

Bestimmung der Erdoberflächenbewegung mittels Radarinterferometrie nahe der Agua Blanca Störung, Baja California

ANIKA RIEDEL¹, BJÖRN RIEDEL¹, CHRISTINE SCHOTTMÜLLER¹,
WOLFGANG NIEMEIER¹ & MARKUS GERKE¹

Zusammenfassung: Das BMBF-geförderte ECOAQUA Projekt untersucht die Folgen der bio-ökonomischen Ausbeutung von Grundwassersystemen in ariden Küstengebieten und analysiert die beteiligten Prozesse und ihre Wechselwirkungen. Das Untersuchungsgebiet umfasst die Stadt Ensenada, Baja California, Mexiko mit ihren umliegenden Tälern. Die extensive Grundwasserentnahme führt zu Salzwasserintrusionen an der Pazifikküste und damit zur Verschlechterung der Wasserqualität im Grundwasserleiter.

Dieser Beitrag stellt die aus radarinterferometrischen Beobachtungen abgeleiteten Oberflächenbewegungen nahe der Agua Blanca Störung, südlich von Ensenada vor. Die Bewegungsraten dienen als ein Parametersatz für ein Vorhersagemodell, das zukünftige Veränderungen des Küstenökosystems beschreibt und mögliche Risiken abschätzt.

Das Untersuchungsgebiet hat eine Größe von 670 km² und umfasst Bergketten mit Höhen bis 1000 m, kleine Ortschaften und landwirtschaftlich genutzte Täler. Zur Auswertung wurden Radaraufnahmen aus Envisat im auf- und absteigenden Bahnbogen ausgewertet. Der aufsteigende Bahnbogen umfasst die Jahre 2005 bis 2010 mit 20 Aufnahmen und der absteigende Bahnbogen liefert 45 Bilder der Jahre 2003 bis 2010. Des Weiteren wird die Zeitreihe mit Sentinel-1 Daten aus drei Jahren ergänzt. Die Daten wurden mit der Persistent Scatterer Interferometry (PSI) und Small Baseline Subset (SBAS) Methode bearbeitet.

Die PSI Auswertung zeigt keine zufriedenstellenden Ergebnisse, weil die Methode in den ländlichen Gebieten zu wenige permanente Rückstreuer über die Zeit nutzen kann. Im Gegensatz zur PSI Methode zeigen die SBAS Auswertungen auf den pliozänen Konglomeraten im Maneadero Tal und am San Tomas Bach Bewegungen, die vermutlich durch Erosions- und Ablagerungsprozesse aus Starkregenereignisse in den Wintermonaten verursacht wurden. Im Maneadero Tal sind punktuelle Bewegungen, vermutlich durch den Bau von Regenrückhaltebecken und Gewächshäusern, erkennbar.

Die Bewegungen der Agua Blanca Störung werden mit $4,5 \pm 1,4$ mm/a für den aufsteigenden Bahnbogen und $4,1 \pm 1,3$ mm/a für den absteigenden Bahnbogen in Schrägentfernungsgeometrie berechnet. ROCKWELL et al. (1993) bestimmt für die letzten 28.000 a Bewegungen von 4,1 mm/a an der Störung. DIXON et al. (2002) bestimmt aus relativen GPS Messungen eine Differenz über die Agua Blanca Störung von 2,5 mm/a und aus Modellrechnungen 6,2 mm/a. Die hier ermittelten Bewegungsraten stimmen in der Größenordnung mit den Literaturwerten überein.

1 Einleitung

Das Projekt ECOAQUA setzt sich mit den Folgen der bio-ökonomischen Ausbeutung von Grundwassersystemen in ariden Küstengebieten auseinander, um die Prozesse und ihre Wechselwirkungen besser verstehen zu können, ein Modell zu entwickeln um zukünftige Veränderun-

¹ Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, TU Braunschweig, Bienroder Weg 81, D-38106 Braunschweig, E-Mail: [a.riedel, b.riedel, c.schottmueller, w.niemeier, m.gerke]@tu-braunschweig.de

gen des Küstenökosystems vorherzusagen und mögliche Risiken besser abschätzen zu können (NIEMEIER et al. 2015). Dieser Beitrag liefert einen Überblick über die Georisiken in dem Gebiet. Das zu untersuchende Gebiet in Mexiko umfasst Bergketten, kleine Ortschaften und landwirtschaftlich genutzte Täler. In den Tälern besteht auf Grund der landwirtschaftlichen Nutzung und der wachsende Industrie- und Tourismusbranche ein erhöhter Wasserbedarf. Das Wasser wird aus grundwassergespeisten Brunnen bezogen und führt zur Ausbeutung der Aquifere (NIEMEIER et al. 2015). Die Übernutzung des Grundwassers scheint zu Salzwasserintrusionen am Pazifik und zur Verschlechterung der Wasserqualität im Grundwasserleiter zu führen (DAESSLÈ et al. 2014). Das Untersuchungsgebiet, siehe Abb. 1, befindet sich ca. 100 km südlich der amerikanisch-mexikanischen Grenze im Norden der Halbinsel Baja California, Mexiko. Im Westen grenzt das Untersuchungsgebiet an den Pazifik und hat eine Fläche von 670 km² mit 23 km Ausdehnung von Ost nach West und 28 km Ausdehnung von Nord nach Süd. Im Nordwesten befindet sich die Stadt Ensenada mit rund 300.000 Einwohnern (IMP & CODEEN 2011), südlich der Stadt schließt sich das Maneadero Tal an. Das Tal hat eine Fläche von ca. 80 km² und grenzt im Süden an die NW nach SE streichende Punta Banda Bergkette mit Höhen bis 1000 m. Die Bergkette hat eine Länge von ca. 30 km und durchtrennt fast das gesamte Untersuchungsgebiet. Die Berge im Osten des Untersuchungsgebiets mit Höhen zwischen 400 und 700 m gehören zur Peninsular Bergkette, die sich von Südkalifornien bis in den Süden Baja Californias zieht (HIRABAYASHI et al. 1996). Im Südosten des Untersuchungsgebietes liegt das San Tomas Tal, das durch den Santo Tomas Bach entwässert wird. Im Norden Baja Californias herrscht ein gemäßigtes, sommertrockenes, winterfeuchtes Subtropen- Klima.

In den Tälern von Maneadero und San Tomas, sowie in den Fluss- und Bachtälern befinden sich quartäre, fluviale, schlecht verfestigte Kiese, Sande und Silte (Qhoal). An der Küste finden sich überwiegend schmale Streifen quartärer äolischer Ablagerungen (Qhoc), die Lagune im Maneadero Tal besteht aus lakustrinen Ablagerungen (Qhopa) (SGM 2003).

Die Halbinsel Baja California besteht im Osten aus Gesteinen des nordamerikanischen Basements, der Westen wurde aus magmatischen Bogengesteinen gebildet. Die Magmatite sind durch die Agua Blanca Störung unterteilt. Nördlich dieser Störung befindet sich die Santiago Peak Formation, südlich die Alisitos Formation. Die Agua Blanca Störung entstand in der Kreide, als der Alisitos Inselbogen mit dem magmatischen Bogen der Santiago Peak Arc Formation am nordamerikanischen Kontinentalrand kollidierte (SCHMIDT et al. 2002).

Im Miozän entstand aus der Transformstörung zwischen der pazifischen und der nordamerikanischen Platte die San Andreas Störung, die die Agua Blanca Störung reaktivierte (HENRY & ARANDA-GOMEZ 1998). Die heute dextrale Agua Blanca Störung ist die südlichste Störung des San Andreas Störungssystems (SPRINGER 2010).

DIXON et al. (2002) bestimmen die Bewegungsraten der Agua Blanca Störung aus GPS- Daten von 1993 bis 1998 und ermittelt daraus Geschwindigkeiten von 2,5 mm/a, viskoelastische Modellberechnungen führen zu Geschwindigkeiten von 6,2 mm/a für die Agua Blanca Störung.

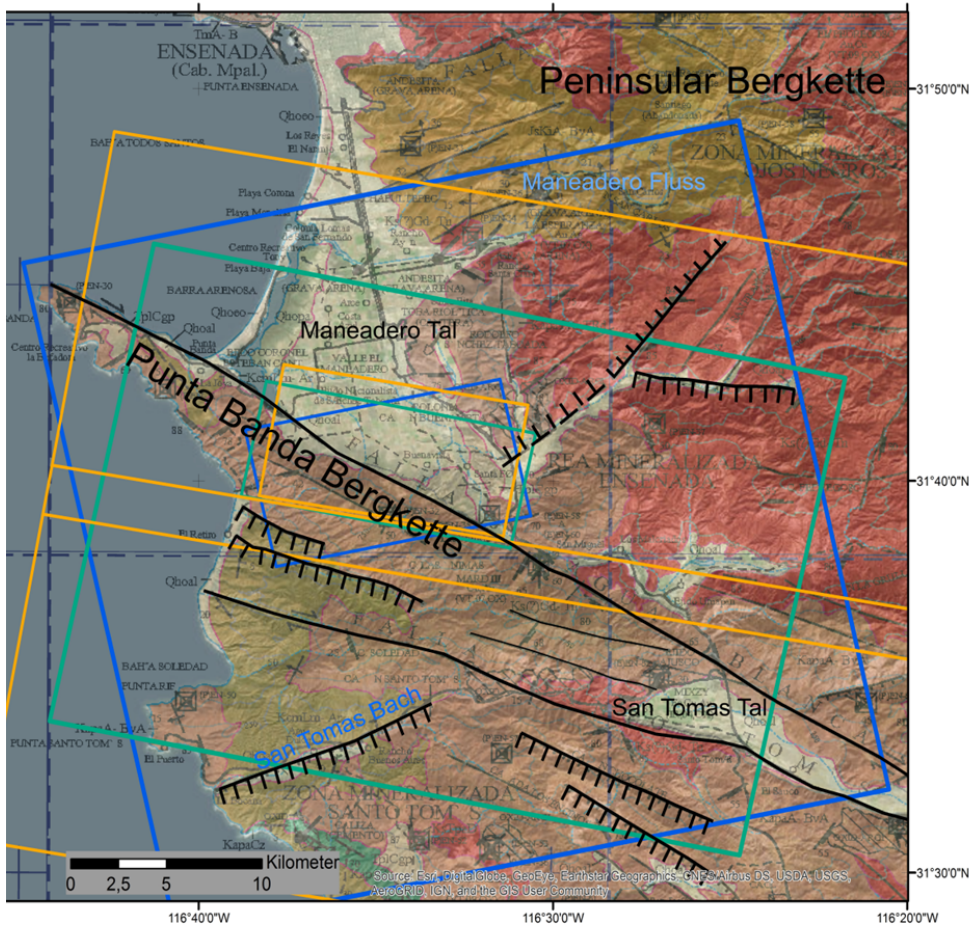


Abb. 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet mit der geologischen Karte (SGM 2003) unterlegt. Envisat: Gebiete des aufsteigenden Bahn Bogens (blau), absteigend (grün), Sentinel-1a absteigend (gelb).

ROCKWELL et al. (1993) bestimmen anhand von linearen Regressionsgeraden aus Versatz und Alter für die Agua Blanca Störung an der Punta Banda Bergkette Bewegungsraten von 4,1 mm/a für die letzten 28 ka. Für die letzten 840 ka wird eine Geschwindigkeit von 2,3 mm/a berechnet, wobei vermutet wird, dass sich die Bewegungsrate im Quartär beschleunigt hat.

Im Norden Baja Californias beschränkt sich die Seismizität auf die obersten 20 km der Kruste. Die stärkste Aktivität wird nahe der San Miguel Vallecitos Störung, nordöstlich des Untersuchungsgebiets, in den obersten 15 km beobachtet. Die Agua Blanca Störung ist zurzeit seismisch still, DIXON et al. (2002) vermuten, dass sie nicht inaktiv ist, sondern sich in der interseismischen Phase befindet. Der Zeitpunkt des letzten Erdbebens ist nicht bekannt.

Die in diesem Beitrag ermittelten Bewegungsraten werden als ein Parametersatz für ein Vorhersagemodell, das zukünftige Veränderungen des Küstenökosystems beschreibt, verwendet um mögliche Risiken abzuschätzen.

2 Methodik

Die Oberflächenbewegungen im Untersuchungsgebiet werden aus radarinterferometrischen Beobachtungen abgeleitet.

Die Radarfernerkundung ist ein aktives Messverfahren, bei dem ein Satellit elektromagnetische Wellen auf die Erde sendet und die rückgestreute Welle empfängt, dabei werden Amplitude und Phase aufgezeichnet. Beim interferometrischen SAR (InSAR) werden die Phasenunterschiede zweier getrennt voneinander aufgenommenen Datensätze bzw. angeordneter Antennen ausgewertet. Dieser Phasenunterschied kann i) zur Objekthöhenberechnung (Ableitung von Geländemodellen) oder ii) zur Bestimmung der geometrischen Veränderungen (Setzung, Verschiebungen) der Erdoberfläche genutzt werden (ALBERTZ 2007).

Multitemporale Auswertemethoden ermöglichen die Erstellung von Zeitreihen über die Erdoberflächenbewegungen im Untersuchungsgebiet. Es wurde die Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) Methode nach FERRETTI et al. 2001 und die Small Baseline Subset (SBAS) Methode nach BERARDINO et al. 2002 durchgeführt. Die PSI Methode analysiert die Verschiebung von stabilen Streuern (Scatterer) über den Auswertez Zeitraum, die Auswahl dieser, kann auf Grund von Kohärenzgrenzwerten, Amplitudenwerten oder Phaseneigenschaften erfolgen. Aus den einzelnen Interferogrammen wird die Verschiebung der Streuer über die gesamte Zeit ermittelt. Diese Methode ist besonders geeignet für urbane Gebiete (MOTAGH 2016). Die SBAS Methode arbeitet mit verteilten Streuern (distributed scatterer) und ist deshalb besonders geeignet für ländliche Gebiete und gemischt bebaute Flächen. Die Methode ist deshalb in vielen landwirtschaftlich geprägten Gebieten besser geeignet als die PSI Methode (GONG et al. 2016).

Aus dem ESA Archiv standen 65 Aufnahmen von Envisat in auf- und absteigenden Bahnbögen der Jahre 2003 bis 2011 zur Verfügung. Der aufsteigende Bahnbogen umfasst die Jahre 2005 bis 2011 mit 20 Aufnahmen, der absteigende Bahnbogen liefert 45 Bilder der Jahre 2003 bis 2011. Zur Erweiterung der Zeitreihe wurden außerdem 55 Bilder des absteigenden Bahn Bogens des Sentinel-1a verwendet, der seit 2014 operiert. Das Untersuchungsgebiet umfasst zwei Bursts, die gemeinsam ausgewertet wurden.

Die Daten werden mit der PSI und SBAS Methode bearbeitet. In einem ersten Schritt wurde das gesamte Untersuchungsgebiet mit einer Ausdehnung von 23 km x 28 km prozessiert, um einen Überblick über mögliche Bewegungen zu erhalten. Zudem wurde ein Detailausschnitt (12 x 6 km) über die Agua Blanca Störung bearbeitet um relative Bewegungsraten zu bestimmen und diese mit Literaturwerten zu vergleichen.

In der Abb. 2 sind die räumlichen und zeitlichen Verbindungen zwischen den einzelnen Radaraufnahmen in Form sogenannter Netzwerkgrafiken dargestellt. Die PSI Auswertungen sind links dargestellt und bilden nur Interferogramme zwischen einem Masterdatensatz und allen anderen Aufnahmen (slaves). Die SBAS Auswertung verwendet mehrere Masterdatensätze auf Basis einer maximalen zeitlichen und räumlichen Differenz. Die jeweiligen Werte sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

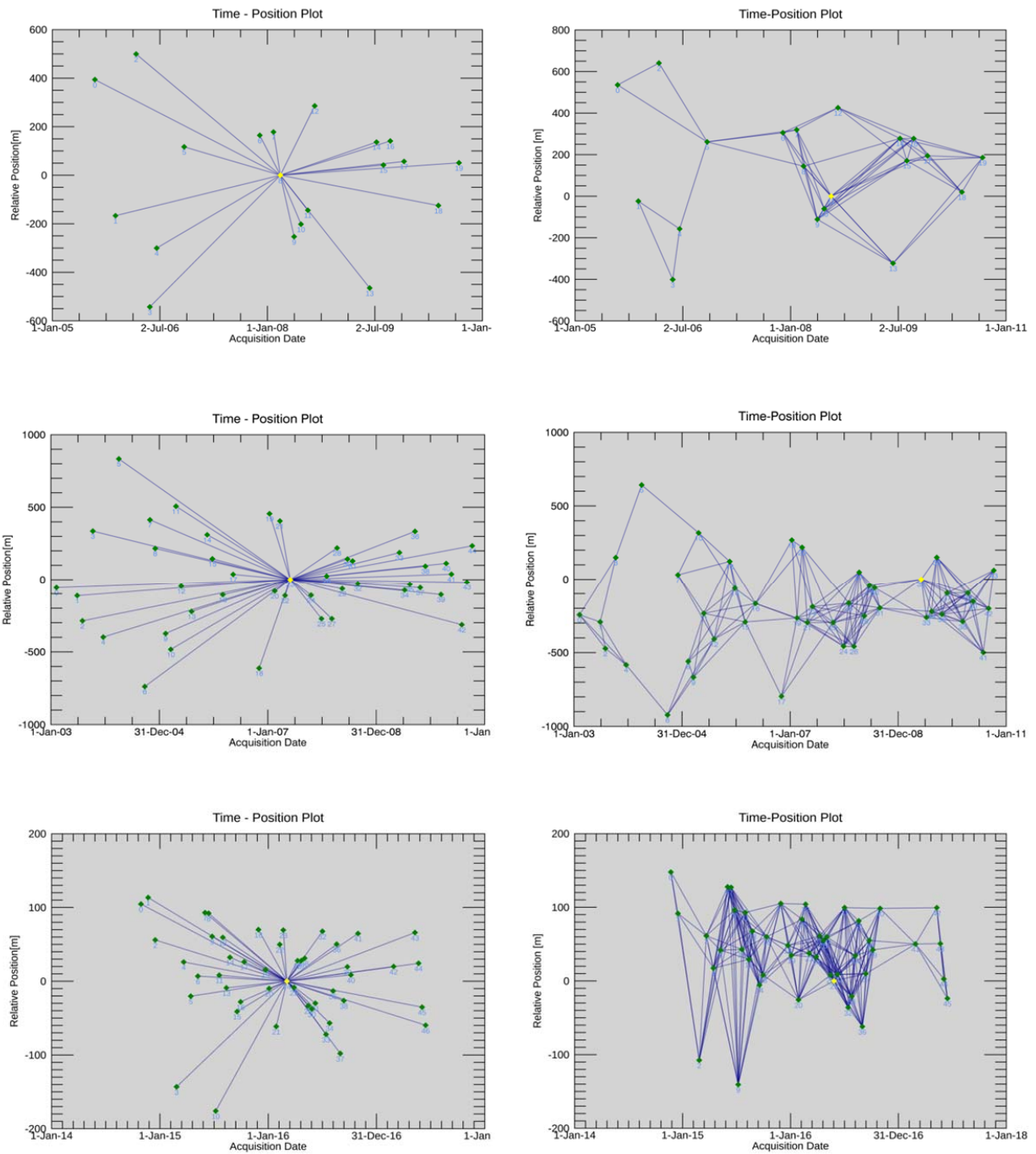


Abb. 2: Räumlichen und zeitlichen Verbindungen zwischen Master und Slaves für PSI Auswertung (links) und SBAS Auswertung (rechts). Netzwerkgrafiken: Obere Zeile Envisat aufsteigender Bahnbogen, mittlere Zeile Envisat absteigender Bahnbogen, unten Sentinel-1

Tab. 1: Übersicht über die verwendeten Parameter in der SBAS Auswertung

Satellit	Bahnbogen	Zeitintervall	Anzahl der Bilder	Gebiet	Max. kritische Basislinie (%)	Max. temporale Basislinie (d)	Anzahl Interferogramme
Envisat	Aufsteigend	08.2005- 09.2010	20	gesamt	60	500	63
Envisat	Aufsteigend	08.2005- 09.2010	20	Ausschnitt	50	400	37
Envisat	Absteigend	02.2003- 10.2010	45	gesamt	60	450	214
Envisat	Absteigend	02.2003- 10.2010	45	Ausschnitt	50	365	153
Sentinel-1a	Absteigend	11.2014-10.2017	55	gesamt	45	120	342
Sentinel-1a	Absteigend	11.2014-10.2017	53	Ausschnitt	45	60	170

3 Ergebnisse

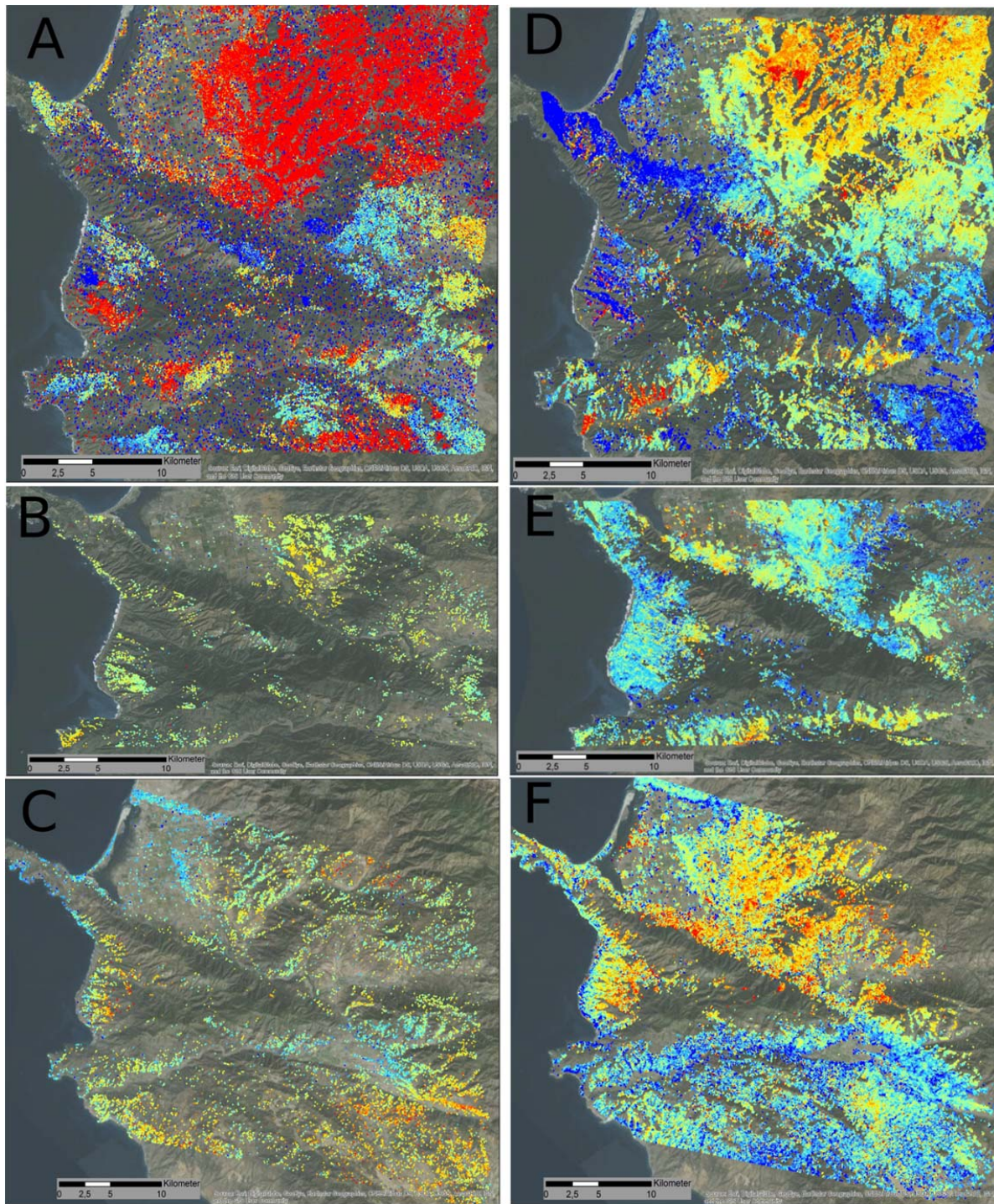
Das Ergebnis der PSI Auswertung des aufsteigenden Bahn Bogens aus Envisat, siehe Abb. 3 A, liefert im gesamten Untersuchungsgebiet keine verlässlichen Geschwindigkeiten. Der absteigende Bahnbogen aus Envisat zeigt in der PSI Auswertung, siehe Abb. 3 B, ein sehr homogenes Ergebnis, das keine signifikanten Bewegungsraten liefert.

Die Ergebnisse der PSI Auswertung aus Sentinel, siehe Abb. 3 C, lassen sich ebenfalls kaum vom Rauschen unterscheiden. Im Maneadero- und im San Tomas Tal sind die Geschwindigkeiten negativ in den höheren Regionen leicht positiv.

3.1 SBAS Ergebnisse im gesamten Untersuchungsgebiet

Die SBAS Auswertung des aufsteigenden Bahn Bogens aus Envisat im Untersuchungsgebiet, siehe Abb. 3 D, zeigt Geschwindigkeitswerte zwischen -7 bis +6 mm/a. Im Maneadero Tal sind die Geschwindigkeiten überwiegend negativ, im Westen und Südwesten stark negativ mit Geschwindigkeiten zwischen -7 bis -2 mm/a. Im Osten des Maneadero Tals, auf Höhen um 300 m, steigen die Geschwindigkeiten auf bis +6 mm/a an. Höher gelegene Bereiche weiter östlich zeigen Geschwindigkeiten zwischen 0 bis +3 mm/a. Auf der Punta Banda Gebirgskette sind die Geschwindigkeiten mit -5 bis -2 mm/a stark negativ und auch Südlicher, am Pazifik, sind die Geschwindigkeiten zwischen -5 bis +2 mm/a im Durchschnitt, leicht negativ. Im Süden des Untersuchungsgebiets, entlang des San Tomas Baches, sind die Geschwindigkeiten meist positiv mit Geschwindigkeiten bis +8 mm/a. Nördlich und südlich des San Tomas Tals sind die Geschwindigkeiten zwischen -5 bis -2 mm/a.

Die ermittelten Geschwindigkeiten des absteigenden Bahn Bogens aus Envisat, siehe Abb. 3 E, zeigen Werte zwischen -6 bis +7 mm/a im gesamten Untersuchungsgebiet. Im Maneadero Tal überwiegen die positiven Geschwindigkeiten zwischen 0 bis +3 mm/a, im Südwesten und Südosten des Tals sind negative Geschwindigkeiten zwischen -5 bis 0 mm/a zu beobachten. In der Peninsular Bergkette im Osten überwiegen die Geschwindigkeiten zwischen -2 bis 0 mm/a. Südlich der Punta Banda Bergkette, an der Pazifikküste, sind die Geschwindigkeiten zwischen -2 bis 0 mm/a negativ. Nahe des San Tomas Baches haben die Geschwindigkeiten Werten von 0 bis +7 mm/a und sind relativ hoch.



**Geschwindigkeit
(mm/a)**

- 3,1 - 10
- 2,1 - 3,0
- 1,1 - 2,0
- 0,1 - 1,0
- -0,9 - 0,0
- -1,9 - -1,0
- -2,9 - -2,0
- -10 - -3,0

Abb. 3: Ergebnisse der PSI und SBAS Auswertungen des Untersuchungsgebiets. A: PSI Envisat aufsteigend, B: PSI Envisat absteigend, C: PSI Sentinel-1a, D: SBAS Envisat aufsteigend, E: SBAS Envisat absteigend, F: SBAS Sentinel-1a.

Insgesamt weist dieser Datensatz ein sehr homogenes Bild auf mit stark negativen Geschwindigkeiten an den südlichen Berghängen der Punta Banda und den westlichen Hängen der Peninsular Bergkette.

Die Ergebnisse für die SBAS Auswertung der Sentinel-1 Zeitreihe, siehe Abb. 3 E, weist Geschwindigkeiten zwischen +8 bis -9 mm/a auf. Im Maneadero Tal sind Geschwindigkeiten überwiegend zwischen -2 bis +2 mm/a festzustellen. In der Peninsular Bergkette steigen die Geschwindigkeiten zwischen +1 bis +8 mm/a an. Im landseitigen Teil der Lagune und an den Bergen der Punta Banda Bergkette sind positive Geschwindigkeiten zu beobachten. Südlich der Bergkette am Pazifik steigen die Geschwindigkeiten von -9 auf +8 mm/a an. Im Bereich des San Tomas Tals und Baches sind die Geschwindigkeiten negativ mit Werten zwischen 0 bis -8 mm/a. Beim Vergleich der Envisat mit den Sentinel Ergebnissen muss darauf geachtet werden, dass sich die Aufnahmegeometrien der Satellitentypen unterscheiden. Envisat hat einen Einfallwinkel θ_{inc} von 17° bis 26° in den vorgestellten Daten. Bei Sentinel ist θ_{inc} zwischen 36° und 51° . Dadurch variiert auch der Line of Sight (LOS) Winkel. Die vorgestellten Ergebnisse sind jeweils in LOS dargestellt.

3.2 SBAS Ergebnisse für den Ausschnitt der Agua Blanca Störung

Die SBAS Ergebnisse des aufsteigenden Bahn Bogens aus Envisat im kleinen Ausschnitt der Agua Blanca Störung, siehe Abb. 4 oben, zeigt Geschwindigkeiten zwischen -10 bis +8 mm/a. An den Berghängen der Punta Banda Bergkette sind die Geschwindigkeiten mit -10 bis -4 mm/a am größten. Im Nordwesten des Ausschnitts ist ein fast runder Bereich mit 500 m Durchmesser und Geschwindigkeiten zwischen -10 bis -4 mm/a erkennbar. Ringsherum steigen die Geschwindigkeiten kontinuierlich auf +2 mm/a an. In der Mitte des Ausschnitts zeigt sich ein Bereich negativer Geschwindigkeiten bis -4 mm/a. Es scheint als wechselten sich von West nach Ost negative und positive Geschwindigkeiten ab.

Die Geschwindigkeiten der SBAS Auswertung der Jahre 2003 bis 2010 des absteigenden Bahn Bogens aus Envisat, siehe Abb. 4 Mitte, zeigen im Ausschnitt der Agua Blanca Störung Werte zwischen -8 bis +6 mm/a. Im Nordwesten des Ausschnitts sind negative Geschwindigkeiten zwischen -8 bis -3 mm/a erkennbar, die eine runde Form mit ca. 400 m Durchmesser zeigen. Die Geschwindigkeiten steigen rundherum auf bis +2 mm/a an, im Osten schließen sich Geschwindigkeiten zwischen +1 bis +3 mm/a an. In der Mitte des Ausschnitts sind die Geschwindigkeiten zwischen -8 bis 0 mm/a und im Südosten steigen sie auf 0 bis +3 mm/a an. An den Hängen der Peninsular Bergkette sind die Geschwindigkeiten mit Werten zwischen -3 bis +1 mm/a eher negativ. Auf der Südseite der Punta Banda Bergkette sind vereinzelte Geschwindigkeiten zwischen -8 bis +3 mm/a berechnet worden.

Die Auswertung der Daten aus Sentinel-1 für den kleinen Ausschnitt der Agua Blanca Störung, siehe Abb. 4 unten, zeigt Probleme in der Auswertung. Im Südwesten und Nordosten scheinen topographische Effekte aufzutreten und sehr hohe Geschwindigkeiten zu erzeugen. Im Südosten ist eine deutliche Phasenrampe sichtbar. Im mittleren Bereich der Auswertung sind nördlich der Agua Blanca Störung meist positive Geschwindigkeiten zwischen +1 bis +7 mm/a erkennbar. Auf der Störung und südlicher überwiegen die negativen Geschwindigkeiten zwischen 0 bis -10 mm/a.

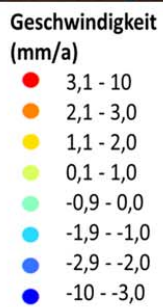
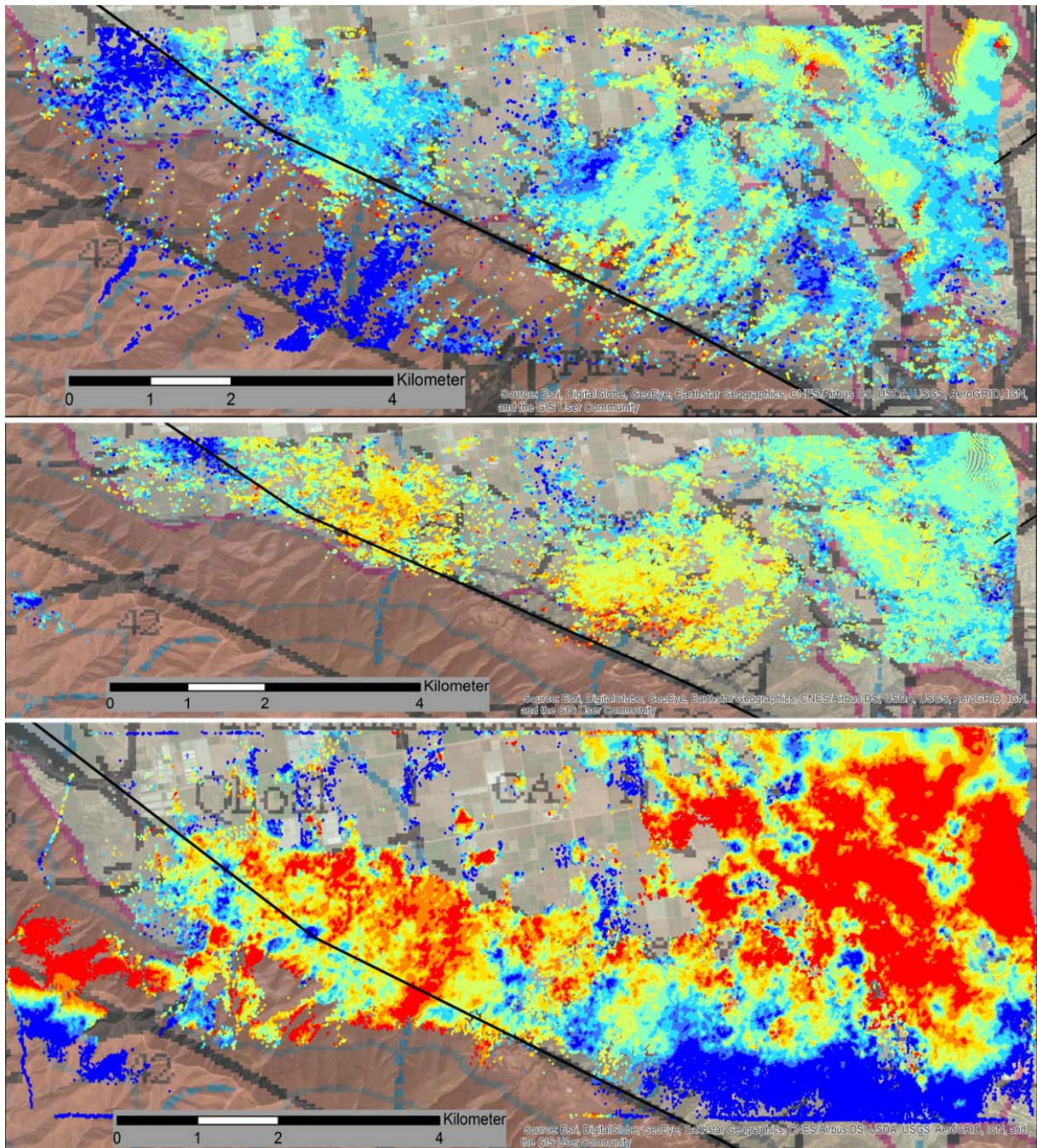


Abb. 4: Ergebnisse der SBAS Auswertungen mit der geologischen Karte (SGM 2003) unterlegt und der Agua Blanca Störung (schwarz) überlagert. Oben: Envisat aufsteigend, Mitte: Envisat absteigend, Unten: Sentinel-1a

4 Diskussion

Die Ergebnisse der PSI Auswertungen sind in den absteigenden Bahnbögen aus Envisat und Sentinel kaum vom Rauschen zu unterscheiden. Das Ergebnis des aufsteigenden Bahnbogens wirkt in den topographisch hohen Lagen sehr verrauscht und zeigt für die Peninsular Bergkette sehr hohe Geschwindigkeiten. Es lässt sich feststellen, dass die PSI Auswertungen im Untersuchungsgebiet keine belastbaren Ergebnisse liefern. Die PSI Methode scheint daher für das ländliche Untersuchungsgebiet nicht geeignet zu sein.

In Abb. 5 A sind die Ergebnisse der SBAS Auswertung des aufsteigenden Bahnbogens aus Envisat mit der geologischen Karte unterlegt. Westlich des San Tomas Tals sind die Geschwindigkeiten höher als südlich und nördlich davon. In der geologischen Karte (SGM 2003) ist ein Intrusionskörper (vermutlich Kreidezeitliche Granodiorite und Tonalite) sichtbar, der durch die San Tomas Störung versetzt wurde. Die San Tomas Störung könnte diese unterschiedlichen Geschwindigkeitsfelder herbeiführen.

Nordwestlich des San Tomas Tals befindet sich der San Tomas Graben, der in der Karte durch zwei parallele Verwerfungen gekennzeichnet ist. Die Geschwindigkeitsmuster scheinen sich an diesen zu orientieren. Südlich der Punta Banda Bergkette befindet sich ein negatives, verrauschtes Gebiet. Der Verlauf der San Tomas Störung ist hier sehr deutlich sichtbar und auch die nördlicheren Abschiebungen sind durch die Ergebnisse südlich erkennbar. Im Südwesten, am San Tomas Bach, befindet sich eine Abschiebung. Die hohen Geschwindigkeiten dort könnten durch Erosion und Sedimentablagerungen aus Starkregenereignissen entstanden sein.

Die Winter 2004/2005, 2008/2009, 2010/2011 und 2016/2017 waren sehr niederschlagsreich (CONAGUA 2017). Der Winter 2008/2009 fällt in den Auswertungszeitraum und könnte starke Erosionsprozesse begünstigt haben.

Die ermittelten Geschwindigkeiten im Maneadero Tal sind insgesamt negativ, weisen aber kleinräumige positive Geschwindigkeitsfelder auf. Im Tal wurden in den letzten Jahren vermehrt Becken für aufbereitetes Wasser und Gewächshäuser gebaut. Es lässt sich vermuten, dass durch die Auflast dieser Becken, der Boden in der Nähe lokal verformt wird und so dies zu kleinräumigen positiven Verformungsmustern führt. Die Gewächshäuser könnten sehr gute Streuer sein, weil ihre Objekteigenschaften sich nicht ändern.

In Abb. 5 B sind die Ergebnisse des absteigenden Bahnbogens aus Envisat dargestellt und mit der geologischen Karte unterlegt. Die räumliche Ausdehnung ist insgesamt geringer, als im aufsteigenden Bahnbogen, so dass die Bewegung der San Tomas Störung nördlich und südlich nicht erkennbar ist. Am San Tomas Bach sind die Geschwindigkeiten, vermutlich durch Erosions- und Ablagerungsprozesse erhöht.

Die Verwerfungen und Abschiebungen südlich der Punta Banda Bergkette sind aus den Ergebnissen nicht ableitbar. Im Maneadero Tal sind überwiegend positive Geschwindigkeiten zu beobachten und punktuell auch höhere, die durch Wasserbecken oder Gewächshäuser erklärt werden könnten, siehe oben.

In Abb. 5 C sind die Ergebnisse aus Sentinel-1a mit der geologischen Karte unterlegt. Die positiven Geschwindigkeiten auf der landzugewandten Seite der Lagune könnten durch Sedimentakkumulation entstanden sein.

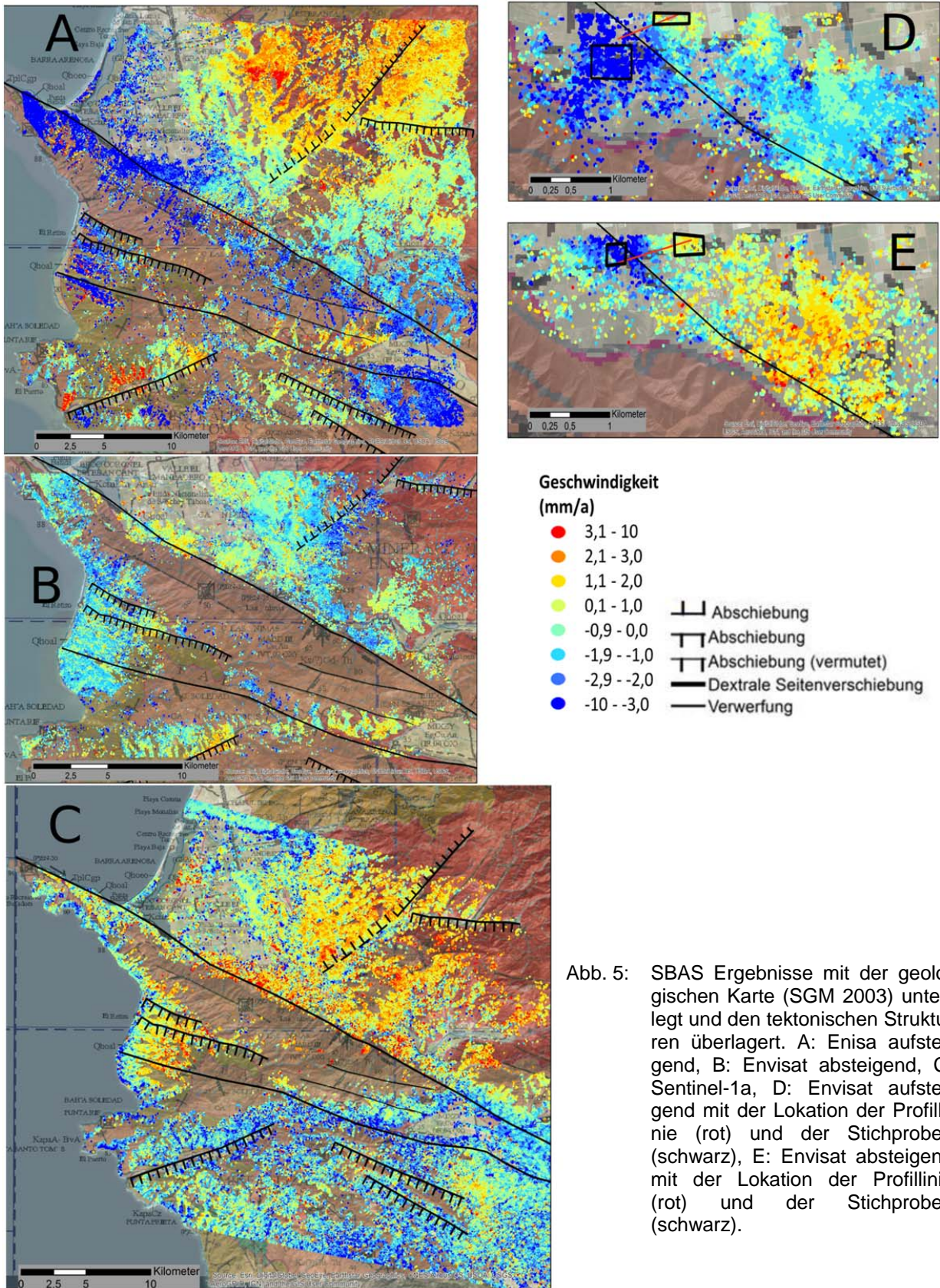


Abb. 5: SBAS Ergebnisse mit der geologischen Karte (SGM 2003) unterlegt und den tektonischen Strukturen überlagert. A: Enisa aufsteigend, B: Envisat absteigend, C: Sentinel-1a, D: Envisat aufsteigend mit der Lokation der Profillinie (rot) und der Stichproben (schwarz), E: Envisat absteigend mit der Lokation der Profillinie (rot) und der Stichproben (schwarz).

Die überwiegend negativen Geschwindigkeiten im Maneadero Tal könnten die extensive Nutzung des Grundwassers zeigen. Die Übernutzung des Aquifers könnte zu Setzungserscheinungen an der Erdoberfläche führen (DE LUNA et al. 2017). Die hohen Geschwindigkeiten in der Peninsular Bergkette und südlich der Punta Banda Bergkette am Pazifik sind topographische Effekte, die in einem weiteren Schritt korrigiert werden müssten (HANSEN 2001).

Die negativen Geschwindigkeiten am San Tomas Bach könnten auch durch Erosion und Starkregenereignisse im Winter 2016/2017 erklärbar sein.

Beim Vergleich der Envisat mit den Sentinel Ergebnissen muss darauf geachtet werden, dass die Zeitreihen sehr unterschiedliche Zeiträume abbilden und in der Anzahl der verarbeiteten Aufnahmen stark variieren. Des Weiteren unterscheiden sich die Aufnahmegeometrien der Satellitentypen. Am San Tomas Bach sind in allen Auswertungen hohe Geschwindigkeiten erkennbar, allerdings variiert das Vorzeichen, dies könnte u.a. mit dem LOS und dem Azimut der Aufnahme zusammenhängen. Insgesamt fällt aber auf, dass die Ergebnisse im Maneadero Tal negativ sind und in der Peninsular Bergkette topographische Effekte auftreten und zu hohen Geschwindigkeiten führen, dies ist in den kürzeren Zeitreihen von Sentinel-1a und im aufsteigenden Bahnbogen von Envisat ausgeprägter.

In Abb. 4 oben sind die Ergebnisse des Ausschnitts der Agua Blanca Störung im aufsteigenden Bahnbogen von Envisat mit der geologischen Karte unterlegt und mit den Strukturen überlagert. Im Westen des Ausschnitts korreliert das negative Geschwindigkeitsfeld südlich der Agua Blanca Störung sehr genau mit der Grenze der quartären Ablagerungen (hell) zu den Unter-Kreide Andesiten und andesitischen Brekzien (rot). Nördlich der Agua Blanca Störung sind die Geschwindigkeiten überwiegend positiv. Der Geschwindigkeitswechsel scheint durch die Agua Blanca Störung verursacht zu sein, weil eine atmosphärische Filterung bereits erfolgt ist. Im Südosten des Tals befinden sich pliozäne polymiktischen Konglomerate (beige), dieses Gebiet weist schwächere Hangneigungen auf als die umliegenden Punta Banda Berge. In Luftbildern sind alluviale Fächer erkennbar, die durch Starkregenereignisse in den Wintermonaten entstanden sein könnten.

In Abb. 4 Mitte sind die Ergebnisse des absteigenden Bahn Bogens mit der geologischen Karte unterlegt. Im Westen befindet sich das negative Geschwindigkeitsfeld fast ausschließlich südlich der Agua Blanca Störung, nördlich sind die Geschwindigkeiten positiv. Es könnte vermutet werden, dass die Lage der Störung nicht korrekt in der geologischen Karte erfasst ist und etwas nördlicher verläuft. Im Osten des Ausschnitts verläuft ein Flussbett, das in den Wintermonaten Wasser führen könnte und die negativen Geschwindigkeiten dort durch Erosionsprozesse erklären könnte. Die Konglomerate im Südosten sind durch positive Geschwindigkeiten gekennzeichnet.

In Abb. 4 unten sind die Ergebnisse von Sentinel dargestellt. Die Agua Blanca Störung ist durch die verbleibenden Effekte und die Phasenrampe nicht eindeutig erkennbar. Die Auswertung scheint zu Fehlerträchtig um die Störung deutlich abzubilden. Des Weiteren beträgt die Zeitreihe nur drei Jahre und ist damit auch sehr kurz im Vergleich zu den Ergebnissen von Envisat.

Der Vergleich der SBAS Auswertungen für Envisat zeigt ähnliche Geschwindigkeitsmuster und Amplituden im Maneadero Tal, die Geschwindigkeiten an den Berghängen im Osten sind unterschiedlich.

DIXON et al. (2002) berechnen aus 5 Jahren GPS-Daten, die in vier Mess-Kampagnen jeweils 3 bis 5 Tage aufgezeichnet wurden, eine horizontale Geschwindigkeitsdifferenz von 2,5 mm/a senkrecht zur Streichrichtung der Störung. In Abb. 5 D und E sind Profillinien (rot) senkrecht zur Agua Blanca Störung eingezeichnet um einen Eindruck über die Geschwindigkeitsverteilung an der Störung zu bekommen, die in LOS vorliegen. Die Abb. 6 links zeigt das Profil des aufsteigenden Bahn Bogens mit einem relativ regelmäßigen Verlauf. Die Abb. 6 rechts zeigt den absteigenden Bahn Bogens mit einer größeren Variation der Geschwindigkeiten.

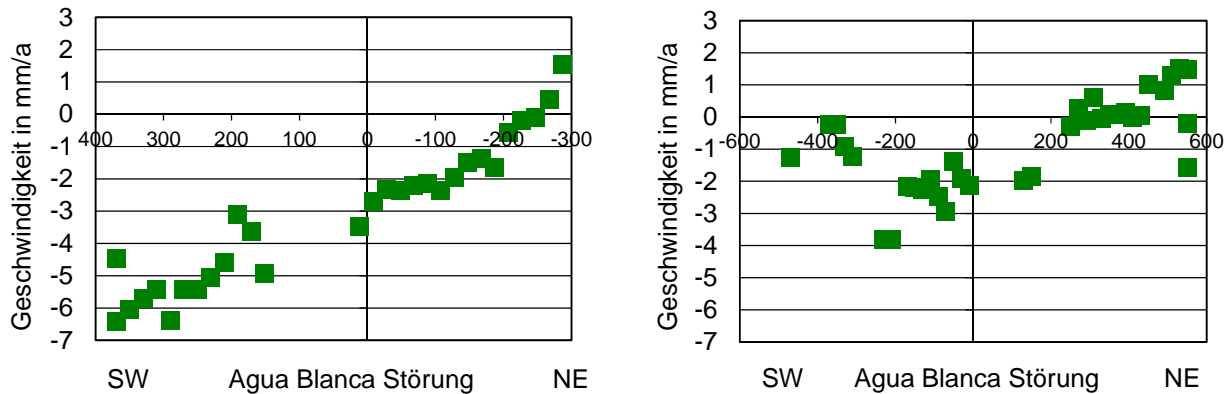


Abb. 6: Envisat-Profile senkrecht zur Agua Blanca Störung. Links: Aufsteigend, Rechts: Absteigend, Lokationen: siehe Abbildung 5 D und E.

In Abb. 5 D und E sind jeweils eine Punktwolke (schwarz) nördlich und südlich der Agua Blanca Störung markiert. Die Tabelle 2 zeigt die Berechnung von relativen Geschwindigkeiten für die Agua Blanca Störung aus diesen Punktwolken. Für den aufsteigenden Bahnbogen ergeben sich so im Mittel Geschwindigkeiten von $4,5 \pm 1,4$ mm/a. In den Punktwolken des absteigenden Bahn Bogens für Envisat ist die Geschwindigkeit im Mittel $4,1 \pm 1,3$ mm/a.

ISYA et al. 2018 ermitteln aus den hier vorgestellten Daten des absteigenden Bahn Bogens mit troposphärischer Power Law Korrektur eine Geschwindigkeit von $4,5 \pm 1,0$ mm/a aus zwei Punkten. TS1 befindet sich nördlich der Agua Blanca Störung im Südwesten des Maneadero Tals, nahe der Lagune und weist eine Geschwindigkeit von $-2,7 \pm 0,4$ mm/a auf. Der Punkt TS2 südlich der Agua Blanca Störung befindet sich am Südhang der Punta Banda Bergkette nahe des Pazifiks und wurde mit $1,8 \pm 0,9$ mm/a ermittelt.

ROCKWELL et al. (1993) ermitteln für die letzten 28 ka Bewegungen an der Agua Blanca Störung von 4,1 mm/a. Die von DIXON et al. (2002) berechneten Geschwindigkeiten aus GPS Daten von 2,5 mm/a senkrecht zur Störung sind niedriger, als die hier ermittelten Werte. Es muss allerdings beachtet werden, dass die hier vorgestellten Ergebnisse in LOS vorliegen und nicht in horizontale und vertikale Komponenten zerlegt wurden.

Tab. 2: Geschwindigkeitsberechnungen aus Envisat für die Agua Blanca Störung

Punktgruppe im Norden				Punktgruppe im Süden			
Bahnbogen	Stichproben- größe	Mittelwert mm/a	Standard- abweichung mm/a	Bahnbogen	Stichproben- größe	Mittelwert mm/a	Standard- abweichung mm/a
Aufsteigend	75	0,1	0,8	Aufsteigend	328	-4,4	1,2
Absteigend	130	0,6	0,6	Absteigend	73	-3,5	1,1

Differenz von Nord und Süd			
Aufsteigend		4,5	1,4
Absteigend		4,1	1,3

4 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der SBAS Methode zeigen am San Tomas Bach, im Süden des Untersuchungsgebiets, Bewegungen, die vermutlich durch Erosions- und Ablagerungsprozesse aus Starkregeneignissen verursacht wurden. Dies ist auch auf den pliozänen Konglomeraten im Südosten des Maneadero Tals erkennbar. Im Maneadero Tal sind insgesamt negative Bewegungen zu beobachten, die durch die Übernutzung des Aquifers entstanden sein könnten. Die punktuellen positiven Bewegungen im Maneadero Tal sind, vermutlich durch den Bau von Wasserbecken und Gewächshäusern, erklärbar. Die San Tomas Störung zeigt nahe dem Tal gegenläufige Geschwindigkeitsmuster, die durch die Störung verursacht sein müssen, da der Versatz einer Intrusion aus der geologischen Karte erkennbar ist.

Aus den Ergebnissen der Envisat Auswertungen lassen sich für die Agua Blanca Störung Bewegungen in der Größenordnung von $4,5 \pm 1,4$ mm/a für den aufsteigenden Bahnbogen und $4,1 \pm 1,3$ mm/a für den absteigenden Bahnbogen in LOS ermitteln. Korrigiert man die LOS-Bewegung mit dem Sinus des Einfallwinkels von Envisat (23°) so liegen die abgeleiteten Horizontalbewegungen zwischen 1,6 und 1,8 mm/a und sind somit etwas kleiner als die publizierten Werte von DIXON et al. (2002). Es zeigt sich, dass es mit einer ausreichend großen Datenmenge und Zeitbasis möglich ist mit radarinterferometrischen Methoden die Bewegung einer langsamen Seitenverschiebung (strike-slip fault) zu bestimmen.

Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes werden die Sentineldaten weiter erfasst und prozessiert. Hierbei wird auch eine gemeinsame Lösung der auf- und absteigenden Bahnbögen mit Berücksichtigung des Aufnahmewinkels in LOS angestrebt, um die horizontale Bewegung entlang der Agua Blanca Störung signifikant zu bestimmen.

5 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J., 2007: Einführung in die Fernerkundung- Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 3. Auflage, 56-68.
- BERARDINO, P., FORNARO, G., LANARI, R. & SANSOSTI, E., 2002: A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**(11), 2375-2383.
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA), 2017: Banco nacional de datos de Aguas superficiales BANDAS, Ensenada.
- DAESSLÈ, L.W., PEREZ-FLORES, M.A., SERRANO-ORTIZ, J., MENDOSA-ESPINOSA, L., MANJARREZ-MASUDA, E., LUGO-IBARRA, K.C. & GOMEZ-TREVINO, E., 2014: A geochemical and 3D-geometry geophysical survey to assess artificial groundwater recharge potential in the Pacific coast of Baja California, Mexico. *Environmental Earth Science*, **71**(8), 3477-3490.
- DE LUNA, R.M.R., GARNÈS, S.J.A. & CABRAL, J.J.S.P., 2017: Groundwater overexploitation and soil subsidence monitoring on Recife plain (Brazil). *Natural Hazards*, **86**(3), 1363-1376.
- DIXON, T., DECAIX, J., FARINA, F., FURLONG, K., MALSERVICI, R., BENNETT, R., SUAREZ-VIDAL, F., FLETCHER, J. & LEE, J., 2002: Seismic cycle and rheological effects on estimation of present-day slip rates for the Agua Blanca and San Miguel-Vallecitos faults, northern Baja California, Mexico. *Journal of Geophysical Research*, **107**(B10), 2226.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA, F., 2001: Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**(1), 8-20.
- GONG, W., THIELE, A., HINZ, S., MEYER, F.J., HOOPER, A. & AGRAM, P.S., 2016: Comparison of Small Baseline Interferometric SAR Processors for Estimating Ground Deformation. *Remote Sensing*, **8**(330), 1-26.
- HANSEN, R.F., 2001: Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 2, 148.
- HENRY, C.D. & ARANDA-GOMEZ, J., 2000: Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range. *Tectonophysics*, **318**, 1-26.
- HIRABAYASHI, K., ROCKWELL, T.K., WESNIOUSKY, S.G., STIFLING, M.W. & SUAREZ-VIDAL, F., 1996: A neotectonic study of the San Miguel-Vallecitos Fault, Baja California, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**, 1770-1783.
- IMP (INSTITUTO MUNICIPAL DE INVESTIGACIÓN Y PLANEACIÓN DE ENSENADA) & CODEEN (CONSEJO DE DESARROLLO ECONÓMICO DE ENSENADA), 2011: Plan estratégico del desarrollo económico del municipio de Ensenada (PEDEME). Ensenada, 56.
- ISYA, L., RIEDEL, A., RIEDEL, B. & NIEMEIER, W., 2018: Comparison of Power Law Tropospheric Correction for Time Series InSAR Application. 38. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und PFGK18 Tagung in München – Publikationen der DGPF, Band 27
- MOTAGH, M., 2016: InSAR Time-series Analysis. SAR-EDU Sommerschule 2016, Jena, 11-13.
- NIEMEIER, W., CASARIN, R.S. & ESPEJEL CARBAJAL, M.I., 2015: Bio-Ökonomische Folgen der Ausbeutung von Grundwassersystemen in Ariden Küstengebieten - BMBF-

- Projektbeschreibung ECOAQUA. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Braunschweig, 1-3.
- ROCKWELL, T.K., SCHUG, D.L. & HATCH, M.E., 1993: Late quaternary slip rate along the Agua Blanca fault Baja California, Mexico. Geological investigations in Baja California, Publikationen der South coast geological Society, Abbott, P. L., Sangines E. M. & Rendina M. A. (Hrsg.), Santa Ana, 1-40.
- SCHMIDT, K., WETMORE, P. & PATERSON, S., 2002: Controls on orogenesis along an ocean-continent margin transition in the Jura-Cretaceous Peninsular Ranges batholiths. Geological Society of America, Special Paper 365, 49-71.
- SGM (SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO), 2003: Carta Geológico- Minera 1:250.000 Ensenada H11-2, Baja California. Servicio Geológico Mexicano, 1.
- SPRINGER, A., 2010: Constraining basin geometry and fault kinematics on the Santo Tomás segment of the Agua Blanca Fault through a combined geophysical and structural study. Masterarbeit der University of South Florida, 11.