

Kelln, Jessica; Jensen, Jürgen

Retrospektive der Meeresspiegelforschung in Deutschland - Teil 2: Deutsche Ostseeküste

Originalveröffentlichung / Original Publication:

<https://doi.org/10.23784/HN116-09>

Verfügbar unter / Available at:

<https://hdl.handle.net/20.500.11970/107814>

Vorgeschlagene Zitierweise / Suggested citation:

Kelln, Jessica; Jensen, Jürgen (2020): Retrospektive der Meeresspiegelforschung in Deutschland - Teil 2: Deutsche Ostseeküste. In: Hydrographische Nachrichten 116. Rostock: Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V.. S. 60-67. <https://doi.org/10.23784/HN116-09>.



Retrospektive der Meeresspiegel- forschung in Deutschland

Teil 2: Deutsche Ostseeküste

Ein Beitrag von JESSICA KELLN und JÜRGEN JENSEN

In diesem Beitrag werden die beobachteten Meeresspiegeländerungen auf Grundlage von pegelbasierten Wasserstandsmessungen an der deutschen Ostseeküste seit dem 18. Jahrhundert dargestellt. Es werden sowohl die Anfänge der Meeresspiegeluntersuchungen aufgrund von vertikalen Landbewegungen als auch aktuellste Forschungsergebnisse zur Auswertung langzeitlicher Pegelzeitreihen über das 20. Jahrhundert und die Verknüpfung mit Landbewegungsschätzern vorgestellt. Dabei zeigen die Untersuchungen für die Ostsee lineare Trends im Bereich der entsprechenden Ergebnisse für den globalen Meeresspiegelanstieg. Da die Ostsee nur durch die dänische Meerenge mit der Nordsee und dem globalen Ozean verbunden ist, überlagern allerdings zusätzlich lokale Effekte die Meeresspiegelentwicklung.

Meeresspiegel | MSL | Ostsee | Pegeldata | vertikale Landbewegungen
sea level | MSL | Baltic Sea | gauge data | vertical land movements

This paper presents the observed sea level changes based on level-based water level measurements on the German Baltic Sea coast since the 18th century. The beginnings of sea level investigations based on vertical land movements are presented, as well as the latest research results on the evaluation of long-term level time series over the 20th century and the link to land movement estimators. The investigations for the Baltic Sea show linear trends in the range of the corresponding results for global sea level rise. However, since the Baltic Sea is connected to the North Sea and the global ocean only through the Danish Strait, additional local effects overlay the sea level development.

Autoren

Dr.-Ing. Jessica Kelln ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen hat dort den Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau inne.

jessica.kelln@uni-siegen.de

Der erste Teil des Beitrags beschäftigte sich mit dem Meeresspiegel an der deutschen Nordseeküste; er ist in Ausgabe 115 erschienen (DOI: 10.23784/HN115-03).

1 Einleitung

Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels (englisch: mean sea level, MSL) verläuft sowohl räumlich als auch zeitlich unterschiedlich. So kann der regionale MSL erheblich von der globalen Entwicklung abweichen, weshalb es notwendig ist, regionale Meeresspiegelstudien durchzuführen und die einzelnen Prozesse, die am Meeresspiegelanstieg beteiligt sind, zu identifizieren. Nachdem sich in der 115. Ausgabe der *Hydrographischen Nachrichten* in Teil 1 der »Retrospektive der Meeresspiegel-forschung in Deutschland« mit der Nordsee befasst wurde (Jensen 2020), liegt der Fokus dieses Beitrages nun auf der Ostsee. Durch den limitierten Wasseraustausch mit der Nordsee bzw. dem Nordatlantik und die große Beeinflussung durch Frischwassereinträge wird die Ostsee als ein eher isoliertes Gebiet betrachtet und gilt somit als nicht repräsentativ für globale Meeresspiegelentwicklungen (Jevrejeva et al. 2014). Diese Einschätzung ist allerdings auf die relative Meeresspiegelentwicklung bezogen, die in der Ostsee hochgradig durch vertikale Landbewegungen beeinflusst wird (Kelln 2019). Führböter und Jensen (1985) betrachten im Gegensatz dazu die Ostsee als gedämpften

Pegel der Nordsee bzw. des Atlantiks/Weltozeans. Dies zeigt sich im Wesentlichen in den sehr viel kleineren Gezeitenamplituden als in der Nordsee, da diese durch die dänische Meerenge gedämpft werden. Dennoch zeigt der mittlere Meeresspiegel in der Ostsee eine sehr hohe Variabilität, die auf die Beeinflussung lokaler Effekte (insbesondere meteorologische Effekte durch Wind und Luftdruckänderungen) zurückzuführen ist.

Untersuchungen der Meeresspiegelentwicklung in der Ostsee reichen bis weit in die Wikingerzeit zurück (etwa 793 bis 1066 n. Chr.; Worsaae 1873). Dies ist vor allem darin begründet, dass die Ostsee eine geologische Besonderheit aufweist, die schon in der Vergangenheit und auch heute noch zu beobachtbaren relativen Änderungen des Meeresspiegels führt. Da vor etwa 10 000 Jahren am Ende der Würm- und Weichselkaltzeit das Fennoskandische Eisschild abgeschmolzen ist (Janssen 2002), hebt sich seit dieser Zeit das Land. Denn durch die Gewichtsreduzierung des Eisschildes tritt eine Entlastung bzw. -spannung der teilelastischen Erdkruste auf. Diese vertikalen Landbewegungen werden auch als postglaziale Landbewegungen bezeichnet (englisch: glacial

isostatic adjustment, GIA). Aufgrund dieser Landhebungen durch GIA konnte schon seit der Wikingerzeit ein Absinken des Meeresspiegels im Bottnischen Meerbusen beobachtet werden, da es durch die Wasserstandsänderungen zu Problemen mit Hafenzufahrten kam (Seibold und Seibold 2012). Die ersten Beobachtungen und Aufzeichnungen zum Absinken des Meeresspiegels erfolgten 1491 in schwedischen Quellen und 1621 in einem finnischen Gebetsbuch (Seibold und Seibold 2012). Auch Anders Celsius befasste sich 1743 mit dem Absinken des Meeresspiegels in fennoskandischen Häfen und ermittelte einen Betrag von 13,7 mm/Jahr (Celsius 1743, zitiert in Ekman 1991; Seibold und Seibold 2012). An der deutschen Ostseeküste wurden zusätzlich zu den Untersuchungen der Meeresspiegeländerungen auch die Höhenlagen der Pegel untersucht und unterschiedliche, teils widersprüchliche Aussagen über eine Hebung bzw. Senkung der deutschen Ostseeküste abgeleitet (siehe z. B. Hagen 1878; Geinitz 1883). Auch aktuelle Untersuchungen zeigen große Unsicherheiten in der südwestlichen Ostsee, da sich dieses Gebiet genau im Übergangsbereich zwischen Landhebungen und Landsenkungen befindet (Kelln et al. 2020). Ausführliche historische Darstellungen zu den Untersuchungen von Meeresspiegeländerungen in der Ostsee im Zusammenhang mit vertikalen Landbewegungen finden sich auch in Wegmann (1969) und Ekman (1991). Aufgrund der beobachteten Meeresspiegeländerungen durch vertikale Landbewegungen wurden schon frühzeitig Pegelmessungen in der Ostsee durchgeführt, weshalb die Verfügbarkeit von Beobachtungsdaten in der Ostsee heute mit einigen der längsten Pegelzeitreihen weltweit als hervorragend zu bewerten ist. In Abschnitt 2 erfolgt daher zunächst ein Überblick der Geschichte der Pegelmessungen in der Ostsee seit dem 18. Jahrhundert. Daran anschließend werden in Abschnitt 3 die wichtigsten Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zu relativen Meeresspiegeländerungen anhand von Pegelmessungen zusammengefasst. In Abschnitt 4 werden neue Untersuchungen zu den Meeresspiegeländerungen in der Ostsee unter Berücksichtigung vertikaler Landbewegungen erläutert und die lokale Meeresspiegelentwicklung in den globalen Kontext gesetzt.

2 Erfassung des Meeresspiegels über Pegelmessungen seit dem 18. Jahrhundert

Die ersten Pegelmessungen in der Ostsee erfolgten entlang der russischen Küste im Jahr 1703 in St. Petersburg und 1707 auf der Insel Kotlin (hier wurde später der Pegel Kronstadt errichtet). Für diese historischen Zeitperioden stehen allerdings heute keine nutzbaren Daten mehr zur Verfügung, da gerade in den frühen Jahren keine kontinuierliche Erfassung der Messwerte durchgeführt wurde

(Leppäranta und Myrberg 2009). Die ersten regelmäßigen und lückenlosen Pegelaufzeichnungen hingegen, die auch heute noch zur Auswertung verfügbar sind, begannen in der Ostsee im Jahr 1774 am Pegel Stockholm in Schweden (Ekman 1988) und 1777 am Pegel Kronstadt nahe St. Petersburg (Bogdanov et al. 2000). Dabei dienten die Pegelinstallationen insbesondere in Schweden vorrangig der Abschätzung von vertikalen Landbewegungen (Samuelsson und Stigebrandt 1996). Entlang der südwestlichen Ostseeküste gehören die an der ehemals deutschen Küste (heute Polen) gelegenen Pegel Stettin (1771), Pillau (1802) und Swinemünde (1810) zu den ältesten Pegeln (Seibt 1881; Matthäus 1972). Die ältesten Lattenpegelablesungen des Pegels Travemünde liegen seit 1826 vor (Jensen und Töppe 1986). Dabei wurden die ersten Wasserstandsaufzeichnungen vorrangig im Zuge von Baumaßnahmen an den Ostseehäfen durchgeführt und dienten somit in erster Linie der Schifffahrt und dem Hafenbetrieb (Jensen und Töppe 1986; 1990).

Um eine einheitliche Durchführung von Wasserstandsbeobachtungen an den Pegeln der deutschen Ostseeküste zu gewährleisten, wurde diese in einem unter anderem von Johann Albert Eytelwein unterschriebenen Erlass der Technischen Oberbaudeputation vom 13. Februar 1810 geregelt: »Pegelinstruction – Wie der Pegel auf den Strömen und Gewässern gesetzt, der Wasserstand beobachtet und die Nachrichten eingezogen und überreicht werden sollen« (Jacoby 1925; Hahn und Rietschel 1938). Somit wurde ab 1810 an den installierten Pegeln an der deutschen Ostseeküste zunächst der tägliche Höchstwert durch die jeweilige zuständige Gemeinde abgelesen (Hagen 1878). 1845 wurde ein Dekret erlassen, nach dem Wasserstände immer einheitlich um 12 Uhr mittags erfasst werden sollten (Hagen 1878). Paschen (1856) berichtete über die Wahrnehmbarkeit von Ebbe und Flut in der Ostsee. Insbesondere in einem Nachtrag zu dieser Veröffentlichung wies der Autor darauf hin, dass die Ablesung der Ostseepiegel nur einmal täglich um 12 Uhr mittags nicht ausreicht, um den mittleren Meeresspiegel der Ostsee zu beschreiben, sondern dass diese einmalige Ablesung aufgrund der täglichen Gezeiten zu einer Unter- bzw. Überschätzung des mittleren Wasserstandes führt (Paschen 1856). Paschen (1856) schlug daher eine Ablesung der Wasserstände zweimal täglich mit einem zeitlichen Abstand von sechs Stunden vor.

Der erste analoge Schreibpegel, der den Wasserstand über den gesamten Tag mit Hilfe eines Stifts als Linie auf einen Pegelbogen aufzeichnet, wurde 1870 in Swinemünde installiert (Seibt 1881). Danach übernahm das Geodätische Institut Potsdam (GIP) die Verantwortung für die Messung und Analyse der Wasserstandsaufzeichnungen und installierte weitere Mareographen (automatisierte

Schreibpegel) entlang der deutschen Ostseeküste, wie 1890 in Travemünde sowie 1894 in Wismar und Warnemünde (Hahn und Rietschel 1938; Liebsch 1997). Die Pegelbogenaufzeichnungen wurden manuell digitalisiert, um den Wasserstand für bestimmte Zeiten zur Verfügung zu stellen. In der Vergangenheit wurden meist nur ein bis vier äquidistante Aufzeichnungen pro Tag manuell digitalisiert, da angenommen wurde, dass dies ausreiche, um die mittleren täglichen Bedingungen wiederzugeben. Einige der historischen Pegelbögen für Pegelstandorte entlang der deutschen und polnischen Küsten werden heute noch in Archiven aufbewahrt. Aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwandes wurden diese historischen Pegelbögen jedoch noch nicht nachdigitalisiert, weshalb für diese Zeitperioden meist nur (höchstens) ein bis vier digitalisierte Aufzeichnungen pro Tag zur Verfügung stehen. Die analogen Schreibpegel wurden ab etwa 1975 durch moderne elektronische Datensammler ersetzt, welche die digital aufgezeichneten Wasserstände direkt an die zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ) senden (Hupfer et al. 2003). Die WSÄ sind heute verantwortlich für den Betrieb der Pegelstationen, die Qualitätssicherung der Daten und die Bereitstellung der Messdaten in einem einheitlichen Höhenbezugssystem.

Schon im späten 19. sowie frühen 20. Jahrhundert beschäftigten sich einige Autoren, wie Seibt (1890) und Westphal (1900), mit der Ermittlung von MSL-Zeitreihen an der deutschen Ostseeküste aus den verfügbaren Wasserstandaufzeichnungen und wiesen auf die Problematik der MSL-Ermittlung aus Einzelterminwerten (Terminwertablesungen um 12 Uhr) bzw. die damit verbundene notwendige Gezeitenkorrektur hin. Westphal (1900) ermittelte den Einfluss der Gezeiten aus dem Vergleich von Monatsmittelwertzeitreihen aus Terminwertablesungen und Monatsmittelwerten aus höher aufgelösten Aufzeichnungen für dieselben Zeitperioden. Wobei Westphal (1900) nur für drei Jahre höher aufgelöste Aufzeichnungen zur Verfügung standen, weshalb er darauf hinwies, dass seine ermittelte Gezeitenkorrektur in der Zukunft angepasst werden müsse, wenn genügend hochaufgelöste Wasserstandsdaten zur Bestimmung des Einflusses der täglichen Gezeiten vorliegen. Liebsch (1997) erklärte den Einfluss der täglichen Gezeiten in der Ostsee auf den Monatsmittelwert aus der Perspektive der Signalverarbeitungstheorie, in der dieses Phänomen in der Spektralanalyse als Aliasing-Effekt bekannt ist. Liebsch et al. (2000) führen daher an, dass Gezeitenkorrekturen für die Monatsmittelwerte, welche nicht aus mindestens vier äquidistanten Beobachtungen pro Tag ermittelt wurden, berechnet werden müssen. Die Untersuchungen zu Gezeitenkorrekturen in der Ostsee wurden in Kelln (2019) ausführlich zusammengetragen, weshalb für weitere Details auf diese Arbeit

verwiesen wird. Da in Kelln (2019) langzeitliche hochaufgelöste Pegelzeitreihen für eine hohe Anzahl von Pegelstandorten zur Verfügung standen, wurden die in der Vergangenheit durchgeführten Gezeitenkorrekturen ausführlich miteinander verglichen, eine geeignete Methodik ermittelt sowie eine aktualisierte Gezeitenkorrektur generiert. Durch die umfassende Sammlung und Aufbereitung von hochaufgelösten Pegelzeitreihen im Rahmen des Forschungsprojektes AMSeL_Ostsee (Patzke und Fröhle 2019; Kelln et al. 2019a) sowie die Verbesserung der Gezeitenkorrektur (Kelln 2019), wurden langzeitliche qualitativ hochwertige MSL-Monatszeitreihen für die südwestliche Ostseeküste erzeugt und über die Datenplattform PANGAEA öffentlich zugänglich gemacht (Kelln et al. 2019b). Dies ist nach derzeitigem Kenntnisstand der umfassendste MSL-Datensatz für die deutsche Ostsee, der bislang erstellt wurde.

3 Untersuchungen zu relativen Meeresspiegeländerungen anhand von Pegelmessungen

Einige der ersten Untersuchungen anhand von Pegelbeobachtungen zu Meeresspiegeländerungen entlang der südwestlichen Ostseeküste wurden von Paschen (1869), Hagen (1878), Seibt (1881), Paschen (1882) und Westphal (1900) durchgeführt, wobei sich diese Arbeiten auf die Darstellung des Mittelwassers beschränkten und darin keine Trends ermittelt wurden. Hagen (1878) ermittelte die mittleren Wasserstände für elf Pegelstandorte über den Zeitraum 1846 bis 1875 und stellte einen abfallenden mittleren Wasserstand am Pegel Swinemünde sowie einen ansteigenden mittleren Wasserstand am Pegel Wittower Posthaus fest. Die gegenläufigen Entwicklungen führte Hagen (1878) auf die Vertiefung und Verbreiterung der Swine sowie die Verengung des Rassower Stromes zurück. Weiterhin bemerkte Hagen (1878), dass der mittlere Meeresspiegel der Ostsee durch Luftdruckschwankungen und Windeffekte beeinflusst wird und sich eine regelmäßige periodische Änderung des Wasserstandes im Laufe eines Jahres einstellt, die an allen Pegelstandorten beobachtet werden kann. Diese periodische Änderung wird heute als saisonaler Zyklus bezeichnet und wirkt sich vor allem auf die interannuelle Variabilität des mittleren Meeresspiegels der Ostsee aus. Da sich dieser Beitrag vor allem auf mögliche Langzeittrends fokussiert, sei für weitere Erkenntnisse zum saisonalen Zyklus in der Ostsee auf z. B. folgende Arbeiten verwiesen: Plag und Tsimplis 1999; Hünicke und Zorita 2008; Kelln 2019.

Seibt (1881) untersuchte den mittleren Meeresspiegel anhand von Wasserstandsbeobachtungen am Pegel Swinemünde von 1826 bis 1879 (Beobachtungen 1826 bis 1869; Schreibpegelaufzeichnungen 1870 bis 1879); später erweiterte Seibt (1890) seine Untersuchungen um weitere 24

Beobachtungsjahre (Untersuchungszeitraum 1811 bis 1888). Seibt (1885) führte darüber hinaus Untersuchungen des Mittelwassers am Pegel Travemünde durch. Für die Jahre 1882 bis 1897 wurde das Mittelwasser der Pegelstandorte Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona und Swinemünde von Westphal (1900) untersucht. Kühnen (1916) bezog sich direkt auf die Arbeiten von Seibt (1881), Seibt (1885), Seibt (1890) und Westphal (1900) und setzte deren Untersuchungen fort. Dabei berechnete Kühnen (1916) Monats- und Jahresmittelwerte anhand der Wasserstandsmessungen um 12 Uhr mittags von 1898 bis 1910 für die Pegelstandorte Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona, Swinemünde, Pillau und Memel. Weiterhin vermutete Kühnen (1916) als Gründe für die Schwankungen des mittleren Meeresspiegels die Gezeiten, meteorologische Einflüsse wie Luftdruck und Wind sowie den Wassermassenausgleich zwischen Nord- und Ostsee.

Rietschel (1933) ermittelte einen relativen Anstieg der Mittelwasserzeitreihen (Mittelwasser, MW, als Approximation des relativen mittleren Meeresspiegels, englisch: relative mean sea level, RMSL) auf Grundlage von fünfjährigen Mittelwerten der Pegelstandorte Kolberg (heute Kolobrzeg in Polen) und Swinemünde zu:

- Kolberg von 1817 bis 1929: 0,8 mm/Jahr,
- Kolberg von 1871 bis 1929: 1,5 mm/Jahr,
- Swinemünde von 1811 bis 1929: 0,6 mm/Jahr,
- Swinemünde von 1871 bis 1929: 1,2 mm/Jahr.

Hahn und Rietschel (1938) stellten langzeitliche MSL-Jahreszeitreihen über das 19. Jahrhundert bis zum Jahr 1935 für die Pegelstandorte Pillau, Stolpmünde, Kolberg, Swinemünde, Barhöft, Warnemünde, Travemünde und Schleimünde anhand von 12-Uhr-Lattenablesungen zur Verfügung (außer für Swinemünde, hier erfolgten die Ablesungen von 1811 bis 1826 um 8 Uhr). Dabei konnte ein Anstieg der mittleren jährlichen Ostseewasserstände verzeichnet werden. Gaye (1951) kommt in »Wasserstandsänderungen in der Ostsee in den letzten 100 Jahren« mit 19-jährigen Teilzeitreihen zu folgenden Anstiegsraten für die mittleren Jahreswasserstände (MW als Approximation RSML):

- Schleimünde von 1880/1898 bis 1929/47 um 2,5 mm/Jahr,
- Travemünde von 1860/1878 bis 1921/1938 um 2,6 mm/Jahr,
- Marienleuchte von 1883/1901 bis 1922/1940 um 1,4 mm/Jahr,
- Swinemünde von 1860/1878 bis 1914/1932 um 1,1 mm/Jahr.

Jensen und Töppe (1986) geben für den Pegel Travemünde für eine RMSL-Zeitreihe von 1826 bis 1985 einen Anstieg von 1,2 mm/Jahr an. Umfangreiche neuere Analysen der gemessenen Pegelwasserstände in der südwestlichen Ostsee und

an der deutschen Ostseeküste wurden bisher von Liebsch (1997), Liebsch et al. (2000), Jensen und Mudersbach (2004), Lampe et al. (2010), Richter et al. (2006), Richter et al. (2012) und Donner et al. (2012) durchgeführt. Die Untersuchungen beschränkten sich auf relativ wenige Pegel (z. B. Marienleuchte, Travemünde, Wismar, Warnemünde, Barth, Sassnitz, Koserow, Greifswald, Swinoujscie, Kolobrzeg). Richter et al. (2012) detektierten lineare Trends in den RMSL-Jahreszeitreihen über die Zeitperiode 1908 bis 2007 von 0,6 mm/Jahr (Sassnitz) bis 1,5 mm/Jahr (Travemünde). Im Forschungsprojekt AMSeL_Ostsee haben Kelln et al. (2019a) sowie Patzke und Fröhle (2019) zum ersten Mal nachdigitalisierte hochaufgelöste Wasserstandszeitreihen ab etwa 1950 sowie vorhandene weitere Pegelaufzeichnungen genutzt, um insgesamt 43 qualitativ hochwertige MSL-Monatszeitreihen entlang der deutschen Ostseeküste zu erzeugen und zu untersuchen. Über das 20. Jahrhundert von 1900 bis 2015 ergeben sich nach Kelln (2019) für sechs Pegelstandorte entlang der südwestlichen Ostseeküste lineare Trends von:

- Marienleuchte: $0,9 \pm 0,1$ mm/Jahr,
- Travemünde: $1,7 \pm 0,1$ mm/Jahr,
- Wismar Baumhaus: $1,5 \pm 0,1$ mm/Jahr,
- Warnemünde: $1,6 \pm 0,1$ mm/Jahr,
- Swinoujscie: $1,2 \pm 0,1$ mm/Jahr,
- Kolobrzeg: $1,0 \pm 0,1$ mm/Jahr (Kelln 2019).

4 Meeresspiegelentwicklung über das 20. Jahrhundert mit Berücksichtigung von vertikalen Landbewegungen

Die bisher vorgestellten Untersuchungen zu Meeresspiegeländerungen in der Ostsee bezogen sich alle auf den relativen Meeresspiegel. Um die regionale Entwicklung jedoch mit dem globalen Meeresspiegelanstieg vergleichen bzw. einordnen zu können, ist es notwendig die absolute Meeresspiegelentwicklung zu betrachten. Da Pegel auf der Erdoberfläche installiert sind und daher »nur« relativ zum umgebenden Land die lokalen Variationen des relativen Meeresspiegels messen (Ekman 1988), sind zusätzlich Informationen zu vertikalen Landbewegungen notwendig. Pegelmessungen geben somit zum einen klimainduzierte Änderungen im Meeresspiegel wieder, die in Verbindung mit der Ozeanerwärmung, der Landeissschmelze oder der Wasserumverteilung stehen (Hünicke et al. 2017). Zum anderen werden durch die Relativmessung jedoch auch Bewegungen der Erdkruste mit gemessen. Vertikale Landbewegungen beruhen auf geodynamischen Prozessen (z. B. GIA, gegenwärtige Eisschmelze, Erdbeben, Vulkane, Erdbeben) oder auf lokalen/regionalen Effekten (z. B. Grundwasser- oder Gasentnahmen) (Woodworth 2006). In der Ostsee dominieren vertikale Landbewegungen aufgrund von GIA, die mit Hilfe von GIA-Modellen modelliert und für die betrachteten Zeitskalen der Pegelmessungen als

lineare Prozesse angenommen werden können. Mit Hilfe der aus GIA-Modellen erzeugten mittleren Landbewegungsraten für die Gegenwart (inklusive Geoidänderungen) können Pegelzeitreihen zumindest um die RMSL-Änderung aus GIA korrigiert werden. Eine Korrektur um lokale vertikale Landbewegungen über den Beobachtungszeitraum der Pegel ist derzeit noch nicht möglich. Grundsätzlich können vertikale Landbewegungen (lokal und aufgrund von GIA) präzise über GPS-Messungen aufgezeichnet werden, die zeigen, dass es sich um zeitlich nichtlineare Prozesse handelt. Da GPS-Messungen bisher noch nicht an allen Pegelstandorten und nur über einen kurzen Beobachtungszeitraum zur Verfügung stehen, können diese nicht über das gesamte 20. Jahrhundert extrapoliert und somit nicht für die Korrektur von langzeitlichen Pegelmessungen um vertikale Landbewegungen genutzt werden (Kelln et al. 2020).

Aussagen über den absoluten Anstieg des MSL sind also nur möglich, wenn die Wasserstandsbeobachtungen mit belastbaren Zeitreihen bzw. Aussagen über Vertikalbewegungen des Hinterlandes kombiniert werden. Die verlässliche Abschätzung von Vertikalbewegungen über einen längeren Zeitraum und den Anschluss an geologische Stabilbereiche ist eine zwingend erforderliche Voraussetzung für die Einordnung des absoluten MSL-Anstiegs (Dangendorf et al. 2020). Die Unsicherheiten der bisherigen Schätzwerte für den Anteil der vertikalen Landbewegungen an den Langzeittrends übersteigen entlang der deutschen Ostseeküste, die im Übergangsbereich zwischen Landhebungen und Landsenkungen liegt, die eigentlichen Trendschätzer. Beispielsweise liegen laut GIA-Modell NKG2016LU nach Vestøl et al. (2019), welches insbesondere für Fennoskandia entwickelt wurde, die RMSL-Änderungsraten aus GIA entlang der deutschen Ostseeküste im Bereich von $\pm 0,2$ mm/Jahr (siehe Abb. 1). Die Unsicherheiten in der GIA Modellierung werden zu 0,2 bis 0,4 mm/Jahr beziffert (Kelln et al. 2020).

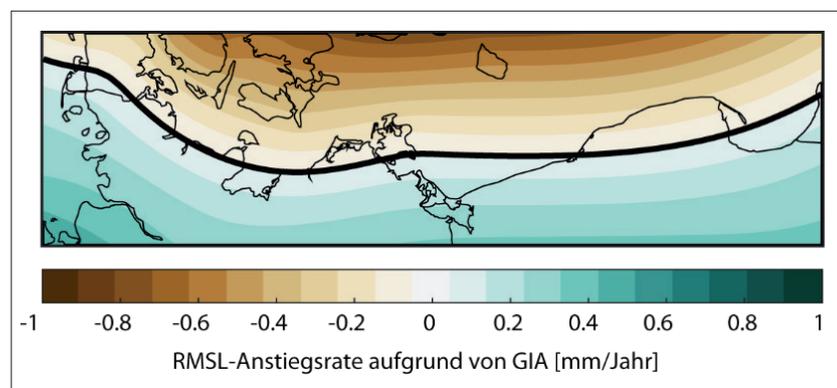


Abb. 1: Änderungen des RMSL entlang der südwestlichen Ostseeküste aufgrund von GIA relativ zum Geoid aus dem NKG2016LU-Modell nach Vestøl et al. (2019). Die Nulllinie ist durch eine breite schwarze Linie gekennzeichnet. Negative Werte kennzeichnen eine Landhebung, positive eine Landsenkung (Kelln et al., in Begutachtung)

Kelln et al. (2019a) detektierten positive Trends sowohl in den RMSL als auch in den um GIA nach NKG2016LU korrigierten RMSL-Zeitreihen entlang der südwestlichen Ostseeküste. Über das 20. Jahrhundert (1900 bis 2015) ergibt sich nach GIA-Korrektur für die südwestliche Ostseeküste ein linearer Trend von $1,2 \pm 0,1$ mm/Jahr (Kelln 2019). Für Küstenschutzbelange ist zu beachten, dass sich die lineare Trendentwicklung der RMSL-Zeitreihen für die Zeitperiode ab etwa Mitte des 20. Jahrhunderts (1960 bis 2015) entlang der schleswig-holsteinischen Küste leicht von den linearen Trends entlang der mecklenburg-vorpommerschen Küste unterscheidet. So weisen die meisten Pegel entlang der schleswig-holsteinischen Küste ab etwa Mitte des 20. Jahrhunderts etwas geringere Trends auf ($1,7 \pm 0,2$ mm/Jahr), als entlang der mecklenburg-vorpommerschen Küste ($2,0 \pm 0,3$ mm/Jahr) (Kelln 2019).

In dem vom BMBF geförderten KFKI-Forschungsprojekt MSLabsolut wurde der Fokus auf die räumlichen Differenzen der MSL-Entwicklung entlang der deutschen Küsten (Nord- und Ostsee) gelegt, besonders im Hinblick auf die Rolle der vertikalen Landbewegungen (Dangendorf et al. 2020). Durch die Entwicklung einer neuartigen hybriden Rekonstruktionsmethodik konnten relative MSL-Felder über das gesamte 20. Jahrhundert von 1900 bis 2015 in einer hohen räumlichen Auflösung an die deutschen Küsten transferiert werden. Hierdurch wurde die Bewertung potenzieller anthropogener und postglazialer vertikaler Landbewegungen ermöglicht. An der deutschen Küste ergeben sich aus dieser Betrachtung vertikale Landbewegungsschätzungen für die deutschen Küsten, die in den meisten Fällen $\pm 0,5$ mm/Jahr nicht überschreiten. Einzelne Ausnahmen können auf lokale Gasentnahmen oder bisher nicht detektierte Nullpunktverschiebungen zurückgeführt werden. Der Median der um residuale vertikale Landbewegungen korrigierten RMSL-Zeitreihen entlang der deutschen Ostseeküste liegt bei $1,6 \pm 0,1$ mm/Jahr (Dangendorf et al. 2020).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die deutsche Ostseeküste über das 20. Jahrhundert eine MSL-Entwicklung aufweist, die sich hinsichtlich des Langzeittrends nicht wesentlich von der des globalen Mittels (von 1,3 bis 2 mm/Jahr) unterscheidet (vgl. Church und White 2011; Jevrejeva et al. 2014; Hay et al. 2015; Dangendorf et al. 2017; Dangendorf et al. 2019). Detaillierte Analysen zeigen jedoch signifikante räumliche Differenzen in der langzeitlichen MSL-Entwicklung entlang der deutschen Ostseeküste (Kelln et al. 2020). Vorläufige Untersuchungen zu den Ursachen dieser Differenzen lassen einerseits lokal variable vertikale Landbewegungen und andererseits Änderungen in den dominanten Westwindlagen (Dangendorf et al. 2014; Gräwe et al. 2019) als potenzielle Erklärungen vermuten. Für weitere Erläuterungen be-

züglich der Einflussfaktoren auf die linearen Trends sowie die Meeresspiegelvariabilität in der Ostsee wird auf Kelln (2019) verwiesen.

5 Zusammenfassung

Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels führt weltweit zu einer Gefährdung von Küstenregionen. Auch in der Ostsee ist durch die weiter zunehmende Besiedelung der Küstenbereiche sowie die intensive Nutzung für Wirtschaft, Tourismus und Naturschutz eine erhöhte Vorsorge vor einem steigenden Meeresspiegel unabdingbar. Um einen vorausschauenden und effektiven Küstenschutz zu betreiben, sind Kenntnisse über die lokale und regionale Entwicklung des mittleren Meeresspiegels sowie die Einordnung dieser Größen in die globale Entwicklung von entscheidender Bedeutung. Hierzu werden qualitativ hochwertige und möglichst langzeitliche Messungen des MSL benötigt. Die Ostsee gehört mit einigen der längsten Pegelaufzeichnungen zu den am besten bepegelten Gebieten weltweit. Dadurch konnten schon frühzeitig Untersuchungen zur Meeresspiegelentwicklung vorgenommen und für unterschiedliche betrachtete Zeitperioden sowie anhand von verschiedenen Pegelstandorten in der südwestlichen Ostsee lineare Trends im Bereich von 0,6 bis 2,6 mm/Jahr ermittelt werden.

Während die linearen Trends der RMSL-Zeitreihen für den Küstenschutz von besonderer Bedeutung sind, ist die Ermittlung der Meeresspiegel-trends anhand der um GIA bereinigten Zeitreihen

wichtig für die Einordnung der absoluten Meeresspiegeländerungen. Lineare Trends des RMSL können durch vertikale Landbewegungen beeinflusst sein und somit die absoluten Trends der Meeresspiegeländerungen, die vorwiegend klimatisch induziert sind, überdecken. Eine Bereinigung der RMSL-Zeitreihen um GIA ermöglicht eine zumindest etwas genauere Einordnung der klimatisch induzierten Trends, wenn die Zeitreihen nicht noch zusätzlich durch große lokale Landbewegungen beeinflusst sind. Je nach Korrekturmethode konnten lineare Trends über das 20. Jahrhundert von 1900 bis 2015 von $1,2 \pm 0,1$ mm/Jahr (Kelln et al. 2020) bis $1,6 \pm 0,1$ mm/Jahr (Dangendorf et al. 2020) für die gesamte südwestliche Ostsee ermittelt werden, die im Bereich der Trendschätzer für den GMSL liegen. Aufgrund der Verbindung der Ostsee durch die dänische Meerenge mit der Nordsee bzw. dem Nordatlantik spiegelt sich somit die Entwicklung des GMSL auch in der Ostsee wider. Zusätzlich überlagern jedoch lokale Effekte die Meeresspiegelentwicklung und führen zu geringfügigen regionalen und lokalen Unterschieden. Kenntnisse über die vergangene und gegenwärtige Entwicklung des Meeresspiegels entlang der deutschen Ostseeküste sind für die regionale und lokale Küstenschutzplanung von entscheidender Bedeutung und müssen insbesondere im Hinblick auf eine mögliche Beschleunigung weiterhin sorgfältig beobachtet werden, um notwendige Küstenschutzmaßnahmen rechtzeitig umzusetzen. //

Danksagung

Unser Dank gebührt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das die Projekte AMSeL_Ostsee und MSLabsolut aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Leitung des Projektträgers Jülich (PTJ) finanziell gefördert hat. Weiterhin bedanken wir uns bei allen Projektpartnern für die konstruktive Zusammenarbeit.

Literatur

- Bogdanov, V. I.; M. Yu. Medvedev et al. (2000): Mean monthly series of sea level observations (1777–1993) at the Kronstadt gauge. Reports of the Finnish Geodetic Institute
- Celsius, Anders (1743): Anmärkning om vatnets förminskande så i Östersjön som Vesterhafvet. Kongl. Swenska Wetenskaps Akademiens Handlingar, 4, S. 33–50
- Church, John A.; Neil J. White (2011): Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. Surveys in Geophysics, DOI: 10.1007/s10712-011-9119-1
- Dangendorf, Sönke; Jessica Kelln et al. (2020): Untersuchungen zur Rekonstruktion des Meeresspiegels und vertikaler Landbewegungen an den deutschen Küsten. Die Küste, in Begutachtung
- Dangendorf, Sönke; Francisco M. Calafat et al. (2014): Mean sea level variability in the North Sea: Processes and implications. Journal of Geophysical Research: Oceans, DOI: 10.1002/2014JC009901
- Dangendorf, Sönke; Carling Hay et al. (2019): Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. Nature Climate Change, DOI: 10.1038/s41558-019-0531-8
- Dangendorf, Sönke; Marta Marcos et al. (2017): Reassessment of 20th century global mean sea level rise. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, DOI: 10.1073/pnas.1616007114
- Donner, Reik V.; R. Ehrcke et al. (2012): Spatial patterns of linear and nonparametric long-term trends in Baltic sea-level variability. Nonlinear Processes in Geophysics, DOI: 10.5194/npg-19-95-2012
- Ekman, Martin (1988): The world's longest continued series of sea level observations. PAGEOPH, DOI: 10.1007/BF00878691
- Ekman, Martin (1991): A concise history of postglacial land uplift research (from its beginning to 1950). Terra Nova, DOI: 10.1111/j.1365-3121.1991.tb00163.x
- Führböter, Alfred; Jürgen Jensen (1985): Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, 42, S. 78–100
- Gaye, Julius (1951): Die Wasserstandsänderungen in der Ostsee und in der Nordsee in den letzten 100 Jahren. Die Wasserwirtschaft, Sonderheft: Vorträge der Gewässerkundlichen Tagung 1951 in Hamburg
- Geinitz, F. Eugen (1883): Ueber die gegenwärtige Senkung der mecklenburgischen Ostseeküste. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, www.schweizerbart.de/papers/zdgg_alt/detail/35/61966/Ueber_die_gegenwaertige_Senkung_der_mecklenburgischen_Ostseekueste
- Gräwe, Ulf; Knut Klingbeil et al. (2019): Decomposing mean sea level rise in a semi-enclosed basin, the Baltic Sea. Journal of Climate, DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0174.1

- Hagen, Gotthilf (1878): Vergleichung der Wasserstände der Ostsee an der Preussischen Küste, Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften in Berlin. Königliche Akademie der Wissenschaften; Mathematische Abhandlungen der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften
- Hahn, Artur; Ernst Rietschel (1938): Langjährige Wasserstandsbeobachtungen an der Ostsee. Berichte und Mitteilungen, Baltische Hydrologische Konferenz
- Hay, Carling C.; Eric D. Morrow et al. (2015): Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nature*, DOI: 10.1038/nature14093
- Hünicke, Birgit; Eduardo Zorita (2008): Trends in the amplitude of Baltic Sea level annual cycle. *Tellus*, DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00277.x
- Hünicke, Birgit; Eduardo Zorita; Hans von Storch (2017): The Challenge of Baltic Sea Level Change. In: Jan Harff, Kazimierz Furmańczyk und Hans von Storch (Hg.): *Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East. Past and Future Projection*, Bd. 19. Springer International Publishing, Cham, Schweiz (Coastal research library, 19), S. 37–54
- Hupfer, Peter; Jan Harff et al. (2003): Die Wasserstände an der Ostseeküste. *Entwicklung – Sturmfluten – Klimawandel. Die Küste, Sonderheft 66*
- Jacoby, G. (1925): Beitrag zur Geschichte der Pegel. Die Bautechnik, http://delibra.bg.polsl.pl/Content/21062/BCPS_22632_1925-H32_Die-Bautechnik--Jg---.pdf
- Janssen, Frank (2002): Statistische Analyse mehrjähriger Variabilität der Hydrographie in Nord- und Ostsee. Möglichkeiten zur Validation und Korrektur systematischer Fehler eines regionalen Ozeanmodells. Dissertation, Universität Hamburg
- Jensen, Jürgen (2020): Retrospektive der Meeresspiegelforschung in Deutschland. Teil 1: Deutsche Nordseeküste. *Hydrographische Nachrichten*, DOI: 10.23784/HN115-03
- Jensen, Jürgen; Christoph Mudersbach (2004): Analyses of Variations in Water Level Time-Series at the Southern Baltic Sea Coastline. *Coastline Reports*, 2, S. 175–184
- Jensen, Jürgen; Andrea Töppe (1986): Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 4
- Jensen, Jürgen; Andrea Töppe (1990): Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 1/2
- Jevrejeva, Svetlana; J. C. Moore et al. (2014): Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807. *Global and Planetary Change*, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.12.004
- Kelln, Jessica (2019): Untersuchungen zu Änderungen und Einflussgrößen des mittleren Meeresspiegels in der südwestlichen Ostsee. Dissertation, Siegen
- Kelln, Jessica; Sönke Dangendorf et al. (2020): Entwicklung des mittleren Meeresspiegels entlang der südwestlichen Ostseeküste. *Die Küste*, in Begutachtung
- Kelln, Jessica; Sönke Dangendorf; Jürgen Jensen (2019a): AMSeL_Ostsee A: Analyse vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger Wasserstände in der südwestlichen Ostsee. Abschlussbericht. Förderkennzeichen BMBF 03KIS114. Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Siegen
- Kelln, Jessica; Sönke Dangendorf et al. (2019b): Monthly sea level from tide gauge stations at the German Baltic coastline (AMSeL_Baltic Sea). PANGAEA. DOI: 10.1594/PANGAEA.904737
- Kühnen, Friedrich (1916): Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona, Swinemünde, Pillau, Memel und das Mittelwasser der Nordsee bei Bremerhaven in den Jahren 1898–1910. Veröffentlichungen des Königl. Preußischen Geodätischen Institutes, Neue Folge Nr. 70
- Lampe, Reinhard; Elisabeth Endtmann et al. (2010): Relative sea-level development and isostasy along the NE German Baltic Sea coast during the past 9 ka. *E&G Quaternary Science Journal*, DOI: 10.3285/eg.59.1-2.01
- Leppäranta, Matti; Kai Myrberg (2009): *Physical oceanography of the Baltic Sea*. Springer/Praxis Pub., Berlin, Chichester
- Liebsch, Gunter (1997): *Aufbereitung und Nutzung von Pegelmessungen für geodätische und geodynamische Zielstellungen*. Dissertation, München
- Liebsch, Gunter; Reinhard Dietrich et al. (2000): Die Reduktion langjähriger Wasserstandsmessungen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns auf einen einheitlichen Höhenbezug. *Die Küste*, 62, S. 7–32
- Matthäus, Wolfgang (1972): On the history of recording tide gauges. *Proceeding of the Royal Society of Edinburgh*, 3
- Paschen, F. (1856): Über die Wahrnehmbarkeit von Ebbe und Fluth in der Ostsee. In: Großherzoglich Mecklenburgisches Statistisches Büro zu Schwerin (Hg.): *Archiv für Landeskunde in den Großherzogthümern Mecklenburg-Schwerin*. Schwerin: Sandmeyer, 137–150 und 255.
- Paschen, Friedrich (1869): Beitrag zur Untersuchung der Frage über die Hebung der deutschen Ostsee. In: *Beiträge zur Statistik Mecklenburgs*
- Paschen, Friedrich (1882): Wasserstandsbeobachtungen an den Ostseepiegeln zu Wismar und Warnemünde. In: *Die geometrischen Nivellements*. Großherzoglich Mecklenburgische Landesvermessung, S. 96–106
- Patzke, Justus; Peter Fröhle (2019): Analyse von hochaufgelösten Wasserstandverläufen und Ermittlung des MSL sowie von Extremwasserständen an der südlichen und südwestlichen Ostseeküste (AMSeL_Ostsee). Teilvorhaben B – Zeitliche Entwicklung von Extremwasserständen unter Berücksichtigung von vertikalen Landbewegungen auf die relativen Wasserstandänderungen. Abschlussbericht. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, Institut für Wasserbau
- Plag, Hans-Peter; Michael N. Tsimplis (1999): Temporal variability of the seasonal sea-level cycle in the North Sea and Baltic Sea in relation to climate variability. *Global and Planetary Change*, DOI: 10.1016/S0921-8181(98)00069-1
- Richter, Andreas; Reinhard Dietrich; Jens Wendt (2006): Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee. *Die Küste*, 71, S. 33–59
- Richter, Andreas; Andreas Groh; Reinhard Dietrich (2012): Geodetic observation of sea-level change and crustal deformation in the Baltic Sea region. *Physics and Chemistry of the Earth*, DOI: 10.1016/j.pce.2011.04.011
- Rietschel, Ernst (1933): Neuere Untersuchungen zur Frage der Küstensenkung. *Deutsche Wasserwirtschaft*, 5, S. 81–86

- Samuelsson, Madleine; Anders Stigebrandt (1996): Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic sea. *Tellus*, DOI: 10.1034/j.1600-0870.1996.t01-4-00006.x
- Seibold, Eugen; Ilse Seibold (2012): Zum Auf und Ab des Meeresspiegels in Skandinavien: Langer Streit um Eustasie oder Isostasie. *International Journal of Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s00531-011-0692-9
- Seibt, Wilhelm (1881): Das Mittelwasser der Ostsee bei Swinemünde. Publication des Königl. Preuss. Geodätischen Instituts
- Seibt, Wilhelm (1885): Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde. Publication des Königl. Preuss. Geodätischen Instituts
- Seibt, Wilhelm (1890): Das Mittelwasser der Ostsee bei Swinemünde. Zweite Mitteilung. Veröffentlichung des Königl. Preuss. Geodätischen Instituts
- Vestøl, Olav; Jonas Ågren et al. (2019): NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-019-01280-8
- Wegmann, E. (1969): Changing ideas about moving shorelines. In: G. J. Scheer (Hg.): *Towards a history of geology*, S. 386–414
- Westphal, Alfred (1900): Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona und Swinemünde in den Jahren 1882/1897. Veröffentlichung des Königl. Preussischen Geodätischen Instituts, Neue Folge Nr. 2
- Woodworth, Philip L. (2006): Some important issues to do with long-term sea level change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, DOI: 10.1098/rsta.2006.1737
- Worsaae, Jens Jakob Asmussen (1873): *De Danskes Kultur i Vikingetiden* (Die dänische Kultur in der Wikingerzeit)

Die Fokusthemen der nächsten Ausgaben

Wir haben uns entschieden, die Fokusthemen der nächsten Hefte schon vorab zu verraten, weil wir uns dadurch interessante Fachbeiträge von Ihnen erhoffen. Beiträge, auf die wir selbst nicht gekommen wären, die wir folglich niemals angefragt hätten.

- | | |
|-----------------------|---|
| HN 117 (Oktober 2020) | Tiefsee
Redaktionsschluss: 15. September 2020 |
| HN 118 (Februar 2021) | Numerische Modelle in der Hydrographie
Redaktionsschluss: 15. Januar 2021 |
| HN 119 (Juni 2021) | Häfen und Verkehre der Zukunft
Redaktionsschluss: 30. April 2021 |

Falls Sie zu einer Ausgabe einen thematisch passenden Fachbeitrag beisteuern können, so melden Sie sich bitte bei der Redaktion oder schicken Sie Ihren Beitrag an: lars.schiller@dhyg.de. Fachbeiträge zu anderen Themen der Hydrographie sind natürlich weiterhin willkommen. Wir freuen uns auf das Wissen, das Sie mit uns teilen.