

# AMSeL\_Ostsee: Analyse von hochauflösenden Wasserstandsverläufen und Ermittlung des MSL sowie von Extremwasserständen an der südlichen und südwestlichen Ostseeküste

Jürgen Jensen<sup>1</sup>, Peter Fröhle<sup>2</sup>, Sönke Dangendorf<sup>3</sup>, Jessica Kelln<sup>4</sup> und Justus Patzke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), [juergen.jensen@uni-siegen.de](mailto:juergen.jensen@uni-siegen.de)

<sup>2</sup> Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau

<sup>3</sup> Tulane University, Department for River-Coastal Science and Engineering, USA

<sup>4</sup> Bundesanstalt für Wasserbau

## Zusammenfassung

Das Verbundprojekt AMSeL\_Ostsee (03KIS0114 & 03KIS0115) wurde zwischen 2015 und 2018 durch das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen und das Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg bearbeitet. Dabei standen insbesondere die Recherche, Akquise, Aufbereitung und ggf. zusätzliche Digitalisierung verfügbarer Pegel­daten in der Ostsee mit einem Fokus auf die südliche und südwestliche Ostseeküste im Mittelpunkt der Untersuchungen. Anhand der somit verfügbaren Pegelzeitreihen mit unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen wurden möglichst langjährige und qualitativ hochwertige Wasserstandszeitreihen aufbereitet. Im Ergebnis wurden Monatszeitreihen des mittleren Meeresspiegels (MSL) generiert sowie Extremwertzeitreihen zusammengestellt und untersucht.

## Schlagwörter

Meeresspiegelanstieg, Wasserstände, Ostsee, Extremereignis, Sturmflut, Sturmhochwasser, Tidepegel, MSL, AMSeL\_Ostsee

## Summary

*The collaborative project AMSeL\_Baltic Sea (03KIS0114 & 03KIS0115) 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 Hydraulic Engineering at the Technical University Hamburg-Harburg. In particular, the investigation concentrated on the research, acquisition, processing and, if necessary, additional digitisation of available sea level data in the Baltic Sea with a focus on the southern and south-western Baltic Sea coast. On the basis of the total available sea level time series with different temporal resolutions, long-term and high-quality monthly time series of the mean sea level (MSL) as well as extreme sea level time series were generated and investigated.*

## Keywords

*Sea level rise, water levels, Baltic Sea, extreme event, storm surge, storm high tide, tide gauge, MSL, AMSeL\_Baltic Sea*

## 1 Einleitung und Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet des Projektes AMSeL\_Ostsee beschränkt sich im Wesentlichen auf die südliche und südwestliche Ostsee, genauer die deutsche und polnische Ostseeküste, wobei für ein besseres System-/Prozessverständnis sowie für weitergehende räumliche Untersuchungen auch Pegel aus der gesamten Ostsee sowie der benachbarten Nordsee und dem Nordatlantik integriert wurden.

Die Ostsee ist aufgrund ihrer mittleren Tiefe von ca. 52 m und der weit größeren Horizontalausdehnung über eine Fläche von 415.266 km<sup>2</sup> ein typisches Flachgewässer (Hupfer et al. 2003). Mit ihrem Volumen von ca. 22.000 km<sup>3</sup> bildet die Ostsee ein kleines, interkontinentales Nebenmeer des Atlantischen Ozeans und ist eines der größten Brackwassermeere der Welt (Hupfer et al. 2003, Hünicke 2008). Die Ostsee ist über die Nordsee mit dem Nordostatlantik verbunden und liegt auf dem Nordeuropäischen Schelf. Somit werden Prozesse, die auf dem Nordeuropäischen Schelf und im Nordostatlantik generiert werden, auch in die Ostsee eingetragen. Die Verbindung zwischen Nord- und Ostsee beginnt mit dem bis zu 700 m tiefen, zur Nordsee zugehörigen Skagerrak. Das anschließende Kattegat ist mit einer durchschnittlichen Tiefe von 80 m hingegen sehr flach und behindert gemeinsam mit der Meerenge von Öresund und dem Beltmeer den Wasseraustausch zwischen der Ostsee und dem offenen Meer. Der drosselnde Effekt des engen und flachen Einlaufbereichs in die Ostsee ist nach Ekman (2009) Hauptgrund dafür, dass es in der Ostsee nur sehr gering ausgeprägte Gezeitensignale gibt. Die Verbindungen zwischen den restlichen Hauptbecken der Ostsee sind im Vergleich zur dänischen Meerenge breit und tief, wodurch sie einen viel schnelleren Wasseraustausch ermöglichen (Winsor et al. 2001).

Die Einordnung des vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Meeresspiegelverlaufs ist für die nachhaltige und sichere Nutzung der Küstenregionen von Nord- und Ostsee von größter Bedeutung. Vor diesem Hintergrund ist es insbesondere der mittlere Meeresspiegel (englisch: Mean Sea Level (MSL)), der sich als Basisgröße zur Beurteilung von Klimaszenarien und als Grundlage für die Risikobewertung bei Extremereignissen bzw. Sturmfluten an der Nordseeküste oder Sturmhochwasser an der Ostseeküste etabliert hat. Weiterhin ist er die Grundlage für weitergehende wasserwirtschaftliche und küstenhydrologische Fragestellungen sowie Bemessungen von Küstenschutzbauwerken sowie der zukünftigen strategischen Ausrichtung des integrierten Küstenzonenmanagements.

Für die Nordsee wurde im Rahmen des KFKI-Projektes „AMSeL - Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste“ (gefördert durch das BMBF unter der Projektnummer 03KIS068) die Entwicklung des mittleren Meeresspiegels in der Deutschen Bucht seit 1843 auf Basis hochaufgelöster Pegeldaten analysiert (Jensen et al. 2011a, Jensen et al. 2011b). Gleichzeitig wurden Untersuchungen zu Verweildauern von bestimmten Wasserständen und Tideketten durchgeführt. Entsprechende Auswertungen und Forschungsergebnisse aus dem KFKI-Projekt AMSeL haben u. a. ergeben, dass Langzeittrends, welche aus den dort ermittelten relativen MSL Zeitreihen der Deutschen Bucht abgeleitet wurden, überwiegend Übereinstimmungen mit

gleichen Trenduntersuchungen von anderen regionalen oder globalen Untersuchungen aufweisen. Zudem konnte ein beschleunigter MSL Anstieg um 1900 sowie innerhalb der zurückliegenden Dekaden detektiert werden. Vor allem im Hinblick auf den Vergleich mit Beobachtungsdaten über die vergangenen 166 Jahre können die ermittelten Meeresspiegelanstiegsraten innerhalb der letzten Jahre nicht als ungewöhnlich bezeichnet werden. Weiterhin zeigte der Vergleich der Rekonstruktion des MSL-Verlaufs der Deutschen Bucht mit globalen MSL Rekonstruktionen erhebliche regionale Differenzen auf interannuellen bis mehrdekadischen Zeitskalen, was die Notwendigkeit von regionalen Klima- und MSL-Anstiegsprojektionen für Zwecke des Küsteningenieurwesens hervorhebt. Diese regionalen Rekonstruktionen sind deshalb für den Küstenschutz von weitaus größerer Relevanz als globale Projektionen.

Hieraus leitet sich das Ziel ab, die entsprechenden Auswertungen in vergleichbarer Art auf die Pegel im Ostseeraum auszudehnen und die in AMSeL entwickelten Methoden zur Analyse vorhandener Wasserstandsdaten zu ergänzen und zu erweitern. Insbesondere eine methodisch vergleichbare Auswertung von Ostseepegeln mit Pegeln der Nordseeküste sollte hilfreiche Erkenntnisse über den Vergleich der Charakteristik und des Ausmaßes der MSL Änderungen in beiden Meeren ergeben sowie einen Beitrag zum besseren Verständnis über die wechselseitigen Beziehungen zwischen Nordsee und Ostsee und hintergründige Prozesse (z. B. Meeresspiegelanstiegssignal aus dem Nordatlantik) liefern. Weiterhin ist es von Bedeutung, Muster zeitlicher Schwankungen erkennen und erklären zu können. Dazu werden u. a. meteorologische und ozeanografische Datensätze in die Untersuchung miteinbezogen.

Weiterhin haben auch die Effekte und Auswirkungen von Extremwetterlagen bzw. extremen Wasserständen große Bedeutung. Aufgrund des geringen Einflusses der Gezeiten in der Ostsee ist die Dauer entsprechender Extremereignisse (Sturmfluten bzw. Sturmhochwasser) im Wesentlichen von der Dauer der Sturmflut erzeugenden Wetterlagen abhängig. Diese können an der Ostsee bis zu mehreren Tagen andauern und sind somit im Gegensatz zur Nordsee ein wesentlicher Faktor sowohl im zeitlich variierenden Verhalten des MSL als auch hinsichtlich der Gefährdung und Belastung der Küstenregion über längere Zeiträume (Mudersbach und Jensen 2009a, 2009b). Aus diesem Grund sollen weiterhin die Auswirkungen der MSL-Variationen auf extreme Hochwasserereignisse in die Untersuchung einbezogen werden, um ein geschlossenes Bild der Gefährdungslage der Küste, aber auch des Langzeitverhaltens des MSL zu erhalten.

## 2 Das Verbundprojekt AMSeL\_Ostsee

Ziel des Vorhabens ist die Analyse von hochaufgelösten Wasserstandsaufzeichnungen an möglichst vielen Standorten entlang der südlichen und südwestlichen Ostseeküste. Auf der Grundlage von konsistenten Stichproben für Wasserstandsganglinien aus (verfügbaren) Messdaten (Pegeldaten, Satellitendaten, GPS) wird die räumliche und zeitliche Verteilung des MSL ermittelt. Hierzu werden statistische Verfahren zur Mittelwertbildung herangezogen und auf die Messdaten angewendet. Insbesondere sollen der detaillierte Verlauf und Trend (linear und nicht-linear) des MSL und von Extremereignissen ausgewertet werden. Im Detail sollen folgende Forschungsziele erreicht werden:

- Ermittlung qualitativ hochwertiger Monats-MSL-Zeitreihen für eine größere Anzahl von Pegeln auf Basis möglichst hochaufgelöster Wasserstandsdaten

- Ableitung einer räumlich und zeitlich konsistenten mittleren Zeitserie des MSL (und der extremen Einzelereignisse) in der südlichen und südwestlichen Ostsee
- Die Ermittlung der wesentlichen Einflüsse auf die beobachteten relativen Wasserstandsänderungen; Landhebungs- und -senkungseffekte spielen, wie im Stand der Forschung aufgeführt, vermutlich eine große Rolle und sollen daher quantifiziert werden (durch regional hoch aufgelöste GIA-Modelle, GPS Messungen am Tidepegel, geologische Untersuchungen)
- Einbeziehung von Extremereignissen und statistische Analyse der zeitlichen Entwicklung extremer Hochwasserereignisse unter Berücksichtigung der Entwicklung des MSL
- Einordnung der ermittelten Veränderungen des mittleren Meeresspiegels in großräumige Untersuchungen und Vergleich mit anderen Bereichen (z. B. in welcher Form kann die Ostsee als gedämpfter Nordsee-Pegel aufgefasst werden und wie gut sind globale Meeresspiegelszenarien auf Basis der Analyse der Beobachtungsdaten für das Untersuchungsgebiet einzuschätzen?)

Im Ergebnis des Forschungsvorhabens sind detaillierte Kenntnisse über die in der Vergangenheit stattgefundenen Änderungen des MSL entlang der deutschen und (teilweise auch der) polnischen Ostseeküste verfügbar, die mit aktuellsten Wasserstandsdaten und methodischen Ansätzen sowie auf dem Stand der Wissenschaft erarbeitet wurden (im Gegensatz hierzu wurden in früheren Studien vielfach unter anderem auch PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) – Datensätze herangezogen, welche zwar leicht verfügbar, zumindest im Falle der deutschen Ostseeküste jedoch teilweise inkonsistent sind). Weiterhin wird hierdurch eine Wissenslücke im Vergleich zur deutschen Nordseeküste geschlossen. Es wurde auch überprüft, inwieweit kohärente Änderungen entlang der gesamten südwestlichen und südlichen Ostseeküste (auch im Vergleich zur Nordsee) zu beobachten sind.

Das Verbundprojekt gliedert sich in die beiden Teilprojekte

AMSeL_Ostsee A: 03KIS0114	Analyse vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger Wasserstände in der südwestlichen Ostsee (fwu, Universität Siegen)
AMSeL_Ostsee B: 03KIS0115	Zeitliche Entwicklung von Extremwasserständen in der südwestlichen Ostsee unter Berücksichtigung von vertikalen Landbewegungen auf die relativen Wasserstandsänderungen (TUHH)

Wesentliche Ergebnisse der beiden Teilprojekte können den jeweiligen Beiträgen in dieser Ausgabe von „Die Küste“ entnommen werden. Eine Beschreibung der Inhalte der beiden Teilprojekte sowie eine detaillierte Darstellung der durchgeführten Arbeiten sind den jeweiligen Abschlussberichten Kelln et al. (2019) und Patzke und Fröhle (2019) zu entnehmen.

### 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 konstruktive Zusammenarbeit.

#### 4 Literaturverzeichnis

Ekman, M.: The changing level of the Baltic Sea during 300 years. A clue to understanding the earth. Summer Institute for Historical Geophysics, Godby, 2009.

Hünicke, B.: Atmospheric forcing of decadal Baltic Sea level variability in the last 200 years: A statistical analysis. Dissertation. Universität Hamburg, 2008.

Hupfer, P.; Harff, J.; Sterr, H.; Stigge, H.-J. (Hg.): Die Wasserstände an der Ostseeküste. Entwicklung – Sturmfluten – Klimawande. 2003.

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.: AMSeL\_Ostsee A – Analyse vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger Wasserstände in der südwestlichen Ostsee. Abschlussbericht Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Siegen, 2019.

Mudersbach, C.; Jensen, J.: Extremwertstatistische Analyse von historischen, beobachteten und modellierten Wasserständen an der deutschen Ostseeküste. In: Die Küste, 75, MUSTOK. Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der deutschen Ostseeküste, 131–161, 2009a.

Mudersbach, C.; Jensen, J.: Statistische Extremwertanalyse von Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste. Abschlussbericht 1.4 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK) Universität Siegen, 2009b.

Patzke, J.; Fröhle, P.: AMSeL\_Ostsee B – Zeitliche Entwicklung von Extremwasserständen unter Berücksichtigung von vertikalen Landbewegungen auf die relativen Wasserstandänderungen. Abschlussbericht Technische Universität Hamburg-Harburg, 2019.

Winsor, P.; Rodhe, J.; Omstedt, A.: Baltic Sea ocean climate: an analysis of 100 yr of hydrographic data with focus on the freshwater budget. In: Climate Research, 18, 5–15. <https://doi.org/10.3354/cr018005>, 2001.