

Abschlussbericht

Einsatz der Multi-track SAR-Interferometrie zur Bestimmung von Beginn und Ausgangspunkt des Hebungssignales in Böblingen

von

Maryse Wampach, Malte Westerhaus

Karlsruher Institut für Technologie
Geodätisches Institut

Förderkennzeichen: L75 15001

Laufzeit: 01.10.2015 - 30.09.2017

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse	1
2	Motivation und Hintergründe des Vorhabens	2
3	Aufgabenstellung	3
4	State-of-the-art	3
5	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
7	Erzielte Ergebnisse	7
7.1	Datengrundlage	7
7.2	PSI-Prozessierung	8
7.2.1	Vorgehensweise	8
7.2.2	Ergebnisse	9
7.3	Modellierung des Hebungsbeginns	11
7.3.1	Funktionales Modell	11
7.3.2	Anpassung des Bewegungsmodells an die Daten über ein Grid-Search-Verfahren	12
7.3.3	Anpassung des Bewegungsmodells mit dem Matlab-Programmpaket „Shape Language Modelling“	12
7.3.4	Stochastische Eigenschaften der Modellparameter	15
7.4	Startzeitpunkt, Hebungsdaten und Ausdehnung des Hebungsgebietes	20
7.4.1	Bestimmung des Startzeitpunktes	20
7.4.2	Zunahme der Hebungssignale im Jahr 2008	23
7.4.3	Minimierung des Residuums durch Modellierung mit höheren Polynomgraden .	25
7.5	Zusammenschluss zweier benachbarter Tracks	25
7.6	Zusammenfassung und Diskussion	27
8	Verwertbarkeit der Ergebnisse	29
9	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	30
10	Danksagung	30

1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Das Forschungsvorhaben L7515001 befasst sich mit einem Hebungs- und Schadensereignis im Stadtgebiet Böblingen, das vermutlich durch unzureichend abgedichtete Bohrungen für Erdwärmesonden in den Jahren 2006 und 2008 hervorgerufen wurde. Um die zeitlichen Zusammenhänge zwischen den Bohrzeitpunkten und dem Beginn der Hebungen zu quantifizieren wurden 62 Szenen des C-Band Radarsatelliten Envisat aus den Jahren 2003 bis 2010, aufgenommen von zwei benachbarten, einander überschneidenden Beobachtungstreifen, nach der Methode der Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie (PSI) prozessiert. Die erhaltene Bewegungskarte weist erhöhte Verschiebungsraten in den zwei bekannten Schadensgebieten im Ostteil der Stadt Böblingen aus, die als Hebungssignal interpretiert werden. Im südlicheren der beiden Hebungsgebiete können drei Bewegungsphasen dokumentiert werden:

1. 03/2003 bis 10/2006: ein schwaches Hintergrundsignal von ca. 0.5 mm/Jahr
2. 11/2006 (1.Bohrphase) bis 11/2008: erhöhte Verschiebungsraten von 2.6 mm/Jahr bis 7.3 mm/Jahr im westlichen Teil des Hebungsgebietes (Achalmstraße bis Kniebisstraße), etwas geringere Raten zwischen 0.9 mm/Jahr und 4.6 mm/Jahr im östlichen Teil
3. 12/2008 (2.Bohrphase) bis 10/2010: Anstieg der Hebungsraten auf 17.5 mm/Jahr (Kniebisstraße) bis 20.3 mm/Jahr (nördliche Sudetenstraße, Wilhelm-Ganzhorn-Weg).

Die akkumulierten Hebungsbeträge zwischen Oktober 2006 und Oktober 2010 erreichen Werte von über 40 mm. Die Ergebnisse einer unabhängigen Auswertung des zweiten zur Verfügung stehenden Beobachtungstreifen bestätigen diese Befunde; da sich die Qualität der beiden Datenstapel jedoch deutlich unterscheidet, kann aus der Kombination der Zeitreihen kein zusätzlicher Gewinn gezogen werden.

Die spezifischen Fragestellungen der Studie wurden mittels einer Anpassung physikalisch sinnvoller Bewegungsmodelle an die Beobachtungsreihen einzelner PS-Punkte adressiert. Dabei wurde die Matlab-Toolbox Shape Language Modeling (SLM) (©John D'Errico) eingesetzt. Dieses Programmpaket ermöglicht unter anderem die Suche nach Trendänderungen in Zeitreihen. Die Modellbildung ist flexibel gestaltet, sodass sich auch a-priori Wissen, wie beispielsweise die Zeitpunkte der Bohrungen oder bekannte Eigenschaften des Hebungssignales, integrieren lässt. Wesentliche statistische Kenngrößen der abgeleiteten Modellparameter als Funktion von Signalrauschen, Akquisitionsintervall, Hebungsraten sowie verschiedenen Satellitenkonstellationen wurden auf Basis simulierter Daten evaluiert, und es wurde ein Bootstrapping-Verfahren zur Ableitung aussagekräftiger Streuungsmaße aus einzelnen Datenreihen entwickelt.

Für die realen Messreihen der Fallstudie Böblingen liegt die Präzision, mit der der Beginn des Hebungsereignisses angegeben werden kann, zwischen 40 und 183 Tagen. Sie verbessert sich auf 19.7 Tage für das gewichtete Mittel über PS-Datenreihen in einem Abstand von bis zu 430 m von den Bohrungen. Der wahrscheinlichste Zeitpunkt für den Beginn der Hebungen fällt auf den 05.11.2006, 24 Tage nach Beginn der Bohrarbeiten. Dieser Zeitpunkt liegt zwischen zwei kurz aufeinanderfolgenden Bohrtätigkeiten (12.10.-18.10.2006, 18.01.-30.01.2007) und könnte auf eine Überlagerung der Einflüsse beider Bohrungen zurückzuführen sein. Eine andere Erklärungsmöglichkeit ist, dass die Bohrphase im Oktober 2006 das Hebungsereignis ausgelöst hat, aber eine gewisse Zeitspanne für die Etablierung des hydraulischen Kurzschlusses über die Ringraumverfüllung und das Eindringen einer für den Quellvorgang ausreichenden Wassermenge in die Gipskeuperschichten notwendig war. In beiden Fällen legt die Koinzidenz zwischen der ersten Bohrphase im Oktober 2006/Januar 2007 und dem Einsetzen des Hebungssignales im südlichen Schadensgebiet der Stadt Böblingen einen Kausalzusammenhang nahe; zweifelsfrei kann ein solcher Zusammenhang aus den geodätischen Beobachtungen alleine jedoch nicht abgeleitet werden.

2 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Mit der steigenden Verfügbarkeit geodätischer Messdaten wird deutlich, dass die wirtschaftliche Nutzung des Untergrundes vielerorts Auswirkungen an der Erdoberfläche hat. Eine Karte der aus Präzisionsnivellements abgeleiteten vertikalen Bodenbewegungen in Südwestdeutschland zeigt, dass anthropogene Effekte die natürlichen Bewegungen im Allgemeinen um ein bis zwei Größenordnungen übertreffen und das Bewegungsbild dominieren (Fuhrmann et al., 2014). In Ballungsräumen können anthropogene Bodenbewegungen zu einer Beeinträchtigung der Wohn- und Infrastruktur führen, insbesondere aber stellen sie eine Herausforderung für die gesellschaftliche Akzeptanz wirtschaftlicher und technischer Aktivitäten im Untergrund dar.

Eine besondere Situation herrscht in Baden-Württemberg, wo häufig bereits in geringer Tiefe Gipskeuperschichten anstehen. Das in diesen Schichten vorkommende Mineral Anhydrit wandelt sich durch Wassereinlagerung zu Gips und vergrößert dabei sein Volumen um ca. 61 % (Sass, 2012). Dabei entstehen Quelldrücke von 1.7 MPa bis 4.7 MPa, die dem Gesteinsdruck in ca. 70 m bis 190 m Tiefe entsprechen. Sofern die Mächtigkeit der überlagernden Schichten geringer ist, kommt es durch den Quelldruck zu Anhebungen der Erdoberfläche. In den vergangenen Jahrzehnten ist der Quellvorgang durch technische Eingriffe in den Untergrund wiederholt ausgelöst worden und hat zu ernsthaften Schäden an der Statik von Tunneln und Wohngebäuden geführt. Beispiele aus jüngster Zeit sind die Hebungseignisse in Staufen/Breisgau und Böblingen, wo eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass unzureichend abgesicherte Geothermiebohrungen den Quellvorgang ausgelöst haben könnten.

Da in den kommenden Jahren die wirtschaftlich/technische Nutzung des Untergrundes weiter zunehmen wird (Förderung von Kohlenwasserstoffen, CO₂-Sequestrierung, flache/tiefe Geothermie, Grundwasserentnahme, technische Infrastrukturprojekte), müssen neben der Ausweisung von Verbotsgeländen und verbesserten Bauverfahren auch flächendeckende Monitoringverfahren weiterentwickelt werden, die ein Hebungs- oder Senkungseignis frühzeitig aufdecken. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Deformationsmessung mit Radarsatelliten mit synthetischer Apertur (SAR-Satelliten) zu, die in der Lage sind, Bodenbewegungseignisse mit hoher Präzision

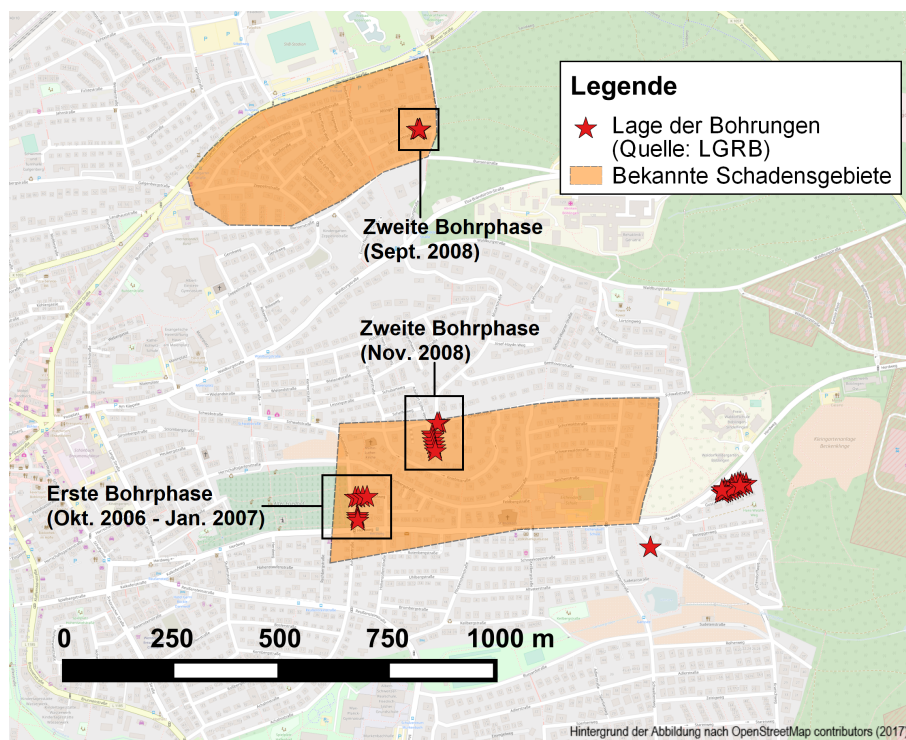


Abb. 2.1: Lage der Schadensgebiete sowie der Geothermie-Bohrungen in der Innenstadt Böblingens (Steinacker, 2015). In die erste Bohrphase fallen die Bohrungen am Herdweg (12.10.-18.10.2006) und Schliffkopfweg (18.01.-30.01.2007). Die zweite Phase umfasst Bohrungen an der Siemensstr. (29.09.-01.10.2008), Gansseeweg (05.11.-07.11.2008) und Heinrich-Heine-Weg (25.11.-01.12.2008)

räumlich und zeitlich einzugrenzen und zu vermessen. Insbesondere die für die kontinuierliche Erdbeobachtung ausgelegten C-Band Missionen der ESA können aufgrund ihrer regelmäßigen Erfassung und Archivierung von Radarbildern des Untergrundes entscheidende Hinweise auf den Beginn eines Deformationsereignisses geben. Die im April 2014 gestartete Erdbeobachtungsmision Sentinel-1 wird im Verein mit den im Rahmen des EU-Projektes Copernicus zur Verfügung gestellten Produkten die Nutzung der SAR-Interferometrie dabei wesentlich voranbringen.

Die vorliegende Studie befasst sich mit dem Hebungereignis im Stadtgebiet Böblingen. Seit 2011 werden aus mehreren Gebieten im Ostteil der Stadt Gebäudeschäden im Zusammenhang mit einer Anhebung des Untergrundes gemeldet (siehe Abbildung 2.1). Es besteht der Verdacht, dass die Hebungen, die inzwischen mehrere Dezimeter betragen, auf einen Quellvorgang im unter der Stadt anstehenden Gipskeuper zurückzuführen sind, der möglicherweise durch Bohrungen für Erdwärmesonden in den Jahren 2006 bis 2008 ausgelöst wurde. Für den Ende 2008 einsetzenden Hebungsvorgang im nördlichen Schadensgebiet wurde dieser Zusammenhang inzwischen gut dokumentiert und gilt als bestätigt (Koch u. a., 2015), im südlichen Schadensgebiet sind Beginn und Ausgangspunkt der Hebungssignale sowie die zeitlichen Zusammenhänge nach 2006 noch nicht eindeutig geklärt.

3 Aufgabenstellung

Um die Beobachtungslage für die im vorigen Abschnitt genannte Fragestellung zu verbessern, wurden die im Archiv der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA vorhandenen Radarszenen des C-Band Satelliten ENVISAT der Jahre 2002 bis 2010 für benachbarte Beobachtungstreifen, die sich im Stadtgebiet Böblingen überschneiden, mit den Methoden der SAR-Interferometrie ausgewertet. Insbesondere kam hier die Technik der Persistent Scatterer InSAR (PSI) Technik zum Einsatz. Durch die kombinierte Auswertung von je zwei unabhängigen Datensätzen aus unterschiedlichen Überflugrichtungen (Multi-Track SAR-Interferometrie) wird eine Verbesserung der Präzision abgeleiteter Hebungsraten erwartet. Da die Radaraufnahmen in benachbarten Aufnahmestreifen zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen, können die Messreihen für identische Punkte in den überlappenden Gebieten zeitlich verdichtet werden. Mittels mathematischer Methoden zur Detektion von Trendänderungen soll der Beginn eines möglichen Hebungereignisses in den verdichteten Zeitreihen besser als bisher und mit aussagekräftigen Vertrauensmaßen bestimmt werden.

4 State-of-the-art

Die Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie (PSI) ist eine radarbasierte Fernerkundungsmethode zur Messung von Deformationen der Erdoberfläche (Ferretti u. a., 2001). Dabei wird die Phase des komplexen Radarsignales verwendet, die präzise Informationen über den Abstand zwischen Bodenpunkt und Radarantenne enthält. Durch Verwendung von großen Bildstapeln können mittels statistischer Methoden diejenigen Punkte am Boden identifiziert werden, deren Rückstreuverhalten zeitlich stabil ist. Diese langzeitstabilen Rückstreuer (Persistent Scatterer oder PS-Punkte) werden für die Deformationsmessung verwendet.

Das Potential von PSI zum Erkennen und Messen von Bodenbewegungen ist in den letzten 15 Jahren durch eine Reihe von Fallbeispielen nachgewiesen worden (Bamler u. a. (2008); Crosetto u. a. (2010); Schenk und Westerhaus (2012); Anderssohn (2014)). Die Bandbreite reicht von der Beobachtung natürlicher Deformationsereignisse durch Erdbeben, Vulkanismus und Hangrutschungen bis hin zu kleinräumigen, anthropogenen Prozessen, die durch eine Bewirtschaftung des Untergrundes hervorgerufen werden (Rohstoffförderung, Grundwasserentnahme). Zu letzteren zählen auch lokale Deformationsphänomene im Zusammenhang mit aufquellenden Gipskeuperschichten, die in Deutschland vorwiegend in Baden-Württemberg auftreten (Grimm u. a., 2014).

Zu den Stärken der PSI-Methode gehören die hohe räumliche Dichte von Messpunkten sowie die im Vergleich zu terrestrischen Methoden kurze Wiederholzeit der Messungen. Beim Einsatz von C-Band Satelliten werden in urbanen Gebieten typischerweise 50 – 200 langzeitstabile, natürliche Rückstreuer (Persistent Scatterer, PS) pro

Quadratkilometer identifiziert. Außerdem kann durch die regelmäßige Erfassung großer Teile der Erdoberfläche auf ein umfangreiches Datenarchiv zurückgegriffen werden. Dadurch können der zeitliche und räumliche Ausgangspunkt von Deformationsereignissen, die Historie der Deformationsraten sowie die räumliche Ausdehnung von signifikanten Bewegungsfeldern bestimmt werden. Wenn 30 oder mehr Radarszenen eines Beobachtungsgebietes zur Verfügung stehen, kann durch Stapelverarbeitungstechniken eine Präzision¹ von 1 mm – 4 mm für Punktverschiebungen und 0.2 mm/Jahr - 0.6 mm/Jahr für Bewegungsraten erreicht werden (Bamler u. a. (2008); Crosetto u. a. (2010); Schenk (2014)).

Die PSI-Methode birgt aber auch Herausforderungen. So ist zum Beispiel bei einer räumlichen Auflösung des SAR-Systems am Boden von 5 m x 20 m (C-Band), die Lage bzw. das Phasenzentrum eines PS-Punktes im Allgemeinen nicht genau bekannt. Häufig fungieren Hausfassaden und -dächer als langzeitstabile Rückstreuer, sodass thermische Ausdehnung und Gebäudeneigungen als weitere Signalanteile zur Bodenbewegung hinzu treten können (Gernhardt u. a. (2009); Fornaro u. a. (2013); Schenk (2014)). Eine wichtige limitierende Größe für die Genauigkeit der abgeleiteten Bewegungen sind Laufzeitvariationen durch die Atmosphäre. Die Separierung der verschiedenen Anteile, die das interferometrische Signal ausmachen, ist die wesentliche Aufgabe der PS-Prozessierung. Ein wesentliches Charakteristikum der SAR-interferometrischen Daten ist deren Mehrdeutigkeit, da Phasenmessungen nur Werte zwischen $[-\pi, +\pi[$ annehmen können. Unabhängig von der verwendeten Software wird im Verlauf der Prozessierung die Phasenmehrdeutigkeit durch die sogenannte Phasenabwicklung beseitigt. Dabei können Fehler auftreten, die zu einer Über- oder Unterschätzung der abgeleiteten Bewegungsraten führen.

Signifikante nicht-lineare Bewegungsanteile, wie sie etwa beim Einsatz eines Hebungsereignisses innerhalb des Beobachtungsintervalls auftreten, können zu einer Verringerung der aufgefundenen PS-Punkte führen (Crosetto u. a., 2010). Die am GIK eingesetzte PS-Software StaMPS (Hooper u. a., 2007) verzichtet auf ein explizites a-priori Bewegungsmodell und trennt die wesentlichen Phasenterme auf der Basis räumlicher Korrelationen. Bei lokalen Bewegungsereignissen mit vergleichsweise großen horizontalen Deformationsgradienten kann dies wiederum zu einer Unterschätzung der abgeleiteten Bewegungsraten führen.

Zentrales Ergebnis der PSI-Prozessierung sind Zeitreihen, die die zeitlichen Veränderungen der Schrägentfernung zwischen Satellitenantenne und Bodenpunkt widerspiegeln. Nach Abspaltung aller relevanten Fehlerterme können durch Analyse der PS-Zeitreihen physikalische Ursachen für Bodenbewegungen besser verstanden und quantifiziert werden. Das Problem ist allerdings nicht eindeutig: unterschiedliche Bearbeiter mit unterschiedlicher Software werden zu abweichenden Ergebnissen kommen. Während der Laufzeit der vorliegenden Studie erschien ein für diese Problematik relevanter Artikel der Arbeitsgruppe aus Delft (Chang und Hanssen, 2016). Die Autoren schlagen darin einen probabilistischen Ansatz vor, mit dem auf Basis multipler Hypothesentests verschiedene physikalisch sinnvolle Bewegungsmodelle evaluiert und eine optimale Modellkombination bestimmt wird. Der Ansatz, konzipiert für das effiziente Testen einer großen Anzahl von Datenpunkten und Zeitreihen, ermöglicht unter anderem das Aufdecken von Beobachtungs- und Prozessierungsfehlern und erhöht damit die Zuverlässigkeit der abgeleiteten Modellparameter. Es wäre interessant, diese Methodik für ein lokales Bodenbewegungsereignis wie in Böblingen anzuwenden und unter anderem zu untersuchen, ob das optimale Modell auch das geeignetste Modell ist, um spezifische Fragestellungen zu diskutieren. Dies muss jedoch einer weiterführenden Studie vorbehalten bleiben.

¹ Unter "Präzision" wird im Folgenden die empirische Standardabweichung $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$ verstanden.

5 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der geplante Ablauf, sowie die tatsächliche Durchführung der Arbeiten im Rahmen des Vorhabens L7515001 werden im Folgenden tabellarisch dargestellt.

Tab. 5.1: Geplanter Ablauf der Arbeiten.

Zeitraum	Geplante Arbeiten
10.2015 - 03.2016	<ul style="list-style-type: none"> – Prozessierung der C-Band-Daten mit StaMPS/M-SBAS – Tests auf optimale Parametereinstellung – Darstellung und erste Interpretation der Zwischenergebnisse, getrennt für jeden Beobachtungstreifen (Zeitreihen, Deformationskarten).
31.03.2016	Zwischenbericht 1
04.2016 – 09.2016	<ul style="list-style-type: none"> – Überprüfung der Datensätze benachbarter Tracks auf identische Punkte. – Interpolation auf ein gemeinsames Gitter und Kombination der Tracks. – Kombination der Tracks unter Berücksichtigung der Blickwinkeldifferenz. – Beurteilung von Präzision und Zuverlässigkeit der kombinierten PS-Zeitreihen.
30.09.2016	Zwischenbericht 2
10.2016 – 03.2017	<ul style="list-style-type: none"> – Zeitreihenanalyse mit BFAST. – Bestimmung des Hebungsbeginns, nach Möglichkeit Angabe von Vertrauensintervallen für Zeit- und Ausgangspunkt der Hebungen.
31.03.2017	Zwischenbericht 3
04.2017 - 07.2017	<ul style="list-style-type: none"> – Abschließende Arbeiten auf Basis der bisherigen Ergebnisse. – Implementierung des Ansatzes zur Datumsvereinheitlichung über Orbittransformation. – Vergleich mit Interpolationsansatz.
08.2017 – 09.2017	<ul style="list-style-type: none"> – Dokumentation der Vorgehensweise – Darstellung der Endergebnisse in Form von Zeitreihen und Karten (nach Abstimmung mit Projektpartnern)
30.09.2017	Abschlussbericht

Tab. 5.2: Übersicht über die durchgeführten Arbeiten. Der tatsächliche Ablauf weicht von der geplanten Durchführung ab.

Zeitraum	Durchgeführte Arbeiten
10.2015 - 12.2015	<ul style="list-style-type: none"> – Prozessierung der C-Band-Daten mit StaMPS. – Tests auf optimale Parametereinstellung. – Darstellung und erste Interpretation der Zwischenergebnisse für Track 251. – kinematisches Referenzmodell (Inversion via Grid Search).
21.12.2015	Zwischenbericht 1
01.2016 – 12.2016	<ul style="list-style-type: none"> – PSI-Prozessierung von Track 22. – Zeitreihenanalyse mit Shape Language Modeling (SLM). – Bestimmung statistischer Kenngrößen mittels Bootstrapping.
31.12.2016	Zwischenbericht 2
01.2017 – 07.2017	<ul style="list-style-type: none"> – stochastische Tests mit simulierten Datenreihen. – Modellierung des systematischen Fehlers.
14.02.2017	Treffen mit den Projektpartnern (Landratsamt Böblingen, LGRB, Airbus Defense & Space).
08.06.2017	Posterpräsentation auf ESA-Konferenz Fringe 2017.
08.2017 – 09.2017	<ul style="list-style-type: none"> – Überprüfung der Datensätze benachbarter Tracks auf identische Punkte. – Interpolation auf ein gemeinsames Gitter und Kombination der Tracks. – Beurteilung der Modellverbesserung durch die kombinierten PS-Zeitserien.
10.2017 – 01.2018	<ul style="list-style-type: none"> – Dokumentation der Vorgehensweise. – Darstellung der Endergebnisse in Form von Zeitserien und Karten. – Veröffentlichung im Rahmen der Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Bernhard Heck.
13.03.2018	Abschlussbericht

Die Abläufe aus Tabelle 5.1 und 5.2 unterscheiden sich im Wesentlichen in vier Punkten:

- Im Antrag wurde mit der Abgabe von drei Zwischenberichten geplant, es waren jedoch nur zwei erforderlich. Die Abgabe erfolgte jeweils zu den Jahresenden 2015 und 2016.
- Die Inhalte wurden in etwas veränderter Reihenfolge abgearbeitet. Dies betrifft insbesondere den Punkt der Kombination der Daten. Es hat sich herausgestellt, dass von vier möglichen Tracks nur zwei wirklich auswertbar sind (Track 251 und Track 22, beide mit absteigendem Orbit). Bei den verbleibenden beiden Tracks unterscheidet sich die Qualität deutlich, sodass nur Track (251) dazu verwendet wurde, belastbare Aussagen bezüglich der Aufgabenstellung zu treffen. Die Kombination von Track 251 und Track 22 wurde zu einem späteren Zeitpunkt realisiert.
- Die Zeitreihenanalyse wurde nicht wie ursprünglich geplant mit der Software BFAST (siehe Verbesselt u. a. (2010)), sondern mit einem Matlab-Tool namens "Shape Language Modelling (SLM)" (Autor: John d'Errico) durchgeführt. Es hat sich herausgestellt, dass BFAST nicht zur Bestimmung des zeitlichen Hebungsbegins geeignet ist, da es keine Zeitserien mit unregelmäßigen Abtastintervallen zulässt.
- Es wurden zusätzliche stochastische Tests durchgeführt.

6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wie in Tabelle 5.2 ersichtlich, fand im Februar 2017 im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Treffen der Projektpartner statt. Vertreten waren neben den Projektbearbeitern des KIT, das Landratsamt Böblingen, das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) und die Firma Airbus Defence & Space. Ziel dieses Treffens war es, alle beteiligten Stellen auf den aktuellen Stand der Arbeiten zu bringen und einen Austausch anzuregen. Wichtig für unsere Arbeiten waren unter anderem Informationen über die genaue Lage und Zeitpunkte der Geothermie-Bohrungen, welche uns im Nachgang des Treffens vom LGRB zur Verfügung gestellt wurden.

Zudem enthielt die Gutachter-Bewertung des zweiten Zwischenberichtes folgenden Kommentar: "Es wird angeregt, in den Ausblick des Berichts eine knappe kleinräumliche hydrogeologische Analyse zu integrieren, in der auch die unterirdischen Pfade des Wassers und dessen Verbreitungsgeschwindigkeit Erwähnung finden sollen." Ein kurzer Überblick über die hydrogeologischen Verhältnisse wird bereits im Sachstandsbericht des LGRB aus dem Jahr 2015 gegeben (siehe Koch u. a. (2015)). Da eine detailliertere Analyse unsere fachlichen und zeitlichen Kompetenzen überschreiten würde, haben wir kurz nach Erhalt des Gutachtens erneut Kontakt zum Landratsamt Böblingen aufgenommen, um in Erfahrung zu bringen ob intern bereits eine solche Untersuchung durchgeführt worden war. Dies war zu dem Zeitpunkt noch nicht der Fall, allerdings wurde uns mitgeteilt, dass diese Untersuchung ebenfalls von Interesse des Landratsamtes ist und sie aus diesem Grund die hydrogeologische Auswertung im Stadtgebiets Böblingen bei einer externen Fachfirma (Büro Vees) in Auftrag gegeben haben. Insbesondere lautet der Auftrag die Ursache der ungewöhnlichen Ausdehnungsform des südlichen Hebungsgebietes zu klären. Hierfür wichtige Untersuchungsgrößen sind geologische Störungen, die Mächtigkeiten der geologischen Schichten, sowie die Grundwasserströmung. Die Auswertung vom Büro Vees erfolgt mittels hydrogeologischen Messwerten aus den Jahren 1992 bis heute. Am 28. Februar 2018 fand ein Workshop zum Stand der Sanierungsarbeiten in Böblingen statt, auf dem das Büro Vees die Datenbasis vorgestellt und die geplante Vorgehensweise erläutert hat. Wir gehen davon aus, dass die zuständigen Bearbeiter ihre Resultate als öffentlich zugänglichen Bericht zur Verfügung stellen werden, sodass ein Vergleich mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie möglich ist.

7 Erzielte Ergebnisse

7.1 Datengrundlage

Es stehen 107 SLC-Radarszenen des C-Band Satelliten Envisat aus vier benachbarten, auf- und absteigenden Orbits (aufsteigend: von Süden nach Norden fliegend, absteigend: von Norden nach Süden fliegend) im Archiv der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA) für die Untersuchung zur Verfügung. Aufgrund von technischen Gegebenheiten konnten nicht alle Szenen in der PS-Prozessierung verwendet werden. Insbesondere für die aufsteigenden Tracks standen zu wenig Szenen zur Verfügung, um die statistischen Verfahren der SAR-Interferometrie erfolgreich anwenden zu können. Aus diesem Grund wurde nur mit den absteigenden Orbits 251 und 22 gearbeitet und die Daten im Kontext der PS-Prozessierung ausgewertet (die genaue Beschreibung der Vorgehensweise bei der Auswertung folgt im Unterkapitel 7.2). Die nachfolgende Abbildung 7.1 gibt einen Überblick über die geographische Lage der auswertbaren Satellitentracks, während Tabelle 7.1 die Anzahl an ausgewerteten Szenen anzeigt.

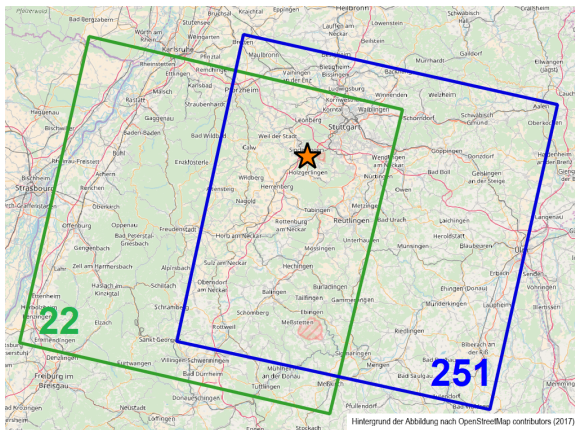


Abb. 7.1: Übersicht über die Lage der auswertbaren Envisat-Tracks.

Tab. 7.1: Anzahl der in der Prozessierung verwendeten SAR-Szenen.

Track	Anzahl an ausgewerteten Szenen	Bemerkung
251	32	Absteigender Orbit
22	30	Absteigender Orbit
215	16	Aufsteigender Orbit; zu wenig Szenen
444	12	Aufsteigender Orbit; zu wenig Szenen

7.2 PSI-Prozessierung

7.2.1 Vorgehensweise

Die Datenprozessierung erfolgte nach der Methode der Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie (PSI) auf Basis der wissenschaftlichen Softwarepakete DORIS (Kampes u. a., 2003) und StaMPS (Hooper u. a., 2007). Die Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie ist eine radarbasierte Methode zur Messung von Deformationen der Erdoberfläche. Dabei wird die Phase des zurückgestreuten Radarsignales verwendet, um präzise Informationen über den Abstand zwischen Bodenpunkt und Radarantenne zu erhalten. Durch Verwendung von großen Bildstapeln können mittels statistischer Methoden diejenigen Punkte am Boden identifiziert werden, deren Rückstreuverhalten zeitlich stabil ist. Diese langzeitstabilen Rückstreuer (Persistent Scatterer oder PS-Punkte) werden für die Deformationsmessung verwendet. Wenn 30 oder mehr Radarszenen eines Beobachtungsgebietes zur Verfügung stehen, kann eine Präzision von 1 mm – 4 mm für Punktbewegungen und 0.2 mm/Jahr - 0.6 mm/Jahr für Bewegungsraten erwartet werden. Bei weniger als 20 Szenen nimmt das Messpunktrauschen deutlich zu. Es muss dann im Einzelfall geprüft werden, ob die Datenqualität für eine sinnvolle Bewegungsanalyse ausreicht.

Die wesentliche Aufgabe der PS-Prozessierung ist eine Separierung der verschiedenen Anteile, die das interferometrische Signal ausmachen. Neben dem gesuchten Deformationssignal handelt es sich dabei im Wesentlichen um (1) die topographische Höhe des Punktes über dem Referenzellipsoid, (2) atmosphärische Laufzeitvariationen, und (3) das Phasenrauschen. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist die Beseitigung der Phasenmehrdeutigkeit durch die sog. Phasenabwicklung (*unwrapping*). Zur Reduzierung des topographischen Phasenanteils wurde zu Beginn der Analyse ein SRTM-3-Geländemodell (*Shuttle Radar Topography Mission*) eingeführt. Szenen mit außergewöhnlich starken atmosphärischen Phasensignalen wurden nach einem ersten Durchlauf aussortiert. Hauptbestandteil der ersten Arbeitsphase waren umfangreiche Tests zur Bestimmung optimaler Parametereinstellungen. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um die verwendeten Filter- und Interpolationsansätze, räumliche und zeitliche Filterlängen sowie die Größe der Interpolationsgitter, die jeweils an die spezifischen Gegebenheiten eines Untersuchungsgebietes angepasst werden müssen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der PS-Prozessierung ist das sogenannte *Weeding*. In diesem Schritt werden Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den gefundenen PS-Punkten ausgewertet, um redundante Punkte (unmittelbar nebeneinander liegende, als PS-Punkte eingestuft Punktechos, die jedoch vom selben physikalischen Rückstreuer stammen) und/oder Einzelpunktbewegungen aufzuspüren und zu beseitigen. Ziel ist es, eine PS-Punktdichte zu finden, die einerseits das Bewegungsgebiet ausreichend abdeckt und sich andererseits auf möglichst verlässliche Punkte stützt.

Ein wesentliches Charakteristikum der interferometrischen SAR-Daten ist deren Mehrdeutigkeit. Phasenmessungen können nur Werte zwischen $[-\pi, +\pi[$ annehmen. Die Phasenmehrdeutigkeit wird im Verlauf der Prozessierung durch die Phasenabwicklung beseitigt, deren Grundannahme darin besteht, dass sich die Phasendifferenzen zwischen zwei räumlich oder zeitlich benachbarten Punkten auf dieses Intervall beschränken. Durch hohes Phasenrauschen, große horizontale Deformationsgradienten oder große räumliche und zeitliche Punktabstände können dabei jedoch Fehler auftreten, die zu einer Über- oder Unterschätzung der abgeleiteten Bewegungsraten führen können. Derartige Fehler wurden bei der Analyse der Tracks 22 und 251 vor allem in den Jahren 2009 bis 2011 beobachtet, da für diesen Zeitraum nur wenige Aufnahmen vorliegen. Die Probleme konnten durch eine Reduzierung des Gitterabstandes zur Phaseninterpolation (StaMPS Parameter *unwrap_grid_size*) auf 20 m sowie durch eine Vergrößerung des Zeitfensters für die Bestimmung des Phasenrauschens (StaMPS Parameter *unwrap_time_win*) auf 360 Tage (default: 730 Tage) weitgehend gelöst werden. Lediglich bei einigen Punkten im Zentrum des südlichen Hebungsgebietes wird die Phasenmehrdeutigkeit der zeitlich letzten Aufnahme nicht korrekt gelöst (Abbildung 7.2).

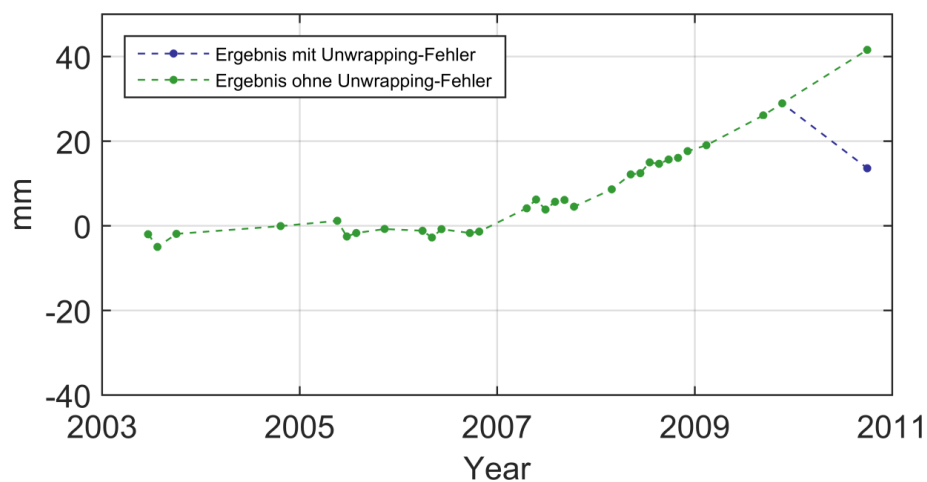


Abb. 7.2: Beispiel für einen Fehler bei der Phasenabwicklung (unwrapping error). Der Wert des letzten Datenpunktes (blau) ist deutlich zu klein. Nach Addition eines Korrekturwertes von 28 mm (entsprechend eines Phasensprungs von 2π) liegt er im Trend der vorhergehenden Datenpunkte (grün).

Im Hinblick auf die Interpretation der Ergebnisse gilt es zu beachten, dass der Satellit die Schrägentfernung (Line-of-Sight, LoS) zwischen SAR-Antenne und Bodenpunkt misst. Das Messsignal enthält daher sowohl vertikale als auch horizontale Verschiebungskomponenten, die nur auf Basis von Zusatzinformationen getrennt werden können. Wenn im Folgenden von „Hebungen“ gesprochen wird, ist damit immer die Bewegung in Schrägentfernung gemeint. Da zur Vermeidung von räumlichem Aliasing vor der Analyse eine zweifache Überabtastung der SAR-Szenen vorgenommen wurde, ist jeder PS-Punkt repräsentativ für ein 2 m x 10 m großes Areal am Untergrund.

7.2.2 Ergebnisse

Die Abbildungen 7.3 und 7.4 zeigen einen Ausschnitt des Stadtgebietes Böblingen mit den entsprechend ihrer mittleren Bewegungsrate eingefärbten PS-Punkten. Dargestellt sind die Ergebnisse von Track 251 und von Track 22. Die Unterschiede zwischen den beiden Auswertungen treten deutlich hervor. Für Track 22 werden deutlich weniger PS-Punkte gefunden, und die Hebungsraten sind etwas geringer. Da die Prozessierungsparameter gleich gewählt wurden, ist die Ursache für diese Diskrepanz nicht ganz klar. Die geringe Anzahl an PS-Punkten lässt auf ein höheres Rauschen in den Rohdaten auf Track 22 schließen. Vermutlich spielen die unterschiedlichen Aufnahmegeometrien bzw. Blickwinkel während des Überflugs dabei eine Rolle, oder auch eine ungünstige Verteilung atmosphärischer Störungen. Aufgrund der höheren Punktdichte und der offensichtlich besseren Qualität haben sich unsere Auswertungen im weiteren Projektverlauf überwiegend auf Track 251 konzentriert.

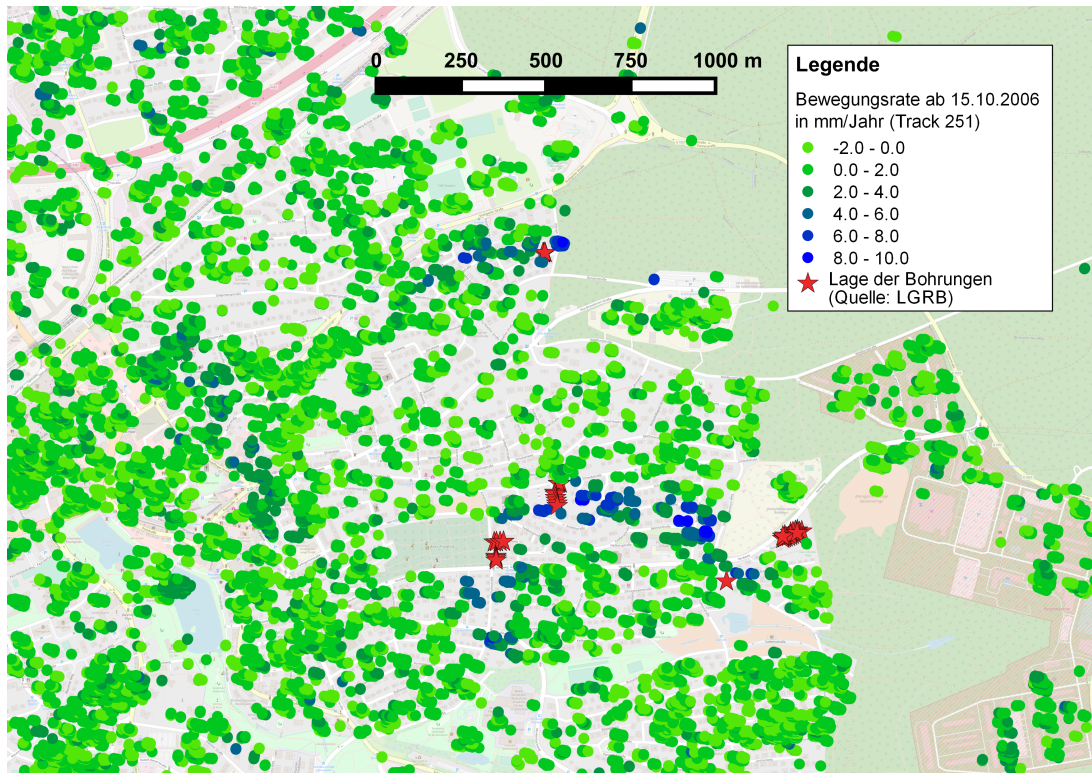


Abb. 7.3: Ergebnisse der PS-Prozessierung von Track 251 (32 Szenen). Dargestellt sind die linearen Hebungen der PS-Punkte ab dem 15. Oktober 2006.

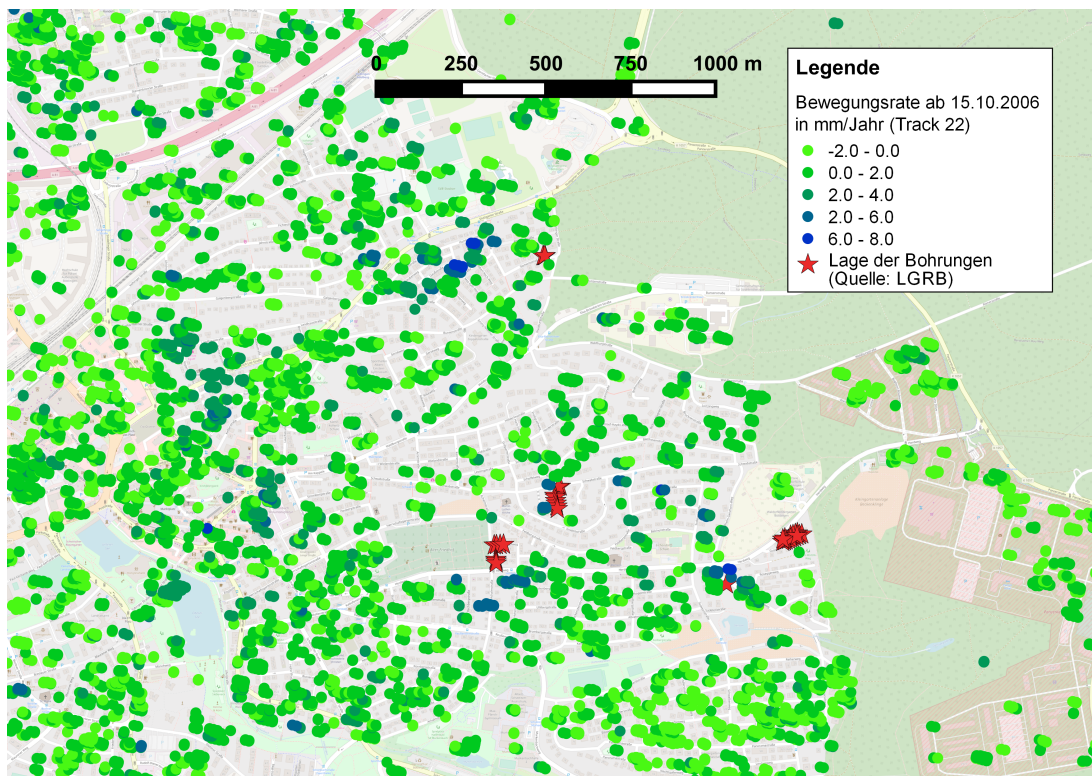


Abb. 7.4: Ergebnisse der PS-Prozessierung von Track 22 (30 Szenen). Dargestellt sind die linearen Hebungen der PS-Punkte ab dem 15. Oktober 2006.

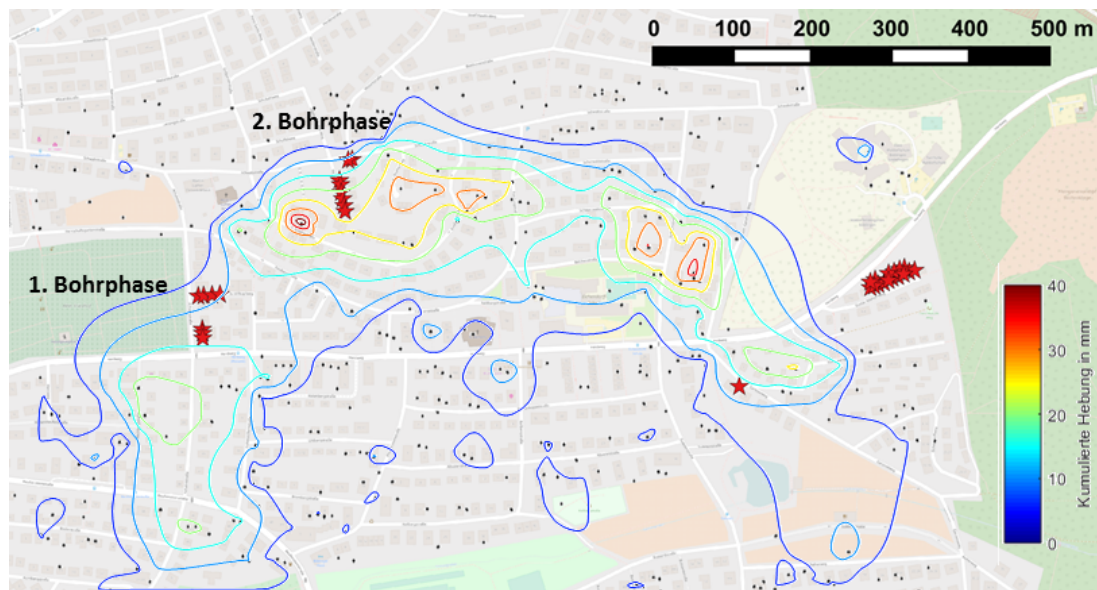


Abb. 7.5: Kumulative Verschiebungen im südlichen Hebungsgebiet. Die maximalen Verschiebungen liegen in den Bereichen Kniebisstraße/Heinrich-Heine-Weg und nördl. Sudetenstraße/Wilhelm-Ganzhorn-Weg. Die schwarzen Punkte entsprechen den verwendeten PS-Punkten zur Erstellung des Contour-Plots.

Abbildung 7.5 zeigt die Gesamtverschiebung im südlichen Hebungsgebiet zum Zeitpunkt der letzten Radarszene am 01.10.2010. Die Darstellung basiert auf den SLM-Modellen der PS-Punkte aus Track 251, welche kumulativ aufaddiert und anschließend mit Hilfe eines Contour-Plots interpoliert wurden. Die Abstände zwischen den Isolinien betragen jeweils 5 mm. Die Maxima liegen in der Nähe des Heinrich-Heine-Weges und der nördlichen Sudetenstraße und fallen mit den größeren Schadensgebieten zusammen.

7.3 Modellierung des Hebungsbeginns

7.3.1 Funktionales Modell

Kernziel des Projektvorhabens ist die Bestimmung des zeitlichen und räumlichen Hebungsbeginns im Stadtgebiet Böblingens. Diese Aufgabe wird durch Anpassung eines kinematischen Modells r_{mod} an die Daten gelöst:

$$r_{mod} = \begin{cases} 0, & \text{für } t < T \\ v \cdot (t - T), & \text{für } t \geq T \end{cases} \quad (7.1)$$

Im Zuge einer Inversionsrechnung oder alternativer Verfahren zur Anpassung einer mathematischen Funktion an die Messdaten werden Hebungsbeginn T und Hebungsrate v bestimmt. Die physikalische Realisation des Modells ist eine im elastischen Halbraum eingebettete Druck- oder Volumenquelle, die zum Zeitpunkt T aktiviert wird. Die Erdoberfläche wird sich in diesem Fall ohne Zeitverzug deformieren; die Deformationsraten hängen von der Rate, mit der Druck oder Volumen im Untergrund anwachsen, sowie dem Abstand eines Beobachtungspunktes vom Zentrum der Quelle ab. Über eine Aneinanderreihung solcher (punktförmiger) Quellen können im Prinzip beliebige Deformationsmuster an der Oberfläche modelliert werden. Das Modell (7.1) hat gegenüber komplexeren Erklärungsmöglichkeiten verschiedene Vorzüge:

- Es erklärt die Daten ausreichend gut (die Verteilungsfunktion des Residuums widerspricht nicht der Annahme einer Normalverteilung).
- Es erklärt die Daten nur unwesentlich schlechter als komplexere Modelle mit einer höheren Anzahl anzupassender Parameter.

- c) Im Gegensatz zu Modellen mit höheren Polynomgraden liefert es einen definierten Zeitpunkt für den Beginn des Hebungseignisses.
- d) Es widerspricht nicht den physikalischen Vorstellungen. Es gibt beispielsweise keine Anhaltspunkte dafür, dass sich das durch den Quellvorgang im Untergrund ausgelöste Hebungseignis an Messpunkten in einiger Entfernung zu den Bohrungen über allmählich zunehmende Hebungsraten manifestieren müsste.

Nach dem Prinzip vom *Ockhams Rasiermesser*, nach dem von mehreren Modellen für ein und denselben Sachverhalt die einfachste Variante vorzuziehen sei, haben wir uns daher für dieses Modell entschieden, da es zudem klare Aussagen zur Ausgangsfragestellung der Untersuchungen ermöglicht. Wir verwenden dieses Modell, um die Präzision, mit der sich der Startzeitpunkt des Hebungseignisses eingrenzen lässt, zu quantifizieren. Einschränkend ist zu erwähnen, dass Aussage (a) strenggenommen nur bis Ende des Jahres 2008 gilt. Im Zuge der zweiten Bohrphase im November 2008 wird an einigen Punkten eine starke Zunahme der Hebungsraten beobachtet. Dies kann in Ausnahmefällen dazu führen, dass das Residuum nach Abzug des Modells r_{mod} die Kolmogorov-Smirnov Teststatistik auf Normalverteilung nicht erfüllt. In den Abschnitten 7.4.2 und 7.4.3 werden entsprechende Modifikationen des Modells zur Beantwortung dieser und weiterer Fragestellungen diskutiert.

7.3.2 Anpassung des Bewegungsmodells an die Daten über ein Grid-Search-Verfahren

Als Referenzmethode wurde ein Inversionsansatz verwendet, bei dem der zwei-dimensionale vT -Parameterraum schrittweise durchlaufen wurde. Drei beispielhafte PS-Zeitreihen aus dem südlichen Gebiet (S1, S2, S3) wurden nach diesem Ansatz analysiert (siehe Abbildung 7.6). Sie zeigen eine im vierten Quartal 2006 einsetzende positive Bewegung mit Raten zwischen 4 mm/Jahr und 10 mm/Jahr. Das Signalrauschen beträgt 1.5 mm bis 2.2 mm und kann als befriedigend eingestuft werden.

Abbildung 7.7 zeigt die aus der Inversion berechneten empirischen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen $f(T, v)$:

$$f(v, T) = k \cdot \exp\left(-0.5 \cdot \frac{\sum_i (r_{obs,i} - r_{mod,i})^2}{\sigma_{obs}^2}\right)$$

mit: k = Normalisierungsfaktor, $r_{obs,i}$ = Beobachtungen, σ^2 = Varianz der Beobachtungen.

Standardabweichungen für den Hebungsbeginn T und die Rate v wurden mit Hilfe der marginalen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen $f_T(T)$ und $f_v(v)$ bestimmt, die jeweils einer Normalverteilung sehr nahe kommen. Danach kann der Beginn des Hebungseignisses mit einer Unsicherheit von ± 29 Tagen bis ± 66 Tagen bestimmt werden; die Unsicherheit der Ratenbestimmung liegt zwischen 0.36 mm/Jahr und 0.64 mm/Jahr.

Die wesentlichen Ergebnisse der Inversionsrechnung zur Anpassung des einfachen Bewegungsmodells sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst. Die Ergebnisse werden hier mit der im weiteren Verlauf verwendeten Methode "SLM&Bootstrap" verglichen, welche im kommenden Abschnitt 7.3.3 beschrieben wird.

7.3.3 Anpassung des Bewegungsmodells mit dem Matlab-Programmpaket „Shape Language Modelling“

Laut Projektantrag war es ursprünglich vorgesehen, die Software BFAST (Verbesselt u. a., 2010) für die quantitative Bestimmung möglicher Trendänderungen in den PSI-Zeitreihen einzusetzen. Basierend auf der nicht-proprietären Programmierplattform R für statistische Anwendungen vereinigt BFAST die Dekomposition einer Zeitreihe in Trend, saisonale Variationen und Restsignal mit Methoden zur Detektion von plötzlichen Veränderungen. In ersten Voruntersuchungen hat sich jedoch gezeigt, dass BFAST nicht für Zeitreihen mit ungleichmäßigen Aufnahmezeitpunkten geeignet ist. Eine Anpassung des Programms an diesen Fall hätte zusätzlichen Aufwand bedeutet. Wir haben uns daher dafür entschieden, das Programmpaket SLM (Shape Language Modelling, D'Errico (2017)) einzusetzen. Bei SLM handelt es sich um eine Matlab Toolbox, die via Fileexchange unter dem Link <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24443-slm-shape-language-mode>

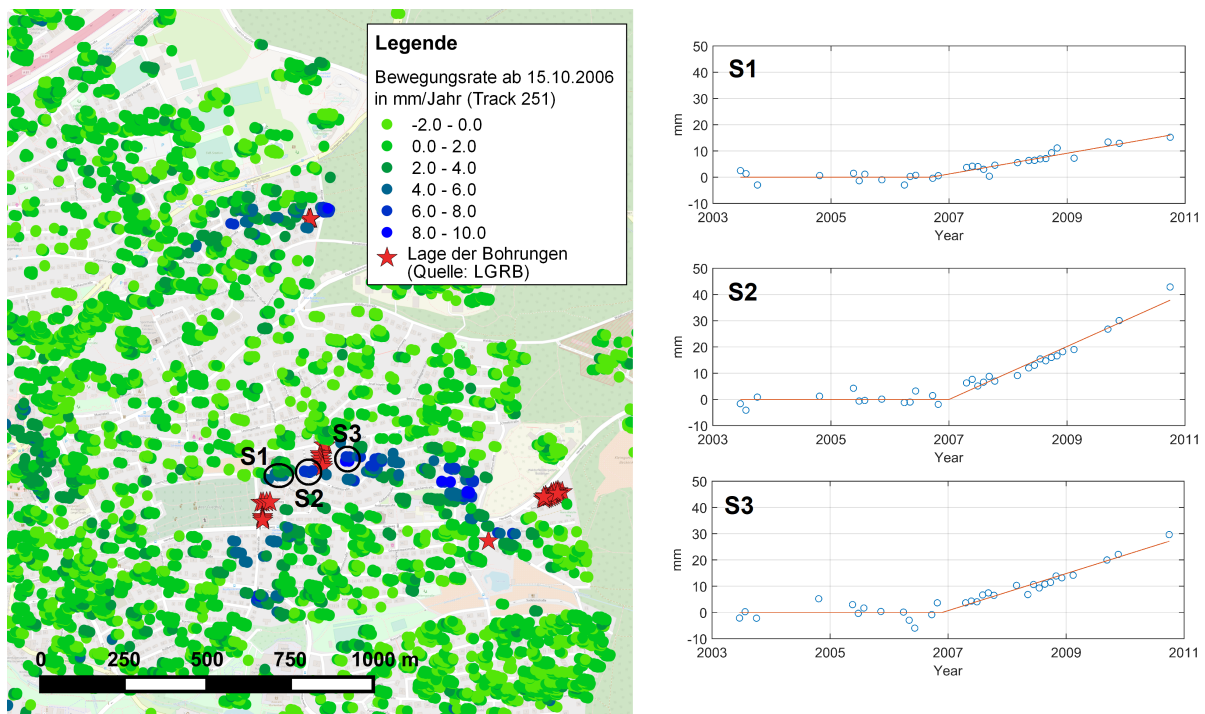


Abb. 7.6: Drei Beispiel-Zeitreihen im südlichen Hebungsbiet. Die roten Linien zeigen ein einfaches Bewegungsmodell, das bestmöglich an die gegebenen LOS-Verschiebungen (blaue Punkte) angepasst wurde.

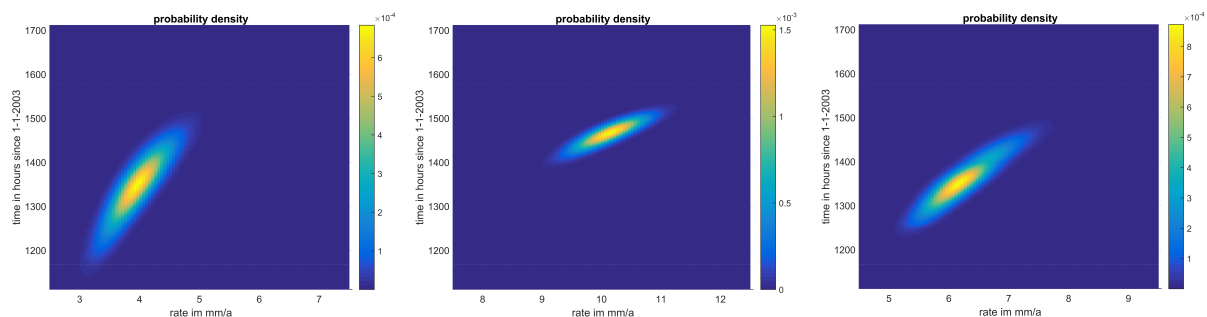


Abb. 7.7: Empirische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der drei Beispiel-Zeitreihen S1, S2 und S3 (von links nach rechts) aus Abbildung 7.6, die aus der Dateninversion nach den zwei Parametern Hebungsbeginn T und Hebungsrate v abgeleitet wurden.

ling abgerufen werden kann. Das Copyright liegt bei dem Autor der Software, John D'Errico. SLM ist frei verfügbar, setzt aber die kommerzielle Programmierumgebung Matlab ab Release R2014b voraus.

Das in SLM implementierte Werkzeug sind kubische Splines (*least squares splines*), die grundsätzlich eine sehr flexible Modellierung von Beobachtungszeitreihen ermöglichen. Das wesentliche Konzept der Software besteht jedoch darin, dass der Nutzer die Form der Modellkurven vorgeben und damit Vorinformation in den Anpassungsprozess einfließen lassen kann. Die Vorgaben können sehr einfach oder auch sehr detailliert gehalten werden, sie betreffen u.a. den Grad der Splines, die Anzahl und Lage der Knoten, Monotonie oder Differenzierbarkeit. Die Modellkurve wird unter Beibehaltung der vorgegebenen Form optimal an die Daten angepasst. Damit wird der Nutzer in die Lage versetzt, nicht nur mathematische Funktionen wie z.B. Polynome an die Daten zu fiten, sondern gezielt Hypothesen über die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse an den Daten zu testen. Beispiele für solche Tests finden sich in diesem Abschnitt, sowie in den Abschnitten 7.4.2 und 7.4.3.

Das angenommene Bewegungsmodell r_{mod} (siehe Gleichung 7.1) lässt sich als Vorgabe in SLM realisieren. Dazu wird der Grad der Splines zu Eins gesetzt, sodass nur lineare Segmente erlaubt sind. Die Anzahl der Segmente wird durch die Zahl der sogenannten Knoten zwischen Anfangs- und Endpunkt der Zeitreihe bestimmt. Für unser einfaches Bewegungsmodell r_{mod} wurde ein Knoten vorgegeben, dessen genaue Lage nicht festgelegt wurde. Da-

Tab. 7.2: Vergleich der Ergebnisse aus dem Inversionsansatz mit denen die mit Hilfe der SLM Toolbox und anschließendem Bootstrapping bestimmt wurden. Die Vorgehensweise des zweiten Ansatzes wird in Abschnitt 7.3.3 detailliert beschrieben. Für die Gegenüberstellung beider Ansätze wurden beispielhaft drei PS-Punkte aus dem südlichen Hebungsgebiet näher betrachtet.

	S1		S2		S3	
	SLM &Bootstrap	Inversion	SLM &Bootstrap	Inversion	SLM &Bootstrap	Inversion
Knickpunkt	14.09.06	12.09.06	05.01.07	05.01.07	22.11.06	28.11.06
Std in Tagen	82	66	53	36	64	64
Trend in mm/Jahr	3.99	3.95	10.16	10.10	7.05	7.05
Std in mm/Jahr	0.37	0.36	0.57	0.57	0.55	0.65
Mittleres Rauschen in mm 2003–2006	1.67		2.21		2.98	

mit besteht das SLM-Modell aus zwei linearen Segmenten, wobei zusätzlich die Steigung des ersten Segmentes zu Null gesetzt wurde. Aufgabe der Software ist es damit, die Lage des Knotens (= Hebungsbeginn T) und die Steigung des zweiten Segmentes (= Hebungsrate v) optimal an die Datenreihen anzupassen. Ein Beispiel, wie so eine an die Daten angepasste Funktion aussieht, ist in der nachfolgenden Abbildung 7.8 zu sehen. Die Ergebnisse, die mit dem Inversionsansatz erzielt wurden, dienen als Basis für einen Vergleich mit SLM.

Ungeachtet der hohen Flexibilität und der Vielfältigkeit der Anwendungen liefert der SLM-Algorithmus keine Genauigkeitsangaben für die angepassten Modellparameter. Die Ableitung von Vertrauensmaßen für den Beginn und die Rate des Hebungsereignisses in Böblingen sind aber integraler Bestandteil unseres Projekts. Um dieses Problem zu lösen, werden die Genauigkeitsangaben a-posteriori auf der Basis eines Bootstrapping-Verfahrens ermittelt.

Bootstrapping ist eine Methode zur Schätzung statistischer Kenngrößen wie Varianz oder Vertrauensintervalle, wenn die zugrundeliegende theoretische Verteilungsfunktion nicht bekannt ist. Grundlage ist eine einzige Stich-

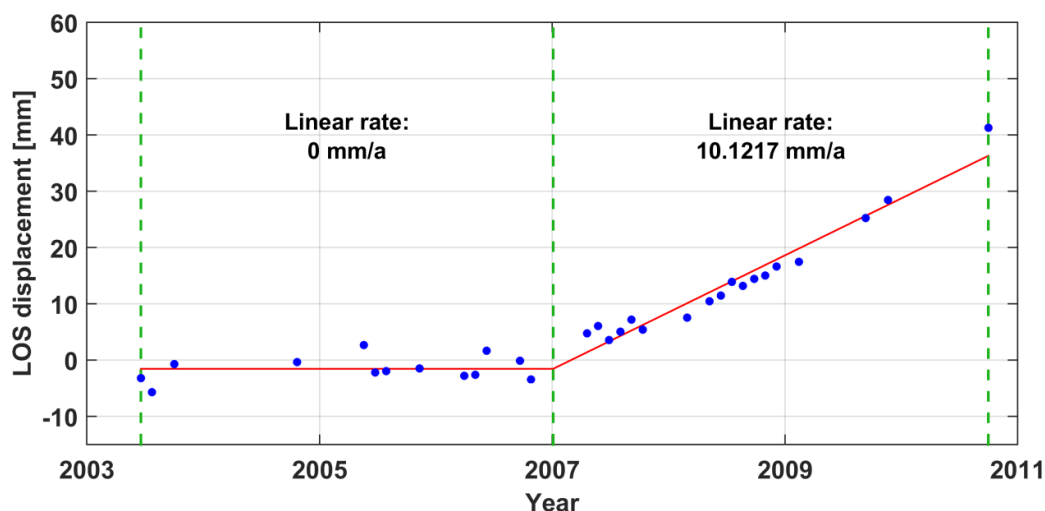


Abb. 7.8: Exemplarische PS-Punkt-Zeitreihe aus dem südlichen Hebungsgebiet. Hebungsbeginn und -rate wurden mit Hilfe der SLM-Toolbox bestimmt. Vorgegeben wurden die Anzahl an Knotenpunkten (1), sowie die Form der Segmente (linear). Außerdem wurde die erste Rate auf 0 mm/Jahr fixiert. Nach diesen Angaben findet das SLM-Tool eine Trendänderung am 4. Januar 2007 und eine lineare Rate von rund 10 mm/Jahr ab diesem Zeitpunkt.

probe, aus der durch Ziehen mit Zurücklegen eine große Anzahl weiterer Stichproben generiert wird. Für jede Stichprobe wird ein Wert für die interessierende Zufallsvariable (in unserem Fall Hebungsbeginn T und Hebungsrate ν) ermittelt, und aus der Gesamtheit der Ergebnisse werden empirische Verteilungsfunktionen für die interessierenden Größen bestimmt. Die empirischen Verteilungsfunktionen ersetzen die unbekannte theoretische Verteilung (Chernick, 1999).

Es existieren verschiedene Bootstrapping-Varianten. Nach eingehenden Tests haben wir uns für das sog. Residuen-Bootstrapping entschieden. Dabei wird zunächst das Modell \hat{y} an die Daten y angepasst und das Residuum e berechnet:

$$e_i = y_i - \hat{y}$$

Im nächsten Schritt wird durch Ziehen mit Zurücklegen ein synthetisches Residuum \hat{e}_j erzeugt, wobei j jeweils zufällig aus der vollständigen Liste für den Index $i = 1, \dots, m$ gewählt wird. Das dergestalt umsortierte Residuum wird auf das Modell addiert, und es wird eine synthetische Beobachtungsreihe \hat{y}_i^* generiert:

$$\hat{y}_i^* = \hat{y}_i + \hat{e}_j$$

Nun wird der Optimierungsschritt wiederholt. Das Modell \hat{y} wird an die synthetische Datenreihe \hat{y}_i^* angepasst, und es werden die interessierenden Parameter erneut bestimmt. Der Vorgang wird sehr häufig wiederholt bis eine aussagekräftige empirische Verteilungsfunktion für jeden Parameter vorliegt, aus der die gesuchten statistischen Größen wie Mittelwert und Varianz abgelesen werden können.

Für den Vergleich mit dem Inversionsansatz wurden für das Bootstrapping je 1000 Durchläufe für die drei schon zuvor verwendeten exemplarischen Zeitreihen angesetzt. Die erhaltenen Standardabweichungen sind für die Hebungsrate praktisch identisch mit den Inversionsergebnissen (siehe Tabelle 7.2). Für den Hebungsbeginn tendiert das Verfahren zu etwas größeren Unsicherheitswerten, die jedoch mit Blick auf das mittlere Samplingintervall der Messdaten (86 Tage) noch im Rahmen der Erwartungen liegen. Der Vergleich zeigt, dass sich über Bootstrapping Genauigkeitsmaße ableiten lassen, deren Aussagekraft derjenigen des Inversionsansatzes nicht nachsteht. Allerdings geht mit dem nachgelagerten Bootstrapping der Geschwindigkeitsvorteil des SLM-Verfahrens weitgehend verloren, zumindest für das einfache 2-Parametermodell. Bei Modellen mit mehreren Parametern wird SLM mit anschließendem Bootstrapping dagegen wieder an Schnelligkeit gewinnen, da das Abtasten eines mehrdimensionalen Parameterraumes den rechnerischen Aufwand der Inversion deutlich erhöht.

7.3.4 Stochastische Eigenschaften der Modellparameter

Für eine sinnvolle Interpretation der Resultate des Inversionsansatzes oder der Kurvenanpassung mit SLM ist die Kenntnis der stochastischen Eigenschaften der abgeleiteten Modellparameter notwendig. Im folgenden werden mit Hilfe von synthetischen Rauschmodellen statistische Kenngrößen des nach Gleichung 7.1 formulierten Problems beschrieben und modelliert. Anschließend wird überprüft, inwieweit der Lösungsansatz über SLM inklusive des Bootstrapping Verfahrens die Statistik adäquat repräsentiert.

Beschreibung des synthetischen Experimentes

Grundlage der synthetischen Experimente ist das Modell r_{mod} nach Gleichung 7.1, dem rechnerisch ein normalverteiltes Zufallssignal überlagert wird. Einem vorausgehenden Hypothesentest nach Kolmogorov-Smirnov zufolge verstoßen nur sehr wenige der durch Bootstrapping erzeugten Residuen gegen die Null-Hypothese, sodass die Annahme einer Normalverteilung gerechtfertigt erscheint. Für die zeitliche Diskretisierung des Modells wurden die tatsächlichen Aufnahmezeitpunkte der SAR-Szenen oder realistische Annahmen für künftige Satellitenmissionen zugrunde gelegt. Um eine Kontamination durch die mögliche Beschleunigung des Hebungsvorganges nach der zweiten Bohrphase zu vermeiden (Abschnitt 7.4.2), wurden nur Akquisitionszeitpunkte bis Ende 2008 verwendet (26 für Track 251, 50 für die Kombination der beiden Tracks 251 und 22). Der Beginn des Hebungserignis-

ses wurde im Modell auf den 15.10.2006 festgelegt, die Hebungsrate wurde schrittweise über den Bereich von 3 mm/Jahr bis 30 mm/Jahr variiert.

Es wurden zahlreiche Experimente durchgeführt, die die Abhängigkeit der gesuchten Modellparameter von der Hebungsrate, der Rauschamplitude und der Akquisitionsrate der Radarbilder untersuchen. Jedes Experiment besteht aus fünf Durchläufen, wobei pro Durchlauf für jede vorgewählte Hebungsrate 500 synthetische Messreihen erzeugt und die Parameter T_i (Hebungsbeginn) und v_i (Hebungsrate) über SLM bestimmt werden ($i = 1 \dots 500$, Nummer der Stichprobe). Aus den 500 Realisierungen der Zufallsvariablen T_i und v_i wurden pro Durchlauf empirische Mittelwerte und Standardabweichungen $\sigma_{T,k}$ und $\sigma_{v,k}$ berechnet ($k = 1 \dots 5$, Nummer des Durchlaufs), anschließend wurden diese über alle Durchläufe gemittelt. Auf diese Weise wurden für jedes Experiment basierend auf 2500 Stichproben repräsentative Schätzungen der Erwartungswerte für Hebungsbeginn T und Hebungsrate v sowie deren Standardabweichungen σ_T und σ_v bestimmt. Es ist zu betonen, dass bei diesen Experimenten zunächst kein Bootstrapping angewendet wird, sondern das Rauschen für jede einzelne Stichprobe aus der Grundgesamtheit der Normalverteilung gezogen wird.

Abhängigkeit vom Messrauschen

Mit der ersten Modellsequenz zur statistischen Struktur des Problems wurde die Abhängigkeit der gesuchten Parameter vom Messrauschen σ_n untersucht. Zu diesem Zweck wurde die Standardabweichung des Modellrauschens in sieben Stufen von 1.7 mm auf 4.5 mm gesteigert. Abbildung 7.9 zeigt die Gesamtmittelwerte jedes Experimentes als Funktion der wahren Hebungsrate.

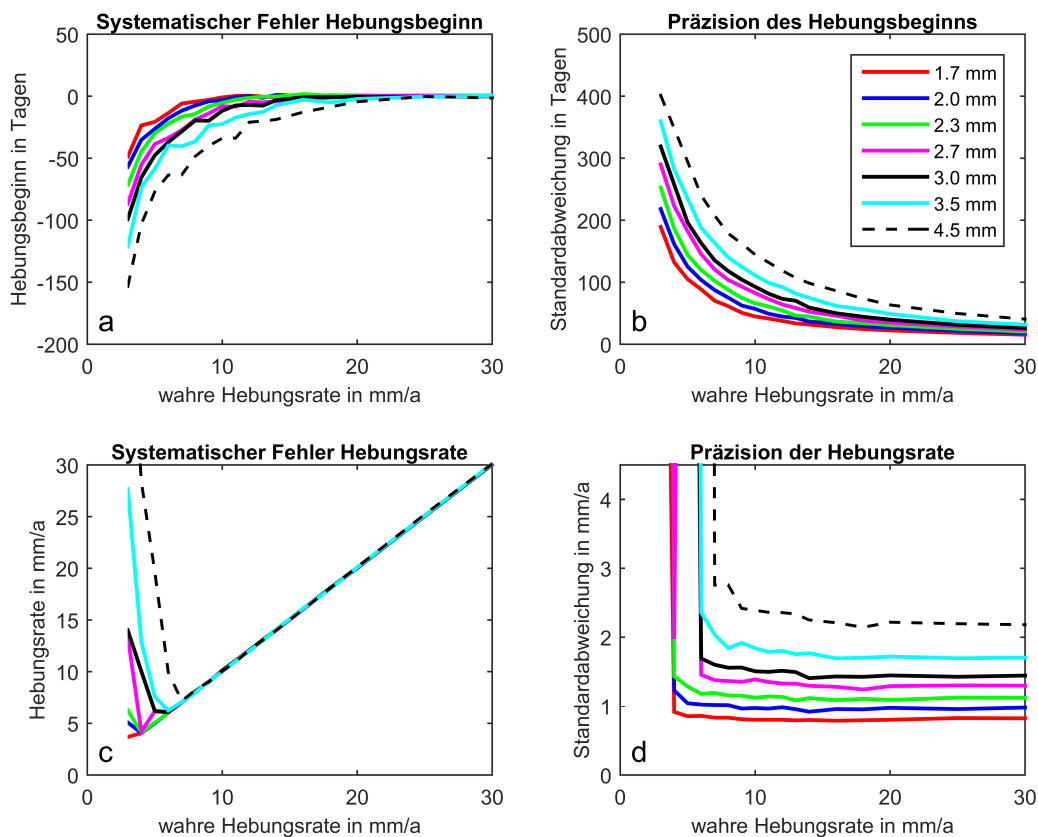


Abb. 7.9: Systematische Fehler (links) und Standardabweichungen (rechts) für den Hebungsbeginn und die geschätzte Hebungsrate als Funktion des Datenrauschens und der wahren Hebungsrate. Dargestellt sind die Mittelwerte aus 2500 Testläufen pro vorgewählter (wahr)er Hebungsrate. Tag 0 in (a) ist der Hebungsbeginn am 15.10.2006.

Wesentliches Ergebnis dieses Experimentes ist, dass die Hebungsrate oberhalb eines rauschabhängigen Schwellwertes zuverlässig mit annähernd gleichbleibender Präzision detektiert wird (Abbildungen 7.9c und 7.9d). Die Schwellwerte betragen 4 mm/Jahr für $1.7\text{mm} \leq \sigma_n \leq 2.3\text{mm}$, 6 mm/Jahr für $1.7\text{mm} \leq \sigma_n \leq 3.5\text{mm}$ und 7 mm/Jahr für $\sigma_n = 4.5\text{mm}$, die Standardabweichungen variieren rauschabhängig zwischen 0.85 mm/Jahr und 2.2 mm/Jahr, sind aber oberhalb des Schwellwertes weitgehend unabhängig von der wahren Hebungsrate. Im Gegensatz dazu weicht der Hebungsbeginn für Raten unterhalb von 10 mm/Jahr bis 20 mm/Jahr systematisch um bis zu -140 Tage vom Sollwert ab, erst für große Hebungsraten nähern sich die Ergebnisse dem wahren Wert an (Abbildung 7.9a). Die Standardabweichungen fallen über das ganze Untersuchungsintervall exponentiell von mehreren hundert Tagen auf unter 50 Tage ab (Abbildung 7.9b).

Der hier untersuchte statistische Prozess hat demnach die Eigenschaft, dass der im Zuge der Dateninversion geschätzte Hebungsbeginn in der Zeit systematisch verschoben wird und vor dem eigentlichen Beginn liegt. Bei einer Hebungsrate von 6 mm/Jahr betragen die Abweichungen rauschabhängig -13 Tage bis -63 Tage. Dieses Ergebnis muss bei der Interpretation der PSI-Beobachtungen berücksichtigt werden, um keine falschen Schlussfolgerungen zu ziehen. Die Ergebnisse aus vorangegangenen Untersuchungen belegen, dass dieses Ergebnis nicht von der verwendeten Methode (SLM oder grid search) abhängt, sondern in der Struktur des Problems selbst liegt.

Abhängigkeit vom Akquisitionsintervall

Eine Verdichtung der Aufnahmezeit führt zu einer konsistenten Schätzung der Hebungsparameter, da sowohl der systematische Fehler als auch die Standardabweichung des Hebungsbeginns mit kürzer werdendem Akquisitions-

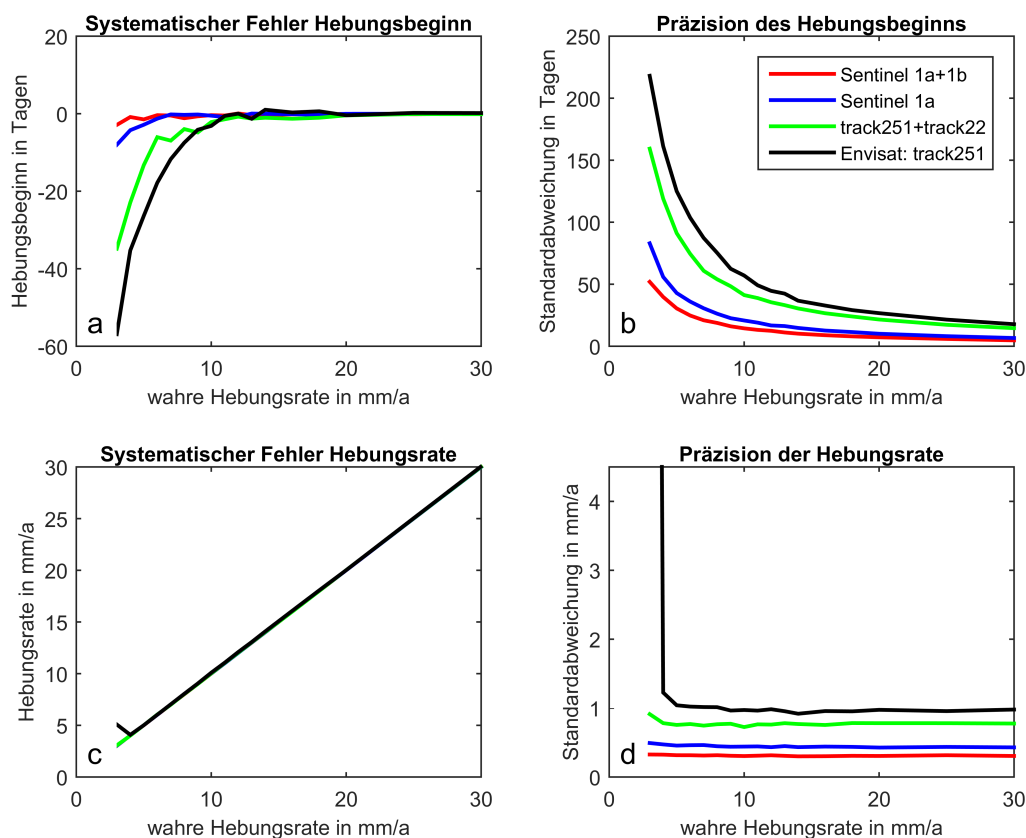


Abb. 7.10: Systematische Fehler und Standardabweichungen des Hebungsbeginns (oben) und der Hebungsrates (unten) als Funktion des Akquisitionsintervalls und der wahren Hebungsrates. Dargestellt sind die Mittelwerte aus 2500 Testläufen pro vorgewählter (wahrer) Hebungsrates. Es wurde ein normalverteiltes Rauschsignal mit $\sigma_n = 2.0\text{mm}$ angesetzt. Tag 0 in (a) ist der Hebungsbeginn am 15.10.2006.

Tab. 7.3: Regressionskoeffizienten a und b nach Anpassung des Modells 7.2 für die Envisat-Daten aus Track 251. R^2 steht für das korrigierte Bestimmtheitsmaß (*adjusted R-square*), n bezeichnet das Datenrauschen (einfache Standardabweichung)

	n=1.7	n=2.0	n=2.3	n=2.7	n=3.0	n=3.5	n=4.5
a in Tagen	110.3	115.5	134.7	139.7	161.8	165.8	191.5
b	0.1929	0.1694	0.1603	0.1364	0.1364	0.1165	0.09801
R^2	0.973	0.993	0.981	0.973	0.978	0.937	0.943

Tab. 7.4: Regressionskoeffizienten a und b nach Anpassung des Modells 7.2 für verschiedene Datenzeitreihen mit unterschiedlichen mittleren Akquisitionsintervallen. dt bezeichnet das mittlere Akquisitionsintervall, das Rauschniveau wurde auf 2.0 mm festgesetzt.

	Sentinel 1a	Sentinel 1a/1b	Envisat 251	Envisat 251+22 (kombiniert)
a in Tagen	24.09	3.487	115.5	80.01
b	0.2303	0.1224	0.1694	0.188
R^2	0.968	0.654	0.993	0.972
dt in Tagen	12	6	75	41

intervall deutlich abnehmen. Die Kombination der beiden benachbarten Envisat-Tracks 251 und 22 ergibt eine moderate Verbesserung, während der systematische Fehler bei Verwendung von ununterbrochenen Datenreihen der Satelliten Sentinel-1a und -1b mit Akquisitionsintervallen von jeweils 12 Tagen nicht mehr deutlich in Erscheinung tritt (Abb. 7.10).

Die besten Ergebnisse erhält man für eine Kombination der beiden Sentinel-Satelliten und der daraus folgenden Verkürzung des Akquisitionsintervalls auf 6 Tage. Für eine Hebungsrate von 6 mm/Jahr betragen systematischer Fehler σ_B und Standardabweichung σ_T des Hebungsbeginns im Falle des Envisat-Datenstapels -17.8 Tage und 103 Tage, bei Sentinel-1a entsprechend -1.3 Tage und 36 Tage. Für die Kombination der Sentinel-1a und -1b Daten lässt sich ein solches Hebungereignis mit einer Präzision von 25 Tagen bestimmen.

Modellierung der Ratenabhängigkeit

Für die konkrete Nutzung der Rauschuntersuchungen ist eine Modellierung der Ergebnisse notwendig. Dies gilt insbesondere für die systematische, rauschabhängige Verschiebung des Hebungsbeginns (Abb. 7.9a), die für die Interpretation der PSI-Beobachtungen von Bedeutung ist. Für die empirische Bestimmung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen der Verschiebung des Hebungsbeginns und der Standardabweichung wurde die aus der Statistik und Diffusionsproblemen bekannte Error-Funktion (*erf*) verwendet, die im Gegensatz zu anderen Funktionen wie beispielsweise der Exponentialfunktion konvergiert.

Über einen iterativen Regressionsansatz mittels des *curve-fitting* Tools von Matlab wurde zunächst ein Modell der Form

$$y = a \cdot (\text{erf}(b \cdot x) - 1) \quad (7.2)$$

an jede Kurve aus Abb. 7.9a angepasst und die Parameter a und b bestimmt. Aus den in Tabelle 7.3 und 7.4 zusammengefassten Ergebnissen können anschließend lineare Zusammenhänge zwischen b und a sowie zwischen a und σ_n abgeleitet werden:

$$b = -0.001065 \cdot a + 0.2993$$

$$a = 29.729 \cdot \sigma_n + 61.95$$

In beiden Fällen ist das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2 größer als 0.90, d.h. die abhängigen Variablen können zu über 90% durch das Modell erklärt werden (siehe dazu e.g. Fahrmeir u. a. (2007)). Damit ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der systematischen Verschiebung des Hebungsbeginns T_{shift} und der Hebungsrate v für eine gegebene Standardabweichung des Rauchens σ_N :

$$T_{shift}(v|\sigma_n) = a \cdot (\operatorname{erf}((-0.001065 \cdot a + 0.3) \cdot v) - 1)$$

mit:

$$a = 30 \cdot (\sigma_n + 2)$$

Eine gleichartige Untersuchung ergibt für den Zusammenhang zwischen T_{shift} und dem (mittleren) Akquisitionsintervall dt :

$$T_{shift}(v|dt) = a \cdot (\operatorname{erf}((-0.000675 \cdot a + 0.245) \cdot v) - 1)$$

mit:

$$a = \sqrt{2} \cdot dt + 6$$

Die Ergebnisse der Regressionsanalysen sind in den Abbildungen 7.11 und 7.12 grafisch zusammengefasst. Das Datenrauschen wurde dabei auf 2.0 mm festgesetzt. Durchgezogene Linien zeigen die Ergebnisse einer Modellierung des Fehlers auf Basis der Errorfunktion (siehe Gleichung 7.2). Eine multi-variate Betrachtung der gemeinsamen Abhängigkeit von T_{shift} von σ_n und dt bleibt weiterführenden Untersuchungen vorbehalten. Voraussetzung dafür sowie für die weitere Stabilisierung der bisherigen Ergebnisse sind umfangreiche zusätzliche Modellierungen des Rauschverhaltens.

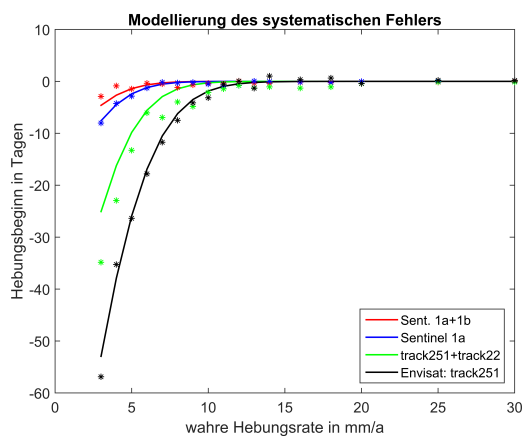


Abb. 7.11: Der systematische Fehler des Hebungsbeginns als Funktion des Akquisitionsintervalls und der wahren Hebungsrate (Punkte).

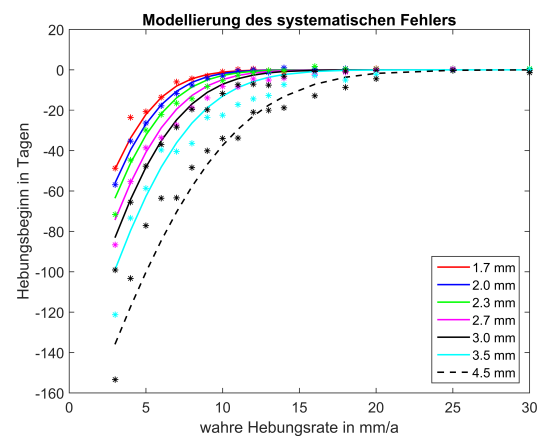


Abb. 7.12: Der systematische Fehler des Hebungsbeginns als Funktion des Datenrauschens und der wahren Hebungsrate für den Envisat-Track 251 (Punkte).

Bootstrapping

Im Gegensatz zu den synthetischen Modellierungen steht in der realen Welt für jeden Beobachtungspunkt nur eine einzige Messreihe (die an diesem Punkt aufgezeichnete Zeitreihe der Beobachtungen) zur Verfügung. In diesem Fall ist eine einmalige Bestimmung der Modellparameter T und v möglich, die entsprechend der Varianz des Prozesses zufällig vom wahren Wert abweichen werden. Eine Verbesserung des Resultates kann – unter bestimmten Voraussetzungen – nur über eine Mittelung über benachbarte Messpunkte erfolgen (siehe Abschnitt 7.4.1).

Mit Hilfe der synthetischen Modellierungen ist daher zunächst nur überprüfbar, ob Bootstrapping, durchgeführt an einer einzelnen Messreihe, in der Lage ist, die Standardabweichung des gegebenen Prozesses angemessen zu schätzen. Diese Frage ist insofern wichtig, da die Anzahl der Akquisitionszeitpunkte für einen einzelnen Envisat Beobachtungstreifen (26 für Track 251) eher am unteren Ende der für das Bootstrapping-Verfahren empfohlenen

Anzahl liegt (Chernick, 1999).

Für diese Rechnungen wurde die synthetische Modellierung dahingehend modifiziert, dass zunächst per SLM die Parameter T und ν für eine einzelne, zufällig verrauschte Modellzeitreihe bestimmt wurden. Anschließend wurde über 500-maliges Residuen-Bootstrapping eine Verteilungsfunktion und damit die Standardabweichung der beiden Parameter geschätzt. Wie im oben vorgestellten Fall wurden fünf Durchläufe gerechnet und die Ergebnisse gemittelt. Der Vergleich mit den Ensemble-Ergebnissen zeigt, dass Residuen-Bootstrapping die Raten- und Rauschabhängigkeit der Standardabweichung des Hebungsbeginns sehr gut wiedergibt (Abb. 7.13). Das Gleiche gilt für die Standardabweichung der Ratenbestimmung (Abb. 7.14), wobei hier eine leichte Tendenz zur Unterschätzung (ca. 10%) erkennbar wird, die bei genauerem Hinsehen auch für den Hebungsbeginn gilt. Insgesamt lässt sich jedoch festhalten, dass Residuen-Bootstrapping zur Bestimmung der Präzision der mit SLM bestimmten Parameter des Hebungseignisses in Böblingen gut verwendbar ist.

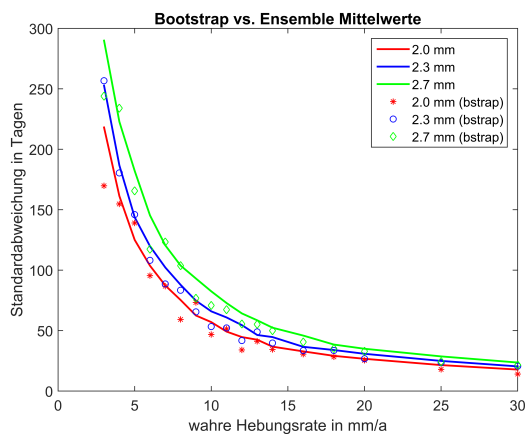


Abb. 7.13: Vergleich der Standardabweichung des synthetischen Modells (Linien) mit den Bootstrap-Ergebnissen (Einzelsymbole) für den Hebungsbeginn.

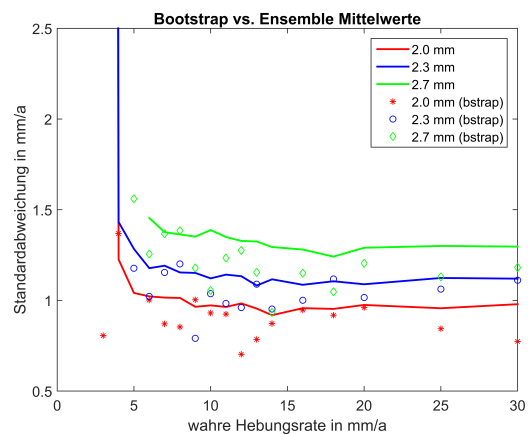


Abb. 7.14: Vergleich der Standardabweichung des synthetischen Modells (Linien) mit den Bootstrap-Ergebnissen (Einzelsymbole) für die Hebungsraten.

7.4 Startzeitpunkt, Hebungsraten und Ausdehnung des Hebungsgebietes

7.4.1 Bestimmung des Startzeitpunktes

Die Frage, der in diesem Abschnitt nachgegangen wird, lautet: wie präzise lässt sich der Startzeitpunkt des Hebungseignisses auf Basis der Envisat-Daten auf Track 251 ermitteln? Wie im vorherigen Absatz erwähnt, steht für jeden Beobachtungspunkt nur eine einzelne Messreihe zur Verfügung. Unabhängig vom angewendeten methodischen Ansatz werden die an diesem Punkt bestimmten Modellparameter des Hebungseignisses statistisch streuen. Die Situation kann durch Mittelung über benachbarte Punkte verbessert werden, allerdings unter einigen zum Teil starken Annahmen:

- Die Rauschteile benachbarter Messpunkte sind nicht korreliert. Um dies sicherzustellen, wurde eine Clusteranalyse (Matlab-Funktion *kmeans*) durchgeführt und für jedes Cluster nur die Zeitreihe mit dem geringstem Rauschen ausgewählt. Für die mittels Kriging-Interpolation kombinierten Streifen (siehe Abschnitt 7.5) ist diese Vorgehensweise nicht möglich, deshalb wurde die räumliche Mittelung nur für den Beobachtungstreifen 251 durchgeführt.
- Der Prozess ist ergodisch, sodass Ensemble-Mittelwerte durch räumliche Mittelwerte ersetzt werden dürfen. Dies ist für die meisten natürlichen Prozesse der Fall; in der SAR-Interferometrie werden räumliche Mittelungen verschiedentlich angewendet.
- Das Hebungssignal setzt an allen benachbarten Punkten gleichzeitig ein. Diese Annahme ist die stärkste, da davon auszugehen ist, dass sich das Quellsignal von den Bohrpunkten aus entsprechend der Fließ- oder

Diffusionsgeschwindigkeit des Grundwassers ausbreitet und daher eine gewisse Zeit braucht, um weiter entfernt liegende Messpunkte zu erreichen. Aus den zu Verfügung stehenden Datensätzen ist ein Zeitversatz allerdings nicht erkennbar. Stattdessen scheint sich die spezielle Hebungssignatur in der westlichen Hälfte des südlichen Hebungsgebiets innerhalb kurzer Zeit etabliert zu haben, wobei die langgestreckte, gebogene Form möglicherweise ein Hinweis auf den Einfluss rasch fließenden Grundwassers ist.

Unter diesen Annahme wurde das Verfahren SLM + Bootstrapping zur Bestimmung von Hebungsbeginn T und Hebungsrate v für das südliche Hebungsgebiet in Böblingen angewendet. Die zu analysierenden PS-Zeitreihen im Hebungsgebiet wurden aus der Gesamtmenge der PS-Punkte im betroffenen Stadtteil von Böblingen mit dem statistischen Test nach Anderson-Darling ausgewählt. Der Anderson-Darling Test prüft zwei Stichproben (im vorliegenden Fall zwei Zeitreihen) auf Ähnlichkeit. Es ist ein nicht-parametrischer Hypothesentest bei dem keine Annahmen über die Verteilung der beiden zu untersuchenden Stichproben benötigt werden. Im Wesentlichen erfolgt eine Distanzmessung zwischen den zwei empirischen Verteilungsfunktionen. Ist die maximale Distanz D kleiner als ein kritischer Wert, besteht Ähnlichkeit zwischen den beiden Stichproben und der Test wird angenommen. Zur Berechnung des kritischen Wertes wird nach Scholz und Stephens (1987) eine Näherungsformel für die asymptotische Verteilung genutzt für die ein Signifikanzniveau vom Nutzer festgelegt werden muss. Der Anderson-Darling Test ist für unseren Fall besonders gut geeignet, da er sich auch auf kleine Stichproben (sprich Zeitreihen mit einer begrenzten Anzahl an Aufnahmezeitpunkten) anwenden lässt und zudem der Fokus des Tests auf der Form der Verteilungsfunktionen liegt. Er weist außerdem dahingehend Vorteile gegenüber dem sehr ähnlich funktionierenden und oft verwendeten Kolmogorov-Smirnov Test auf, als dass er auch sensitiv in den tails der Verteilungen und somit Ausreißer-sensitiv ist (Engmann und Cousineau, 2011).

Für die nach den Auswahlverfahren verbleibenden 36 Messpunkten wurden T_i und v_i , $i=1..36$ per SLM bestimmt und die Standardabweichungen mittels Bootstrapping berechnet. Wie bei den synthetischen Tests wurden nur Messzeitpunkte bis November 2008 berücksichtigt. Damit entfallen einige Punkte im Osten des Hebungsgebietes, die erst mit der zweiten Bohrphase aktiviert werden. Anhand des Messrauschens vor dem vermuteten Beginn des Hebungssignales wurden entsprechend der Ergebnisse der statistischen Untersuchungen für jeden Punkt Schwellwerte v_{tresh} für die Hebungsrate sowie Korrekturwerte T_{corr} für den systematischen Fehler von T_i festgesetzt. Für die Bestimmung des gemittelten Hebungsbeginns T_m wurden nur Punkte mit $v_i > v_{tresh}$ und $T_i^c = T_i + T_{corr}$ zugelassen. Der Bereich der räumlichen Mittelwertbildung erstreckt sich auf die westliche Hälfte des Hebungsgebietes. Damit reduziert sich die Zahl der Messpunkte weiter auf $n=15$. Bewegungstrends für die Jahre 2003-2006 (siehe 7.4.2) wurden vor Ermittlung der Hebungsparameter abgezogen.

Das Histogramm der aus den verbleibenden Messpunkten ermittelten Startzeitpunkte für den Hebungsbeginn ist auf das Datum des Beginns der ersten Bohrphase am 12.10.2006 (Herdweg) zentriert (Abb. 7.15). Ein zweiter Häufungspunkt koinzidiert mit dem Zeitpunkt der Bohrungen am Schliffkopfweg im Januar 2007. Eine sinnvolle Verteilungsfunktion kann aus dem Histogramm nicht abgeleitet werden, da einerseits die Anzahl der Messpunkte insgesamt zu gering ist, andererseits die Varianz des Modellparameters T aufgrund seiner Abhängigkeit von anderen Kenngrößen der jeweiligen Zeitreihe von Punkt zu Punkt stark variiert. Die Spannweite beträgt 160 Tage^2 bis 33489 Tage^2 entsprechend einer Variation der Standardabweichungen von 40 Tagen bis 183 Tagen. Um den Schätzwert für den Hebungsbeginn zu verbessern, wurde daher ein über die Varianzen gewichtetes Mittel bestimmt:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i T_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

mit:

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$$

Die Varianz des gewichteten Mittelwertes ist gegeben durch:

$$\sigma_{\bar{T}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i^2 \sigma_i^2}{(\sum_{i=1}^n w_i)^2} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}$$

Der gewichtete empirische Mittelwert \bar{T} für den Hebungsbeginn an den ausgewählten 14 PS-Punkten weicht um 23.6 Tage vom Beginn der ersten Bohrphase ab und fällt auf den 05.11.2006 (Abb. 7.15). Der Standardfehler $\sigma_{\bar{T}} = \sqrt{\sigma_{\bar{T}}^2}$ des Mittelwertes beträgt 19.7 Tage. Die Hebungsrate variiert zwischen 4 und 8 mm/Jahr (Abb. 7.16). Ein gewichtetes Mittel wurde in diesem Fall nicht berechnet, da die Hebungsrate vermutlich nicht nur statistischen Schwankungen unterliegt, sondern auch durch lokale Variationen der durch den Quellvorgang hervorgerufenen Geschwindigkeit der Volumenänderungen im Untergrund bestimmt wird.

Die mit Hilfe des verwendeten Bewegungsmodells bestimmten zeitlichen Zusammenhänge erscheinen grundsätzlich plausibel, da aufgrund der endlichen Fließgeschwindigkeit des Grundwassers ein gewisser Zeitversatz zwischen dem Abteufen der Bohrungen und der Initialisierung des Quellvorgangs im Umfeld angenommen werden kann. Die PS-Punkte mit signifikanten Hebungssignalen befinden sich in Entfernungen zwischen 92 m bis 430 m von den Bohrungen im Herdweg, die mittlere Entfernung beträgt 255 m. Bezieht man das Ergebnis auf den Beginn der Bohrarbeiten im Oktober 2006, so lässt der Zeitversatz von 23.6 Tagen auf eine mittlere Abstandsgeschwindigkeit des eindringenden Grundwassers von $1.25 \cdot 10^{-4} \pm 1.04 \cdot 10^{-4}$ m/s schließen. Geht man zusätzlich von einem gewissen Zeitbedarf für die Etablierung der Wasserwegsamkeiten durch die Ringraumverfüllung aus, so dürfte die Fließgeschwindigkeit in der Gipskeuperformation noch höher gewesen sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass keine Zeitverschiebung existiert oder dass der Hebungsbeginn vor den Bohrarbeiten liegt, beträgt ca. 11% (bei Annahme einer Normalverteilung).

Das Histogramm in Abb. 7.15 legt allerdings nahe, dass auch die Bohrarbeiten am Schlifffkopfweg im Januar 2007 zu dem Ereignis beitragen. Wenn beide Bohrphasen zu einer Änderung der beobachteten Verschiebungsraten geführt haben sollten, so würden sich diese Signale in den Zeitreihen überlagern, und der verwendete Modellansatz würde einen Startzeitpunkt ergeben, der zwischen den beiden Bohrzeitpunkten liegt. In diesem Fall ließe sich aus dem beobachteten Zeitversatz kein Hinweis auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Quellimpulses ableiten. Die Interpretation der Ergebnisse muss an diesem Punkt offen bleiben, da weder die Anzahl der verwendbaren Messpunkte noch die zeitliche Auflösung der Messreihen dazu ausreichen, diese Fragen abschließend zu klären. Unabhängig davon legen die Beobachtungen und Ergebnisse jedoch insgesamt nahe, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen dem Niederbringen der Bohrungen im Herdweg und im Schlifffkopfweg und dem Beginn des Hebungsereignisses in Böblingen besteht.

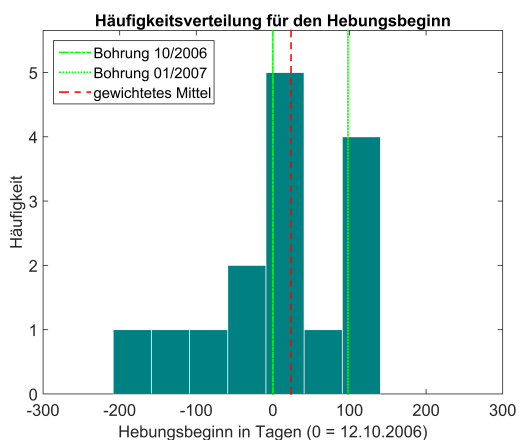


Abb. 7.15: Häufigkeitsverteilung des Hebungsbeginns, berechnet aus 15 PS-Zeitreihen im Hebungsgebiet. Grüne Linien kennzeichnen die Bohrzeitpunkte, die rote Linie das gewichtete Mittel (23.8 Tage)

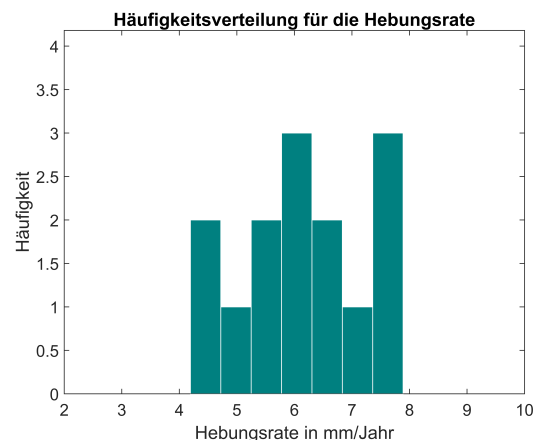


Abb. 7.16: Häufigkeitsverteilung der Hebungsrate, berechnet aus 15 PS-Zeitreihen im Hebungsgebiet.

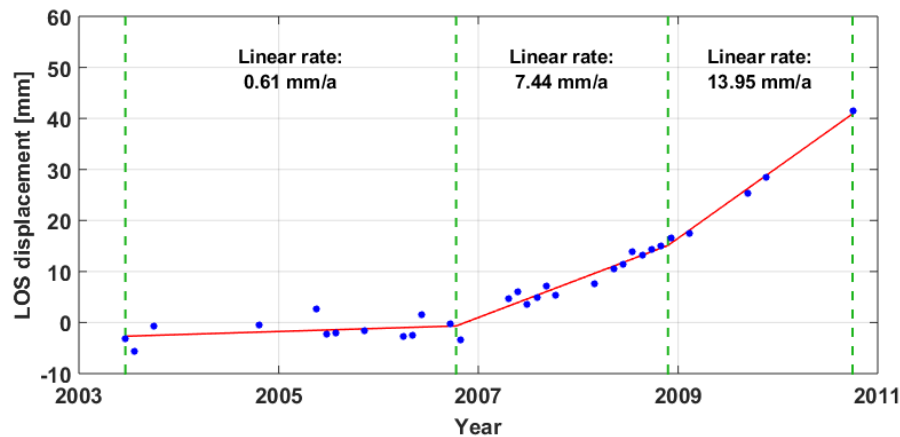


Abb. 7.17: SLM-Modellvariante 2 nach Gleichung 7.3. Die PS-Punkt-Zeitreihe stammt aus dem südlichen Hebungsgbiet. Die lineare Rate des PS-Punktes beträgt zunächst 6.7 mm/Jahr ab Oktober 2006 und steigt ab November 2008 auf 13.2 mm/Jahr an.

7.4.2 Zunahme der Hebungssignale im Jahr 2008

Nach dem Sachstandbericht zum EWS Schadensfall in Böblingen (Koch u. a., 2015) setzen im Bereich Altinger Straße (nördliches Hebungsgbiet, siehe Abbildung 7.3) zeitgleich mit der zweiten Bohrphase im Herbst 2008 starke Bodenhebungen ein. PS-Zeitreihen aus diesem Gebiet, die von der Firma Airbus Defence & Space auf Basis der SAR Satelliten Envisat, Alos2 und Cosmo Skymed prozessiert wurden, weisen Hebungsraten von 50 - 70 mm/Jahr aus, annähernd das Zehnfache der nach 2006 im südlichen Hebungsgbiet beobachteten Raten. Der zeitliche Zusammenhang zwischen den Bohrungen in der Siemensstraße und dem Beginn der Hebungen gilt nach dem Bericht als gesichert.

Eine Auswertung der ab Mai 2011 verfügbaren hochauflösenden TerraSAR-X Stripmap und SpotLight-Daten durch Airbus Defence & Space im Auftrage der Allianz sowie des Landratsamtes Böblingen ergibt auch für das südliche Hebungsgbiet deutlich vergrößerte Hebungsraten von ca. 30 mm/Jahr. Man kann demnach vermuten, dass durch die Bohrungen im Heinrich-Heine-Weg vom 27.11.2008 bis 01.12.2008 die zunächst moderaten Hebungen im südlichen Gebiet deutlich beschleunigt wurden. Anhaltspunkte dafür liefern z.B. die PS-Zeitreihen für S2 und S3 in Abbildung 7.6. Die jeweils letzten vier Datenpunkte dieser Zeitreihen weichen nach oben von der Modellkurve ab und suggerieren einen zunehmenden Trend.

Um diese Vermutung zu überprüfen, wurde das SLM-Modell modifiziert. Basierend auf unserer Kenntnis der Zeitpunkte der Bohrphasen wurden als Vorinformation zwei feste Knotenpunkte am 15. Oktober 2006 und 30. November 2008 eingeführt. Die Steigungen der zwischen den Knotenpunkten liegenden Segmente wurden durch das Programm bestimmt. Das Modell ist damit gegeben als:

$$r_{mod,2}(t) = v_1 \cdot t + (v_2 - v_1) \cdot h(t, T_1) + (v_3 - v_2 - v_1) \cdot h(t, T_2) \quad (7.3)$$

mit:

$$h(t, T_n) = \begin{cases} t - T_n, & \text{wenn } t > T_n \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Abbildung 7.17 zeigt beispielhaft die Zeitreihe für den Punkt S2. In den Jahren 2003 bis 2006 zeigt das Verschiebungsfeld im östlichen Stadtteil von Böblingen eine geringe positive Tendenz von ca. 0.6 mm/Jahr. Diese Rate, die wir als überregionales Hintergrundsignal interpretieren, wurde vor den Analysen im Abschnitt 7.4.1 individuell von jeder PS-Datenreihe abgezogen. Mit der ersten Bohrphase steigt die Hebungsrates für den Punkt S2 auf 7.44 ± 0.37 mm/Jahr an. Im Zuge der zweiten Bohrphase im November 2008 erhöht sich die Rate weiter auf 13.95 ± 0.86 mm/Jahr an.

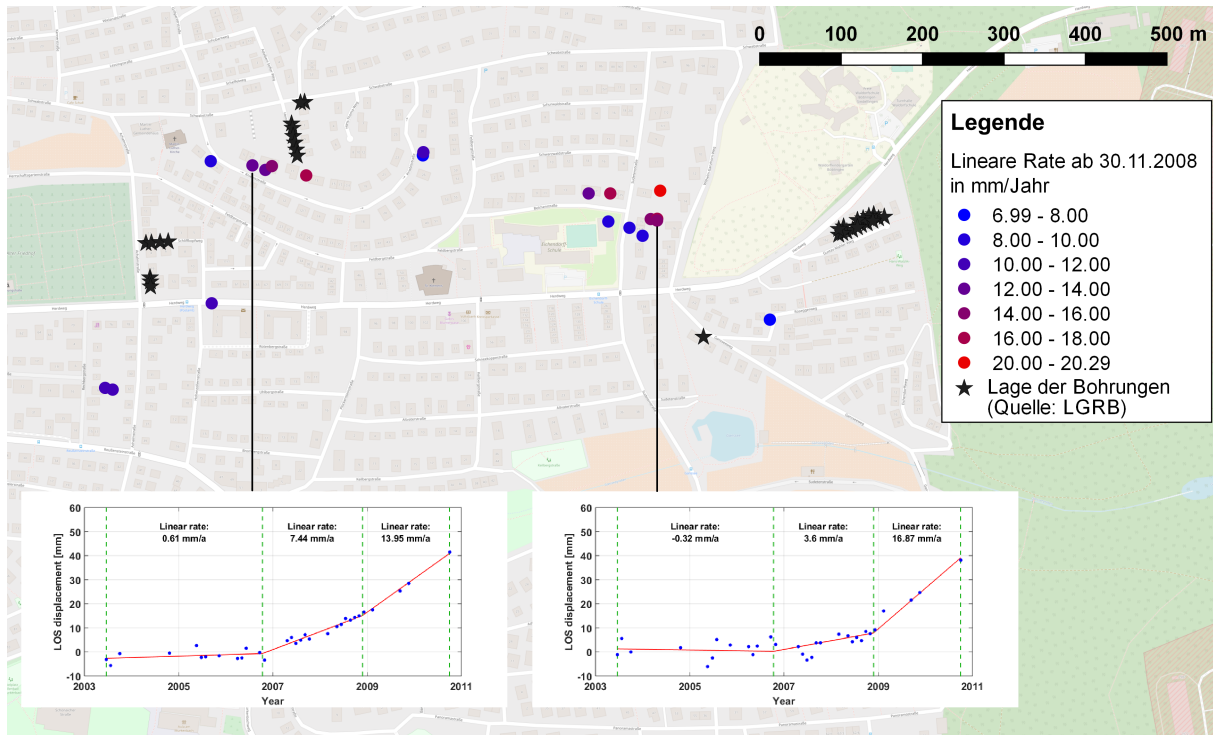


Abb. 7.18: Lage der Punkte mit signifikanter Zunahme der Hebungsrates nach dem 30. November 2008 (20). Außerdem werden die Unterschiede des Bewegungsverhaltens durch zwei repräsentative Zeitreihen verdeutlicht. PS-Punkte nahe den Bohrungen im Heinrich-Heine-Weg zeigen schon ab Ende 2006 deutliche Hebungstrends (links, entspricht Punkt S2), die Punkte weiter östlich dagegen erst nach den Bohrungen im November 2008 (rechts).

Nachdem der Anderson-Darling Test und das anschließende *k-means* Verfahren zur Auswahl von PS-Punkten im südlichen Hebungsbereich angewendet wurde, blieben 60 PS-Zeitreihen übrig. Die verbliebenen 60 Punkte wurden anschließend auf eine signifikante Zunahme der Hebungsrates nach dem 30.11.2008 untersucht. Dafür wurde das Zweifache der Standardabweichung als Kriterium eingeführt – wenn die Differenz der Hebungsrates vor und nach dem 30.11.2008 über diesem Wert liegt, wird die Änderung als signifikant eingestuft. Dies ist für insgesamt 20 PS-Punkte der Fall (siehe Abbildung 7.18). Hervorzuheben ist das unterschiedliche Bewegungsverhalten der PS-Punkte innerhalb des südlichen Hebungsbereiches. Während die Punkte im westlichen Teil Hebungssignale aufzeigen, die schon Ende 2006 beginnen, verläuft die Hebung im östlichen Teil zunächst moderat mit einigen wenigen mm/Jahr und nimmt erst ab Ende 2008 schlagartig stark zu. Zudem sind die Rates im östlichen Teil i.A. größer als im westlichen Teil, was ein Hinweis darauf sein könnte, dass dieser Teil des Stadtgebietes stärker von den Bohrungen im November 2008 betroffen war.

Die im Rahmen dieser Fallstudie erzielten Ergebnisse liefern demnach Indizien für eine Beschleunigung des Hebungsvorganges durch die Bohrungen des Jahres 2008 und würden somit eine Erklärung für die beobachtete Diskrepanz zu den späteren PSI-Auswertungen auf Basis des Satelliten TerraSAR-X liefern. Es muss allerdings betont werden, dass der Envisat-Datensatz auf Track 251 nur bis zum Oktober 2010 reicht und somit nur wenige Datenpunkte für diese Untersuchungen zur Verfügung stehen (siehe Abbildung 7.17). Insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Ratesbestimmung über ein so kurzes Zeitintervall sehr stark von unerkannten Fehlern der Phasenabwicklung beeinflusst würde, die gerade im letzten Zeitabschnitt verstärkt auftreten, müssen die Ergebnisse unter Vorbehalt betrachtet werden. Versuche mit zwei variablen Knotenpunkten, die nicht über a-priori-Wissen eingeführt sondern im Zuge der Anpassung bestimmt werden, schlugen fehl, da die Anzahl und Qualität der Datenpunkte für eine derartige Optimierung nicht ausreicht und keine stabilen Lösungen erzielt werden konnten.

7.4.3 Minimierung des Residuums durch Modellierung mit höheren Polynomgraden

Häufig werden Messdaten in der Art der hier verwendeten PSI-Zeitreihen durch Polynome oder Splines höherer Grade angepasst (z.B. kubische Splines). Damit lässt sich eine glatte Interpolation gewährleisten, allerdings steht hinter diesen Kurven kein deterministisches Modell. Konkrete Aussagen bezüglich der Ursachen beobachteter Trends oder Trendänderungen sind damit im Allgemeinen nicht möglich. Wir haben diesen Modelltyp testweise verwendet, um zu überprüfen, wie weit sich die Standardabweichung des Residuums durch eine glattere Anpassung reduzieren lässt. Das Anpassungsmodell lautet:

$$r_{mod,3}(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \beta_4 h(t, T_0) + \dots + \beta_7 h(t, T_3) \quad (7.4)$$

mit:

$$h(t, T_n) = \begin{cases} (t - T_n)^3, & \text{wenn } t > T_n \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

wobei: T_0, T_3 : Start- und Endzeitpunkt der Zeitreihe, T_1, T_2 : Zeitpunkte der Bohrphasen.

Die Parameter β_0 bis β_7 werden über die Methode der kleinsten Quadrate mit der Vorgabe der Glattheit an den Knotenpunkten bestimmt. Abbildung 7.19 zeigt als Beispiel die Anpassung des Modells an die Zeitreihe des Punktes S2. Gegenüber der Anpassung mit zwei linearen Steigungselementen (siehe 7.17) verringert sich die Standardabweichung des Residuums von 1.68 mm auf 1.58 mm. Dieser geringe Rückgang hebt unserer Meinung nach die Nachteile der schlechteren Interpretierbarkeit dieses Modells nicht auf.

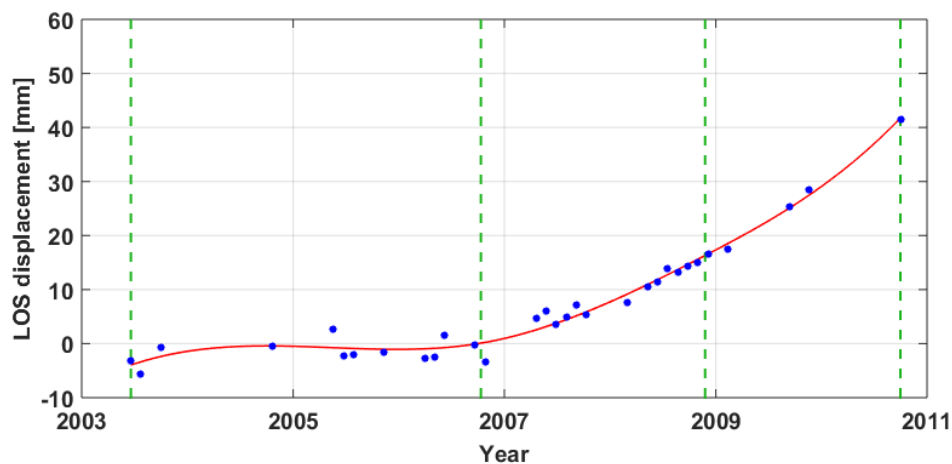


Abb. 7.19: SLM-Modellvariante 3 nach Gleichung 7.4. Dargestellt ist die PS-Punkt-Zeitreihe S2 (siehe Abbildung 7.6) aus dem südlichen Heungsgebiet an die eine kubische Spline-Funktion mit festen Knotenpunkten zu den Bohrzeitpunkten (12.10.2006 und 25.11.2008) angepasst wurde.

7.5 Zusammenschluss zweier benachbarter Tracks

Um die Datendichte im Untersuchungsgebiet sowohl räumlich als auch zeitlich zu erhöhen, wurden die beiden benachbarten Tracks 251 und 22 zusammengeschlossen. Um dies zu erreichen, erfolgte zunächst eine räumliche Interpolation der PS-Punkte aus beiden Tracks auf ein gemeinsames Gitter. Hierzu wurde das Kriging-Verfahren verwendet, welches auf einem Kleinste-Quadrate-Regressionsansatz basiert. Der Algorithmus ist für die Interpolation von Bewegungsraten gut geeignet, weil davon ausgegangen werden kann, dass dieser Signalanteil in den PS-Zeitreihen räumlich korreliert ist. Den interpolierten Datenpunkten wird eine Verschiebungsrates zugewiesen, die aus den umliegenden, realen Werten berechnet und entsprechend der Distanz zwischen Interpolations- und Stützwert gewichtet wurde. Dabei geht insbesondere die räumliche Varianz in die Berechnung mit ein, die mit Hilfe eines Semivariogrammes bestimmt wird. Es wird eine theoretische Variogrammfunktion eingeführt und die

Schätzfehlervarianz hierzu bestimmt und minimiert. Mehr Details zum Kriging-Verfahren können unter Fuhrmann (2016) eingesehen werden.

Zur Kombination wurden zunächst die PS-Punkte jedes einzelnen Tracks auf ein 5x5 Meter Gitter interpoliert. Anschließend wurden diejenigen Punkte, die in beiden Tracks vorliegen beibehalten und die Zeitreihen miteinander verschmolzen. Abbildung 7.20 zeigt die interpolierte und kombinierte Variante des südlichen Hebungsgebietes in Böblingen. Die Darstellung zeigt ein räumlich verdichtetes Bewegungsfeld, das allerdings an einigen Stellen noch Lücken aufweist. Dies erklärt sich durch die maximale Distanz von 20 Metern, die ein interpolierter Wert zu einem realen Wert aufweisen darf.

Abbildung 7.21 zeigt als Beispiel die Zeitreihen des PS-Punktes S2 und einen Punkt des kombinierten Gitters im Abstand von 5.50 m. Das Rauschsignal sowie die Standardabweichungen der über SLM bestimmten Hebungsparameter sind für beiden Zeitreihen sehr ähnlich (siehe Tabelle 7.5). Auffällig ist die starke Streuung der Datenpunkte in der kombinierten Zeitreihe unmittelbar nach dem Einsetzen des Hebungssignales. Da die Schätzung einer Ausgleichsgeraden besonders empfindlich auf abweichende Datenpunkte an den Enden eines linearen Segmentes reagiert, hat die starke Datenspreizung Mitte des Jahres 2007 einen signifikanten Effekt auf das Einsetzen der Hebung. Testrechnungen zeigen, dass allein durch den einzelnen Datenwert mit negativem Hebungsbetrag im Juni 2007 der Startzeitpunkt der Hebung um ca. 40 Tage verzögert wird. Insgesamt ist der Startzeitpunkt in der kombinierten Zeitreihe um ca. 87 Tage gegenüber dem Startzeitpunkt der Zeitreihe von Track 251 verschoben. Er fällt für diese Zeitreihe auf den 02.02.2007 und damit zeitlich in den Bereich der Bohrungen am Schliffkopfweg, die am 18.01.2007 begonnen haben. Aufgrund des späteren Hebungsbeginns ist die detektierte Hebungsrates ca. 10% größer als für den einzelnen Track 251.

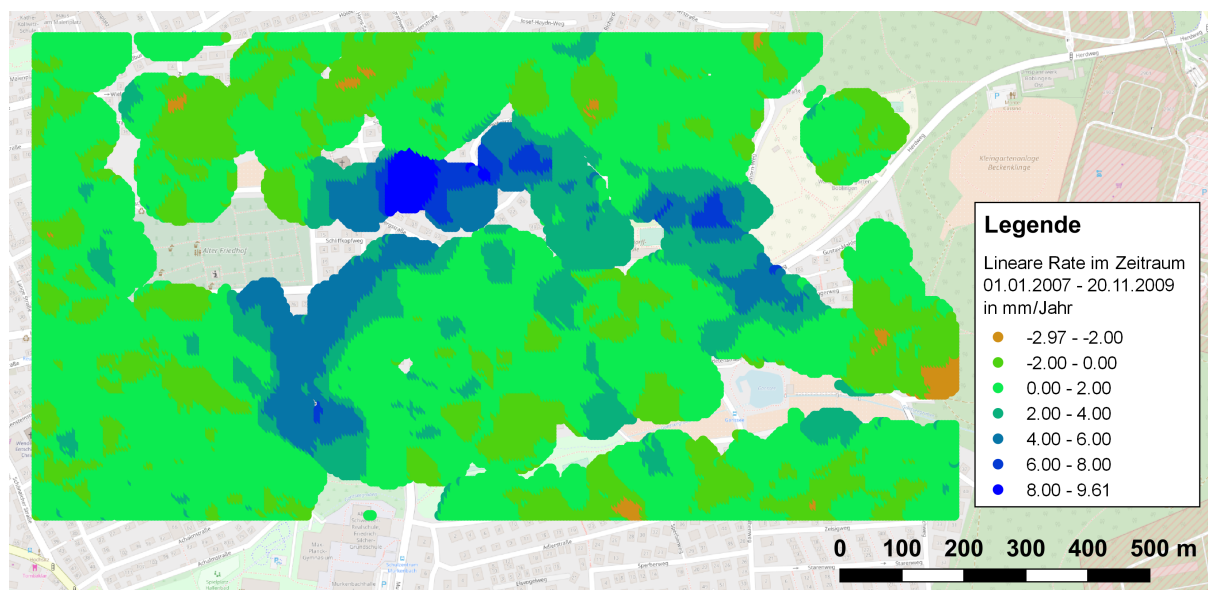


Abb. 7.20: Ergebnisbild des Zusammenschlusses von Track 251 und Track 22 im südlichen Hebungsgebiet. Die PS-Punkte beider Tracks wurden mittels dem Kriging-Verfahren auf ein gemeinsames 5mx5m Gitter interpoliert.

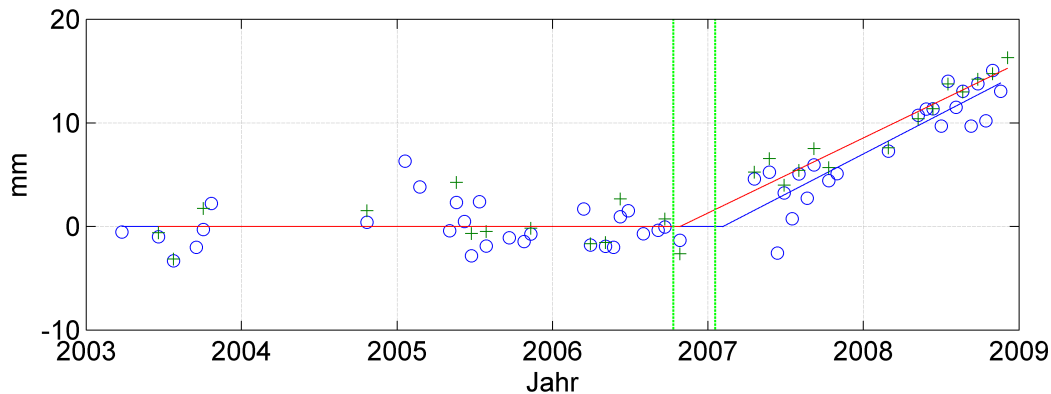


Abb. 7.21: Zeitreihen des Punkte S2 aus Track 251 (rote Kreuze) und eines benachbarten Punktes aus dem kombinierten Datensatz (blaue Kreise, Entfernung zu S2 = 5.50m). Die Modelle wurden jeweils mit Hilfe des SLM-Tools angepasst. Die grünen vertikalen Linien markieren die Bohrphasen im Herdweg (12.10.2006) und im Schliffkopfweg (18.01.2007).

Auf eine räumliche Mittelung der abgeleiteten Hebungsparameter wurde verzichtet, da die interpolierten Zeitreihen statistisch nicht mehr unabhängig sind und somit auch das verdichtete Feld in dieser Hinsicht keinen Mehrwert an Informationen liefert. Insgesamt muss festgestellt werden, dass die Kombination der Tracks 251 und 22 nicht auf einen grundsätzlichen Widerspruch zu den Ergebnissen des Einzeltracks 251 führt. Auch für den späteren Startzeitpunkt der Hebungen bleibt die Verbindung zu den Bohrungen am Herdweg und am Schliffkopfweg plausibel. Die Kombination führt aber nicht zu einer erkennbaren Verbesserung der Resultate. Aufgrund der geschilderten Probleme, insbesondere der geringen Anzahl verwertbarer PS-Punkte auf Track 22, tendieren wir dazu, den für den einzelnen Track 251 abgeleiteten Hebungsparametern den Vorzug zu geben.

Tab. 7.5: Vergleich zwischen der Zeitreihe des Einzelpunktes S2 aus Track 251 und der eines Gitterpunktes aus der Kombination von Track 251 und 22, der in einer Entfernung von 5.50 m von S2 liegt.

	Einzelpunkt S2 (Track 251)	Gitterpunkt aus Kombination (Tracks 251 + 22)
Rauschen vor Hebungsbeginn in mm	2.21	2.13
Rauschen Residuum in mm	1.78	2.08
Rate vor Hebungsbeginn in mm/Jahr	0.54	0.45
Hebungsbeginn	26.10.2006	02.02.2007
Standardabw. Hebungsbeginn in Tagen	63.7	57.6
Hebungsrate in mm/Jahr	7.18	7.75
Standardabw. Rate in mm/Jahr	0.76	0.92

7.6 Zusammenfassung und Diskussion

Die vorliegende Studie kann als Fallbeispiel für den retrospektiven Einsatz der Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie auf Basis archivierter Radarszenen angesehen werden. Auch Jahre nach einem auslösenden Ereignis können zeitliche und räumliche Zusammenhänge mit dem Auftreten größerer Schäden an der Bausubstanz mit aussagekräftiger Präzision bestimmt werden. Für die Auswertung der Beobachtungsreihen wurde in dieser Studie ein modellbasierter Ansatz verwendet. Ausgangspunkt war das Programmpaket "Shape Language Modeling (SLM)", mit dem sich einfache bis komplexe Bewegungsmodelle an die Datensätze anpassen lassen. Die Software ermöglicht eine flexible Modellbildung, in die gegebenenfalls Vorinformation über den untersuchten Vorgang einfließen kann. Mit Hilfe dieser Modelle wurden spezifische Fragestellungen untersucht.

Die Präzision, hier definiert als empirische Standardabweichung der zufällig variierenden Modellparameter, lässt sich mit der Bootstrapping-Methode hinreichend genau bestimmen, wobei nach den synthetischen Tests eine Tendenz zur Unterschätzung von ca. 10% erkennbar ist. Auch die empirische Standardabweichung unterschätzt tendenziell die Standardabweichung der zugrundeliegenden Verteilungsfunktion, wobei wir annehmen dürfen, dass dieser Effekt aufgrund der Größe der Stichproben für die synthetischen Modelle sowie der hohen Anzahl der Bootstrapping-Durchläufe gering ist. Interpretiert man die Bootstrap-Standardabweichung als Schätzwert für die wahre Standardabweichung, so lassen sich damit aus einer einzigen Beobachtungsreihe grundlegende statistische Kenngrößen der gesuchten Modellparameter Hebungsbeginn und Hebungsrate gewinnen. Die Spannweite der empirischen Standardabweichungen für den Zeitpunkt des Hebungsbeginns in Böblingen beträgt 40 Tage bis 183 Tage.

Liegen mehrere unabhängige Beobachtungsreihen vor, so dürfen wir annehmen, dass die statistischen Streuungsmaße über eine Mittelung reduziert werden, und dass sich der empirische Mittelwert dem Erwartungswert eines Modellparameters annähert. Da die Qualität der Beobachtungsreihen und damit die Varianzen der Zufallsvariablen Hebungsbeginn T und Hebungsrate v unterschiedlich sind, wurde ein gewichtetes arithmetisches Mittel berechnet. Im vorliegenden Fall fällt der gewichtete empirische Mittelwert für den Hebungsbeginn auf den 05.11.2006 und ist damit um etwas mehr als drei Wochen gegenüber dem Beginn der ersten Bohrphase vom 12.10 - 18.10.2006 verschoben. Der Standardfehler des gewichteten Mittelwertes beträgt 19.7 Tage.

Der empirische Mittelwert ist interpretierbar im Sinne der Hauptfragestellung dieser Studie unter drei wesentlichen Voraussetzungen:

- a) Das initiale Hebungssignal breitet sich schnell aus, so dass Zeitverschiebungen zwischen benachbarten Messpunkten aufgrund von Diffusionsprozessen oder anderen Wegabhängigkeiten vernachlässigbar klein sind.
- b) Systematische Abweichungen, die von der Qualität der Beobachtungszeitreihe, vom gewählten Bewegungsmodell und den jeweiligen Modellparametern abhängen, können quantifiziert werden.
- c) Die Anzahl der in das Mittel eingehenden Beobachtungsreihen bzw. der daraus abgeleiteten Modellparameter ist ausreichend groß.

Bezieht man die Ergebnisse auf den Zeitpunkt der EWS-Bohrarbeiten im Oktober 2006, so lässt sich die Frage nach dem Hebungsbeginn unter diesen Voraussetzungen wie folgt beantworten: ca. 24 Tage nach Beginn der ersten Bohrphase am 12.10.2006 manifestiert sich das Hebungssignal in der westlichen Hälfte des südlichen Schadensgebietes in Böblingen nahezu flächenhaft. Die Präzision, mit der der Hebungsbeginn auf Basis der Envisat-Daten auf Track 251 bestimmt werden kann, beträgt 19.7 Tage. Die zeitliche Nachlauf von ca. drei Wochen erscheint physikalisch sinnvoll, da eine gewisse Zeitspanne für die Etablierung des hydraulischen Kurzschlusses über die Ringraumverfüllung und das Eindringen einer für den Quellvorgang ausreichenden Wassermenge in die zuvor trockenen Anhydritschichten angenommen werden kann.

Es lässt sich jedoch nicht von der Hand weisen, dass auch die EWS-Bohrungen im Januar 2007 das Hebungsgeschehen beeinflussen. Dadurch können zusätzliche Wegsamkeiten für das Grundwasser geschaffen worden sein, die den Quellbereich vergrößert und damit eine zunächst moderate Hebungsrate verstärkt haben könnten. Es ist zu erwarten, dass durch Anpassung eines aus zwei Segmenten bestehenden Modells in diesem Fall ein Hebungsbeginn ermittelt werden würde, der zwischen den beiden Bohrzeiten liegt. Ein Zusammenhang mit der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers lässt sich bei dieser Interpretation nicht herstellen. Durch die Hinzunahme der Ergebnisse für den zweiten Beobachtungstreifen (track 22) wird der Startzeitpunkt der Hebung um 87 Tage verschoben und fällt zeitlich mit dem Bohrgeschehen im Januar 2007 zusammen. Auf Grund der unregelmäßigen zeitlichen Abtastung der zur Verfügung stehende Daten, insbesondere der Datenlücke zwischen dem 27.10.2006 und dem 20.04.2007, kann der individuelle Beitrag der Bohrungen im Herdweg und im Schliffkopfweg nicht weiter aufgeschlüsselt und diese Frage nicht abschließend beantwortet werden.

Es gibt Anzeichen dafür, dass durch die Bohrtätigkeiten im November 2008 ein zweiter Hebungsimpuls im südlichen Schadensgebiet ausgelöst wurde. Die Hebungsraten einiger PS-Punkte im Bereich Kniebisstraße und Feldbergstraße steigern sich Ende des Jahres 2008 um einen Faktor von 2 – 3 auf bis zu 18 mm/Jahr. Neu hinzu kommt eine Punktgruppe im östlichen Bereich des Schadensgebietes (nördliche Sudetenstraße, Wilhelm-Ganzhorn-Weg), an denen ein signifikantes Bewegungssignal erst Ende 2008 mit großen Raten bis zu 20 mm/Jahr einsetzt.

Auch wenn sich die zeitlichen Abläufe stellenweise nicht vollständig auflösen lassen, so legen die Ergebnisse der PSI-Analyse einen Zusammenhang zwischen den Bohrtätigkeiten und der Initialisierung sowie der Beschleunigung des Hebungseignisses nahe. Es ist bei diesen Schlussfolgerungen allerdings zu beachten, dass geodätische Messungen an der Erdoberfläche prinzipiell nur Koinzidenzen aufzeigen können; ursächliche Zusammenhänge können daraus nicht direkt abgeleitet werden. Die Aussagen sind nur gültig im Rahmen der verwendeten Bewegungsmodelle und den weiteren Annahmen über statistische Zusammenhänge. Es muss betont werden, dass für die statistischen Betrachtungen eine größere Anzahl verwendbarer PS-Punktzeitreihen sehr wünschenswert gewesen wäre. Dies gilt insbesondere für den zweiten Beobachtungstreifen (Track 22), für den eine deutlich geringere Anzahl von PS-Punkten identifiziert werden konnte. Die Ergebnisse für Track 22 bestätigen grundsätzlich diejenigen für Track 251, was die Zuverlässigkeit der mit der PSI-Methode erhaltenen Resultate erhöht. Die geringe Anzahl von PS-Punkten auf Track 22 und die ungünstige Rauschverteilung in der kombinierten Zeitreihe verhinderten jedoch das angestrebte Ziel, durch Kombination beider Tracks die Bestimmung der Hebungsparameter zu verbessern.

8 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Fallstudie Böblingen verdeutlicht das große Potential der SAR-Interferometrie für die Vermessung von Bodenbewegungen. Es gibt kein anderes Verfahren, mit dem sich der Einsatzzeitpunkt eines Hebungs- oder Senkungseignisses retrospektiv mit vergleichbarer Genauigkeit quantifizieren ließe. Die Studie zeigt auch die zukünftige Bedeutung der Satellitenmission Sentinel für ein flächenhaftes Monitoring in Regionen mit kritischen Untertageaktivitäten. Ein solches Monitoringsystem, in das eine Quasi-Echtzeit-Auswertung von Sentinel 1a/1b eingebunden wäre, würde ein Hebungseignis wie in Böblingen innerhalb weniger Monate zuverlässig detektieren können und, in Verbindung mit der entsprechenden Bereitschaft öffentlicher Einrichtungen, zu einer Vermeidung von erheblichen Schäden an Gebäuden und Infrastruktur beitragen.

Im Kern befasst sich die hier vorgelegte Studie mit der Extraktion von Information aus Messreihen. Die Bestimmung kinematischer Parameter aus Zeitreihen der Radar-Interferometrie ist allerdings nicht eindeutig möglich, und bereits kleine Änderungen in den Daten können zu signifikant anderen Ergebnissen führen. Die hier vorgestellten Ansätze können dazu beitragen, die Eigenschaften der aus PSI-Zeitreihen abgeleiteten Bewegungsmodelle besser zu verstehen und damit die Zuverlässigkeit der Interpretation und Schlussfolgerungen zu erhöhen. Fallstudien dieser Art sind notwendig, um die SAR-Interferometrie als geodätische Technik weiter zu konsolidieren.

Die Ansätze und Ergebnisse sind nicht auf den aktuellen Kontext beschränkt, sondern lassen sich auf andere Aufnahme- und Bewegungsszenarien, auf Messungen mit anderen geodätischen Methoden oder auch andere Messverfahren allgemein übertragen. Aufgrund der potentiell hohen Messpunktdichte und der damit verbundenen statistischen Möglichkeiten ist die Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie für solche Fragestellungen allerdings prädestiniert. Dies gilt insbesondere für räumlich hochauflösende Akquisitionsmoden wie TerraSAR-X SpotLight. Aber auch über eine kombinierte Auswertung der C-Band Satelliten Sentinel-1a und -1b können aufgrund des Akquisitionsintervalls von nur sechs Tagen präzise Aussagen über Bewegungsvorgänge an der Erdoberfläche erwartet werden. Es ist daher durchaus vorstellbar, dass die im Rahmen dieser Studie verfolgten Ansätze als Bestandteil eines abgestimmten landesweiten Monitoringsystems für den urbanen Raum oder für Verdachtsflächen auf Bodenbewegungen einsetzbar sind.

9 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Projektarbeiten wurden am 27.10.2016 und am 27.10.2017 im Rahmen der Herbsttagungen des Arbeitskreises Geodäsie/Geophysik vorgestellt und diskutiert. Ein Kurzbericht über das Projekt erschien Ende des Jahres 2016 in der LUBW-Publikation „Einblicke 2016“. International wurde das Projekt am 08.06.2017 anlässlich der ESA-Konferenz FRINGE in Helsinki in Form eines Posters präsentiert. Das Poster ist im Anhang einsehbar. Ein Teil der hier vorgestellten Ergebnisse wurde im Februar 2018 als 12-seitigen Beitrag im Rahmen einer Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Bernhard Heck veröffentlicht. Dem Artikel, der ebenfalls im Anhang enthalten ist, wird eine DOI zugewiesen; damit ist er in Zukunft zitierbar. Es ist geplant, nach Fertigstellung des Abschlussberichtes einen Fachartikel für eine englischsprachige Zeitschrift einzureichen.

10 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Umweltministeriums Baden-Württemberg innerhalb des Förderprogramms "Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS)"(Förderkennzeichen L75 15001) gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) betreut. Wir bedanken uns für die Unterstützung und die gewährte Förderung. Herrn Andreas Steinacker (Landratsamt Böblingen) danken wir für die Bereitstellung von Daten über Bohrzeitpunkte und weiteren Informationen zum Hebungsereignis.

Literatur

- Anderssohn, J. (2014): Satellitenbasierte Bodenbewegungsmessung in Landau in der Pfalz, Deutschland. Forschungsber. Airbus Defence und Space. URL: <http://bodenhebungen-landau.de/files/2014/03/Satellitenbasierte-Bewegungsmessung-Landau.pdf> (besucht am 07.02.2018).
- Bamler, R., Adam, N., Hinz, S. und Eineder, M. (2008): SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN* 7:243–252.
- Chang, L. und Hanssen, R. (2016): A probabilistic approach for InSAR time-series postprocessing. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 54(1):421–430.
- Chernick, M. (1999): *Bootstrap Methods: A Practitioner's Guide* (Wiley Series in Probability and Statistics). XVI. Wiley und Sons, S. 264. ISBN: 0-471-34912-7.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Iglesias, R. und Crippa, B. (2010): Persistent scatterer interferometry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 76(9):1061–1069.
- D'Errico, J. (2017): SLM - Shape Language Modeling. URL: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24443-slm-shape-language-modeling>.
- Engmann, S. und Cousineau, D. (2011): Comparing distributions: the two-sample Anderson-Darling test as an alternative to the Kolmogorov-Smirnov test. *Journal of Applied Quantitative Methods* 6(3):1–17.
- Fahrmeir, L., Kneib, T. und Lang, S. (2007): *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen*. 2007.
- Ferretti, A., Prati, C. und Rocca, F. (2001): Permanent Scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(1):8–20.
- Fornaro, G., Reale, D. und Verde, S. (2013): Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 10(4):677–681.
- Fuhrmann, T. (2016): Surface displacements from fusion of geodetic measurement techniques applied to the Upper Rhine Graben Area. Karlsruhe. URL: <http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000056073> (besucht am 31.01.2018).
- Gernhardt, S., Adam, N., Eineder, M. und Bamler, R. (2009): TerraSAR-X high resolution spotlight persistent scatterer interferometry. In: Proceedings of FRINGE Workshop.
- Grimm, M., Stober, I., Kohl, T. und Blum, P. (2014): Schadensfallanalyse von Erdwärmesondenbohrungen in Baden-Württemberg. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrologie in der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (FH-DGG)* 19(4):275–286.
- Hooper, A., Segall, P. und Zebker, H. (2007): Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112(B7).
- Kampes, B., Hanssen, R. und Perski, Z. (2003): Radar interferometry with public domain tools. In: Proceedings of Fringe Workshop.
- Koch, A., Martin, M., Prestel, R., Ruch, C., Sage, A. und Trapp, C. (2015): Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im nord-östlichen Stadtgebiet von Böblingen (Hebungsgebiet "Nord") - Sachstandsbericht. Forschungsber. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. URL: http://www.lgrb-bw.de/geothermie/boeblingen/pdf/Sachstandsbericht_EWS_Schadensfall_Boeblingen.pdf (besucht am 25.01.2018).
- Sass Ingo und Burbaun, U. (2012): Geothermische Bohrungen in Staufen im Breisgau: Schadensursachen und Perspektiven. *geotechnik* 35(3):198–205.
- Schenk, A. und Westerhaus, M. (2012): SAR-Interferometrie zur Bestimmung des vollständigen Bewegungsvektors - Möglichkeiten und Grenzen. *GeoMonitoring, TU Braunschweig* 2012.
- Schenk, A. (2014): PS-Interferometrie in urbanen Räumen – Optimierte Schätzung von Oberflächenbewegungen mittels Mult-SBAS Verfahren. Diss. Karlsruhe: Geodätisches Institut des KIT. 131 S.
- Scholz, F. W. und Stephens, M. A. (1987): K-sample Anderson-Darling tests. *Journal of the American Statistical Association* 82(399):918–924.
- Steinacker, A. (2015). Privatkommunikation. Landratsamt Böblingen - Wasserwirtschaft.
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G. und Culvenor, D. (2010): Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote sensing of Environment* 114(1):106–115.

Anhang

Analysis of the uplift phenomenon in Böblingen (Germany) using the PSI technique

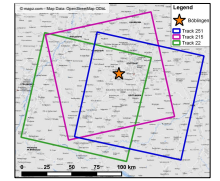
Maryse Wampach, Malte Westerhaus, Bernhard Heck

Motivation of the project

- Geothermal drillings in October 2006 and November 2008 in the inner city of Böblingen
- From 2011 on: Reports of building damages presumably linked to the geothermal activities
- First investigations show uplift trends of **6 mm/month** and an overall uplift of **37 – 45 cm** in the time period from 2011 to 2015
- No information on the spatial and temporal beginning of the uplift trend

Data base

- Envisat data, C-Band
- Time period: 2003 – 2010
- 3 Tracks; ascending (215) and descending (251, 22)
- Evaluation: Persistent Scatterer InSAR (PSI) analysis using StaMPS, mainly on track 251



Research goal: When and where was the beginning of the uplift phenomenon in Böblingen?

funded by the Ministry of the Environment, Climate Protection and the Energy Sector Baden-Württemberg

Methodical approach

Determine the temporal beginning?

- Shape Language Modelling (SLM) Toolbox (© John d'Errico) of Matlab

Idea:

Fit **splines** to PS time series using a **least squares** approach and a **smoothing criterion** and find changepoints and linear rates of the spline. A-priori knowledge regarding the **number of expected changepoints** and the **degree of the sub elements** of the overall function has to be introduced.

Applied model:

- Number of expected changepoints: 1, free
- Sub functions: 1 constant & 1 linear

Advantage: Flexible model handling which takes into account prior knowledge about the ongoing processes in the area of interest.

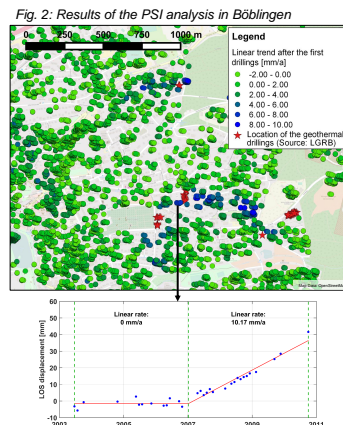


Fig. 3: Results of the SLM toolbox for a specified PS time series. The changepoint for this example is estimated to 04.01.2007.

Determine the accuracy of the SLM result (changepoint and linear trend)?

- Bootstrapping methods

Idea:

Bootstrapping methods allow the deduction of **statistical parameters from the dataset itself** without prior knowledge about the underlying distribution function.

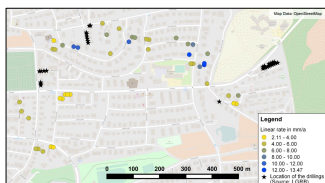
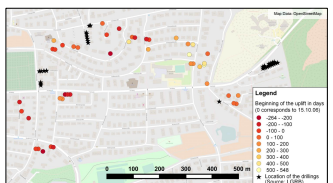
Bootstrapping of the residuals:

- Determine the residuals between model and real data
- Random resampling of the residuals
- Create **N synthetic time series** by adding the residuals to the model and determine their corresponding changepoint and linear trend
- Derive the **standard deviations of the changepoint and the linear trend**

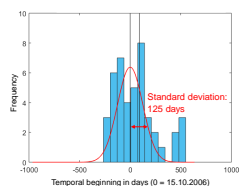
Results

1 Determination of the temporal and spatial beginning of the uplift

Applying the SLM model to 44 PS points with significant uplift parameters: $\text{std}(\text{changepoint}) < 180 \text{ days}$ and $\text{trend} > 3 \cdot \text{std}(\text{trend})$



The results in figure 4 and 5 show that the uplift phenomenon started in the south with a small rate (4 mm/a) and later continued to the northern and western parts of the area with higher rates of up to 13.5 mm/a. The beginning of the uplift is partly dated to 250 days before the first geothermal drillings in October 2006. The histogram in figure 6 shows that the data is nonetheless gaussian distributed with a standard deviation of 125 days. The following observations can be drawn from the three here presented figures:



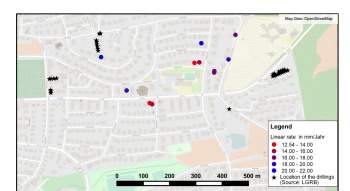
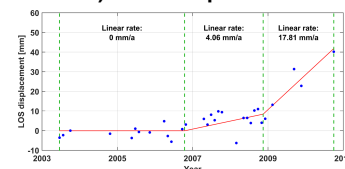
- There clearly exists a **correlation between the uplift phenomenon and the first geothermal drillings** in October 2006.
- A second, smaller maximum in the beginning of 2008 indicates an **increase of the uplift trend at a later point in time.**

2 Increase of the uplift trend in 2008?

Modify the SLM model to the following settings:

- Number of expected changepoints: 2, fixed to 15.10.06 and 15.11.08
- Sub functions: 1 constant, 2 linear

This model is applied to PS points which show a **linear trend greater than 3 mm/a after 15.10.2006** (69). Subsequently, an analysis which looks for significant trend changes ($\text{trend} > 2 \cdot \text{std}(\text{trend})$) after 15.11.2008 is performed and finds **12 PS points with increased linear rates (up to 22 mm/a) after this point in time.**



3 Next steps

- Increase the spatial point density by interpolating the PS points of the single tracks.
- Introduce an additional uplift model in the processing chain in order to enhance the spatial density of the PS points.
- Increase of the temporal density of data points in the time series by combining both available descending tracks (251 and 22).
- Perform a monitoring scenario with the parameters of Sentinel-1.

Bestimmung von Trendänderungen in InSAR-Zeitreihen

Maryse Wampach¹ und Malte Westerhaus¹

¹ Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie,
E-Mail: maryse.wampach@kit.edu, malte.westerhaus@kit.edu

Zusammenfassung

In den Jahren 2006 und 2008 wurden im östlichen Stadtgebiet Böblingen Erdwärmesonden im Tiefenbereich von 80 m bis 130 m installiert. Es gilt inzwischen als gesichert, dass durch die Arbeiten während der zweiten Bohrphase im Herbst 2008 ein Quellvorgang im Untergrund ausgelöst wurde, der sich an der Oberfläche mit lokalen Hebungen und Hebungsraten bis zu mehreren cm pro Jahr bemerkbar macht. Der Zusammenhang zwischen Bohrarbeiten, Beginn des Hebungsereignisses und dem Schadensbild an Gebäuden und Infrastruktur ist für diesen Zeitraum auf Basis verschiedener geodätischer Messverfahren sehr gut dokumentiert, auch der Erfolg von Sanierungsmaßnahmen lässt sich mit Hilfe von Aufnahmen des Radarsatelliten TerraSAR-X eindeutig verfolgen. Für den Zeitraum der ersten Bohrphase im Oktober 2006 ist die Beobachtungslage wesentlich schlechter. Es bestand der Verdacht, dass auch durch diese Bohrungen lokale Hebungen ausgelöst wurden, Beginn und Ausgangspunkt der Hebungssignale waren aber nicht genau bekannt. Im Rahmen eines vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg geförderten Forschungsvorhabens sollte der Frage nach dem zeitlichen und räumlichen Beginn der Hebungsvorgänge ab 2006 und dem möglichen Zusammenhang mit den Geothermie-Bohrungen im südlichen Schadensgebiet nachgegangen werden. Insbesondere war zu klären, mit welcher Präzision sich der Beginn des Hebungsereignisses mittels SAR-Interferometrie retrospektiv bestimmen lässt, um eine mögliche Koinzidenz mit den verursachenden Arbeiten quantitativ zu belegen. Dazu wurden Radarszenen des Envisat-Satelliten mittels der Persistent Scatterer InSAR (PSI) Technik für den Zeitraum 2003 – 2010 ausgewertet und statistische Untersuchungen zur Anpassung eines Bewegungsmodells an die PS-Zeitreihen durchgeführt. Nach Korrektur systematischer Fehler koinzidiert das wahrscheinlichste Datum für den Hebungsbeginn bis auf wenige Tage mit der ersten Bohrphase vom 12. – 18.10.2006. Die Präzision des geschätzten Hebungsbegins, die vom Akquisitionintervall der Radarszenen, dem Datenrauschen und der Hebungsrates abhängt, beträgt 115 Tage.

1 Einleitung

Mit der steigenden Verfügbarkeit geodätischer Messdaten wird deutlich, dass die wirtschaftliche Nutzung des Untergrundes vielerorts Auswirkungen an der Erdoberfläche hat. Eine Karte der aus Präzisionsnivelements abgeleiteten vertikalen Bodenbewegungen in Südwestdeutschland zeigt, dass anthropogene Effekte die natürlichen Bewegungen im Allgemeinen um ein bis zwei Größenordnungen übertreffen und das

Bewegungsbild dominieren (Fuhrmann u. a., 2014). In Ballungsräumen können anthropogene Bodenbewegungen zu einer Beeinträchtigung der Wohn- und Infrastruktur führen, insbesondere aber stellen sie eine Herausforderung für die gesellschaftliche Akzeptanz wirtschaftlicher und technischer Aktivitäten im Untergrund dar.

Eine besondere Situation herrscht in Baden-Württemberg, wo häufig bereits in geringer Tiefe Gips-



keuperschichten anstehen. Das in diesen Schichten vorkommende Mineral Anhydrit wandelt sich durch Wassereinlagerung zu Gips und vergrößert dabei sein Volumen um mehr als 50%. In den vergangenen Jahrzehnten ist der Quellvorgang durch technische Eingriffe in den Untergrund wiederholt ausgelöst worden und hat zu ernsthaften Schäden an der Statik von Tunneln und Wohngebäuden geführt. Beispiele aus jüngster Zeit sind die Hebungsereignisse in Staufen/Breisgau und Böblingen, wo eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass unzureichend abgesicherte Geothermiebohrungen den Quellvorgang ausgelöst haben könnten. Da in den kommenden Jahren die wirtschaftlich/technische Nutzung des Untergrundes weiter zunehmen wird (Förderung von Kohlenwasserstoffen, CO_2 -Sequestrierung, flache/tiefe Geothermie, Grundwasserentnahme, technische Infrastrukturprojekte), müssen neben der Ausweisung von Verbotsgewässern und verbesserten Bauverfahren auch flächendeckende Monitoringverfahren weiterentwickelt werden, die ein Hebungs- oder Senkungsereignis frühzeitig aufdecken. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Deformationsmessung mit Radarsatelliten mit synthetischer Apertur (SAR-Satelliten) zu, die in der Lage sind, Bodenbewegungsereignisse mit hoher Präzision räumlich und zeitlich einzugrenzen und zu vermessen. Insbesondere die für die kontinuierliche Erdbeobachtung ausgelegten C-Band Missionen der ESA können aufgrund ihrer regelmäßigen Erfassung und Archivierung von Radarbildern des Untergrundes entscheidende Hinweise auf den Beginn eines Deformationsereignisses geben. Die im April 2014 gestartete Erdbeobachtungsmission Sentinel 1 wird im Verein mit den im Rahmen des EU-Projektes Copernicus zur Verfügung gestellten Produkten die Nutzung der SAR-Interferometrie dabei wesentlich voranbringen.

Dieser Artikel befasst sich mit dem Hebungsereignis im Stadtgebiet Böblingen. Seit 2011 werden aus mehreren Gebieten im Ostteil der Stadt Gebäudeschäden im Zusammenhang mit einer Anhebung des Untergrundes gemeldet (siehe Abbildung 1.1). Es besteht der Verdacht, dass die Hebungen, die inzwischen mehrere Dezimeter betragen, auf einen Quellvorgang im unter der Stadt anstehenden Gipskeuper zurückzuführen sind, der möglicherweise durch Geothermiebohrungen in den Jahren 2006 bis 2008 ausgelöst wurde. Für den Ende 2008 einsetzenden Hebungsprozess im

nördlichen Schadensgebiet wurde dieser Zusammenhang inzwischen gut dokumentiert und gilt als bestätigt (Koch u. a., 2015), im südlichen Schadensgebiet sind Beginn und Ausgangspunkt der Hebungssignale noch nicht eindeutig geklärt.

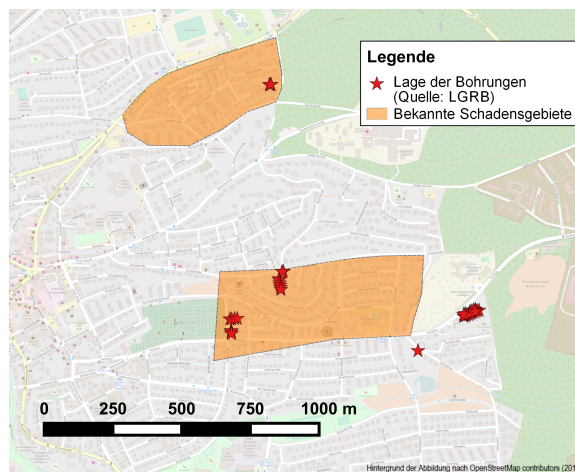


Abbildung 1.1: Lage der Schadensgebiete sowie der Geothermiebohrungen in der Innenstadt Böblingens (Steinacker, 2015).

Um die Beobachtungslage für diese Fragestellung zu verbessern, wurden die im Archiv der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA vorhandenen Radarszenen des C-Band Satelliten ENVISAT der Jahre 2003 bis 2010 für benachbarte Beobachtungstreifen, die sich im Stadtgebiet Böblingen überschneiden, mit den Methoden der Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie (PSI) ausgewertet. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengestellt. Im Fokus dieses Artikels steht die Frage, wie genau der Beginn eines plötzlich einsetzenden Bodenbewegungsereignisses wie in Böblingen aus PSI-Zeitreihen rekonstruiert werden kann.

2 PSI-Ergebnisse

Insgesamt stehen 107 SLC-Radarszenen des C-Band Satelliten Envisat aus vier benachbarten, auf- und absteigenden Orbits für die Untersuchung zur Verfügung. Aufgrund von technischen Gegebenheiten konnten nicht alle Szenen in der PS-Prozessierung verwendet werden. Insbesondere für die aufsteigenden Tracks standen zu wenig Szenen zur Verfügung, um die statistischen Verfahren der SAR-Interferometrie anwenden zu können. Die nachfolgende Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die geographische Lage der beiden auswertbaren Satellitentracks, während Tabelle 2.1 die Anzahl an ausgewerteten Szenen anzeigt.

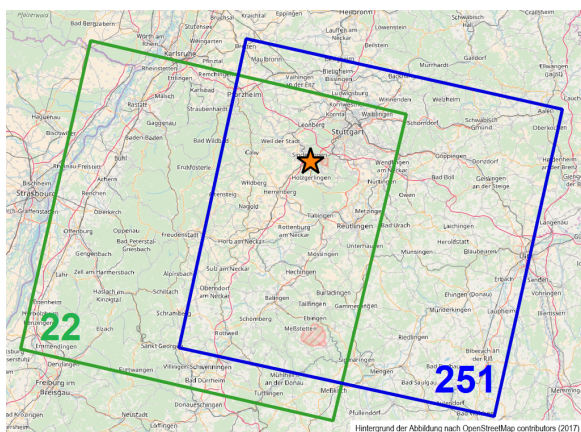


Abbildung 2.1: Übersicht über die Lage der auswertbaren Envisat-Tracks.

Tabelle 2.1: Anzahl der in der Prozessierung verwendeten SAR-Szenen.

Track	Anzahl an ausgewerteten Szenen	Bemerkung
251	32	Absteigender Orbit
22	30	Absteigender Orbit
215	16	Aufsteigender Orbit; zu wenig Szenen
444	12	Aufsteigender Orbit; zu wenig Szenen

Die Datenprozessierung erfolgte nach der Methode der Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie (PSI) auf Basis der wissenschaftlichen Softwarepakete DORIS (Kampes u. a., 2003) und StaMPS (Hooper u. a., 2007). StaMPS eignet sich für den vorliegenden Fall besonders, da bei dieser Umsetzung der PS-Prozessierungsstrategie im Gegensatz zu anderen Programmen kein (lineares) Bewegungsmodell für die PS-Punktsuche verlangt wird. Zur Reduzierung des topographischen Phasenanteils wurde ein SRTM-3-Geländemodell (*Shuttle Radar Topography Mission*) eingeführt. Szenen mit außergewöhnlich starken atmosphärischen Phasensignalen wurden nach einem ersten Durchlauf aussortiert.

Ein wesentliches Charakteristikum der interferometrischen SAR-Daten ist deren Mehrdeutigkeit. Phasemessungen können nur Werte zwischen $[-\pi, +\pi]$ annehmen. Die Phasemehrdeutigkeit wird im Verlauf der Prozessierung durch die Phasenabwicklung beseitigt, deren Grundannahme darin besteht, dass sich die Phasendifferenzen zwischen zwei räumlich oder zeitlich benachbarten Punkten auf dieses Intervall be-

schränken. Durch hohes Phasenrauschen, große horizontale Deformationsgradienten oder große räumliche und zeitliche Punktabstände können dabei jedoch Fehler auftreten, die zu einer Über- oder Unterschätzung der abgeleiteten Bewegungsraten führen können. Derartige Fehler wurden bei der Analyse der Tracks 22 und 251 vor allem in den Jahren 2009 bis 2011 beobachtet, da für diesen Zeitraum nur wenige Aufnahmen vorliegen. Die Probleme konnten durch eine Reduzierung des Gitterabstandes zur Phaseninterpolation (StaMPS Parameter *unwrap_grid_size*) auf 20 m sowie durch eine Vergrößerung des Zeitfensters für die Bestimmung des Phasenrauschens (StaMPS Parameter *unwrap_time_win*) auf 360 Tage (default: 730 Tage) weitgehend, aber nicht vollständig gelöst werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der PS-Prozessierung ist das sogenannte *Weeding*. In diesem Schritt werden Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den gefundenen PS-Punkten ausgewertet, um redundante Punkte (unmittelbar nebeneinander liegende, als PS-Punkte eingestuft Punktes, die jedoch vom selben physikalischen Rückstreuer stammen) und/oder Einzelpunkt-bewegungen aufzuspüren und zu beseitigen. Ziel ist es, eine PS-Punktdichte zu finden, die einerseits das Bewegungsgebiet ausreichend abdeckt und sich andererseits auf möglichst verlässliche Punkte stützt. Im vorliegenden Fall blieben nach dem *Weeding* zu wenig Punkte übrig, um das Hebungsgebiet im Hinblick auf die nachfolgend beschriebenen statistischen Untersuchungen ausreichend abzudecken. Daher wurde auf das *Weeding* verzichtet; stattdessen wurden redundante Punkte im Zuge einer Clusteranalyse reduziert.

Da die PSI-Zeitreihen aus Track 22 aus bisher nicht vollständig verstandenen Gründen erheblich stärker verrauscht sind, werden im weiteren Verlauf nur Ergebnisse für Track 251 verwendet. Im Hinblick auf die Interpretation der Ergebnisse gilt es zu beachten, dass der Satellit die Schrägentfernung (Line-of-Sight, LoS) zwischen SAR-Antenne und Bodenpunkt misst. Das Messsignal enthält daher sowohl vertikale als auch horizontale Verschiebungskomponenten, die nur auf Basis von Zusatzinformationen getrennt werden können. Wenn im Folgenden von „Hebungen“ gesprochen wird, ist damit immer die Bewegung in Schrägentfernung gemeint. Da zur Vermeidung von räumlichem Aliasing vor der Analyse eine zweifache Überabtastung der SAR-Szenen vorgenommen wurde, ist jeder

PS-Punkt repräsentativ für ein 2 m x 10 m großes Areal am Untergrund.

Abbildung 3.1 zeigt einen Ausschnitt des Stadtgebietes Böblingen mit den entsprechend ihrer mittleren Bewegungsrate eingefärbten PS-Punkten. Die bekannten Schadensgebiete im Süden und im Norden treten deutlich hervor (blaue Punkte). Die über den gesamten Beobachtungszeitraum gemittelten, in der Schrägrichtung zum Satelliten gemessenen Verschiebungsraten in diesen Gebieten liegen zwischen 2 mm/Jahr und 6 mm/Jahr. Im restlichen Stadtgebiet werden keine signifikanten Verschiebungsraten beobachtet, insbesondere treten auch keine Absenkungen auf. Ein Blick auf exemplarische PSI-Zeitreihen aus dem südlichen Gebiet (S1, S2, S3) - siehe Abbildung 3.1 - zeigt deutlich eine im vierten Quartal 2006 einsetzende positive Bewegung mit Raten zwischen 4 mm/Jahr und 9 mm/Jahr. Der Beginn der Hebungssignale koinzidiert mit der ersten Geothermie-Bohrphase am 12.10.2006. Eine genauere Untersuchung dieser möglichen Übereinstimmung ist Gegenstand der nachfolgenden Abschnitte.

3 Modellierung der Hebungen

3.1 Anpassung eines Bewegungsmodells

Kernziel des Projektvorhabens ist die Bestimmung des zeitlichen und räumlichen Hebungsbeginns im Stadtgebiet Böblingens. Diese Aufgabe wird durch Anpassung eines Bewegungsmodells r_{mod} an die Daten gelöst:

$$r_{mod} = \begin{cases} 0, & \text{für } t < T \\ v \cdot t, & \text{für } t \geq T \end{cases} \quad (3.1)$$

Im Zuge einer Inversionsrechnung werden Hebungsbeginn T und Hebungsrates v bestimmt. Das Modell (3.1) hat gegenüber anderen möglichen Erklärungsmöglichkeiten verschiedene Vorzüge:

- Es erklärt die Daten ausreichend gut (die Verteilungsfunktion des Residuums widerspricht nicht der Annahme einer Normalverteilung).
- Es erklärt die Daten nur unwesentlich schlechter als komplexere Modelle mit einer höheren Anzahl anzupassender Parameter.

- Im Gegensatz zu Modellen mit höheren Polynomgraden liefert es einen definierten Zeitpunkt für den Beginn des Hebungsereignisses.
- Es widerspricht nicht den physikalischen Vorstellungen. Es gibt beispielsweise keine Anhaltspunkte dafür, dass sich das durch den Quellvorgang im Untergrund ausgelöste Hebungsereignis an Messpunkten in einiger Entfernung zu den Bohrungen über allmählich zunehmende Hebungsraten manifestieren müsste.

Nach dem Prinzip vom *Ockhams Rasiermesser*, nach dem von mehreren Modellen für ein und denselben Sachverhalt die einfachste Variante vorzuziehen sei, haben wir uns daher für dieses Modell entschieden, da es zudem klare Aussagen zur Ausgangsfragestellung der Untersuchungen ermöglicht. Das Bewegungsmodell kann mittels eines Inversionsansatzes über Absuchen des (T, v) -Parameterraumes an die PSI-Zeitreihen angepasst werden, was für Referenzzwecke auch durchgeführt wurde. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten wurde für die Modellierungszwecke allerdings vorrangig das Programmpaket SLM (Shape Language Modeling, siehe D'Errico (2017)) getestet und eingesetzt. Bei SLM handelt es sich um eine Matlab Toolbox, die via Fileexchange unter dem Link <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24443-slm-shape-language-modeling> abgerufen werden kann. Das Copyright liegt bei dem Autor der Software, John D'Errico. SLM ist frei verfügbar, setzt aber die kommerzielle Programmierumgebung Matlab ab Release R2014b voraus.

Das in SLM implementierte Werkzeug sind kubische Splines (*least squares splines*), die grundsätzlich eine sehr flexible Modellierung von Beobachtungszeitreihen ermöglichen. Das wesentliche Konzept der Software besteht jedoch darin, dass der Nutzer die Form der Modellkurven vorgeben und damit Vorinformation in den Anpassungsprozess einfließen lassen kann. Die Vorgaben können sehr einfach oder auch sehr detailliert gehalten werden, sie betreffen u.a. den Grad der Splines, die Anzahl und Lage der Knoten, Monotonie oder Differenzierbarkeit. Die Modellkurve wird unter Beibehaltung der vorgegebenen Form optimal an die Daten angepasst. Damit wird der Nutzer in die Lage versetzt, nicht nur mathematische Funktionen wie z.B. Polynome an die Daten zu fiten, sondern gezielt Hypothesen über die zugrundeliegenden physikalischen

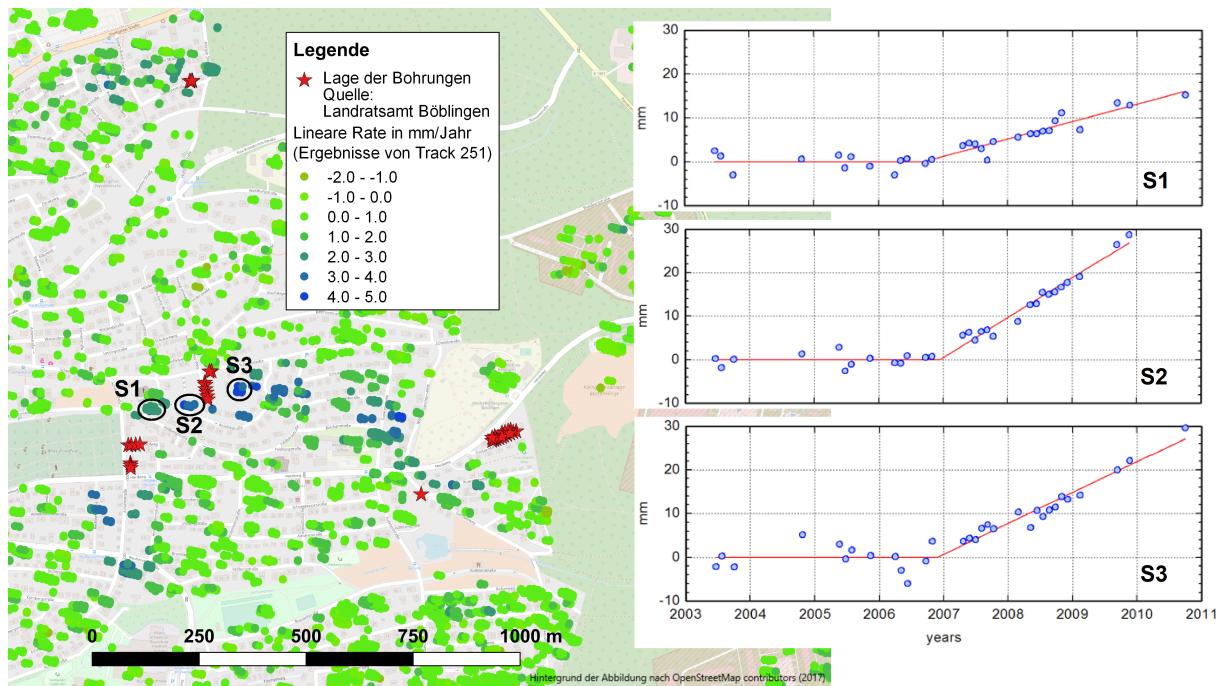


Abbildung 3.1: Drei Beispiel-Zeitreihen im südlichen Hebungsgebiet. Die roten Linien zeigen ein einfaches Bewegungsmodell, das bestmöglich an die gegebenen LOS-Verschiebungen (blaue Punkte) angepasst wurde.

Prozesse an den Daten zu testen.

Auch das Bewegungsmodell r_{mod} (Gleichung 3.1) lässt sich als Vorgabe in SLM realisieren. Dazu wird der Grad der Splines zu Eins gesetzt, sodass nur lineare Segmente erlaubt sind. Die Anzahl der Segmente wird durch die Zahl der sogenannten Knoten zwischen Anfangs- und Endpunkt der Zeitreihe bestimmt. Für das einfache Bewegungsmodell r_{mod} wurde ein Knoten vorgegeben, dessen genaue Lage als unbekannt angenommen wurde. Damit besteht das SLM-Modell aus zwei linearen Segmenten, wobei zusätzlich die Steigung des ersten Segmentes zu Null gesetzt wurde. Aufgabe der Software ist es damit, die Lage des Knotens (= Hebungsbeginn) und die Steigung des zweiten Segmentes optimal an die Datenreihen anzupassen.

Ungeachtet der hohen Flexibilität und der Vielfältigkeit der Anwendungen liefert der SLM-Algorithmus keine Genauigkeitsangaben für die angepassten Modellparameter. Die Ableitung von Vertrauensmaßen für den Beginn und die Rate des Hebungsereignisses in Böblingen sind aber integraler Bestandteil unseres Projekts. Um dieses Problem zu lösen, werden die Genauigkeitsangaben a-posteriori auf der Basis eines Bootstrapping-Verfahrens ermittelt.

Bootstrapping ist eine Methode zur Schätzung statistischer Kenngrößen wie Varianz oder Vertrauensinter-

valle, wenn die zugrundeliegende theoretische Verteilungsfunktion nicht bekannt ist. Grundlage ist eine einzige Stichprobe, aus der durch Ziehen mit Zurücklegen eine große Anzahl weiterer Stichproben generiert wird. Für jede Stichprobe wird ein Wert für die interessierende Zufallsvariable (in unserem Fall Hebungsbeginn T und Hebungsrate v) ermittelt, und aus der Gesamtheit der Ergebnisse werden empirische Verteilungsfunktionen für die interessierenden Größen bestimmt. Die empirischen Verteilungsfunktionen ersetzen die unbekannte theoretische Verteilung (Chernick, 1999).

Es existieren verschiedene Bootstrapping-Varianten. Nach eingehenden Tests haben wir uns für das sog. Residuen-Bootstrapping entschieden. Dabei wird zunächst das Modell \hat{y} an die Daten y angepasst und das Residuum e berechnet:

$$e_i = y_i - \hat{y}$$

Im nächsten Schritt wird durch Ziehen mit Zurücklegen ein synthetisches Residuum \hat{e}_j erzeugt, wobei j jeweils zufällig aus der vollständigen Liste für den Index $i = 1, \dots, m$ gewählt wird. Das dergestalt umsortierte

Tabelle 3.1: Ergebnisse einer Bestanpassung des Bewegungsmodells an drei beispielhaften PS-Zeitreihen aus dem südlichen Hebungsgebiet (siehe Abbildung 3.1) mittels SLM. Die Standardabweichungen wurden durch Bootstrapping (je 1000 Durchläufe) bestimmt. Die erste Bohrphase in Böblingen begann am 12.10.2006.

Punkt	Mittlere Verschiebung von 2003 bis 2006 (mm)	Mittleres Rauschen (mm)	Hebungsbeginn (Tag)	Standardabw. Hebungsbeginn (Tage)	Rate ab 2006 (mm/Jahr)	Standardabw. Rate (mm/Jahr)
S1	-0.91	1.54	14.09.2006	82	3.99	0.37
S2	-1.47	1.37	11.12.2006	35	9.14	0.44
S3	-0.90	2.23	22.11.2006	64	7.05	0.55

Residuum wird auf das Modell addiert, und es wird eine synthetische Beobachtungsreihe \hat{y}_i^* generiert:

$$\hat{y}_i^* = \hat{y}_i + \hat{\epsilon}_j$$

Nun wird der Optimierungsschritt wiederholt. Das Modell \hat{y} wird an die synthetische Datenreihe \hat{y}_i^* angepasst, und es werden die interessierenden Parameter erneut bestimmt. Der Vorgang wird häufig wiederholt bis eine aussagekräftige empirische Verteilungsfunktion für jeden Parameter vorliegt, aus der die gesuchten statistischen Größen wie Mittelwert und Varianz abgelesen werden können.

Das Verfahren wurde an den drei exemplarischen Zeitreihen aus Abbildung 3.1 getestet. Zur Schätzung der Präzision wurde das Residuen-Bootstrapping mit je 1000 Durchläufen eingesetzt. Die Resultate sind in Ta-

belle 3.1 zusammengefasst. Die Standardabweichungen für den Hebungsbeginn T schwanken zwischen 35 und 82 Tagen und liegen damit in der Größenordnung des mittleren Erfassungsintervalls von 86 Tagen. Die Standardabweichungen für die Hebungsrate v liegen zwischen 0.37 und 0.55 mm/Jahr. Die zeitliche Koinzidenz mit den Geothermiebohrungen wird deutlich, allerdings streut der Hebungsbeginn um bis zu zwei Monate um den Zeitpunkt der ersten Bohrphase. Es ist zu bemerken, dass bei diesem Test eine mögliche Zunahme der Bewegungsraten durch die zweite Bohrphase im September/Dezember 2008 nicht berücksichtigt und keine systematischen Fehlerkorrekturen vorgenommen wurden. Die Ergebnisse wurden mit dem klassischen Inversionsansatz über Absuchen des T, v -Parameterraumes verifiziert.

3.2 Synthetische Untersuchungen

Zur besseren Einschätzung der Ergebnisse werden im Folgenden die statistischen Eigenschaften des nach Gleichung 3.1 formulierten Problems mit Hilfe von synthetischen Rauschmodellen beschrieben. Anschließend wird überprüft, inwieweit der Lösungsansatz über SLM inklusive des Bootstrapping Verfahrens die Statistik adäquat repräsentiert.

Beschreibung des synthetischen Experimentes

Grundlage der synthetischen Experimente ist das Modell r_{mod} nach Gleichung 3.1, dem ein normalverteiltes Rauschsignal überlagert wird. Einem vorausgehenden Hypothesentest nach Kolmogorov-Smirnov zufolge verstoßen nur sehr wenige der durch Bootstrapping erzeugten Residuen gegen die Null-Hypothese, sodass die Annahme einer Normalverteilung gerechtfertigt erscheint. Für die zeitliche Diskretisierung des Modells wurden die tatsächlichen Aufnahmezeitpunk-

te der SAR-Szenen oder realistische Annahmen für künftige Satellitenmissionen zugrunde gelegt. Um eine Kontamination durch die mögliche Beschleunigung des Hebungs Vorganges nach der zweiten Bohrphase zu vermeiden, wurden nur Akquisitionszeitpunkte bis Ende 2008 verwendet (26 für Track 251, 50 für die Kombination der beiden Tracks 251 und 22). Der Beginn des Hebungseignisses wurde im Modell auf den 12.10.2006 festgelegt, die Hebungsrate wurde schrittweise über den Bereich von 3 mm/Jahr bis 30 mm/Jahr variiert.

Es wurden zahlreiche Experimente durchgeführt, die die Abhängigkeit der gesuchten Modellparameter von der Hebungsrate, der Rauschamplitude und der Akquisitionsrate der Radarbilder untersuchen. Jedes Experiment besteht aus fünf Durchläufen, wobei pro Durchlauf 500 synthetische Messreihen erzeugt und die Parameter T_i (Hebungsbeginn) und v_i (Hebungsrate) über SLM bestimmt werden ($i = 1 \dots 500$, Num-

mer der Stichprobe). Aus den 500 Werten wurden pro Durchlauf Mittelwerte und Standardabweichungen $\sigma_{T,k}$ und $\sigma_{v,k}$ berechnet ($k = 1 \dots 5$, Nummer des Durchlaufs), anschließend wurden diese über alle Durchläufe gemittelt. Auf diese Weise wurden für jedes Experiment basierend auf 2500 Stichproben repräsentative Werte für Hebungsbeginn T und Hebungsrate v sowie deren Standardabweichungen σ_T und σ_v bestimmt. Es ist zu betonen, dass bei diesen Experimenten zunächst kein Bootstrapping angewendet wird, sondern das Rauschen für jede einzelne Stichprobe aus der Grundgesamtheit der Normalverteilung gezogen wird.

Abhängigkeit vom Messrauschen

Mit der ersten Modellsequenz zur statistischen Struktur des Problems wurde die Abhängigkeit der gesuchten Parameter vom Messrauschen σ_n untersucht. Zu diesem Zweck wurde die Standardabweichung des Modellrauschens in sieben Stufen von 1.7 mm auf 4.5 mm gesteigert. Abbildung 3.2 zeigt die Gesamtmittel-

werte jedes Experimentes als Funktion der wahren Hebungsrate. Wesentliches Ergebnis dieses Experimentes ist, dass die Hebungsrate oberhalb eines rauschabhängigen Schwellwertes zuverlässig mit annähernd gleichbleibender Präzision detektiert wird (Abbildungen 3.2c und 3.2d).

Die Schwellwerte betragen 4 mm/Jahr für $1.7 \text{ mm} \leq \sigma_n \leq 2.3 \text{ mm}$, 6 mm/Jahr für $1.7 \text{ mm} \leq \sigma_n \leq 3.5 \text{ mm}$ und 7 mm/Jahr für $\sigma_n = 4.5 \text{ mm}$, die Standardabweichungen variieren rauschabhängig zwischen 0.85 mm/Jahr und 2.2 mm/Jahr, sind aber oberhalb des Schwellwertes weitgehend unabhängig von der wahren Hebungsrate. Im Gegensatz dazu weicht der Hebungsbeginn für Raten unterhalb von 10 mm/Jahr bis 20 mm/Jahr systematisch um bis zu -140 Tage vom Sollwert ab, erst für große Hebungsraten nähern sich die Ergebnisse dem wahren Wert an (Abbildung 3.2a). Die Standardabweichungen fallen über das ganze Untersuchungsintervall exponentiell von mehreren hundert Tagen auf unter 50 Tage ab (Abbildung 3.2b).

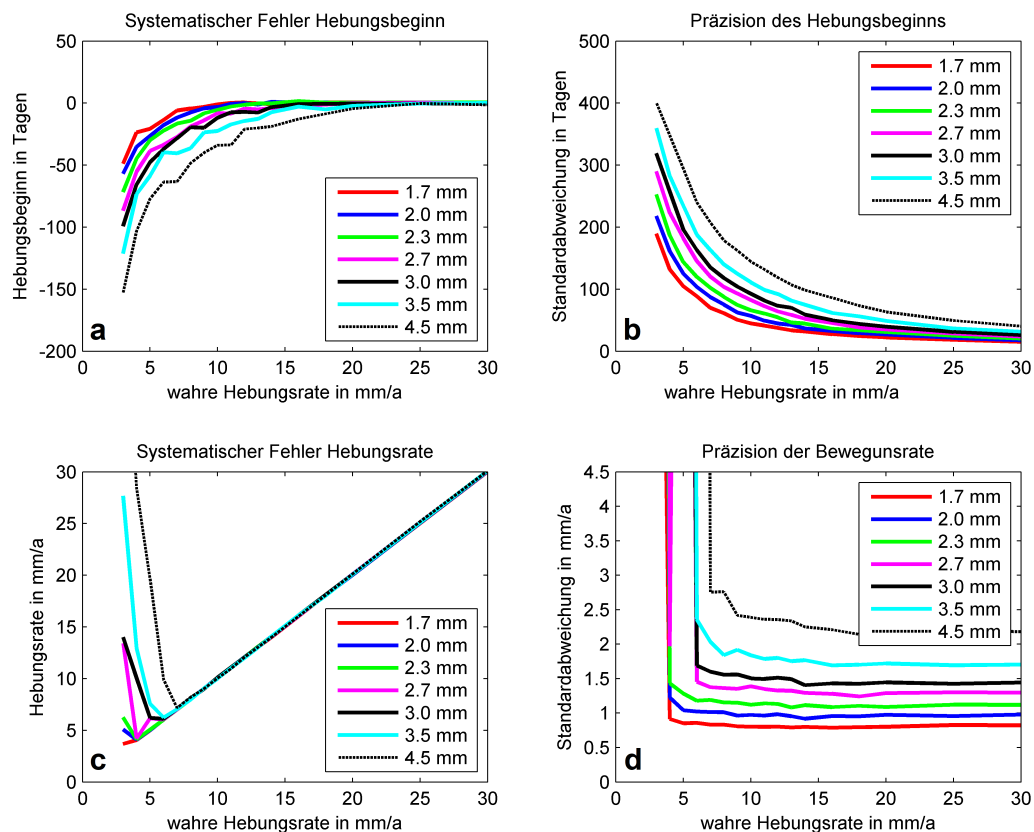


Abbildung 3.2: Systematische Fehler (links) und Standardabweichungen (rechts) für den Hebungsbeginn und die geschätzte Hebungsrate als Funktion des Datenrauschens und der wahren Hebungsrate. Dargestellt sind jeweils die Gesamtmittelwerte jedes Experimentes.

Der hier untersuchte statistische Prozess hat demnach die Eigenschaft, dass der im Zuge der Dateninversion geschätzte Hebungsbeginn in der Zeit systematisch verschoben wird und vor dem eigentlichen Beginn liegt. Bei einer Hebungsrate von 6 mm/Jahr betragen die Abweichungen rauschabhängig -13 Tage bis -63 Tage. Dieses Ergebnis muss bei der Interpretation der PSI-Beobachtungen berücksichtigt werden, um keine falschen Schlussfolgerungen zu ziehen. Die Vergleichsuntersuchungen belegen, dass dieses Ergebnis nicht von der verwendeten Methode (SLM oder grid search) abhängt, sondern in der Struktur des Problems selbst liegt.

Abhängigkeit vom Akquisitionsintervall

Eine Verdichtung der Aufnahmezeit führt zu einer konsistenten Schätzung der Hebungsparameter, da sowohl der systematische Fehler als auch die Präzision des Hebungsbeginns mit kürzer werdendem Akquisitionsintervall deutlich abnehmen.

Die Kombination der beiden benachbarten Envisat-Tracks 251 und 22 ergibt eine moderate Verbesserung, während der systematische Fehler bei Verwendung von ununterbrochenen Datenreihen der Satelliten Sentinel 1a und 1b mit Akquisitionsintervallen von jeweils 12 Tagen kaum noch signifikant in Erscheinung tritt (Abb. 3.3).

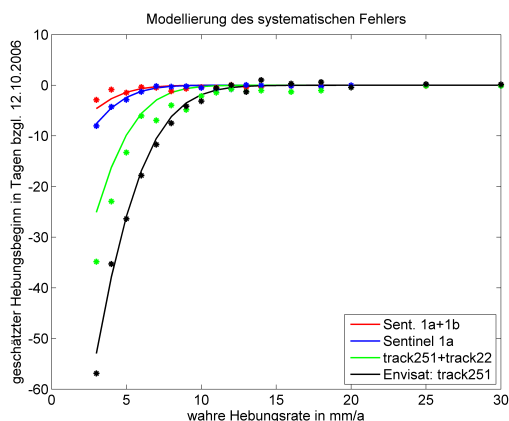


Abbildung 3.3: Der systematische Fehler des Hebungsbeginns als Funktion des Akquisitionsintervalls und der wahren Hebungsrate (Punkte). Das Datenrauschen wurde auf 2.0 mm festgesetzt. Durchgezogene Linien zeigen die Ergebnisse einer Modellierung des Fehlers auf Basis der Errorfunktion.

Die besten Ergebnisse erhält man für eine Kombination der beiden Sentinel-Satelliten und der daraus folgenden Verkürzung des Akquisitionsintervalls auf 6

Tage. Für eine Hebungsrate von 6 mm/Jahr betragen systematischer Fehler σ_B und Standardabweichung σ_T des Hebungsbeginns im Falle des einfachen Envisat-Datenstapels -17.8 Tage und 103 Tage, bei Sentinel 1a entsprechend -1.3 Tage und 36 Tage. Für die Kombination der Sentinel 1a und 1b Daten lässt sich ein solches Hebungsereignis mit einer Präzision von 25 Tagen bestimmen.

Modellierung der Ratenabhängigkeit

Für die konkrete Nutzung der Rauschuntersuchungen ist eine Modellierung der Ergebnisse notwendig. Dies gilt insbesondere für die systematische, rauschabhängige Verschiebung des Hebungsbeginns (Abb. 3.2a), die für die Interpretation der PSI-Beobachtungen von Bedeutung ist. Für die empirische Bestimmung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen der Verschiebung des Hebungsbeginns und der Standardabweichung wurde die aus der Statistik und Diffusionsproblemen bekannte Error-Funktion (*erf*) verwendet, die im Gegensatz zu anderen Funktionen wie beispielsweise der Exponentialfunktion konvergiert.

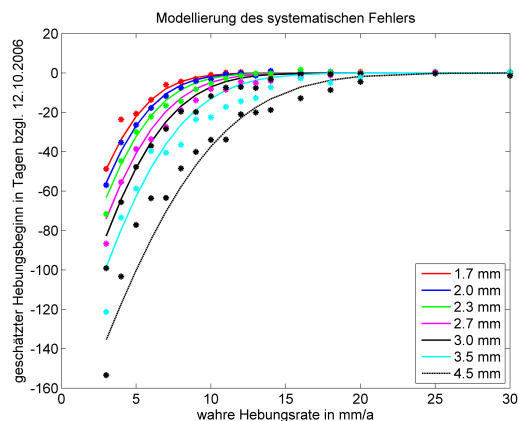


Abbildung 3.4: Der systematische Fehler des Hebungsbeginns als Funktion des Datenrauschens und der wahren Hebungsrate für den Envisat track 251 (Punkte).

Über einen iterativen Regressionsansatz mittels des *curve-fitting* Tools von Matlab wurde zunächst ein Modell der Form

$$y = a \cdot (\text{erf}(b \cdot x) - 1) \tag{3.2}$$

an jede Kurve aus Abb. 3.2a angepasst und die Parameter a und b bestimmt. Aus den in Tabelle 3.2 und 3.3 zusammengefassten Ergebnissen können anschlie-

ßend lineare Zusammenhänge zwischen b und a sowie zwischen a und σ_n abgeleitet werden:

$$b = -0.001065 \cdot a + 0.2993$$

$$a = 29.729 \cdot \sigma_n + 61.95$$

In beiden Fällen ist das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2 größer als 0.90, d.h. die abhängigen Variablen können zu über 90% durch das Modell erklärt werden (siehe dazu z.B. Fahrmeir u. a. (2007)). Damit ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen der systematischen Verschiebung des Hebungsbeginns T_{shift} und der Hebungsrate v für eine gegebene Standardabweichung des Rauchens σ_N :

$$T_{shift}(v|\sigma_n) = a \cdot (\operatorname{erf}((-0.001065 \cdot a + 0.3) \cdot v) - 1)$$

mit:

$$a = 30 \cdot (\sigma_n + 2)$$

Eine gleichartige Untersuchung ergibt für den Zusammenhang zwischen T_{shift} und dem (mittleren) Akquisitionsintervall dt :

$$T_{shift}(v|dt) = a \cdot (\operatorname{erf}((-0.000675 \cdot a + 0.245) \cdot v) - 1)$$

mit:

$$a = \sqrt{2} \cdot dt + 6$$

Die Ergebnisse der Regressionsanalysen sind in den Abbildungen 3.4 und 3.3 grafisch zusammengefasst. Eine multi-variate Betrachtung der gemeinsamen Abhängigkeit von T_{shift} von σ_n und dt bleibt weiterführenden Untersuchungen vorbehalten. Voraussetzung dafür sowie für die weitere Stabilisierung der bisherigen Ergebnisse sind umfangreiche zusätzliche Modellierungen des Rauschverhaltens.

Bootstrapping

Im Gegensatz zu den synthetischen Modellierungen steht in der realen Welt für jeden Beobachtungspunkt nur eine einzige Messreihe (die an diesem Punkt aufgezeichnete Zeitreihe der Beobachtungen) zur Verfügung. In diesem Fall ist eine einmalige Bestimmung der Modellparameter T und v möglich, die entsprechend der Varianz des Prozesses zufällig vom wahren Wert abweichen werden. Eine Verbesserung des Resultates kann – unter bestimmten Voraussetzungen – nur

über eine Mittelung über benachbarte Messpunkte erfolgen (siehe Abschnitt 3.3).

Mit Hilfe der synthetischen Modellierungen ist daher zunächst nur überprüfbar, ob Bootstrapping, durchgeführt an einer einzelnen Messreihe, in der Lage ist, die Standardabweichung des gegebenen Prozesses korrekt zu bestimmen. Diese Frage ist insofern wichtig, da die Anzahl der Akquisitionszeitpunkte für einen einzelnen Envisat Beobachtungstreifen (26 für Track 251) eher am unteren Ende der für das Bootstrapping-Verfahren empfohlenen Anzahl liegt (Chernick, 1999).

Für diese Rechnungen wurde die synthetische Modellierung dahingehend modifiziert, dass zunächst per SLM die Parameter T und v für eine einzelne, zufällig verrauschte Modellzeitreihe bestimmt wurden. Anschließend wurde über 500-maliges Residuen-Bootstrapping eine Verteilungsfunktion und damit die Standardabweichung der beiden Parameter geschätzt. Wie im oben vorgestellten Fall wurden fünf Durchläufe gerechnet und die Ergebnisse gemittelt. Der Vergleich mit den Ensemble-Ergebnissen zeigt, dass Residuen-Bootstrapping die Raten- und Rauschabhängigkeit der Standardabweichung des Hebungsbeginns sehr gut wiedergibt (Abb. 3.5).

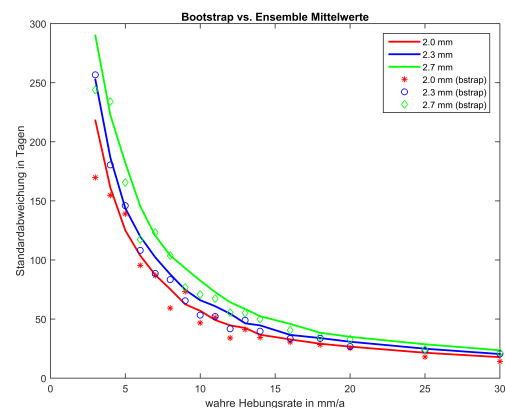


Abbildung 3.5: Vergleich der Standardabweichung des synthetischen Modells (Linien) mit den Bootstrap-Ergebnissen (Einzelsymbole) für den Hebungsbeginn.

Für diese Rechnungen wurde die synthetische Modellierung dahingehend modifiziert, dass zunächst per SLM die Parameter T und v für eine einzelne, zufällig verrauschte Modellzeitreihe bestimmt wurden. Anschließend wurde über 500-maliges Residuen-Bootstrapping eine Verteilungsfunktion und damit die Standardabweichung der beiden Parameter geschätzt. Wie im oben vorgestellten Fall wurden fünf Durch-

Tabelle 3.2: Regressionskoeffizienten a und b nach Anpassung des Modells 3.2 für die Envisat-Daten aus Track 251. R^2 steht für das korrigierte Bestimmtheitsmaß (*adjusted R-square*), n bezeichnet das Datenrauschen (einfache Standardabweichung)

	$n=1.7$	$n=2.0$	$n=2.3$	$n=2.7$	$n=3.0$	$n=3.5$	$n=4.5$
a in Tagen	110.3	115.5	134.7	139.7	161.8	165.8	191.5
b	0.1929	0.1694	0.1603	0.1364	0.1364	0.1165	0.09801
R^2	0.973	0.993	0.981	0.973	0.978	0.937	0.943

Tabelle 3.3: Regressionskoeffizienten a und b nach Anpassung des Modells 3.2 für verschiedene Datenzeitreihen mit unterschiedlichen mittleren Akquisitionsintervallen. dt bezeichnet das mittlere Akquisitionsintervall, das Rauschniveau wurde auf 2.0 mm festgesetzt.

	Sentinel 1a	Sentinel 1a/1b	Envisat 251	Envisat 251+22 (kombiniert)
a in Tagen	24.09	3.487	115.5	80.01
b	0.2303	0.1224	0.1694	0.188
R^2	0.968	0.654	0.993	0.972
dt in Tagen	12	6	75	41

läufe gerechnet und die Ergebnisse gemittelt. Der Vergleich mit den Ensemble-Ergebnissen zeigt, dass Residuen-Bootstrapping die Raten- und Rauschabhängigkeit der Standardabweichung des Hebungsbeginns sehr gut wiedergibt (Abb. 3.5).

Das Gleiche gilt für die Standardabweichung der Ratenbestimmung (Abb. 3.6), wobei hier eine leichte Tendenz zur Unterschätzung (ca. 10%) erkennbar wird, die bei genauerem Hinsehen auch für den Hebungsbeginn gilt. Insgesamt lässt sich jedoch festhalten, dass Residuen-Bootstrapping zur Bestimmung der Präzision der mit SLM bestimmten Parameter des Hebungsereignisses in Böblingen sehr gut verwendbar ist.

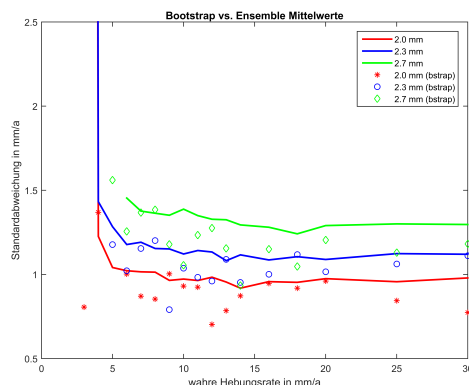


Abbildung 3.6: Vergleich der Standardabweichung des synthetischen Modells (Linien) mit den Bootstrap-Ergebnissen (Einzelsymbole) für die Hebungsrates.

3.3 Bestimmung des zeitlichen Hebungsbeginns

Wie im vorherigen Absatz erwähnt, steht für jeden Beobachtungspunkt nur eine einzelne Messreihe zur Ver-

fügung. Unabhängig vom angewendeten methodischen Ansatz werden die an diesem Punkt bestimmten Modellparameter des Hebungsereignisses statistisch streuen. Die Situation kann durch Mittelung über benachbarte Punkte verbessert werden, allerdings unter einigen zum Teil starken Annahmen:

- Die Rauschanteile benachbarter Messpunkte sind nicht korreliert. Um dies sicherzustellen, wurde eine Clusteranalyse (Matlab-Funktion *kmeans*) durchgeführt und für jedes Cluster nur die Zeitreihe mit dem geringstem Rauschen ausgewählt. Für die mittels Kriging-Interpolation kombinierten Orbits ist diese Vorgehensweise nicht möglich, deshalb wurde die räumliche Mittelung nur für den Beobachtungstreifen 251 durchgeführt.
- Der Prozess ist ergodisch, sodass Ensemble-Mittelwerte durch räumliche Mittelwerte ersetzt werden dürfen. Dies ist für die meisten natürlichen Prozesse der Fall; in der SAR-Interferometrie werden räumliche Mittelungen verschiedentlich angewendet.
- Das Hebungssignal setzt an allen benachbarten Punkten gleichzeitig ein. Diese Annahme ist die stärkste, da davon auszugehen ist, dass sich das Quellsignal von den Bohrpunkten aus entsprechend der Fließ- oder Diffusionsgeschwindigkeit des Grundwassers ausbreitet und daher eine gewisse Zeit braucht, um weiter entfernt liegende Messpunkte zu erreichen. Aus den zu Verfügung stehenden Datensätzen ist ein Zeitversatz allerdings

nicht erkennbar. Stattdessen scheint sich die spezielle Hebungssignatur im südlichen Hebungsgebiet innerhalb kurzer Zeit etabliert zu haben, wobei die langgestreckte, gebogene Form möglicherweise ein Hinweis auf den Einfluss rasch fließenden Grundwassers ist.

Unter diesen Annahmen wurde das Verfahren SLM + Bootstrapping zur Bestimmung von Hebungsbeginn T und Hebungsrate v für das südliche Hebungsgebiet in Böblingen angewendet. Da die Rechenzeit durch das nachgelagerte Bootstrapping etwa 1-2 Minuten pro Zeitreihe beträgt, musste zunächst eine Vorauswahl der zu untersuchenden Punkte getroffen werden, um die Gesamtlaufzeit möglichst gering zu halten. Um zu gewährleisten, dass die Untermenge an zu analysierenden Punkten zum einen PS-Zeitreihen mit deutlichem Hebungssignal enthält, zum anderen keine stark veräuschten Zeitreihen und solche ohne erkennbares Hebungssignal aufweist, wurde der statistische Test nach Anderson-Darling eingesetzt.

Der Anderson-Darling Test prüft zwei Stichproben (im vorliegenden Fall zwei Zeitreihen) auf Ähnlichkeit. Es ist ein nicht-parametrischer Hypothesentest bei dem keine Annahmen über die Verteilung der beiden zu untersuchenden Stichproben benötigt werden. Im Wesentlichen erfolgt eine Distanzmessung zwischen den zwei empirischen Verteilungsfunktionen. Ist die maximale Distanz D kleiner als ein kritischer Wert, besteht Ähnlichkeit zwischen den beiden Stichproben und der Test wird angenommen. Zur Berechnung des kritischen Wertes wird nach Scholz und Stephens (1987) eine Näherungsformel für die asymptotische Verteilung genutzt für die ein Signifikanzniveau vom Nutzer festgelegt werden muss. Der Anderson-Darling Test ist für unseren Fall besonders gut geeignet, da er sich auch auf kleine Stichproben (sprich Zeitreihen mit einer begrenzten Anzahl an Aufnahmezeitpunkten) anwenden lässt und zudem der Fokus des Tests auf der Form der Verteilungsfunktionen liegt. Er weist außerdem dahingehend Vorteile gegenüber dem sehr ähnlich funktionierenden und oft verwendeten Kolmogorov-Smirnov Test auf, als dass er auch sensitiv in den tails der Verteilungen und somit Ausreißer-sensitiv ist (Engmann und Cousineau, 2011).

Für die nach den Auswahlverfahren verbleibenden 60 Messpunkten wurden T_i und v_i ($i = 1 \dots 60$) per SLM

bestimmt und die Standardabweichungen mittels Bootstrapping berechnet. Anhand des Messrauschens vor dem vermuteten Beginn des Hebungssignales wurden entsprechend der Ergebnisse der statistischen Untersuchungen für jeden Punkt Schwellwerte v_{tresh} für die Hebungsrate sowie Korrekturwerte T_{corr} für den systematischen Fehler von T_i festgesetzt. Für die Bestimmung des gemittelten Hebungsbeginns T_m wurden nur Punkte mit $v_i > v_{tresh}$ und $T_i^c = T_i + T_{corr}$ zugelassen. Damit reduziert sich die Zahl der Messpunkte weiter auf 21.

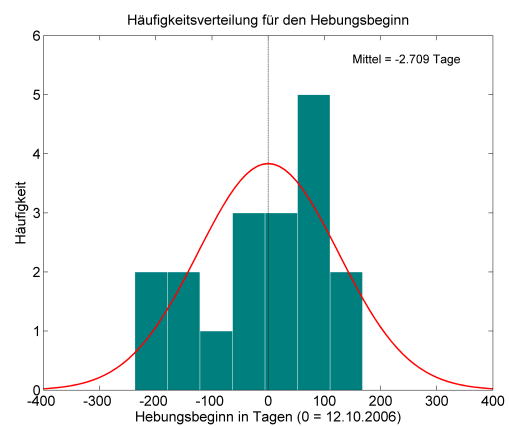


Abbildung 3.7: Häufigkeitsverteilung des Hebungsbeginns, berechnet aus 21 PS-Zeitreihen im Hebungsgebiet.

Der aus den verbleibenden Messpunkten gemittelte Hebungsbeginn weicht nur um wenige Tage vom Beginn der ersten Bohrphase am 12.10.2006 ab (Abb. 3.7). Da die Anzahl der Beobachtungswerte zu gering ist, um aus dem Histogramm in Abb. 3.7 eine aussagekräftige Verteilungsfunktion abzuleiten, wird zum Vergleich eine auf dem mittleren Messrauschen $\sigma_n = 3.1\text{mm}$ und der mittleren Hebungsrate $v_m = 8.2\text{mm/Jahr}$ (Abb. 3.8) basierende Verteilungsfunktion gezeigt, die einigermaßen gut zu der Verteilung der Histogrammwerte passt. Die Standardabweichung dieser Verteilungsfunktion beträgt 115 Tage (siehe dazu Abb. 3.2b). Es ist zu betonen, dass sich die Form der Histogramme mit den Auswahlverfahren für die PS-Punktzeitreihen verändern kann, ohne jedoch die Grundaussage wesentlich zu ändern. Eine Optimierung der Auswahlverfahren, die im Grunde schon bei der PS-Prozessierung beginnt, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

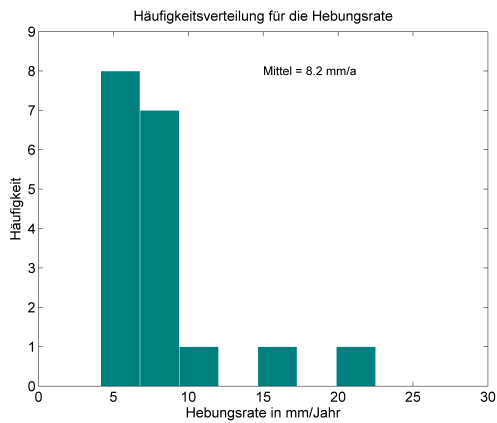


Abbildung 3.8: Häufigkeitsverteilung des Hebungsrate, berechnet aus 21 PS-Zeitreihen im Hebungsgebiet

3.4 Zusammenfassung und Danksagung

Die Anpassung eines einfachen Hebungsmodells an PS-Zeitreihen aus dem Hebungsgebiet Böblingen verbunden mit einer Analyse der statistischen Struktur des Anpassungsproblems ergibt den 09.10.2006 als wahrscheinlichsten Termin für den Hebungsbeginn. Der modellierte Zeitpunkt koinzidiert mit dem Beginn der ersten Bohrphase am 12.10.2006. Die Präzision der Bestimmung des Hebungsbeginns beträgt ca. 115 Tage. Sie verbessert sich auf unter 75 Tage, wenn nur Datenreihen hoher Qualität verwendet werden, deren Rauschanteil kleiner als 2.0 mm ist (vergl. Abbildung 3.2b) und kann sich für ausgewählte Zeitreihen auf ca. 40 Tage reduzieren.

Es scheint auf den ersten Blick ein ein wenig überraschendes Ergebnis zu sein, dass die Präzision, mit der sich der Hebungsbeginn bestimmen lässt, in der Größenordnung des mittleren Akquisitionintervalls der Envisat-Daten liegt. Die statistischen Untersuchungen zeigen jedoch, dass neben dem Akquisitionintervall auch das Datenrauschen und die Hebungsrate eine bedeutende Rolle spielen. Auch mit dem Envisat-Datensatz ließen sich unter anderen Umständen geringere Standardabweichungen für die Modellparameter erzielen. Beispielsweise verdreifacht sich die Präzision für den Hebungsbeginn für Hebungsraten oberhalb von 20 mm/Jahr, wie sie nach der zweiten Bohrphase im November 2008 im nördlichen Hebungsgebiet in Böblingen beobachtet werden, und würde für Envisat weniger als 40 Tage und bei Verwendung von Sentinel-Daten weniger als 10 Tage betragen (bei Datenrauschen von 3.0 mm).

Die Fallstudie Böblingen verdeutlicht das große Potential der SAR-Interferometrie für die Vermessung von Bodenbewegungen. Es gibt kein anderes Verfahren, mit dem sich der Einsatzzeitpunkt eines Hebungs- oder Senkungsereignisses retrospektiv mit vergleichbarer Genauigkeit quantifizieren ließe. Die Studie zeigt auch die zukünftige Bedeutung der Satellitenmission Sentinel für ein flächenhaftes Monitoring in Regionen mit kritischen Untertageaktivitäten. Ein solches Monitoringssystem, in das eine Quasi-Echtzeit-Auswertung von Sentinel 1a/1b eingebunden wäre, würde ein Hebungereignis wie in Böblingen innerhalb weniger Monate verlässlich detektieren können und, in Verbindung mit der entsprechenden Bereitschaft öffentlicher Einrichtungen, zu einer Vermeidung von erheblichen Schäden an Gebäuden und Infrastruktur beitragen.

Das Geodätische Institut hat 2007 mit einigen Bedenken den Schritt in die interferometrische Prozessierung von SAR-Daten „gewagt“. Es ist der Verdienst von Bernhard Heck, das Potential dieser Technik für die Geodynamik, aber insbesondere auch für die Geodäsie erkannt und an seinem Lehrstuhl das notwendige Umfeld geschaffen zu haben, das die Durchführung der zeitaufwendigen und rechenintensiven Arbeiten erlaubte. Inzwischen ist die SAR-Interferometrie in verschiedenen Varianten und Anwendungsgebieten am GIK fest etabliert, und es besteht eine enge Kooperation mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung bei der Nutzung von Radar-Satellitendaten. Wir möchten uns bei Bernhard Heck für die jahrelange vertrauensvolle Zusammenarbeit sehr herzlich bedanken.

Literatur

- Chernick, M. (1999): *Bootstrap Methods: A Practitioner's Guide* (Wiley Series in Probability and Statistics). XVI. Wiley and Sons, S. 264. ISBN: 0-471-34912-7.
- D'Errico, J. (2017): SLM - Shape Language Modeling. URL: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24443-slm-shape-language-modeling>.
- Engmann, S. und Cousineau, D. (2011): Comparing distributions: the two-sample Anderson-Darling test as an alternative to the Kolmogorov-Smirnov test. *Journal of Applied Quantitative Methods* 6(3):1-17.
- Fahrmeir, L., Kneib, T. und Lang, S. (2007): *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen*. 2007.
- Fuhrmann, T., Westerhaus, M., Zippelt, K. und Heck, B. (2014): Vertical displacement rates in the Upper Rhine Graben area derived from precise leveling. *Journal of Geodesy* 88(8):773-787.
- Hooper, A., Segall, P. und Zebker, H. (2007): Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation

- analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112(B7).
- Kampes, B., Hanssen, R. und Perski, Z. (2003): Radar interferometry with public domain tools. In: Proceedings of Fringe Workshop,
- Koch, A., Martin, M., Prestel, R., Ruch, C., Sage, A. und Trapp, C. (2015): Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im nordöstlichen Stadtgebiet von Böblingen (Hebungsgebiet "Nord") - Sachstandsbericht. Forschungsber. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. URL: http://www.lgrb-bw.de/geothermie/boeblingen/pdf/Sachstandsbericht_EWS_Schadensfall_Boeblingen.pdf (besucht am 25.01.2018).
- Scholz, F. W. und Stephens, M. A. (1987): K-sample Anderson-Darling tests. *Journal of the American Statistical Association* 82(399):918–924.
- Steinacker, A. (2015). Privatkommunikation. Landratsamt Böblingen - Wasserwirtschaft.