

Das Bam-Erdbeben 2003: Präzise Herdparameterbestimmung mit Hilfe der differentiellen Radar-Interferometrie

R. Wang, Y. Xia, H. Grosse, H.-U. Wetzel, H. Kaufmann & J. Zschau

11

During the past 10 to 15 years, space geodesy has experienced revolutionary improvements. Especially, since D-InSAR (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar) and continuous GPS (Global Positioning System) monitoring became more frequently used, crust deformation due to earthquakes can be measured with millimeter accuracy. In case of the 2003 Bam earthquake, high-quality D-InSAR interferograms were available for several thousand square kilometres around the epicentral area. The derived displacement data provided strong constraints on the source parameters. The right-lateral surface (or near-surface) ruptures could be clearly detected by using a Sobel-Edge-Filter (a kind of high-pass) on the surface displacement data. The rupture trace can be located with an accuracy of about 100 m. The total rupture length was estimated to be about 24 km. The slip distribution on the rupture plane was derived using a new inversion method, which is more efficient and stable in comparison with the commonly used least-squares method. The results show that more than 80 per cent of the seismic energy was released from its southern segment of 12 to 14 km size. The maximum slip exceeds 200 cm which is unusually large for such small rupture length. In particular, others than initially expected, the earthquake did not occur at the known Bam fault, but 4 to 5 km west from it, indicating that the 2003 Bam earthquake ruptured a hidden fault or new fault and that in this rupture process an unusually strong asperity was involved.

Zusammenfassung

In den letzten 10 bis 15 Jahren hat die Satellitengeodäsie revolutionäre Fortschritte gemacht. Insbesondere dank der D-InSAR- (Differential-Interferometric-Synthetic-Aperture-Radar) und der kontinuierlichen GPS-Messtechnik (Global Positioning System) kann die durch Erdbeben verursachte Krustendeformation millimetergenau gemessen werden. Im Fall des Bam-Erdbebens vom Dezember 2003 zum Beispiel standen die D-InSAR-Interferogramme in sehr hoher Qualität vom gesamten Herdgebiet zur Verfügung. Die daraus abgeleiteten Bodenverschiebungsdaten liefern wichtige Information über die Herdparameter des Bebens. Durch die Sobel-Edge-Filterung (eine Art Hochpass-Filter) der Verschiebungsdaten konnten rechtslaterale Verwerfungsspuren an der Oberfläche (oder nahe Oberfläche) deutlich identifiziert und mit einer Auflösung von

± 100 m lokalisiert werden. Die Gesamtlänge der Verwerfung wurde mit etwa 24 km abgeschätzt. Die Versatzverteilung auf der Bruchfläche wurde mit einer neuen Inversionsmethode abgeleitet, die sich als effizienter und stabiler als die bisher übliche Methode der kleinsten Quadrate erweist. Die Ergebnisse zeigen, dass mehr als 80 % der seismischen Energie aus einem südlichen Verwerfungsstück mit einer Länge von 12 bis 14 km abgestrahlt wurde. Der größte Versatz an der Herdfläche erreicht über 200 cm und ist ungewöhnlich hoch für solch eine relativ kleine Herdfläche. Interessanterweise ereignete sich das Bam-Erdbeben 2003 nicht, wie erwartet, auf der bekannten Bam-Verwerfung, die an dem östlichen Stadtrand vorbei läuft, sondern 4 bis 5 km westlich davon. Daraus folgt, daß das Bam-Erdbeben eine unbekannte Verwerfung aktiviert oder eine neue Verwerfung generiert und eine ungewöhnlich starke Asperity durchbrochen hat.



Abb. 1: Die historische Zitadelle vor und nach dem Erdbeben von Bam, 26. 12. 2003 (Fotos: <http://www.mcah.columbia.edu/bam/>)

The historical Citadel before and after the Bam earthquake of Dec. 26, 2003

Einführung

Am 26. Dezember 2003 geschah in der Provinz Kerman im Südosten Irans ein zerstörerisches Erdbeben der Magnitude Mw 6,5. Am stärksten war die am Rand des Hochlandes vom Iran und der Wüste Dasht-e-Lut gelegene Stadt Bam betroffen. Der historische Stadtteil um die Zitadelle (Abb. 1), vor etwa 2.000 Jahren aus Lehmziegeln erbaut, wurde vollständig zerstört. Nach offiziellen Angaben kamen mehr als 40.000 Menschen ums Leben, etwa 50.000 wurden verletzt und 100.000 obdachlos (Zaré, 2004).

Bam liegt direkt an einer Störungszone, der auf Abb. 2 dargestellten rechtslateralen Bam-Verwerfung, die aber mit hoher Wahrscheinlichkeit in den letzten 2.000 Jahren nicht stark seismisch aktiv war. Als einzige seismisch aktive Störung in der Bam-Region wurde bisher die Gowk-Verwerfung betrachtet (Ambraseys & Melville, 1982; Walker & Jackson, 2002), eine ebenfalls rechtslaterale Blattverschiebung mit Aufschiebungsanteilen, die etwa 40 km westlich an Bam vorbei läuft (Abb. 2). Die aktive Sefidabeh-Störung ist mit mehr als 200 km Entfernung noch weiter entfernt. Das betrachtete Bebengebiet liegt am südöstlichen Rand des Zagrosgebirges. Dieses Gebirge ist der südliche Teil des alpinen Gebirgsbildungsprozesses und dehnt sich von der türkischen Grenze 1.600 km südostwärts bis zur Wüste Lut aus. Es ist eine der jüngsten und aktivsten kontinentalen Kollisionszonen, die durch

die Konvergenz der Arabischen und Eurasischen Platten entstanden ist. Im Zagrosgebirge nahe der Küste zum Persischen Golf beträgt die Konvergenzrate etwa 4 cm/a, wird aber nach Nord-Nordost und Ost-Südost geringer (Berberian et al., 2001). Neuere Messungen z. B. von Vernant et al. (2004) ergeben kleinere Raten von etwa 2 cm/a. Die Gowk- und die Bam-Störung nehmen differentielle Bewegungen von etwa 0,8 cm/a (Vernant et al., 2004) zwischen dem Zentraliranischen Block mit dem Zagrosgebirge und dem Lutblock auf. In der Bam-Region lassen die GPS-Messungen von Nilforoushan et al. (2003) eine Bewegung von 1,4 cm/a vermuten. Wegen der offensichtlich sehr geringen Seismizität in der Lut-Wüste wird der Lut-Block als ein relativ starrer Block angenommen (Ambraseys and Melville 1982, Berberian et al. 2000).

Analysen von optischen Fernerkundungsaufnahmen (Abb. 2) zeigen, dass die Bam-Verwerfung nördlich von Bam keine einzelne Verwerfung ist, sondern ein Störungssystem von 4 bis 5 km Breite darstellt. Südlich von Bam ist nur eine scharfe Störung zu erkennen, die zwischen Bam und Baravat verläuft und nach Süden auf einer Länge von knapp 150 km verfolgt werden kann. Das Gebiet unmittelbar südlich von Bam ist bis in eine Entfernung von etwa 40 km flächig mit Sedimenten bedeckt, die auch bis in die Stadt und weiter nach Norden vorgedrungen sind. Nördlich der Stadt reicht aber das Anstehende an einigen Stellen bis zur Oberfläche,

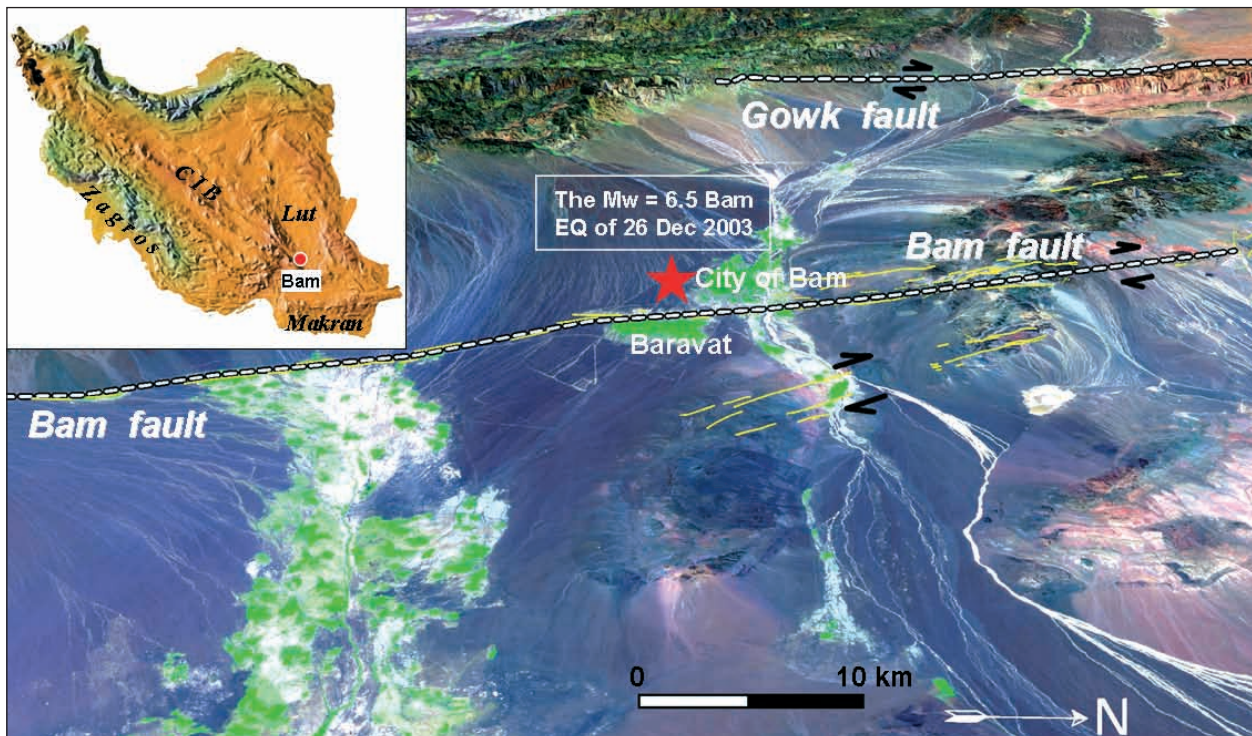


Abb. 2: Fernerkundungsaufnahme vom Iran (Kleinbild) und eine Perspektivansicht vom Osten auf dem Zentralgebiet des Bam-Verwerfungssystems. Gestrichelte weiße Linien sind die Hauptspuren der Bam- und Gowk-Verwerfungen (von Walker & Jackson, 2002; modifiziert). Gelbe Linien sind kleinere Verwerfungszweige im Bam-Gebiet und schwarze Pfeile zeigen die Richtungen der Blattverschiebung an den Verwerfungen, interpretiert von den vorliegenden optischen Fernerkundungsdaten. Die Skala ist nur gültig für den Frontbereich.

Remote sensing image of Iran (inset) and a perspective view from east to the central part of Bam fault system. Dashed white lines are the main traces of Bam and Gowk faults (from Walker & Jackson, 2002; modified). Yellow lines show small fault branches in the Bam area and black arrows indicate the direction of strike-slip movements on the faults, interpreted from the present optical remote sensing data. The scale is only valid for the forefront.

so dass man hier ein komplexeres Störungssystem erkennen kann.

Die Stadt Bam liegt etwa 1.050 m über NN. Nach Hosseini et al. (2004) bildet quartäres Alluvium die geologische Hauptformation in der Stadt. Im östlichen Teil gibt es stellenweise spät-quartäre Ablagerungen (Sandstein und Siltstein). Nur die Zitadelle befand sich auf einem Hügel aus Eruptivgestein (Zaré, 2004). Obwohl der geologische Untergrund von Bam einen hohen Anteil von feinkörnigen Sanden und Schluffen aufweist, soll nach Hosseini et al. (2004) die Gefahr der Bodenverflüssigung wegen des niedrigen Grundwasserspiegels in den meisten Teilen der Stadt gering sein.

Die seismisch aktivste Störungszone in der betrachteten Region ist die Gowk-Verwerfung. Seit 1981 fanden dort fünf starke Erdbeben mit Magnituden von Mw 5,5 bis 7,1 statt, aber alle in einem Abstand von mehr als 100 km von Bam entfernt. Im Vergleich zu anderen Störungssystemen in diesem Gebiet ist die Bam-Störung verhältnismäßig klein. Es gibt keine Berichte von historischen Erdbeben, die mit der Bam-Störung in Verbindung stehen könnten. Da aber nur Daten von starken Erdbeben von größerer Epizentraldistanz für die Abschätzung der seismischen Gefährdung der Bam-Region zur Verfügung stehen, sind die zu erwartenden maximalen seismischen Bodenbeschleunigungen von 2,5 bis 3,0 m/s² in einer Wiederholungsperiode von 75 Jahren (Tavakoli & Ghafroori-Ashtiany, 1999) stark unterschätzt worden. Während des Bam-Bebens sind im Epizentralgebiet in beiden horizontalen Achsen und in vertikaler Richtung 7,0 bis 10,0 m/s² gemessen worden (Hosseini et al., 2004).

Als Herdmechanismus für das Bam-Erdbeben wurde vom US Geological Service (USGS), der Harvard University, dem International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) im Iran fast rechtslaterale Blattverschiebungen angegeben, aber die berechneten Epizentren differierten stark. Die genauesten Bestimmungen des Epizentrums kamen vom USGS und IIEES, beide mit einer Genauigkeit von etwa 10 km. Tatar et al. (2004) lokalisierte Nachbeben im Ostteil von Bam nahe der bekannten Bam-Störung in einer Tiefe von 9 bis 20 km. Aus der Nachbebenverteilung schätzten diese Autoren eine Bruchlänge des Hauptbebens von ungefähr 18 km ab.

Die differentielle Radar-Interferometrie erlaubt die Berechnung hochgenauer co-seismischer Deformationen, die weiterfolgend für eine präzise Bestimmung von Herdparametern genutzt werden können (s. z. B. Feigl et al., 1995). Der erste erfolgreiche Versuch der Bestimmung des Deformationsfeldes nach einem Erdbeben gelang Massonet et al. (1993) für das Landers-Erdbeben 1992 in Kalifornien, USA. Seitdem wird diese Technik für weitere dutzende Beben weltweit mit hervorhangenden Ergebnissen angewendet (z. B. Wright, 2002). Neben der Herdflächenlösung gehören die Bruchlänge und insbesondere ihre Lage zu den wichtigsten Herdparametern eines Erdbebens. Die letzteren sind zwar sehr wichtig für die Risikoabschätzung und vor allem das Katastrophenmanagement, aber meistens durch teleseismische Methode nicht so ge-

nau bestimmbar. Das Problem kann nun im günstigen Fall durch die D-InSAR-Methode gelöst werden.

Für das Bam-Erdbeben wurde auf der Grundlage der ENVISAT-ASAR-Interferogramme aus der absteigenden (descending) Bahn (d. h. Satellit fliegt vom Norden nach Süden über das Untersuchungsgebiet) von Talebian et al. (2004) ein vorläufiges Herdmodell aufgestellt. Hier werden Interferogramme sowohl aus der absteigenden als auch aus der aufsteigenden (ascending) Bahn verwendet und für die Bestimmung der Herdparameter mit Hilfe einer neu entwickelten Inversionstechnik genutzt. Die Ergebnisse wurden vor kurzem veröffentlicht (s. Wang et al., 2004).

Datenaufbereitung für die SAR-Interferometrie

Das Gebiet um Bam ist wegen seines ariden Charakters weitgehend vegetationsfrei und deshalb sehr gut für die Anwendung der InSAR-Technik zur Messung der Oberflächendeformation geeignet. Die Europäische Raumfahrtgesellschaft (ESA) stellte uns jeweils drei ab- und aufsteigende ASAR-Datensätze zu unterschiedlichen Zeitpunkten, darunter je drei Datensätze vor bzw. nach dem Beben aufgenommen, zur Verfügung. Durch die kombinierte Auswertung dieser Datensätze ist es möglich, die Änderung der Geländehöhen und damit die Oberflächendeformation durch das Beben zu berechnen. Details über die SAR-Interferometrie und ihre Anwendungen in Geowissenschaften sind im Beitrag „D-INSAR-Forschung“ von Xia und Kaufmann in diesem Band zu lesen.

Obwohl das Zeitintervall zwischen den Messungen vor dem Beben ein halbes Jahr beträgt, ist die Kohärenz um Bam sehr hoch und die Interferenzringe sind sehr deutlich. Das Problem bei der Datenaufbereitung ist die Ungenauigkeit der Bahnparameter vom ENVISAT. Xia et al. (2003) entwickelten deshalb eine Methode, die Fehler durch die ungenauen Bahnparameter in den Interferogrammen abzuschätzen und zu korrigieren.

Die differentiellen SAR-Interferogramme in Abb. 3 zeigen die statische Bodendeformation des Bam-Erdbebens in der Sichtachse jeweils zur ab- (3a) und aufsteigenden Satellitenbahn (3b). Jede Farbperiode entspricht eine Verschiebung von 2,8 cm (zunehmend in der Reihenfolge grün-rot-blau). Beide Interferogramme wurden mit einem digitalen Höhenmodell, abgeleitet aus optischen Fernerkundungsdaten, geokodiert. Im Falle der absteigenden Satellitenbahn beträgt die maximale Hebung in Richtung der Sichtachse etwa 30 cm und befindet sich am Ort (28,981° N, 58,381° O) ± 100 m. Die maximale Senkung kann nicht so genau lokalisiert werden. Sie befindet sich etwa 18 km nördlich von der maximalen Hebung und beträgt etwa 18 cm.

Bestimmung der Herdparameter aus den D-InSAR Daten

Der ENVISAT-Satellit flog über das Untersuchungsgebiet Bam in einer Höhe von etwa 800 km in Richtung S10°W

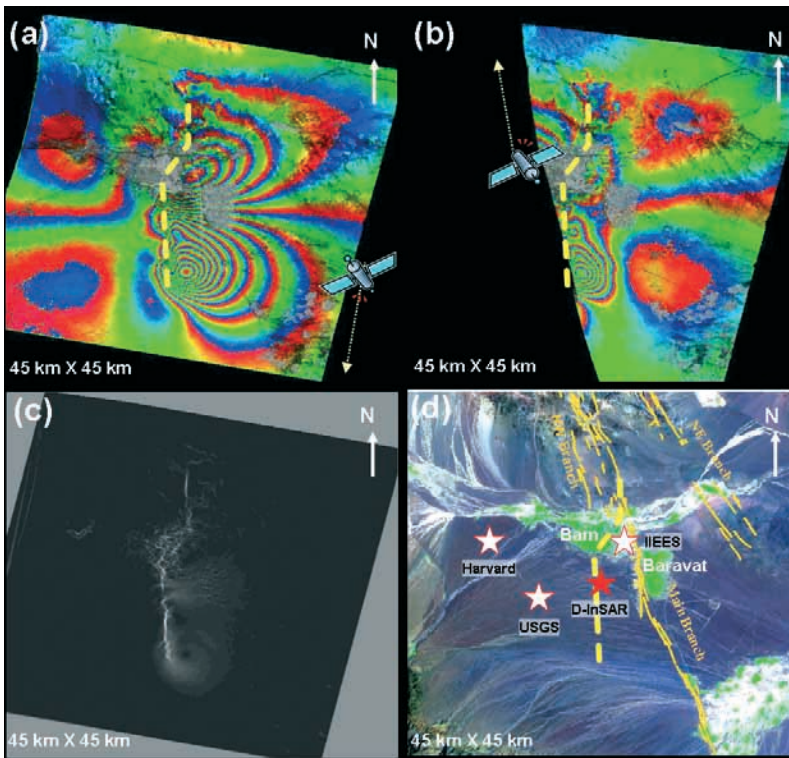


Abb. 3: Differentielle ENVISAT-ASAR-Interferogramme (geokodiert), generiert jeweils vom Datenpaar (a) aus der absteigenden Bahn 9192 am 3. Dezember 2003 und 9693 am 7. Januar 2004 und (b) aus der aufsteigenden Bahn 8956 am 16. November 2003 und 10 459 am 29. Februar 2004. Jede Farbperiode repräsentiert 2,8 cm Bodenverschiebung (zunehmend in der Reihenfolge grün-rot-blau) in der LOS-Richtung (entlang der Sichtachse zum Satelliten). (c) die Verwerfungsspuren des Bam-Erdbebens, detektiert aus den Sobel-Edge gefilterten LOS-Verschiebungen zur absteigenden Bahn, und (d) die vereinfachten Verwerfungssegmente (gestrichelte dicke gelbe Linie), gezeichnet in das optische Fernerkundungsbild. Der gefüllte rote Stern markiert die Position (29,052° N, 58,365° O), wo der Versatz möglicherweise in der Tiefe von 2 bis 4 km das Maximum von mindestens 200 cm erreicht hat. Ungefüllte rote Sterne markieren einige teleseismisch bestimmte Epizentren.

Differential ENVISAT ASAR interferograms (geo-coded) generated (a) from the data pair of descending orbit 9192 and 9693, acquired on 2003 December 3 and 2004 January 7, respectively, and (b) from the data pair of ascending orbit 8956 and 10 459, acquired on 2003 November 16 and 2004 February 29, respectively. Each fringe step represents a ground displacement of 2.8 cm (increasing with the colour sequence green-red-blue) in the LOS (line of sight) direction to the satellite. (c) the fault trace of the Bam earthquake detected from the Sobel-Edge filtered descending LOS displacements, and (d) the simplified fault segments (dotted thick yellow line) drawn on the optical remote sensing image. Red star is the location at (29.052° N, 58.365° E), where the slip possibly reached the maximum of at least 200 cm at a depth of about 2 to 4 km. Unfilled red stars mark a few teleseismic locations of the epicentre.

bei der absteigenden und N10°W bei der aufsteigenden Bahn. Seine Radar-Antenne ist mit 23° (67° Elevation) von der Lotrichtung nach rechts auf die Erdoberfläche gerichtet. Im lokalen kartesischen Koordinatensystem, dessen drei Achsen jeweils nach Osten, nach Norden und nach oben zeigen, hat die Sichtachse (LOS) zum ENVISAT die Richtungskosinusse (0,38, -0,07, 0,92) und (-0,38, -0,07, 0,92) während der ab- bzw. aufsteigenden Bahn.

Abb. 4 erklärt, wie die Bodenverformung des Bam-Erdbebens vom ENVISAT aus den zwei unterschiedlichen Flugrichtungen wahrgenommen wurde. In dieser Simulation ist die vom USGS anhand teleseismischer Daten bestimmte Herdflächenlösung, die die Streich-, die Neigungs- und die Versatzrichtung der Bruchfläche angibt, zur Berechnung der Bodenverformung übernommen worden. Es ist zu erkennen, daß das simulierte LOS-Verschiebungsfeld mit dem aus den D-InSAR-Daten abgeleiteten ungefähr übereinstimmt und damit die NS gerichtete rechtslaterale Blattverschiebung als Herdmechanismus für das Bam-Erdbeben bestätigt. Aber die Differenzen zwischen den modellierten und den beobachteten Daten insbesondere für das LOS-Verschiebungsfeld aus der aufsteigenden Bahn sind an vielen Stellen noch deutlich zu sehen. Eine weitere Interpretation dieser Differenzen wird zu einem genaueren Herdmodell führen, als das aus den teleseismischen Daten stammende.

Katastrophale Erdbeben wie im Fall Bam haben oft eine geringe Herdtiefe. Bei solchen Erdbeben ist zu erwarten, dass ihre Brüche durch Diskontinuitäten oder starke Gradienten, falls sie im Untergrund verdeckt sind, im Verschiebungsfeld und deshalb auch in den D-InSAR-Interferogrammen zu erkennen sind. Aus diesem Grund wurden die LOS-Verschiebungsdaten aus der absteigenden Bahn, die das ganze Herdgebiet vollständig überdecken und von sehr hoher Qualität sind, mit einem Sobel-Edge-Filter (Differenzierungsfilter) behandelt. Von den gefilterten Daten sind die Spuren des Bebens an der Oberfläche deutlich zu identifizieren. Sie bestehen ungefähr aus drei geraden Segmenten. Das südliche Segment ist 12 bis 14 km lang und verläuft von (28,971° N, 58,357° O) bis (29,088° N, 58,351° O); Das nördliche Stück von (29,126° N, 58,382° O) bis (29,178° N, 58,382° O) ist 5 bis 6 km lang. Das mittlere Stück scheint unter dem zerstörten Stadtgebiet zu verlaufen und konnte wegen zu geringer Kohärenz nicht eindeutig verfolgt werden. In den folgenden Modellrechnungen wird angenommen, daß die gesamte Verwerfung nicht unterbrochen ist. So wird das mittlere Segment durch eine direkte Verbindungslinie von etwa 5 km Länge zwischen dem nördlichen und dem südlichen Segment modelliert (vgl. Abb. 3). Auf dem optischen Fernerkundungsbild ist klar zu sehen, dass das Hauptsegment der Verwerfung nicht auf der bekannten Bam-Verwerfung, sondern 4 bis 5 km westlich davon liegt.

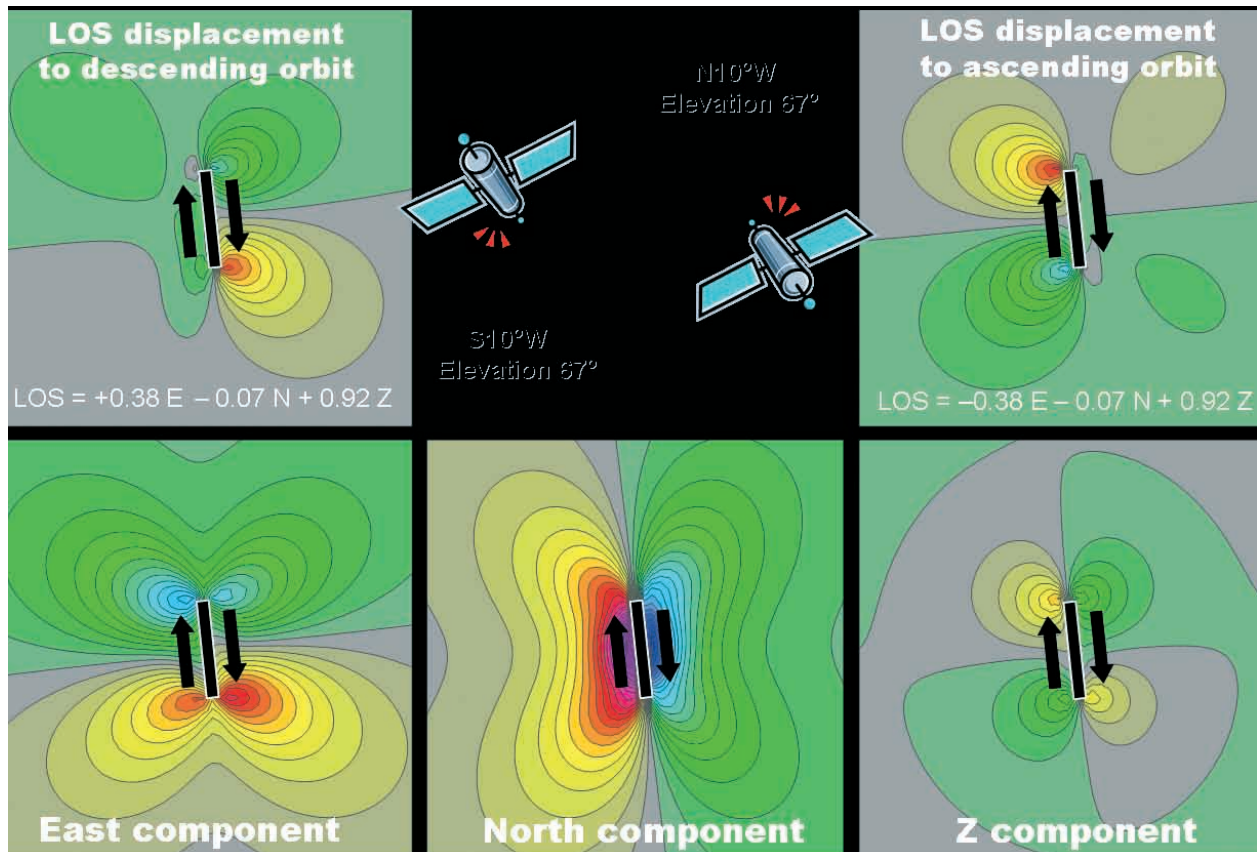


Abb. 4: Berechnete Bodenverformungen für ein vereinfachtes Herdmodell des Bam-Erdbebens. Die verwendete Bruchfläche ist 12 km x 12 km mit der Oberkante in einer Tiefe von 0,5 km. Ein homogener Versatz von 210 cm wurde angenommen. Der Herdmechanismus ist von der teleseismischen Lösung des USGS übernommen: Streichen = 174°, Neigung = 88° und Versatz = 178°. Das Intervall der Konturlinien ist 2,8 cm (grün-blau für negativ und gelb-rot für positiv).

Different displacement components calculated for a simplified source model of the Bam earthquake. The rupture area used is 12 km x 12 km with the upper edge at 0.5 km below the surface. A uniform slip of 210 cm is assumed, and the focal mechanism is adopted from the teleseismic solution provided by USGS: strike = 174°, dip = 88° and rake = 178°. The contour interval is 2.8 cm (green-blue for negative and yellow-red for positive).

Die Bruchfläche des Erdbebens wurde deshalb durch drei Rechtecke repräsentiert, die vom Süden nach Norden die Länge und die Streichrichtung von jeweils (14,0 km, 357°), (4,6 km, 35°) und (7,5 km, 0°) haben. Um die Neigung der Bruchfläche und ihre untere Grenze in der Tiefe zu bestimmen, wurde zunächst ein konstanter Versatz an dem jeweiligen rechteckigen Segment angenommen. Durch eine Reihe von Vorwärtsmodellierungen (Rastersuche) mit Hilfe der elastischen Dislokationstheorie fanden wir, daß sich das südliche und das mittlere Segment mit 75° bis 80° nach Osten und das nördliche Segment dagegen mit etwa 55° nach Westen neigen.

Im nächsten Schritt wurde beim Festhalten der Bruchflächegeometrie die inhomogene Verteilung des Versatzes aus den beiden ENVISAT-ASAR-Interferogrammen invertiert. Um den Rechenaufwand zu minimieren, wurden die D-InSAR-Daten von der ursprünglichen räumlichen Auflösung von etwa 85 m x 85 m auf 430 m x 430 m gefiltert. Die gefilterten Daten umfassen insgesamt 8.976 und 5.781 Verschiebungswerte aus der ab- bzw. aufsteigenden Bahn. Mit einer vergleichbaren Auflösung wurde die Bruchfläche durch 1.405 diskrete Punktquellen dargestellt. Jede Punktquelle ist durch einen Versatzvektor definiert,

der zwei Komponenten entlang der Streich- bzw. Neigungsrichtung hat. Es soll diejenige Versatzverteilung ausgesucht werden, die die beobachteten Daten optimal reproduziert.

Häufig wird die Methode der kleinsten Quadrate (LS = Least Square-Methode) zur Inversion der Versatzverteilung angewendet. In dem vorliegenden Fall ist die LS-Methode wegen der großen Menge von Daten und Variablen rechnerisch sehr aufwendig. Außerdem ist bei dieser Methode nicht garantiert, dass das Ergebnis, also das quantitative Versatzmodell, nicht nur die Daten reproduziert, sondern sich auch als physikalisch stabil und plausibel erweist. Die Ursache liegt darin, daß es schwer ist vorher abzuschätzen, wie fein sich die Versatzverteilung in der Tiefe aus den statischen Deformationsdaten auflösen lässt. In der Regel erhält man ein stabiles Versatzmodell, wenn die Bruchfläche sehr grob vernetzt wird, d. h., nur wenige zu invertierende Punktquellen zulässt. Dadurch würden aber nicht alle nützlichen Informationen aus den Daten ausgeschöpft. Umgekehrt führt eine zu hohe Auflösung der Bruchfläche oft zu einem Versatzmodell, das zwar die Daten bestmöglich reproduziert, aber unrealistisch starke kurzweilige Variationen enthält. In der Praxis

muss eine geeignete Vernetzungsdichte der Bruchfläche ausprobiert werden. Üblicherweise wird der flachere Bereich feiner vernetzt als der tiefere. Zusätzlich müssen häufig empirische Einschränkungen, wie die Begrenzung des Versatzwertes und der Versatzrichtung sowie die Glättung der Versatzverteilung in dem Inversionsverfahren berücksichtigt werden. Das Ergebnis hängt oft von solchen künstlichen Einschränkungen ab.

Um diese Nachteile zu überwinden, haben wir eine neue SA-Methode (Successive Approximation) entwickelt. In dieser Methode wird zuerst eine Empfindlichkeitsverteilung $\Delta R/\Delta U$ berechnet, wobei ΔR den maximal reproduzierbaren Anteil der beobachteten Oberflächendeformation durch eine einzelne Punktquelle an der gleichen Stelle und ΔU den dafür notwendigen Versatzwert der Punktquelle definiert. Es wird dann angenommen, dass die tatsächliche Versatzverteilung näherungsweise mit der Empfindlichkeitsverteilung linear korreliert. Der Korrelationskoeffizient, der die absolute Versatzmagnitude bestimmt, wird durch die Anpassung zwischen der berechneten und der beobachteten Oberflächendeformation nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate bestimmt. Wenn das residuale Deformationsfeld unter dem zu erwartenden Fehlerniveau sinkt, wird die Inversion erfolgreich beendet. Ansonsten wird die gleiche Prozedur an dem residualen Deformationsfeld wiederholt und das Versatzmodell wird Schritt für Schritt korrigiert, bis es unter ein Fehlerniveau sinkt oder sich nicht mehr weiter reduzieren lässt.

Statt tausende diskrete Versatzwerte simultan zu bestimmen, sind hier in jedem iterativen Anpassungsprozeß nur ein oder zwei Korrelationskoeffizienten zu berechnen, je nachdem, ob die Versatzrichtung festgelegt wird. Dadurch ist die SA-Methode viel schneller als die LS-Methode. Abb. 5 zeigt, dass ein stabiles Versatzmodell für

das Bam-Erdbeben schon nach drei Iterationen feststeht. Das endgültige Versatzmodell ist in Abb. 6 gezeigt. Wie bei der SA-Methode zu erwarten, ist die Versatzverteilung im flacheren Bereich deutlich besser aufgelöst als im tieferen Bereich und sie enthält keine künstlichen Oszillationen, trotz der homogenen und sehr feinen Vernetzung der Bruchfläche. Damit hat die neue Methode einen offensichtlichen Vorteil gegenüber der herkömmlichen LS-Methode: Die Versatzverteilung wird automatisch so tiefenabhängig aufgelöst, wie es die Daten erlauben. Zum Beispiel kann die obere Kante der Bruchfläche deutlich genauer bestimmt werden als die untere. Der Herdmechanismus des Erdbebens ist, wie erwartet, durch die rechtslaterale Blattverschiebung dominiert. Der maximale Versatz erreicht über 200 cm und befindet sich im Tiefenbereich zwischen 2 und 4 km nahe dem südlichen Stadtrand von Bam (s. Abb. 3). Die Bruchfläche dehnt sich bis in eine Tiefe von etwa 12 km aus. Die Momentmagnitude (M_w) des Erdbebens ist $6,5 \times 0,1$ und stimmt mit den teleseismischen Abschätzungen gut überein. Die gefundene effektive Bruchfläche (ca. 16 km x 12 km) ist relativ klein für ein Erdbeben dieser Magnitude. Außerdem nimmt der Versatz nahe der Oberfläche sehr stark ab und erreichte wahrscheinlich nur an wenigen Stellen die Erdoberfläche.

In Abb. 7 werden die simulierten mit den beobachteten differentiellen ENVISAT-ASAR-Interferogrammen verglichen. Das Quadratmittel der Residuen beträgt 1,0 cm für das Interferogramm aus der absteigenden Bahn und 1,4 cm für das aus der aufsteigenden Bahn, also unter einem Interferenzring. Die meisten signifikanten Residuen befinden sich im Nahfeldbereich. Sie sind durch die kleinräumigen Unregelmäßigkeiten der Bruchfläche verursacht, die in dem Inversionsverfahren vernachlässigt wurden.

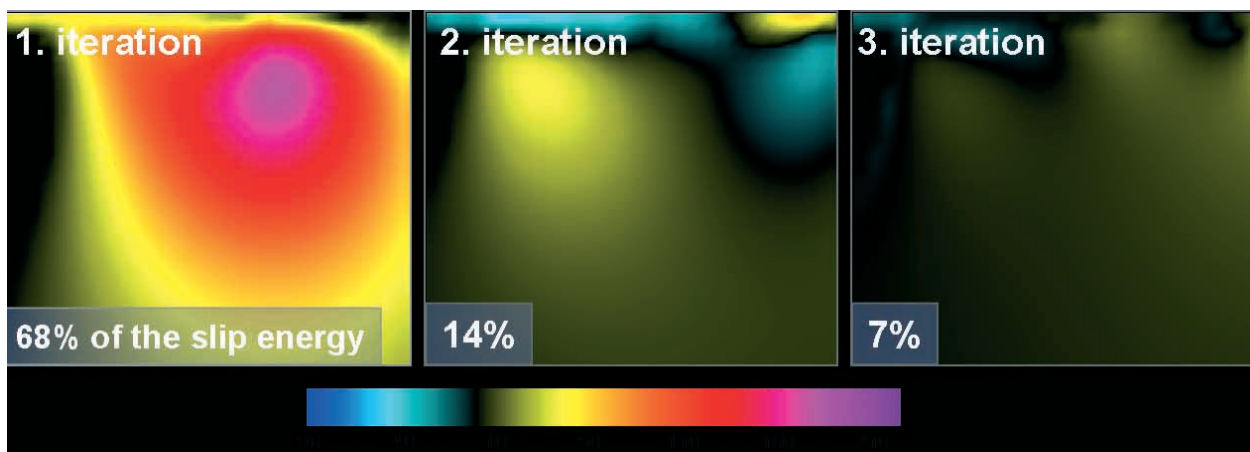


Abb. 5: Iterative Bestimmung der Versatzverteilung auf dem südlichen Bruchsegment (14 km x 12 km) vom Bam-Erdbeben durch die SA-Methode. In der ersten Iteration wird die Versatzverteilung mit der Empfindlichkeit der Punktquellen auf die beobachteten LOS-Verschiebungen korreliert und der Korrelationskoeffizient durch Anpassung an die D-InSAR-Daten im Sinne der kleinsten Quadrate bestimmt. Beiträge zu der Versatzverteilung aus den folgenden Iterationen werden analog durch Anpassung an die Residuen aus den vorherigen Iterationen bestimmt.

Iterative determination of the slip distribution on the south rupture segment (14 km x 12 km) of the Bam earthquake using the SA method. In the first iteration, the slip distribution is correlated with the sensitivity of the point sources to the observed LOS displacements, and the correlation coefficient is determined by the least-squares fitting to the D-InSAR data. Contributions to the slip distribution from the following iterations are obtained in a similar way by fitting the residual data remaining from the foregoing iterations.

Diskussion und Schlußfolgerungen

Die differentielle ENVISAT-ASAR-Interferometrie lieferte hochgenaue Daten über die Verformung der Erdoberfläche, die durch das Erdbeben am 26. Dezember in Bam (Südostiran) hervorgerufen wurde. Die Auswertung der Daten ergab eine präzise Bestimmung der Herdparameter des Bebens. Wie für das Bam-Verwerfungssystem erwartet, handelt es sich um eine rechtslaterale Blattverschiebung. Durch die Filterung der Oberflächendeformation mit Hilfe eines Sobel-Edge-Filters fanden wir drei Bruchsegmente, die wir als geometrische Grundlage für die Inversion von den weiteren Parametern der Bruchfläche aus den Deformationsdaten verwendeten. Das Ergebnis zeigt, dass das südliche verdeckte Segment mit mehr als 80 % Anteil am seismischen Moment, etwa 14 km Länge und bis über 200 cm Versatz das wichtigste Segment der aktuellen Bruchfläche ist. Nach Wells & Coppersmith (1994) ist dieser Wert für ein Erdbeben mit Mw 6,5 ungewöhnlich hoch. Daraus resultiert auch der hohe Spannungsabfall von etwa 6 MPa auf diesem Bruchsegment. Das lässt vermuten, dass eine starke Asperity (d. h. eine harte Stelle, an der sich die tektonische Spannung vor dem Beben konzentriert hat) am Bruchprozess beteiligt war. Außerdem lässt der hohe Spannungsabfall auf eine hohe seismische Energieabstrahlung schließen, die in Verbindung mit den alluvialen Sedimenten zu den starken Schäden im Stadtgebiet geführt hat.

Die Ortung der Bruchfläche ist auf etwa ± 100 m genau. Ihre NS-Streichrichtung entspricht der Richtung der bekannten Bam-Verwerfung, differiert aber südlich der Stadt bezüglich ihrer Lage beträchtlich. Das gefundene Ergebnis zeigt, daß das Bam-Erdbeben 4 bis 5 km westlich der bekannten Bam-Verwerfung eine verdeckte Störung aktiviert oder eine neue erzeugt hat. Die Analyse der optischen Fernerkundungsdaten der Region nördlich von Bam weisen darauf hin, daß es eine südliche Verlängerung des Westteils des Bam-Störungssystems gibt, die mit dem Beben seismisch aktiv wurde.

Die Existenz der drei Bruchsegmente bedeutet scheinbar einen Sprung der Bruchfläche unter der Stadt um etwa 4 km nach rechts. Wie man aber aus der Tiefenverteilung der Dislokation sieht, ist das nördliche Segment nur ganz flach, etwa bis 1 km durchgebrochen. Wir nehmen an, dass dieser Bruch sekundär infolge des Bebens entstanden ist und als aktiver Bruch sehr wenig Energie abgestrahlt hat. Deshalb ist auch bei der Bestimmung der Herdmechanismen der Nachbeben (Tartar et al., 2004) zwischen dem nördlichen und südlichen Segment kein Abschiebungsme-

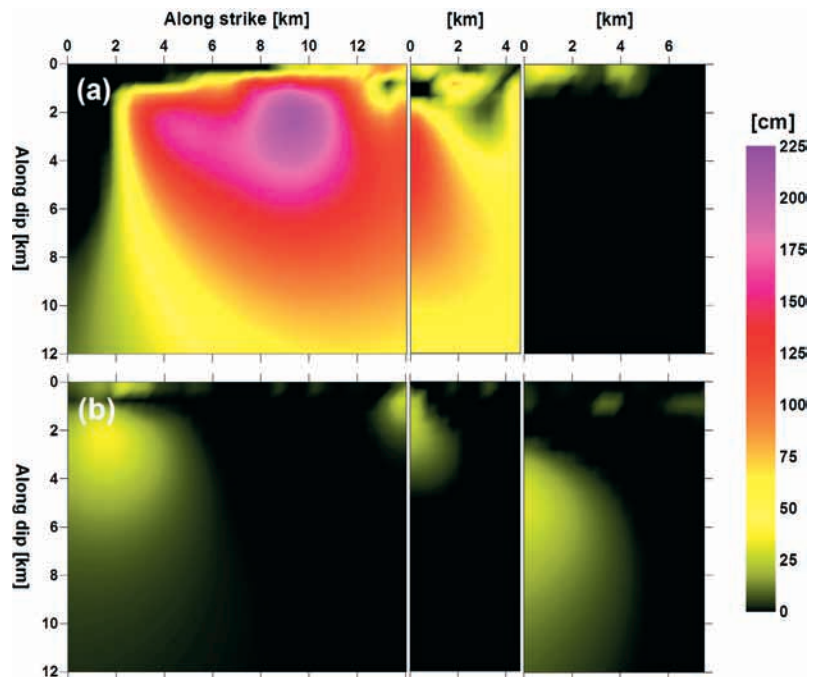


Abb. 6: Das Versatzmodell für das 2003 Bam-Erdbeben, abgeleitet aus den D-InSAR Daten mit der SA-Methode: **(a)** die rechtslaterale Blattverschiebungskomponente und **(b)** die Aufschiebungskomponente. Die Bruchfläche besteht aus drei vom Süden nach Norden angeordneten rechteckigen Segmenten von 14,0 km, 4,6 km bzw. 7,5 km Länge. Der maximale Versatz erreicht über 200 cm und befindet sich zwischen 2 und 4 km unter der Oberfläche bei (29,052° N, 58,365° O) nahe dem südlichen Stadtrand von Bam.

The slip model for the 2003 Bam earthquake derived from the D-InSAR data using the SA method: **(a)** the right-lateral strike-slip component and **(b)** the thrust component. The rupture area consists of three rectangular segments of 14.0 km, 4.6 km and 7.5 km length from south to north, respectively. The maximum slip exceeds 200 cm and appears 2 to 4 km below the surface at (29.052° N, 58.365° E) near the southern outskirts of the Bam city.

chanismus gefunden worden, wie er bei dieser Geometrie zu erwarten gewesen wäre. Auch die präzisen Ortungen von Tartar et al. (2004) zeigen in der Stadt Bam und nördlich davon eine deutliche Verbreiterung der Nachbebenaktivität in west-östliche Richtung, was auf eine diffuse Struktur und/oder Spannungsverteilung andeutet. Das mittlere Segment war an der Oberfläche nicht klar erkennbar (Abb. 3c), weist aber in seiner Dislokation und Tiefenerstreckung (Abb. 6) beträchtliche Werte auf. Im oberflächennahen Bereich ist die Dislokation jedoch relativ klein. Je tiefer man kommt, desto größer werden aufgrund des statischen Verfahrens die Unsicherheiten der Ergebnisse. Ebenfalls sind für dieses Gebiet die Messdaten durch die Zerstörungen in der Stadt möglicherweise verfälscht. Dadurch lässt sich das nördliche Ende des südlichen Segments „nur“ mit einer Genauigkeit von 1 bis 2 km schätzen. Eine zusätzliche Einführung eines Aufschiebungsssegments 10 km östlich der Hauptbruchfläche durch Talebian et al. (2004) ist für die hier analysierten Interferogramme nicht notwendig und widerspricht auch der Auswertung geodätischer Präzisionsmessungen vor und nach dem Erdbeben (Motagh et al., 2006).

Interessant ist in Abb. 6 auch die sehr scharfe obere Begrenzung des südlichen Segments der Bruchfläche, die

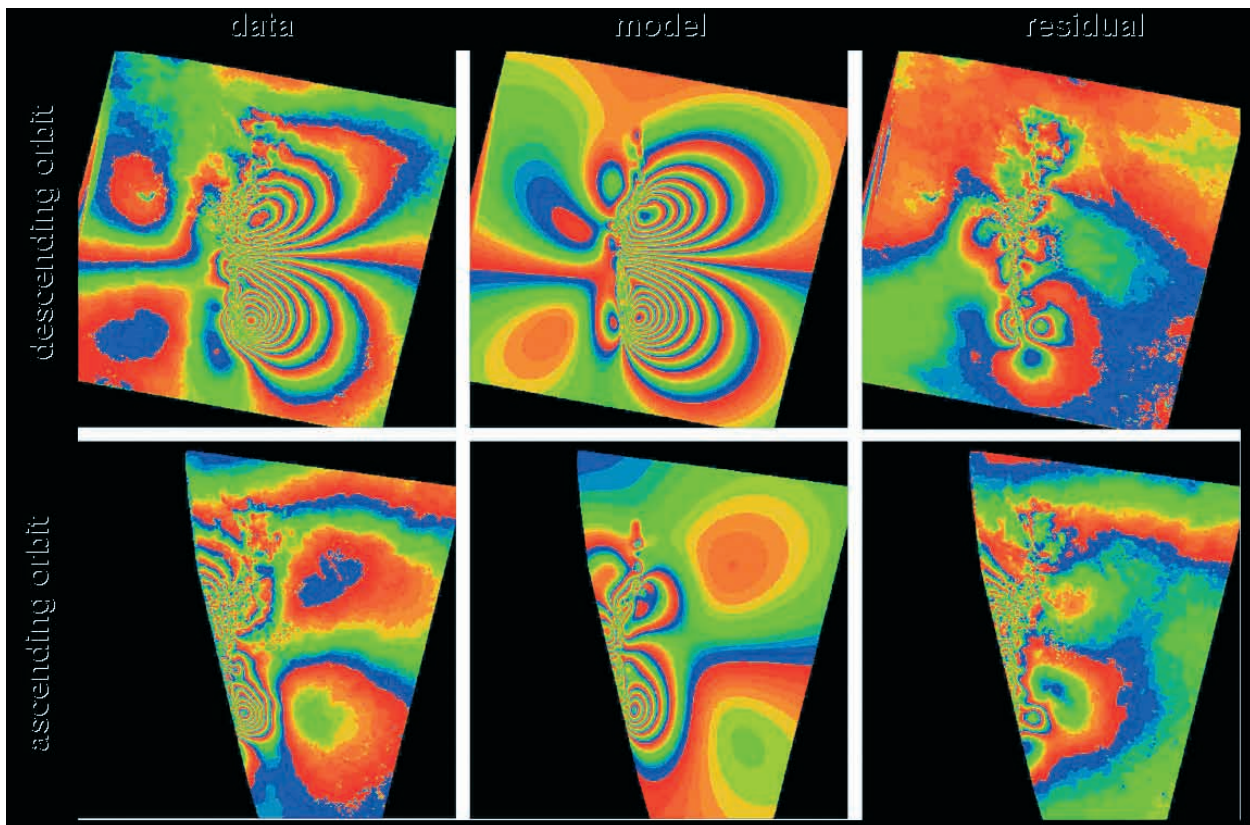


Abb. 7: Vergleich zwischen den simulierten und beobachteten differentiellen ENVISAT-ASAR-Interferogrammen. Comparison between the simulated and observed differential ENVISAT ASAR interferograms.

vom Stadtrand von Bam bis zum Segmentende von 0 auf etwa 1 km abfällt. Nach den gegenwärtigen Erkenntnissen ist gerade für diese geringen Tiefen die D-InSAR Methode sehr genau. Das auffällige Verschiebungsdefizit an der Oberfläche korreliert wahrscheinlich mit der Mächtigkeit der Sedimentschicht (Fialko et al., 2005). Zur Überprüfung dieses Resultats werden deshalb (1) seismische Rauschmessungen (die H/V-Methode von Nakamura, 1989) zur Bestimmung der Sedimentmächtigkeit, (2) ein aktives seismisches Experiment südlich von Bam vorgeschlagen, und (3) müssen im Bedarfsfall 2 bis 3 Bohrungen eine abschließende Klärung herbeiführen.

Literatur

- Ambraseys, N.N., Melville, C.P. (1982): A history of Persian earthquake. Published by the Press Syndicate of the University of Cambridge. The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge CB2 1 RP, 32 East 57th Street, New York, NY 10022, USA, 296 Beaconsfield Parade, Middle Park, Melbourne 3206, Australia. Printed in Great Britain at the University Press, Cambridge, ISBN 0 521 24112 X.
- Berberian, M., Yeats, R.S. (1999): Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian plateau. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 120-139.
- Berberian, M., Jackson, J.A., Qorashi, M., Talebian, M., Khatib, M., Priestley, K. (2000): The 1994 Sefidabeh earthquake in eastern Iran: blind thrusting and bedding-plane slip on a growing anticline, and active tectonics of the Sistan suture zone. *Geophys. J. Int.*, 142, 283-299.
- Berberian, M., Jackson, J.A., Fielding, E., Parsons, B.E., Priestley, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T.J., Baker, C. (2001): The 1998 March 14 Fandoqa earthquake (Mw 6.6) in Kerman province, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrust and the active tectonics of the Gowk fault zone. *Geophys. J. Int.*, 146, 371-398.
- Feigl, K.L., Sergent, A., Jacq, D. (1995): Estimation of an earthquake focal mechanism from a satellite radar interferogram: application to the December 4, 1992 Landers aftershock. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1037-1048.
- Fialko, Y., Sandwell, D., Simons, M., Rosen, P. (2005): Three-dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit. *Nature*, 435, 295-299, doi: 10.1038/nature03425.
- Hosseini, K.A., Mahdaviifar, M. R., Bahshayesh, M.K., Rakhshandeh, M. (2004): Engineering geology and geotechnical aspects of Bam earthquake (preliminary report). <http://www.emsc-csem.org/>.
- Massonet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., Rabautte, T. (1993): The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364, 138-142.
- Motagh, M., Klotz, J., Tavakoli, F., Djamour, Y., Arabi, S., Wetzel, H.-U., Zschau, J. (2006): Combination of precise leveling and InSAR data to constrain source parameters of the Mw = 6.5, 26 December 2003 Bam earthquake. *Pure appl. Geophys.*, in press.
- Nakamura, Y. (1989): A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface, *Q. Rept. RTRI Japan*, 30, 25-33.
- Nilforoushan, F., Masson, F., Vernant, P., Vigny, C., Martinod, J., Abbassi, M., Nankali, H., Hatzfeld, D., Bayer, R., Tavakoli, F., Astiani, A., Doerflinger, E., Daignieres, M., Collard, P., Chery, J. (2003): GPS network monitoring the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran, *Journal of Geodesy*, 77, 411-422.
- Talebian, M., Fielding, E.J., Funning, G.J., Ghorashi, M., Jackson, J., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Rosen, P.A., Walker, R., Wright, T. (2004): The 2003 Bam (Iran) earthquake: rupture of a blind strike-slip fault. *Geophys. Res. Lett.*, 31, doi:10.1029/2004GL020058.
- Tartar, M., Hatzfeld, D., Moradi, A.S., Paul, A., Farahbod, A.M., Mokhari, M. (2004): Aftershocks study of the 26 December 2003 Bam earthquake. *JSEE Special Issue on Bam Earthquake*, 5 (6) & 6 (1), 23-33.
- Tavakoli, B., Ghafory-Ashtiani, M. (1999): Seismic hazard assessment of Iran. *Annali di Geofisica*, 42, 1013-1021.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chéry, J. (2004): Contemporary crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman. *Geophys. J. Int.*, 157, 381-398.
- Walker, R., Jackson, J. (2002): Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike-slip system. *Journal of Structural Geology*, 24, 1677-1698.

Wang, R., Xia, Y., Grosser, H., Wetzel, H.-U., Kaufmann, H., Zschau, J. (2004): The Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite interferometry. *Geophys. J. Int.*, 159, 917-922.

Wells, D.L., Coppersmith, K.J. (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 974-1002.

Wright, T.J. (2002): Remote monitoring of the earthquake cycle using satellite radar interferometry. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 360, 2873-2888.

Xia, Y., Michel, G.W., Reigber, Ch., Klotz, J., Kaufmann, H. (2003): Seismic unloading and loading in northern central Chile as observed by differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) and GPS. *Int. J. Remote Sensing*, 24, 4374-4391.

Zaré, M. (2004): Bam (SE Iran) earthquake of 26 December 2003, Mw 6.5: A preliminary seismological overview. *Orfeus Newsletter*, 6, 14pp.

Zaré, M., Hamzehloo, H. (2004): A study of the strong ground motions of 26 December 2003 Bam earthquake: Mw6.5. *JSEE Special Issue on Bam Earthquake*, 5 (6) & 6 (1), 33-56.

