



MSL_absolut-B:

Differentielle vertikale flächenhafte Land- bewegung entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste (MSL_absolut-VFLdiff)

Schlussbericht zu 3.2 BNBEST-BMBF 98

Gefördert durch: BMBF
Förderkennzeichen: 03KIS117
Bearbeitungszeitraum: 08/2016 – 07/2019

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Bearbeitet von:
Univ.-Prof. i.R. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Niemeier
M. Sc. Anika Riedel
Dr.-Ing. Dieter Tengen
Dr.-Ing. Björn Riedel
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Gerke

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
(IGP)

Braunschweig, 31. Januar 2020

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS.....	4
I. KURZDARSTELLUNG	5
1. Aufgabenstellung.....	5
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	5
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn.....	7
4.1. Vertikale Landbewegungen	7
4.2. Differentielle vertikale flächenhafte Landbewegung	8
II. EINGEHENDE DARSTELLUNG	9
1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	9
1.1 Einleitung und Zielsetzung	9
1.2 Untersuchungsgebiet und Datenlage	10
1.2.1 GNSS- Daten	11
1.2.2 Daten der satellitengestützten Radarfernerkundung	12
1.2.3 Nivellement.....	13
1.3 Modellentwicklung.....	14
1.3.1 Konzept mit Radialen Basisfunktionen.....	14
1.3.2 Nutzung der vorliegenden Daten	16
1.4 GNSS -Auswertemethodik	17
1.5 Auswertung der Sentinel-1 Aufnahmen	19
1.6 Auswertergebnisse	22
1.6.1 GNSS Zeitreihen	22
1.6.2 Ergebnisse der PSI Auswertung.....	23
1.6.3 Studiengebiet Cuxhaven	27
1.7 Ergebnisse	30
1.7.1 Lösung aus der Gesamtmodellierung der GNSS-Zeitreihen	30
1.7.2 Ergebnisse einer flächenhaften PSI-Modellierung und Vergleich mit GNSS	31
1.7.3 Austausch der Ergebnisse mit der Universität Siegen.....	33
1.8 Zusammenfassung:.....	34

2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	36
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	37
4.	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	37
5.	Fortschritt bei anderen Stellen	37
6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	38
	LITERATURVERZEICHNIS	39
	ANHANG	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozesse und ihre zeitliche Dauer, die auf den Meeresspiegelanstieg wirken	9
Abbildung 2: Zusammenhang Höhenänderungen, Meeresspiegeländerungen und Pegelinformationen	10
Abbildung 3: Übersicht zur Ausdehnung des Untersuchungsgebietes	11
Abbildung 4: Übersicht über die verfügbaren radar-Aufnahmen der Sentinel-Tracks	13
Abbildung 5: Modell der Höhenänderungen eines Punktes mit variabler Geschwindigkeit	15
Abbildung 6: Einteilung des Untersuchungsgebietes in 3 Auswertestreifen	17
Abbildung 7: Positionen der Referenzpunkte im Süden des Untersuchungsgebietes	17
Abbildung 8: Prinzip des Erkennens von Bewegungsmustern für Referenzpunkte	18
Abbildung 9: Räumliche und zeitliche Verbindungen zwischen Datensätzen bei PSI und SBAS	20
Abbildung 10: Überblick über die bearbeiteten Patches, hinterlegt mit Sentinel-2-Aufnahmen	21
Abbildung 11: Ergebnisse der Höhenänderungen des stabilen Referenzpunktes 0020 Luckenwalde	22
Abbildung 12: Ergebnisse der Höhenänderungen für den externen referenzpunkt ONSALA	23
Abbildung 13: Gesamtergebnis PSI-Auswertung für die Nord- und Ostseeküste 2014-2018	24
Abbildung 14: Ergebnisse der PSI-Auswertung im Raum Groningen mit Ergebnissen des NCG	25
Abbildung 15: Ergebnisse der PSI-Auswertung und Hebungsraten des GIA	26
Abbildung 16: PSI Ergebnisse im Stadtgebiet Rostock mit AIDA Bürogebäude	27
Abbildung 17: PSI Lösung des Patch 2 für Pegelumfeld des Pegels Cuxhaven-Steubenhöft	27
Abbildung 18: Ergebnis für die GNSS Höhenänderungen am Pegel Cuxhaven Steubenhöft	28
Abbildung 19: Ergebnis für die GNSS-Höhenänderungen für die SAPOS-Station 0641 in Cuxhaven	28
Abbildung 20: Relative vertikale Bewegungen für das GNSS-Netzwerk (grün), P2 (orange) und P3 (rosa)	29
Abbildung 21: Gesamtbewegungsmodell vertikaler Landbewegungen aus GNSS-Beobachtungen 2010-2016 für die deutsche Nord- und Ostseeküste.	30
Abbildung 22: Vertikale Landbewegungen aus Radar-Daten 2016-2018 für den Bereich Wilhelmshaven	32
Abbildung 23: Vertikale Landbewegungen aus Radar-Daten 2016-2018 für den Bereich Stralsund	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenverfügbarkeit der Radarsatelliten für den Großraum Lüneburg, Stand Dez.2017	12
Tabelle 2: Übersicht über die Patches mit Prozessierungszeiten sowie der Gebietsgröße	21
Tabelle 3: Detailuntersuchungen in den Überlappungsbereichen der Patches	26

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Ein wesentliches Problem für den Nachweis von absoluten Meeresspiegeländerungen ist der Relativcharakter von Pegelaufzeichnungen. Zwar beschreiben diese Wasserstandsdaten die Änderungen des mittleren Meeresspiegels (MSL), jedoch beinhalten sie auch gleichzeitig den Einfluss von Vertikalbewegungen der Pegelstationen bzw. von Hebungen oder Senkungen des Hinterlandes. Aussagen über den absoluten Anstieg des MSL sind also nur möglich, wenn die Wasserstandsbeobachtungen mit belastbaren Zeitreihen/Aussagen über Vertikalbewegungen des Hinterlandes in strenger Form kombiniert werden, siehe Abb. 2. Die verlässliche Abschätzung von Vertikalbewegungen über einen längeren Zeitraum und der Anschluss an geologische Stabilbereiche ist eine zwingend erforderliche Voraussetzung für die Bestimmung des **absoluten** MSL-Anstieges.

Im durchgeführten Gesamtprojekt „MSL Absolut“ (MSLabs) sollten für die deutsche Nord- und Ostseeküste flächenhaft die vertikalen Landbewegungen über möglichst langen Zeitraum bestimmt und streng mit den hochaufgelösten Wasserstandsbeobachtungen ausgewählter Stationen sowie räumlichen MSL-Rekonstruktionen kombiniert werden. Im Hinblick auf die Detektion des anthropogenen Anteils bei dem erwarteten beschleunigten Anstieg des MSL in den nächsten Jahren/Jahrzehnten ist zusätzlich eine Separierung der beiden Effekte „Vertikalbewegung“ und „Meeresspiegeländerung“ zwingend erforderlich.

Das Teilprojekt der Universität Siegen (03KIS116) beschäftigte sich mit der Bestimmung des Meeresspiegels (MSL) aus Pegeldaten, sowie der räumlichen und zeitlichen Rekonstruktion des Meeresspiegels. Die Entwicklung eines flächenhaften vertikalen Landbewegungsmodells ist das Ziel im hier dargelegten Teilprojektes (03KIS117) des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der TU Braunschweig.

Als Grundlage für die Modellierung dienten selbst ausgewertete Datensätze für kontinuierliche GNSS-Beobachtungen und Zeitreihen von Radarszenen der Sentinel-Satelliten sowie verfügbare Nivellement-Beobachtungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG).

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im dem vor etwa 10 Jahren abgeschlossenen KFKI-Projekt „IKÜS“ (03KIS057) wurden für den Bereich der Niedersächsischen Nordseeküste Höhenänderungen bzw. Absenkungsgeschwindigkeiten der Landoberfläche bestimmt. Datenbasis waren damals Nivellementsdaten aus Messkampagnen der letzten 100 Jahre sowie Zeitreihen für Permanentstationen des Globalen Navigations-satellitensystems (GNSS) aus den Jahren 1996–2006. Das IGP war schon damals für die Konzeption und softwaremäßige Umsetzung der Kombination der verschiedenartigen Datensätze verantwortlich. In der daraus entstandenen Dissertation des auch in diesem Projekt mitwirkenden Dieter Tengen (2010) wurden die algorithmischen Vorarbeiten zur Modellierung von flächenhaften vertikalen Landbewegungen entwickelt und diskutiert.

Das IGP verfügt darüber hinaus über langjährige Erfahrungen im Bereich der satellitengestützten Prozessierung von Radarfernerkundungsdaten in nationalen und internationalen Projekten, siehe z.B. Mark et al. (2012); Liu et al. (2013); Siles (2015) und Niemeier et al. (2016). Generell ist die Auswertung und Analyse von horizontalen und vertikalen Veränderungen der Erdoberfläche sowie von größeren Bauwerken ein langjähriger Schwerpunkt der Arbeitsgruppe des Antragsstellers.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das übergeordnete Ziel des hier dargelegten Teilprojektes „Differentielle vertikale flächenhafte Landbewegung entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste (MSL_absolut-VFLdiff)“ war die Bestimmung von belastbaren vertikalen Landbewegungen im Bereich der norddeutschen Küste aus der Kombination von unterschiedlicher höhenrelevanter Sensorik und die Ableitung eines großräumigen Modells für die Absenkungsgeschwindigkeiten. Dabei sollten möglichst auch Nichtlinearitäten und anthropogene Einflüsse aufgezeigt werden.

Die Datengrundlage für diese flächenhafte Modellierung sollte aus den punktbezogenen Ergebnissen einer gemeinsamen GNSS-Prozessierung von SAPOS-, IGS-, GREF- und EUREF-Stationen nördlich der Linie Leipzig-Göttingen-Duisburg, den selbst gewonnenen flächenhaften Resultaten aus der interferometrischen Analyse von Radardaten sowie durch Hinzunahme von linienhaften Beobachtungen aus Wiederholungsmessungen des Deutschen Haupthöhennetzes abgeleitet werden.

Um diese Teilprojektzeile zu erreichen wurde als erster Schritt, wie im Arbeits- und Zeitplan des Antrages beschrieben, die Akquisition, Aufbereitung und Auswertung der Beobachtungsdaten durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass - bedingt durch den Förderalismus der Bundesrepublik Deutschland - die Beschaffung von GNSS-Daten von den Vergaberichtlinien der einzelnen Landesvermessungsämter abhängig ist und die Datensätze selbst leider sehr heterogen waren, siehe Abschnitt 1.2.1. Entsprechend war das Pre-Processing viel zeitaufwändiger als ursprünglich geplant.

Der Zugriff auf die Radardaten der europäischen Fernerkundungsatelliten Sentinel 1a und -1b war problemlos über die europäische Weltraumagentur ESA möglich. Auf die Verwendung der Szenen weiterer Satelliten wurde daher verzichtet; hierzu gab es am IGP im Rahmen anderer Projekte schon Erfahrungen über die Datenlage in den Archiven bzgl. ERS-1/-2, ENVISAT und JERS bzw. ALOS.

Die Beschaffung der Nivellementsdaten über das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) gestaltete sich als sehr langwierig, da auch hier das Verfahren zur Weitergabe der eigentlich den Ländern gehörenden Datensätze erst kurz vor Projektende abgeschlossen wurde.

Wie oben angesprochen, sollte das Untersuchungsgebiet den Bereich nördlich der Linie Leipzig-Göttingen-Duisburg bis zur deutsch-dänischen Grenze umfassen. Diese flächenhafte Ausdehnung wurde für die GNSS-Auswertungen und die Nivellementsuntersuchungen auch realisiert. Auf Grund der ebenfalls langen Prozessierungszeiten in der Radarinterferometrie (bis zu mehreren Wochen) wurde in Rücksprache mit der Projektbegleitenden Gruppe (PbG) entschieden, dass nur ein ca. 50 km breiter Streifen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste mittels Radarinterferometrie ausgewertet wurde.

Die Entwicklung der mathematischen Modelle für die Modellierung der Vertikalbewegungen und deren programmtechnische Umsetzung wurden während des gesamten Bearbeitungszeitraumes vorgenommen. Das Gesamtmodell wurde in Teilaufgaben zerlegt und die Umsetzbarkeit der Teile wurde mit simulierten Daten parallel zur Datenaufbereitung überprüft.

Auch für die Aufbereitung der heterogenen GNSS- und umfangreichen RADAR-Daten wurden eigene Tools entwickelt, da nur so die umfangreichen Ausgangsdaten verarbeitet werden konnten.

Generell wurde der Ablauf des Projektes gemäß Zeitplan durchgeführt, kleinere zeitliche und inhaltliche Verschiebungen wurden im Rahmen der Treffen mit der PbG vorgestellt, diskutiert und abschließend besprochen.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Der Anstieg des MSL stellt eine der Hauptkonsequenzen des natürlichen und anthropogenen Klimawandels dar. Hierbei wird generell zwischen dem relativen MSL (d. h. wie sich der Wasserstand relativ zum Land ändert) und dem absoluten MSL (nach Extrahieren vertikaler Landbewegungen) unterschieden. Für Küstenschutzmaßnahmen liegt der Anstieg des relativen MSL im Fokus, da eine relative Betrachtung zwischen dem Anstieg im MSL und des betrachteten Küstenschutzbauwerks angestrebt wird.

Für den absoluten Anstieg des MSL müssen für Wasserstands-Auswertungen an Pegelstandorten mit entsprechender Regionalisierung jedoch etwaige Höhenänderungen der betrachteten Standorte in die Analysen einbezogen werden. Auch sind für globale Modelle des Meeresspiegelanstieges sowie für die Erforschung der Ursachen von Änderungen an den Pegelablesungen absolute MSL-Änderungen erforderlich.

4.1. Vertikale Landbewegungen

Vertikale Landbewegungen resultieren aus unterschiedlichen Prozessen und treten auf verschiedenen räumlichen wie zeitlichen Skalen auf. Eine in der Wissenschaft klar beschriebene Form der vertikalen Landbewegungen resultiert aus postglazialen Prozessen, die in direkter Verbindung mit der viskoelastischen Reaktion der Erdkruste auf die veränderte Auflast nach dem Abschmelzen der Eispänner aus der letzten Eiszeit stehen. Gebräuchlich die englische Bezeichnung „Glacial Isostatic Adjustment“ (GIA). Während der letzten Eiszeit waren große Teile der nördlichen Hemisphäre von Eis bedeckt, dessen Massen die darunterliegende Erdkruste deformierten. Nach dem Abschmelzen setzte ein Entspannungsprozess ein, der bis heute andauert und auf Zeitskalen von Jahrhunderten als linear anzunehmen ist (Peltier, 2004). Diese postglazialen Landbewegungen, die vor allem in Skandinavien und Nordamerika bis zu 14 mm/a an einzelnen Pegelstandorten ausmachen können, treten auf sehr großen räumlichen und zeitlichen Skalen auf und können mit Hilfe von Erdsystemmodellen beschrieben werden (Peltier, 2004).

Daneben gehören zu den Ursachen von Landbewegungen eher lokale und regionale Effekte wie beispielsweise die großräumige Entnahme von Grundwasser oder fossilen Brennstoffen (Gas), die Beeinflussungen durch aktiven Bergbau und tektonische Effekte wie Plattenbewegungen, Erdbeben oder Vulkanismus. Diese Effekte haben sowohl zeitlich als auch räumlich eine deutlich kleinere Ausprägung und können nicht mit Hilfe von Erdsystemmodellen erfasst werden (Wöppelmann und Marcos, 2016). An einigen Standorten weltweit können solche lokalen Effekte die klimatischen Änderungen des Meeresspiegels bei weitem überschreiten. In vielen Metropolregionen treten durch GW-Entnahme erhebliche Setzungen auf (z.B. Siles 2015). Für die an der Küste liegenden Metropolregionen sind solche Setzungen besonders kritisch; z.B. sind für die Region Jakarta Setzungsraten von bis zu 20 mm/a festgestellt worden (Fenoglio et al., 2012).

Während die Raten des GIA aus diversen Erdsystemmodellen frei verfügbar sind, können lokale Effekte bisher nur mit Hilfe von direkten Messungen des GNSS und der Daten aus historischen Nivellements bestimmt werden (Wöppelmann et al., 2007, Tengen, 2010). Eine zukunftsweisende messtechnische

Möglichkeit besteht in der Nutzung der Methoden der satellitengestützten Radarinterferometrie z.B. unter Verwendung der europäischen und deutschen Radarsatelliten ERS-1/-2, ENVISAT, TerraSAR-X/Tandem-X und Sentinel 1a/1b. Durch mehrfache Erfassung der Untersuchungsgebiete und Analyse der sich dabei ergebenden Differenzen der Phasenlagen der rückgestreuten Signale können mit hoher räumlicher Auflösung und einer Unsicherheit im Millimeter-Bereich Aussagen über Vertikalbewegungen gewonnen werden.

4.2. Differentielle vertikale flächenhafte Landbewegung

Die Ableitung differentieller vertikaler flächenhafter Landbewegungen beinhaltet zunächst Bestimmung von vertikalen Landbewegungen als Differenz von verschiedenen Beobachtungsepochen, wie auch die Verteilung der Beobachtungen in der Fläche. Dabei ist es wichtig, einen messtechnischen Bezuges zu Gebieten herzustellen, die als höhenstabil anzusehen sind.

Bisher hatten geodätische Beobachtungen zu Landbewegungen einen punktuellen (GNSS) oder linienhaften (Nivellement) Charakter. Durch die Hinzunahme von relativen Höhenänderungen über die Zeit, wie es bei GNSS und radarinterferometerischen Auswertungen möglich ist, können auch nicht lineare Änderungen der Erdoberfläche differentiell erfasst werden. Die Nutzung der Radarinterferometrie in diesem Projekt ermöglicht es, von der Diskretisierung des Untersuchungsgebietes durch eine geringe Anzahl von geodätischen Punkten zu einer flächenhaften Aufnahme und damit Ableitung des großräumigen Bewegungsverhaltens zu kommen.

Die grundlegenden Ansätze zur Kombination von GNSS und Nivellement wurden im BMBF-geförderten KFKI-Projekt „IKÜS - Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik“ entwickelt und sind im Beitrag Wanninger et al. (2009) in der Zeitschrift „Die Küste“ vorgestellt worden. Die damals benutzten Algorithmen sind in der Dissertation von Tengen (2010) theoretisch ausgearbeitet und detailliert beschrieben worden. Im Rahmen dieses Projektes wurden diese Ansätze um die Integration von interferometrischen Beobachtungen erweitert und in das theoretisch entwickelte und programmtechnisch umgesetzte Bewegungsmodell zusätzlich nicht-lineare Komponenten hinzugenommen, siehe Teil II, Abschnitt 1.3.1.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

1.1 Einleitung und Zielsetzung

Jensen et al. (2014) analysiert und plausibilisiert Pegelzeitreihen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküsten. Die Ergebnisse aus den punktuellen und langjährigen Pegelzeitreihen sollen über räumliche und zeitliche Rekonstruktionen in Verbindung mit Modellen aus der Ozeanreanalyse und Ergebnissen aus der Satellitenaltimetrie den relativen Anstieg des Meeresspiegels quantifizieren. Das Teilprojekt: "Räumlich-zeitliche MSL Rekonstruktionen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste (MSLabs-Rek, 03KIS116) wurde von der Universität Siegen und der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Jensen bearbeitet.

Da Aufzeichnungen des Wasserspiegels an den Pegeln nur einen Relativcharakter haben, muss dieses Signal um den Einfluss verschiedener Prozesse korrigiert werden, um zu einer Aussage über einen absoluten Meeresspiegelanstieg zu kommen. Einen Überblick über die vielfältigen Prozesse und ihre zeitliche Komponente, die auf den Meeresspiegelanstieg wirken, sowie deren zeitliche Einflussdauer ist in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt.

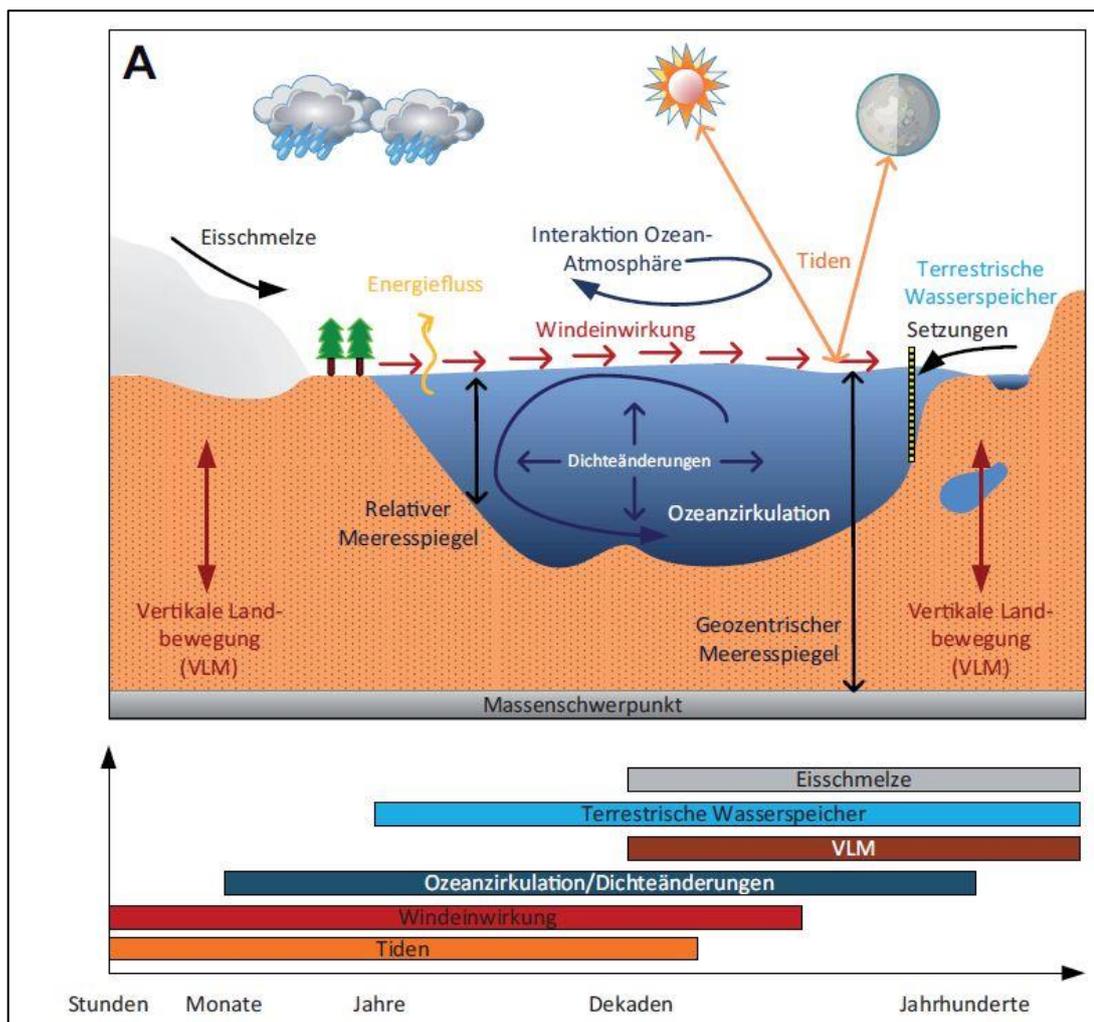


Abbildung 1: Prozesse und ihre zeitliche Dauer, die auf den Meeresspiegelanstieg wirken (Jensen et al., 2014).

Die Geländehöhen im Küstenbereich sind primär geprägt vom Einfluss der Gezeiten, dem Meeresspiegelanstieg und den landseitigen Vertikalbewegungen. Im Untersuchungsgebiet befindet sich eine größere Anzahl von Tidepegeln, deren Aufzeichnungen das Gesamtsignal der beeinflussenden Größen über die Zeit beinhalten, wie es schematisch in Abbildung 2 dargestellt ist. Dies bedeutet, dass das aufgezeichnete Pegelsignal neben dem eigentlichen Gezeitensignal und dem Meeresspiegelanstieg auch Vertikalbewegungen des Pegelumfeldes, die Eigenbewegung des Pegels bzw. seines physikalischen Aufnahmepunktes / Bauwerkes sowie landseitige großräumige Vertikalbewegungen beinhalten kann.

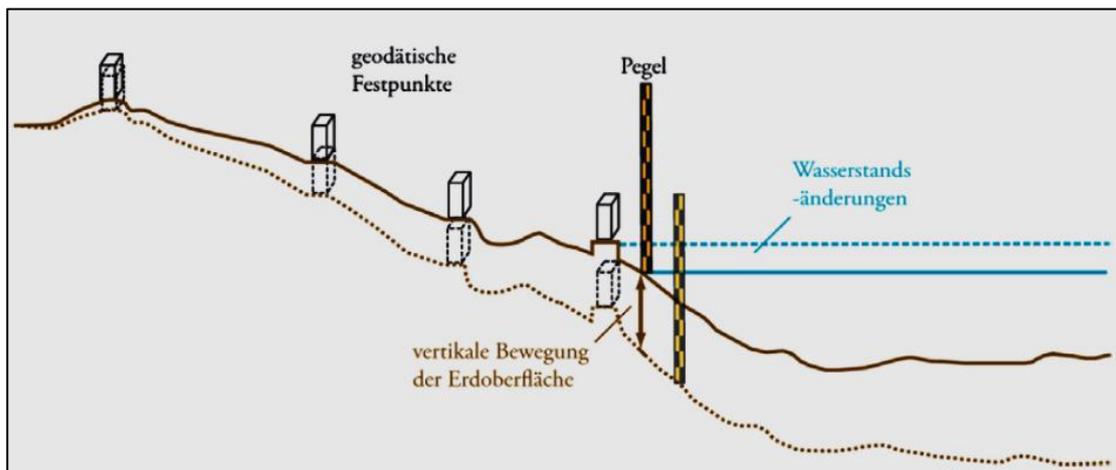


Abbildung 2: Zusammenhang von Vertikalbewegungen, Meeresspiegeländerungen und Pegelinformationen (Wanninger et al., 2009)

Den Pegeln und ihrem Umfeld kommt somit eine zentrale Bedeutung zu, wenn es um die Bestimmung des absoluten Meeresspiegelanstiegs geht. Das Ziel des hier dargelegten Projektes „Differentielle vertikale flächenhafte Landbewegung entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste (MSLabs-VFLdiff)“ ist es bzw. die Ergebnisse dienen dazu, die flächenhaften vertikalen Landbewegungen (VFL) im Bereich der deutschen Küsten an Nord- und Ostsee abzuleiten und daraus ein großräumiges Modell für die Absenkungsgeschwindigkeiten zu erstellen sowie ggf. auch Nichtlinearitäten im Bewegungsmodell aufzuzeigen.

1.2 Untersuchungsgebiet und Datenlage

Die Datengrundlage für diese Aufgaben sind die Ergebnisse (Koordinaten und Kovarianzen) aus einer gemeinsamen GNSS-Prozessierung von SAPOS-, IGS-, GREF- und EUREF-Stationen nördlich der Linie Leipzig-Göttingen-Duisburg bis zur deutsch-dänischen Grenze, den ebenso selbst erzeugten flächenhaften Resultaten aus der Radarinterferometrie, sowie den linienhaften Beobachtungen von Wiederholungsmessungen des Deutschen Haupthöhennetzes, siehe Abb. 3.

Grundsätzlich soll als Kombinationsansatz für die flächenhafte Modellierung das von Tengen (2010) entwickelte Bewegungsmodell genommen werden, das im Rahmen des KFKI-Projektes IKÜS für die Bestimmung von Höhenänderungen in Niedersachsen eingesetzt wurde, das hier allerdings methodisch erweitert und auf den gesamten norddeutschen Küstenraum angewandt wird.

Zur Interpretation und Validierung der Ergebnisse und zur Stützung der Modellierung sollen weitere Daten und Informationen bezüglich postglazialer und tektonischer Bewegungen, sowie regionaler anthropogener Einflüsse, z.B. durch Bergbau und Grundwasser-Entnahme, hinzugezogen werden.

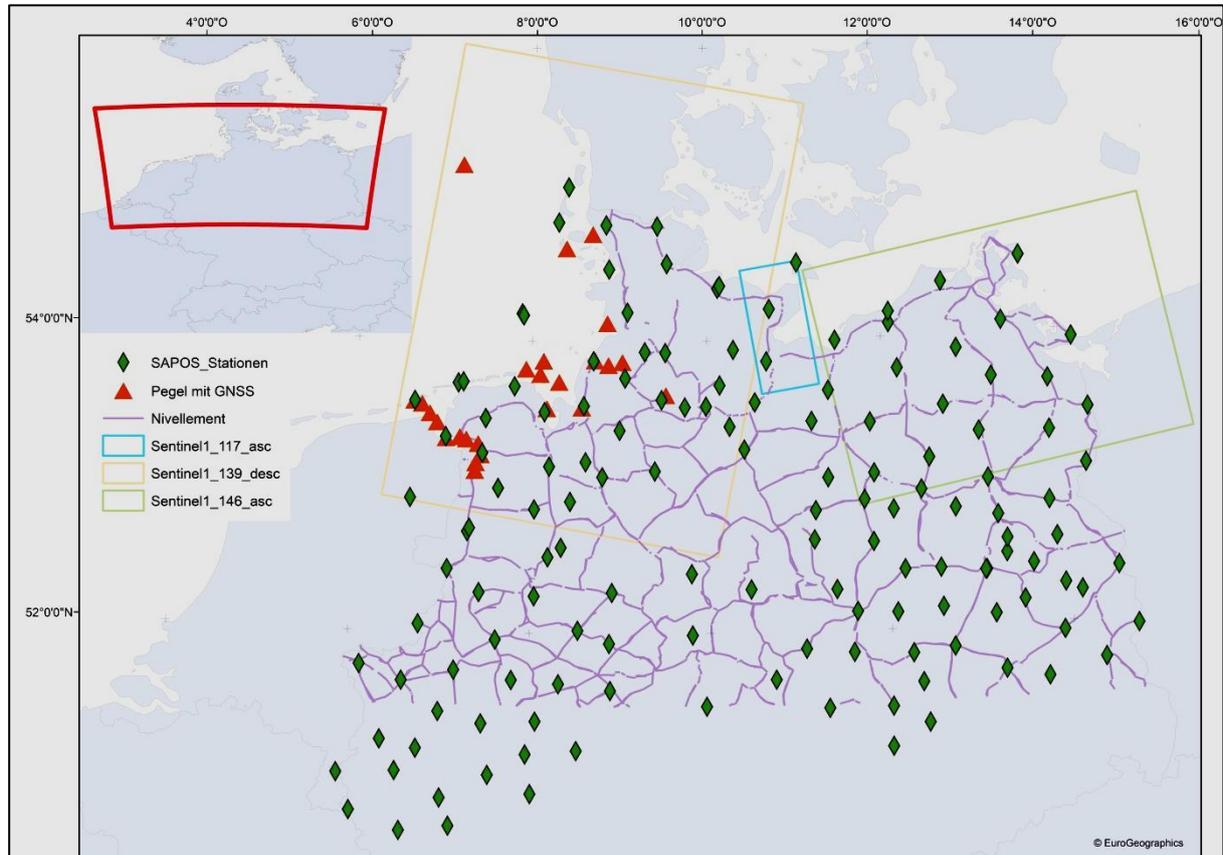


Abbildung 3: Übersicht zur Ausdehnung des Untersuchungsgebietes mit den Positionen der GNSS-Stationen, den Linien mit Doppeldifferenzen aus dem Nivellement, sowie der Lage ausgewählter Sentinel-1 Datensätze.

1.2.1 GNSS- Daten

Die Ausdehnung des Untersuchungsgebietes von der deutsch-dänischen Grenze bis in die deutschen Mittelgebirge und von der niederländischen bis zur polnischen Grenze mit den Positionen der GNSS-Permanentstationen ist in Abbildung 3 dargestellt. Zusätzlich zu den SAPOS-Stationen der Landesvermessungen werden die Daten von 21 Stationen des IGS, von EUREF bzw. GREF ausgewertet. Die Daten von 19 GNSS Stationen auf Nordsee-Pegeln der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) werden ebenfalls in die Auswertung mit einbezogen; sie sind in Abbildung 3 mit orangen Dreiecken dargestellt.

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

Darüber hinaus zeigte sich, dass durch den Förderalismus in der Bundesrepublik Deutschland die Abspeicherung von GNSS-Daten von den Richtlinien der einzelnen Landesvermessungsämter abhängig ist. Da die GNSS-Daten zwar im international üblichen RINEX-Format, aber mit unterschiedlichen Aufzeichnungsraten und Archivierungssystemen vorlagen, war das Pre-Processing viel zeitaufwändiger als ursprünglich geplant: Die RINEX Daten liegen zwar tageweise für jede Station vor, jedoch unterscheidet sich die Art und Weise der Speicherung sehr, 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 Datensätze vor. Insgesamt betrug 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 2014. Präzise Ephemeriden und Atmosphärendaten der ESA werden ebenfalls für die Auswertung bereitgestellt.

1.2.2 Daten der satellitengestützten Radarfernerkundung

Für die Bestimmung des absoluten Meeresspiegelanstiegs an der gesamten deutschen Küste soll ein Bodenbewegungsmodell u.a. aus interferometrischen Radarbeobachtungen abgeleitet werden.

Um einen Überblick über die verfügbaren Datensätze der Radarsatelliten zu bekommen, wurde eine Katalogsuche in den Archiven der Europäischen Raumfahrtagentur ESA durchgeführt. Hierbei erfolgte eine Beschränkung der Suche allein auf die C-Banddaten von ERS-1/-2, ENVISAT und Sentinel-1A/-B. Die L-Banddaten der ALOS-Satelliten und die X-Bandaufzeichnungen von TerraSAR-X bzw. Tandem-X wurden nicht berücksichtigt, da das C-Band im Rahmen der Erdbeobachtung einen guten Kompromiss der Signaleigenschaften, sowohl für den Stadtbereich, wie auch den ländlichen Bereich darstellt. Am Beispiel des Großraums Lüneburg, der zentral im Untersuchungsgebiet liegt, soll in der nachstehenden Tabelle 1, das Ergebnis der Katalogsuche für die Daten der verschiedenen Satelliten gezeigt werden. Es lässt sich feststellen, dass die Datenmenge des ERS-2 Satelliten aus 16 Jahren Erdbeobachtung der Datenmenge des Sentinel-1a Satelliten für 3 Jahre entspricht.

Tabelle 1: Datenverfügbarkeit der Radarsatelliten für den Großraum Lüneburg, Stand: Dez. 2017.

Datenverfügbarkeit Raum Lüneburg				
Satellit	Orbit	Start	Ende	Aufnahmen
Sentinel-1A	asc/desc	14.11.2014	11.12.2017	441
Sentinel-1B	asc/desc	26.09.2014	11.12.2017	162
ENVISAT	asc	29.11.2002	22.09.2010	44
ERS-1	asc/desc	30.07.1991	29.10.1999	76
ERS-2	asc/desc	02.06.1995	18.02.2011	491

Betrachtet man in der Tabelle 1 die Anzahl der Aufnahmen gegenüber dem Aufnahmezeitraum, so zeigt sich, dass eine quasi-kontinuierliche Zeitreihe in der Auswertung nur aus Sentinel-1 Daten möglich ist. Detailuntersuchungen mit den ERS- und ENVISAT-Daten zeigten, dass es nicht möglich ist stabile PS oder SBAS-Lösungen über größere Zeiträume zu generieren, da es sehr große Zeiträume ohne Aufzeichnung in den Archiven gibt. Für die großräumige und flächenhafte Bestimmung der vertikalen Landbewegungen an der Nord- und Ostseeküste wurden deshalb nur Radaraufnahmen der europäischen Radarsatelliten Sentinel-1A bzw. -1B ausgewählt (Riedel et al., 2018).

Erste Auswertungen mit Gebietsgrößen von 80km x 100km zeigten, dass eine vergleichbare flächenhafte Abdeckung wie bei der GNSS-Auswertung, also bis zu den Mittelgebirgen, auf Grund der dann extrem langen Prozessierungszeiten auswertetechnisch nicht realisierbar ist. Daher wird – in Abstimmung mit der PbG - die radarinterferometrische Auswertung auf einen ca. 50 km breiten Streifen entlang der 1200 km langen deutschen Küste begrenzt. Die alternativ grundsätzliche Möglichkeit, globale Rechenzentren einzuschalten, wurde verworfen, da die dort verwendeten Auswerteansätze kaum nachvollziehbar sind und wir doch Kenntnisse über die Auswertealgorithmen haben wollten.

Im Bereich der Nordsee wird der absteigende Orbit des Track 139 genutzt, der von Oktober 2014 bis März 2018 insgesamt 133 Aufnahmen beinhaltet. Der Track 139 deckt die Ostsee bis Lütjenburg ab. Im östlichen Anschluss wird der Track 117 im aufsteigenden Orbit von Juni 2016 bis Februar 2019 mit 122 Aufnahmen verwendet um das Gebiet von Lütjenburg, über Fehmarn bis östlich von Lübeck abzudecken. Für die östlichen Bereiche der Ostsee wird der aufsteigende Orbit 146 mit 130 Aufnahmen von Oktober 2014 bis September 2018 verwendet. Eine Übersicht über die vorhandenen Daten und ihre zeitliche Verfügbarkeit zeigt die folgende Abbildung 4.

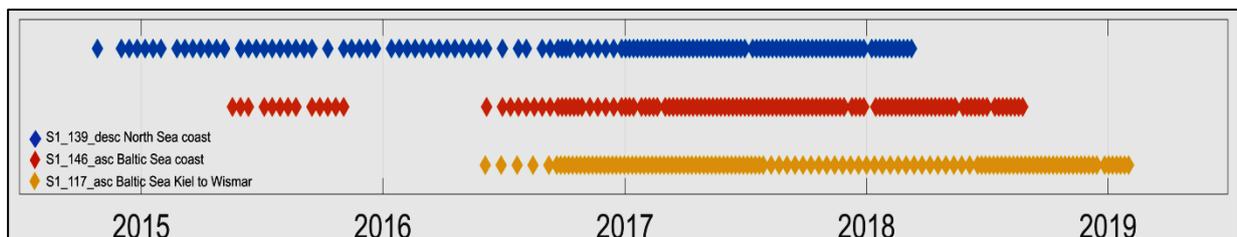


Abbildung 4: Übersicht über die verfügbaren Radar-Aufnahmen der Sentinel- Tracks für den verfügbaren Zeitraum ab 2014.

1.2.3 Nivellement

Datengrundlage waren die linienhaften Beobachtungen aus den Wiederholungsmessungen des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) von 1992 und der aktuellen Erneuerung der Jahre 2006 bis 2012 (DHHN 2016) eingeflossen. Erfahrungen mit der Integration der relativen Höhenänderungen aus Nivellementdaten in Kombination mit den Ergebnissen aus GNSS-Stationsbeobachtungen auf unterschiedlichen Zeitbasen wurden bereits im Verbundprojekt IKÜS -Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik-erworben (Wanninger et al., 2009, Tengen 2010).

Hier werden - wie bei IKÜS - nicht die gemessenen Höhendifferenzen direkt in das Modell eingeführt, sondern es werden Änderungen in den gemessenen Höhendifferenzen zwischen zwei identischen Punkten betrachtet, diese doppelten Differenzen entsprechen Geschwindigkeitsunterschieden zwischen den Punkten. Es werden alle identischen Punkte in den Kampagnen DHHN 1992 und DHHN 2016 bestimmt und die Höhendifferenzen zwischen diesen Punkte summiert. Es werden jedoch nur Höhendifferenzen zusammengefasst, deren Messzeitpunkte innerhalb eines vorgegeben Zeitraumes liegen, Höhendifferenzen, die in unterschiedlichen Jahren gemessen wurden, werden nicht zu einer Line zusammengefasst! Da der Verlauf der Nivellementlinien sich in den Kampagnen DHHN 1992 und DHHN 2016 unterscheidet, werden Algorithmen der Graphentheorie verwendet, um Linien zwischen den identischen Punkten zu finden. Da nur zwei Kampagnen vorliegen, kann aus diesen Nivellementsdaten maximal ein Modell mit einer konstanten Geschwindigkeit aufgebaut werden. Die Datenlage war jedoch unzureichend, so dass in etliche Fällen keine Höhendifferenzen zwischen zwei identischen Punkten berechnet werden konnten. Insgesamt muss man konstatieren, dass ein zusammenhängendes Netz aus Geschwindigkeitsdifferenzen aus den hier vorliegenden Nivellementsdaten nicht bestimmbar ist.

1.3 Modellentwicklung

1.3.1 Konzept mit Radialen Basisfunktionen

Das übergeordnete Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Ableitung eines zeitabhängigen Geschwindigkeitsfeldes für Vertikalbewegungen im Raum der deutschen Küsten an Nord- und Ostsee. Wenn möglich, sollte dazu ein mathematisches Modell verwendet werden, für das uns als Ausgangsmodell die methodischen Ansätze aus dem KFKI-Verbundprojekt „IKÜS“ dienen, wie sie in Wanninger et al. (2009) und detaillierter in Tengen (2010) beschrieben sind.

Theoretisch wird hierbei das (zunächst noch fiktive) Geschwindigkeitsfeld im gesamten Untersuchungsgebiet durch eine Linearkombination von Radialen Basisfunktionen (RBF) approximiert, die sich in der Fachliteratur (z.B. Buhman, 2010; Wu, 2012) als geeignet für solche sogenannten No-Mesh-Approximationen erwiesen haben. Die RBFs werden über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt aufgebaut und erlauben die Berechnung der Geschwindigkeit für beliebige Positionen im Untersuchungsgebiet. Kriterium für die Anordnung, d.h. die Lage der Zentren und Wirkweite dieser „Pos-RBFs“, ist die Verfügbarkeit von Messdaten und eine erwartete Änderungsrate bzw. Krümmung der Fläche. Bei der hier erfolgten Modellerweiterung sollten auch zeitlich veränderliche Bewegungen mit erfasst werden können. Dazu wurden neben den „Pos-RBFs“ für die Interpolation in der Fläche auch „Temp-RGBs“ eingeführt, um Bewegungen mit der Zeit zu modellieren.

Mit Hilfe von Clustering kann bei Bedarf die Punktdichte reduziert werden. Als Kernelfunktion für die Pos-RBF wird eine Gauß'sche Glockenkurve verwendet. Die Position (x_k, y_k) und die Breite (Standardabweichung s_k) der Kurve werden aufgrund der vorliegenden Daten festgelegt. Das Gewicht w_k der einzelnen RBF wird im Modell bestimmt. Die Geschwindigkeit v_i eines beliebigen Punktes P_i mit den Koordinaten x_i, y_i ergibt sich als Summe von n Radialen Basisfunktionen im Umfeld des Punktes:

$$v_i = \sum_{k=1}^n w_k e^{-\frac{((x_i-x_k)^2+(y_i-y_k)^2)}{2s_k^2}}$$

Im Projekt IKÜS wurde diese Geschwindigkeit der RBF als konstant angenommen. Im Projekt MSL_absolut wird das Modell um Temp-RBF erweitert, um die Modellierung auch nicht-linearer Geschwindigkeiten möglich zu machen. Die Geschwindigkeit ist damit zeitabhängig, d.h. v_i^t des Punktes P_i zum Zeitpunkt t wird als Summe von Radialen Basisfunktionen, wieder mit Gauß-Kernel, repräsentiert, die jetzt als Temp-RBF bezeichnet werden können:

$$v_i^t = \sum_{k=1}^n w_k e^{-\frac{(t-t_k)^2}{2s_k^2}}$$

Die Zentren der Basisfunktionen t_k und die Standardabweichungen s_k werden aus der Zeitreihe der als Input einfließenden Daten über Höhenänderungen abgeleitet. Das Gewicht w_k wird im Modell bestimmt. Die Höhenänderungen entsprechen dem Integral der Geschwindigkeit über die Zeit:

$$\Delta h = \int_{t_0}^{t_1} v(t) dt$$

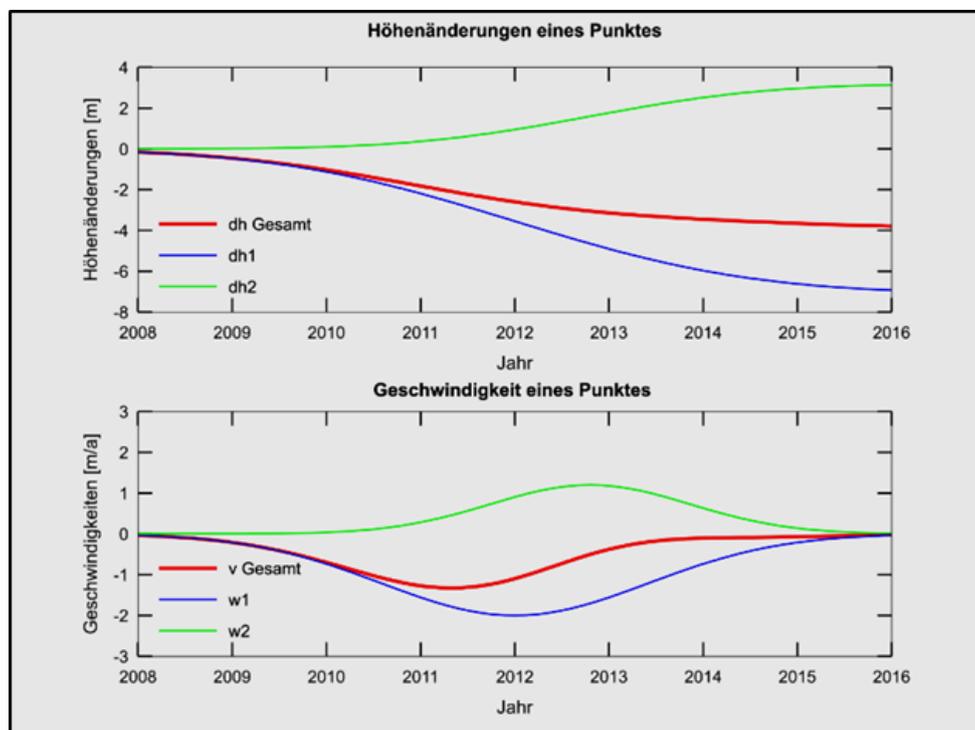


Abbildung 5: Modell der Höhenänderung eines Punktes mit variabler Geschwindigkeit.

In Abbildung 5 wird in der oberen Abbildung die Höhenänderung eines Punktes in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die zugehörige Geschwindigkeit der Höhenänderung wird in der unteren Zeichnung visualisiert. Die Gesamtgeschwindigkeit v_{Gesamt} setzt sich aus der Summe von zwei einzelnen radialen Basisfunktionen zusammen. Durch die Verwendung von mehreren RBF können beliebige Höhenänderungen modelliert werden.

Dieser erweiterte Ansatz ist im Rahmen des Projektes softwaremäßig entwickelt und erprobt worden.

1.3.2 Nutzung der vorliegenden Daten

Die reale Berechnung eines Geschwindigkeitsfeldes erfolgt mit den Eingangsdaten aus der Radarinterferometrie, den GNSS-Höhenänderungen der Permanentstationen und den Höhendifferenzen aus den Nivellements in einem gemeinsamen Modell. Hierbei werden die aus der Radarinterferometrie bestimmten Höhenänderungen in Abhängigkeit von Zeit und Ort verwendet. Alle diese Daten können ohne Änderungen in das Modell übernommen werden.

- Ein gemessener Höhenunterschied Δh_i zwischen 2 Szenen zum Zeitpunkt t_a und t_b kann formuliert werden als:

$$\Delta h_i = \int_{t_a}^{t_b} v_i dt$$

- Die Höhendifferenz Δh_i^t der GNSS-Station P_i zum Zeitpunkt t wird in das Modell eingeführt als:

$$\Delta h_i^t = \int_{t_0}^t v_i(t) dt + \sum_{k=1}^n (a_k \sin(2\pi f_k(t - t_0)) + b_k \cos(2\pi f_k(t - t_0))) + o_i^t$$

Neben einer nichtlinearen Geschwindigkeit können bei diesem Ansatz für die GNSS-Stationen auch eine saisonale Bewegung mit den Parametern a_k und b_k sowie der Frequenz f_k und ein Offset in Form einer Treppenfunktion o^t geschätzt werden.

- Für die Ergebnisse von Nivellements gilt: Die Höhe eines Punktes P_i zum Zeitpunkt t bei bekannter Anfangshöhe $H_i^{t_0}$ zum Zeitpunkt t_0 entspricht:

$$H_i^t = H_i^{t_0} + \int_{t_0}^t v_i(t) dt$$

Für eine gemessene Höhendifferenz zwischen den Punkten P_i und P_k zum Zeitpunkt t folgt entsprechend:

$$\Delta h_{k-i}^t = H_k^t - H_i^t = \left(H_k^{t_0} + \int_{t_0}^t v_k(t) dt \right) - \left(H_i^{t_0} + \int_{t_0}^t v_i(t) dt \right)$$

Für den Zeitpunkt t_2 gilt entsprechend:

$$\Delta h_{k-i}^{t_2} = H_k^{t_2} - H_i^{t_2} = \left(H_k^{t_0} + \int_{t_0}^{t_2} v_k(t) dt \right) - \left(H_i^{t_0} + \int_{t_0}^{t_2} v_i(t) dt \right)$$

Die Differenz der Höhendifferenzen ergibt sich zu

$$\Delta h_{k-i}^{t_2} - \Delta h_{k-i}^{t_1} = \int_{t_1}^{t_2} v_k(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} v_i(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} (v_k(t) - v_i(t)) dt$$

Bei einer Kombination von Höhendifferenzen mit GNSS- bzw. Radar-Daten mit nichtlinearen Bewegungen kann die obige Formel für eine strenge Integration der Nivellementdaten in das Gesamtmodell verwendet werden.

Als Ergebnis stehen pro Tag 5 Teillösungen mit global kartesischen Koordinaten sowie vollständiger Kovarianzmatrix zur Verfügung. Die 35 Teillösungen pro Woche werden zu einer Wochenlösung zusammengefasst. Für jede Teillösung werden 7 Parameter einer räumlichen Helmert-Transformation zugelassen und daraus wird mit dem Programmsystem PANDA ein einheitlicher Koordinatensatz mit vollständiger Kovarianzmatrix berechnet. Die Kovarianzmatrix nach einer freien Ausgleichung mit Gesamtspurminimierung beschreibt die innere Genauigkeit des Netzes.

Die Wochenlösung wird im Sinne einer Helmert-Transformation auf Referenzpunkte im Mittelgebirge gelagert, da die Mehrzahl der Punkte in diesem Gebiet als geologisch stabil anzusehen 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 7.

Um ein Kippen des gesamten Netzes in Nord-Süd-Richtung zu erkennen, wird auch die IGS Station Onsala in Süd-Schweden, deren Bewegungsverhalten unter Einfluss von GIA sehr gut bekannt ist, zur Kontrolle in die Auswertung einbezogen. Die hier bestimmten Bewegungen für Onsala entsprechen den Erwartungen sehr gut.

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 1992 und des DHHN 2016 (Wallenhorst, Flechtingen und Hoppegarten).

Durch einen im Rahmen dieses Vorhabens entwickelten innovativen Ansatz (Tengen et al. 2019) kann im Zuge dieser Transformationen nicht nur eine Kontrolle der Referenzpunkte auf Stabilität durchgeführt werden, sondern es wird möglich, für instabile Punkte eine nichtlineare Punktbewegung und/oder eine saisonale Bewegung zu erkennen und dann zu berücksichtigen. 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 stets eine strenge Deformationsanalyse (Kongruenztest) mit kompletter Kovarianzmatrix. Die Deformationsanalyse wird im global kartesischen System durchgeführt. Es wird fortlaufend jede Epoche mit der ersten Epoche (Nullepoche) verglichen. Sobald 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.

Wie in Abb. 8 exemplarisch skizziert, wird für die instabilen Punkte eine Zeitreihe aufgestellt und versucht, ein Bewegungsmuster zu bestimmen, wie eine lineare Bewegung, ein Offset oder eine saisonale Bewegung (hier nicht dargestellt). Kann die jeweilige Bewegung über mehrere Epochen mit Hilfe von Parametern zuverlässig beschrieben werden, so wird der Punkt als „Referenzpunkt mit bekannten Bewegungsverhalten“ definiert und verbleibt weiterhin in der Gruppe der Referenzpunkte.

Erst durch diesen Ansatz wird erreicht, dass die Gruppe der Referenzpunkte hinreichend groß bleibt, also eine langfristige Auswertung von GNSS-Daten mit Bezug zu festen Gebieten möglich wird.

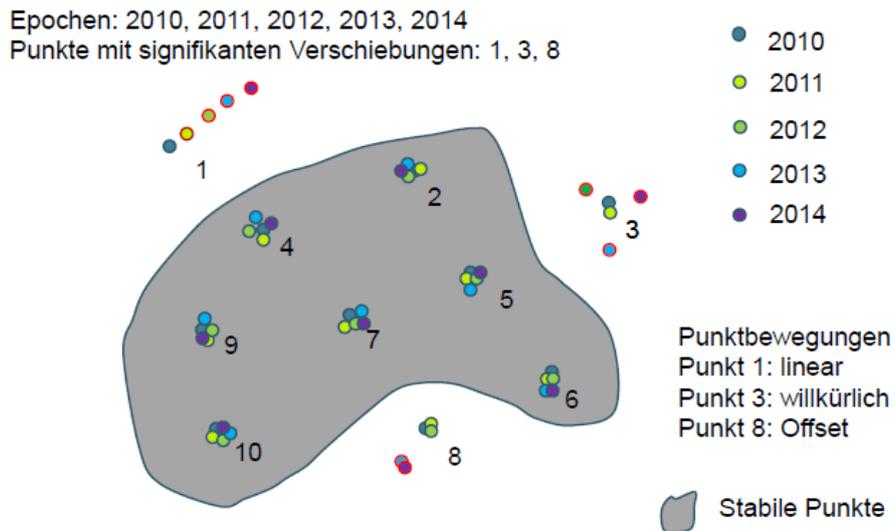


Abbildung 8: Prinzip des Erkennens von Bewegungsmustern für Referenzpunkte (Tengen et al., 2019)

Anschließend wird die Deformationsanalyse für sämtliche Epochen neu gestartet, wobei jetzt neben den stabilen Referenzpunkten auch die Referenzpunkte mit bekannten Bewegungsverhalten als identische Punkte betrachtet werden. Es werden für jede Epoche somit Transformationsparameter berechnet und alle Stationen mit Hilfe dieser Parameter in ein einheitliches System transformiert. Abschließend werden für alle Punkte (Referenz- und Objektpunkte) die Koordinaten bzw. Koordinatenänderungen im Horizontsystem bestimmt. Die so errechneten Ergebnisse sind im Abschnitt 1.6.1 wiedergegeben.

1.5 Auswertung der Sentinel-1 Aufnahmen

Die Auswertung der Sentinel-1 Daten erfolgt zuerst mit den multitemporalen Prozessierungsmethoden *Persistent Scatterer Interferometrie (PSI)* und *Small Baseline Subset (SBAS)* (Ferretti et al., 2001; Berardino et al., 2002).

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 07. Februar 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 Interferogrammstapels 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.

Die Auswertung mittels der PSI-Methode ist i.d.R. ideal für den urbanen Raum, da die Rückstreueigenschaften der Oberfläche im Stadtgebiet über längere Zeiträume nahezu stabil sind.

Die alternative *SBAS-Auswertung* verwendet mehrere Masterdatensätze und nur eine Untermenge der weiteren Datensätze in Bezug zur Referenzszene. Die SBAS-Methode hat im ländlichen Raum durch ihre große Anzahl von Verknüpfungen zwischen den einzelnen Aufnahmen den Vorteil, dass man trotz

Änderungen der Rückstreuereigenschaften an der Erdoberfläche, z.B. durch Vegetation, eher in der Lage ist, die geometrischen Veränderungen der Oberfläche abzuleiten.

In Abbildung 9 sind exemplarisch die Verbindungsgraphen für die PSI- und SBAS-Ansätze dargestellt, hierzu wurde der Track 139 im absteigenden Bahnbogen genutzt. Für die SBAS Auswertung wurden die Parameter 2 % kritische Basislinie und 60 Tage maximale zeitlicher Basislinie zugelassen. Es ist aus der Abbildung 9 ersichtlich, dass die Variation der räumlichen Basislinien sehr gering ist und die Wiederholraten mit bis zu 6 Tagen sehr hoch sind. Beides führt zu einer sehr guten Verknüpfung der Datensätze in der PSI- bzw. SBAS-Auswertung.

Zu Beginn der Auswertungen wurden für das Gebiet des späteren Patch 2 verschiedenen Testläufe in der PSI und SBAS- Auswertung mit verschiedenen Parametern durchgeführt. Die SBAS -Auswertung benötigte bis zum Dreifachen der Zeit einer PSI-Auswertung, allein durch die höhere Anzahl an Interferogrammen, die zu Prozessieren waren. Daher wurde entschieden, auf die flächenhafte Lösung mittels SBAS zu Gunsten der PSI-Prozessierung verzichtet. In Tabelle 2 sind für die endgültigen Prozessierungen die Prozessierungszeiten gelistet.

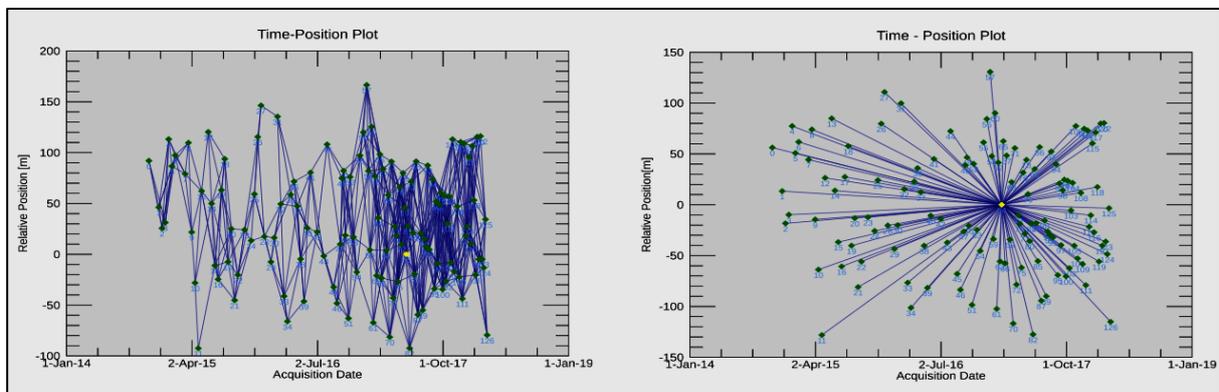


Abbildung 9: Räumliche und zeitliche Verbindungen zwischen Referenzaufnahme (master) und weiteren Datensätzen (slave) für PSI-Auswertung (links) und SBAS-Auswertung (rechts) für Track 139.

Das in Abbildung 10 dargestellte Untersuchungsgebiet wurde in mehrere Teilgebiete (Patches) mit großen 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 (gelb) und 2 (orange) 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 2. Die angegebene Gesamtrechnenzeit von bis zu 3 Wochen bezieht sich auf die Interferogramm-Generierung und die anschließende PS-Prozessierung bis zur Geokodierung 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 Rechenzeiten 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.

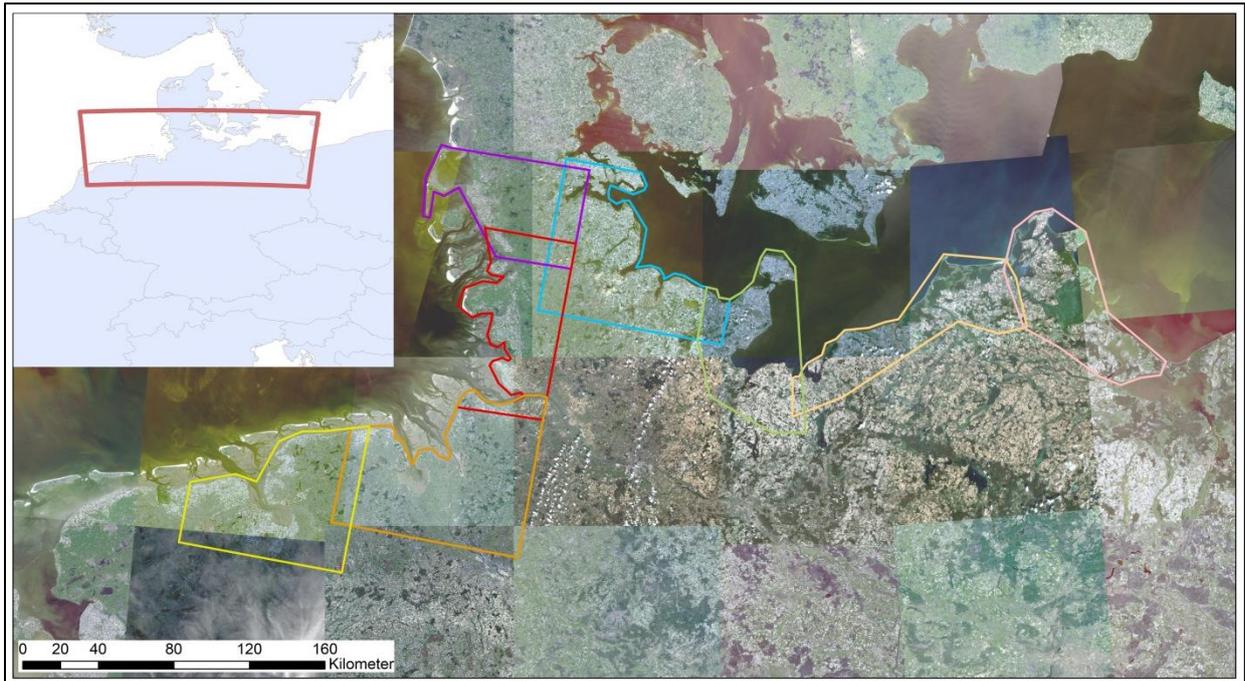


Abbildung 10: Überblick über die bearbeiteten Patches, hinterlegt mit Sentinel-2 Aufnahmen.

Tabelle 2: Übersicht über die Patches mit Prozessierungszeiten, sowie der Gebietsgröße.

Satellit en- Track	Name	Ausdehnung	Fläche (km ²)	Rechenzeit (Tage)	Datensat z (TByte)	Computer
139	Patch1	Emden-Papenburg	5300	14	2	8 Kerne\ 3,4 GHz
139	Patch2	Wilhemshaven- Bremen	6300	22	2	8 Kerne\ 3,4 GHz
139	Patch3	Cuxhaven- Bredtstedt	3500	6	1,2	88 Kerne\ 2,8GHz
139	Patch4	Bredtstedt-Sylt	3700	6	1,1	88 Kerne\ 2,8GHz
139	Patch5	Flensburg- Lütjenburg	5000	7	1,3	88 Kerne\ 2,8GHz
117	117_asc	Lütjenburg-Lübeck	2200	5	1,1	32 Kerne\ 4,1GHz
146	Ostsee_W est	Wismar-Stralsund	3500	8	2	88 Kerne\ 2,8GHz
146	Ostsee_O st	Stralsund- Świnoujście	3800	5	2	88 Kerne\ 2,8GHz

1.6 Auswertergebnisse

1.6.1 GNSS Zeitreihen

Als Ergebnis der Auswertung - nach dem vorstehend beschriebenen Konzept - erhält man für sämtliche GNSS-Stationen Zeitreihen mit Höhenänderungen i.d.R. für den Zeitraum 2010 - 2016. Diese Ergebnisse sind bezogen auf die Gruppe der Referenzpunkte im Bereich der Mittelgebirge gemäß der Einteilung in Abb. 7. Diese Zeitreihen bilden die Grundlage für die Ableitung eines Bewegungsmodells für den Küstenbereich im Abschnitt 1.7.

In den Abbildungen 11 und 12 sind exemplarisch für zwei GNSS Stationen die Ergebnisse aus den Wochenlösungen über 7 Jahre GNSS-Beobachtungen im Horizontsystem dargestellt.

Für den als *stabil eingestuften Referenzpunkt 0020 in Luckenwalde*, Lage siehe Abbildung 7, kann man eine saisonale Variabilität in der Höhe beobachten, aber der sehr geringe Trend in der Bewegung und die hohe innere Genauigkeit von weniger als 2 mm für die Wochenlösungen der Beobachtungen, siehe unteren Teil von Abbildung 11, zeigt die Langzeitstabilität für diesen Punkt Luckenwalde an.

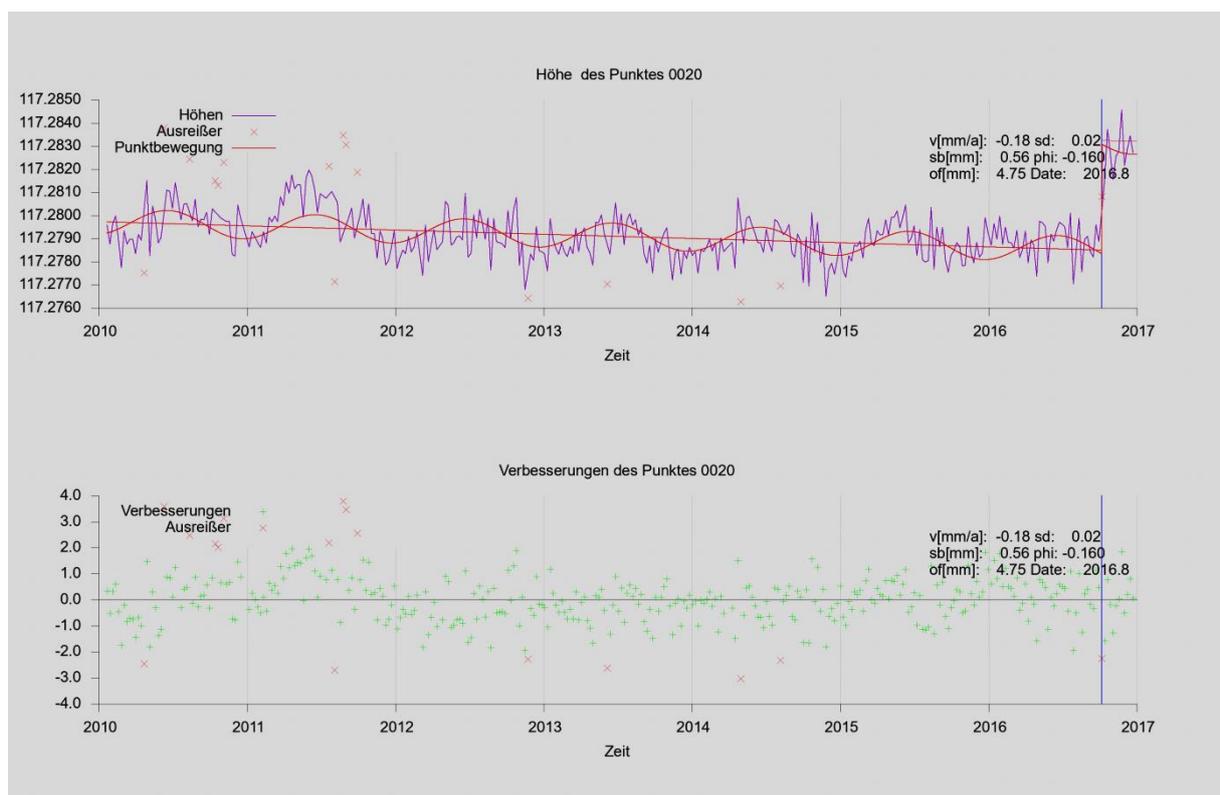


Abbildung 11: Ergebnis für die Höhenänderung des stabilen Referenzpunktes 0020 (Luckenwalde).

Für den in Südschweden liegenden Referenzpunkt ONSALA sind die Ergebnisse in Abbildung 12 wiedergegeben. Auch wenn durch die Extrapolation aus dem Untersuchungsgebiet hier mit einer geringeren Genauigkeit auszugehen ist, so bestätigt der ermittelte Trend doch das bekannte Bewegungsverhalten für ONSALA hinreichend genau.

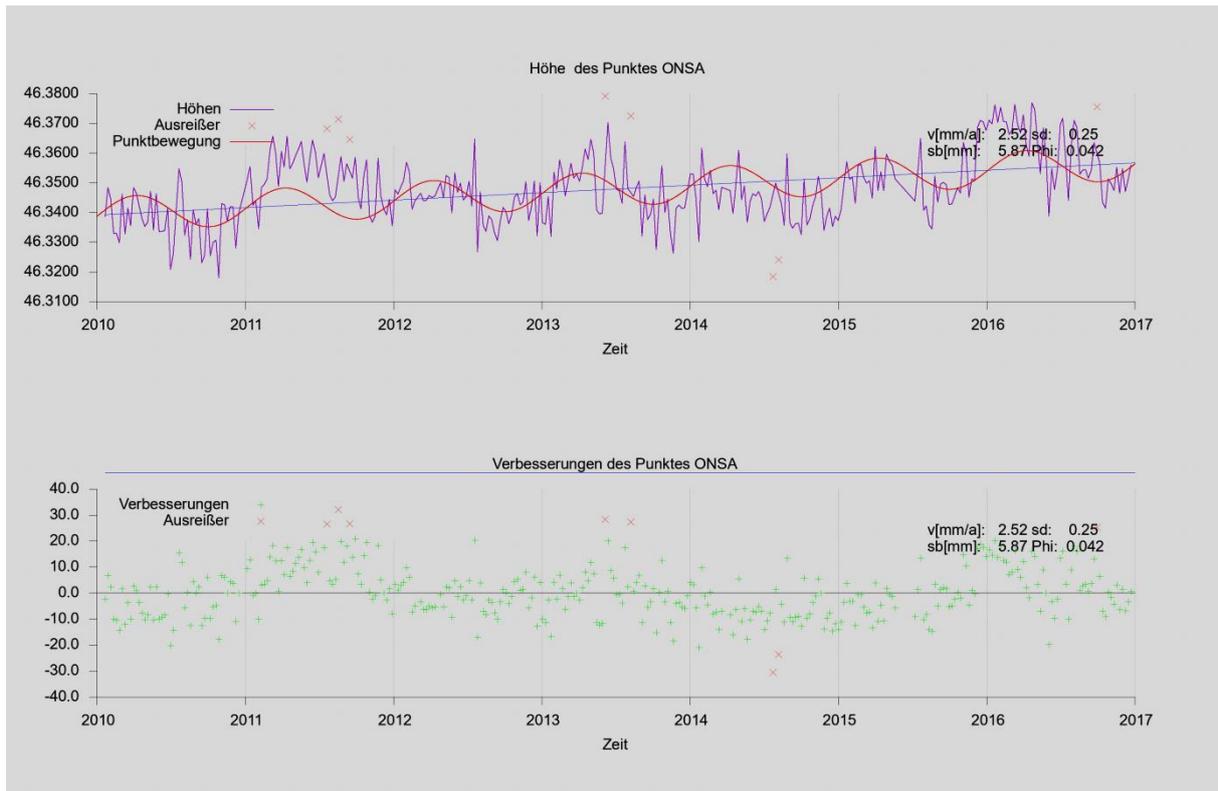


Abbildung 12: Ergebnis für die Höhenänderungen für die externe Bezugsstation ONSALA in Schweden.

1.6.2 Ergebnisse der PSI Auswertung

Obwohl die Daten für diese radarinterferometrische Bestimmung von Bewegungen die Szenen mehreren Sentinel-Streifen umfassen und die Auswertung in mehreren Patches erfolgte, siehe Tabelle 2, werden hier die Ergebnisse zu einer Gesamt-Darstellung zusammengefasst. In Abbildung 13 sind die *Vertikalbewegungen* dargestellt, die sich aus den Sentinel Radarszenen aus dem Gesamtzeitintervall minimal Oktober 2014 bis maximal Februar 2019 ergeben haben. Dabei wird von einem linearen Geschwindigkeitsfeld ausgegangen, da es keine eindeutigen Hinweise daraus gibt, beziehungsweise keine belastbare Vorinformation dafür vorliegt, dass hier ein nichtlineares Bewegungsmodell eher angemessen ist.

Die Ergebnisse der zusammengefassten PSI Auswertung in Abbildung 13 zeigen für weite Bereiche der Nordsee und der Ostsee ein sehr homogenes Geschwindigkeitsfeld, das sich zwischen $\pm 3\text{mm/a}$ bewegt und großräumig als stabil betrachtet werden kann. Im Raum Emden und Groningen werden stärkere Vertikalbewegungen beobachtet mit Geschwindigkeiten bis zu -8mm/a . Diese Bewegungen lassen sich vielleicht als abklingende langfristige Auswirkung der Entnahme von Gas im Groninger Gasfeld erklären. In Wilhelmshaven und im Salzstock Etzel befinden sich Kavernenspeicher, die die Setzungen an der Erdoberfläche mit Vertikalbewegungen bis -10mm/a verursachen (BGR, 2018).

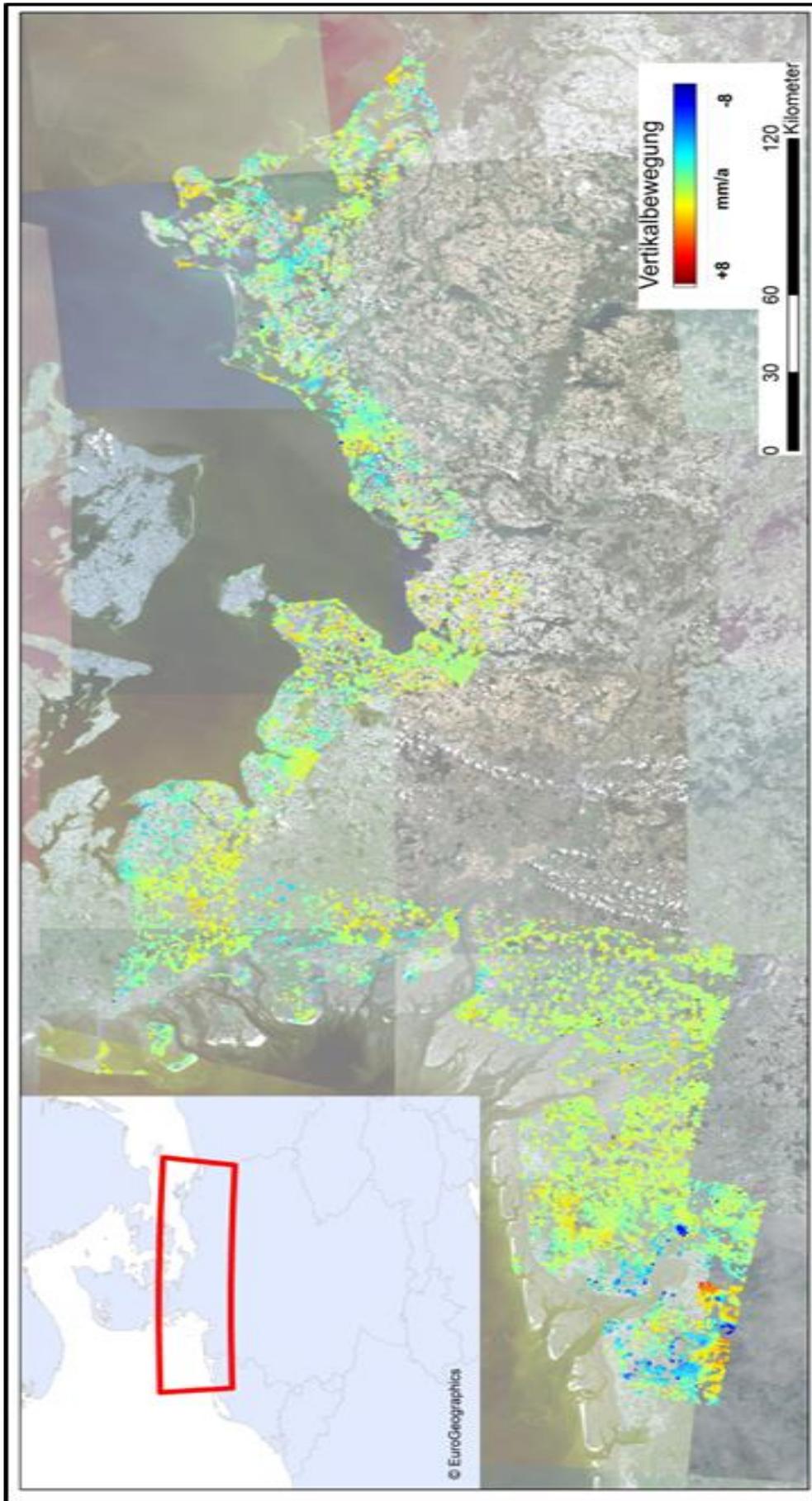


Abbildung 13: Gesamtergebnis PSI-Auswertung für die Nord- und Ostseeküste für die Jahre 2014-2018

Diskussion im Bereich Emden/Groningen: In Abbildung 14 sind den PSI Ergebnissen die Ergebnisse des Niederländischen Bodenbewegungsdienstes (Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-Informatica (NCG, 2019) hinterlegt. Es lässt sich feststellen, dass die Bewegungen im Raum Groningen in ihrer Ausdehnung überein passen, aber der NCG (2019) Bewegungsraten auf niederländischer Seite bis -30 mm/a ermittelt.

Nördlich von Windschoten könnten Hebungen durch das Blauwestad Projekt entstanden sein. Während der Projektphase wurde des Naturschutzgebiet Oldamtmeer teilweise geflutet und zu einem neuen See verändert. Hebungen in den Dörfern nahe des Zuiddardenermeers können auf anthropogene Ursachen zurückgeführt werden. Hauptsächlich durch den Bau von Häusern und Stegen als Bootsanleger, Installationen von Solaranlagen auf Dächern, industrielle und landwirtschaftliche Produktion, die zu mikroklimatischen Effekten führt und in der Auswertung, als Hebung erkennbar ist. In Veendam sind leichte Hebungen durch den Bau eines neuen Kreisverkehrs und eines neuen Autobahnkreuzes erkennbar. Die lokalen Hebungen sind in Übereinstimmung mit den Bewegungen des Bodenbewegungsdienstes der Niederlande (Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-Informatica (NCG, 2019).

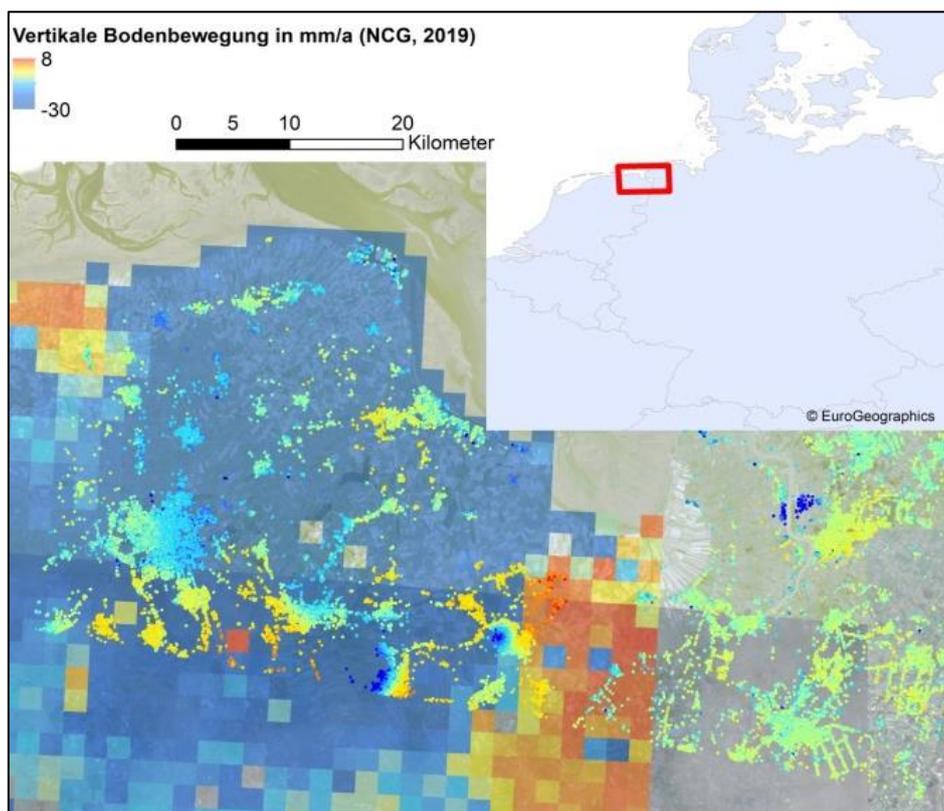


Abbildung 14: Ergebnisse der PSI Auswertung im Raum Groningen hinterlegt mit Ergebnissen des Bodenbewegungsdienstes der Niederlande (NCG, 2019).

Die **Ergebnisse der PSI-Lösungen im Bereich der Ostsee** wirken homogener, als an im Emdener Bereich und generell der Nordseeküste. Eine Hebung auf Grund der isostatischen Ausgleichsbewegungen der letzten Eiszeit (Glacial Isostatic Rebound GIA) ist aus den Radarergebnissen nicht eindeutig erkennbar, siehe Abbildung 15. Die Zeitreihe ist wohl zu kurz, um diese Ausgleichsbewegung zu detektieren, siehe das Modell für GNNS im Abschnitt 1.7.

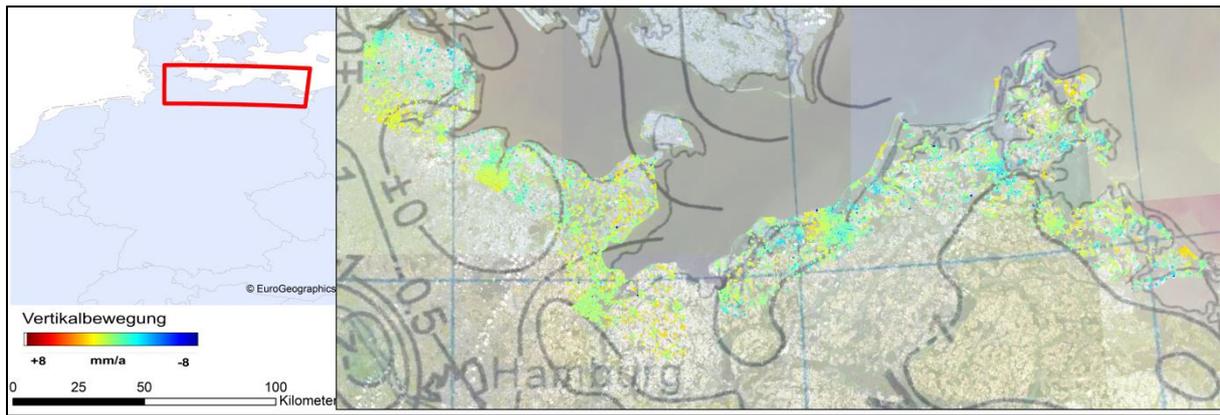


Abbildung 15: Ergebnisse der PSI Auswertung und Hebungsraten des GIA (Frischbutter & Schwab 2001)

Ein **grundsätzliches Problem** für großräumige Betrachtungen ist die Verwendung von Radarszenen aus unterschiedlichen Streifen und die Bearbeitung in unterschiedlichen Patches. Hier können sich Restsystematiken aus nicht genauen Orbits, unterschiedlichen Atmosphärenmodellen u.a. auswirken. Daher ist es interessant, dass bei Detailuntersuchungen in den Überlappungsbereichen der Patches nur sehr geringe Offsets zwischen den Auswertungen von bis zu $-0,7$ mm/a aufgezeigt werden konnten, siehe Tabelle 3. Auf Grund dieser geringen Offsets wird keine Offset Korrektur angebracht. Entsprechend werden die Änderungsraten aus der PSI-Auswertung als reale Höhenänderungen angesehen und so in die Gesamtbetrachtung, siehe Abschnitt 1.6.4, eingeführt.

Tabelle 3: Detailuntersuchungen in den Überlappungsbereichen der Patches

Name	Ausdehnung	Fläche (km ²)	Überlappende Fläche (km ²)	Anzahl PS	Anzahl PS in überlappender Fläche	Geschwindigkeitsdifferenz in überlappender Fläche [mm/a]
Patch1 (P1)	Groningen-Papenburg	5300	510 mit P2	249890	20120	-0,1
Patch2 (P2)	Wilhemshaven-Bremen	6300	450 mit P3	254713	P1: 25250 P3: 10401	-0,1
Patch3 (P3)	Cuxhaven-Bredtstedt	3500	580 mit P4	62580	P2: 13715 P4: 5500 P5: 758	-0,7
Patch4 (P4)	Bredtstedt-Sylt	3700	690 mit P5	31678	P3: 6749 P5: 13971	0,1
Patch5 (P5)	Flensburg-Lütjenburg	5000	500 mit P3	68528	P3: 1202 P4: 10924 117_asc: 1871	P3: -0,4
117_asc	Lütjenburg-Lübeck	2200	100 mit P5	108461	P5: 4776	P5: 0,5
Baltic Sea_West (BS_W)	Wismar-Stralsund	3500	180 mit BS_E	94200	12246	0,2
Baltic Sea_East (BS_E)	Stralsund-Świnoujście	3800		72081	12117	

Im alten Stadthafen von Rostock sind Setzungen von bis zu $-4,5 \text{ mm/a}$ auf einer Fläche von 10 km^2 erkennbar, siehe Abbildung 16. Zu Beginn der Zeitreihe 2014 wurde das neue AIDA Büro auf holozänen Torfen gebaut, diese zusätzliche Auflast führte zu starker Konsolidierung der Torfe. (AIDA, 2016; BGR, 1993).

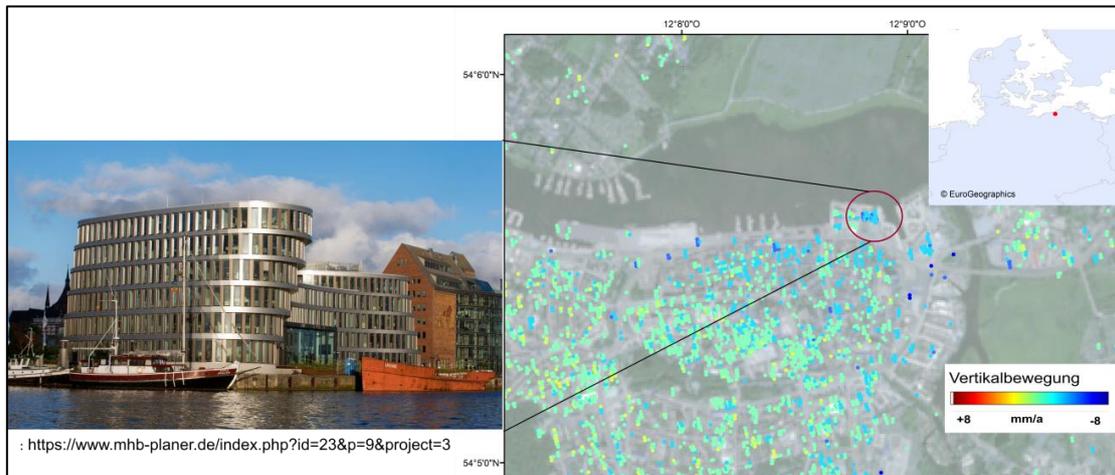


Abbildung 16: PSI Ergebnisse im Stadtgebiet Rostock mit dem AIDA Bürogebäude eingezeichnet.

Lokale vertikale Landbewegungen können meist auf Bauaktivitäten, wie Anbringung von Solarzellen auf Feldern und Dächern, starke Befahrung von Straßen und mikroklimatischen Effekten in Ballungsgebieten zurückgeführt werden.

1.6.3 Studiengebiet Cuxhaven

Der Pegel in Cuxhaven-Steubenhöft hatte in diesem Projekt eine hohe Bedeutung, weil er die längste Zeitreihe Deutschlands seit 1900 darstellt (Jenssen et. al. 2014).

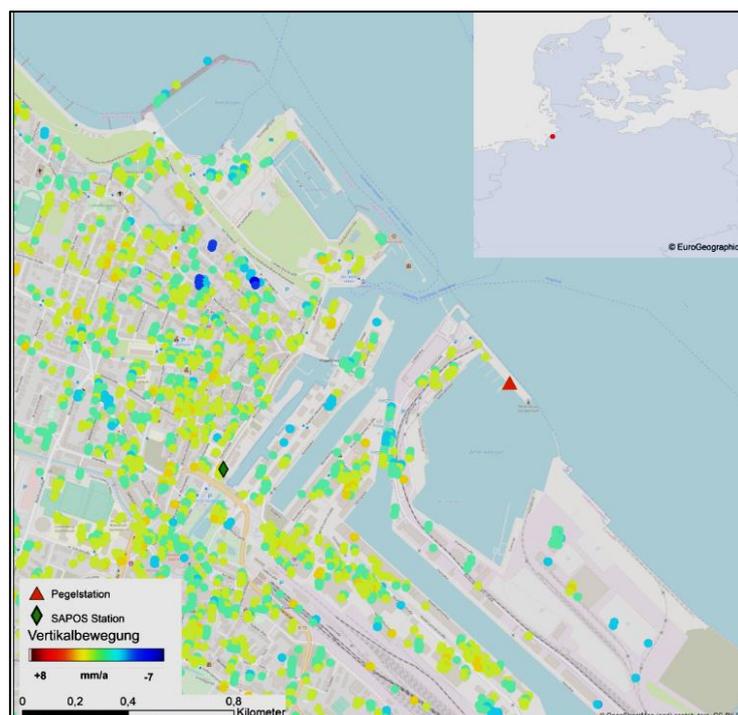


Abbildung 17: Persistent Scatterer Lösung des Patch 2 für das Pegelumfeld des Pegels Cuxhaven-Steubenhöft.

In Abbildung 17 ist die Lage der Pegelstation TGCU, die mit einem GNSS Empfänger ausgestattet ist, sowie die benachbarte SAPOS-Station 0641 dargestellt.

Für den *Pegel in Cuxhaven-Steubenhöft*, siehe Abbildung 18, erkennt man eine deutlich höhere Variabilität (Saisonalität) der Höhenkomponente des GNSS-Pegelpunktes TGCU, aber nur sehr geringe langfristige Effekte, hier sogar eine geringe Hebung.

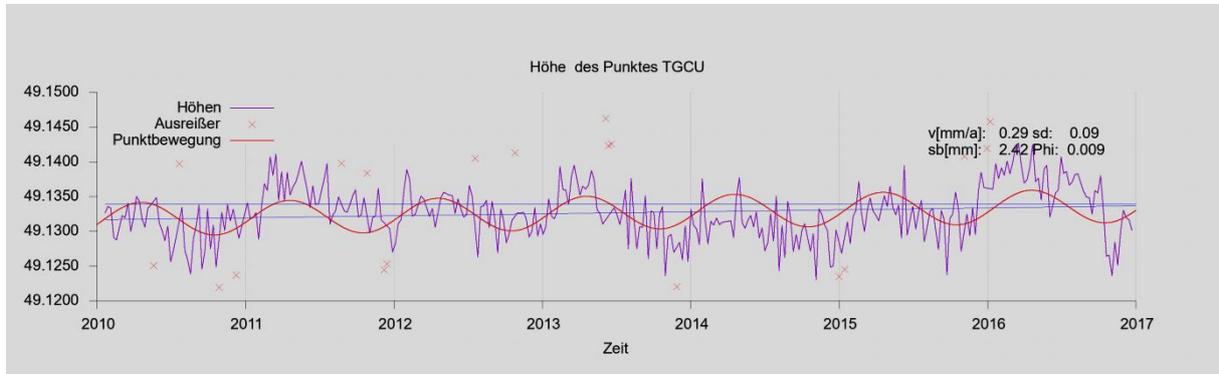


Abbildung 18: Ergebnis für die GNSS-Höhenänderungen am Pegel in Cuxhaven-Steubenhöft

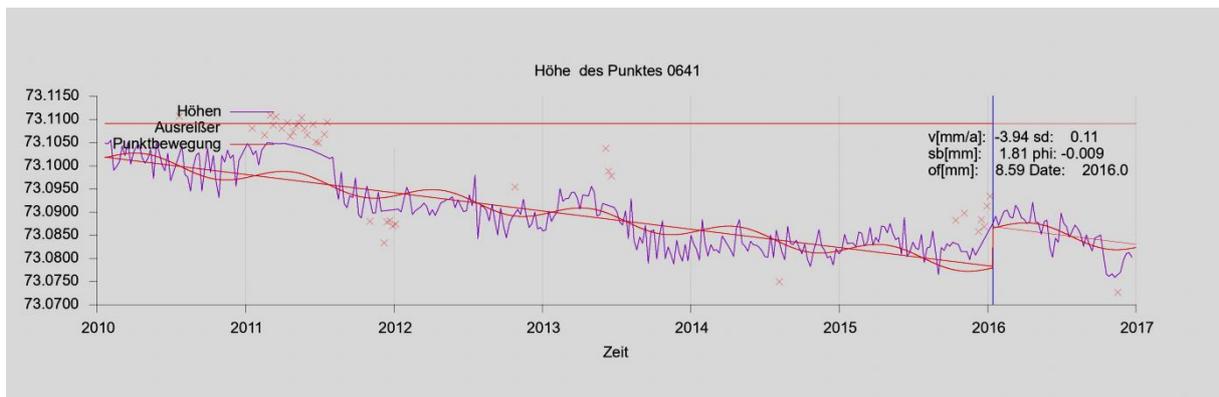


Abbildung 19: Ergebnis für die GNSS-Höhenänderungen für die SAPOS-station 0641 in Cuxhaven

Für die immer noch im Hafengebiet liegende SAPOS-Station 0641 ist gemäß Abbildung 19 ein völlig anderes Verhalten festgestellt worden. Zwar sind auch hier saisonale Effekte erkennbar, doch liegt eine deutliche Vertikalbewegung von - 3.94 mm/a vor.

Dies zeigt, wie problematisch die Annahme eines gleichmäßigen Verhaltens für Nachbar-Punkte im Küstenbereich ist, d.h. es muss immer eine Detailbetrachtung vorgenommen werden.

Hier ist der Versuch unternommen worden, die Bewegungen einer GNSS Station mit den Ergebnissen der umliegenden PS zu vergleichen: Die Abbildung 20 zeigt die gemittelte Höhenänderung des nächsten PS Punkteclusters zum Pegel Cuxhaven-Steubenhöft, d.h. der Pixelgruppe, die den geringsten räumlichen Abstand zum GNSS-Pegel TGCU hat für Patch 2 (orange), wie auch Patch 3 (rosa), sowie die Zeitreihe des GNSS Netzwerks für den Pegelpunkt (grün). Die Zeitreihe des GNSS Pegels TGCU enthält 355 Datensätze bei einer wöchentlichen Wiederholrate und 7 Jahren Beobachtungsdauer. Die mittlere Geschwindigkeit des GNSS Netzwerks beträgt -1,7 mm/a mit einer Standardabweichung von 4,4 mm/a.

Das PS Cluster für den Patch 2 befindet sich in 140 m Entfernung zum Pegel und besteht aus 2 PS. Die mittlere Geschwindigkeit ist für den Zeitraum 2014-2018 0,9 mm/a mit einer Standardabweichung von 2,2 mm/a.

Das PS Punktecluster für Patch 3 befinden sich in 200 m Entfernung zum Pegel und umfasst eine Punktgruppe von vier PS Pixeln. Die mittlere Geschwindigkeit ist für den Zeitraum 2014-2018 1,9 mm/a mit einer Standardabweichung von 2,2 mm/a.

Die Standardabweichung des GNSS Netzwerks ist mit 4,4 mm/a hoch und könnte durch ein saisonales Signal verursacht sein. Es ist erkennbar, dass die relativen vertikalen Bewegungen zwischen GNSS und PSI im Zeitraum 2015-2017 gut übereinstimmen.

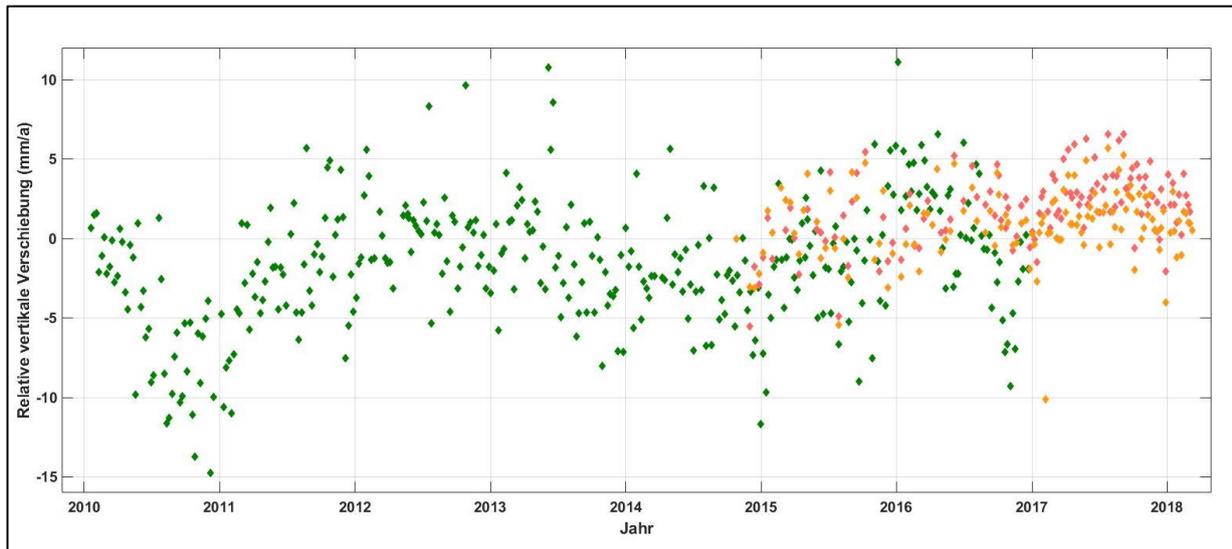


Abbildung 20: Relative vertikale Bewegungen für das GNSS Netzwerk (grün), P2_neu (orange) und P3 (rosa)

In der Literatur wird das Verhalten dieses Bereichs um den Pegel Cuxhaven-Steubenhöft nicht einheitlich gewertet: Siefert und Lassen (1985) berichten von Subsidenz an diesem Pegel und ermitteln einen Korrekturterm für die Pegelzeitreihe vor Ort. Ergebnisse des IKÜS –Projektes (Wanninger et. al. 2008) ermittelten für den Bereich Cuxhaven (ohne den Pegelpunkt selbst einbezogen zu haben) auch negative Vertikalbewegungen.

Im Gegensatz dazu ermittelten Sudau und Weiß (2001) Hebungen am Pegel. Die hier vorgestellten Ergebnisse weisen auf geringe Hebungen direkt am Pegel seit 2010 hin, ebenso aber auf Senkungen im Stadt- bzw. Hafengebiet von Cuxhaven.

1.7 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die erzielten Erkenntnisse über Vertikalbewegungen an Nord- und Ostsee zusammenfassend dargelegt. Dabei sind nicht alle Berechnungskonzepte vorgestellt, die im Zuge der Bearbeitung verfolgt wurden. So konnten keine zuverlässigen Ergebnisse für die Nutzung der Nivellementsdaten erzielt und hier einbezogen werden, da die Datenbasis für das betrachtete Zeitintervall wenig aussagekräftig war, siehe Abschnitt 1.2.3.

1.7.1 Lösung aus der Gesamtmodellierung der GNSS-Zeitreihen

Die Abbildung 21 zeigt das flächenhafte differentielle vertikale Bewegungsmodell für das Untersuchungsgebiet aus den kontinuierlichen GNSS-Beobachtungen für den Zeitraum von 2010 bis 2016. Hierbei sind sämtliche Beobachtungen für das in Abbildung 6 dargestellte umfangreiche Netz von GNSS-Permanentstationen berücksichtigt worden. Der gesamte Datensatz ist zunächst nach dem in Abschnitt 1.4 beschriebenen Auswertekonzept bearbeitet und im Hinblick auf stabile Referenzpunkte analysiert worden.

Anschließend ist eine Modellierung des Bewegungsfeldes aus den GNSS-Daten mittels Radialer Basisfunktionen (RBF) gemäß Abschnitt 1.3 erfolgt. Da – wohl bedingt durch die doch recht kurze Beobachtungszeit – keine Indikatoren für ein nichtlineares Bewegungsfeld feststellbar waren, wurde nur mit POS-RBF bearbeitet, d.h. es wurde von linearen Vertikalbewegungen ausgegangen.

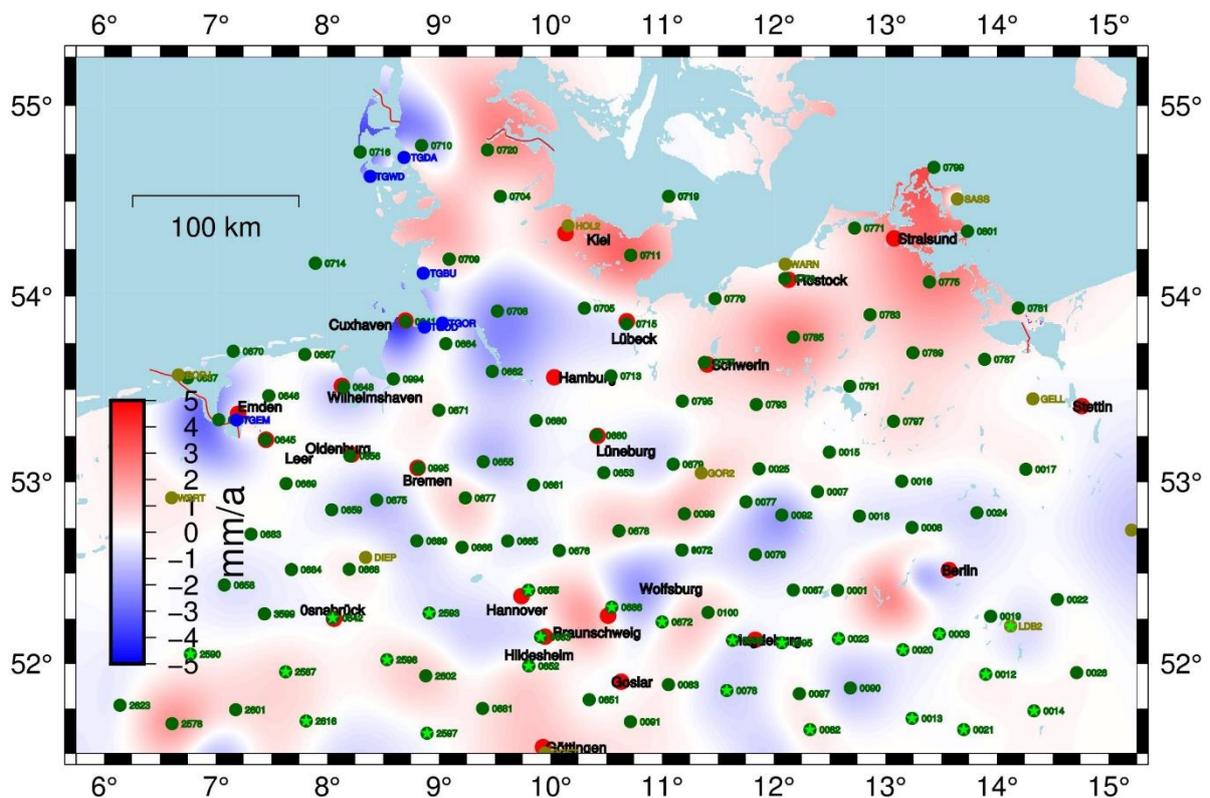


Abbildung 21: Gesamtbewegungsmodell vertikaler Landbewegungen aus GNSS-Beobachtungen 2010 - 2016 für die deutsche Nord- und Ostseeküste.

Hier zeigt sich, dass die **Hebungen entlang der gesamten Ostsee-Küste** eine recht hohe Übereinstimmung mit den Ansätzen des „Global Isostatic Adjustment (GIA)“ zeigen. Der Bereich der Hebung passt recht gut zu allgemein anerkannten Annahmen des GIA, siehe auch Abbildung 15. Die Größenordnung ist allerdings nicht gleichmäßig, was auf eher regionale Effekte und die sicherlich für solch globale Modelle kurze Beobachtungszeit zurückzuführen sein kann.

Die Ergebnisse im **Bereich Emden** stehen in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Niederländischen Bodenbewegungsdienstes NCG (2019). Vertikale Veränderungen im Gebiet von Groningen haben eine ähnliche flächenhafte Ausdehnungen, aber große Absolutbeträge, wobei uns der Untersuchungszeitraum des NCG nicht klar ist. Aber auch hier sind - siehe Abschnitt 1.7.2 – lokale Abweichungen, sogar Hebungen, festgestellt worden.

Der Bereich Cuxhaven ist ja bereits im Abschnitt 1.6.3 behandelt worden. Auf die Abschnitte an der übrigen Nordseeküste wird im Abschnitt 1.7.2 eingegangen.

Die Höhenänderungen im Hinterland weisen ebenso eine heterogene Struktur auf. Auf eine Einzelanalyse dieser Ergebnisse ist bisher verzichtet worden.

1.7.2 Ergebnisse einer flächenhaften PSI-Modellierung und Vergleich mit GNSS

Die präsentierten Ergebnisse der multi-temporalen PSI Auswertung in Abbildung 13 mit Ergebnissen der Sentinel-1 A/B Satelliten von teilweise Oktober 2014 bis März 2019 zeigen recht homogene Ergebnisse an der deutschen Küste mit erklärbar größeren Bewegungen im Bereich des Dollart.

Ausgehend von diesen Ergebnissen erfolgte nun eine Modellierung des Bewegungsverhaltens mittel RBFs gemäß Abschnitt 1.3. Da schon bei der PSI-Auswertung eine lineare Geschwindigkeit angenommen wurde, wird auch jetzt nur mit den sogenannten POS-RBF gearbeitet. Eine direkte Anwendung ist bei Tausenden von PSI Punkten (insgesamt ca. 800 000 Punkte) und aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung nicht möglich. Mehrere PSI Punkte wurden in einer POS-RBF zusammengefasst, deren Position durch ein abstands-basiertes Clustering bestimmt wurde, wobei jedes Cluster eine Mindestanzahl von Punkten umfassen musste. Neben der Position der RBF wurde auch die Standardabweichung bestimmt, die aus dem Abstand zu den Nachbar RBF abgeleitet wird.

Im Modell verbleiben jedoch die Geschwindigkeiten aller PSI Punkte als Beobachtungen, was den Vorteil hat, dass an den verbliebenen Verbesserungen eine Aussage über die Güte der Modellierung gemacht werden kann. Es verbleiben noch mehrere tausend POS-RBF und hunderttausende Beobachtungen im Modell, die Rechenzeit war entsprechend lang.

Daher wurde das gesamte Gebiet in Teilbereiche unterteilt und das Geschwindigkeitsfeld nur aus den RADAR Daten berechnet; auch die graphischen Darstellungen entsprechen diesen Teilbereichen.

In den Abbildungen 22 und 23, die hier exemplarisch aufgenommen wurden, sind Höhenänderungen gemäß diesem Modell für die Bereiche Wilhelmshaven/Bremerhaven/Cuxhaven sowie Rostock/Stralsund/Rügen dargestellt worden. Zusätzlich sind für die in das jeweilige Gebiet fallenden GNSS-Permanentstationen die ermittelten Geschwindigkeiten für Vertikalbewegungen numerisch eingetragen worden.

Im **Anhang** sind Abbildungen für diese flächenhafte Approximation der Radar-Ergebnisse für sämtliche Abschnitte an der Nord- und Ostseeküste dargestellt worden.

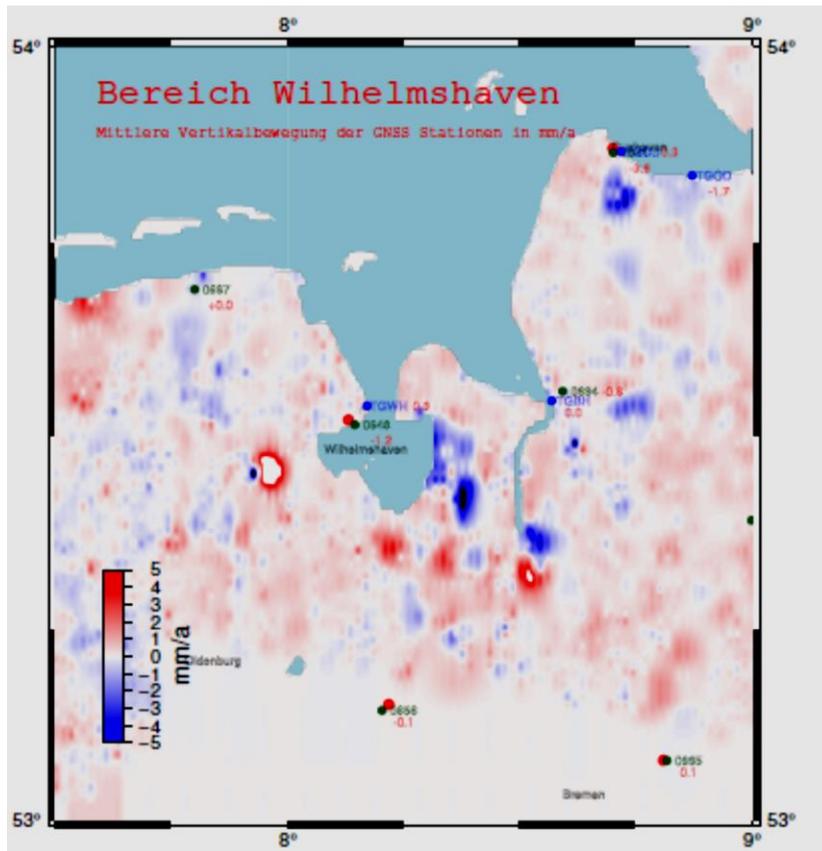


Abbildung 22: Vertikale Landbewegungen aus RADAR-Daten 2015 – 2018 für den Bereich Wilhelmshaven/Bremerhaven/Cuxhaven

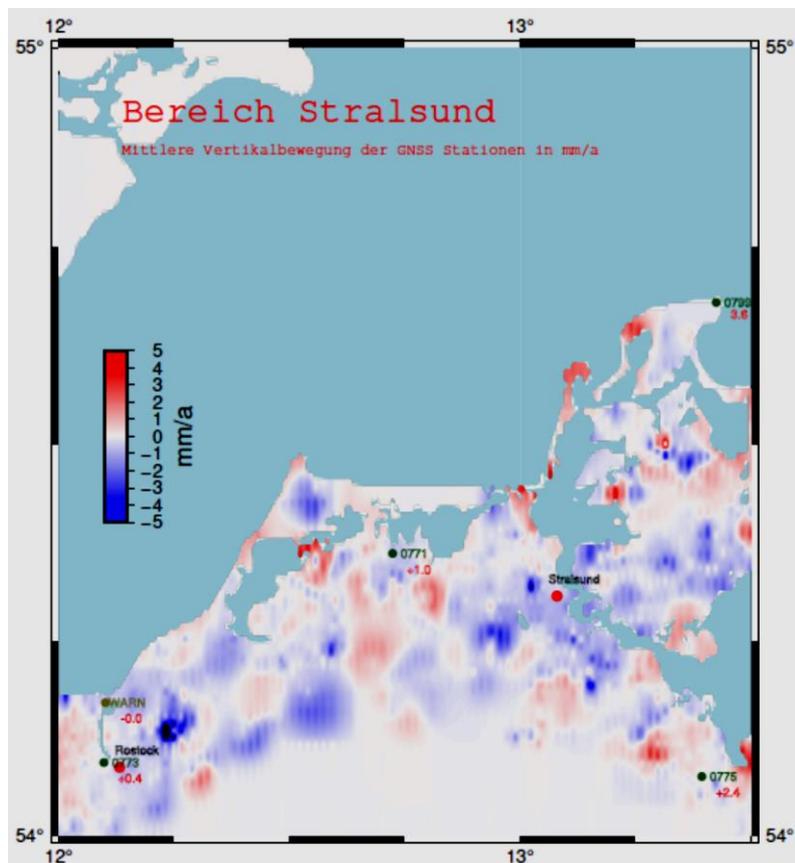


Abbildung 23: Vertikale Landbewegungen aus Radar-Daten 2015 - 2018 für den Bereich Rostock/Stralsund/Rügen

Die ermittelten vertikalen Bewegungen sind insgesamt als eher gering einzustufen; es fällt allerdings auf, dass es recht viele lokale bis regionale Zonen mit einem individuellen Bewegungsverhalten gibt. Als Beispiele für solche lokalen Effekte können größere Baumaßnahmen, der Betrieb von unterirdischen Kavernen, großflächige GW-Entnahmen oder auch die Installation von Solarzellen auf mehreren Dächern in einer Stadt genannt werden. Hier soll gar nicht versucht werden, diese Bewegungen zu erklären, das muss im interdisziplinären Kontext mit lokalen Fachleuten erfolgen.

Der Vergleich mit den Ergebnissen der GNSS-Stationen zeigt, dass es bei benachbarten GNSS-Stationen zu abweichenden (Cuxhaven, Wilhelmshaven) und gut übereinstimmenden (Bremerhaven) Ergebnissen kommen kann. Eine pauschale Bewertung der GNSS-Ergebnisse ist somit nicht möglich; damit ist auch eine strenge algorithmische Verknüpfung mit den Radar-Daten nicht gerechtfertigt.

Unseres Erachtens nach ist mit diesen Ergebnissen eine Informationsbasis gegeben, die aufzeigt, bis zu welchem Detaillierungsgrad schon heute Aussagen über Vertikalbewegungen mittels Radar-Interferometrie gewonnen werden können, auch wenn betont werden muss, dass nur eine kurze Zeitdauer an Beobachtungen vorlag und daher die oft recht kleinen Vertikalbewegungen noch eine größere Unsicherheit aufweisen.

Das Deutsche Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR, 2018) präsentiert eine Bodenbewegungskarte aus ERS Daten von 1991 bis 1999. Die Gebiete mit Setzungen in Emden stimmen sehr genau überein. Auch die stabilen Bereiche an der Küste passen gut zu unseren Ergebnissen. Eine weitergehende Validierung dieser InSAR-Ergebnisse wäre durch Vergleich mit den Ergebnissen des aktuellen Bodenbewegungsdienstes Deutschland (Lege et al. 2019) sehr nützlich gewesen, für die die Zeitbasis besser übereinstimmt. Dieser Bodenbewegungsdienst für Deutschland stellt allerdings den Bereich von + 4 mm/a bis - 4 mm/a mit nur einer Farbe dar, macht also für weitere Bereiche der Nord- und Ostseeküste keine konkreten Aussagen.

Nach diesen Betrachtungen sollten die mit einem maximal vierjährigen Intervall ermittelten Bewegungen entsprechend vorsichtig bewertet werden. Ideal wäre eine Verlängerung des Beobachtungsintervalls, d.h. Fortsetzung dieser Untersuchungen, in die auch eine Zuordnung zu möglichen anthropogenen Aktivitäten einzubeziehen wäre.

1.7.3 Austausch der Ergebnisse mit der Universität Siegen

An die Universität Siegen sind die für eine intern und mit der PbG abgesprochene Liste von Pegeln aus den Radardaten die Geschwindigkeiten der Pegel geschätzt d. h. aus den Umliegenden PS-Punkten gemittelt. Diese Daten sind mit Zusatzinformationen von der Arbeitsgruppe Prof. Jensen in den Modellrechnungen genutzt worden und es zeigte sich, dass diese PSI Lösungen recht gut zu den meeresseitigen Modellen passen, siehe Abschlussbericht der Siegener Gruppe zu BMBF 03KIS116.

1.8 Zusammenfassung:

In diesem Forschungsvorhaben sind neuartige Ansätze für die Bestimmung von landseitigen Vertikalbewegungen im Bereich der deutschen Nord- und Ostsee-Küste entwickelt und eingesetzt worden. Die Ergebnisse beruhen auf unterschiedlichen Sensordaten, nämlich GNSS-Zeitreihen, multitemporale Radarszenen und wiederholte Nivellementsnetze, die nach völlig anderen physikalischen Prinzipien arbeiten und von daher als komplementär anzusehen sind.

Wesentliche methodische und auswertetechnische Arbeiten befassten sich mit:

- Beschaffung und Aufbereitung der GNSS-Datensätze von 2010 – 2016, für die die Rohdaten im Umfang von ca. 10 TB in sehr unterschiedlichen Formaten abgespeichert worden waren.
- Auswertung und mathematisch strenge Analyse der GNSS-Datensätze zur Ableitung von Zeitreihen für jede der ca. 160 Station für den Beobachtungszeitraum. Hierfür sind durch innovative Konzepte die bestehenden Ansätze zur mathematisch-statistischen Deformationsanalyse erweitert worden, insbesondere um in die Gruppe von Referenzpunkten auch Stationen mit bekanntem Bewegungsverhalten mit aufnehmen zu können.
- Beschaffung und Aufbereitung von Radarszenen für die Ableitung von flächenhaften Vertikalbewegungen. Nach sorgfältiger Analyse der Archiv-Bestände sind allein die Daten der Sentinel-Satelliten als geeignet für die hier vorzunehmenden Untersuchungen eingestuft worden.
- Auswertung der Sentinel-Daten zwischen Okt. 2014 und Febr. 2019 nach den weiterentwickelten Auswertansätzen „Persistent Scatterer Interferometrie (PSI)“ und „Small Baseline Interferometrie (SBAS)“, wobei sich die Methode PSI für unsere Aufgabenstellung und Datenlage als überlegen herausgestellt hat.
- Die Auswertung erfolgte aus Gründen der Rechnerkapazität durch Aufspaltung des Gebietes in 8 Bereiche. Zur Kontrolle der Qualität dieser getrennten Auswertungen, die sich z.T. auch auf Daten verschiedener Sentinel Aufnahme-Streifen bezogen, wurden die Differenzen in den Überlappungsbereichen analysiert mit dem Ergebnis, dass keine Restsystematiken erkennbar waren.
- Beschaffung der noch verfügbaren Beobachtungsdaten für die Nivellementsnetze DHHN1992 und DHHN 2016 beim BKG. Hieraus sind sogenannte doppelte Differenzen abgeleitet worden, die es erlauben sollten, zwischen den Nivellementspunkten die Veränderungen in den Höhen zwischen beiden Epochen zu bestimmen und daraus dann Vertikalgeschwindigkeiten für den jeweiligen Zeitraum abzuleiten. Aufgrund der Datenlage konnte kein zusammenhängendes Netz mit solchen Relativgeschwindigkeiten abgeleitet werden; Ursache waren u.a. die sehr heterogenen Beobachtungszeiten im DHHN1992, die von ca. 1975 bis 1986 reichten und die daraus resultierende Problematik, die anzuleitenden doppelten Differenzen bestimmten Zeitunterschieden zuordnen zu können.
- Methodisch wurden die Ansätze zur Modellierung eines Geschwindigkeitsfeldes aus dem Projekt „IKÜS“ erweitert. Zum einen auf die Einbeziehung von Radar-Daten, was eine Clusterung der PS erforderte, und zum anderen auf die Hinzunahme von zeitgezogenen RBF, um so zeitliche Änderungen in den Vertikalgeschwindigkeiten mit approximieren zu können. Diese Ansätze sind konzeptionell entwickelt, softwaremäßig umgesetzt und mit simulierten Daten erprobt worden. Aufgrund der doch geringen Zeitskala für die realen Daten ist die endgültige Modellierung der Geschwindigkeitsfelder dann doch mit einem linearen Flächenansatz vorgenommen worden.

Als Ergebnis können zwei Modelle vorgestellt werden:

1. Bewegungsmodell allein aus den GNSS-Zeitreihen. Hier zeigen sich großräumige Trends:
 - Im Bereich der Ostsee stimmen die Höhenänderungen gut mit den globalen Modellen des GIA übereinstimmen.
 - Im Bereich des Dollart wird ein Absinkverhalten erkannt, das wohl auf das Abklingen der Bewegungen aus den Bergbauaktivitäten im Groninger Gasfeld hinweist und gut mit den Ergebnissen des Niederländischen Bodenbewegungsdienstes übereinstimmt.
2. Eine flächenhafte Approximation der Ergebnisse der Radar-Interferometrie, die oft bis genau an die Küstenlinie heranreicht, ergibt ein eher heterogenes Bild von Bewegungen, das auf eine Vielzahl von regionalen und lokalen Einflüssen auf die Höhenänderungen in den Küstenzonen hinweist. darauf hindeutet. Die absolute Größenordnung der Vertikalbewegungen liegt oft nur im Bereich von wenigen mm/a, so dass diese Ergebnisse mit Vorsicht zu werten sind, da die Datenbasis relativ kurz ist und mögliche Einflussfaktoren, die oft anthropogen sind, nicht mit berücksichtigt werden konnten.

Insgesamt konnten erste flächenhafte Aussagen über die aktuellen absoluten Vertikalbewegungen im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste bestimmt werden. Es wäre wünschenswert, wenn diese Auswertungen und Analysen fortgesetzt werden könnten, um die Zeitbasis zu erweitern und so das Unsicherheitsbudget zu verringern.

Empfehlung:

Für das zukünftige Höhenmonitoring der Pegelstationen sollten auch bei Bestückung mit GNSS-Stationen die Bewegungen im direkten Pegelumfeld durch regelmäßige Messungen, z.B. Radar-Messungen, gestützt werden, damit großräumige Effekte, wie die Auswirkung des Glacial Isostatic Adjustment (GIA) von lokalen Effekten getrennt werden können.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Dem Zuwendungsempfänger standen für die Durchführung der Arbeiten die in nachfolgender Tabelle aufgeführten und bewilligten Mittel zur Verfügung.

Tabelle 2: Überblick über die bewilligten Mittel (ohne Projektpauschale)

Kostenart	0812	0822	0843	0846	0850	
Zweck	Personal- ausgaben	Beschäftigungs- engelte	Allgemeine Verwaltungs- ausgaben	Dienstreisen	Gegenstände über 410€	Gesamt (ohne Projekt- pauschale)
Bewillgt	189.556€	14.832€	1.100€	7.744€	1.500€	214.732€

Die bewilligten Mittel für Dienstreisen wurden für nachfolgend aufgeführte in- und ausländische Dienstreisen im Zusammenhang mit diesem Projekt verwendet, tlw. wurden Dienstreisen von Mitarbeitern, die nicht aus dem Projekt finanziert wurden aus Landesmitteln finanziert.

Tabelle 3: Durch Projekt- und tlw. Landesmittel finanzierte Dienstreisen der Projektbeteiligten

Datum	Anlass	Teilnehmer (TU Braunschweig)
11/2016	KFKI-Seminar Bremerhaven	W. Niemeier
08./09.12.2016	1.Projektgruppensitzung in Siegen	W.Niemeier, B. Riedel, D. Tengen, C. Schottmüller
06/2017	1.Sitzung der Projektbe-gleitenden Gruppe in Hamburg	W. Niemeier, B. Riedel, A. Riedel, D. Tengen, M. Gerke
10/2017	AK4-Sitzung Darmstadt	B. Riedel
11/2017	KFKI-Seminar Bremerhaven	W. Niemeier, A. Riedel
01/2018	2.Sitzung der Projektbe-gleitenden Gruppe in Bremen	W. Niemeier, B. Riedel, A. Riedel, D. Tengen, M. Gerke
03/2018	DGPF-Tagung München	A. Riedel
14./15.06.2018	2.Projektgruppensitzung in Braunschweig	B. Riedel, A. Riedel, D. Tengen
09/2018	3.Sitzung der Projektbegleitenden Gruppe in Bremen	W. Niemeier, B. Riedel, A. Riedel, D. Tengen, M. Gerke
10/2018	AK Sitzung Geomesstechnik	W. Niemeier
03/2019	4.Sitzung der Projektbegleitenden Gruppe in Bremen	W. Niemeier, B. Riedel, A. Riedel, D. Tengen, M. Gerke
06/2019	ESA Living Planet 2019, Mailand	A. Riedel

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Betrachtet man die Publikation Wanninger et al. (2009) und die Dissertation von Tengen (2010), so erkennt man, dass die bisherigen Arbeiten zu vertikalen Landbewegungen an der deutschen Küste sich nur auf die Nordseeküste bezogen und die Modellierungsarbeiten den Schwerpunkt auf dem Bereich Niedersachsen mit dem dazugehörigen Küstenabschnitt lagen.

Daher waren die im Projekt geleisteten GNSS- Auswertearbeiten für den gesamten Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste, sowie des Hinterlandes bis zur den Mittelgebirgen mit den Anschluß an das europäische GNSS-Netz notwendig. Das gleiche gilt für die Auswertearbeiten im Bereich der Radarfernerkundung, da dieses direkte Beobachtungsverfahren das einzige Verfahren ist, das großräumig flächenhafte differentielle Ergebnisse der Erdoberflächenveränderung liefern kann.

Da die Kombination von inhomogenen Beobachtungsmaterial (GNSS, InSAR, Nivellement) und Modellierung von differentiellen vertikalen flächenhaften Landbewegungen kein Standardfall der geodätischen Auswertemethodik ist, mussten hier viele algorithmische Entwicklungen und Anpassungen an den vorhandene IKÜS-Kernel aus 2010 durchgeführt und erprobt werden.

Alle diese Arbeiten waren zwingend notwendig um die Projektziel zu erreichen und wurden tlw. auch aus Institutsmitteln (Personal und Finanzen) unterstützt.

4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im hier dargestellten Teilprojekt MSL_absolut-VFLdiff wurden in der Datenprozessierung großer Radardatenmengen bzw. GNSS-Netze regionaler Ausdehnung Prozessketten entwickelt und optimiert, die für zukünftige Forschungsprojekte einen deutlichen Effizienzgewinn darstellen.

Aus den weiterentwickelten flächenhaften Modellierungsansätzen lassen sich in Zukunft vertikale Landbewegungen für großräumigen Gebiete, auch mit der Berücksichtigung von lokalen Effekten, aus heterogenen Bewegungsdaten inkl. der Berücksichtigung von Nichtlinearitäten im Bewegungsverhalten ableiten.

5. Fortschritt bei anderen Stellen

Zu dem untersuchten Thema wurden im Rahmen der Bearbeitung sowie des wissenschaftlichen Austausches mit nationalen und internationalen Kollegen sowohl im Bereich Ingenieurgeodäsie und Fernerkundung, wie auch in den Geowissenschaften allgemein aktuelle Veröffentlichungen verfolgt, Konferenzen besucht sowie weitere Informationsrecherchen durchgeführt.

Es sind keine Hinweise bekannt, die einzelne Bearbeitungsschritte und Ziele des Forschungsprojektes obsolet machen.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die praktischen Arbeiten, sowie Teilergebnisse des Forschungsprojektes gingen auch in die Lehre des Institutes in den Fächern Monitoring und Fernerkundung ein.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die nachstehenden Studien- bzw. Abschlussarbeiten von Masterstudierenden erfolgreich abgeschlossen:

J.-N. Kracke: Entwicklung einer Kombinationslösung für Vertikalbewegungen der Erdoberfläche aus radarinterferometrischen Beobachtungen im auf- und absteigenden Bahnbogen (2018).

N. Richter: PS-Auswertung im Raum Cuxhaven unter Berücksichtigung der räumlichen Filtergröße in Sarscape (2018).

A. Kratzke: Flächenhafte Anpassung zweier Sentinel-1 PSI-Lösungen (2018).

A. Kratzke: Untersuchung von kurzen PS- und GNSS-Zeitreihen an der deutschen Nordseeküste auf systematische Effekte (2019).

Publikationen auf Tagungen und in Zeitschriften:

Riedel, B.; Riedel, A.; Tengen, D.; M. Gerke und W. Niemeier (2020): Ableitung vertikaler Landbewegungen entlang der deutschen Küste aus geodätischen Beobachtungen. *Die Küste 2020*, (in prep.).

Riedel, A.; Riedel, B.; Tengen, D. and M. Gerke (2019): Investigations on vertical land movements along the North S and Baltic Sea coast in Germany with PS Interferometry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, 1945–1949, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1945-2019>, 2019

Tengen, D.; Riedel, A.; Riedel, B.; Gerke, M. und W. Niemeier (2019): Ableitung vertikaler Landbewegungen an der deutschen Nord- und Ostseeküste aus GNSS- und PS-Auswertungen. *Tagung: GeoMonitoring 2019*. Hannover: Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover

Riedel, B.; Kracke, J.-N.; Tengen, D. ; Riedel, A.; M. Gerke, M. und W. Niemeier (2018): Bestimmung vertikaler Landbewegungen an der deutschen Nordseeküste. *Tagung: GeoMonitoring 2018*. 167-180.

Neben den hier gelisteten Journal-Artikel bzw. Konferenzbeiträgen wurden die Ergebnisse auch auf Tagungen in Deutschland, Niederlanden und Italien als Vorträge bzw. Poster präsentiert.

Braunschweig, am 23. März 2020



(Prof. a.D. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Niemeier)

Literaturverzeichnis

- Aida,Media.aida.de/fileadmin/user_upload/v4/Unternehmen/Presse/PM_2016_Q2/AIDA_Kussmund_gr%C3%BC%C3%9Ft_Rostock_vom_Dach_des_AIDA_Home.pdf, 2016. 01.04.2019:
- Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R. und Sansosti, E.: A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry. IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens, Vol. 40, No. 11, 2002.
- Martin D. Buhmann: Radial Basis Functions: Theory and Implementations. Cambridge University Press, 2003
- Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Geologische Karte Deutschlands 1:1 000 000 (GK1000), BGR, Hannover, 1993.
- Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Map of Mining and Storage Operations of the Federal Republic of Germany 1:2 000 000 (BergSP). BGR, Hannover, 2018.
- Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR), 30.03.2019:
dlr.de/eoc/Portaldata/60/Resources/images/3_imf_sv/DefoDE_BIG_2048.jpg, 2018.
- Fenoglio-Marc L., T. Schöne , J. Illigner , M. Becker , P. Manurung, Khafid, (2012): Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region, *Marine Geodesy*, 35, 137-150.
- Ferretti, A.; Prati, C.; und Rocca, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry. In: *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions, Vol. 39 (1), 8 – 2, 2001.
- Frischbutter, A. und Schwab, G.: Recent vertical movements (mm/a). *Supplements to Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, 8, 1, 2001.
- Jensen, J.; Dangendorff, S.; Wahl, T. und Steffen, H.: Meeresspiegeländerungen in der Nordsee: Vergangene Entwicklungen und zukünftige Herausforderungen mit einem Fokus auf die Deutsche Bucht. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 58 (4), 304–323; DOI: 10.5675/HyWa_2014,6_1,2014.
- Kalia, A. C.; Frei, M.; und Lege, T.: A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. In: *Remote Sensing of Environment*, Vol 202, 234-249, 2017.
- Lege, T.; Kalia, A. C.; und Frei, M.: Aspekte des Bodenbewegungsdienstes Deutschlands, Tagungsband *GeoMonitoring 2019*, 37-47, <https://doi.org/10.15488/4511>, Hannover, 2019.
- Liu, D., Sowter, A., Liu, Z., Niemeier, W., Riedel, B. und Bian, Z. (2013): Mapping land deformation caused by mining in a mountainous area and extracting mining subsidence parameters with high resolution satellite-based SAR. *Proceedings of 2nd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, Nottingham, 2013.
- Mark P., Niemeier W., Schindler S., Blome A., Heek P., Krivenko A. und E. Ziem (2012): „Radarinterferometrie zum Setzungsmonitoring beim Tunnelbau - Anwendung am Beispiel der Wehrhahn-Linie in Düsseldorf“. In: *Bautechnik*, vol.89, Heft 11, Ernst&Sohn, Berlin.

- Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-Informatica (NCG), 26.03.2019: bodemdalingskaart.nl, Copyright © NCG, 2019.
- Niehüser, S.; Jensen, J.; Wahl, T.; Dangendorf, S.; und Hofstede, J.: Zum Einfluss möglicher Setzungserscheinungen am Leuchtturm Cuxhaven auf die langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen am Pegel Cuxhaven Steubenhöft. In: Die Küste, Vol 84, 119-145, <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105215>, 2016.
- Niemeier W., B. Riedel, G. Siles und F. Pratesi (2016): Monitoring of Deformations of Infrastructure Objects by Radar-Interferometry - Prerequisites, Potential and Limitations. Proceeding of JISDM 2016, Vienna.
- Peltier, W. R.: Global Glacial Isostasy and the Surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE. Annual Review of Earth and Planetary Sciences Vol. 32, S. 111-149, 2004.
- Riedel, A.; Riedel, B.; Tengen, D.; und Gerke, M.: Investigations on vertical land movements along the North Sea and Baltic Sea coast in Germany with PS Interferometry. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., Vol. XLII-2/W13, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1945-2019>, 2019.
- Riedel, B.; Kracke J.-N.; Tengen D.; Riedel A.; Gerke M. und Niemeier W.: Bestimmung vertikaler Landbewegungen an der deutschen Nordseeküste, Tagungsband GeoMonitoring 2018, 167-180, Clausthal-Zellerfeld, 2018.
- Siefert, W. und Lassen, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelaufzeichnungen. In: Die Küste, Vol. 42, 1-77, <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101217>, 1985.
- Siles, G.L. (2015): "Advanced InSAR methodologies to study subsidence and fracturing caused by groundwater withdrawal in Valley of Mexico". PhD-Thesis, Technische Universität Braunschweig.
- Tengen, D.: Höhenveränderungen im Bereich der niedersächsischen Nordseeküste bestimmt aus Nivellement- und GPS-Messungen. Dissertation TU Braunschweig, ISBN 3-926146-21-4, 2010.
- Tengen, D.; Riedel, A.; Riedel, B.; Gerke, M. und Niemeier, W.: Ableitung vertikaler Landbewegungen an der deutschen Nord- und Ostseeküste aus GNSS- und PS-Auswertungen, Tagungsband GeoMonitoring 2019, 121-133, <https://doi.org/10.15488/4517>, Hannover, 2019.
- Yue Wu, Hui Wang, Biaobiao Zhang and K.L. Du, "Using Radial Basis Function Networks for Function Approximation and Classification," *ISRN Applied Mathematics*, vol. 2012, Article ID 324194, 34 pages, 2012. doi:10.5402/2012/324194
- Wanninger, L.; Niemeier, W.; Jahn, C. H. und Sudau, A.: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS), Abschlussbericht KFKI Projekt 03KIS055-058, <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101641>, Dresden, 2008.

- Wanninger, L.; Rost, Ch.; Sudau, A.; Weiss, R.; Niemeier, W.; Tengen, D.; Heinert, M.; Jahn, C.-H.; Horst, S. und Schenk A.: Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken. Die Küste, Heft 76, 121–180, 2009.
- Weiss, R. und Sudau, A.: Satellitengestützte Überwachung der Pegelnullpunktehöhe in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, Vol 78, 1-32, <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101658>, 2011.
- Wöppelmann, G., Marcos, M. (2016): Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability, Rev. Geophys., 54.

Anhang

Vertikale flächenhafte Landbewegungen aus SENTINEL Radar-Daten der Jahre 2015 – 2018
Ergänzt durch die Vertikalgeschwindigkeiten für GNSS-Stationen im jeweiligen Bereich

