

MSL Absolut: Untersuchungen zum absoluten Meeresspiegelanstieg an der deutschen Nord- und Ostseeküste

Jürgen Jensen¹, Wolfgang Niemeier², Sönke Dangendorf³, Jessica Kelln^{1,4} und Markus Gerke²

¹ Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, juergen.jensen@uni-siegen.de

² TU Braunschweig; Institut für Geodäsie und Photogrammetrie

³ Old Dominion University, Center for Coastal Physical Oceanography

⁴ Bundesanstalt für Wasserbau

Zusammenfassung

Das Verbundprojekt MSL Absolut (03KIS116 und 03KIS117) wurde von 2016 bis 2019 durch das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen und das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Universität Braunschweig bearbeitet. Dabei stand die räumliche und zeitliche Rekonstruktion von Änderungen des absoluten und relativen Meeresspiegels entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste im Fokus. Im Einzelnen wurden (i) die Aufzeichnungen der Gezeitenpegel mit aktualisierten Schätzungen der vertikalen Landbewegungen verglichen und (ii) eine Kombination aus den zeitlichen Informationen des räumlich begrenzten Gezeitenpegelnetzes und räumliche Informationen aus geophysikalischen Modellen und Satellitenhöhenmessdaten verwendet, um den Meeresspiegel entlang der gesamten Küste einschließlich der unbepegelten Gebiete zu rekonstruieren. Im Ergebnis konnte über einen Zeitraum von 1900 bis 2015 eine flächige Beschreibung der vertikalen Landbewegungen an den Küsten sowie der Meeresspiegelentwicklung erfolgen.

Schlagwörter

Nordsee, Ostsee, Tidepegel, MSL, vertikale Landbewegungen, GNSS, InSAR

Summary

The collaborative project MSL Absolut (03KIS116 and 03KIS117) was carried out between 2015 and 2018 by the Research Institute for Water and Environment (fwu) at the University of Siegen and the Institute of Geodesy and Photogrammetry at the Technical University Braunschweig. The focus was on the spatio-temporal reconstruction of changes in the absolute/relative MSL along the German North and Baltic Sea coasts. In particular, we have (i) compared tide gauge records to updated vertical land motion estimates, and (ii) used a combination of the temporal information of the spatially sparse tide gauge network and spatial information from geophysical models and satellite altimetry data to reconstruct sea level along the entire coastline including ungauged sites. As a result, a two-dimensional description of vertical land movements and sea level trends was possible over a period of 1900 to 2015.

Keywords

North Sea, Baltic Sea, tide gauge, MSL, vertical land movements, GNSS, InSAR

1 Einleitung

Seit der letzten Eiszeit ist der Wasserstand in der Nordsee mit Transgressions- und Regressionsphasen, insbesondere in Folge postglazialer Krustenbewegungen deutlich angestiegen. In den letzten 7.000 Jahren ist der mittlere Meeresspiegel in der Nordsee um 6 bis 7 m mit regionalen Unterschieden gestiegen. Heute ist der Meeresspiegel in der Deutschen Bucht etwa 1 m höher als vor 1.000 Jahren (s. a. Jensen 2020).

Der Anstieg des Meeresspiegels ist eine Folge der natürlichen Klimaänderungen und des anthropogenen Klimawandels, z. B. durch die Reduzierung der Dichte bzw. durch die Volumenausdehnung des Wassers bei Temperaturanstieg und den Masseneintrag aufgrund des Abschmelzens landgebundener Eismassen (Grönland, Antarktis oder Gletscher). Zusätzlich führen Landsenkungen und -hebungen sowie Ozeanzirkulationen und atmosphärische Strömungen zu regionalen Veränderungen des Meeresspiegels. Dem absoluten, d. h. sich global ändernden (eustatischen) Meeresspiegel steht der sogenannte relative Meeresspiegel gegenüber, der sich auf Meeresspiegeländerungen in regionalem oder lokalem Maßstab relativ zum Landniveau bezieht.

Bei den vertikalen Landbewegungen im Bereich der Küsten sind neben dem sogenannten GIA-Effekt (engl.: Glacial Isostatic Adjustment) auch lokale Senkungs- oder Hebungsercheinungen, die z. B. aus Gas- oder Grundwasserentnahmen folgen, bis hin zu Bauwerkssetzungen, zu berücksichtigen. Insbesondere zu lokalen Senkungen und Hebungen liegen derzeit jedoch sowohl zeitlich wie räumlich nur unzureichende Informationen vor. Die Bestimmung der Gesamtbewegungen und die Separierung der Einzelprozesse kann heute punktuell mit Hilfe des Global Navigation Satellite Systems (GNSS) sowie in der Fläche durch Nutzung der Methoden der Radarinterferometrie (InSAR) und ergänzender geologischen Untersuchungen erreicht werden.

Die Analyse der Wasserstandsentwicklung wird üblicherweise auf Basis von Pegelmessungen relativ zum umgebenden Land durchgeführt. Diese enthalten somit neben Massen- oder Dichteänderungen auch die vertikalen Landbewegungen. Dies ist hinsichtlich der Analyse klimatischer Anteile im mittleren Meeresspiegel (engl.: Mean Sea Level; MSL) zu beachten, da die Landbewegungen in kaum einem Zusammenhang mit dem anthropogenen Klimawandel stehen. Um Fehlinterpretationen bei der Analyse der Pegelmessungen zu vermeiden, sollten deshalb die Anteile vertikaler Landbewegungen möglichst aus den Daten extrahiert werden.

Die Messungen der globalen Meeresspiegelhöhe bzw. der Meeresspiegeländerungen relativ zum Geoid mit Satelliten (Satellitenaltimetrie) begann mit einer wissenschaftlich nutzbaren Präzision 1992 und wurde mit verschiedenen Satelliten fortgesetzt. Die längsten Satelliten-Messreihen reichen damit bis 1992 zurück und ermöglichen Aussagen zur absoluten Veränderung des globalen und regionalen Meeresspiegels, jedoch nur eingeschränkt für die Küsten.

In dem Verbundprojekt „Untersuchungen zum absoluten Meeresspiegelanstieg an der deutschen Nord- und Ostseeküste (MSL Absolut)“ wurden erstmalig entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

2 Das Verbundprojekt MSL Absolut

In dem Forschungsvorhabens MSL Absolut wurden detaillierte Aussagen zu den relativen und absoluten Änderungen des MSL entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste erarbeitet. Damit wurde eine Kenntnislücke bezüglich der Bedeutung vertikaler Landbewegungen sowie der räumlichen Entwicklung des absoluten und relativen MSL geschlossen und untersucht, inwieweit kohärente Änderungen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste zu beobachten waren und ob es Änderungen in den Beobachtungszeitreihen gibt, die auf anthropogene Einflüsse im Zusammenhang mit dem globalen Klimawandel schließen lassen. Hierdurch wurde gleichzeitig die Basis für die Ableitung belastbarer regionaler MSL-Projektionen für diesen Bereich geschaffen.

Dafür wurden die Arbeitspakete AP1 durch die das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen und AP2 durch das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der TU Braunschweig bearbeitet. AP2 umfasste dabei die differentielle vertikale flächenhafte Quantifizierung der Landbewegungen entlang der deutschen Küsten. AP1 verfolgte hingegen die räumlich-zeitliche MSL Rekonstruktion entlang der deutschen Küsten. Gemeinsam wurden die Ergebnisse zusammengestellt und verarbeitet sowie in den überregionalen Kontext eingeordnet.

Das Verbundprojekt gliedert sich somit in die beiden Teilprojekte:

AP1	MSL _{Abs} -Rek: 03KIS116	Räumlich-zeitliche MSL Rekonstruktion entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste (fwu, Universität Siegen)
AP2	MSL _{Abs} -VFL _{diff} : 03KIS117	Differentielle vertikale flächenhafte Landbewegung entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste (IGP, TU Braunschweig)

Die konzeptionellen und methodischen Ansätze sowie die wesentliche Ergebnisse der beiden Teilprojekte können den jeweiligen Beiträgen Dangendorf et al. (2022) sowie Niemeier et al. (2022) in dieser Ausgabe von „Die Küste“ entnommen werden.

Als Gesamtergebnis kann festgehalten werden: Im Projekt MSL Absolut wurden flächenhaft vertikale Landbewegungen für die Küstenzonen entlang der Nord- und Ostseeküste bestimmt und streng mit den hochaufgelösten Wasserstandsbeobachtungen ausgewählter Pegelstationen sowie räumlichen MSL Rekonstruktionen kombiniert. MSL Absolut baut damit direkt auf den früheren KFKI Projekten AMSeL (Nordsee) („Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste“) und AMSeL_Ostsee („Analyse von hochaufgelösten Wasserstandsverläufen und Ermittlung der Entwicklung des MSL sowie von Extremwasserständen an der südlichen und südwestlichen Ostseeküste“) sowie IKÜS („Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik“) auf und erweitert diese um mehrere methodische und auswertetechnische Aspekte.

Die mit den AMSeL Projekten erarbeitete punktuelle Datenbasis an Tidepegeln entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste (s. a. Jensen et al. 2011b, Jensen et al. 2011a, Kelln et al. 2019, Kelln et al. 2022) wurde um neue, verbesserte Landbewegungsraten korrigiert und anschließend in Kombination mit neuen hochauflösenden Altimeterdatensätzen in die Fläche gebracht. Diese räumlich-zeitlichen Rekonstruktionen des absoluten/relativen MSL entlang der deutschen Küsten umfassen somit die Küstengewässer inklusive der unbepegelten Gebiete.

Mit dem Projekt IKÜS (Wanninger et al. 2009) erfolgte eine erste Bestimmung von Landbewegungen im Bereich Niedersachsen. Im Projekt MSL Absolut wurde diese nun auf die Küstengewässer an der Nord- und Ostsee ausgeweitet. Methodisch wurden GNSS-Zeitreihen nach innovativen Ansätzen analysiert (Tengen et al. 2019) sowie eine eigenständige Auswertung und Analyse von Sentinel-Radardaten nach dem PSI (Persistent Scatterer Interferometrie)-Ansatz vorgenommen. Anschließend wurde das Bewegungsverhalten im Gesamtbereich durch eine numerische Approximation beschrieben bzw. modelliert. Innerhalb von MSL Absolut konnten somit erste flächenhafte Aussagen über die absoluten Vertikalbewegungen im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste bestimmt werden.

3 Danksagung

Unser Dank gebührt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das dieses Projekt aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Leitung des Projektträgers Jülich (PTJ) finanziell über einen Zeitraum von drei Jahren gefördert hat. Weiterhin danken wir dem KFKI für die fachliche Unterstützung im Rahmen der projektbegleitenden Gruppe. Unser Dank gilt auch allen Behörden und Institutionen, die Daten für die Realisierung des Projektes bereitgestellt haben. Zuletzt bedanken wir uns bei allen Projektpartnern für die sehr konstruktive Zusammenarbeit.

4 Literaturverzeichnis

Dangendorf, S.; Kelln, J.; Arns, A.; Gräwe, U.; Steffen, H.; Jensen, J.: Untersuchungen zur Rekonstruktion des Meeresspiegels und vertikaler Landbewegungen an den deutschen Küsten. In: *Die Küste*, 91, <https://doi.org/10.18171/1.090103>, 2022.

Jensen, J.: Retrospektive der Meeresspiegelforschung in Deutschland. Teil 1: Deutsche Nordseeküste In: *Hydrographische Nachrichten*, 115, 03, 18–26. <https://doi.org/10.23784/HN115-03>, 2020.

Jensen, J.; Frank, T.; Wahl, T.: Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL). In: *Die Küste*, 78, 2011a.

Jensen, J.; Frank, T.; Wahl, T.; Dangendorf, S.: Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL). Abschlussbericht Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Siegen, 2011b.

Kelln, J.; Dangendorf, S.; Jensen, J.; Patzke, J.; Fröhle, P.: Monthly sea level from tide gauge stations at the German Baltic coastline (AMSeL_Baltic Sea). In: *PANGAEA*, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.904737>, 2019.

Kelln, J.; Dangendorf, S.; Gräwe, U.; Steffen, H.; Jensen, J.: Entwicklung des mittleren Meeresspiegels entlang der südwestlichen Ostseeküste. In: *Die Küste*, 91, <https://doi.org/10.18171/1.091105>, 2022.

Niemeier, W.; Riedel, A.; Tengen, D.; Riedel, B.; Gerke, M.: Bestimmung flächenhafter vertikaler Landbewegungen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste. In: *Die Küste*, 91, <https://doi.org/10.18171/1.091102>, 2022.

Tengen, D.; Riedel, A.; Riedel, B.; Gerke, M.; 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>, 2019.

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. Die Küste, 76, 121–180, 2009.