

Räumlich-zeitliche Meeresspiegelrekonstruktionen entlang der Deutschen Nord- und Ostseeküste (MSLabs-Rek)

Sönke Dangendorf^{1,2}, Jessica Kelln¹, Jürgen Jensen¹

¹Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Universität Siegen, Paul-Bonatz-Str. 9-11, 57076 Siegen

²Department for Ocean, Earth and Atmospheric Sciences, Old Dominion University, Norfolk, VA, USA

Einführung

Weltweit leben derzeit rund 600 Millionen Menschen (~10% der gesamten Bevölkerung) in Küstengebieten, die tiefer als 10 m über dem mittleren Meeresspiegel (englisch: Mean Sea Level, hiernach: MSL) liegen. Der MSL bestimmt den Verlauf der Küstenlinien und damit auch den Lebensraum vieler Menschen. Während der globale MSL (GMSL) mit Trendraten von maximal ± 5 cm/Jahrhundert über die letzten 3000 Jahre verhältnismäßig konstant verlaufen ist und so eine umfangreiche Besiedlung des Küstenraums erst ermöglicht hat, ist seit Mitte des 19. Jahrhunderts eine signifikante Beschleunigung zu verzeichnen (Kopp et al., 2016). Diese Beschleunigung resultierte in einem durch Gletscherschmelze und thermale Ausdehnung dominierten GMSL Anstieg von 13-19 cm über das 20. Jahrhundert (z.B. Church & White, 2006; Hay et al., 2015; Dangendorf et al., 2017). Aus Tidepegeln und Satellitenaltimeterdaten abgeleitete GMSL Rekonstruktionen deuten zudem darauf hin, dass sich die Anstiegsrate seit den 1960er Jahren ein weiteres Mal auf mittlerweile rund 34 cm/Jahrhundert beschleunigt hat (Cazenave et al., 2018; Dangendorf et al., 2019). Vor allem die rasante Beschleunigung der vergangenen 10-20 Jahre ist durch erhöhte Massenverluste der beiden Eisschilde (insbesondere Grönland) zu erklären, die mittlerweile die Beiträge kontinentaler Gletscher übersteigen (Nerem et al., 2018; Cazenave et al., 2018). Zukunftsprognosen mit Hilfe von Klimamodellen gehen davon aus, dass sich diese Entwicklungen weiter fortsetzen und so bei ungeminderten Treibhausgasemissionen mit hoher Wahrscheinlichkeit in einem Anstieg von 61 bis 110 cm im Jahre 2100 münden werden (Oppenheimer et al., 2019), wobei bei einer Destabilisierung des West-Antarktischen Eisschildes auch Meeresspiegel-änderungen von rund 2 m bis 2100 derzeit nicht ausgeschlossen werden können (Oppenheimer et al., 2019). Hierbei ist zu beachten, dass eine Vielzahl von Prozessen (z.B. gravitativ- und/oder zirkulations-bedingte Massenumverteilungen im Ozean, Wind, Luftdruck, räumlich variable Wärmeaufnahme des Ozeans, vertikale Landbewegungen) räumliche Differenzen zum globalen Mittel induzieren und die globale Entwicklung lokal amplifizieren können. Die erheblichen Unsicherheiten (insbesondere im Zusammenhang mit der Entwicklung in der Westantarktis) in den

Projektionen des globalen und regionalen Meeresspiegels stellen den Küstenschutz auch in Deutschland vor große Herausforderungen und erfordern innovative Konzepte wie die des Klimadeichs in Schleswig-Holstein. Während die über die vergangenen Jahrzehnte beobachteten Änderungen im MSL für den Küstenschutz weitestgehend handelbar waren, können rasante Beschleunigungen innerhalb weniger Jahre oder Jahrzehnte (z.B. durch schnelle Massenverluste der Eisschilde) die Umsetzung größerer Küstenschutzkonzepte erschweren. Aus diesem Grund ist die permanente Beobachtung sowie das Verständnis vergangener Änderungen im MSL unerlässlich.

In den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten KFKI Projekten AMSeL Nord- (Wahl et al., 2011) und Ostsee (Kelln et al., in Begutachtung) wurden seit 2008 qualitativ hochwertige historische Zeitreihen des MSL für eine Vielzahl von Pegeln entlang Deutscher Küsten zusammengetragen und ausgewertet. Während die Pegelreihen in ihrem säkularen Verhalten grundsätzlich der globalen Entwicklung folgten, zeigen detaillierte Analysen signifikante räumliche Differenzen in der langzeitlichen MSL Entwicklung entlang Deutscher Küsten (Wahl et al., 2011; Dangendorf et al., 2014; Kelln et al., in Begutachtung). Vorläufige Untersuchungen deuten darauf hin, dass diese Differenzen einerseits durch vertikale Landbewegungen (englisch: *vertical land motion*, hiernach VLM) und andererseits durch Änderungen in den dominanten Westwindlagen (Dangendorf et al., 2014, Gräwe et al., 2019) erklärt werden können. Vor allem die Rolle der VLM konnte jedoch bis heute nicht abschließend beurteilt werden, da es nach wie vor an ausreichenden direkten Messdaten mangelt (Wahl et al., 2011) und verfügbare Messreihen (z.B. durch das Globale Positionsbestimmungssystem GNSS) meist zu kurz sind, um langfristige Änderungen über das gesamte 20. Jahrhundert zu extrapolieren und die Pegelraten entsprechend zu korrigieren. Auch unterscheidet sich die zeitliche Verfügbarkeit der MSL Zeitreihen teils erheblich mit nur wenigen Pegelstationen, die über Messwerte vor den 1930er Jahren verfügen.

In dem zwischen Juli 2016 und Juni 2019 vom BMBF geförderten KFKI Projekt MSL Absolut (MSLabs, Förderkennzeichen 03KIS116) sollten daher die räumlichen Differenzen der MSL Entwicklung entlang Deutscher Küsten

besonders im Hinblick auf die Rolle der VLM adressiert werden. Im Fokus standen zwei übergeordnete Ziele:

1. Separierung der VLM vom klimatisch induzierten relativen MSL Anstieg des globalen Ozeans.
2. Regionalisierung der MSL und der VLM-Änderungen entlang der gesamten Deutschen Küsten.

Die Umsetzung des Projektes erfolgte am Forschungsinstitut für Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen in Kooperation mit dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (igp) der Technischen Universität Braunschweig. Während das igp sich vorrangig mit der Ableitung der VLM aus geodätischen Messungen und Nivellements auseinandersetzt, stand am fwu vor allem der Vergleich mit relativen MSL Änderungen sowie deren Regionalisierung im Fokus der Arbeiten.

Rekonstruktionsansatz

Zur räumlich-zeitlichen Rekonstruktion des relativen MSL wurde am fwu ein neuartiger Algorithmus entwickelt, der den regionalen MSL durch klimatische Einflussfaktoren aus einem globalen Tidepegelnetzwerk sowie Vorinformationen zur räumlichen Struktur ableitet. Der Algorithmus basiert auf einer Kopplung zweier gängiger Verfahren (Church & White, 2006; Hay et al., 2015) und wird in der Folge als hybride Rekonstruktion (HR) bezeichnet. Mathematische Details hierzu finden sich in Dangendorf et al. (2019). Die Grundidee der HR besteht darin, dass regionale Differenzen zwischen Pegeln weltweit auf physikalische Prozesse wie Eisschmelze oder Ozeanzirkulation zurückgeführt werden können, deren räumliche Struktur modelliert und in der Folge an die Pegeldata angepasst werden kann. Dies mündet in einer HR des relativen MSL, die einerseits optimal mit Pegelmessungen weltweit übereinstimmt und andererseits Konsistenz mit den bekannten physikalischen Prozessen aufweist. Des Weiteren werden nur großräumige klimatische Prozesse in der HR berücksichtigt, wodurch lokale Prozesse, wie beispielsweise VLM oder auch Messfehler oder Datumsungenauigkeiten über die Differenzen zum lokalen Pegel separiert werden können.

Ergebnisse

Durch die Entwicklung und Anwendung der HR wurden im Projekt MSLabs erstmals räumliche MSL Felder erzeugt, die sowohl global als auch regional eine hohe Übereinstimmung mit Satellitendaten aufweisen (Dangendorf et al., 2019, s.a. Abbildung 1a-d). Der GMSL der HR deutet auf einen Anstieg von insgesamt 1,6 mm/a seit 1900 hin, wobei sich die Raten von rund 1 mm/a am Ende der 1960er Jahre auf über 3 mm/a im Jahr 2015 signifikant beschleunigt haben (Dangendorf et al., 2019).

Räumlich besitzt die HR eine Auflösung von ¼ Grad und entlang der Deutschen Nord- und Ostseeküsten zeigen sich relative MSL Trends (ohne lokale und postglaziale VLM) zwischen ~1.5 und 2 mm/a (Abbildung 1e). Hierbei ergeben sich auf der Nordseeeseite etwas höhere Anstiegsraten von 1,8-2 mm/a, während der MSL an der Ostseeküste Raten von ~1,5-1,6 mm/a aufweist. Die Unterschiede in den Säkularraten sind vornehmlich auf eine Intensivierung der Westwindlagen zurückzuführen (Gräwe et al., 2019). Vergleiche der HR mit einzelnen Pegelstandorten deuten zudem, unter Berücksichtigung aktualisierter GNSS Messungen, auf VLM hin, die mit wenigen Ausnahmen in einer Größenordnung von ±0,5 mm/a liegen und prinzipiell einen Gradienten von Subsidenz im Südwesten (z.B. Norderney) hinzu Landhebung im Nordosten (z.B. Grenzbereich zu Polen) aufzeigen. Des Weiteren konnten mit Hilfe der HR an mehreren Lokationen (Leuchtturm Alte Weser, Stahlbrode) zuvor undetektierte Verschiebungen in den Nullpunkten der Pegel auffindig gemacht werden. Auch weisen einzelne Nordseepegel (Dagebüll, Emden, Bremerhaven) lokale Divergenzen zu umliegenden Stationen auf, die in einer asymmetrischen Tidehubentwicklung (daher: variierende Trends in Tidehoch- und Niedrigwasser) begründet sind und sich so auch im MSL bemerkbar machen.

Literatur

- CAZENAIVE et al. (2018): Global sea-level budget 1993–present. In: *Earth System Science Data*, Jg. 10, 3, 1551-1590.
- CHURCH et al. (2013): Sea Level Change. In: STOCKER et al. (Hrsg.): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- CHURCH und WHITE (2006): A 20th century acceleration in global sea-level rise. In: *Geophysical Research Letters*, Jg. 33, 1, L01602.
- DANGENDORF et al. (2014): Mean sea level variability in the North Sea: Processes and implications. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Jg. 119, 10, 6820-6841.
- DANGENDORF et al. (2017): Reassessment of 20th century global mean sea level rise. In: *PNAS*, Jg. 114, 23, 5946-5951.
- DANGENDORF et al. (2019): Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. In: *Nature Climate Change*, Jg. 9, 705-710.
- GRÄWE et al. (2019): Decomposing mean sea level rise in a semi-enclosed basin, the Baltic Sea. In: *Journal of Climate*, Jg. 32, 3089-3108.
- HAY et al. (2015): Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. In: *Nature*, Jg. 517, 7535, 481-484.
- KELLN et al. (in Begutachtung): Entwicklung des mittleren Meeresspiegels entlang der südwestlichen Ostseeküste. In: *Die Küste*, n.a.
- KOPP et al. (2016): Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. In: *PNAS*, Jg. 113, E1434-E1441.
- NEREM et al. (2018): Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter

era. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, doi: 10.1073/pnas.1717312115.

OPPENHEIMER et al. (2018): Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C.Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press.

WAHL et al. (2011): Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. In: Ocean Dynamics, Jg. 61, 5, 701-715. doi: 10.1007/s10236-011-0383-x.

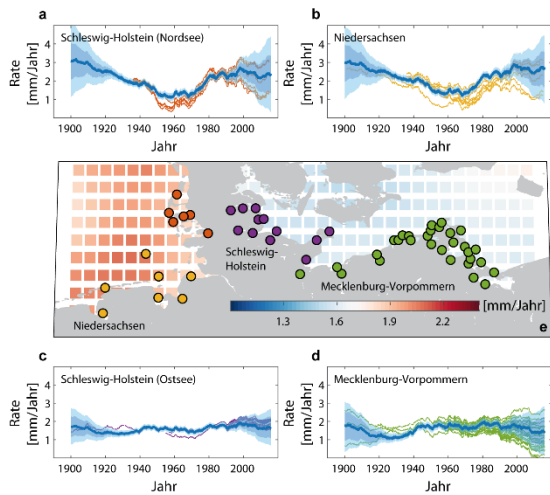


Abbildung 1: Nichtlineare (a-d) und lineare Trends (e) des MSL entlang Deutscher Küsten. In (a-d) finden sich die nichtlinearen Trendraten für die einzelne Pegel definierter Küstengebiete (farbig, Lokationen finden sich in e) sowie Gebietsmittel aus der hybriden Rekonstruktion (blau) entlang der jeweiligen Küste. Die Schattierungen stellen (je nach Helligkeitsgrad) die Unsicherheitsbänder (1 und 2σ) der nichtlinearen Trends dar. In e) sind zudem die linearen Trends zwischen 1900 und 2015 aufgetragen.