

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Online First

Niemeier, Wolfgang; Riedel, Anika; Tengen, Dieter; Riedel, Björn; Gerke, Markus

Bestimmung flächenhafter vertikaler Landbewegungen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste

Die Küste, 92 (Online First)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) (Hg.)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108351>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Niemeier, Wolfgang; Riedel, Anika; Tengen, Dieter; Riedel, Björn; Gerke, Markus (2022): Bestimmung flächenhafter vertikaler Landbewegungen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste. In: Die Küste, 92 (Online First). <https://doi.org/10.18171/1.091102>.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Bestimmung flächenhafter vertikaler Landbewegungen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste

Wolfgang Niemeier¹, Anika Riedel¹, Dieter Tengen², Björn Riedel¹ und Markus Gerke¹

¹ Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Technische Universität Braunschweig, Bienroder Weg 81, 38106 Braunschweig

² Geotec Geodätische Technologien GmbH, Heinrich-Heine-Weg 69, 30880 Laatzen

Zusammenfassung

Das übergeordnete Ziel des BMBF-geförderten Projektes: „Untersuchungen zum absoluten Meeresspiegelanstieg an der deutschen Nord- und Ostseeküste (MSL Absolut)“ ist es, den aktuellen Meeresspiegelanstieg aus Pegelbeobachtungen, Re-Analysen von Ozeandaten und den Vertikalbewegungen der Erdoberfläche für die norddeutsche Küste in einem absoluten Bezugssystem zu ermitteln.

Das Teilprojekt der Universität Siegen beschäftigt sich mit dem räumlich-zeitlichen Verhalten des Meeresspiegels (MSL) und Rekonstruktionen aus Ozeandaten und Pegelinformationen (Dangendorf et al. 2022).

Das hier vorgestellte Teilprojekt der Technischen Universität Braunschweig befasst sich mit der Bestimmung der vertikalen Landbewegungen im Küstenbereich, da reine Pegelzeitreihen relative Messungen darstellen, die um die zugehörigen Vertikalbewegungen zu korrigieren sind, um zu absoluten Aussagen zu kommen.

Zur Bestimmung der Vertikalbewegungen sind hier GNSS-Zeitserien und multitemporale Radarszenen ausgewertet und analysiert worden. Diese „Sensoren“ arbeiten nach unterschiedlichen physikalischen Prinzipien und können daher als komplementär angesehen werden.

Insgesamt wurden GNSS-Datensätze von 180 Permanent-Stationen im Zeitraum von 2010 bis 2016 ausgewertet. Durch ein im Zuge dieses Vorhabens entwickeltes Verfahren zur Deformationsanalyse von Zeitserien wurde erreicht, dass sich die GNSS-Ergebnisse auf Stabilzonen in den Mittelgebirgen beziehen. Daneben wurden Sentinel-1-Radardaten von 2014 bis 2019 mittels der Persistent Scatterer (PS) Methode für die Küstenzonen eigenständig prozessiert.

Methodisch wurden die Ansätze zur Modellierung eines Geschwindigkeitsfeldes aus dem Projekt „IKÜS“ (Wanninger et al. 2009) erweitert, um neben GNSS-Zeitserien und epochalen Nivellementsdaten auch die Ergebnisse von Radar-Daten einbeziehen zu können, was unter anderem eine Clusterung der PS-Daten erforderte.

Zur Flächenapproximation sind in dem Projekt „IKÜS“ positionsbezogene radiale Basisfunktionen verwendet worden. Dieser Ansatz ist hier durch die Hinzunahme von zeitbezogenen radialen Basisfunktionen (RBF) konzeptionell und softwaremäßig erweitert worden, um auch zeitliche Änderungen in den Vertikalgeschwindigkeiten mit modellieren zu können. Bedingt durch die kurzen Beobachtungszeiträume ließen sich nichtlineare Bewegungen allerdings nicht nachweisen.

Wie im Text ausführlich begründet wird, sind Nivellementsdaten in die hier realisierten Auswertansätze nicht mit einbezogen worden.

Insgesamt konnten für den Untersuchungszeitraum flächenhafte Aussagen über die aktuellen absoluten Vertikalbewegungen im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste abgeleitet werden.

Schlagwörter

Vertikale Landbewegungen, Meeresspiegelanstieg, GNSS-Zeitreihen, PS Interferometrie, flächenhafte Approximation

Summary

The overall objective of the BMBF-funded project: “Determinations on absolute sea-level rise on the German North Sea and Baltic Sea coasts (MSL Absolute)” is to determine the current sea-level rise for the German coastal areas from levelling observations, reanalyses of ocean data and vertical movements of the earth's surface in an absolute reference frame.

The subproject of the University of Siegen dealt with the spatio-temporal behaviour of sea level (MSL) and reconstructions from ocean data and level information.

The subproject of the Technical University of Braunschweig presented here is concerned with the determination of vertical land movements in coastal areas, since tidal gauge time series represent relative measurements which have to be corrected for the associated vertical land movements (Dangendorf et al. 2022).

For the determination of the vertical movements in this project GNSS time series and multitemporal satellite-based radar scenes data are processed and analyzed. These “sensors” follow completely different physical principles and can therefore be regarded as being complementary.

In total, GNSS data sets from 180 permanent stations between 2010 and 2016 were evaluated. By an innovative approach for deformation analysis for time series, developed within this project, it was possible to refer the GNSS data sets to stable zones in the low mountain ranges. For the coastal zones Sentinel-1 data sets from 2014 to 2019 were independently processed using the Persistent Scatterer (PS) method.

Methodologically, the approaches for modelling a velocity field from the “IKUES” project (Wanninger et al. 2009), developed for GNSS time series and repeated levelling campaigns, were extended here for inclusion of radar data, which required – among others - a clustering of the PS data sets.

For surface approximation, in IKUES position-based radial basis functions (pos-RBF) were used. This approach was extended here by time-related radial basis functions (temp-RBF), in order to be able to map temporal changes in the vertical velocities, as well. Due to the limited length of the available data sets, non-linear velocities could not be detected.

As explained within the text, levelling data were not included in the here realized processing steps and analysis.

Finally, an area-wide motion field and conclusions on the actual absolute vertical movements in the coastal areas at Northern and Baltic Sea around Germany could be derived, valid for the period of investigation.

Keywords

vertical land movements, Mean Sea Level rise, GNSS time series, PS Interferometry, surface approximation

1 Einleitung

1.1 Mittlerer Meeresspiegelanstieg und Pegelaufzeichnungen

Jensen et al. (2014) analysiert und plausibilisiert die vielfältigen Prozesse und ihre zeitlichen Komponenten, die sich auf den Meeresspiegelanstieg auswirken; einen Überblick gibt die Abbildung 1. Es wird deutlich, dass die Aufzeichnungen des Wasserspiegels an den Pegeln nur einen Relativcharakter haben, dessen Signal um den Einfluss verschiedener Prozesse korrigiert wird, um zu einer Aussage über einen absoluten Meeresspiegelanstieg zu kommen.

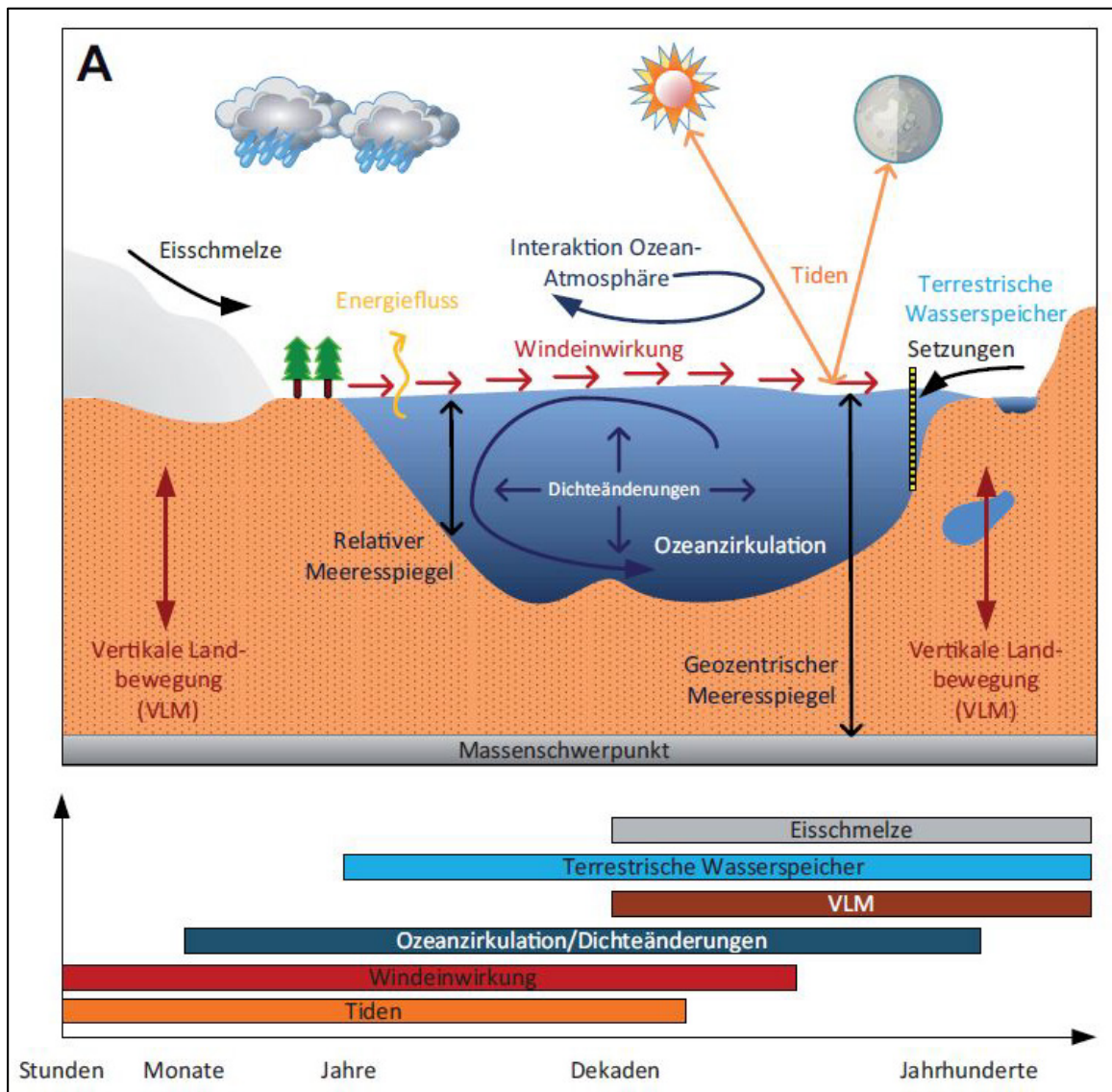


Abbildung 1: Prozesse und ihre zeitliche Dauer, die auf den Meeresspiegelanstieg wirken (Jensen et al. 2014).

Zwar beschreiben diese Wasserstandsdaten die Änderungen des mittleren Meeresspiegels (MSL), jedoch beinhalten sie auch gleichzeitig den Einfluss von Vertikalbewegungen (VLM) 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

Pegels selbst, des Pegelhauses und des Hinterlandes in strenger Form kombiniert werden, siehe die schematische Darstellung in Abbildung 2.

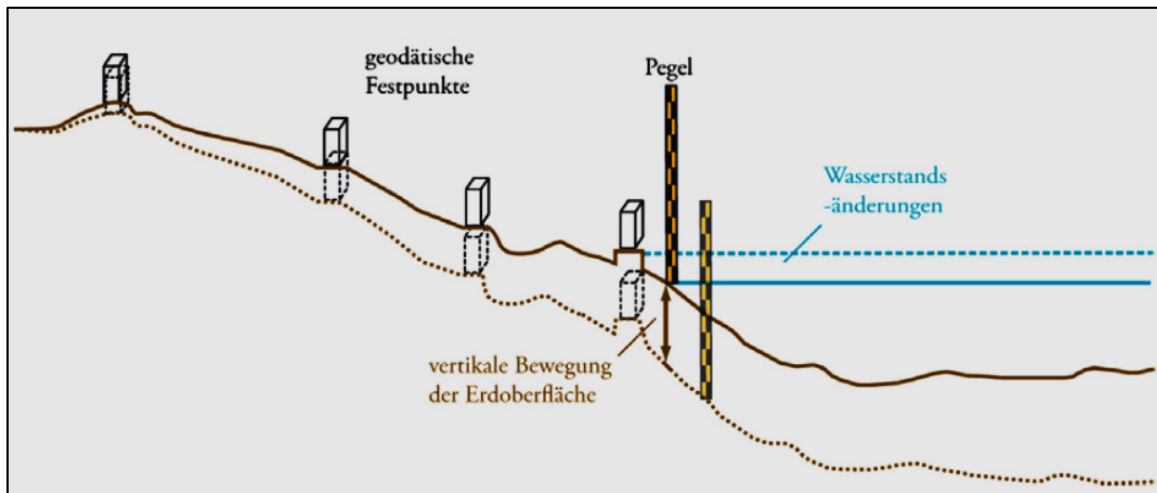


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Vertikalbewegungen, Meeresspiegeländerungen und Pegelinformationen (IKÜS-Abschlussbericht 2008, Wanninger et al. 2009).

Im durchgeführten Gesamtprojekt „MSL Absolut“ (MSLabs) sollten für die deutsche Nord- und Ostseeküste flächenhaft die vertikalen Landbewegungen über einen möglichst langen Zeitraum bestimmt und dann über räumliche und zeitliche Rekonstruktionen in Verbindung mit Modellen aus der Ozean-Reanalyse und Ergebnissen aus der Satellitenaltimetrie der absolute Anstieg des Meeresspiegels quantifiziert werden.

Auch im Hinblick auf die Detektion des anthropogenen Anteils bei dem erwarteten beschleunigten Anstieg des MSL in den nächsten Jahren/Jahrzehnten ist eigentlich für sämtliche Bereiche der Erde eine Separierung der beiden Effekte „Vertikalbewegung“ und „Meeresspiegeländerung“ zwingend erforderlich.

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 bzw. Berücksichtigen 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.

1.2 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 visko-elastischen Reaktion der Erdkruste auf die

veränderte Auflast nach dem Abschmelzen der Eispanser aus der letzten Eiszeit stehen. Gebräuchlich ist 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 Landhebungen, 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 dargestellt werden (Peltier 2004). Auch in Lidberg et al. (2007) und Vestol et al. (2019) finden sich ausführliche Darstellungen zum aktuellen Stand der Modellierung des GIA.

Daneben gehören zu den Ursachen von Landbewegungen eher lokale und regionale Effekte wie beispielsweise die großräumige Entnahme von Grundwasser oder fossilen Brennstoffen (Gas, Erdöl), die Beeinflussungen durch aktiven Bergbau und tektonische Aktivitäten 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 klimatisch bedingten Änderungen des Meeresspiegels bei weitem überschreiten. In vielen Metropolregionen treten durch Grundwasser-Entnahme erhebliche Setzungen mit Absolutbeträgen von einigen Metern auf (z. B. Siles 2015). Für die an der Küste liegenden Metropolregionen sind solche Setzungen besonders kritisch; z. B. sind für die Region Jakarta Setzungsgeschwindigkeiten 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). Durch die 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 ist man in der Lage, vertikale Bewegungen der Erdoberfläche in lokalen und regionalen Bereichen abzuleiten. 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.

Die verlässliche Abschätzung von Vertikalbewegungen setzt konsistente Beobachtungen über einen längeren Zeitraum voraus. Die Lebensdauer eines satellitengestützten Radarsensors ist allerdings begrenzt; die Verwendung mehrerer Sensoren mit leicht unterschiedlicher Technologie ist hier vermieden worden.

Daneben ist der messtechnische Anschluss an geologische Stabilbereiche eine zwingend erforderliche Voraussetzung für die Bestimmung eines absoluten MSL-Anstieges. Durch den im Abschnitt 4.1 skizzierten innovativen Auswertansatz ist zumindest für GNSS-Zeitreihen für dieses Problem eine Lösung entwickelt worden. Eine strenge Kombination der GNSS-Ergebnisse mit Radardaten wirft allerdings Probleme auf, die in den späteren Kapiteln diskutiert werden.

2 Datengrundlage

2.1 Grundsätzliches

Bisher hatten geodätische Beobachtungen und damit auch Aussagen zu Landbewegungen entweder einen punktuellen (GNSS) oder einen linienhaften (Nivellement) Charakter. 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 eines wirklich räumlichen Bewegungsverhaltens zu kommen.

Die Analyse von messtechnisch bestimmten Vertikalbewegungen beschränkt sich in der Mehrzahl der Fälle auf ein lineares Bewegungsmodell, da die Datenlage meist nicht mehr hergibt. 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 erfasst werden. Aufgrund der Datenlage konnten diese Ansätze auch hier leider nur theoretisch entwickelt und nicht praktisch erprobt werden.

Das hier betrachtete Untersuchungsgebiet umfasst den Bereich von der dänischen Grenze bis in die deutschen Mittelgebirge und von der niederländischen bis zur polnischen Grenze. Diese flächenhafte Ausdehnung wurde für die GNSS-Auswertungen realisiert, für die Auswertung der Radardaten erfolgte eine Beschränkung auf breite Streifen entlang der Küsten. In Abbildung 3 ist ein Überblick über das Untersuchungsgebiet und die verfügbaren Daten gegeben.

In der Konzeptionsphase des Projektes sollten sämtliche verfügbaren Daten für eine flächenhafte Modellierung des vertikalen Geschwindigkeitsfeldes genutzt werden, die methodisch durch Erweiterung der Ansätze von Tengen (2010) umgesetzt worden ist, siehe Abschnitt 3. Die nutzbaren Daten für die Modellierung bestanden zum einen aus punktbezogenen Zeitreihen mit Koordinatenveränderungen aus einer gemeinsamen GNSS-Prozessierung der verfügbaren SAPOS-, IGS-, GREF- und EUREF-Stationen im Untersuchungsgebiet. Zum zweiten standen selbst gewonnene flächenhafte Resultate aus der interferometrischen Analyse von Sentinel-Radardaten zur Verfügung, wobei aufgrund der langen Prozessierungszeiten (bis zu mehreren Wochen) nur ein ca. 50 km breiter Streifen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste mittels Radarinterferometrie vollständig ausgewertet wurde. Für Plausibilitätsprüfungen sollten auch Ergebnisse von linienhaften Beobachtungen aus Wiederholungsmessungen des Deutschen Haupthöhennetzes hinzugenommen werden, was allerdings nicht erfolgreich war, siehe Abschnitt 2.4.

Um dieses Arbeitsziel zu erreichen wurde als erster Schritt die Akquisition, Aufbereitung und Auswertung der verfügbaren Beobachtungsdaten durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass – bedingt durch den Föderalismus in der Bundesrepublik Deutschland – die Beschaffung von GNSS-Daten von den Vergaberichtlinien der einzelnen Landesvermessungsämter abhängig ist und die Datensätze selbst leider sehr heterogen waren.

Der Zugriff auf die Radardaten der europäischen Fernerkundungssatelliten 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 – leider recht eingeschränkte – Verfügbarkeit von Daten in den Archiven bzgl. ERS-1/-2, ENVISAT und JERS bzw. ALOS. Siehe hierzu auch die Detailbetrachtung im Abschnitt 2.3.

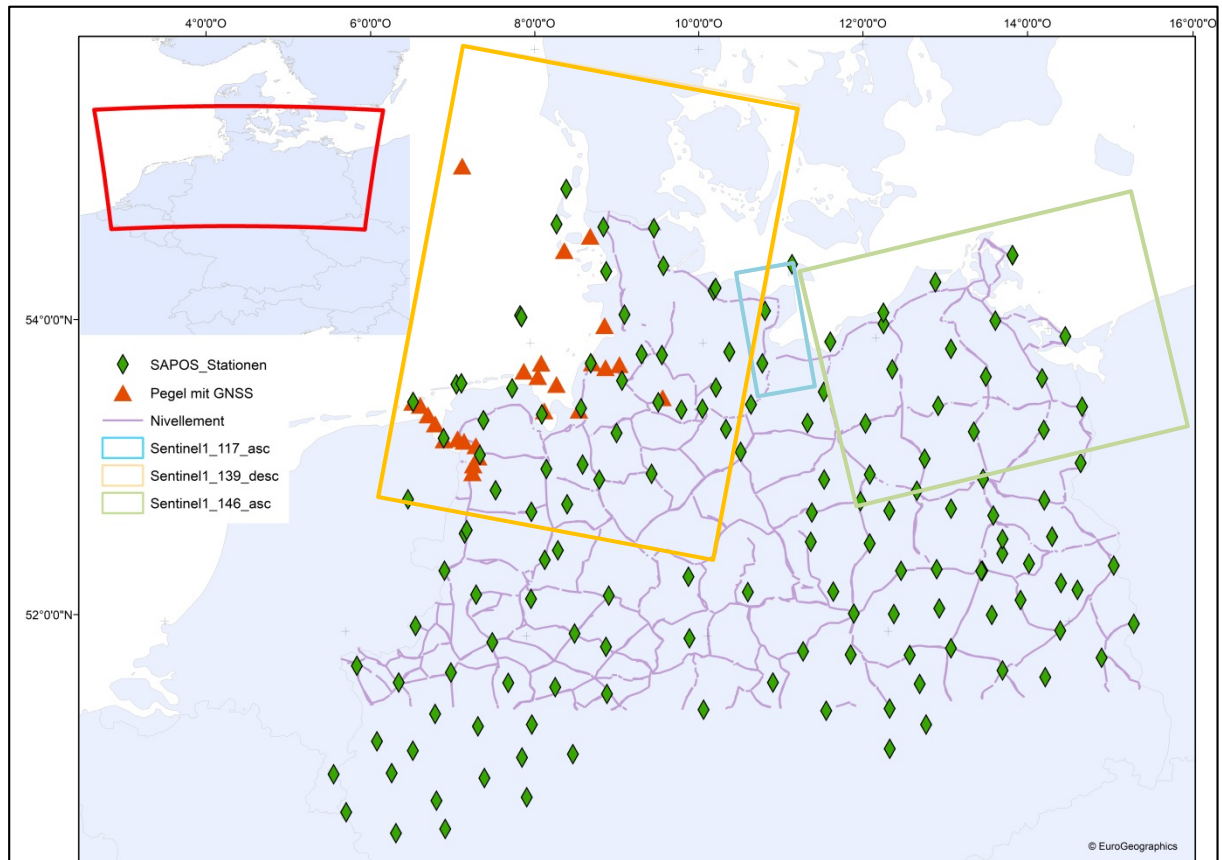


Abbildung 3: Übersicht zur Ausdehnung des Untersuchungsgebietes mit GNSS-Stationen, Doppeldifferenzen aus Nivellement, sowie die Lage ausgewählter Sentinel-1 Datensätze.

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.

2.2 GNSS-Daten

Die Positionen der GNSS-Permanentstationen sind für das Untersuchungsgebiet in Abbildung 3 dargestellt. Zusätzlich zu SAPOS-Stationen der Landesvermessungen wurden noch Daten von 21 Stationen des IGS, von EUREF bzw. GREF ausgewertet. Auch wurden die Daten der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) für 19 GNSS-Stationen auf Pegeln an der Nordseeküste in die Auswertung mit einbezogen, siehe die orangefarbenen Rauten in Abbildung 3.

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Daten im Zeitraum von Anfang 2010 bis Ende 2016 ausgewertet. Früher liegende Datensätze sind von den Landesvermessungsämtern nicht durchgehend abgespeichert worden. Die Daten einiger norddeutscher Bundesländer können für wissenschaftliche Zwecke kostenlos erhalten werden, die Daten aus Nordrhein-Westfalen und Berlin sind sogar frei verfügbar. Die Daten aus Hamburg werden nicht kostenlos bereitgestellt und entsprechend sind hier keine Messungen 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 Föderalismus 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 die Vorverarbeitung 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 lagen ca. 400.000 RINEX Dateien (eine Datei pro Jahr/Tag/Station) mit einer Taktrate von 30 Sekunden vor. Pro Tag wurden auch zwei Navigationsdateien für GPS und GLONASS erzeugt. Im Rahmen der Aufbereitung wurde 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.

2.3 Daten der satellitengestützten Radarfernerkundung

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 darstellt und somit sowohl für den Stadtbereich, wie auch den ländlichen Bereich geeignet ist. 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 drei Jahre entspricht.

Tabelle 1: Datenverfügbarkeit der Radarsatelliten für den Großraum Lüneburg, Dezember 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 für längere Zeitabschnitte zu generieren, da es für diese Satelliten sehr große Zeitintervalle 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 80 km*100 km zeigten, dass auf Grund der langen Prozessierungszeiten eine vergleichbare flächenhafte Abdeckung wie bei der GNSS-Auswertung, nämlich bis zu den Mittelgebirgen, auswertetechnisch nicht realisierbar war. Daher wurde die radarinterferometrische Auswertung auf einen ca. 50 km breiten Streifen entlang der 1.200 km langen deutschen Küste reduziert. Die grundsätzlich gegebene alternative Möglichkeit, globale Rechenzentren einzuschalten, wurde verworfen, da die dort verwendeten Auswerteansätze kaum nachvollziehbar sind und die Ergebnisse der einzelnen Auswertealgorithmen detailliert analysiert werden sollten.

Im Bereich der Nordsee wurde 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 wurde 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 wurde 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.

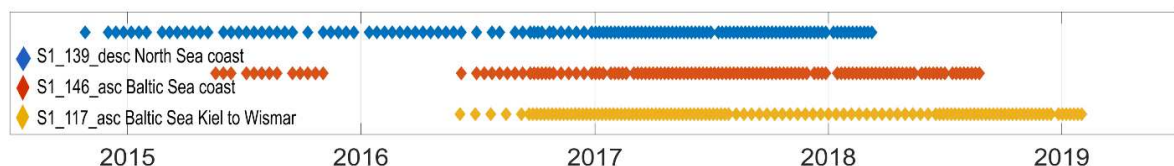


Abbildung 4: Übersicht über die verfügbaren Aufnahmen in den verschiedenen Tracks für den Zeitraum ab 2014.

2.4 Nivellement

Es war eigentlich beabsichtigt, auch originäre Nivellementsdaten in dieses Projekt einzu beziehen. Allerdings war diese Teiluntersuchung nicht erfolgreich:

Datengrundlage waren die beim BKG abgespeicherten, linienhaften Beobachtungen aus den Wiederholungsmessungen des Deutschen Haupthöhennetzes von 1992 (DHHN92) und der aktuellen Erneuerung der Jahre 2006 bis 2012 (DHHN2016). Erfahrungen mit der Kombination von relativen Höhenänderungen aus Nivellementsdaten mit den Ergebnissen aus GNSS-Zeitreihen, auch auf unterschiedlichen Zeitbasen, liegen aus dem KFKI-Verbundprojekt „IKÜS“ vor (Wanninger et al. 2009, Tengen 2010).

Hier sollten – wie bei IKÜS – Änderungen in den gemessenen Höhendifferenzen zwischen zwei identischen Punkten betrachtet werden. Diese doppelten Differenzen entsprechen Geschwindigkeitsunterschieden zwischen den Punkten und geben daher viel besser die Vertikalbewegungen wieder, als die Ergebnisse von Gesamtausgleichungen. In der Theorie sollten alle identischen Punkte aus den Kampagnen DHHN92 und DHHN2016 bestimmt und die Höhendifferenzen zwischen diesen Punkten aufsummiert

werden. Dabei muss man wissen, dass – nach Kenntnis der Autoren – in das DHHN92 auch weiter zurückliegende Messungen ab ca. 1975 eingeflossen sind, also zum Nachweis von Vertikalbewegungen in jedem Fall eine Nutzung der Originaldaten anzustreben ist.

Es wurden jedoch nur Höhendifferenzen zusammengefasst, deren Messzeitpunkte innerhalb eines vorgegebenen Zeitraumes liegen: Höhendifferenzen, die in unterschiedlichen Jahren gemessen wurden, sollten nicht zu einer Line zusammengefasst werden. Da der Verlauf der Nivellementslinien sich in den Kampagnen DHHN92 und DHHN2016 stark unterscheidet, wurden Algorithmen der Graphentheorie eingesetzt, um Linien zwischen identischen Punkten zu finden. Allerdings war die Datenlage aufgrund der sehr unterschiedlichen Beobachtungsabfolge so ungünstig, dass auch mit diesem Ansatz nicht die Höhendifferenzen zwischen zwei identischen Punkten berechnet werden konnten. Da die Nivellementsdaten erst sehr spät bereitgestellt wurden, konnten weitergehende Analysen nicht realisiert werden.

Insgesamt muss man daher konstatieren, dass der anspruchsvolle Ansatz der Nutzung von originären Geschwindigkeitsdifferenzen mit den vorliegenden Nivellementsdaten nicht erfolgreich war.

3 Methodik/Theorie der Modellvorstellung

Das übergeordnete Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Ableitung eines zeitabhängigen Geschwindigkeitsfeldes für Vertikalbewegungen im Bereich der deutschen Küsten an Nord- und Ostsee. Dazu sollte – in der Ausgangsüberlegung – ein mathematisches Modell verwendet werden, das die methodischen Ansätze aus dem KFKI-Verbundprojekt „IKÜS“ umfasst, 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. Buhmann 2010, Wu et al. 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 in diesem Vorhaben entwickelten und programmtechnisch umgesetzten Modellerweiterung sollten auch zeitlich veränderliche Bewegungen mit erfasst werden können. Dazu wurden neben den „Pos-RBFs“ für die Interpolation in der Fläche auch „Temp-RBFs“ eingeführt, um Bewegungen mit der Zeit zu modellieren.

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:

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

Im Projekt IKÜS wurden diese Geschwindigkeiten der RBF als konstant angenommen, hingegen wurden im Projekt MSL_absolut Erweiterungen um – hier so bezeichnete – temporäre RBFs („Temp-RBF“) vorgenommen, um die Modellierung auch nicht-linearer Geschwindigkeiten grundsätzlich möglich zu machen.

Die Geschwindigkeit kann als zeitabhängig modelliert werden, da v_i^t des Punktes P_i zum Zeitpunkt t als Summe von Radialen Basisfunktionen, wieder mit Gauß-Kernel, repräsentiert wird. Für die Geschwindigkeiten dieser Temp-RBF gilt damit:

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

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

$$\Delta h = \int_{t_0}^{t_1} v(t) dt \quad (3)$$

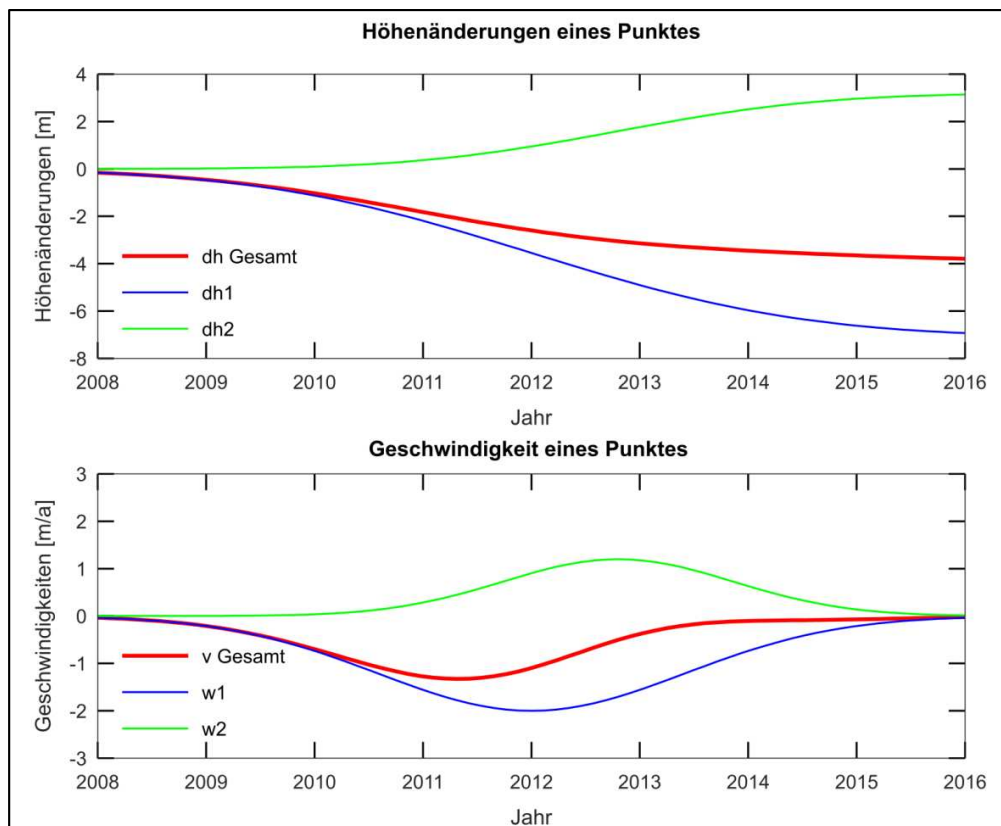


Abbildung 5: Modell der Höhenänderung eines Punktes mit variabler Geschwindigkeit.

Abbildung 5 werden in der oberen Abbildung diese Höhenänderung eines Punktes in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Dargestellt sind zwei Ausgangsmodelle für Höhenänderungen, z. B. zwei zeitlich variable Ursachen, wie Grundwasserentnahme und Bergbauaktivität. 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.

Die reale Berechnung eines Geschwindigkeitsfeldes kann damit grundsätzlich mit den Eingangsdaten aus der Radarinterferometrie, den GNSS-Höhenänderungen der Permanentstationen und den Höhendifferenzen aus den Nivellements in einem gemeinsamen Modell erfolgen. Hierbei können die aus der Radarinterferometrie bestimmten Höhenänderungen in Abhängigkeit von Zeit und Ort verwendet werden. Alle diese Daten können ohne Änderungen in das Modell übernommen werden. Mit Hilfe von Clustering kann bei Bedarf, z. B. bei sehr dichten PSI-Daten, die Punktdichte reduziert werden.

Ein gemessener Höhenunterschied Δh_i zwischen zwei Szenen aus der Radarauswertung zu den Zeitpunkten t_a und t_b kann formuliert werden als:

$$\Delta h_i = \int_{t_a}^{t_b} v_i dt \quad (4)$$

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

$$\Delta h_i^t = \int_{t_0}^t v_i(t) dt + \sum_{k=1}^n (a_k \sin(2\pi f_k(t - t_0)) + b_k \cos(2\pi f_k(t - t_0))) + o_i^t \quad (5)$$

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:

$$H_i^t = H_i^{t_0} + \int_{t_0}^t v_i(t) dt \quad (6)$$

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

$$\Delta h_{k-i}^t = H_k^t - H_i^t = \left(H_k^{t_0} + \int_{t_0}^t v_k(t) dt \right) - \left(H_i^{t_0} + \int_{t_0}^t v_i(t) dt \right) \quad (7)$$

Für den Zeitpunkt t_2 gilt entsprechend:

$$\Delta h_{k-i}^{t_2} = H_k^{t_2} - H_i^{t_2} = \left(H_k^{t_0} + \int_{t_0}^{t_2} v_k(t) dt \right) - \left(H_i^{t_0} + \int_{t_0}^{t_2} v_i(t) dt \right) \quad (8)$$

Die Differenz der Höhendifferenzen ergibt sich zu

$$\Delta h_{k-i}^{t_2} - \Delta h_{k-i}^{t_1} = \int_{t_1}^{t_2} v_k(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} v_i(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} (v_k(t) - v_i(t)) dt \quad (9)$$

Diese erweiterten Auswertansätze sind zu Beginn des Projektes methodisch entwickelt und softwaremäßig umgesetzt worden. Bei der realen Modellierung des vertikalen Bewegungsverhaltens konnten – hauptsächlich wohl bedingt durch die kurzen Beobachtungsdauern – keine nichtlinearen Geschwindigkeiten nachgewiesen werden, d. h. die „Temp-RBFs“ wurden leider nicht verwendet.

Außerdem sind die in den Abschnitten 6.1 und 6.2 vorgestellten Ergebnisse nur jeweils aus einer Beobachtungsart abgeleitet worden: Eine wirkliche Integration der verschiedenen Beobachtungsarten war aufgrund der sehr heterogenen Daten leider nicht erfolgreich, siehe Abschnitt 6.2. Allerdings sind in den Abbildungen 24 und 25 die Ergebnisse der Modellierung aus Radardaten zusammen mit den Geschwindigkeiten aus den GNSS-Zeitreihen dargestellt, um so zumindest einen visuellen Vergleich vorzunehmen.

4 Auswertung

4.1 Modellbildung aus GNSS-Daten

Pro Tag liegen – nach der vorne beschriebenen aufwändigen Aufbereitung der Rohdaten – die RINEX-Daten von ca. 180 GNSS-Stationen vor. Da diese hohe Anzahl von Stationen mit dem verwendeten Auswerteprogramm WaPNet nach Auskunft des Softwareentwicklers nicht gemeinsam ausgewertet werden können, wird das gesamte Netz in drei nord-süd-orientierte 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 Untergruppe bilden die Pegelstationen zusammen mit ausgewählten Stationen in der Nachbarschaft, siehe die nachstehende Abbildung 6.

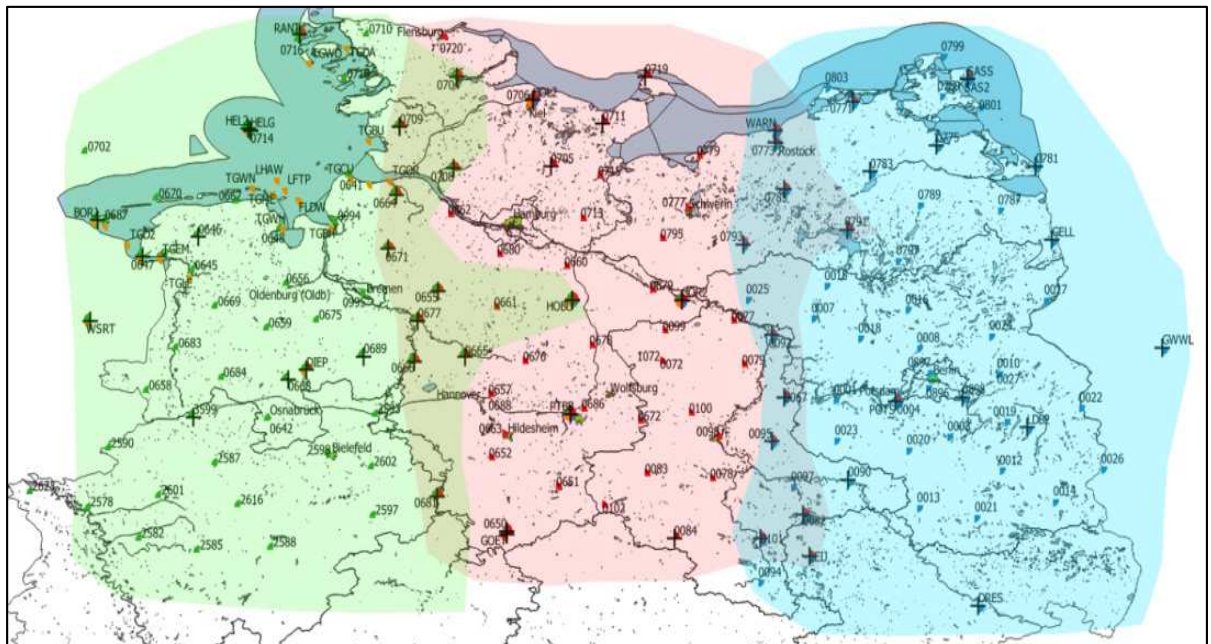


Abbildung 6: Einteilung des Untersuchungsgebietes in 3 Auswertestreifen. Kartengrundlage auf Basis freier Daten des BKG.

Als Ergebnis stehen somit pro Tag fünf Teillösungen – je Untergruppe eine – mit global-kartesischen Koordinaten sowie vollständiger Kovarianzmatrix zur Verfügung. Die 35 Teillösungen pro Woche werden zu einer Wochenlösung zusammengefasst. Für jede Teillösung können im hierfür verwendeten Auswerteprogramm PANDA sieben Parameter einer räumlichen Helmert-Transformation zugelassen werden und daraus wird dann ein einheitlicher Koordinatensatz mit vollständiger Kovarianzmatrix berechnet. Die Kovarianzmatrix einer so gerechneten freien Ausgleichung mit Gesamtpurminimierung beschreibt die innere Genauigkeit des Netzes.

Jede Wochenlösung wird im Sinne einer Helmert-Transformation auf Referenzpunkte im Mittelgebirge gelagert, da die Mehrzahl der Punkte in diesem Gebiet als geologisch stabil anzusehen ist. Außerdem beziehen sich auch 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.

Wie in Abbildung 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.

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 im Projekt nach diesem Schema ermittelten Bewegungen sind für ausgewählte GNSS-Stationen in Kapitel 5 wiedergegeben und diskutiert worden.

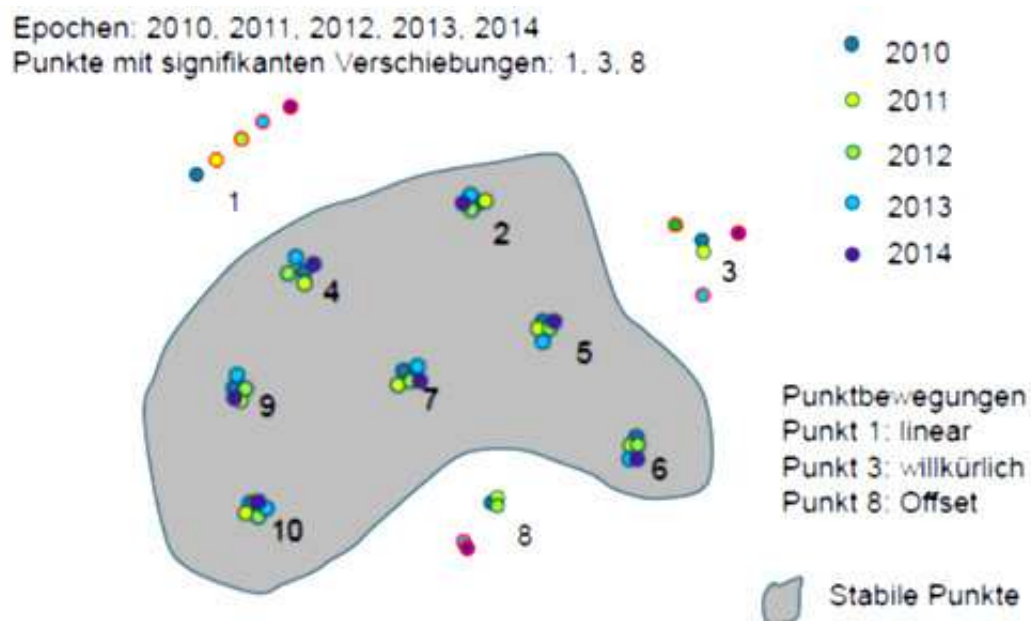


Abbildung 8: Erweiterung der Kongruenzanalyse: Erkennen von Bewegungsmustern für Referenzpunkte bei n Epochen (Tengen et al. 2019).

4.2 Auswertung der Sentinel-1 Aufnahmen

Die Auswertung der Sentinel-1 Daten erfolgte zuerst mit den multitemporalen Prozessierungsmethoden Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) und Small Baseline Subset (SBAS) (Ferretti et al. 2001, Berardino et al. 2002). Für diese Auswertungen wurden etablierte Software-Lösungen verwendet.

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 8 werden

die möglichen Interferogramme zwischen der Masteraufnahme vom 7. 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 Basislinien aus der Auswertung herauszunehmen. 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.

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, kann aber auch im ländlichen Bereich angewendet werden, soweit klare Objekte identifiziert werden können.

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 Rückstreueigenschaften 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 für unser Projekt dargestellt, wobei der Track 139 im absteigenden Bahnbogen genutzt wurde. Für die SBAS-Auswertung wurden Basislinienlängen zwischen den einzelnen Aufnahmen von unter 100 m angestrebt und der Zeitabstand zwischen den einzelnen Aufnahmen sollte 60 Tage nicht überschreiten, um für die PS-Auswertung eine solide Interferogrammbasis zu generieren. 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 verschiedene Testläufe in der PSI- und SBAS-Auswertung mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Die SBAS-Auswertung benötigte bis zum Dreifachen der Zeit einer PSI-Auswertung, allein durch die höhere Anzahl der zu prozessierenden Interferogramme. Daher wurde entschieden, auf die flächenhafte Lösung mittels SBAS zu Gunsten der PSI-Prozessierung zu verzichten. In Tabelle 2 sind für die endgültigen Prozessierungen die Rechenzeiten gelistet.

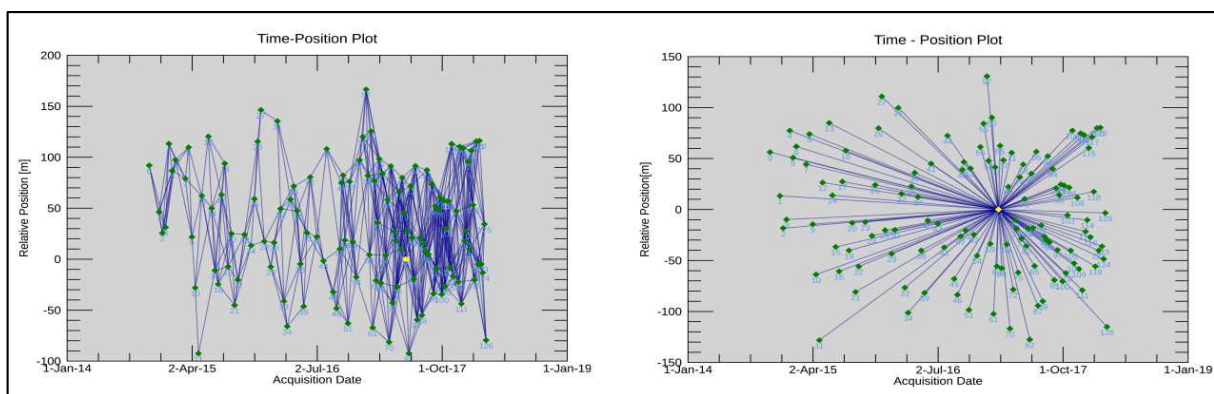


Abbildung 9: Räumliche und zeitliche Verbindungen zwischen Referenzaufnahme (master) und weiteren Datensätzen (slave) für PSI-Auswertung (links) und SBAS-Auswertung (rechts) für Track 139.

Das in Abbildung 10 dargestellte Untersuchungsgebiet wurde in mehrere Teilgebiete (Patches) mit großen Überlappungsbereichen aufgeteilt, da es auf Grund von Prozessierungszeiten und Festplattenspeicher (SSD) nicht möglich war, eine Komplettlösung für die Nord- bzw. Ostsee zu berechnen.

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 Gesamtrechenzeit von bis zu drei Wochen bezieht sich auf die Interferogrammgenerierung und die anschließende PS-Prozessierung bis zur Geokodierung der Ergebnisse in vertikale Bewegungen.

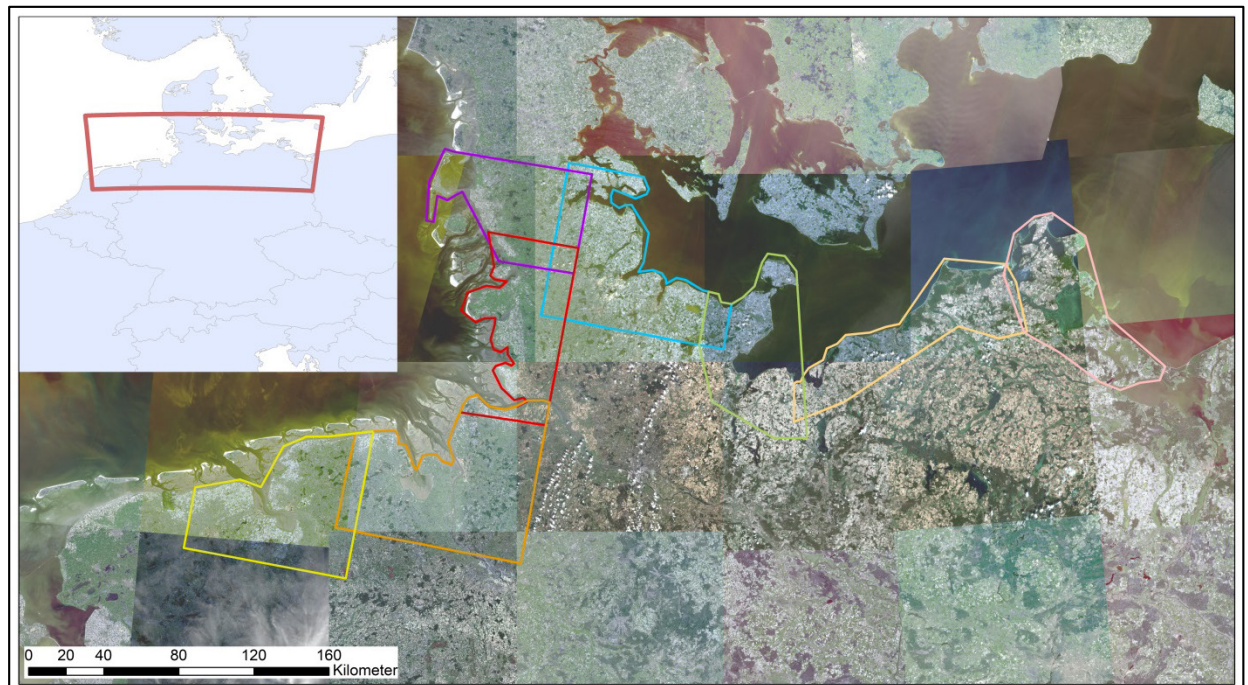


Abbildung 10: Überblick über die bearbeiteten Patches, hinterlegt mit Sentinel-2 Aufnahmen.

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

Satelliten-Track	Name	Ausdehnung	Fläche (km ²)	Rechenzeit (Tage)	Datensatz (TByte)	Computer
139	Patch1	Emden-Papenburg	5300	14	2	8 Kerne\ 3,4 GHz
139	Patch2	Wilhelmshaven-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	Ost-see_West	Wismar-Stralsund	3500	8	2	88 Kerne\ 2,8GHz
146	Ost-see_Ost	Stralsund-Świnoujście	3800	5	2	88 Kerne\ 2,8GHz

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, waren die Rechenzeiten auf demselben Rechner deutlich unterschiedlich. Die Ursache lag 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.

5 Ergebnisse

5.1 GNSS

Als Ergebnis der Auswertungen nach dem vorstehend beschriebenen Konzept erhält man für sämtliche GNSS-Stationen Zeitreihen mit Höhenänderungen i. d. R. für den Zeitraum von 2010 bis 2016. Diese Ergebnisse sind bezogen auf die Gruppe der Referenzpunkte im Bereich der Mittelgebirge gemäß der Einteilung in Abbildung 7. Diese Zeitreihen bilden die Grundlage für die Ableitung eines Bewegungsmodells für den Küstenbereich in Kapitel 6.

In den Abbildungen 11 bis 15 sind exemplarisch für fünf GNSS-Stationen diese absoluten Vertikalbewegungen über sieben Jahre GNSS-Beobachtungen dargestellt.

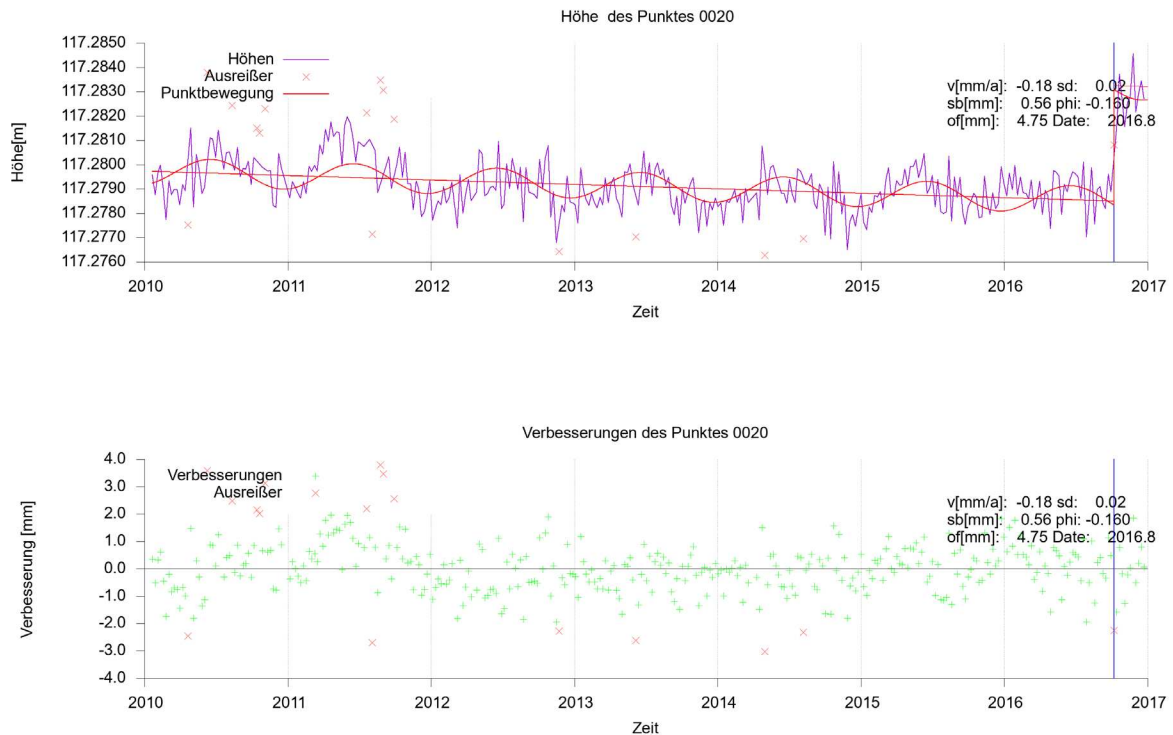


Abbildung 11: Höhenänderungen für den stabilen Referenzpunkt 0020 (Luckenwalde).

Exemplarisch kann man für den als *stabil eingestuft* Referenzpunkt 0020 in Luckenwalde, Lage siehe Abbildung 7, einen sehr geringen Trend und eine saisonale Variabilität in der Höhe beobachten; die Parameterwerte können aus der Zeichnung abgelesen werden.

Wie im unteren Teil von Abbildung 11 ablesbar, zeigt sich in den Wochenlösungen eine Genauigkeit von ca. 2 mm, womit dann auch – für den vorliegenden nur kurzen Beobachtungszeitraum – die Langzeitstabilität für diesen Punkt statistisch nachgewiesen wurde.

Für den in Südschweden liegenden Referenzpunkt Onsala (ONSA), siehe Anmerkungen im Abschnitt 4.1, sind die Höhenänderungen in Abbildung 12 wiedergegeben.

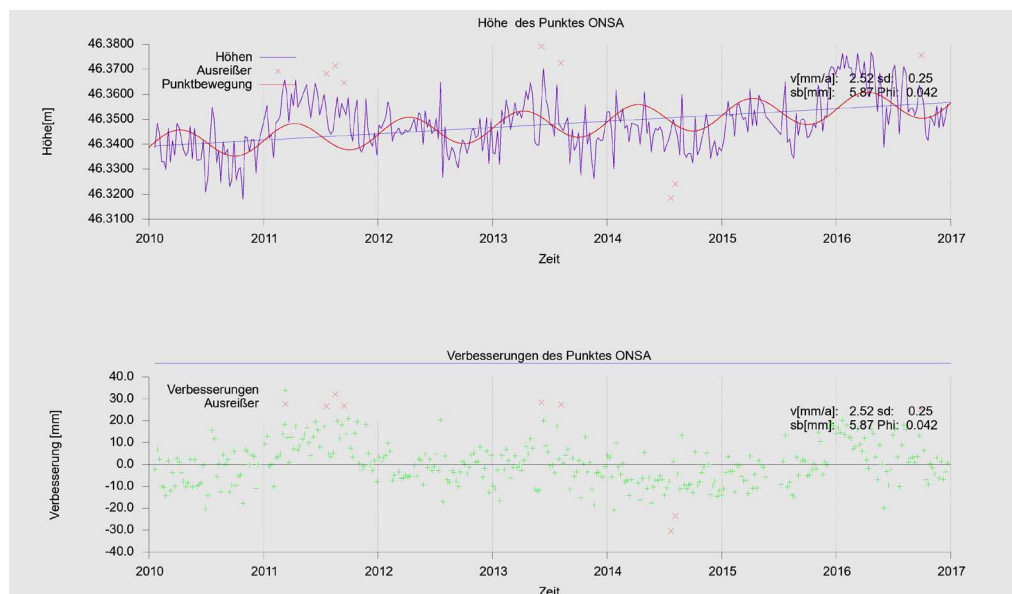


Abbildung 12: Ergebnis der GNSS-Auswertungen für die Höhenänderungen für den externen Bezugspunkt ONSALA in Schweden.

Hier wird für ONSA eine Hebungsgeschwindigkeit von 2,57 mm/a geschätzt, die unter Berücksichtigung der – mit der hier sicher zu optimistisch abgeleiteten – Standardabweichung von 0,25 mm/a trotzdem recht gut zu dem in Vestol et al. (2019) angegebenen Wert von 2,90 mm/a passt. Insoweit bestätigt der hier ermittelte Trend das aus dem Anstieg des fennoskandinavischen Schildes bekannte Bewegungsverhalten für ONSA. Auswertetechnisch ist daher weitestgehend auszuschließen, dass es durch die Extrapolation von den als stabil eingestuften Mittelgebirgsregionen zu den Küstenzonen einen unentdeckten Kippungseffekt gibt.

Die Zeitreihen der GNSS-Stationen in den Abbildungen 13 und 14 beziehen sich auf küstennahe Punkte an der Nord- bzw. Ostsee; auf diese Ergebnisse wird auch im Gesamtergebnis in Abschnitt 6.2 eingegangen.

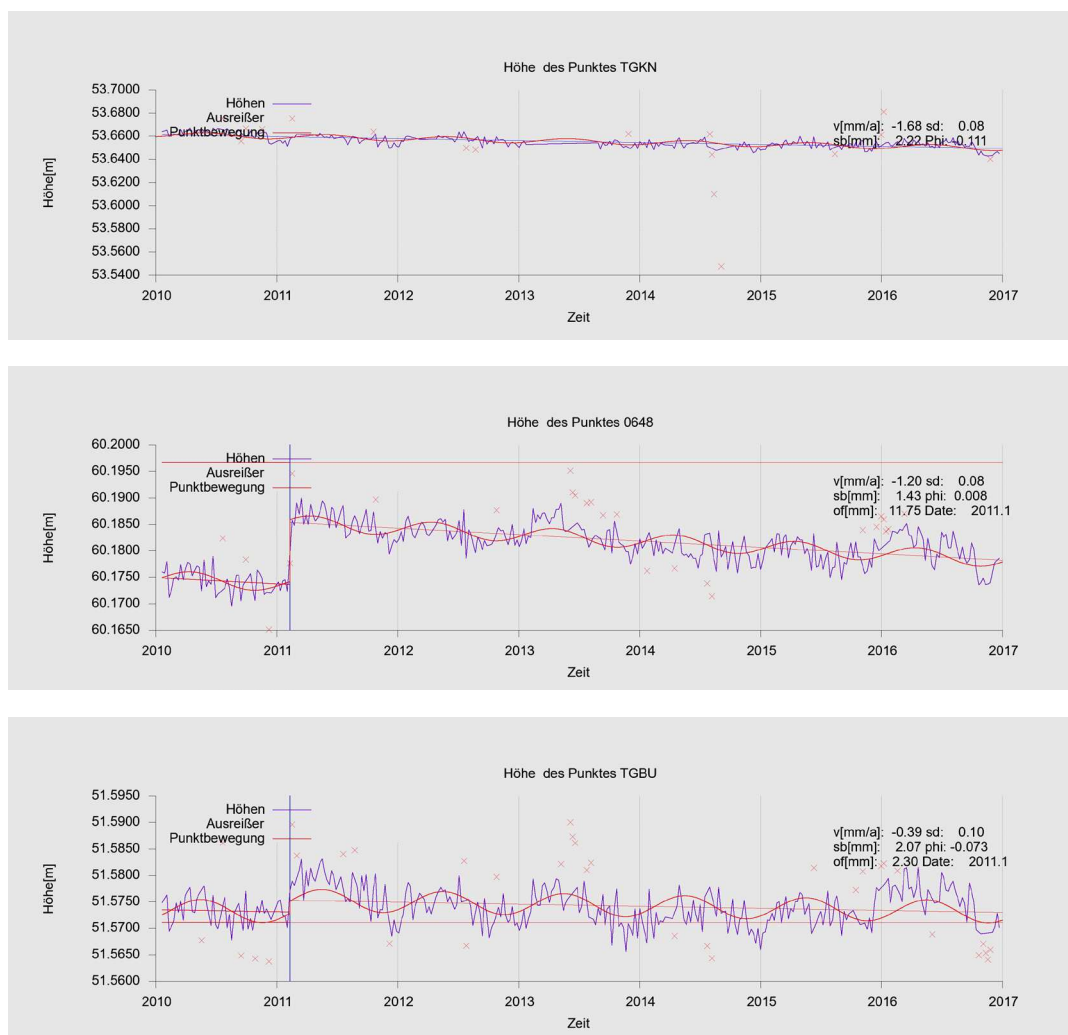


Abbildung 13: Zeitreihen für die absoluten Vertikalbewegungen für einige im Bereich der Nordsee liegenden GNSS-Stationen: Emden (TGKN), Wilhelmshaven (0648) und Büsum (TGBU).

Es ergeben sich mehr oder weniger gleichmäßige Absenkbewegungen dieser Stationen. Für die Station TGKN bei Emden ist kein saisonaler Effekt erkennbar, wie er sich für die Stationen Wilhelmshaven (0648) und Büsum (TGBU) jedoch klar abzeichnet. Hier spielen offensichtlich die Bodenverhältnisse und die Gründung der Stationen eine wichtige Rolle. Für Wilhelmshaven und Büsum ist in den Zeitreihen ein Offset erkennbar, der auf eine Änderung der Antenne bzw. der Antennenaufhängung hinweist.

Die Stationen Schleswig (0704) und Swinemünde (0781) zeigen Hebungen von 0,33 mm/a bzw. 0.66 mm/a, für Warnemünde wird quasi keine Bewegung geschätzt. Wie in Abbildung 17 dargestellt und auch durch die aktuelle Publikation von Vestol et al. (2019) bestätigt, werden für den fennoscandischen GIA-Anstieg in diesem Bereich Bewegungen zwischen 0 und 1 mm/a angesetzt, so dass unsere Ergebnisse sehr gut zu diesem Modell passen.

Wie Büsum und Wilhelmshaven weisen auch die Stationen Schleswig und Warnemünde deutliche saisonale Effekte auf; auch sind wieder Offsets in den Antennenhöhen für zwei Stationen nachgewiesen und eliminiert worden.

Insgesamt sind für alle GNSS-Stationen diese Zeitreihen ermittelt und analysiert worden. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die flächenhafte Modellierung aus GNSS in Abschnitt 6.1.

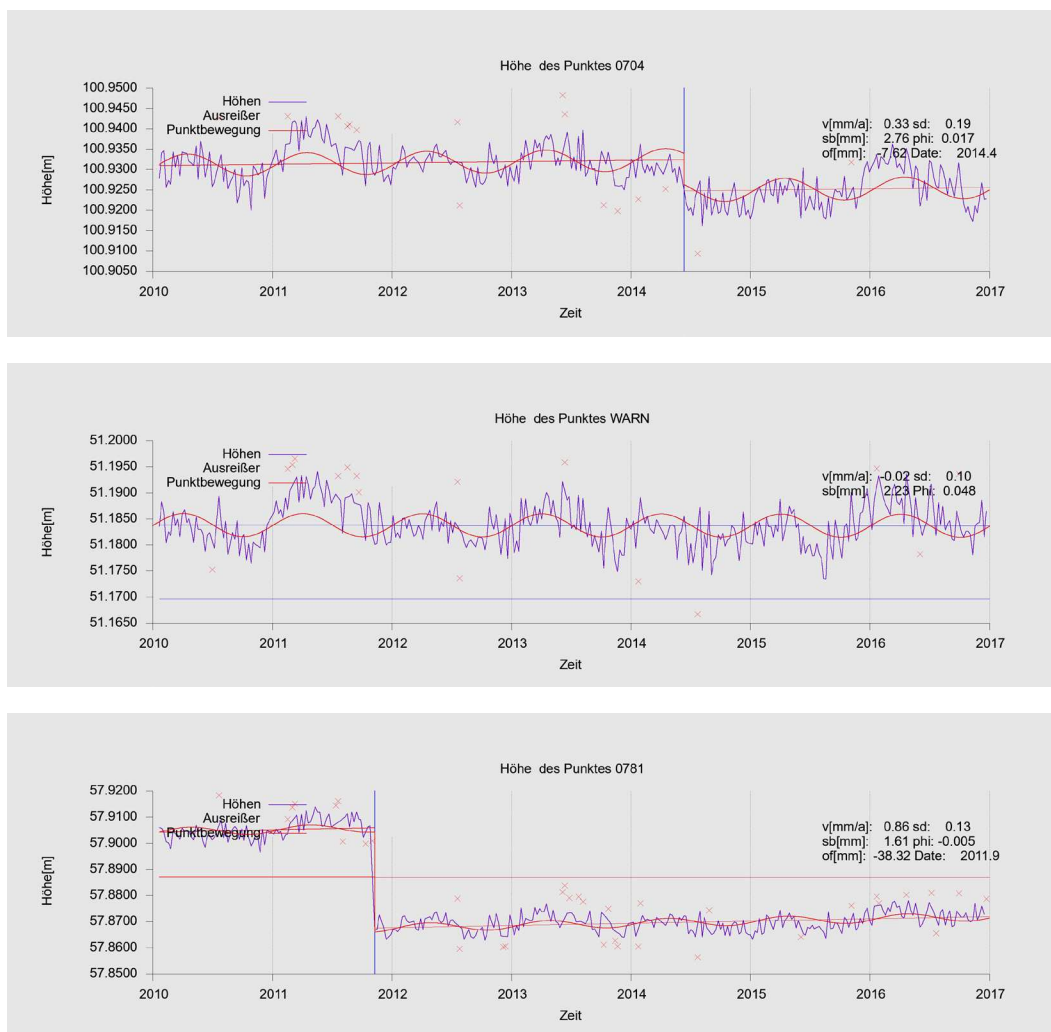


Abbildung 14: Zeitreihen für absolute Vertikalbewegungen für einige im Bereich der Ostsee liegenden GNSS-Stationen: Schleswig (0704), Warnemünde (WARN) und Swinemünde (0781).

5.2 Ergebnisse der PSI-Auswertung

In Abbildung 15 sind die *Vertikalbewegungen* für den gesamten Küstenbereich wiedergegeben, die sich aus der Auswertung der einzelnen Patches der Sentinel-Radarszenen für die

unterschiedlichen Zeitintervalle von zweieinhalb Jahren (Ostsee) und bis zu dreieinhalb Jahren (Nordsee) ergeben haben.

Obwohl die Daten für diese radarinterferometrische Bestimmung von Bewegungen mehrere Sentinel-Streifen umfassen und die Auswertung in mehreren Patches erfolgte, siehe Tabelle 2, werden hier die Ergebnisse zu einer Gesamt-Darstellung zusammengefasst, da Auswertungen für Überlappungsbereiche keine Hinweise auf systematische Effekte zwischen den Streifen zeigen, siehe Tabelle 3. Die primär ermittelten Veränderungen in Line-Of-Sight (LOS) sind aufgrund der Aufnahmegeometrie in Vertikalbewegungen umgerechnet worden, wobei von der Hypothese ausgegangen wird, dass ausschließlich vertikale Bewegungen vorliegen. Schließlich wird von einem linearen Geschwindigkeitsfeld ausgegangen, da es aus den Daten keine eindeutigen Hinweise dafür gibt, beziehungsweise keine belastbare Vorinformation dafür vorliegt, dass hier ein nicht-lineares Bewegungsmodell eher angemessen wäre.

Die Ergebnisse der zusammengefassten PSI-Auswertung in Abbildung 15 zeigen für weite Küstenbereiche der Nord- und Ostsee eine sehr homogene Geschwindigkeitsverteilung, die von einigen signifikanten Hebungs- (rot-orange)- bzw. Setzungssignalen (blau-dunkelblau) durchbrochen wird. Die gesamte Schätzung der Geschwindigkeiten erfolgte anhand kurzer Zeitreihen, deren Aussagekraft nicht vergleichbar zu den längeren GNSS-Zeitreihen ist. Daher sind die gelben bis hellblauen Farbbereiche mit ihren Geschwindigkeiten innerhalb der Spanne von ± 3 mm/a im Rahmen der Unsicherheit der Auswertung als nicht signifikante Bewegungen betrachtet worden.

Im Raum Emden werden stärkere Vertikalbewegungen beobachtet mit Geschwindigkeiten bis zu -8 mm/a. Diese Bewegungen lassen sich eventuell als abklingende langfristige Auswirkung der Entnahme von Gas im Groninger Gasfeld erklären. In Wilhelmshaven und im Bereich Etzel befinden sich Kavernenspeicher, die die Setzungen an der Erdoberfläche mit Vertikalbewegungen bis -10 mm/a verursachen (BGR 2018).

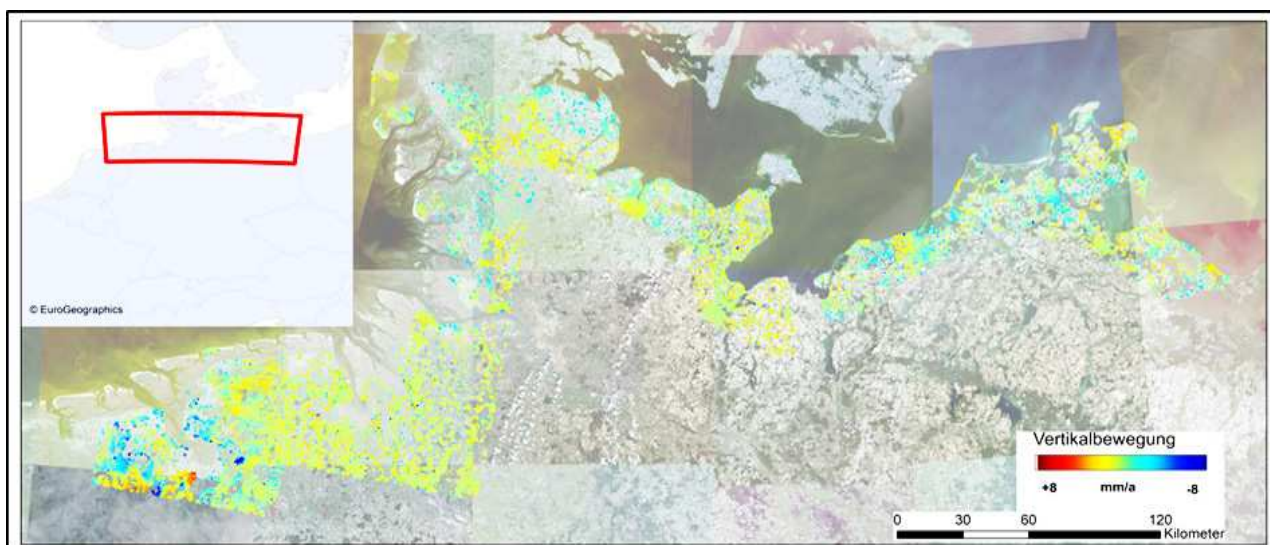


Abbildung 15: Gesamtergebnis der PSI-Auswertung für die Nord- und Ostseeküste, zusammengesetzt aus den Teillösungen für den Zeitraum Oktober 2014 bis Februar 2019.

Diskussion im Bereich Emden/Groningen: In Abbildung 16 sind den PSI-Ergebnissen die Ergebnisse des Niederländischen Bodenbewegungsdienstes (Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-Informatica (NCG 2019) hinterlegt. Es lässt sich fest-

stellen, dass die Bewegungen im Raum Groningen in ihrer Ausdehnung übereinstimmen, aber der NCG (2019) Bewegungsraten auf niederländischer Seite bis -30 mm/a ermittelt.

Nördlich von Windschoten (roter Kreis in Abbildung 16) 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 Zuuidlardenermeers 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 führen und in der Auswertung, als Hebung erkennbar ist. In Veedam sind leichte Hebungen durch den Bau eines neuen Kreisverkehrs und eines neuen Autobahnkreuzes erkennbar. Die lokalen Hebungen stimmen mit den Bewegungen des Bodenbewegungsdienstes der Niederlande (Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-Informatica) (NCG 2019) überein.

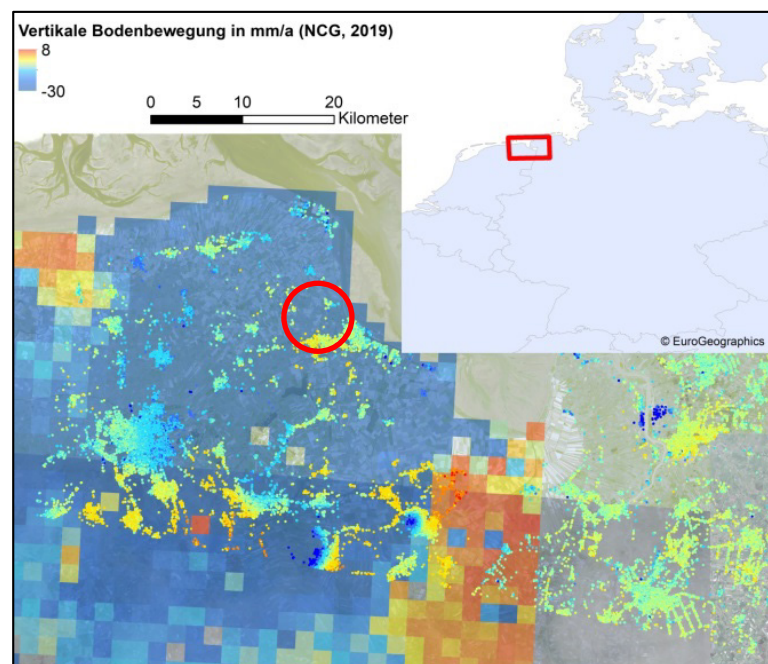


Abbildung 16: Ergebnisse der PSI-Auswertung im Raum Groningen hinterlegt mit Ergebnissen des Bodenbewegungsdienstes der Niederlande (NCG 2019). Roter Kreis markiert Hebungsbe-
reich nördlich Windschoten.

Die **Ergebnisse der PSI-Lösungen im Bereich der Ostsee** wirken homogener als im Emdener Bereich und generell an 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 17, zeigt sich jedoch als Tendenz. Die Zeitreihen von maximal drei Jahren Länge, je nach Teilgebiet, sind zu kurz, um diese Ausgleichsbewegung nachweislich zu detektieren.

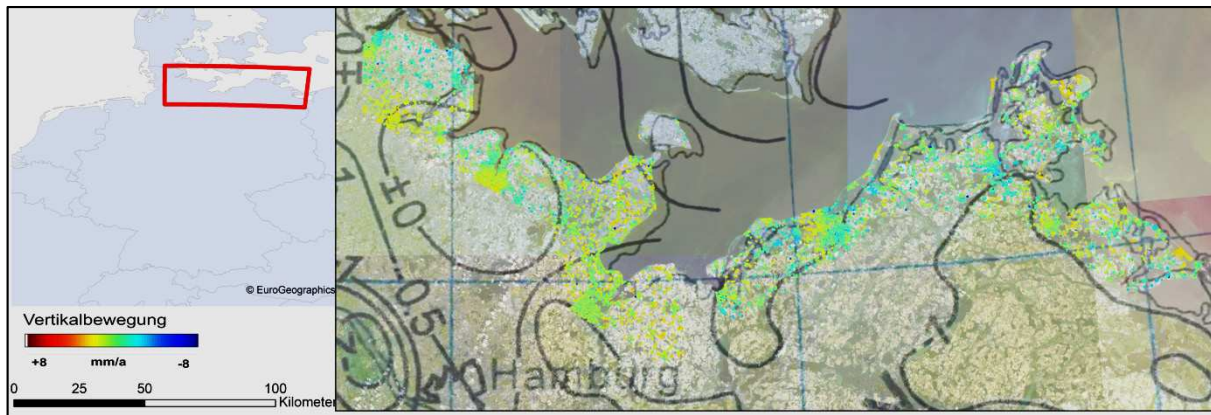


Abbildung 17: Ergebnisse der PSI-Auswertung hinterlegt mit Hebungsraten des GIA aus Frischbutter und Schwab (2001).

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 den Orbits, unterschiedlichen Atmosphärenkorrekturen u. a. auswirken. Daher ist es wichtig festzustellen, dass bei Detailuntersuchungen in den Überlappungsbereichen der Patches die Offsets zwischen den Auswertungen meist im Bereich von 0,1 bis 0,4 mm/a liegen, allerdings mit einem Maximalwert von $-0,7$ mm/a, siehe Tabelle 3. Auf Grund dieser geringen Offsets wird keine Offsetkorrektur angebracht. Entsprechend werden die Änderungsraten aus der PSI-Auswertung als reale Höhenänderungen angesehen und so in die Gesamtbetrachtung, siehe Abbildung 15, 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	Differenz in überlappender Fläche [mm/a]
Patch1 (P1)	Groningen-Papenburg	5300	510 mit P2	249890	20120	-0,1
Patch2 (P2)	Wilhelmshaven-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 $-4,5$ mm/a auf einer Fläche von 10 km² erkennbar, siehe Abbildung 18. Zu Beginn der Zeitreihe 2014 wurde ein Bürogebäudekomplex auf holozänen Torfen gebaut; diese zusätzliche Auflast führte zu starker Konsolidierung der Torfe (BGR 1993).

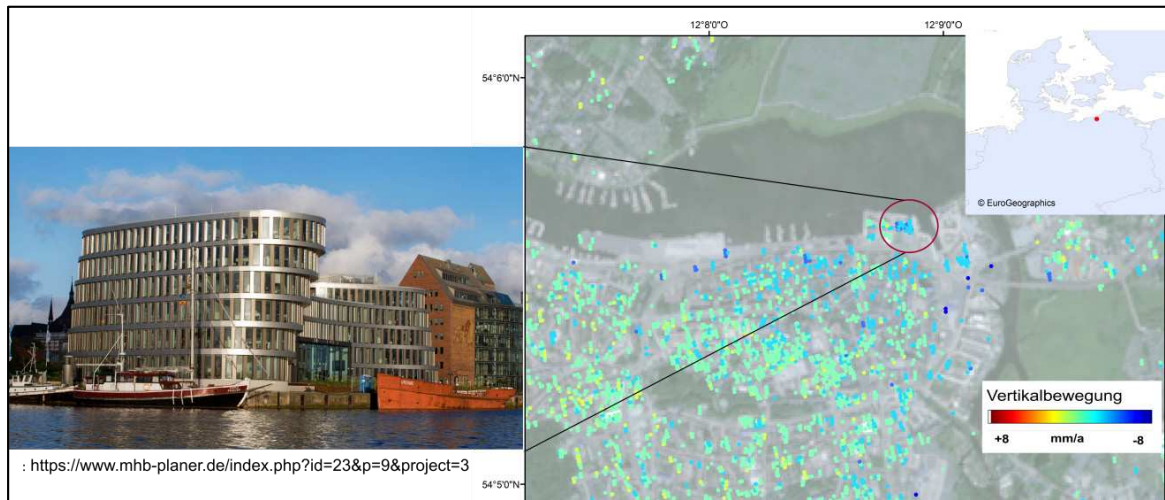


Abbildung 18: PSI-Ergebnisse für ein neues Bürogebäudes im Stadtgebiet Rostock.

Weitere derart lokale vertikale Landbewegungen können ebenso meist auf größere Bauaktivitäten, aber auch z. B. das Anbringung von Solarzellen auf Feldern und Dächern, starke Befahrung von Straßen und mikroklimatische Effekte in Ballungsgebieten zurückgeführt werden.

Das **Studiengbiet Cuxhaven** und insbesondere der Pegel in Cuxhaven-Steubenhöft hatten in diesem Projekt eine hohe Bedeutung, weil dieser Pegel mit Aufzeichnungen seit 1900 die längste Zeitreihe Deutschlands darstellt (Jensen et. al. 2014).

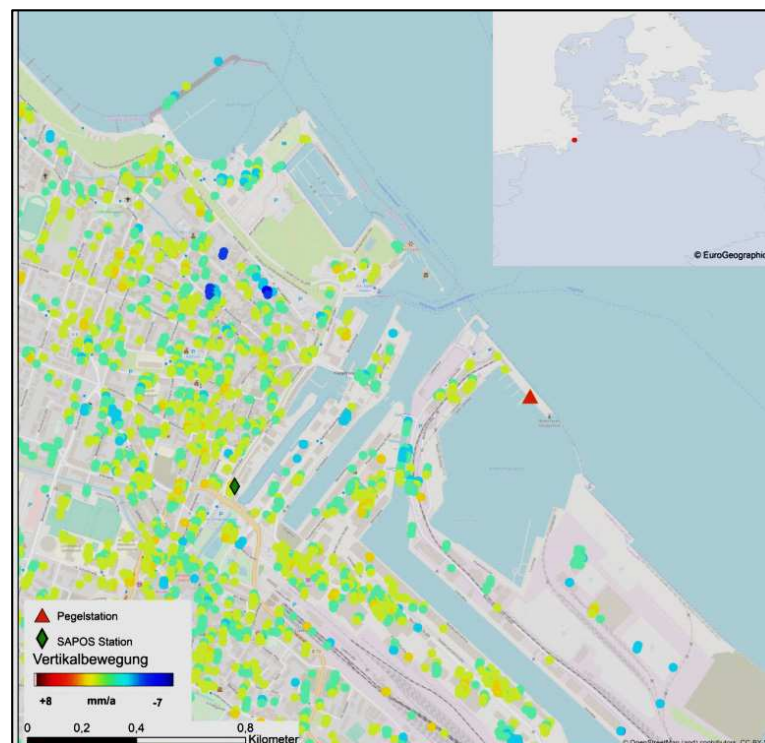


Abbildung 19: PSI-Lösung für Patch 2 für das Umfeld des Pegels Cuxhaven-Steubenhöft.

In Abbildung 19 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 20, erkennt man eine deutlich höhere Variabilität (Saisonalität) der Höhenkomponente des GNSS-Pegelpunktes TGCU, aber nur sehr geringe langfristige Effekte, hier sogar eine geringe Hebung.

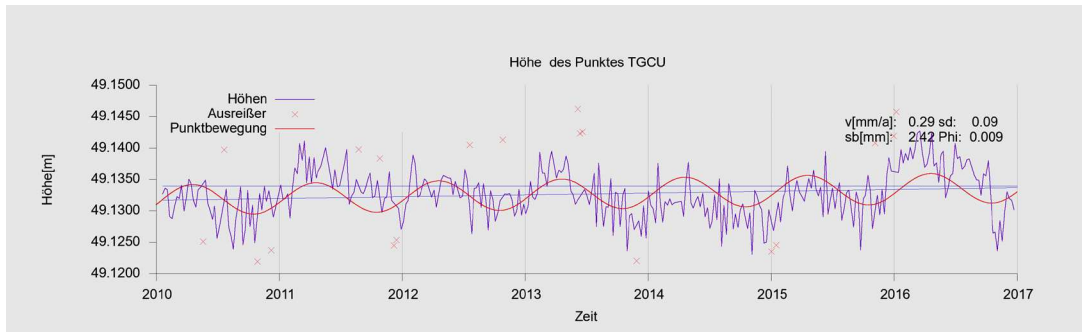


Abbildung 20: Ergebnis für die GNSS-Höhenänderungen am Pegel in Cuxhaven-Steubenhöft.

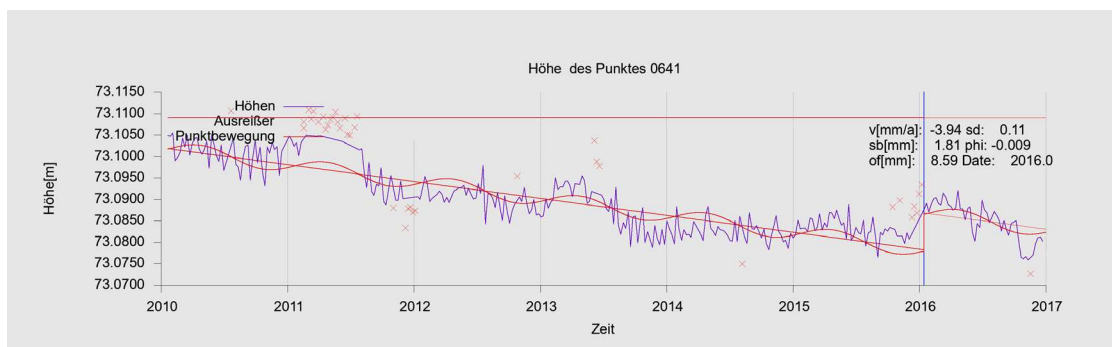


Abbildung 21: Ergebnis für die GNSS-Höhenänderungen für die SAPOS-Station 0641 im Hafengebiet von Cuxhaven.

Für die noch im Hafengebiet liegende SAPOS-Station 0641 ist gemäß Abbildung 21 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 Nachbarpunkte im Küstenbereich ist, d. h. es muss immer eine Detailbetrachtung vorgenommen werden!

Anhand des oben detaillierten Beispiels soll die Kombination der GNSS- mit PS-Daten erläutert werden: Abbildung 22 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-Pegelpunktes (grün). Die Zeitreihe des GNSS-Pegels TGCU enthält 355 Datensätze bei einer wöchentlichen Wiederholrate und sieben Jahren Beobachtungsdauer. Die mittlere Geschwindigkeit des Pegelpunktes 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 für den Zeitraum von 2014 bis 2018 beträgt $0,9$ 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 für den Zeitraum von 2014 bis 2018 beträgt $1,9$ mm/a mit einer Standardabweichung von $2,2$ mm/a.

Die Standardabweichung aus der GNSS-Lösung ist mit 4,4 mm/a hoch und könnte durch ein saisonales Signal verursacht sein. Es ist dennoch erkennbar, dass die relativen vertikalen Bewegungen im Zeitraum von 2015 bis 2017 zwischen den beiden PS-Lösungen und der GNSS-Lösung übereinstimmen.

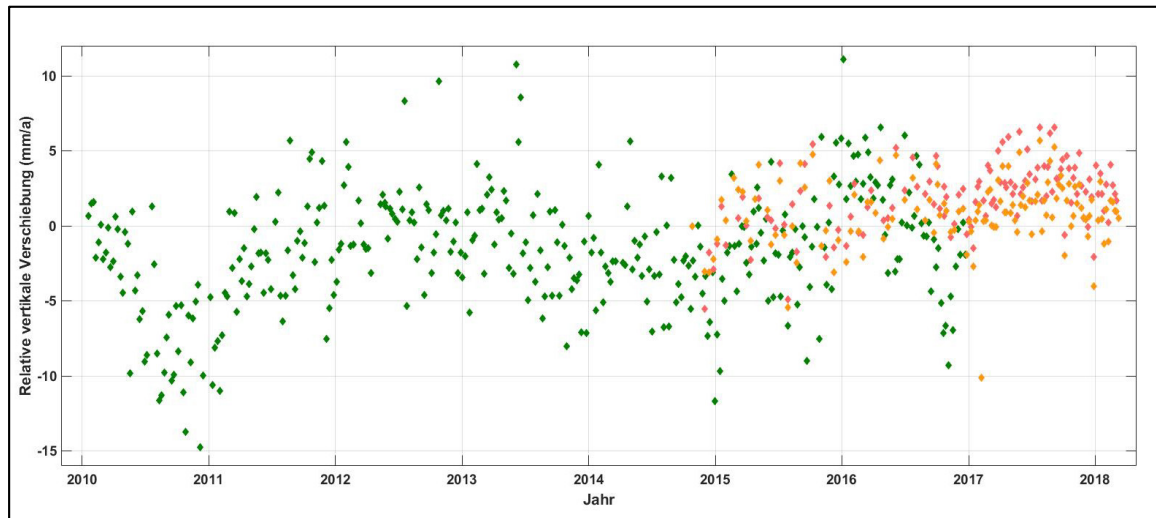


Abbildung 22: Relative vertikale Bewegungen für den GNSS-Pegelpunkt (grün), P2_neu (orange) und P3 (rosa).

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.

Als Ergebnis dieser Detailbetrachtung darf festgehalten werden, dass Pegelbauwerke selbst kontinuierlich in ihrem Verhalten in Bezug zur Umgebung beobachtet werden sollten, d. h. zu Stabilpunkten oder Punkten mit bekanntem Bewegungsverhalten. Eine elegante Lösung wird in der physikalisch stringenten Verbindung zu einer GNSS-Antenne auf dem Pegel selbst gesehen.

6 Darstellung der Gesamtmodelle

In diesem Abschnitt werden die erzielten Erkenntnisse über flächenhafte Vertikalbewegungen an Nord- und Ostsee zusammenfassend dargelegt. Ausgangsbasis hierfür waren Modellierungen für das Bewegungsverhalten im gesamten Untersuchungsgebiet auf der Grundlage der methodischen Ansätze aus Kapitel 3.

Leider konnte aus den vorliegenden Nivellementsdaten kein zusammenhängendes Netz aus abgeleiteten Geschwindigkeitsdifferenzen bestimmt werden, siehe Abschnitt 2.4. Daher erfolgte keine separate Modellierung allein aus Nivellementsdaten.

6.1 Ergebnisse einer flächenhaften Modellierung aus GNSS-Zeitreihen

Die Abbildung 23 zeigt das flächenhafte 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 4.1 beschriebenen Auswertekonzept bearbeitet und im Hinblick auf stabile Referenzpunkte und Referenzpunkte mit bestimmbarer Bewegungsverhalten im Bereich der Mittelgebirge analysiert worden.

Anschließend ist eine Modellierung des Bewegungsfeldes aus den GNSS-Daten mittels Radialer Basisfunktionen (RBF) gemäß Abschnitt 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 wurden allein lineare Vertikalbewegungen geschätzt.

Die ermittelten Hebungen liegen mit bis zu 2 mm/a entlang der gesamten Ostseeküste eher höher als die Ansätze aus dem „Global Isostatic Adjustment (GIA)“, die in Abbildung 17 skizziert sind. Dieser Effekt stimmt mit Ergebnissen von Vestol et al. (2019) überein, der aufzeigt, dass Upliftraten aus aktuellen GNSS-Messungen im norddeutschen Raum um ca. 1 mm/a größer ausfallen können, als im GIA-Modell abgeschätzt.

Allerdings ist auch zu berücksichtigen, dass es regionale und lokale Effekte gibt und die Verifizierung solch globaler Modelle durch die kurzen Beobachtungszeiten in unserem Projekt schwierig ist.

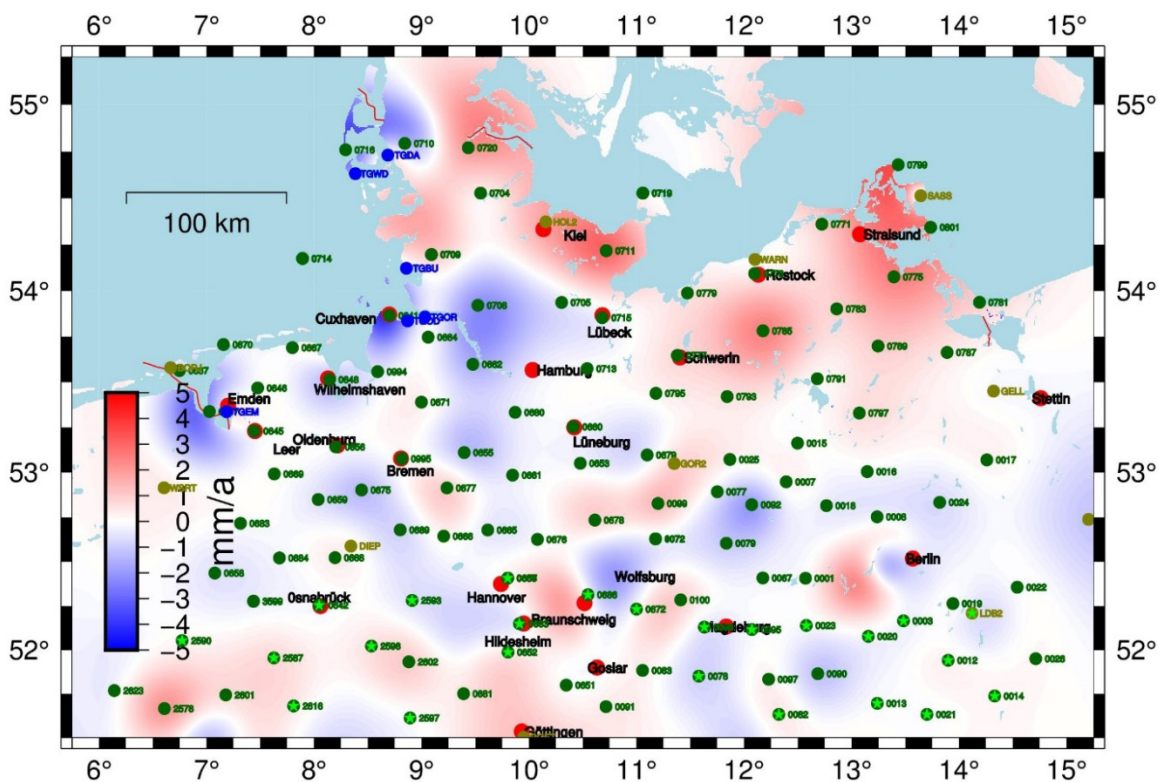


Abbildung 23: Gesamtbewegungsmodell vertikaler Landbewegungen für die deutsche Nord- und Ostseeküste, abgeleitet aus GNSS-Zeitreihen für die Jahre von 2010 bis 2016.

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 Ausdehnung, aber doch große Absolutbeträge, wobei der Untersuchungszeitraum des NCG nicht klar angegeben ist. Aber auch in diesem Bereich sind lokale Abweichungen, sogar Hebungen festgestellt worden.

Der Bereich Cuxhaven ist bereits in Abschnitt 5.2 detailliert behandelt worden. Auf die Abschnitte an der übrigen Nordseeküste wird in Abschnitt 6.2 eingegangen. Die Höhenänderungen im Hinterland weisen eine doch heterogene Struktur auf. Auf eine Einzelanalyse dieser Ergebnisse ist bisher verzichtet worden.

6.2 Ergebnisse einer flächenhaften PSI-Modellierung und Vergleich mit den GNSS-Zeitreihen

Die präsentierten Ergebnisse der multi-temporalen PSI-Auswertung in Abbildung 15 mit Ergebnissen der Sentinel-1 A/B Satelliten von teilweise Oktober 2014 bis März 2019 zeigen relativ gleichförmige und i. d. R. nur geringe Vertikalbewegungen an der deutschen Küste mit erklärbar größeren Veränderungen im Bereich des Dollart.

Ausgehend von diesen Ergebnissen erfolgte nun eine Modellierung des Bewegungsverhaltens mittels RBFs gemäß Abschnitt 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 verblieben jedoch als Beobachtungen die Geschwindigkeiten aller PSI-Punkte. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass an den verbliebenen Verbesserungen eine Aussage über die Güte der Modellierung gemacht werden konnte.

Da aufgrund der sehr vielen PSI-Punkte und der mehr als tausend RBF der Berechnungsaufwand extrem hoch wurde, erfolgte zunächst eine Modellierung des Geschwindigkeitsfeldes in Teilbereichen, die dann zu einem Gesamtmodell zusammengefasst wurden. In den Abbildungen 24 und 25 sind Vertikalbewegungen gemäß diesem Modellansatz für die Bereiche an der Nordseeküste und der Ostseeküste dargestellt worden.

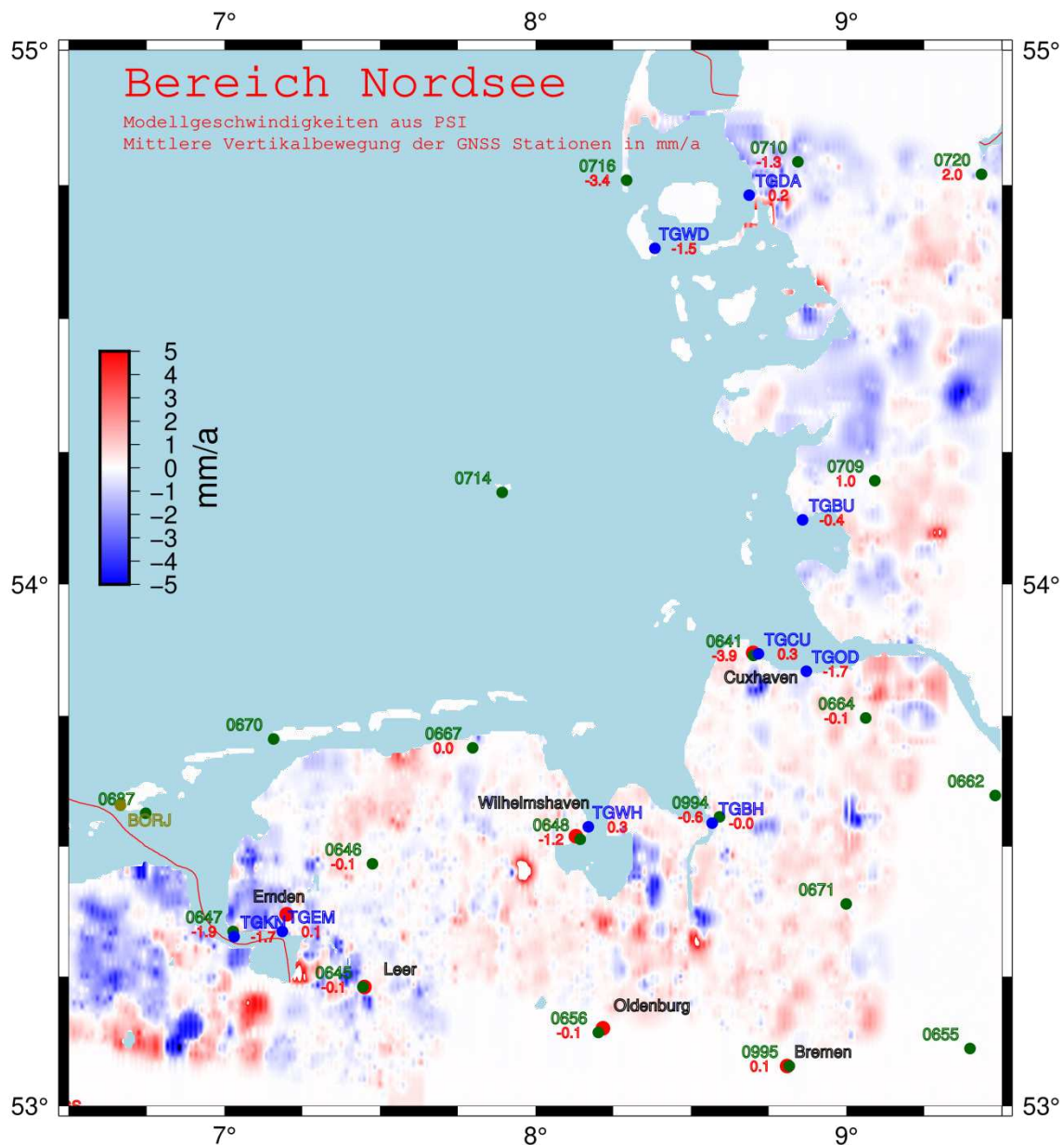


Abbildung 24: Modell der vertikalen Landbewegungen aus den PSI-Lösungen für den Zeitraum von 2014 bis 2018 für den Bereich der deutschen Nordseeküste.

In die Abbildungen 24 und 25 sind zusätzlich die Geschwindigkeiten für Vertikalbewegungen für die GNSS-Stationen im jeweiligen Gebiet eingetragen. Wie schon im Abschnitt 5.2 beim „Studiengbiet Cuxhaven“ diskutiert, ist ein direkter punktueller Vergleich zwischen den GNSS-Stationen und den benachbarten PS-Punkten schwer möglich, da der nächste PSI mehrere 100 m Distanz haben kann und die Zeitbasen für die Ableitung der Geschwindigkeit (GNSS sieben Jahre und PSI drei Jahre) unterschiedlich sind. Diese Angaben dienen dem direkten Vergleich zwischen den Messsystemen; eine numerische Integration erschien aufgrund der doch vorhandenen größeren Abweichungen nicht sinnvoll.

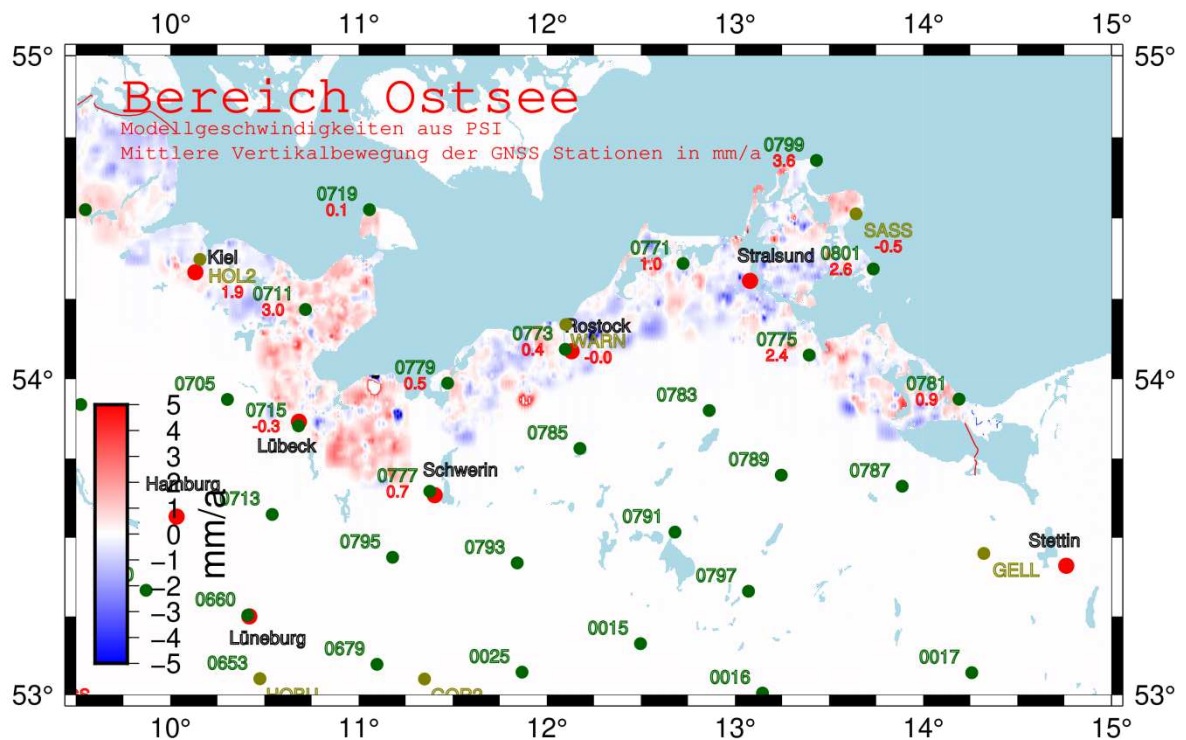


Abbildung 25: Modell der vertikalen Landbewegungen aus den PSI-Lösungen für den Zeitraum von 2015 bis 2018 für den Bereich der deutschen Ostseeküste.

Die ermittelten geringen vertikalen Bewegungen entsprechen insgesamt den Erwartungen, d. h. sie weichen in der Größenordnung nicht von den bisherigen Erkenntnissen ab, siehe z. B. Frischbutter und Schwab (2001), Wanninger et al. (2009). Im Bereich der Ostseeküste kann eine leichte Hebungstendenz erkannt werden, die durchaus mit GIA-Modellen übereinstimmt, siehe Vestol et al. (2019).

Es fällt allerdings auf, dass es recht viele lokale bis regionale Zonen mit einem individuellen Bewegungsverhalten gibt. Als Beispiele für solche lokalen Effekte können der Betrieb von unterirdischen Kavernen, großflächige GW-Entnahmen, größere Baumaßnahmen oder – in Einzelfällen – sogar die Installation von Solarzellen auf mehreren Dächern in einer Stadt genannt werden.

Der Vergleich mit den Ergebnissen der GNSS-Stationen zeigt, dass zwischen PSI-Ergebnissen und benachbarten GNSS-Stationen sowohl abweichende (z. B. Cuxhaven, Wilhelmshaven) als auch gut übereinstimmende (z. B. Bremerhaven, Lübeck, Wismar) Bewegungen festgestellt wurden. Wie die in Abschnitt 5.2 geführte Diskussion zum Studiengebiet Cuxhaven zeigt, können solche Abweichungen oft auf lokale Besonderheiten zurückgeführt werden. Vor einer strengen algorithmischen Verknüpfung der Daten aus GNSS und PSI müsste eine solche Bewertung für sämtliche GNSS-Stationen vorgenommen werden, was im Rahmen dieses Projektes nicht möglich war.

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

6.3 Austausch der Ergebnisse mit der Universität Siegen

Für die Universität Siegen sind für eine Reihe von Pegeln aus den Radardaten die Geschwindigkeiten der Pegelstationen selbst geschätzt, d. h. aus den umliegenden PS-Punkten gemittelt worden. Auf die Nutzung dieser Daten mit Zusatzinformationen wird im Beitrag Dangendorf et al. (2022) eingegangen.

7 Diskussion

In dem hier vorgestellten Forschungsvorhaben sind vertikale Bewegungen der Küstenbereiche von Nord- und Ostsee bestimmt worden, die als aktuelle landseitige Information bei der Ableitung von Veränderungen des absoluten Meeresspiegels anzusehen sind.

Dabei sind neuartige Ansätze für die messtechnische Bestimmung und die auswertetechnische Bearbeitung bzw. Modellierung eingesetzt worden. Messtechnisch beruhen die Ergebnisse auf unterschiedlichen Sensoren, nämlich auf GNSS-Zeitreihen und multitemporalen Radarszenen; da diese Messverfahren nach völlig anderen physikalischen Prinzipien arbeiten, sind sie als komplementär und damit als voneinander unabhängig anzusehen. Allerdings ist die Datenbasis bei GNSS von maximal 2010 bis 2016 und bei den Sentinel-Radarszenen von maximal Oktober 2014 bis Februar 2019 recht kurz, so dass die Ergebnisse nur als eine Momentaufnahme anzusehen sind.

Die ebenfalls im Projekt beschafften Beobachtungsdaten für die Nivellementsnetze DHHN92 und DHHN2016 konnten nicht mit in die Analyse einbezogen werden, insbesondere, da das DHHN92 sehr heterogene Beobachtungszeiten aufweist, die von ca. 1975 bis 1986 reichen und es oft unterschiedliche Messwege (Reihenfolge der Nivellementspunkte) gibt. Für den hier verfolgten Ansatz der Ableitung von doppelten Differenzen aus den ursprünglichen Beobachtungsdaten wiesen diese Daten daher große Lücken auf und waren für eine Gesamtmodellierung leider nicht nutzbar.

Auswertetechnisch sind die GNSS-Zeitreihen in Bezug zu geologisch als stabil anzusehenden Bereiche in den deutschen Mittelgebirgen bestimmt worden, was nur nach einer innovativen mathematisch-statistischen Analyse möglich geworden ist. Die flächenhafte Ableitung des Bewegungsfeldes erfolgte mittels selbst entwickelter Flächenapproximationen, die auf Radialen Basisfunktionen basierten, ein Konzept, das als Erweiterung zu den Ansätzen des KFKI-Projektes IKÜS (Wanninger et al. 2009, Tengen 2010) anzusehen ist.

In Abschnitt 6 sind als Ergebnis zwei Bewegungsmodelle für die Küstenzonen an Nord- und Ostsee vorgestellt worden:

1. Ein Bewegungsmodell allein aus den GNSS-Zeitreihen. Hier sind allein punktbezogenen Informationen aus den Jahren 2010 bis 2016 als Ausgangsinformation für die Ableitung einer flächenhaften Bewegung genutzt worden. Es zeigen sich großräumige Trends, siehe auch die Abbildung 23:
 - Im Bereich der Ostsee stimmen die Höhenänderungen gut mit den globalen Modellen eines Global Isostatic Adjustment (GIA) überein.

- Im Bereich des Dollart wird ein Absinkverhalten erkannt, das wohl auf das Abklingen der Bewegungen aus den Bergbauaktivitäten im Groninger Gasfeld hinweist und gut zu den Ergebnissen des Niederländischen Bodenbewegungsdienstes passt.
2. Eine flächenhafte Approximation der aus sehr vielen PSI-Punkten bestehenden Ergebnissen der Radar-Interferometrie, die oft bis genau an die Küstenlinie heranreichen, ergibt ein deutlich heterogeneres Bild der Erdoberflächenbewegungen als bei der modellierten GNSS-Lösung. Auch Hebungstendenzen gemäß des Global Isostatic Adjustment (GIA) für den Bereich der Ostsee sind durchaus erkennbar, aber diese wird von einer Vielzahl von lokalen Bewegungsmustern in den Küstenzonen überlagert. Diese lokalen Vertikalbewegungen liegen oft im Bereich von wenigen mm/a, und müssen mit Vorsicht gewertet werden, da die Datenbasis relativ kurz ist und mögliche Einflussfaktoren, die oft anthropogen sind, nicht mit berücksichtigt werden konnten.

Im Vorgängerprojekt IKÜS (Wanninger et al. 2008, 2009) sind für den Bereich der niedersächsischen Nordseeküste Vertikalbewegungen abgeleitet worden, die hier nochmals in Abbildung 26 wiedergegeben worden sind.

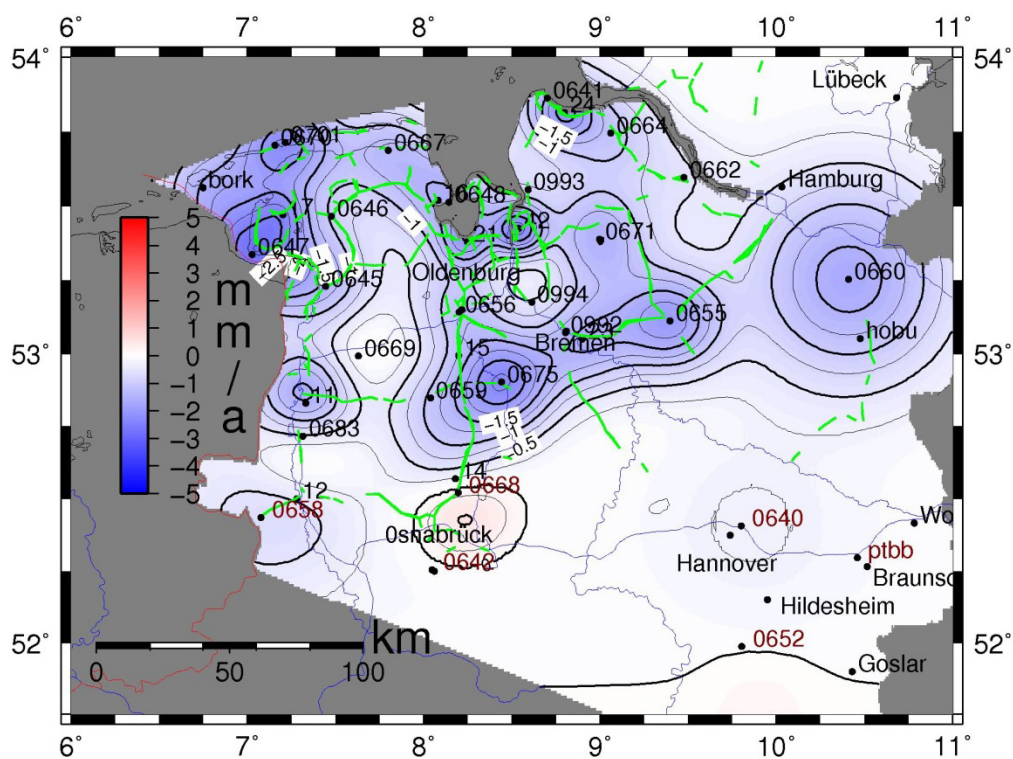


Abbildung 26: Vertikale Landbewegungen für Niedersachsen aus dem Projekt IKÜS aus einer Kombination von Nivellements und GNSS-Daten (Wanninger et al. 2009).

Die Ergebnisse in Abbildung 26 aus dem KFKI-Projekt IKÜS sind abgeleitet aus Nivellementsdaten der Landesvermessungen von etwa 1928 bis 2004, wobei die Messungen zur Schaffung des aktuellen DHHN2016 noch nicht vorlagen. Die GNSS-Zeitreihen stammen aus den Jahren 1998 bis 2007, also aus der frühen Phase der GNSS-Messungen, was sich in der Kontinuität der Messungsdaten und der nicht durchgehend hohen Qualität bemerkbar machte.

Auswertetechnisch wurde ein lineares Geschwindigkeitsmodell angesetzt, d. h. es wurde versucht, aus den Daten je Punkt/Bereich konstante Geschwindigkeiten abzuleiten. Für die Einflüsse des GIA und großräumiger Tektonik war dieser Ansatz sicherlich gerechtfertigt, für die mehr regionalen und lokalen, oft anthropogenen Einflüsse war die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit über fast 100 Jahre aber nur eine erste Näherung:

- Für die Station 647 in Emden wurde in IKÜS eine Geschwindigkeit von $-2,5$ mm/a geschätzt. Nach den hier vorliegenden Ergebnissen hat sich dieser Wert auf $-1,9$ mm/a reduziert, was plausibel mit dem Auslaufen der Erdgas-Förderung im Groninger Gasfeld zu erklären wäre.
- Für die Station 641 Cuxhaven hat sich die Vertikalbewegung von $-1,3$ mm/a in IKÜS auf jetzt $-3,9$ mm/a deutlich vergrößert, während für die GNNS-Station Steubenhöft am benachbarten Pegel keine nennenswerte Bewegung nachgewiesen werden konnte, siehe Abschnitt 5.2. Hier muss also von einem lokalen Effekt ausgegangen werden.
- Für die GNSS-Station 648 Wilhelmshaven sind die Geschwindigkeiten mit $-1,4$ mm/a (IKÜS) und $-1,2$ mm/a hier sozusagen identisch.

Diese Betrachtungen sollen verdeutlichen, dass auf Grund der unterschiedlichen Zeitbasis und der unterschiedlichen äußeren Einwirkungen kein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen sinnvoll erscheint. Die hier gefundenen Werte geben die aktuellen Vertikalgeschwindigkeiten wieder.

Das Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR 2019) präsentiert eine Bodenbewegungskarte aus ERS Daten von 1991 bis 1999. Die Gebiete mit Setzungen in Emden stimmen sehr gut mit unseren Ergebnissen 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 fasst allerdings den Bereich von $+4$ mm/a bis -4 mm/a in einer Klasse zusammen, macht also für weitere Bereiche der Nord- und Ostseeküste keine konkreten Aussagen.

Insgesamt konnte das Projektziel erreicht werden, aktuelle flächenhafte Aussagen über die aktuellen absoluten Vertikalbewegungen im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste zu bestimmen. Es wäre wünschenswert, wenn diese Auswertungen und Analysen kontinuierlich fortgesetzt werden könnten, um die Zeitbasis zu erweitern und auch zeitlich variable Bewegungen mit zu erfassen.

Für das zukünftige Höhenmonitoring der Pegelstationen ist eine Bestückung mit GNSS-Stationen absolut sinnvoll, wie sie z. T. schon realisiert worden ist. Daneben sollten aber auch die Bewegungen im direkten Pegelumfeld durch regelmäßige Messungen, z. B. Radar-Messungen gestützt werden, damit großräumige Effekte, wie die Auswirkung des GIA von lokalen und oft anthropogenen Effekten getrennt werden können.

8 Danksagung

Dieses Forschungsvorhaben und damit die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des vom BMBF finanzierten Projektes „MSL absolut – VFLdiff“ (Förderkenn-

zeichen 03KIS117) erarbeitet. Für die intensive und immer unterstützende inhaltliche Betreuung möchten wir unseren Dank gegenüber dem KFKI zum Ausdruck bringen.

9 Literaturverzeichnis

Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R.; Sansosti, E.: A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry. In: *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens*, 40, 11, 2002.

Buhmann, M. D.: *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.

Dangendorf, S.; Kelln, J.; Arns, A.; Gräwe U.; Steffen, H.; Hofstede, J.; Jensen, J.: *Untersuchungen zur Rekonstruktion des Meeresspiegels und vertikaler Landbewegungen an den deutschen Küsten*. *Die Küste*, 91, 2022.

Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR), 30.03.2019: dlr.de/eoc/Portaldata/60/Resources/images/3_imf_sv/DefoDE_BIG_2048.jpg

Fenoglio, L.; Schöne, T.; Illigner, J.; Becker, M.; Manurung, P.; Khafid: *Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region*. In: *Marine Geodesy*, 35, 137–150, <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2012.718682>, 2012.

Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F.: *Permanent scatterers in SAR interferometry*. In: *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 39 (1), 8–2, 2001.

Frischbutter, A.; Schwab, G.: *Recent vertical movements (mm/a)*. In: *Supplements to Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, 8, 1, 2001.

Jensen, J.; Dangendorf, S.; Wahl, T.; Steffen, H.: *Meeresspiegeländerungen in der Nordsee: Vergangene Entwicklungen und zukünftige Herausforderungen mit einem Fokus auf die Deutsche Bucht*. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 58 (4), 304–323, https://doi.org/10.5675/HyWa_2014,6_1, 2014.

Lege, T.; Kalia, A. C.; Frei, M.: *Aspekte des Bodenbewegungsdienstes Deutschlands, Tagungsband GeoMonitoring 2019*, 37–47, <https://doi.org/10.15488/4511>, Hannover, 2019.

Lidberg, M.; Johansson, J. M.; Scherneck, H.-G.; Davis, J. L.: *An improved and extended GPS-derived 3D velocity field of the glacial isostatic adjustment (GIA) in Fennoscandia*. In: *Journal of Geodesy*, 81, 213–230, 2007.

Nederlands Centrum voor Geodesie en Geo-Informatica (NCG), 26.03.2019: bodemdalingenkaart.nl, Copyright © NCG, 2019.

Peltier, W. R.: Global Glacial Isostasy and the Surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE. In: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, 111–149, 2004.

Riedel, B.; Kracke J.-N.; Tengen D.; Riedel A.; Gerke M.; Niemeier, W.: Bestimmung vertikaler Landbewegungen an der deutschen Nordseeküste. In: *Tagungsband GeoMonitoring 2018*, 167–180, Clausthal-Zellerfeld, 2018.

Siefert, W.; Lassen, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelaufzeichnungen. In: *Die Küste*, 42, 1–77, <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101217>, 1985.

Siles, G. L.: Advanced InSAR methodologies to study subsidence and fracturing caused by groundwater withdrawal in Valley of Mexico. PhD-Thesis, Technische Universität Braunschweig, 2015.

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.; Niemeier, W.: Ableitung vertikaler Landbewegungen an der deutschen Nord- und Ostseeküste aus GNSS- und PS-Auswertungen. In: *Tagungsband GeoMonitoring 2019*, 121–133, <https://doi.org/10.15488/4517>, Hannover, 2019.

Vestol, O.; Agren J.; Steffen H.; Kierulf H.; Tarasov L.: NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. In: *Journal of Geodesy*, 93, <https://doi.org/10.1007/s00190019-01280-8>, 2019.

Wanninger, L.; Niemeier, W.; Jahn, C. H.; 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.; Schenk, A.: Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken. In: *Die Küste*, 76, 121–180, 2009.

Wöppelmann, G.; Marcos, M.: Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. In: *Rev. Geophys.*, 54, 2016.

Wu, Y.; Wang, H.; Zhang, B.; Du, K.L.: Using Radial Basis Function Networks for Function Approximation and Classification. In: *ISRN Applied Mathematics*, vol. 2012, Article ID 324194, <https://doi.org/10.5402/2012/324194>, 2012.