

# Ableitung vertikaler Landbewegungen an der deutschen Nord- und Ostseeküste aus GNSS- und PS-Auswertungen

DR. DIETER TENGEN, ANIKA RIEDEL, M.Sc., DR. BJÖRN RIEDEL, PROF. MARKUS GERKE & PROF. WOLFGANG NIEMEIER

Die Ableitung und Modellierung von vertikalen Landbewegungen an der deutschen Nord- und Ostseeküste hat u.a. das Ziel, den Einfluss der Landsenkung bzw. -hebung an der Küste von scheinbaren Pegelanstiegen trennen zu können. Für die Berechnung eines großräumigen landseitigen Bewegungsmodells ist es zunächst erforderlich die Höhenänderungen über längere Zeiträume aus GNSS- und Radarinterferometrie-Beobachtungen zu bestimmen. Im Rahmen dieses Beitrages werden die Berechnungsschritte und erste vorläufige Ergebnisse für die Höhenänderungen an den GNSS-Stationen für den Zeitraum von 2010 bis 2016, sowie Zeitreihen aus der PS-Interferometrie der Sentinel-1 Satelliten für die Jahre 2014 bis 2018 vorgestellt.

**Schlüsselwörter** – Vertikale Landbewegung, GNSS, PS Interferometrie, Zeitreihen

## 1. Einführung

Wie bereits in RIEDEL ET AL. (2018) ausführlich dargestellt, gliedert sich das vom Ministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „Untersuchungen zum absoluten Meeresspiegelanstieg an der deutschen Nord- und Ostseeküste (MSLabs)“ in zwei Teilprojekte. Die im Rahmen dieses Beitrages vorgestellten Arbeiten und Ergebnisse des Teilprojektes der TU Braunschweig dienen als Grundlage für die Modellierung eines großräumigen Bewegungsmodells für die Beschreibung der flächenhaften und zeitabhängigen vertikalen Landbewegungen basierend auf einer Linearkombination von Radialen Basisfunktionen. Die Arbeiten im Teilprojekt der Universität Siegen nutzen die umfangreichen Tidepegelzeitreihen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste für die räumliche und zeitliche Rekonstruktion des Meeresspiegels.

Die räumliche Schnittstelle zwischen den beiden Teilprojekten bildet der Küstenbereich, der primär geprägt ist vom Einfluss der Gezeiten, Meeresspiegelanstieg und landseitigen Vertikalbewegungen. Um den absoluten Meeresspiegelanstieg von vertikalen Landbewegungen zu trennen, soll ein Modell für die Beschreibung der vertikalen Landbewegungen an der deutschen Nord- und Ostseeküste entwickelt werden. Hierbei soll das von TENGEN (2010) entwickelte Bewegungsmodell für Niedersachsen auf Norddeutschland mit Hilfe von Radialen Basisfunktionen erweitert werden. Diese erweiterte Modellbildung ist beschrieben in RIEDEL ET AL. (2018).

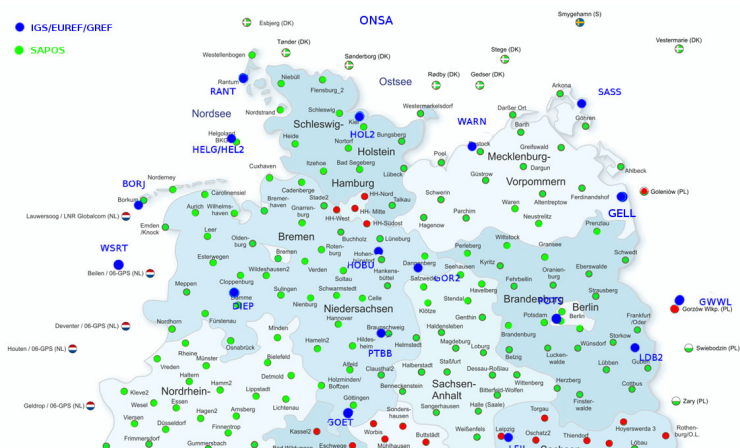
Um die Eingangsdaten für die vertikale flächenhafte Modellbildung zur Verfügung zu haben, ist es zunächst notwendig, Höheninformationen für den deutschen Küstenbereich aus GNSS-Beobachtungen

für eine große Anzahl an Stationen über einen möglichst langen Zeitraum in einer einheitlichen Form zu generieren. Zusätzlich sollen neben den punktuellen Ergebnissen aus GNSS auch flächenhafte Informationen über die Vertikalbewegung an der Erdoberfläche aus radarinterferometrischen Auswertungen aus Satellitendaten genutzt werden.

Im weiteren Beitrag wird nun die Datenlage für GNSS und Sentinel-1 im Untersuchungsgebiet beschrieben, sowie die Berechnungsschritte und erste vorläufigen Ergebnisse für die Höhenänderungen an knapp 160 GNSS-Stationen für den Zeitraum von 2010 bis 2016 vorgestellt. Daran anschließend werden exemplarisch Zeitreihen aus der PS-Interferometrie der Sentinel-1 Satelliten für die Jahre 2014 bis 2018 beschrieben, sowie eine Übersicht der bereits prozessierten Gebiete dargestellt.

## 2. Einführung GNSS-Beobachtungen und ihre Auswertung

### 2.1. GNSS-Daten und ihre Verfügbarkeit



**Abbildung 1:** Übersicht der in der Auswertung genutzten SAPOS, IGS, EUREF und DREF-Stationen. Rote Punkte stehen für Stationen in Deutschland die nicht in die Auswertung eingehen. Kartengrundlage SAPOS (2018).

Die Ausdehnung des Untersuchungsgebietes von der deutsch-dänischen Grenze bis in die deutschen Mittelgebirge und von der niederländischen Grenze bis zur polnischen Grenze mit den Positionen der GNSS-Permanentstationen ist in Abbildung 1 dargestellt. Zusätzlich zu den SAPOS-Stationen der Landesvermessungen werden noch die Daten von 21 Stationen des IGS, von EUREF bzw. GREF ausgewertet.

Die Daten von 19 GNSS Stationen auf den Pegeln der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) an der Nordseeküste werden in die Auswertung mit einbezogen, siehe Abbildung 2.

Im Rahmen des Projektes werden die Daten im Zeitraum von Anfang 2010 bis Ende 2016 ausgewertet. Die Daten einiger norddeutscher Bundesländer können für wissenschaftliche Zwecke kostenlos erhalten werden, die Daten aus Nordrhein-Westfalen und Berlin sind frei verfügbar, die Daten aus Hamburg werden nicht kostenlos bereitgestellt. Die Daten von IGS/EUREF/DREF können kostenlos aus dem Internet bezogen werden, auch die Daten der BfG stehen kostenlos zur Verfügung.



Abbildung 2: Lage der 19 GNSS Pegel der Bundesanstalt für Gewässerkunde an der deutschen Nordseeküste. Kartengrundlage auf Basis freier Daten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG).

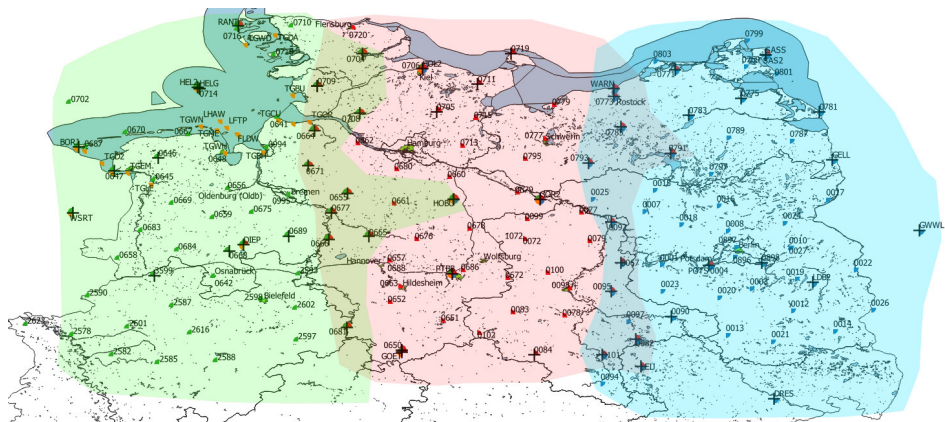


Abbildung 3: Einteilung des Untersuchungsgebietes in 3 Auswertestreifen. Kartengrundlage auf Basis freier Daten des BKG.

## 2.2. Datenaufbereitung der RINEX Daten

Die RINEX Daten liegen tageweise für jede Station vor, jedoch unterscheidet sich die Art und Weise der Speicherung von Bundesland zu Bundesland, z. B. Jahr/Station/Tag, GPS-Woche/Tag/Station oder Jahr/Tag/Station (am häufigsten). Teilweise sind die Daten im originären Sekundentakt gespeichert, manchmal schon reduziert auf eine Datenrate von 30 Sekunden. Auch liegen gepackte oder ungepackte Daten vor. Insgesamt beträgt die aufzubereitende Datenmenge ca. 10 TByte.

Nach Aufbereitung der Originaldaten liegen ca. 400.000 RINEX Dateien (eine Datei pro Jahr/Tag/-Station) mit einer Taktrate von 30 Sekunden vor. Pro Tag werden auch zwei Navigationsdateien für GPS und GLONASS erzeugt. Im Rahmen der Aufbereitung wird u.a. eine Liste aller verwendeten Antennen erzeugt und weitestgehend automatisch fehlerhafte Antenneneinträge korrigiert. Die Satellitenantennendaten beziehen sich auf das IGS 14. Präzise Ephemeriden und Atmosphärendaten der ESA werden ebenfalls für die Auswertung bereitgestellt.

## 2.3. Auswertung der RINEX Daten

Pro Tag gibt es bis ca. 160 GNSS Stationen bzw. die dazugehörigen RINEX Dateien, die nicht gemeinsam mit dem Programm WaPNet von WaSoft ausgewertet werden können. Deshalb wird das gesamte Netz in drei senkrechte Streifen mit einem Überlappungsbereich von ca. 10 Punkten aufgeteilt. Zur Stabilisierung wird ein übergeordnetes Referenznetz aus IGS/EUREF/DREF und ausgewählten SAPOS Stationen über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt. Eine fünfte Gruppe bilden die Pegelstationen mit ausgewählten Stationen in der Nachbarschaft, siehe die nachstehende Abbildung 3. Als Ergebnis stehen pro Tag 5 Teillösungen mit global kartesischen Koordinaten sowie vollständiger Kovarianzmatrix zur Verfügung.

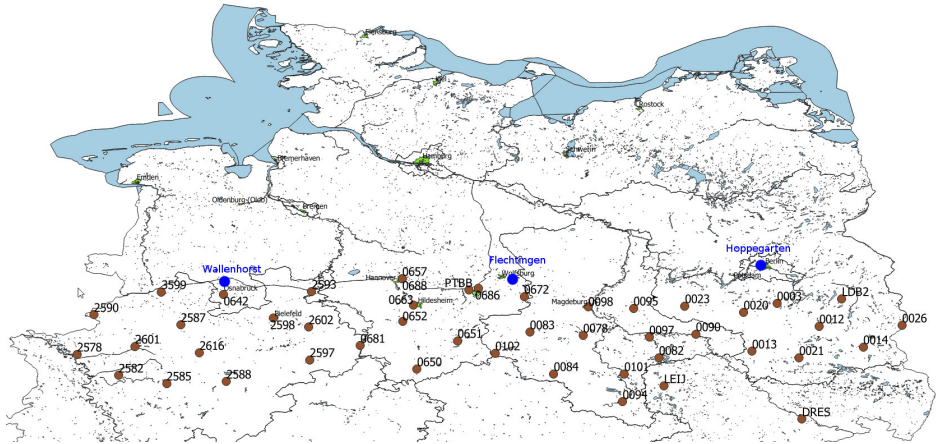
## 2.4. Berechnung der Wochenlösungen

Die 35 Teillösungen pro Woche werden zu einer Wochenlösung zusammengefasst. Für jede Teillösung werden 7 Parameter einer räumlichen Helmert-Transformation zugelassen und es wird ein einheitlicher Koordinatensatz mit vollständiger Kovarianzmatrix berechnet. Die Kovarianzmatrix nach einer freien Ausgleichung mit Gesamtpurminimierung beschreibt die innere Genauigkeit des Netzes.

Die Wochenlösung wird im Sinne einer Helmert-Transformation auf Referenzpunkte im Mittelgebirge gelagert, da angenommen werden kann, dass die Mehrzahl der Punkte stabil sind. Außerdem beziehen sich frühere Nivellement-Ergebnisse auf den Höhenfestpunkt Wallenhorst, der sich ebenfalls am Rand der Mittelgebirge befindet. Da die Koordinaten nach Norden hin extrapoliert werden, wird ein möglichst breiter Streifen von 46 Referenzpunkten im Süden gewählt, siehe Abbildung 4. Um ein Kippen des gesamten Netzes in Nord-Süd-Richtung zu erkennen, wird auch die IGS Station Onsala in Schweden, deren Bewegungsverhalten sehr gut bekannt ist, zur Kontrolle in die Auswertung einbezogen. Durch diese Transformation wird ein einheitlicher Bezug für alle Epochen hergestellt und es besteht keine Abhängigkeit von der Realisierung globaler Referenzsysteme. Ebenfalls liegen in diesem Bereich auch Höhenreferenzpunkte der Nivellements DHHN 1985 und des DHHN 2016 (Wallenhorst, Flechtingen und Hoppegarten).

Im Rahmen der Transformationen wird eine Kontrolle der Referenzpunkte auf Stabilität durchgeführt und hierbei ist es möglich, für instabile Punkte eine nichtlineare Punktbeziehung und/oder eine saisonale Bewegung einzuführen. Auch ein Antennenwechsel kann durch ein Offset im Modell berücksichtigt werden. Für die Transformation können somit auch Punkte mit einem erkennbaren, präzifizierbaren Bewegungsmuster verwendet werden.

Basis für das Erkennen stabiler Referenzpunkte ist eine strenge Deformationsanalyse (Kongruenztest) mit kompletter Kovarianzmatrix. Die Deformationsanalyse wird im global kartesischen System durchgeführt. Es wird fortlaufend jede Epoche mit der ersten Epoche, der Nullepoche, verglichen. Sobald



**Abbildung 4:** Position der Referenzpunkte im Süden des Untersuchungsgebietes. Kartengrundlage auf Basis freier Daten des BKG.

die Anzahl der bislang stabilen Punkte einen kritischen Wert unterschreitet (Kriterium in diesem Projekt: 20 Referenzpunkte), wird die Berechnung unterbrochen und alle bisher berechneten Epochen werden auf die als stabil erkannten Punkte transformiert. Für die instabilen Punkte wird eine Zeitreihe aufgestellt und versucht, die oben genannten Bewegungsmuster zu bestimmen. Kann die Bewegung mit Hilfe der Parameter beschrieben werden, so wird der Punkt als Referenzpunkt mit bekannten Bewegungsverhalten definiert.

Anschließend wird die Deformationsanalyse neu gestartet, wobei jetzt neben den stabilen Referenzpunkten auch die Referenzpunkte mit bekannten Bewegungsverhalten als identische Punkte betrachtet werden. In der Deformationsanalyse wird dann getestet, ob die aus dem Bewegungsmodell abgeleitete Koordinate mit der gemessenen Koordinate verträglich ist.

## 2.5. Berechnung von Höhenänderungen

Es werden für jede Epoche Transformationsparameter berechnet und alle Stationen mit Hilfe dieser Parameter in ein einheitliches System transformiert. Anschließend werden für alle Punkte Koordinaten bzw. Koordinatenänderungen im Horizontsystem bestimmt. In den Abbildungen 5 und 6 sind exemplarisch für zwei GNSS Stationen die Ergebnisse aus den Wochenlösungen über 7 Jahre GNSS-Beobachtungen im Horizontsystem dargestellt. Für den stabilen Referenzpunkt 0020 in Luckenwalde (Abbildung 5) kann man noch eine gewisse Variabilität in der Höhe beobachten, aber die hohe innere Genauigkeit von weniger als 2 mm für die Wochenlösungen der Beobachtungen in Abbildung 6 zeigt die Langzeitstabilität für den Punkt Luckenwalde. Für den Pegel in Cuxhaven-Steubenhöft (Abbildung 7) erkennt man eine deutlich höhere Variabilität der Höhenkomponente des GNSS-Pegelpunktes, sowie auch Trendeffekte über längere Zeiträume. Die Lage des Pegels und seines Umfeldes ist in Abbildung 12 zu sehen.

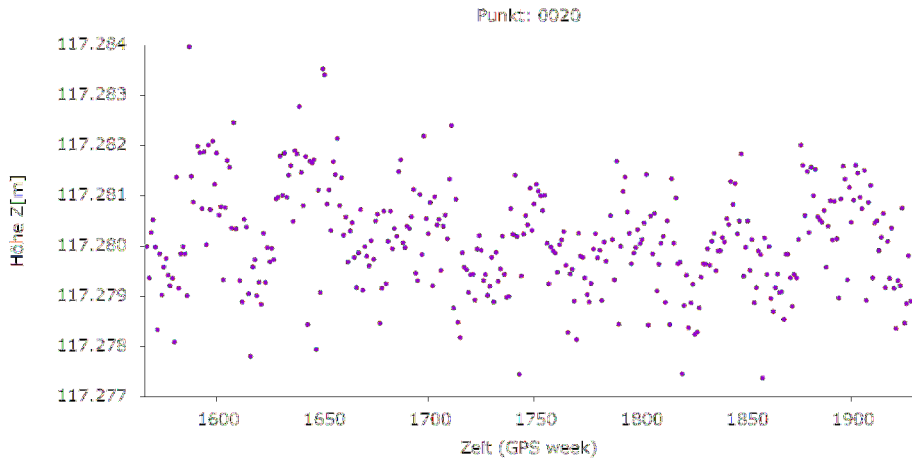


Abbildung 5: Vorläufiges Ergebnis für die Höhenänderung des stabilen Referenzpunktes 0020 (Luckenwalde).

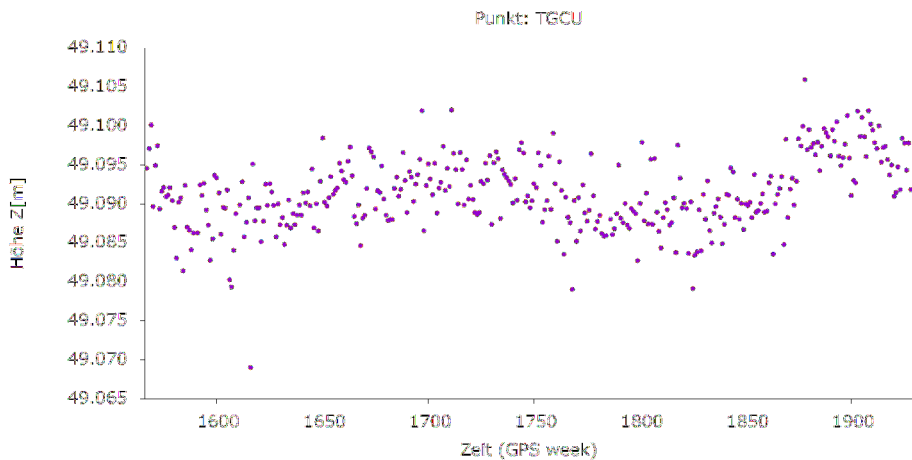


Abbildung 6: Darstellung der Genauigkeit der einzelnen Wochenlösungen für den Zeitraum Januar 2010 bis Dezember 2016 für die Station Luckenwalde.

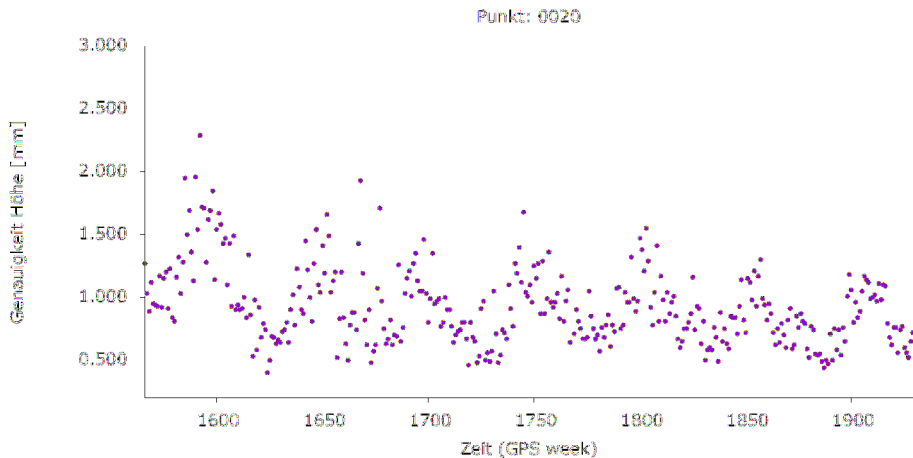


Abbildung 7: Vorläufiges Ergebnis für die Höhenänderungen am Pegel in Cuxhaven-Steubenhöft.

### 3. Auswertung der Radardaten

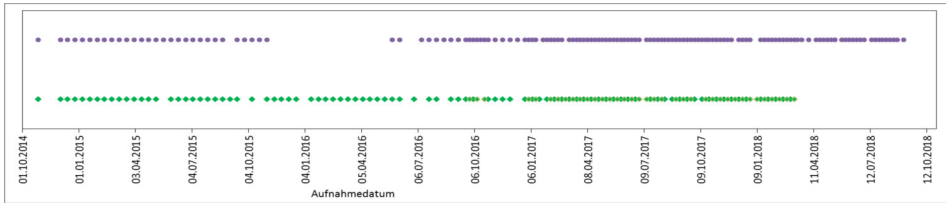
#### 3.1. Radardaten und ihre Persistent Scattereranalyse

Für die großräumige und flächenhafte Bestimmung der vertikalen Landbewegungen an der Nord- und Ostseeküste wurden Radaraufnahmen der europäischen Radarsatelliten Sentinel-1A bzw. -1B ausgewählt (RIEDEL ET AL. 2018). Erste Auswertungen mit Gebietsgrößen von 80 km\*100 km zeigten, dass eine vergleichbare flächenhafte Abdeckung wie bei der GNSS-Auswertung bis zu den Mittelgebirgen, auf Grund der Prozessierungszeiten, auswertetechnisch nicht realisierbar ist. Daher wird die radarinterferometrische Auswertung auf einen ca. 50 km breiten Streifen entlang der 1200 km langen deutschen Küste reduziert. Insgesamt umfasst die bisher ausgewertete Fläche knapp 75.000 km<sup>2</sup>.

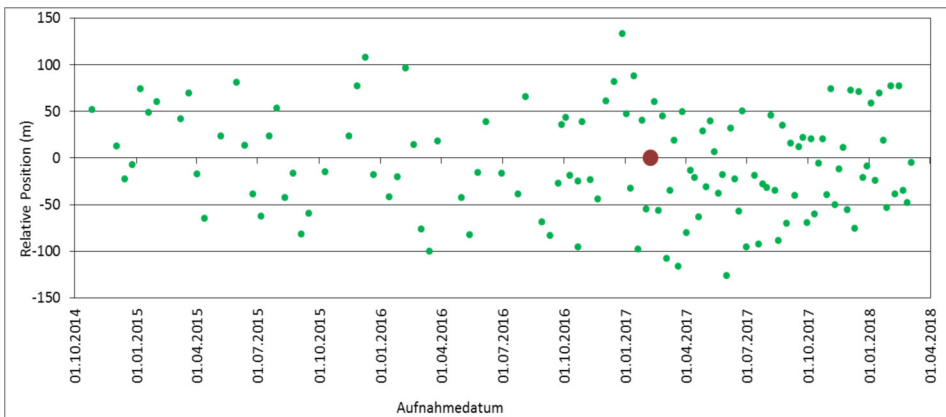
Im Bereich der Nordsee wird der absteigende Orbit des Track 139 genutzt, der von Oktober 2014 bis März 2018 insgesamt 133 Aufnahmen beinhaltet. Für die Ostsee wird der aufsteigende Orbit 146 mit 130 Aufnahmen von Oktober 2014 bis September 2018 ebenfalls mit dem Persistent Scatterer Interferometrie Methode nach FERETTI ET AL. (2001) bearbeitet. Eine Übersicht über die vorhandenen Daten und ihre zeitliche Verfügbarkeit zeigt die folgende Abbildung 8.

Die multitemporale Prozessierungsmethode Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) nutzt das Stapeln aller Interferogramme, die zwischen einer Masterszene und den verfügbaren anderen Datensätzen (Slaves) berechnet werden können. In Abbildung 9 werden die möglichen Interferogramme zwischen der Masteraufnahme vom 2. Juli 2017 und allen anderen Aufnahmezeitpunkten über die Zeit dargestellt. Zusätzlich werden hier auch noch die Orbitabstände zwischen den Aufnahmen visualisiert, um ggf. Daten mit zu großen Baselines aus der Auswertung rauszunehmen.

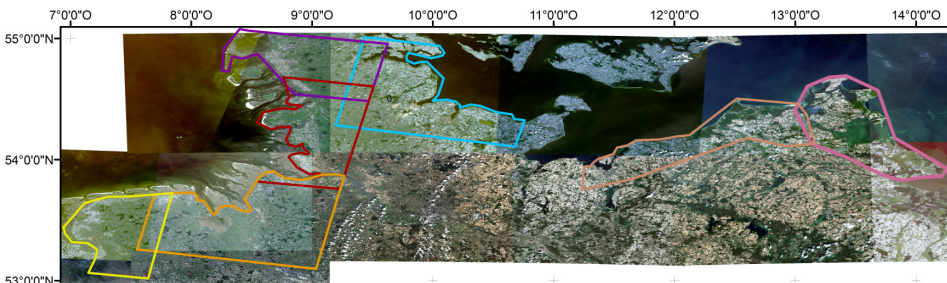
Beim Prozess des Interferogrammstapelns werden die Punkte auf ihre Rückstreustabilität untersucht und nur Pixel, die gewissen Kriterien wie z.B. Langzeitstabilität oder Rückstreuintensität genügen, werden für die weitere Bestimmung der Veränderungen an der Erdoberfläche berücksichtigt. Das in Abbildung 10 dargestellte Untersuchungsgebiet wurde in mehrere Teilgebiete (Patches) mit großen



**Abbildung 8:** Übersicht über die verfügbaren Aufnahmen des Track 139 (grün) für die Nordsee und des Track 146 (lila) für die Ostsee.



**Abbildung 9:** Darstellung des räumlichen und zeitlichen Abstandes zwischen der Masteraufnahme (rot) vom 07.02.2017 mit den einzelnen Slaveszenen (grün) im Track 139 für die PS Auswertung.



**Abbildung 10:** Überblick über die schon bearbeiteten Patches. Das nicht markierte Gebiet zwischen Fehmarn und Fehmarn liegt in einem noch nicht bearbeiteten Track. Das Bildmosaik ist aus mehreren multispektralen Sentinel-2 Aufnahmen zusammengesetzt.



Überlappungsbereichen aufgeteilt, da es auf Grund von Prozessierungszeiten und Festplattenpeicher (SSD) nicht möglich war eine Komplettlösung für die Nord- bzw. Ostsee zu rechnen. Die Patches 1 und 2 wurden mit einem Standard-Arbeitsplatzrechner mit 4 physikalischen Prozessoren bzw. 8 logischen Kernen bei einer Taktfrequenz von 3,4 GHz und SSD-Platten berechnet, siehe hierzu auch die Tabelle 1. Die angegebene Gesamtrechenzeit von bis zu 3 Wochen bezieht sich auf die Interferogrammgenerierung und die anschließende PS-Prozessierung bis zur Geocodierung der Ergebnisse in vertikale Bewegungen.

Die Prozessierung der weiteren Patches erfolgte auf einem leistungsfähigeren Rechner mit 44 physikalischen Kernen bzw. 88 logischen Prozessoren mit 2,8 GHz Taktfrequenz und ebenfalls 2 TByte SSD-Plattenspeicher. Obwohl die zu bearbeitende Fläche für die beiden Ostsee-Patches nahezu gleich ist, sind die Rechenzeit auf demselben Rechner deutlich unterschiedlich. Die Ursache liegt in der zu verarbeitenden Aufnahmegeometrie (Anzahl der genutzten bursts) von Sentinel-1, der Anzahl notwendigen Iterationen zur Bestimmung der PS Pixel, sowie der Auswahl und Größe der Filterschritte.

**Tabelle 1:** Übersicht mit den Prozessierungszeiten der bereits bearbeiteten Patches, sowie der Gebietsgröße.

Name	Ausdehnung	Größe (km <sup>2</sup> )	Rechenzeit (Tage)	Datensatz (TByte)	Computer
Patch1	Emden-Papenburg	11000	14	2	8 Kerne\ 3,4 GHz
Patch2	Wilhelmshaven-Bremen	18848	22	2	8 Kerne\ 3,4 GHz
Patch3	Cuxhaven-Bredtstedt	10965	6	1,2	88 Kerne\ 2,8GHz
Patch4	Bredtstedt-Sylt	10748	6	1,1	88 Kerne\ 2,8GHz
Patch5	Flensburg-Lütjenburg	3000	7	1,3	88 Kerne\ 2,8GHz
Ostsee_West	Wismar-Stralsund	11100	8	2	88 Kerne\ 2,8GHz
Ostsee_Ost	Stralsund-Świnoujście	11500	5	2	88 Kerne\ 2,8GHz

### 3.2. Ergebnisse aus der PSI Auswertung

Die Ergebnisse der PSI Auswertung in Abbildung 11 zeigen für den nördlichen Bereich der Nordsee und der Ostsee ein sehr homogenes Geschwindigkeitsfeld, das sich zwischen  $\pm 3$  mm/a bewegt und großräumig als stabil betrachtet werden kann. Im Raum Emden werden starke Vertikalbewegungen beobachtet mit Geschwindigkeiten bis zu -10 mm/a. Diese Bewegungen im Raum Emden lassen sich auf die bis heute andauernde Entnahme von Kohlenwasserstoffen aus dem Untergrund erklären. In Wilhelmshaven und im Salzstock Etzel befinden sich Kavernenspeicher, die die Setzungen an der Erdoberfläche mit Vertikalbewegungen bis -10 mm/a verursachen.

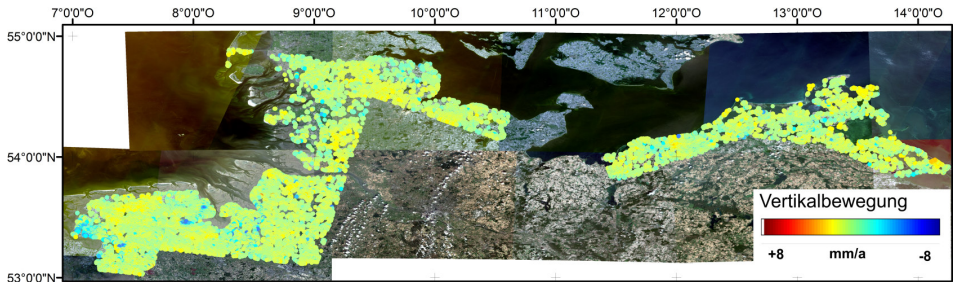


Abbildung 11: Vorläufiges Gesamtergebnis PSI für Vertikalbewegung an der deutschen Nord- und Ostsee für die bereits prozessierten Küstenstreifen.

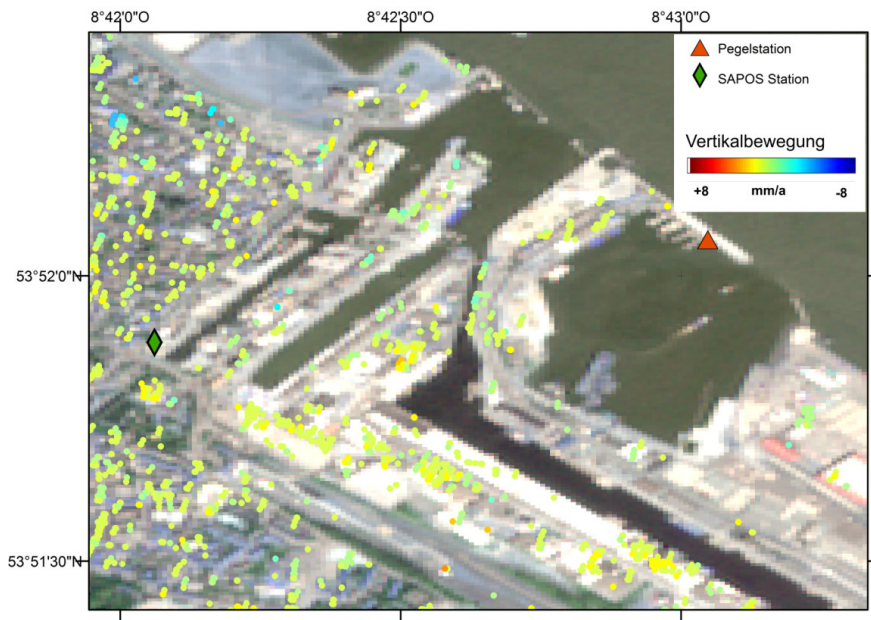


Abbildung 12: Persistent Scatterer Lösung des Patch 3 für das Pegelumfeld des Pegels Cuxhaven-Steubenhöft.

In Raum Cuxhaven überlappen sich die Patches 2 und 3, so dass u.a. im Bereich des Pegels Cuxhaven-Steubenhöft eine Detailstudie durchgeführt wurde, um mögliche Unterschiede zwischen den beiden Auswertungen zu ermitteln. In Abbildung 12 ist die Lage der Pegelstation mit GNSS Empfänger (s. Abbildung 7), sowie die benachbarte SAPOS-Station dargestellt. Man kann außerdem die Lage der einzelnen PS Pixel mit ihren dazugehörigen Geschwindigkeiten erkennen. Die grünen Pixel können als stabil betrachtet werden, wo hingegen die blauen Punkte auf Setzungen hindeuten.

In Abbildung 13 sind die gemittelten Geschwindigkeiten vom Patch 2 und 3 in einem Radius von 500 m zum Pegel in Cuxhaven dargestellt und bereits um einige Ausreißer bereinigt. Im Patch 2 wurden 60 PS Pixel erfasst, in Patch 3 liegen in diesem Radius 75 PS Punkte (Pixel). Die abgeleiteten Geschwindigkeiten bewegen sich zwischen  $\pm 3\text{mm/a}$  und sind repräsentativ für die Genauigkeit der Auswertung. Beide Zeitreihen zeigen ein sehr ähnliches Bewegungsmuster und die Differenzen sind so klein, dass im Weiteren von einer Offsetkorrektur zwischen den Patches abgesehen wird, da nur die relativen Änderungen an einer Position in die spätere Modellbildung eingeführt werden.

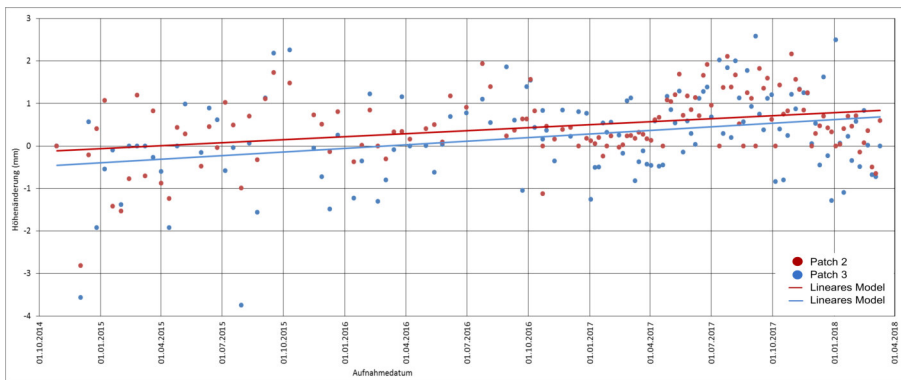


Abbildung 13: Gemittelte Höhenänderungen der PS Punkte in 500 m Radius zum Pegel mit den dazugehörigen Trendgeraden für Patch 2 und 3.

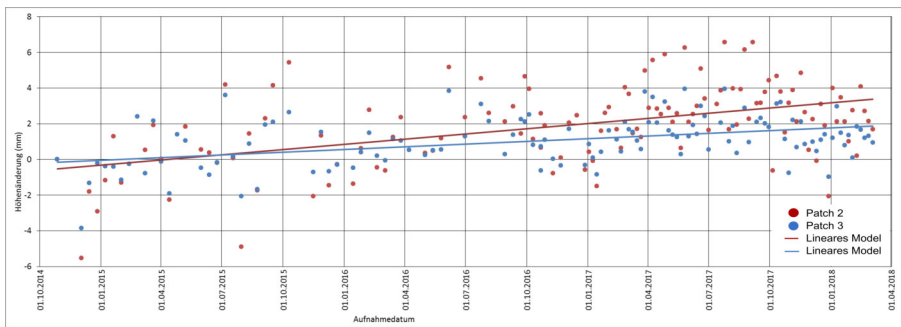


Abbildung 14: Gemittelte Höhenänderungen des benachbarten PS Punkteclusters zum Pegel Cuxhaven-Steubenhöft.

An den hier dargestellten Zeitreihen kann man durch die höhere Datendichte ab Herbst 2016 (zusätzliche Sentinel-1b Daten) noch deutlicher ein saisonales Signal auf den Vertikalbewegungen erkennen. Der Radius von 500 m um den Pegel wurde auch gewählt, um eine Aussage über die Stabilität des Pegelfestpunktfeldes treffen zu können. Der geschätzte lineare Bewegungstrend von 0,2 mm/a, hier durch die Regressionsgeraden dargestellt, ist hier mehr als ein Maß für die Stabilität der Punktgruppe zu betrachten.

Die Abbildung 14 zeigt die gemittelte Höhenänderung des nächsten PS Punkteclusters zum Pegel, d. h. der Pixelgruppe, die den geringsten räumlichen Abstand zum GNSS-Pegel hat für Patch 2, wie auch Patch3. Diese PS Punktecluster befinden sich in 200 m Entfernung zum Pegel und umfassen jeweils eine Punktgruppe von vier PS Pixeln. Es ist erkennbar, dass auch hier diese gemittelten Zeitreihen einen sehr geringen Hebungstrend über die Zeit zeigen, allerdings mit einer größeren Streuung als die Lösungen in Abbildung 13, die aus einer größeren Punktmenge abgeleitet wurden. Der in Abbildung 7 zu sehende Trend für den GNSS-Pegel in 200 m Entfernung von diesem Punktecluster ist deutlich stärker ausgeprägt.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird die Vorgehensweise in der Homogenisierung der RINEX-Daten der verschiedenen Bundesländer und anderer nationaler und internationaler Datenquellen für die Auswertung von GNSS-Beobachtungen in Norddeutschland beschrieben. Die GNSS-Auswertung der verschiedenen Punktgruppen, sowie die verschiedenen Transformationsschritte um eine Lösung in einem einheitlichen System zu erzeugen, werden ausführlich dargestellt, wie auch exemplarisch erste Ergebnisse für die GNSS Zeitreihen einer stabilen Referenzstation und eines GNSS bestückten Pegels.

Im zweiten Teil des Beitrages werden die Radardaten für Nord- und Ostsee und die bereits prozessierten Lösungen aus der PS Interferometrie für einen ca. 50 km breiten Küstenstreifen entlang der deutschen Küste beschrieben. Detaillierte Lösungen aus zwei Prozessierungen für ein Teilgebiet um den Pegel Cuxhaven zeigen die Vergleichbarkeit und hohe innere Genauigkeit der Auswertungen.

Die Ergebnisse aus der Bestimmung der relativen flächenhaften Höhenänderungen (siehe Abbildung 11 und exemplarisch Abbildung 13) aus der Radarinterferometrie und den dazugehörigen punktuellen GNSS Zeitreihen (siehe Abbildung 1 und exemplarisch Abbildungen 5 und 7) sollen im nächsten Abschnitt des Projektes zur Berechnung eines zeitabhängigen Vertikalbewegungs- bzw. Geschwindigkeitsmodells für die deutsche Küste als Eingangsdaten genutzt werden. Das Modell für die Beschreibung der vertikalen Landbewegungen an der deutschen Nord- und Ostseeküste basiert auf einer Erweiterung eines Ansatzes mit Radialen Basisfunktionen, die TENGEN (2010) für vertikale Landbewegungen in Niedersachsen genutzt hat (RIEDEL ET AL., 2018).

#### Danksagung

Diese im Beitrag vorgestellten Arbeiten im Verbundprojekt „MSL\_absolut – Untersuchungen zum Meeresspiegelanstieg an der deutschen Nord- und Ostseeküste; Vorhaben: Differentielle vertikale flächenhafte Landbewegung“ werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03K15117 gefördert. Der europäischen Weltraumagentur ESA danken wir für die kostenfreie Bereitstellung der Satellitendaten von Sentinel-1a/-1b und Sentinel-2a/-2b.

## Literatur

- FERRETTI A., PRATI C. & F. ROCCA (2001): "Permanent scatterers in SAR interferometry". *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 1, pp. 8 – 2.
- RIEDEL, B., KRACKE J.-N., TENGEN D., RIEDEL A., GERKE M. & NIEMEIER W. (2018): *Bestimmung vertikaler Landbewegungen an der deutschen Nordseeküste. Tagungsband GeoMonitoring 2018*, S. 167 – 180, 2018.
- SAPOS (2018): [www.zentrale-stelle-sapos.de/files/SAPOS-UeberregionaleUebersicht\\_GNSS\\_RS\\_2018-OL\\_600dpi.gif](http://www.zentrale-stelle-sapos.de/files/SAPOS-UeberregionaleUebersicht_GNSS_RS_2018-OL_600dpi.gif). Letzter Zugriff: 18.01.2018
- TENGEN, D. (2010): *Höhenveränderungen im Bereich der niedersächsischen Nordseeküste bestimmt aus Nivellement- und GPS-Messungen. Dissertation, TU Braunschweig*, ISBN 3-926146-21-4.