

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Patzke, Justus; Fröhle, Peter

Zeitliche Entwicklung von Extremwasserständen entlang der südwestlichen Ostseeküste

Die Küste

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

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110455>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Patzke, Justus; Fröhle, Peter (2022): Zeitliche Entwicklung von Extremwasserständen entlang der südwestlichen Ostseeküste. In: Die Küste 91. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 221-266. <https://doi.org/10.18171/1.091108>.

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.



Zeitliche Entwicklung von Extremwasserständen entlang der südwestlichen Ostseeküste

Justus Patzke¹ und Peter Fröhle²

¹ Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau, Justus.Patzke@tuhh.de

² Technische Universität Hamburg, Institut für Wasserbau

Zusammenfassung

Eine wesentliche Grundlage zur Analyse von langfristigen Änderungen von Wasserständen für größere Küstenabschnitte sind räumlich und zeitlich hochaufgelöste aufbereitete Pegel­daten. Im Rahmen des Vorhabens AMSeL_Ostsee wurden verfügbare Wasserstandsdaten von Pegelmessstationen entlang der gesamten Ostseeküste zusammengetragen und in einer Datenbank (AMSeL-Datenbasis) einheitlich formatiert abgelegt. Ergänzt durch Digitalisierungen von historischen Pegelschrieben und Wasserstandslisten wurde somit eine einzigartige Grundlage für die Analysen im Vorhaben und darüber hinaus geschaffen. Zur Sicherstellung der Qualität der Analysen und Bewertungen wurde im Rahmen einer umfassenden Datenaufbereitung eine Methodik zur Plausibilisierung von Wasserstandsdaten entwickelt und angewandt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Daten (soweit möglich) in ein einheitliches Bezugssystem überführt, und bekannte Offsets wurden korrigiert. Auf Grundlage der im Vorhaben AMSeL_Ostsee erzeugten Datenbasis wurden Analysen zur Beurteilung der zeitlichen Entwicklung von Extremwasserständen mit Schwerpunkt auf die südliche und südwestliche Ostsee durchgeführt. Anhand der Entwicklung von Verweilzeiten und Häufigkeiten von Sturmhochwasserständen sowie der zeitlichen Änderung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Extremwasserständen – hierzu wurde im Vorhaben eine eigene Methodik entwickelt – wurde ein aktueller Überblick über das derzeitige und zukünftige Sturmflutgeschehen für die südlichen und südwestlichen Küsten der Ostsee erstellt.

Schlagwörter

AMSeL_Ostsee, Extremwasserstände, Pegel­daten, Plausibilisierung, Trends, Wasserstandsstatistik, Ostsee, Eintrittswahrscheinlichkeit

Summary

An essential base for the analysis of long-term changes of water levels of a larger coastal section is a comprehensive source of long-term and processed water-level data. In the context of the project AMSeL_Ostsee available water level data of tide gauge measurements were therefore acquired and uniformly formatted into a database. Supplemented by digitizations of historical tide gauge records, a unique base for the analyses in the project was created. Subsequently, a methodology for the plausibility check of water level data was developed and applied in the context of a comprehensive data preparation using high-resolution hourly data. For comparison purposes, the data is (as far as possible) converted into a uniform reference system and

known offsets are corrected. With the database developed within AMSEL_Ostsee which is up to date and plausibilized using state of the art scientific approaches analyses have been carried out to assess the temporal development of extreme water levels. Based on the development of residence times and storm flood frequencies as well as an applied investigation methodology for the temporal change of the occurrence probabilities of extreme water levels, an overview of the current and future occurrence of storm surge levels on the southern and southwestern coasts of the Baltic Sea is given.

Keywords

AMSeL_Baltic Sea, extreme sea level, tide gauge data, plausibilization, trends, sea level statistic, Baltic sea, probability of occurrence

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Küsten der Ostsee sind eine seit langem bevölkerte Zone, die seit etwa 1581 (Geltinger Noor) durch Deiche und bereits seit 1423 durch andere Küstenschutzmaßnahmen vor Extremereignissen geschützt werden. Durch Stürme erzeugte Extremwasserstände stellen eine wesentliche Belastung für Küstenschutzbauwerke dar und Veränderungen im Sturmflutgeschehen können signifikante Konsequenzen für Küstenschutzanlagen haben. Beispielsweise können hieraus erhöhte Instandhaltungsaufwendungen, Verstärkungen der Anlagen, Ersatzneubauten oder sogar die Errichtung neuer Küstenschutzanlagen zur Erhaltung bisher ungeschützter Gebiete erforderlich werden.

Zur Beurteilung langfristiger Veränderungen werden in der Ostsee seit 1774 Wasserstände am Pegel Stockholm aufgezeichnet (Ekman 1988). Seit 1882 werden an der deutschen Ostseeküste systematische und automatisierte (Mareographen) Aufzeichnungen zur Beurteilung der Wasserstandsänderungen durchgeführt (Paschen 1882). Zuvor galten Wasserstandsmessungen meist ausschließlich nautischen Zwecken, was die Informationslage und die Verwendung dieser Daten heutzutage erschwert. Seither wurde das Pegelnetz beständig ausgeweitet. Die Dokumentation und Auswertung der Wasserstandsdaten ist ein essentieller Schritt zum Verständnis des Wasserstandsverhaltens und somit zum Schutz der Küsten (Seibt 1881, 1885, 1890, Westphal 1900, Kühnen 1916, Montag 1964, Hupfer et al. 2003). Analysen extremer Wasserstände werden bereits seit geraumer Zeit, spätestens aber seit der höchsten gemessenen Sturmflut vom November 1872, für die an Pegelstationen der süd(west-)lichen Ostsee gemessenen Wasserstandsdaten durchgeführt (Krüger 1910, Kannenberg 1956, Baerens 1998, Sztobryn et al. 2005, Bork und Müller-Navarra 2009, Salecker et al. 2014, Woodworth et al. 2016b).

Anlass zur konsistenten Fortsetzung begonnener Forschungsarbeiten gab das Vorgängerprojekt „Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste“ (Projekt AMSeL, (Jensen et al. 2010)). In AMSeL entwickelte Methoden zur Analyse der Entwicklung des MSL sollten auf die Ostsee übertragen und erweitert werden, um vergleichbare Untersuchungen durchführen zu können.

Das Ziel war es, das Verständnis der Entwicklung von extremen und mittleren Wasserständen im Kontext eines global steigenden Meeresspiegels auf Basis möglichst hochaufgelöster Wasserstandsdaten zu erweitern. Hierzu wurde die Datenbasis aktualisiert und bestehende Lücken wo möglich durch die Erschließung weiterer Datenquellen geschlossen. Zudem wurden die Daten einheitlich prozessiert und plausibilisiert.

In konsekutiven Arbeitsschritten wurden zur Erreichung der Ziele Methoden der Datenakquise, der Datenaufbereitung sowie der Datenauswertung als Grundlage für die Zusammenstellung und das Datenhandling der im Projekt etablierten und derzeit aktuellsten und umfassendsten Wasserstandsdatenbank für die Ostsee entwickelt und entsprechend umgesetzt. Als Grundlage zur einheitlichen Auswertung der Wasserstandsdaten im Gesamtprojekt war ein wichtiger Aspekt der Arbeiten des Instituts für Wasserbau (IWB) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) im Teilprojekt AMSeL_Ostsee B die Akquise der Wasserstandsdaten und die Übertragung auf ein definiertes Höhenbezugsniveau sowie die Plausibilisierung der Daten. Die akquirierten Wasserstandsdaten wurden einheitlich formatiert in eine konsistente Pegeldatenbank übertragen. So wurde es möglich, statistische Auswertungen methodisch einheitlich für Wasserstandsdaten von Pegelstationen entlang der südlichen und südwestlichen sowie der gesamten Ostseeküste durchzuführen. Neben der Datenaufbereitung und der Datenakquise, die einen Schwerpunkt der Arbeiten der TUHH darstellten, ist aus phänomenologischer Sicht die Analyse und Beschreibung der rezenten und möglichen zukünftigen zeitlichen Entwicklung von Extremwasserständen in der südlichen und südwestlichen Ostsee das Kernziel des Teilprojekts AMSeL_Ostsee B.

Die vorliegende Veröffentlichung stellt die wesentlichen Ergebnisse des Teilprojekts AMSeL_Ostsee B zur Datenakquise, -plausibilisierung, Digitalisierung, zum Datenbankaufbau sowie zur Analyse der zeitlichen Entwicklung von Extremereignissen unter Einbeziehung quantifizierter Einflüsse glazialer Ausgleichsprozesse dar. Für eine detailliertere Beschreibung wird auf den Abschlussbericht verwiesen (Patzke und Fröhle 2019). Die Arbeiten des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen im Teilprojekt AMSeL_Ostsee A bestanden in der detaillierten Analyse der Entwicklung des MSL anhand von Pegeldaten und dem Vergleich mit Ergebnissen aus numerischen Modellrechnungen (Kelln et al. 2019). Das Untersuchungsgebiet von AMSeL_Ostsee umfasst die südliche und südwestliche Ostseeküste mit der deutschen und Teilen der polnischen Küste (bis Danzig). Wasserstandsdaten von Pegeln der gesamten Ostseeküste wurden vergleichend und für großräumliche Untersuchungen hinzugezogen.

2 Die Wasserstände in der südlichen und südwestlichen Ostsee

Im Gebiet der deutschen Küste liegen von West nach Ost die schleswig-holsteinische Fördenküste, die holsteinisch-westmecklenburgische (Groß-)Buchtenküste, die mecklenburgische Ausgleichsküste und die Vorpommersche Boddenküste (Duphorn et al. 1995), siehe Abbildung 1. Insgesamt misst die deutsche Ostseeküste eine Länge von 2247 km, wovon 1712 km auf das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern und 535 km auf das Bundesland Schleswig-Holstein fallen. 70 % der deutschen Küstenzonen werden als Innenküste bezeichnet, so z. B. die Küsten der Förden in Schleswig-Holstein oder Teile der Boddenküsten Mecklenburg-Vorpommerns (Koppe 2002). Die im Projektgebiet liegende polnische Küste besitzt von Swinemünde ostwärts eine verhältnismäßig geradlinige Ausgleichsküste mit nordnordwestlicher Ausrichtung. Ab der Danziger Bucht beginnt die polnische Nehrungs- und Haffküste. Die Küstenlinie der Ausgleichsküste ist geprägt von Haffen, die durch Nehrungen von der offenen Ostsee getrennt sind. Insgesamt umfasst der betrachtete polnische Küstenabschnitt bis Danzig etwa 500 km.

Die Außenküsten unterliegen bei aus der offenen Ostsee anlaufenden Wellen in Kombination mit hohen Wasserständen einer besonderen Belastung. Etwa 70 % der Küstenabschnitte weisen einen negativen Sedimenthaushalt mit mittleren Abtragungsraten von $\sim 34\text{m}/100$ Jahre (Seidel 1994) bzw. zwischen 0,1 m und 1 m pro Jahr (Koppe 2002, Duphorn et al. 1995) auf. Sturmhochwasserereignisse, und dabei vorwiegend ihre Dauer, dominieren die Erosionsprozesse an den vielen Küsten und sorgen dabei maßgeblich für Beschädigungen an Küstenschutzanlagen. In wenigen Tagen können insbesondere an Steilküsten und an Dünen Küstenrückgänge von bis zu 20 m erfolgen (Duphorn et al. 1995). Die langfristige Erosion von Küsten kann dagegen ausschließlich mit dem Küstenlängstransport erklärt werden. Obwohl die Sturmhochwasserereignisse der Ostsee im Vergleich zur Nordsee geringere Höhen erreichen, ist ihr Energieeintrag durch die vergleichsweise sehr langen Verweilzeiten vergleichbar hoch. Die systematische Auswertung von Wasserstandsdaten zu extremen Ereignissen und ihrer Verweilzeiten erlaubt eine Beurteilung der Belastungen, stützt die Planung und Konstruktion von Hochwasserschutzanlagen, hilft küstensichernde Maßnahmen und Unterhaltungsstrategien zu entwickeln und liefert gleichzeitig die Grundlagen zur Modellierung von extremen Niedrig- oder Hochwasserereignissen und deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt.

Allgemein werden Wasserstände an Küsten determiniert von

- der astronomischen Tide (Gezeiten),
- Windstau bzw. Windsunk sowie Druckunterschieden und Dichtegradienten des Wassers als Folge der örtlichen und großräumigen Druck-, Wind- und Fetchverhältnisse sowie von Zu- und Abflüssen,
- Füllung/Entleerung von Becken, Beckenschwingungen und Fernwellen,
- langfristigen (relativen) Wasserstandsänderungen als Folge von Klimaveränderungen (Eustasie) bzw. relativen Bewegungen der Erdkruste (Istostasie).

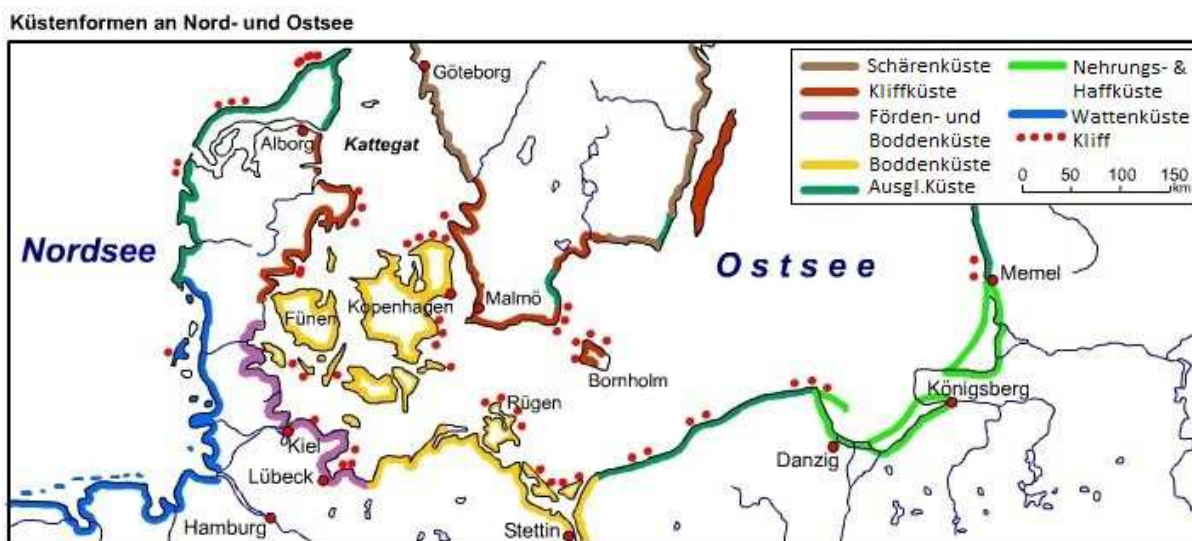


Abbildung 1: Küstenformen an Nord- und Ostsee, aus (Seydlitz 1989).

Die täglichen Gezeiten, welche die Wasserstandsentwicklung an der Nordsee dominieren, spielen wegen der geringen Wassermasse in der Ostsee sowie aufgrund der dämpfenden Wirkung des kleinen Einstromquerschnitts von der Nordsee zur Ostsee zwischen den dänischen Inseln eine vergleichsweise geringe Rolle. Der Tideinfluss nimmt von Westen nach Osten hin weiter ab. So zeigen die Wasserstandsdaten am Pegel Leuchtturm Kiel einen

Hub der astronomischen Tide von ca. 20 cm, wogegen am Pegel in Sassnitz unter gleichen Bedingungen nur noch wenige Zentimeter beobachtet werden. Dennoch treten auch an Pegelstationen in der südlichen Ostsee zeitweise deutlich höhere Wasserstände auf. Die treibende Kraft ist der Wind, welcher in Extremsituationen je nach Windrichtung und Lokation (ggf. zusätzlicher Buchteneffekt) der Pegelstation Erhöhungen von mehr als 3 m im Vergleich zum mittleren Wasserspiegel hervorrufen kann (z. B. 11/1872: HHW Travemünde 3,3 m ü. NN). Die Windverhältnisse der Ostsee werden durch den Westwindgürtel bzw. die Nordatlantische Oszillation (NAO) der nördlichen Hemisphäre bestimmt, wodurch im Mittel West- bis Südwestwinde mit mittleren Windgeschwindigkeiten im Frühsommer von 4–5 m/s und im Winter von 7–9 m/s dominieren (Koppe 2002). Die meteorologischen Bedingungen, die an der gesamten südlichen Ostseeküste zu besonders sturmhochwasserinduzierenden Stürmen im 20. Jahrhundert geführt haben, beruhen in der Regel auf Sturmtiefs die von der Norwegischen See in südöstlicher Richtung über Skandinavien und die Ostsee ziehen (Sztobryn et al. 2005). Hauptursächlich für Sturmhochwasser in der südlichen und südwestlichen Ostsee sind schließlich diesen Tiefs nachgelagerte nordwestliche bis nordöstliche Winde.

Als Randmeer mit nur einer geringen Ausstromquerschnittsfläche von etwa 0,35 km² ist die Ostsee einem nennenswerten Süßwasserzufluss unterlegen, welcher im Mittel etwa dem Ausstromvolumen der Ostsee zur Nordsee entspricht (Hupfer et al. 2003). Insgesamt erfolgen etwa 75 % des Zustroms als Salzwasser über das Kattegat und etwa 25 % als Süßwasser aus Flüssen und Niederschlag. Diese dynamischen Zustrombedingungen können den Verlauf von Sturmhochwasserständen maßgeblich beeinflussen und koppeln die Austauschprozesse von Ostseewasser stark an die Ein- und Ausströmungsbedingungen dieses Bereichs. Über Tage und Wochen gleichbleibende Windverhältnisse einer dominierenden Windrichtung können den mittleren Wasserstand (Wst) der Ostsee um mehrere Dezimeter beeinflussen. Hierdurch veränderte mittlere Wasserstände werden Füllungsgrad oder in Bezug auf nachfolgende Extremereignisse auch Vorfüllung genannt (Hupfer et al. 2003, Baerens 1998). Ein Vorfüllungsereignis kann zu erhöhten Wasserständen beitragen (Hupfer et al. 2003), hat im Vorlauf eines Extremereignisses jedoch keinen signifikanten Einfluss auf dessen Entstehung (Mudersbach und Jensen 2009b).

Durch die Dynamik der genannten Prozesse sowie die Ostseeform (großes Verhältnis von Länge zu Breite) können ein- und mehrknotige Eigenschwingungen (Seiches) des gesamten Ostseebeckens entstehen. Aufgrund der meteorologischen Bedingungen sowie der Größe und Form der Ostsee entstehen jedoch überwiegend einknotige Schwingungen, welche an den Schwingungsbäuchen bei einer Periode von ~31 h Amplituden von bis zu 1 m erreichen können (Hupfer et al. 2003). Das Abklingen dieser Schwingungen dauert nicht länger als vier Perioden (ca. 5 Tage).

Durch ihre verhältnismäßig kurze und ereignisreiche (geologische) Geschichte befinden sich die Küstenzonen der Ostsee und dadurch auch die gemessenen Wasserstände in stetigem Wandel. Insbesondere das Abschmelzen der skandinavischen Gletschereismassen infolge eines klimatischen Wandels nach der Weichseleiszeit vor ca. 10.000 Jahren bewirkt bis heute kontinuierliche Veränderungen der Küstenform. Durch die fehlende Auflast des Gletschereises ist ein Prozess im Gange der je nach Region die Landmassen (vorwiegend) vertikal hebt oder senkt. Dieses Phänomen wird als glaziale Isostasie bzw. dessen Bewegungsprozesse als glaziale isostatische Anpassung (GIA) bezeichnet. Die Beschreibung der

GIA-Verhältnisse ist Gegenstand zahlreicher Modelle und Forschungen, die die Landbewegungen versuchen möglichst exakt zu beschreiben und nachzuvollziehen (Ågren und Svensson 2007, Peltier 2004, Jivall et al. 2016, Ågren und Svensson 2011, Vestøl et al. 2016). Die Größenordnung dieser Bewegungen kann im Bereich der global detektierten Änderungen des mittleren Meeresspiegels oder auch weit darüber liegen. Der GIA ist folglich als wichtiger Einflussfaktor insbesondere für die Auswertung von langjährigen Wasserstandszeitreihen einzubeziehen.

Insgesamt entsteht die Variabilität der Ostseewasserstände stets aus der Interferenz der einzelnen Signalanteile (Vorfüllung, Gezeiten, Eigenschwingung, Windstau,...). Findet eine Überlagerung der Signalanteile statt, kann es zu besonders extremen Sturmhochwasserereignissen kommen (z. B. November 1872). Die Wasserstände der Ostsee werden aufgrund der im Vergleich zur Nordsee geringeren Gezeiteneinflüsse als weithin atmosphärisch dominiert angesehen (Meissner 1924, BACC II Author Team 2015).

3 Daten und Methoden

3.1 Datenakquise

Im Rahmen des Projekts wurden digital verfügbare Wasserstandsdaten für Pegelstationen aller Anrainerstaaten der Ostsee akquiriert, umformatiert, auf definierte und möglichst einheitliche Höhenbezugssysteme transformiert, sowie in Auszügen auch digitalisiert und über eine Datenbank für die Projektteilnehmer in einem einheitlichen Format zur Verfügung gestellt. Die Wasserstandsdatensätze und zugehörige Metainformationen stammen aus folgenden Quellen:

Deutsche Wasserstandsdaten

- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Lübeck und Stralsund (u. a. www.pegel-online.wsv.de)
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Rostock
- Staatliches Amt für Umwelt und Natur (StAUN) Rostock und Internes Messnetz Küste (IMK)
- Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)
- Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL.org)
- Datensätze aus Forschungsprojekten: MUSTOK, Bemessungswasserstände

Internationale Wasserstandsdaten:

- Allgemein:
 - Permanent Service for Mean Sea Level (psmsl.org)
 - GESLA, Global Extreme Sea Level Analysis (Woodworth et al. 2016a)
- Schweden: SMHI, Swedish Meteorological & Hydrological Institute
- Finnland: FMI, Finnish Meteorological Institute,
- Russland: Literaturquellen (Bogdanov 2000)
- Estland: EEA, Estnisches Umweltministerium
- Lettland: LVGMC, Lettisches Zentrum für Umwelt, Geologie und Meteorologie
- Litauen: EPA, Environmental Protection Agency
- Polen: GESLA

- Dänemark: DMI, Danish Meteorological Institute sowie University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC)

Ergänzt wurde die Zusammenstellung mit zusammengetragenen Informationen/Datensätzen der Gewässerkundlichen Jahrbücher, dem Landeshauptarchiv Brandenburg sowie von u. a. (Bogdanov 2000, Ekman 1988, Montag 1964, Kannenberg 1956, Westphal 1900, Kühnen 1916, Liebsch 1997, Furmanczyk 2008, Hahn und Rietschel 1938, Richter et al. 2006, Feistel et al. 2008). Ergänzende Informationen hierzu finden sich im Projektabschlussbericht (Patzke und Fröhle 2019), dem auch ein Pegelprotokoll mit verfügbaren Metainformationen (zeitl. Umfang und Auflösung, die Quellen, die geografische Lage, detektierte potentiell unplausible Zeiträume sowie weitere verfügbare Informationen) beigelegt ist. Die aus der Akquise hervorgehenden Zeitreihen sowie daraus zusammengestellte Datensätze liegen (je nach Station) für die nachfolgend aufgeführten zeitlichen Auflösungen vor:

- Jahresmaximal-, Jahresminimal- und Jahresmittelwerte,
- Monatsmaximal-, Monatsminimal- und Monatsmittelwerte,
- Tagesmaximal-, Tagesminimal- und Tagesmittelwerte,
- Stundenwerte,
- Minutenwerte und
- Momentanwerte wechselnder Frequenz und zeitlicher Auflösung.

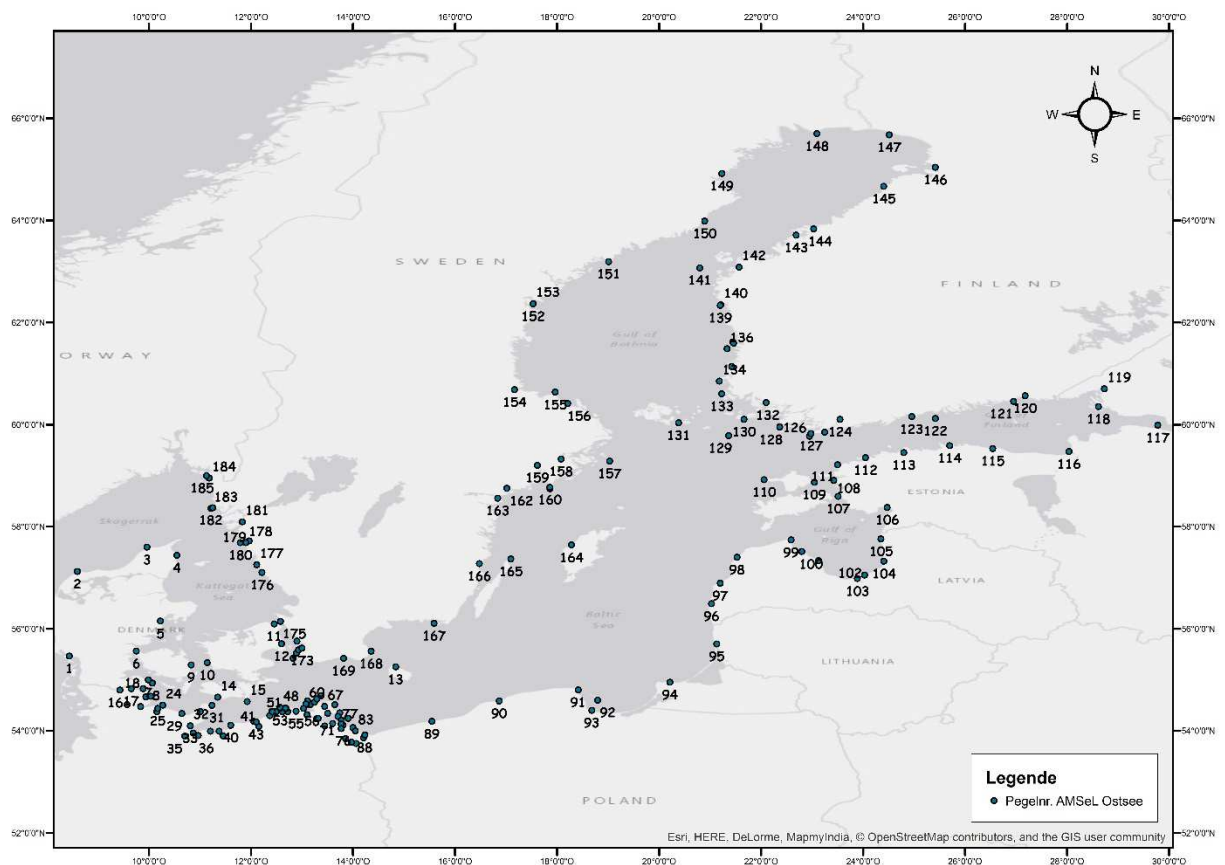


Abbildung 2: Lage der Pegelstationen mit aktuell für das Projekt verfügbaren digitalen Zeitreihen und eingeführter Pegelnummerierung.

Die exakte Angabe der Verfügbarkeiten zeitlicher Auflösungen je Station kann dem Pegelprotokoll entnommen werden, soweit verfügbar wurden jedoch alle Datensätze mindestens bis zum Jahr 2015 aktualisiert. Insgesamt stehen in der Datenbank 484 Datensätze für 185 Pegelstationen zur Verfügung. In Abbildung 2 ist die Lage der im Vorhaben AMSeL Ostsee akquirierten Pegelstationen, nummeriert entgegen dem Uhrzeigersinn entlang der Ostseeküste, dargestellt. Deutsche Wasserstandsdaten wurden einheitlich in das Höhenbezugssystem Normalhöhennull (NHN) überführt, siehe Abschnitt 3.2.1. Daten eines Landes mit unterschiedlichen Höhenbezügen wurden, sofern mit vertretbarem Aufwand möglich, jedoch auf das jeweilige nationale Höhensystem umgerechnet, um beispielsweise den Vergleich von Daten des Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) mit Daten der nationalen Behörden durchführen zu können. Dies ermöglicht einen einheitlichen Bezug der für eine Station verfügbaren Daten und somit auch eine unter Umständen hilfreiche Zusammenführung von Datensätzen. Auch wenn die räumliche Verteilung grundsätzlich als sehr gut und homogen zu bezeichnen ist, sind hinsichtlich der Möglichkeiten für die Beurteilung der langzeitlichen Entwicklung im gesamten Ostseeraum Einschränkungen vorhanden. Die zeitliche Verteilung sowie die Datenqualität der verfügbaren Zeitreihen sind teilweise sehr inhomogen. Insbesondere die für die baltischen Länder sowie die für Russland akquirierten Datensätze sind im Vergleich teils als qualitativ nicht ausreichend zu bewerten. Während für die Ermittlung von Monatsmittelwerten zumindest genügend Informationen vorliegen (Kelln et al. 2022), eignen sich die Daten von lediglich wenigen Stationen aus diesen Gebieten für die Analyse der zeitlichen Entwicklung von Extremwerten sowie für extremwertstatistischen Auswertungen. Eine Anpassung aller in diesem Projekt verfügbaren Daten auf ein einheitliches Bezugssystem konnte wegen des Informationsdefizits nicht durchgeführt werden, wird für zukünftige Auswertungen mit Fokus auf die gesamte Ostsee jedoch empfohlen (s. a. Infos zum europäischen Höhenreferenzsystem (EVRF 2000/2007) (Sacher et al. 2007, Augath und Ihde 2002).

Die in AMSeL_Ostsee B in Zusammenarbeit mit dem BSH Rostock durchgeführten umfangreichen Digitalisierungsarbeiten sollen an dieser Stelle lediglich kurz erwähnt werden. Die Erweiterung der Datenbasis für die Station Schleimünde wurde durch die Digitalisierung von ~500 historischen Pegelbögen für Messdaten aus den Jahren zwischen 1943 und 1956 erreicht. Diese Daten sind nach dem Abschluss der weiteren Plausibilisierungsarbeiten durch das BSH Rostock zukünftig verfügbar.

3.2 Datenaufbereitung

3.2.1 Höhenbezug von Wasserstandsdaten

Als Grundlage für die Auswertungen ist es zweckmäßig, die Daten auf ein einheitliches Höhenbezugssystem zu beziehen. Hierzu müssen Informationen zu Offsets (u. a. Pegelversetzungen) sowie Höhendifferenzen zwischen den Pegelnullpunkten und den Höhensystemen ermittelt werden. Durch Verwendung verschiedener Höhenbezugssysteme über die Zeit haben sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Höhenlagen und Bezugssystemen für die betrachteten Pegel ergeben. Hierbei ist anzumerken, dass die Höhenlage der Pegelnullpunkte auch innerhalb eines Bezugssystems zeitlichen Änderungen unterliegen kann. Um einen konsistenten Höhenbezug in Wasserstandsdaten zu erzeugen, müssen diese Informationen ermittelt und Wasserstandsdaten u. U. angepasst werden.

Tabelle 1: In AMSeL_Ostsee verwendete Pegelnullpunktshöhen in [m] bezogen auf Normalhöhennull.

ID	Pegelname	Latitude	Longitude	PNP - NHN	ID	Pegelname	Latitude	Longitude	PNP to NHN
01	Flensburg	54.795	9.433	-5.008	39	Barth	54.371	12.723	-4.986
02	Langballigau	54.823	9.654	-5.017	41	Barhöft	54.434	13.032	-4.986
03	LT Kalkgrund	54.825	9.888	-4.987	42	Stralsund	54.315	13.099	-4.986
04	Kappeln	54.664	9.938	-4.994	43	Schaprode (IMK)	54.513	13.165	-4.990
05	Schleswig	54.511	9.569	-5.023	44	Neuendorf Hf.	54.510	13.090	-4.986
07	Schleimünde	54.673	10.037	-5.003	45	Neuendorf O.	54.524	13.081	-4.986
08	Eckernförde	54.475	9.836	-5.004	46	Kloster	54.585	13.111	-4.986
09	LT Kiel	54.500	10.273	-4.985	47	Wittower Fähre	54.558	13.247	-4.986
12	Kiel-Holtenau	54.372	10.157	-4.995	48	Wiek / Rügen	54.622	13.292	-4.986
14	Lippe	54.336	10.646	-5.000	49	Varnkevitz (IMK)	54.684	13.370	-4.990
15	Heiligenhafen	54.373	11.006	-4.985	51	Sassnitz	54.511	13.643	-4.987
16	Marienleuchte	54.497	11.239	-4.981	52	Ralswiek	54.475	13.448	-4.987
17	Neustadt	54.097	10.813	-5.000	53	Göhren (IMK)	54.350	13.742	-4.990
19	Travemünde	53.953	10.872	-5.010	54	Thiessow	54.280	13.709	-4.987
20	Lübeck Bauhof	53.893	10.703	-5.013	55	Lauterbach	54.341	13.503	-4.987
21	Dassow (IMK)	53.906	10.968	-4.990	56	Glewitz	54.243	13.318	-4.988
22	Boltenhagen (IMK)	53.991	11.208	-4.990	57	Stahlprode	54.234	13.290	-4.988
23	Wismar B.	53.899	11.458	-4.990	58	Greifswald Eldena	54.093	13.446	-4.988
24	Timmendorf	53.992	11.376	-4.990	59	Greifswald Wieck	54.080	13.450	-4.988
25	Rerik (IMK)	54.106	11.605	-4.990	60	Lubmin (IMK)	54.141	13.603	-4.990
26	Rostock	54.083	12.155	-4.987	61	Wolgast	54.042	13.770	-4.988
27	Warnemünde (IMK)	54.181	12.057	-4.990	62	Karlshagen	54.108	13.808	-4.987
28	Warnemünde	54.170	12.103	-4.987	63	Peenemünde	54.134	13.769	-4.987
29	Dierhagen (IMK)	54.297	12.369	-4.990	64	Ruden	54.204	13.772	-4.987
30	Ahrenshoop (IMK)	54.383	12.414	-4.990	65	Greifswalder Oie	54.241	13.907	-4.987
31	Althagen	54.372	12.419	-4.986	66	Koserow (IMK)	54.061	14.001	-4.990
32	Darßer Ort	54.375	12.498	-4.986	67	Koserow	54.060	14.001	-4.988
33	Prerow außen	54.455	12.573	-4.986	68	Stagnieß	53.996	14.047	-4.988
34	Prerow innen	54.442	12.575	-4.986	69	Karnin	53.826	13.857	-4.989
36	Zingst (IMK)	54.445	12.673	-4.990	70	Mönkebude (IMK)	53.776	13.972	-4.990
37	Zingst/Bodden	54.431	12.689	-4.986	71	Ueckermuende	53.750	14.066	-4.987
38	Zingst	54.443	12.679	-4.986	72	Kamminke	53.861	14.209	-4.988

Durch die bis 1990 bestehende Teilung der Bundesrepublik koexistierten mit dem Normalnull- (NN) und dem Höhennull-(HN)-System zwei deutsche Höhenbezugssysteme parallel. Erst mit Einführung des Normalhöhennullsystems (NHN) im Jahr 1992 wurden diese vereinheitlicht. So besitzen die vom WSA Stralsund (WSA-S) betreuten Pegel in

Mecklenburg-Vorpommern (MV) eine einheitliche Nullpunktshöhe (5.14 m u. HN) und die des WSA Lübeck (WSA-L) aus Schleswig-Holstein (SH) eine vergleichsweise variable. Offsetkorrekturen wurden in die abgelegten Daten des WSA-S bereits eingepflegt, in die des WSA-L nicht (Zusammenlegung der WSÄ ab 13.10.2020 zum WSA Ostsee). Ausgegeben werden die Daten bezogen auf den Pegelnullpunkt. Es obliegt dem Anwender der Daten eine Umrechnung ins gewählte Höhensystem durchzuführen. Informationen zu (nicht) erfolgten Offsetkorrekturen werden nicht automatisch mit ausgegeben, siehe folgendes Beispiel: Im Zuge der Umstellung der Pegel aus MV zum 01.11.1985 wurde für die Pegel eine einheitliche Nullpunktshöhe von $PNP_{HN} = HN - 5.14$ m hergestellt (LUV MV 2009). Der daraus resultierende Höhenversatz von mehreren Zentimetern in den Wasserstandsdaten wurde für die vom WSA-S betreuten Pegelstationen korrigiert. Dies gilt jedoch nicht für die Pegelstationen in Wismar und Timmendorf/Poel, welche in MV liegen aber vom WSA Lübeck betreut werden. D. h., das durch den Pegelversatz erzeugte Offset ist weiter in diesen Daten enthalten. Die Offsets sind beim Bezug der Daten nicht unmittelbar ersichtlich, müssen im Sinne einer korrekten Beurteilung langfristiger Änderungen der mittleren und extremen Wasserstandsverhältnisse jedoch behandelt werden. Dies wurde in AMSeL_Ostsee durchgeführt. Im Austausch mit den WSA-S und WSA-L sowie dem Staatlichen Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg (StALU MM) wurden zusätzlich die zur NHN-Umrechnung notwendigen Informationen aller deutschen Pegelstationen mit verfügbaren hochaufgelösten Wasserstandsdaten ermittelt. Die aus bereitgestellten Systemdifferenzen (z. B. NN-NHN) und direkten Differenzen zwischen PNP und Bezugssystem (z. B. PNP-NN) ermittelten Ergebnisse dieses Prozesses sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die verwendeten Höhendifferenzen δP sind als ‚PNP zu HN‘ Wert dargestellt und wurden auf die Offset-bereinigten Zeitreihen nach folgendem Zusammenhang angewandt:

$$Wst_{NHN} = Wst_{PNP} + \delta P \quad (1)$$

3.2.2 Plausibilisierung

Zur Plausibilisierung der hochaufgelösten Wasserstandsdaten wurden zwei Methoden entwickelt und angewandt. Die nötigen Schritte zum Erreichen einer im Projekt plausibilisierten Zeitreihe lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- i. Entwicklung der Routinen
- ii. Anwendung der Routinen auf Stundenwertzeitreihen der Datenbank
- iii. Zusammenführen der detektierten potentiell unplausiblen Abschnitte je Vergleichsstation
- iv. Sichtprüfung und Beurteilung der potentiell unplausiblen Abschnitte
- v. Aktualisierung der Datenbank mit den als tatsächlich unplausibel beurteilten Abschnitten

Die entwickelten Plausibilisierungsverfahren (PI und PII) sind wie folgt umgesetzt worden:

- a) Verfahren I zur Plausibilisierung von Wasserstandsdaten (PI)

Die Verfahren beruhen auf einer Kreuzanalyse von Zeitreihen. Das Fließdiagramm in Abbildung 3 verdeutlicht das Vorgehen für PI. Ausgehend von einer Testzeitreihe X werden

zu jeder in der Datenbank vorliegenden deutschen Station mit Stundenterminwerten lineare Korrelationskoeffizienten r gebildet. Liegen Werte mit $r < 0.925$ vor, wird eine Zeitreihe als Vergleichszeitreihe zur Bestimmung potentiell unplausibler Abschnitte herangezogen. Die nachfolgenden Schritte müssen für jede dieser Stationen vorgenommen werden, sodass am Ende für jede der ausgewählten Vergleichsstationen potentiell unplausible Abschnitte in Bezug zur Teststation ausgegeben werden.

Im nächsten Schritt wird für die beiden aktuell betrachteten Zeitreihen (Testzeitreihe und ausgewählte Vergleichszeitreihe) eine Glättung vorgenommen, um vor dem Vergleich minimale Schwankungen (Rauschen) innerhalb der Zeitreihen auszugleichen. Anschließend werden die Zeitreihen über ihren Erwartungswert und die Standardabweichung normiert. Um die zu untersuchenden Bereiche weiter einzuschränken, werden nur diejenigen Bereiche näher untersucht, bei denen die Differenzen zwischen den geglätteten Zeitreihen vom $6\text{-}\sigma$ -Intervall abweichen. Nun folgt der Entscheidungsprozess für die Auswahl potentiell unplausibler Zeiträume. Hierbei werden diejenigen Bereiche als unplausibel ausgegeben, bei welchen der Korrelationskoeffizient im gleitenden Fenster für länger als 5 h unter 0.7 fällt. Der ausgegebene Bereich potentiell unplausibler Werte umfasst dann denjenigen zeitlichen Bereich um das $r < 0.7$ Fenster, bei welchem die Korrelation unter $r < 0.9$ gelangt ist. Die Routine gibt im Abschluss diejenigen Bereiche aus, die die obig genannten Kriterien erfüllen. Dieses Vorgehen muss für jede der Vergleichszeitreihen durchgeführt werden, sodass im Abschluss für eine Testzeitreihe je Vergleichsstation ein Dokument mit potentiell unplausiblen Abschnitten entsteht. Erst durch das Zusammenführen dieser Dokumente, den Vergleich der ausgegebenen potentiellen unplausiblen Zeiträume von mindestens zwei Vergleichszeitreihen und die abschließend folgende Sichtprüfung aller enthaltenen Bereiche kann festgelegt werden, welche Abschnitte als tatsächlich unplausibel eingestuft werden. Zur Anwendung dieses Verfahrens auf die Zeitreihen aus Travemünde, Wismar und Warnemünde wurde ein Plausibilisierungsbericht erstellt (Patzke et al. 2017, 2016), der zu Änderungen an den offiziellen Wasserstandsdaten geführt hat.

Liegen geeignete Vergleichszeitreihen vor, zeigt die Methodik sehr gute Ergebnisse. Nachteilig ist der hohe zeitliche Aufwand zur Sichtung und Beurteilung der ausgegebenen Bereiche zu bewerten. Dieses Verfahren ist zur Plausibilisierung historischer Zeitbereiche zu verwenden, für welche wenige Vergleichszeitreihen zur Verfügung stehen.

b) Verfahren II zur Plausibilisierung von Wasserstandsdaten (PII)

Aufgrund der Tatsache, dass bei Verwendung des *Plausibilisierungsverfahrens I* jede Vergleichszeitreihe einzeln untersucht werden muss, was eine erhöhte Anzahl an ausgegebenen und zu vergleichenden Zeiträumen zur Folge hat, und die Effizienz zwischen detektiertem und tatsächlich unplausiblem Abschnitt weiteren Optimierungsbedarf zeigte, wurde das vorherige Verfahren zur Untersuchung aktuellerer Wasserstandsdaten erweitert.

Die wesentliche Neuerung ist das Zusammenführen der Vergleichszeitreihen zu einer Prüfzeitreihe sowie schärfere Auswahlkriterien für Vergleichszeitreihen. Im Fließdiagramm aus Abbildung 4 ist der Prozessablauf dargestellt. Zu Beginn werden erneut die Korrelationskoeffizienten potentieller Vergleichszeitreihen (y_i) in Bezug zur Testzeitreihe (x) gebildet. Zur Bildung einer Prüfzeitreihe werden diejenigen Zeitreihen zugelassen, welche Korrelationskoeffizienten $r_{xy} > 0.975$ aufweisen. Vor der Zusammenführung durch Mittelung

der Einzelwerte der zugelassenen Zeitreihen findet zusätzlich eine Glättung über die Bildung von gleitenden Polynomen statt, um kleinere Schwankungen (Rauschen) in den Zeitreihen auszugleichen.

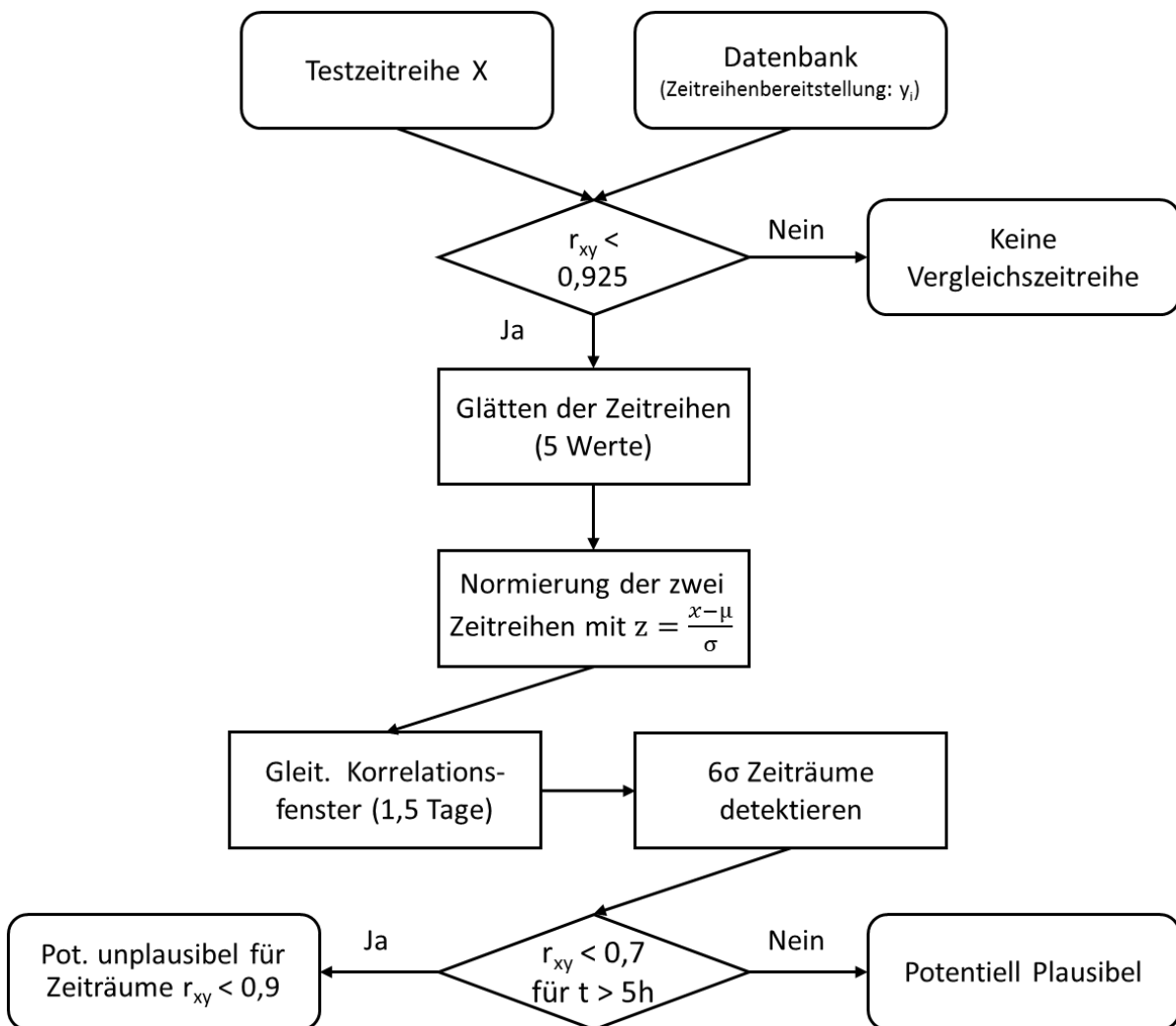


Abbildung 3: Vorgehen zur Plausibilisierung I von hochaufgelösten Wasserstandsdaten an der deutschen Küste (altes Verfahren).

Zwischen der nun erstellten Prüfzeitreihe (z) und der Testzeitreihe (x) werden gleitende Fenster von 1.5 Tagen Länge gelegt, für die erneut Korrelationskoeffizienten r_{xz} gebildet werden. Nun folgt der Entscheidungsprozess zur Festlegung potentiell unplausibler Zeiträume innerhalb der Testzeitreihe. Gelangt der Korrelationskoeffizient für einen Zeitraum von $t > 5$ h unter $r_{xz} < 0.7$ werden diejenigen Bereiche als unplausibel ausgegeben bei denen die Korrelation um das betrachtete Kriterium mit $r_{xz} < 0.925$ liegt.

Im Abschluss steht für jede der untersuchten Stationen ein Dokument mit den ermittelten Abschnitten potentiell unplausibler Werte zur Verfügung. Durch die Zusammenführung der Vergleichsstationen und die Verwendung geringfügig anderer Kriterien konnte schlussendlich die Anzahl an ausgegebenen Dokumenten und Abschnitten potentiell unplausibler Werte reduziert und die Effizienz der ausgegebenen Zeiträume erhöht werden. Auch für dieses Verfahren ist es unerlässlich, anschließend eine Sichtprüfung der ausgegebenen Zeiträume durchzuführen, um eine abschließende Beurteilung treffen zu können.

Der hierfür notwendige Zeitaufwand wurde aufgrund der Zusammenführung der Vergleichszeitreihen sowie der effizienteren Ermittlung auffälliger Zeiträume jedoch gegenüber dem Verfahren I erheblich reduziert. Es muss jedoch festgehalten werden, dass für dieses (und weitere) präzise statistische Verfahren ein möglichst flächendeckendes Stationsnetz notwendig ist, sodass sich das Verfahren PII vorwiegend für dt. Wasserstandsdaten ab Einführung der Wasserstandsdatenfernübertragung 1995 eignet (LAWA 2018).

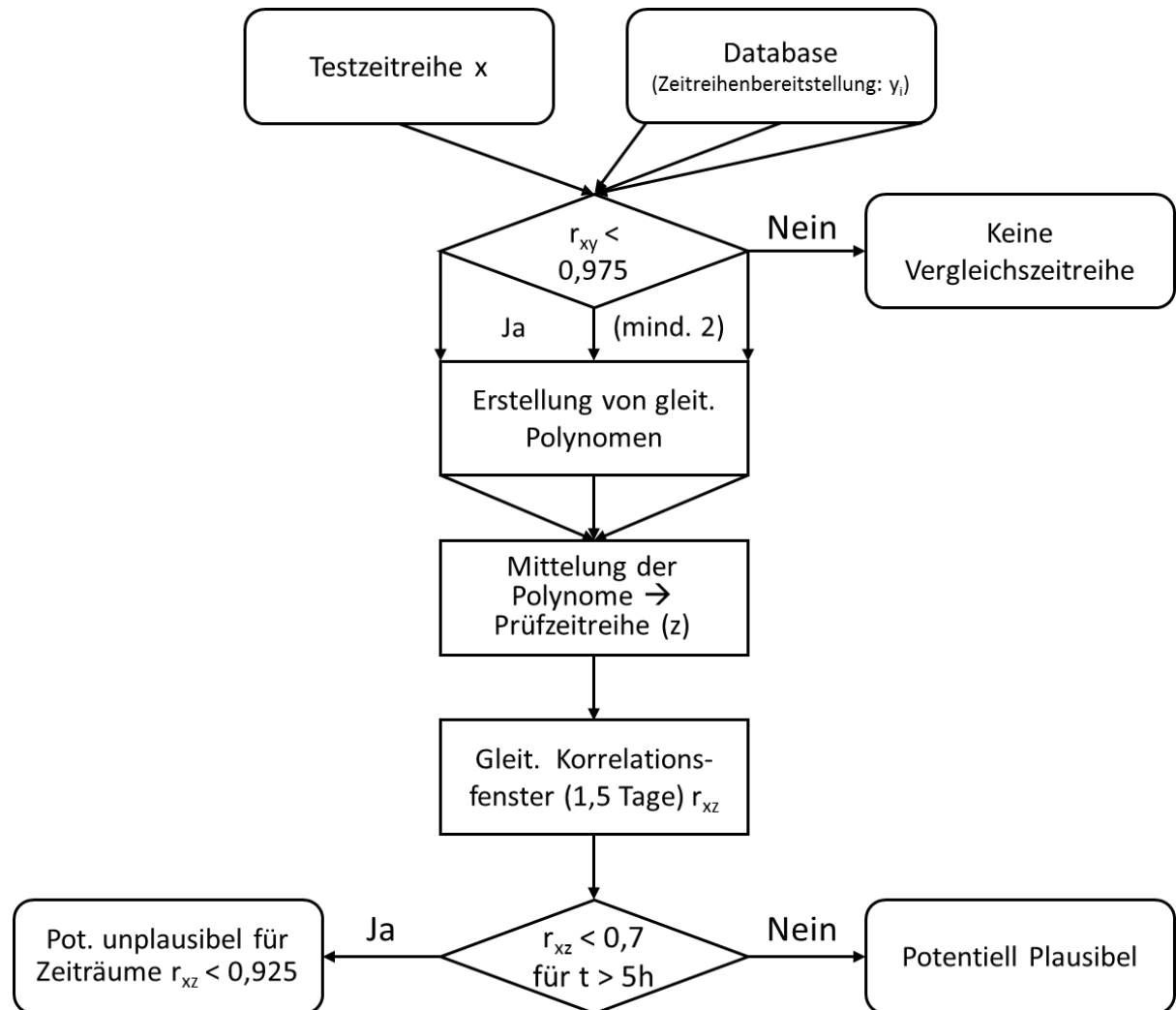


Abbildung 4: Vorgehen zur Plausibilisierung II von hochaufgelösten Wasserstandsdaten an der deutschen Küste (neues Verfahren).

3.3 Vertikale Landbewegungen

Für die Auswertung der mit ortsfesten Messinstrumenten durchgeführten Aufzeichnungen von Wasserständen ist eine Quantifizierung der unabhängig vom Wasserstand in den Messdaten enthaltenen Signalanteile wichtig. Als solche Anteile gelten vertikale Landbewegungen, welche die Pegelstationen mitbewegen und so die Messungen des Wasserstandes beeinflussen. Vertikale Landbewegungen können klein- oder großräumig auftreten und sind zeitlich und (vor allem) räumlich nicht zwingend konstant. Die Beurteilung und der Vergleich von hydrologischen und/oder meteorologischen Trends in Extremwertzeitreihen

sollte möglichst nach einer Korrektur der Wasserstandsdaten um diese Signalanteile erfolgen, da die genannten Effekte sich auf die ermittelten Trendraten auswirken können.

Für Küstenpegel der Ostsee sind vorwiegend Gas- oder Grundwasserentnahmen (kleinräumig) sowie isostatische Ausgleichsprozesse als Folge der Gletscherhistorie Skandinaviens (großräumig) verantwortlich (Hupfer et al. 2003). Während Landbewegungen hervorgerufen durch Gas- oder Grundwasserentnahmen aufgrund einer häufig geringen Informationslage nur schwer zurückzufolgen sind, lassen sich glazial-isostatische Ausgleichsprozesse (GIA) aufgrund ihrer großflächigen Wirkung im gesamten Ostseeraum besser quantifizieren.

Grundsätzlich lassen sich die Daten nur dann korrigieren, wenn Herkunft, Größe und zeitliche Ausdehnung der vertikalen Landbewegungen bekannt sind. Eine Quantifizierung kann durch Messung der Lage der ortsfesten Punkte in Bezug zum Erdmittelpunkt erfolgen. In der Regel werden hierzu erdpositionsunabhängige GPS-Messungen verwendet, welche jedoch erst seit maximal 20 Jahren und auch nur für vereinzelte Lokationen zur Verfügung stehen (Santamaría-Gómez et al. 2012). Solche Punktinformationen haben (bislang) nicht die nötige Datenlänge und insbesondere nicht die räumliche Abdeckung um allein daraus für den gesamten Ostseeraum vertikale Landbewegungen abzuleiten (Wöppelmann und Marcos 2016). Aus der Abschätzung ehemaliger Gletschereismassen, Berechnungen zur Masse der Kontinentalkruste sowie der Viskosität des oberen und unteren Erdmantels können jedoch globale oder regionale mathematische Modelle für die GIA-Bewegungen abgeleitet werden. Verfügbare GPS- und Pegeldata können die Modelle optimieren.

Tabelle 2: RMSL-Änderungsraten aufgrund von GIA [mm/a] für Pegelstationen in AMSeL_Ostsee; ermittelt aus dem Modell NKG2016LU nach (Vestøl et al. 2016); südliche und südwestliche Ostsee (hellblau), gesamte Ostsee (hellblau + violett).

P.Nr.	Land	Pegelname	Lattude	Longitude	Trend [mm/a]
15	Dänemark	Gedser	54.573	11.926	0.234
16	Deutschland	Flensburg	54.795	09.433	0.002
27	Deutschland	Kiel-Holtenau	54.372	10.157	-0.037
34	Deutschland	Travemünde	53.953	10.872	-0.123
38	Deutschland	Wismar Baumhaus	53.899	11.458	-0.120
43	Deutschland	Warnemünde	54.170	12.103	0.003
66	Deutschland	Sassnitz	54.511	13.643	0.090
88	Polen	Swinoujście	53.917	14.233	-0.176
89	Polen	Kolobrzeg	54.183	15.550	-0.061
93	Polen	Gdansk	54.400	18.683	-0.053
95	Litauen	Klaipeda	55.700	21.133	0.201
123	Finnland	Helsinki	60.154	24.956	3.694
127	Finnland	Hanko	59.823	22.977	4.163
135	Finnland	Rauma	61.134	21.426	6.813
149	Schweden	Furuogrund	64.916	21.231	9.445
158	Schweden	Stockholm	59.324	18.082	5.328
167	Schweden	Kungsholmsfort	56.105	15.589	1.359
183	Schweden	Smogen	58.354	11.218	3.440

Im Projekt AMSeL_Ostsee B wurden die als Folge von glazialisostatischen Ausgleichprozessen auftretenden vertikalen Bewegungen als signifikante Einflussgröße für die Ermittlung langzeitlicher Veränderungen in den Wasserstandsdaten identifiziert. Diese müssen daher berücksichtigt werden. Als Resultat aus dem Vergleich globaler (Peltier 2004) und

regionaler (Vestøl et al. 2016) GIA-Modelle sowie einem Vergleich mit aus GPS-Daten (SONEL 2016) ermittelten Landbewegungsraten wurde das Modell der nordischen Geodätischen Kommission NKG2016LU (Vestøl et al. 2016) als am besten geeignet für die vorgesehenen Untersuchungen beurteilt. Die über das Modell als Gitterinformationen verfügbaren Landbewegungsraten sind mittels bilinearer Interpolation auf die Kugelgestalt der Erde interpoliert worden, sodass schlussendlich die Quantifizierung der vertikalen Landbewegungsraten für jede im Projekt verfügbare Pegelstation abgeleitet wurde. Da sich die dynamischen Prozesse der GIA in geologischen Zeiträumen ändern (> 1000 Jahre), wird für die in den durchgeführten Untersuchungen betrachteten Zeiträume (≥ 200 Jahre) vereinfachend ein lineares Verhalten angenommen. Die Ergebnisse für die in diesem Artikel verwendeten Pegelstationen sind in Tabelle 2 aufgezeigt, die Ergebnisse zu den Trendraten der weiteren im Projekt verfügbaren Stationen können dem Projektabschlussbericht entnommen werden (Patzke und Fröhle 2019). Die berechneten Landhebungsraten beziehen sich auf die Lokation der Stationen, abgeleitet aus dem verwendeten GIA-Modell. Positive Werte zeigen eine Landhebung, negative Werte eine Landsenkung in Millimetern pro Jahr an.

3.4 Pegelzeitreihen für Extremwertanalysen

Im Anschluss an die für das Gesamtprojekt aufbereiteten Daten wurden die Stichproben zur Analyse der zeitlichen Entwicklung extremer Wasserstände zusammengestellt. Für den vorliegenden Artikel werden die mit der Annual-Block-Methode (Jahrextremwerte) ermittelten Stichproben sowie deren Auswertung exemplarisch vorgestellt. Hierbei werden stets hydrologische Jahre (vom 01.11. bis zum 31.10. des Folgejahres) ausgewertet. Für die Zusammenstellung wurden, sofern hochaufgelöste Zeitreihen zur Verfügung stehen, nur dann die Extrema ermittelt, wenn für mindestens 75 % eines Jahres Daten zur Verfügung stehen. Stehen mehrere Datenquellen mit Bezug auf dasselbe Höhensystem zur Verfügung ist jeweils der höhere (Maxima) bzw. niedrigere (Minima) Wert verwendet worden. Die Lage der verwendeten Stationen ist in Abbildung 5 dargestellt, die verfügbaren Zeiträume der Extremwertzeitreihen finden sich in Tabelle 3.

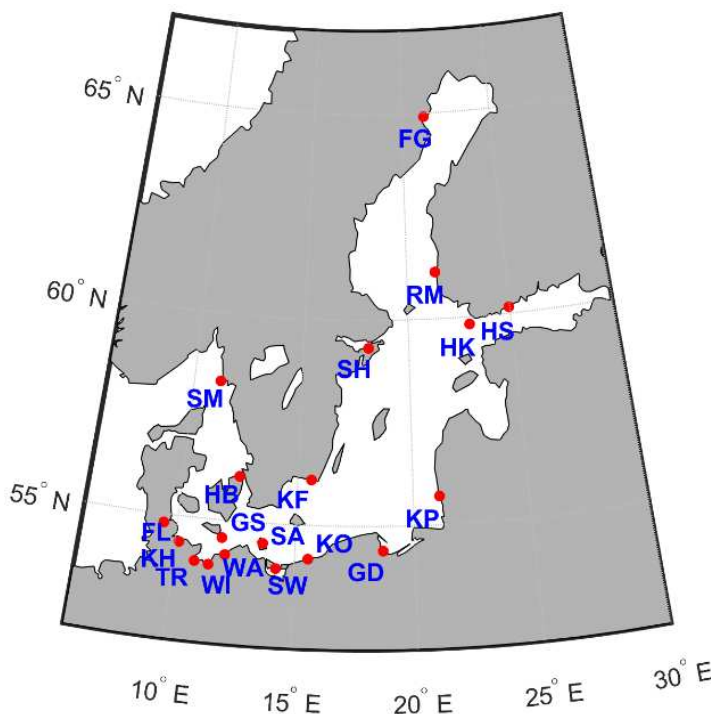


Abbildung 5: Lage der Pegelstationen für die Trendanalyse von Extremwasserstandsdaten der gesamten Ostsee.

Für die südliche und südwestliche Ostseeküste wurde eine Auswahl von 10 Pegelstationen mit möglichst langen Datenreihen und weitgehend homogener Verteilung über die Küste getroffen. Neben Stationen aus Polen und Deutschland ist aufgrund der hohen Datenqualität, der zeitlichen Ausdehnung und der räumlichen Nähe auch die Zeitreihe der dänischen Station in Gedser einbezogen worden. Für vergleichende Betrachtungen der gesamten Ostsee wurden Daten von weiteren Stationen mit dem Ziel der gleichmäßigen räumlichen und zeitlichen Abdeckung zusammengestellt. Die Verfügbarkeit von hochaufgelösten und langjährigen Zeitreihen ist im östlichen Teil der Ostsee noch nicht optimal.

Tabelle 3: Verfügbare Zeiträume von Jahresextremwerten ausgewählter Stationen der gesamten Ostsee (Werte beziehen sich immer auf das Abflussjahr vom 01.11.–31.10. eines Jahres).

<i>Station</i>	<i>Land</i>	<i>Zeitraum (Max)</i>	<i>Zeitraum (Min)</i>	<i>Station</i>	<i>Land</i>	<i>Zeitraum (Max)</i>	<i>Zeitraum (Min)</i>
<i>Hornbaek</i>	DK	1891-2012	1891-2012	Kolobrzeg	PO	1867-2006	1886-2006
<i>Gedser</i>	DK	1892-2012	1892-2012	Gdansk	PO	1886-2006	1886-2006
<i>Flensburg</i>	DE	1921-2016	1955-2016	Klaipeda	LIT	1902-2003	1867-2006
<i>Kiel-Holtenau</i>	DE	1901-2016	1965-2016	Helsinki	FIN	1971-2015	1971-2015
<i>Travemünde</i>	DE	1826-2016	1826-2016	Hanko	FIN	1971-2015	1971-2015
<i>Wismar</i>	DE	1848-2016	1910-2016	Rauma	FIN	1971-2015	1971-2015
<i>Warnemünde</i>	DE	1855-2016	1910-2016	Furuogrund	SWE	1916-2015	1916-2015
<i>Sassnitz</i>	DE	1882-2016	1931-2016	Stockholm	SWE	1889-2015	1889-2015
<i>Swinoujsice</i>	PO	1901-2006	1901-2006	Kungs-holmsfort	SWE	1887-2015	1887-2015
				Smogen	SWE	1911-2015	1911-2015

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Plausibilisierung und Datenaufbereitung

Insgesamt wurde durch die intensive Aufbereitung der Daten eine sehr gute Datengrundlage an plausibilisierten Stationen erreicht. Sowohl die räumliche als auch die zeitliche Abdeckung der Plausibilisierung für die Zeitreihen liefert gute Ergebnisse. Für eine detaillierte Übersicht der als unplausibel eingestuften Zeiträume empfiehlt sich das Studium des Abschlussberichts (Patzke und Fröhle 2019). Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Plausibilisierung der Daten werden anhand von Tabelle 4 zusammengefasst.

Für 22 der in Tabelle 4 zusammengefassten Stationen konnten die aktuelleren Zeiträume nach ca. 1990 mit dem Plausibilisierungsverfahren II (PII) geprüft werden. Insgesamt wurden 70 Abschnitte unterschiedlicher zeitlicher Länge als statistisch auffällig beurteilt und als potentiell unplausibel definiert. Aufsummiert umfassen diese potentiell unplausiblen Abschnitte einen Zeitraum von 17608 Stunden (ca. 2 Jahre). Für weiter zurückliegende Zeiträume wurde das Plausibilisierungsverfahren I (PI) auf die Messdaten angewandt. Hierbei ergaben sich für die 11 untersuchten Stationen 123 Zeiträume unterschiedlicher zeitlicher Länge als potentiell unplausibel oder auffällig. Die Anwendung des PI als manuelle Ergänzung (Vergleichspegel werden manuell definiert) des automatisierten (Vergleichspegel werden anhand einer statistischen Analyse automatisch zugeordnet) PII wurde für 11 der 21 betrachteten Stationen angewendet. Die Stationen Warnemünde, Rostock und Barhöft wurden dabei ausschließlich mit PI geprüft, siehe Tabelle 4 und Abbildung 3. Die Behandlung der dargestellten Abschnitte bezieht sich bislang ausschließlich auf Daten des Projekts AMSeL_Ostsee. Auf Basis der Untersuchungen zum Plausibilisierungsbericht (Patzke et al. 2016) haben jedoch bestimmte Abschnitte offizieller Wasserstandsdaten eine Überarbeitung erfahren (Travemünde, Wismar, Warnemünde). Eine abschließende Beurteilung auf Basis der zum Abschlussbericht zusammengestellten Bereiche ist durch die Behörden noch nicht erfolgt, jedoch wurden u. a. bereits einzelne Hochwassermarken der Station Travemünde überarbeitet:

- 31.12.1904: von 763 cm auf 716 cm PNP (NN-500)
- 09.01.1908: von 727 cm auf 677 cm PNP (NN-500)
- 10.12.1960: von 665 cm auf 655 cm PNP (NN-500)

4.2 Lineare Trends

4.2.1 Jahresextremwerte

Im Untersuchungsgebiet liegen für 78 Pegelstationen Daten mit unterschiedlichen Zeitreihen vor. Nicht alle eignen sich aufgrund der Qualität, Länge oder zeitlichen Auflösung zur Auswertung als Extremwertzeitreihe. Für die Analysen wurden 10 Pegelstationen mit möglichst langen und plausiblen verfügbaren Extremwerten ausgewählt und die Zeitreihen entsprechend aufbereitet. Die längste verfügbare Extremwertzeitreihe existiert für die Station Travemünde, die Werte reichen von 1826 bis 2016 (Jensen und Töppe 1986). Wie auch diese Ergebnisse zeigen, sind beobachtete Wasserstände vor Beginn der systematischen Aufzeichnung mit Mareographen (1882) mit größeren Unsicherheiten behaftet und im Einzelfall immer auch kritisch zu hinterfragen.

Tabelle 4: Übersicht über die mit den beiden entwickelten Verfahren P-I und P-II geprüften Bereiche und daraus detektierte potentiell unplausible Abschnitte.

Nr. Station	P-Verfahren I			P-Verfahren II			Gesamt		
	Abschnitte	stat.sign.auffällig	Zeitraum	Abschnitte	stat.sign.auffällig	Zeitraum	Abschnitte	stat.sign.auffällig	Abdeckung
1 Timmendorf/Poel	21	2118	1961-1990	5	207	1990-2013	26	2325	0.96
2 Wismar Baumhaus	32	6761	1957-1991	3	320	1991-2013	35	7081	0.97
3 Sassnitz	3	3	1963-1984	3	114	1984-2015	6	117	0.85
4 Thiessow	x	x	x	2	101	1984-2014	2	101	0.97
5 Ueckermuende	x	x	x	3	240	1976-1990	3	240	0.28
6 LT Kiel	x	x	x	1	96	1989-2015	1	96	1.00
7 Kiel-Holtenau	1	48	1964-1989	7	5911	1989-2015	8	5959	1.00
8 Eckernförde	x	x	x	2	54	1989-2015	2	54	1.00
9 Schleimünde SP	x	x	x	9	6076	1990-2015	9	6076	1.00
10 Flensburg	3	108	1964-1989	1	43	1989-2015	4	151	0.84
11 LT Kalkgrund	x	x	x	3	366	1990-2015	3	366	1.00
12 Langballigau	x	x	x	4	446	1991-2015	4	446	1.00
13 Koserow	x	x	x	1	721	1984-2014	1	721	0.70
14 Ruden	1	72	1965-1984	5	369	1984-2014	6	441	0.98
15 Lübeck Bauhof	x	x	x	3	222	1990-2014	3	222	0.96
16 Neustadt	x	x	x	2	683	1991-2014	2	683	0.96
17 Travemünde	2	194	1957-1991	1	40	1991-2014	3	234	0.86
18 Greifswald Wieck	1	1	1963-1975	4	25	1975-2013	5	26	0.96
19 Lauterbach	x	x	x	2	349	1975-2013	2	349	0.95
20 Greifswalder Oie	x	x	x	4	386	1984-2014	4	386	0.97
21 Neuendorf Hafen	x	x	x	0	0	1997-2003	0	0	0.19
22 Stahlbrode	x	x	x	5	839	1975-2014	5	839	0.98
23 Rostock UP	26	4271	1968-2014	x	x	x	26	4271	0.98
24 Warnemünde	23	2302	1957-2015	x	x	x	23	2302	0.94
25 Barhöft	10	680	1965-2015	x	x	x	10	680	0.82
	123	16558	Stunden	70	17608	Stunden	193	34166	Stunden
		1.89	Jahre		2.01	Jahre		3.9	Jahre
		0.20%	Prozent		0.22%	Prozent		0.42%	Prozent
Gesamtbetrachtung									

Um eine Quantifizierung der zeitlichen Entwicklung vornehmen zu können, wurde für die Zeitreihen jeweils der lineare Trend ermittelt und per Mann-Kendall-Trendtest (Uhlig 2002) auf Signifikanz geprüft. Neben den linearen Trendraten wurde zur Beurteilung der dekadischen Variabilität der Extremwerte ebenfalls das gleitende Mittel mit Fensterlänge

von 11 Jahren berechnet und dargestellt. Die Zeitreihen werden entsprechend ihrer geografischen Lage entlang der Küste von West nach Ost sortiert dargestellt. Aufgrund der teils variierenden Zeitreihenlängen wurden zur stationsübergreifenden Vergleichbarkeit der Ergebnisse zusätzliche Betrachtungszeiträume gewählt. Diese ergeben sich aus einer bestmöglichen Überschneidung bzw. der Länge des Nodalzyklus:

- 1826 bis 2016 (soweit verfügbar; gesamter verfügbarer Zeitraum der Zeitreihen)
- 1900/1910/1920 bis 2006 (säkuläre Entwicklung)
- 1950 bis 2006 (3-facher Nodalzyklus)

Wie die durchgeführten Analysen zeigen, ist eine Betrachtung von kürzeren Zeiträumen für Jahrestremwertzeitreihen u. a. aufgrund der großen Schwankungen der Einzelwerte wenig aussagekräftig, siehe Tabelle 5 sowie Patzke und Fröhle (2019).

Abbildung 6 zeigt die jährlichen Höchstwasserstände (HW) mit und ohne Reduktion um die RMSL-Änderungsraten aufgrund von GIA für alle verfügbaren Zeiträume. Alle Trendwerte der beiden Abbildungen sind positiv und liegen im Bereich zwischen 0.17 mm/a (Kolobrzeg) und 2.27 mm/a (Gdansk) für nicht um den GIA bereinigte Zeitreihen. Von Westen ausgehend sind die ermittelten Trends ab der Station Travemünde statistisch signifikant. Während zu Beginn des 19. Jahrhunderts sowie zu Beginn der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts Intervalle mit höherer Sturmhochwasseraktivität zu beobachten sind, ergeben sich aus den Betrachtungen der gleitenden Mittel keine stationsübergreifenden eindeutigen Schwankungsmuster.

Die GIA-Korrektur der Daten liefert im betrachteten Zeitraum keine sichtbare Vereinheitlichung der ermittelten Trendraten. Im Mittel liegen die GIA korrigierter Trends bei 1.3 ± 0.7 mm/a. Eine Zusammenfassung der Trendanalysen GIA korrigierter Zeitreihen für verschiedene Betrachtungszeiträume ist in Tabelle 5 aufgezeigt. Im Falle der Jahresmaximalwerte zeigen sich höhere Trendraten an nahezu allen Stationen. Der mittlere Trend über alle Stationen beträgt 1.5 ± 0.7 mm/a. Werden lediglich die signifikanten Trends einbezogen, liegt der Mittelwert gar bei 1.7 ± 0.6 mm/a. Insgesamt werden ausschließlich positive Trendwerte ermittelt, welche z. T. diejenigen des mittleren Meeresspiegelanstiegs übertreffen. Die Trendraten der Jahresminimalwertzeitreihen aus dem Zeitraum 1910–2006 für Stationen der südlichen Ostseeküste weisen ein inhomogenes Trendverhalten auf. Im Mittel ergeben sich im Vergleich zu den HW erheblich geringere Trends mit einer Trendrate von 0.9 ± 1 mm/a, wobei für die Kieler sowie die Pommersche Bucht negative (jedoch nicht signifikante) Trends ermittelt wurden. Im Vergleich mit den Jahresmaximalwerten zeigen die signifikanten Trends mit Raten von 1.7 ± 0.4 mm/a ein Verhalten gleicher Größenordnung.

Für die Minimalwerte zeigen sich im Vergleich zu den Maximalwerten insgesamt für eine geringere Anzahl an Stationen statistisch signifikante Trends. In vergleichbaren Zeiträumen (1900 bzw. 1910 bis 2006) zeigen Minimal- und Maximalwerte unterschiedlicher Stationen bei ausschließlicher Betrachtung der statistisch signifikanten Werte jedoch ähnliche Trendraten. Weiterhin auffällig ist, dass insbesondere die polnischen Pegel nahezu unabhängig vom Betrachtungszeitraum signifikante Trendraten aufweisen. Dieses abweichende Trendverhalten lässt sich u.a. durch die Küstenform und Lage erklären. Während die polnische Küste exponiert zur offenen Ostsee mit großen Windwirklängen ausgerichtet ist, sind die dt. Küsten von großen Buchtenzonen und vorgelagerten Inseln geprägt. Aus der Betrachtung der Wasserstandsdaten der polnischen Stationen, welche durch geringere

Buchteneinflüsse als repräsentativer für das großräumige Verhalten der südlichen Ostsee gesehen werden können, lässt sich außerdem ein Anstieg der Trendraten während des letzten Jahrhunderts vermuten, s. Abbildung 7.

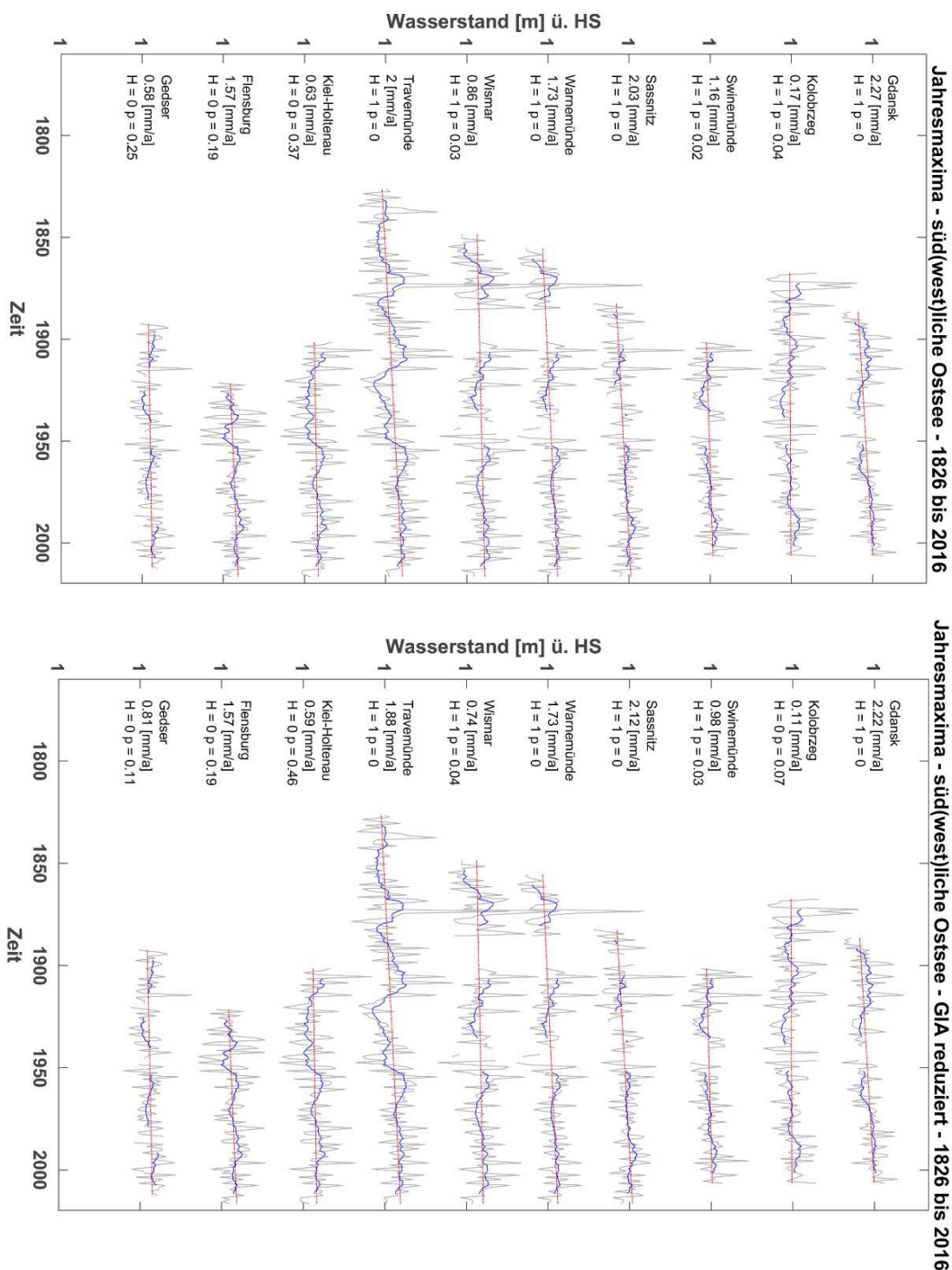


Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung der Jahresmaxima der Wasserstände an der südlichen und südwestlichen Ostseeküste für den gesamten verfügbaren Zeitraum.

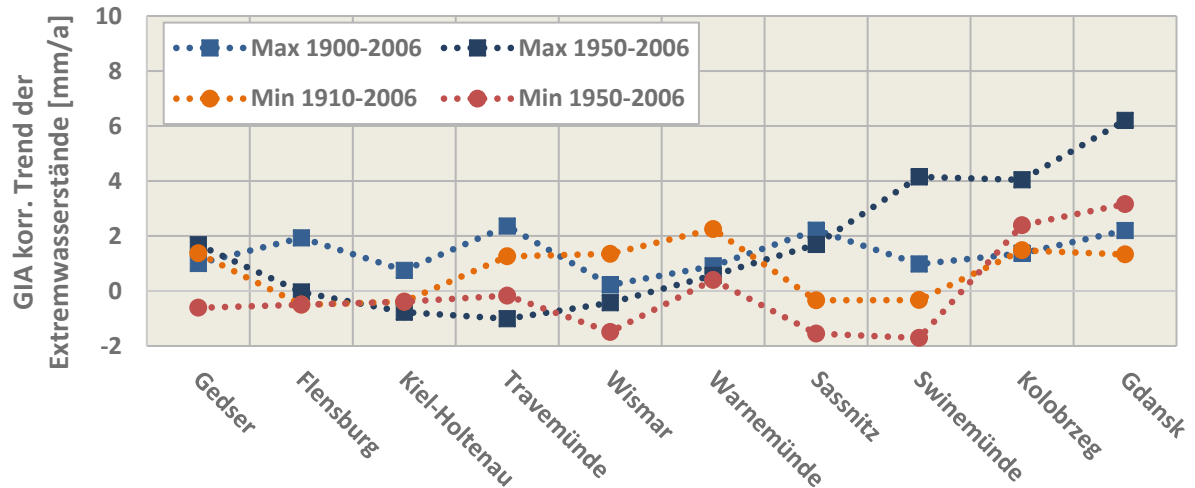


Abbildung 7: Ermittelte Trendraten für GIA korrigierte Zeitreihen der jährlichen Maximal- und Minimalwasserstände von Stationen der südlichen und südwestlichen Ostsee.

In Abbildung 8 sind die Auswertungen der jährlichen maximalen (HW) und in Abbildung 9 die der jährlichen minimalen (NW) Wasserstände mit und ohne GIA-Korrektur aus den Jahren von 1910 bis 2006 dargestellt. Werden neben den für die südliche und südwestliche Ostseeküste ausgewählten Stationen weitere Stationen der gesamten Ostsee einbezogen, kann die großräumige Entwicklung der Extremwerte im Ostseeraum beurteilt werden und der Einfluss vertikaler Landbewegungen auf die Wasserstandsdaten wird deutlich. Die hier diskutierte Untersuchung basiert auf Datenauswertungen von 19 Pegelstationen hinsichtlich ihrer Jahresmaximal- und -minimalwerte. Während im Bottnischen Meerbusen signifikant negative und in der südlichen Ostsee signifikant positive Trendraten der nicht um den GIA-Einfluss korrigierten Jahresmaximalwerte ermittelt werden, zeichnet sich nach der GIA-Korrektur ein weitgehend homogenes Bild der zeitlichen Entwicklung der Jahresmaximalwerte im gesamten Ostseeraum ab. Im Mittel ergeben sich die signifikanten Trends der GIA korrigierten Zeitreihen für den Betrachtungszeitraum von 1910 bis 2006 zu 2.4 ± 0.9 mm/a (vgl. Tabelle 5), welche deutlich höher liegen als der für die gesamte südwestliche Ostsee ermittelte langfristige Anstieg (1.2 ± 0.1 mm/a) des mittleren Meeresspiegels (Kelln et al. 2019). Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus anderen Studien (Gönnert et al. 2004, Hünicke et al. 2008). Bemerkenswert ist außerdem, dass für kürzere Betrachtungszeiträume einheitlich höhere Trendraten im signifikanten Bereich beobachtet werden. Für den Zeitraum ab 1950 ergibt sich im Mittel ein Trend von $4.7 \pm 0,8$ mm/a. Dies kann ein Indiz für eine Zunahme bzw. eine Erhöhung der Maximalwasserstände seltener Ereignisse sein. Die ermittelten Trends der Minimalwertzeitreihen weisen insgesamt geringere Schwankungen über die betrachteten Zeiträume auf. Dies liegt vorwiegend an der geringeren Variabilität der Minimalwasserstände innerhalb der Zeitreihen.

Tabelle 5: Lineare Trends für GIA korrigierte Jahresmaximal- und minimalwerte verschiedener Betrachtungszeiträume ausgewählter Pegelstationen der gesamten Ostseeküste; fett = statistisch signifikant (MK-Test); olivgrün = südl./südwestl. Ostseeküste.

Pegelname	Jahresmaxima GIA korrigiert Trends [mm/a]				Jahresminima GIA korrigiert Trends [mm/a]		
	Total	1910- 2006	1950- 2006	1970- 2006	Total	1910- 2006	1950- 2006
Hornbaek	2.01 ± 0.21	1.9 ± 0.21	2.13 ± 0.21	-2.47 ± 0.22	1.38 ± 0.17	2.38 ± 0.17	3.78 ± 0.17
Gedser	0.81 ± 0.22	1.54 ± 0.23	1.68 ± 0.23	3.78 ± 0.21	0.58 ± 0.18	1.37 ± 0.18	-0.61 ± 0.2
Flensburg	1.57 ± 0.29	1.93 ± 0.29	-0.04 ± 0.25	1.44 ± 0.24	0.46 ± 0.28	-0.5 ± 0.27	-0.5 ± 0.27
Kiel-Holtenau	0.59 ± 0.32	2.13 ± 0.31	-0.77 ± 0.3	1.53 ± 0.29	1.76 ± 0.27	-0.39 ± 0.27	-0.39 ± 0.27
Travemünde	1.88 ± 0.37	4.33 ± 0.31	-1.01 ± 0.29	3.12 ± 0.27	0.29 ± 0.25	1.26 ± 0.25	-0.17 ± 0.25
Wismar	0.74 ± 0.36	1.49 ± 0.31	0.43 ± 0.3	5.87 ± 0.28	1.4 ± 0.25	1.35 ± 0.26	-1.49 ± 0.27
Warnemünde	1.73 ± 0.31	1.5 ± 0.26	0.57 ± 0.23	3.7 ± 0.22	2.26 ± 0.22	2.25 ± 0.22	0.4 ± 0.23
Sassnitz	2.12 ± 0.27	2.69 ± 0.25	1.69 ± 0.21	1.24 ± 0.2	0.055 ± 0.19	-0.34 ± 0.19	-1.55 ± 0.19
Swinemünde	0.98 ± 0.26	1.85 ± 0.25	4.15 ± 0.22	3.43 ± 0.22	-0.62 ± 0.16	-0.33 ± 0.17	-1.71 ± 0.16
Kolobrzeg	0.11 ± 0.32	2.29 ± 0.25	4.04 ± 0.21	3.26 ± 0.22	1.35 ± 0.16	1.48 ± 0.16	2.39 ± 0.16
Gdansk	2.22 ± 0.23	2.74 ± 0.22	6.2 ± 0.19	2.97 ± 0.2	1.51 ± 0.14	1.33 ± 0.14	3.16 ± 0.13
Klaipeda	4.59 ± 0.27	5.56 ± 0.27	5.6 ± 0.29	3.94 ± 0.28	1.61 ± 0.16	1.74 ± 0.16	2.65 ± 0.16
Helsinki	-0.09 ± 0.27	2.62 ± 0.27	2.62 ± 0.27	2.62 ± 0.27	2.74 ± 0.15	3.93 ± 0.14	3.93 ± 0.14
Hanko	-0.66 ± 0.22	0.17 ± 0.22	0.17 ± 0.22	0.17 ± 0.22	2.21 ± 0.14	4.21 ± 0.14	4.21 ± 0.14
Rauma	1.3 ± 0.23	0.18 ± 0.22	0.18 ± 0.22	0.18 ± 0.23	2.78 ± 0.12	1.68 ± 0.13	1.68 ± 0.13
Furuogrund	3.91 ± 0.22	3.96 ± 0.22	4.38 ± 0.25	-1.77 ± 0.25	-0.14 ± 0.16	-0.94 ± 0.16	1.72 ± 0.16
Stockholm	2.1 ± 0.16	2.3 ± 0.15	2.28 ± 0.16	-1.55 ± 0.18	1.45 ± 0.1	1.7 ± 0.11	1.74 ± 0.11
Kungsholmsfort	1.53 ± 0.19	2.36 ± 0.18	4.41 ± 0.18	0.8 ± 0.17	1.83 ± 0.12	1.17 ± 0.12	-0.36 ± 0.12
Smogen	1.92 ± 0.17	1.5 ± 0.17	4.4 ± 0.16	3.5 ± 0.17	1.59 ± 0.09	1.43 ± 0.09	2.69 ± 0.1
Mittelwert (alle)	1.5	2.3	2.3	1.9	1.3	1.3	1.1
Stdabw.	1.2	1.3	2.2	2.2	0.9	1.3	1.9
Mittelwert (sign.)	1.7	2.4	4.7	-	1.7	1.7	2.8
Stdabw.	0.5	0.9	0.8	-	0.4	0.5	0.7
Mittelwert (alle südl. Ost- see)	1.3	2.2	1.7	3.0	0.9	0.7	0.0
Stdabw.	0.7	0.8	2.3	1.3	0.8	1.0	1.6
Mittelwert (sign. Südl. Ostsee)	2.0	2.4	4.8	-	1.6	1.6	3.2
Stdabw.	1.2	0.9	1.0	-	0.4	0.4	0.0

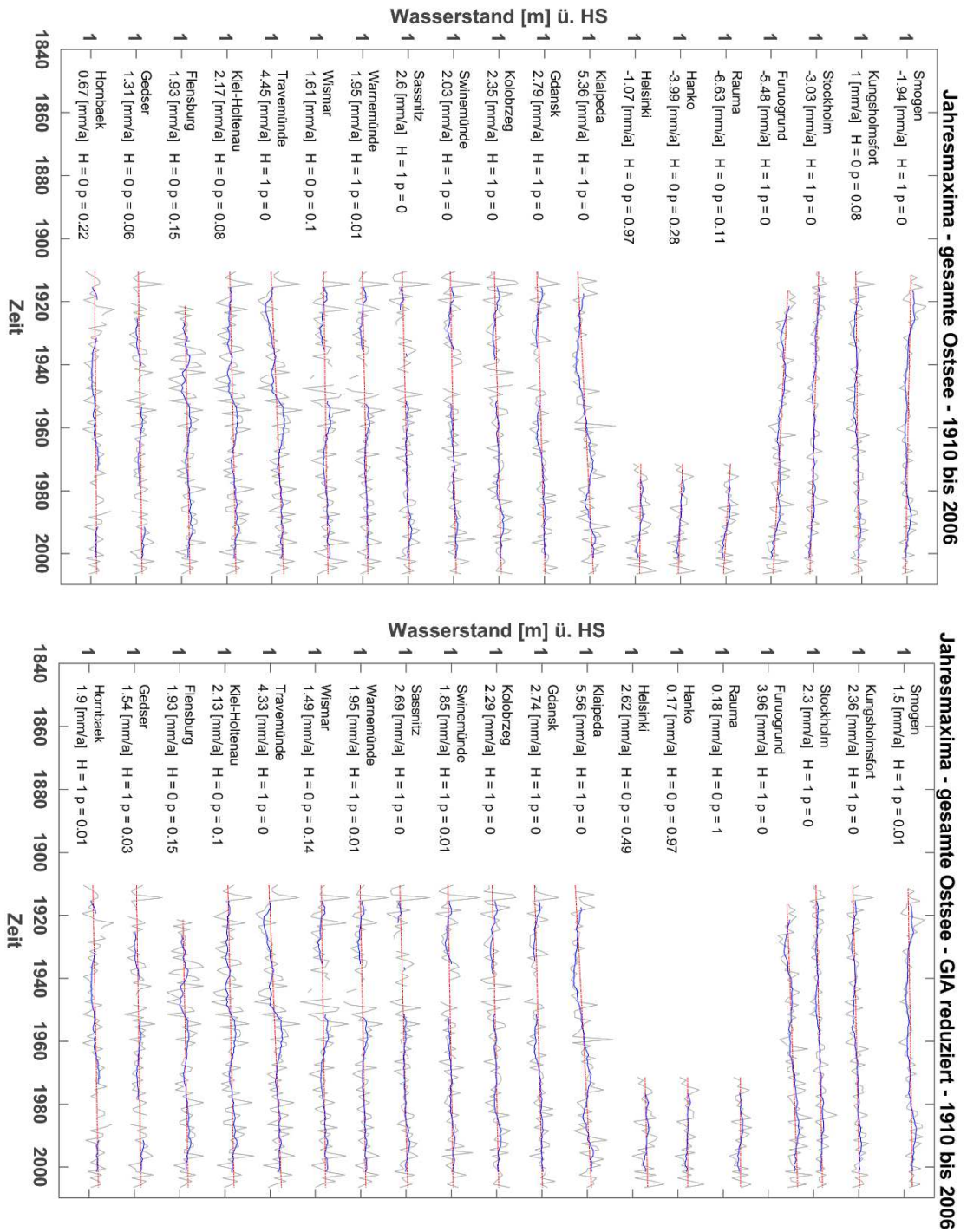


Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung von extremen Hochwasserständen an der Ostseeküste: oben Maxima, unten GIA korrigierte Maxima.

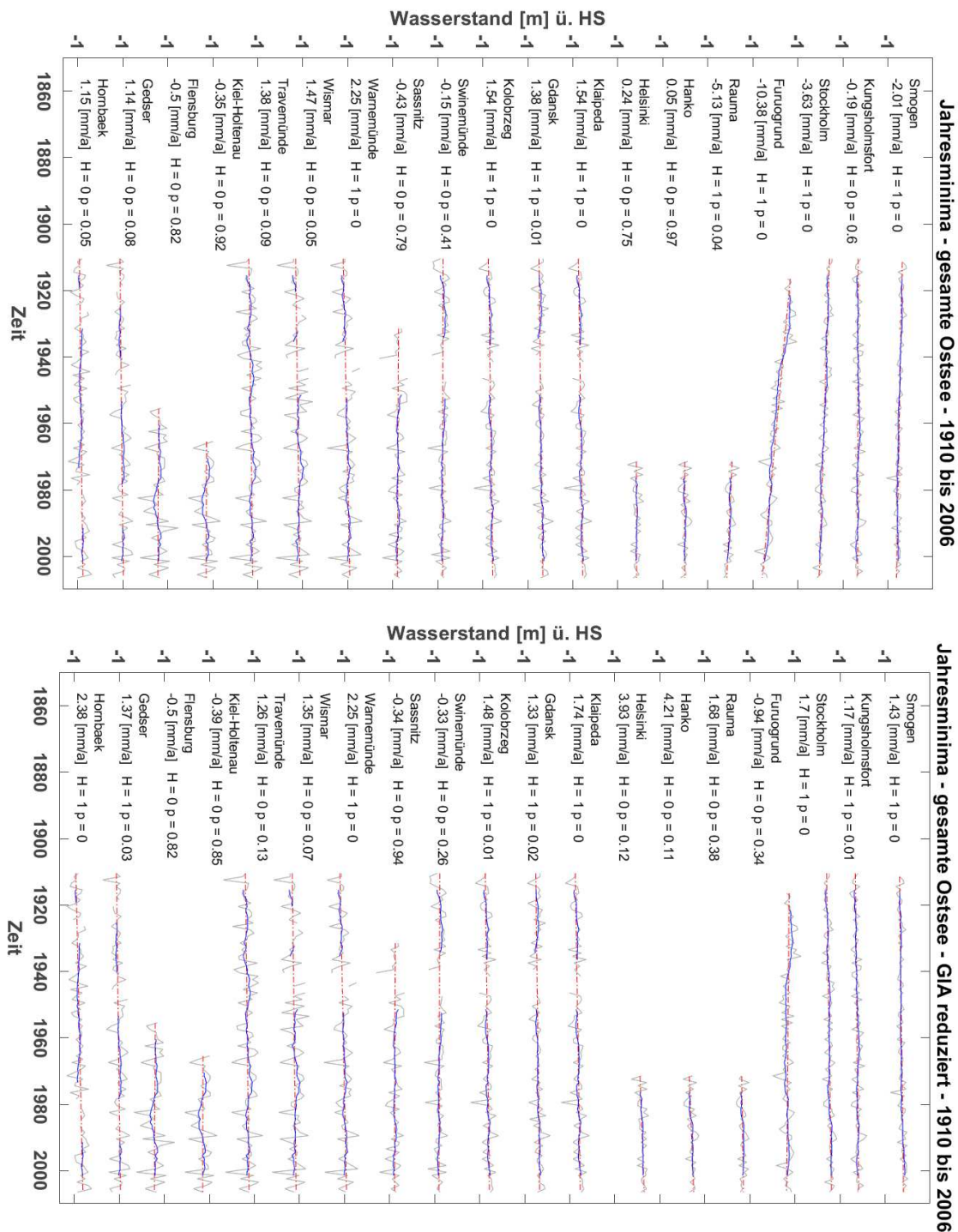


Abbildung 9: Zeitliche Entwicklung von extremen Niedrigwasserständen an der Ostseeküste: oben Minima, unten GIA korrigierte Minima.

4.2.2 Monatsextremwerte

Zur Untersuchung saisonaler Veränderungen im Auftreten extremer Wasserstände wurden die hochaufgelösten Daten von sechs deutschen Pegelstationen (Flensburg, Kiel-Holtenau, Travemünde, Wismar, Warnemünde und Sassnitz) im Zeitraum von 1957 bis 2016 hinsichtlich ihrer monatlichen Extremwasserstände ausgewertet. Die ermittelten Stichproben wurden einer Trendanalyse unterzogen und die Ergebnisse miteinander verglichen. Eine

Einschätzung zu den mittleren und räumlichen Verhältnissen der saisonalen Anteile sowie zur zeitlichen Entwicklung der Extremwerte einzelner Monate wird getroffen. Einschätzungen zur extremwertstatistischen Einordnung der monatlichen Wasserstände nach Wiederkehrintervallen basieren in Teilen auf der im Rahmen des Vorhabens angefertigten Projektarbeit von Mahzoum (2018).

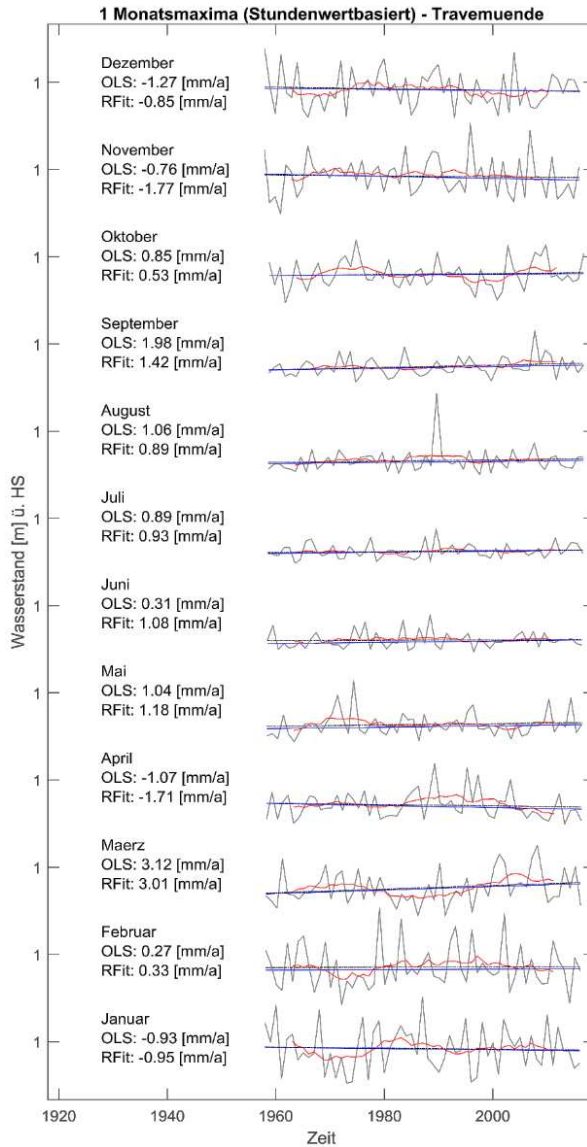


Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung monatlicher Maximalwasserstände der Station Travemünde (H1957-2016); mit 11m-gleit. Mittel (rot), OLS (schwarz) und robuste Regression (blau); GIA korrigiert.

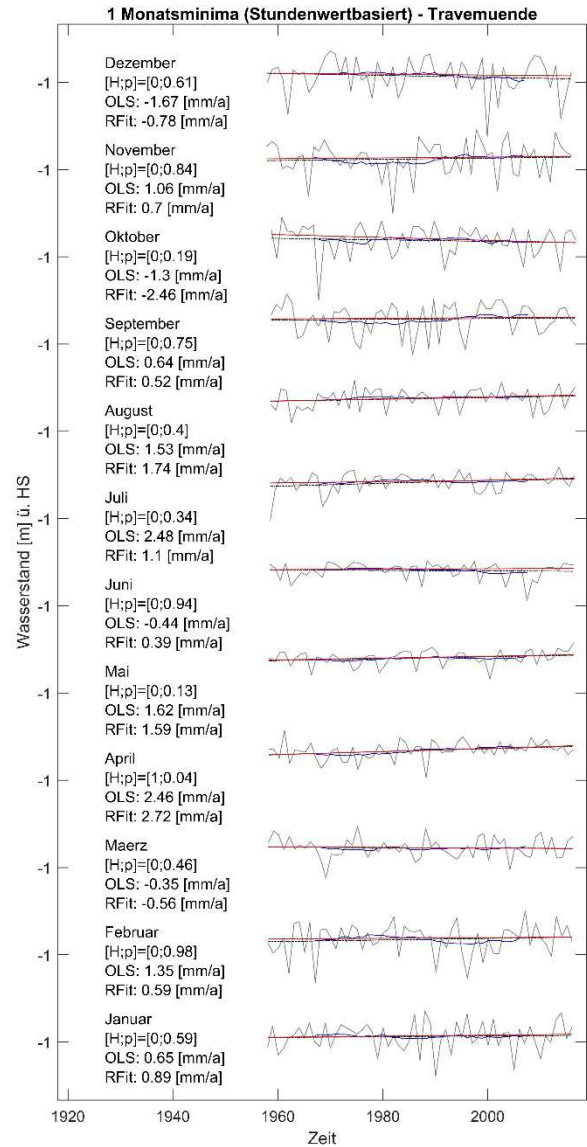


Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung monatlicher Minimalwasserstände der Station Travemünde (H1957-2016); mit 11m-gleit. Mittel (rot), OLS (schwarz) und robuste Regression (blau); GIA korrigiert.

Abbildung 10 zeigt die Form der Trend-Auswertung anhand der Ergebnisse für die Station Travemünde. Dargestellt sind die ermittelten und plausibilisierten monatlichen Maximalwerte über den Betrachtungszeitraum. Ergänzt ist die Darstellung um Ergebnisse der linearen Trendanalyse mittels der Methode der kleinsten Quadrate (OLS) sowie der Methode der robusten Regression (RR). Bei der robusten Regression wird eine Wichtung der Stichprobenwerte vorgenommen, sodass vom Mittel stark abweichende Werte geringeren Einfluss auf den ermittelten Trendwert ausüben. Um etwaige periodische Schwankungen in

den Stichproben aufzuzeigen, wurden Parameterstudien mit unterschiedlich langen gleitenden Fenstern zur Mittelwertbildung durchgeführt. Im Ergebnis hat sich gezeigt, dass die verwendeten Fensterlängen von 11 Jahren, entsprechend der Visualisierung einer dekadischen Periodizität, die aussagekräftigsten Ergebnisse liefern (siehe auch Weidemann 2014). Während in den Sommermonaten nahezu keine dekadischen periodischen Anteile in den Stichproben beobachtet werden, zeigen die Monate von Oktober bis April ein stärkeres dekadisches Signal. Die beobachteten Schwankungen sind dabei über die Monate einer Saison (Jahreszeit) jedoch nicht gleich verteilt. In den Monaten Oktober, November, Dezember, Januar, Februar und April wurde ein periodischer Hochpunkt in der Mitte der achtziger Jahre beobachtet, demgegenüber sind im Monat März in dieser Phase deutlich geringere Extrema aufgetreten. D. h., es wird für den Monat März eine gegenläufige Periodizität beobachtet.

Wie sich darüber hinaus in den folgenden Analysen zeigt, sind daneben weitere statistische Merkmale für den Monat März im Vergleich zu den anderen Monaten außergewöhnlich. In den mittleren Verhältnissen der ermittelten Monatsextrema, dargestellt in Abbildung 12, wird dieser Umstand jedoch noch nicht direkt deutlich. Die höchsten Extrema werden mit durchschnittlich etwa 0.9 m NHN in Kiel-Holtenau, Flensburg, Travemünde und Wismar in den Monaten November bis Januar beobachtet. Mit 0.8 m NHN in Warnemünde und 0.7 m NHN in Sassnitz fallen die Extrema (arithm. Mittel der Monatsmaxima des Wasserstands) außerhalb von Förden und Buchten im Mittel 10 cm bzw. 20 cm niedriger aus. Nach der Wintersaison ist bei allen Stationen ein Abfall der mittleren Maximalwasserstände zu beobachten. In Sassnitz (0.3 m NHN) und Warnemünde (0.4 m NHN) werden die niedrigsten mittleren Monatsextrema im Mai beobachtet, an den anderen Stationen erst im Juni (~ 0.5 m NHN). Am konstantesten treten hohe Extremwerte im Dezember auf, für diesen Monat sind die Standardabweichungen der monatlichen Maximalwasserstände an allen Stationen deutlich geringer als im Januar und November. Insgesamt werden an allen Stationen die größten Schwankungen (Standardabweichungen) im Januar und Februar beobachtet.

Analog zu den höchsten Hochwasserständen werden die niedrigsten Niedrigwasserstände zwischen November und Januar beobachtet, jedoch mit einem eindeutigen Minimum an allen Stationen im Januar. Während die Maxima der Buchtenpegel (hier Flensburg, Kiel-Holtenau und Travemünde) ein weitgehend einheitliches Verhalten aufweisen, zeigen die Niedrigwasserstände in Flensburg mit den extremsten Werten im Januar von im Mittel -1 m NHN ein deutlich abweichendes Verhalten. Die höchsten Niedrigwasserstände werden (im Juli) analog erneut in Sassnitz beobachtet, welches der offenen Ostsee zugewandt und dementsprechend geringeren Sunkeffekten ausgesetzt ist. Die größten Amplituden, also die Differenzen zwischen den im Mittel höchsten und niedrigsten Werten werden in Flensburg im Januar beobachtet. Gleichzeitig zeigt die Station Flensburg normale (Maxima) bis geringe (Minima) Schwankungsbreiten gegenüber den anderen Stationen. Werden die monatlichen Trends der untersuchten Stationsdaten grafisch den Monaten gegenübergestellt, kann eine mögliche Verschiebung von Sturmhochwassercharakteristiken beurteilt werden. In Abbildung 12 sind die Trends sowie die mittleren Verhältnisse der monatlichen Extremwasserstände aus dem Zeitraum 1957 bis 2016 dargestellt.

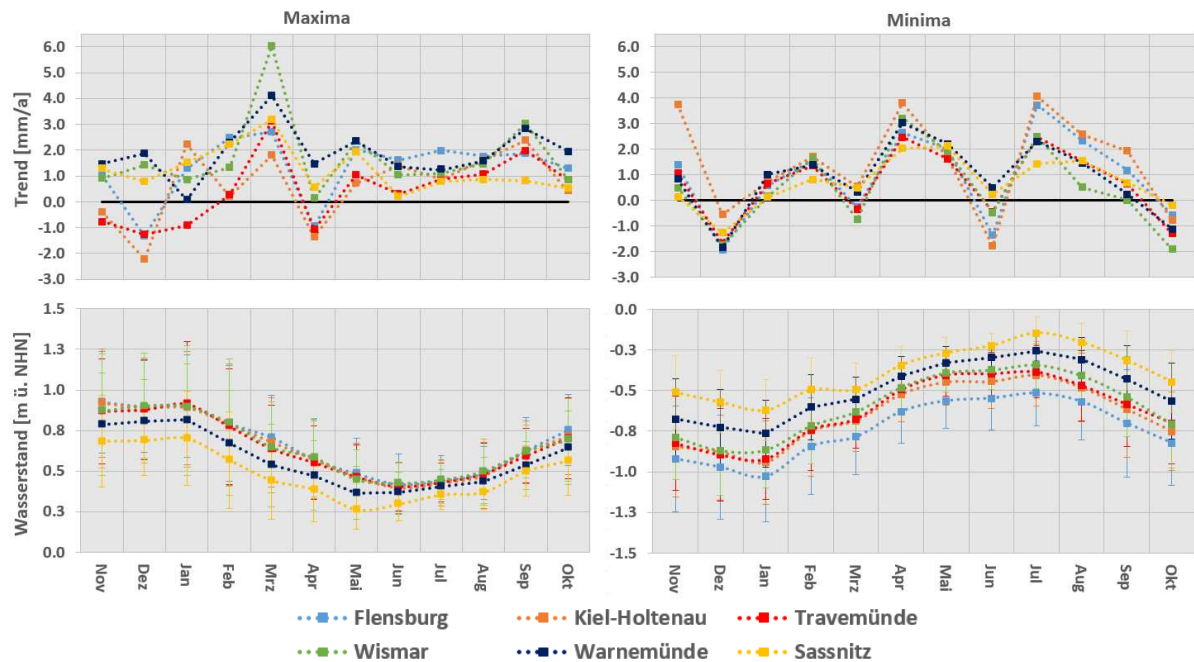


Abbildung 12: Lineare Trends und mittlere Verhältnisse inkl. Standardabweichung der monatlichen Maxima/Minima der Wasserstände an den Stationen Flensburg, Kiel-Holtenau, Travemünde, Wismar, Warnemünde und Sassnitz für den Zeitraum 1957 bis 2016.

Zusammenfassend wird hier beobachtet, dass bei Betrachtung der Trends der Monatsmaxima zwischen den Monaten Mai und Oktober ein weitgehend einheitliches Trendverhalten mit positiven/steigenden Trends im Bereich von etwa 1–2 mm/a für alle Stationen auftritt. Von November bis März wurden überwiegend positive/steigende Trends bei jedoch deutlich größeren Schwankungen zwischen den Stationen ermittelt. An allen Stationen werden die größten positiven Trends im Jahresverlauf im März ermittelt. Gefolgt werden diese von einem Einbruch der Trendraten im April mit über alle Stationen hinweg gering positiven (Warnemünde, Sassnitz, Wismar) bis negativen (Travemünde, Kiel-Holtenau, Flensburg) Trends. Dieses Verhalten deckt sich weitgehend zwischen beiden angewandten Trendermittlungsmethoden (kleinste Quadrate und robuste Regression) und deutet eine zeitliche Verschiebung des Auftretens von höheren Wasserständen (eine Verschiebung der Sturmhochwasser-Saison) in Richtung März an. Ein Verhalten, das dem der Maxima gegenüber abweicht, zeigt sich bei Betrachtung der Entwicklungen der monatlich niedrigsten Niedrigwasserstände. Das Trendverhalten weist ein sehr einheitliches Verhalten über alle Stationen hinweg sowie eine Schwankung im drei bis vier Monatsrhythmus auf. Minima mit betragsmäßig negativen Trends treten im Dezember, März, Juni und Oktober an allen Stationen auf. Die betragsmäßig größten negativen Trends weisen die Pegeldata in den Monaten Oktober und Dezember auf. Die betragsmäßig größten positiven Trends der Minimalwasserstände wurden für April ermittelt. Im Vergleich mit der Entwicklung des mittleren Meeresspiegels zeigt sich, dass die negativen/fallenden Trends und die leicht steigenden Trendwerte zwischen Dezember und Februar meist unterhalb von ermittelten MSL Trends liegen. Die Spanne zwischen Sturmhoch- und Sturmniedrigwasserständen kann daher in diesen Monaten weiter ansteigen. Im Monat April zeigt sich ein entgegengesetztes Bild. Dort werden niedrige Maxima- und hohe Minima-Trends beobachtet, sodass auf Basis dieser Auswertung für den Monat April eine zukünftige Abnahme extremer hoher und niedriger

Wasserstände vermutet werden kann. Als Einschränkung bleibt anzumerken, dass die Verfügbarkeit hochaufgelöster Stundendaten (welche für diese Form der Auswertung notwendig sind) die Betrachtungszeiträume auf längstens die 1950er Jahre begrenzt.

4.3 Häufigkeiten

In diesem Abschnitt werden die zeitlichen Veränderungen der absoluten Häufigkeiten von Extremereignissen diskutiert. Die Trenduntersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der Höhe der Extremwasserstände signalisieren (vgl. Kapitel 4.5), dass leichte Sturmhochwasser zukünftig höhere Wasserstände aufweisen können bzw. dass die Wasserstände für Sturmhochwasser mit 5 Jahren Wiederkehrintervall signifikant steigen und sich parallel eine Verschiebung/Ausweitung der Sturmhochwassersaison in den Frühling andeutet (vgl. Kapitel 4.2.2). Zusätzlich zur Höhe von Extremereignissen soll in diesem Kapitel nun deren Häufigkeit diskutiert werden. Hierzu wird die Ereignishäufigkeit von Sturmhochwasserständen auf der Grundlage der zuvor als repräsentativ ausgewählten Stationen (Flensburg, Kiel-Holtenau, Travemünde, Wismar, Warnemünde und Sassnitz) für den Zeitraum von 1957 bis 2016 (60 Jahre) angegeben.

Für die Auswertung der Häufigkeit des Auftretens sind Zeitreihen mit möglichst hoher zeitlicher (und räumlicher) Auflösung und vor allem mit kontinuierlichen, d. h. lückenlosen Wasserstandsaufzeichnungen erforderlich. Analog zur Untersuchung der Verweilzeiten von Wasserständen (vgl. Kapitel 4.4) wird die Häufigkeit der Sturmhochwasser durchgängig nach den vier Klassen des BSH (Sztobryn et al. 2005) für HW-Ereignisse (hier SI-SIV) herangezogen. Die Klassen I bis IV für NW Ereignisse (Sztobryn et al. 2009) werden analog festgelegt (hier NI bis NIV):

- Sturmhochwasser (SI): 1.00–1.25 m über MW
- mittleres Sturmhochwasser (SII): 1.25–1.50 m über MW
- schweres Sturmhochwasser (SIII): 1.50–2.00 m über MW
- sehr schweres Sturmhochwasser (SIV): mehr als 2.00 m MW

- Sturmniedrigwasser (NI): 1.00–1,25 m unter MW
- mittleres Sturmniedrigwasser (NII): 1.25–1.50 m unter MW
- schweres Sturmniedrigwasser (NIII): 1.50–2.00 m unter MW
- sehr schweres Sturmniedrigwasser (NIV): mehr als 2.00 m unter MW

An der einzigen polnischen Station (Wladyslawowo) für die hochaufgelöste Daten über mehrere Dekaden vorliegen, wurden im gesamten Untersuchungszeitraum lediglich 18 Sturmhochwasserereignisse ermittelt. Nur zwei Ereignisse sind dabei höher aufgelaufen als ein leichtes Sturmhochwasser. Statistisch signifikante Trends in den Häufigkeiten weisen die Daten dieser Station nicht auf.

Eine alleinige Auswertung der linearen Trends des Auftretens innerhalb der betrachteten Klassen bietet sich nicht an, da im Betrachtungszeitraum nur wenige Ereignisse eingetreten sind die höher als ein leichtes Sturmhochwasser aufliefen. Ereignisse werden als unabhängig betrachtet, wenn Sie mindestens 168 Stunden (7 Tage) auseinanderliegen. Dies entspricht der zweifachen Länge (An- und Abklingzeit) der größten ermittelten mittleren jährlichen Verweilzeit auf Sturmhochwasserklassen an den betrachteten Pegeln.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Auswertung für die sechs ausgewählten Stationen zusammengefasst. Die für die Kategorie SI ermittelten linearen Trendraten sind für die Stationen Flensburg, Travemünde und Wismar signifikant ($\alpha = 10\%$). Für die Station Warnemünde wurde ein steigender Trend ermittelt, dieser ist jedoch nicht signifikant. Diese Ergebnisse sind konsistent zu Arbeiten von Meinke (1998), welche einen steigenden (jedoch nicht-signifikanten) Trend im Auftreten der leichten Sturmhochwasser für Warnemünde im Zeitraum 1953 bis 1997 festgestellt hat. Weidemann (2014) hat ergänzend dazu ermittelt, dass die Häufigkeitszunahme leichter Sturmhochwasser mit einer erhöhten Häufigkeit von Eigenschwingungen (Beckenschwingungen) der Ostsee zusammenfällt.

Tabelle 6: Sturmhoch- und Sturmniedrigwasserhäufigkeiten an deutschen Pegelstationen im Zeitraum 1957 bis 2016 unterteilt nach Klassen.

Sturmhochwasser									
Pegelname	SI		SII		SIII		SIV		Gesamt
Flensburg	85	69 %	32	26 %	7	6 %	0	0 %	124
Kiel-Holtenau	71	65 %	28	25 %	11	10 %	0	0 %	110
Travemünde	79	68 %	27	23 %	11	9 %	0	0 %	117
Wismar	76	63 %	32	27 %	11	9 %	1	1 %	120
Warnemünde	63	80 %	12	15 %	4	5 %	0	0 %	79
Sassnitz	38	95 %	2	5 %	0	0 %	0	0 %	40

Sturmniedrigwasser									
Pegelname	NI		NII		NIII		NIV		Gesamt
Flensburg	85	62 %	40	29 %	11	8 %	2	1 %	138
Kiel-Holtenau	57	72 %	14	18 %	8	10 %	0	0 %	79
Travemünde	56	73 %	15	19 %	6	8 %	0	0 %	77
Wismar	44	73 %	12	20 %	4	7 %	0	0 %	60
Warnemünde	19	83 %	2	9 %	2	9 %	0	0 %	23
Sassnitz	7	88 %	1	13 %	0	0 %	0	0 %	8

Tabelle 7: Sturmhochwasserhäufigkeiten (10 Jahre) an deutschen Pegelstationen im Zeitraum 1957 bis 2016.

Sturmhochwasser													
Pegelname	1957-66		1967-76		1977-86		1987-96		1997-2006		2007-16		Gesamt
Flensburg	18	15 %	18	15 %	16	13 %	30	24 %	16	13 %	26	21 %	124
Kiel-Holtenau	18	16 %	18	16 %	16	15 %	25	23 %	16	15 %	17	15 %	110
Travemünde	17	15 %	17	15 %	14	12 %	28	24 %	21	18 %	20	17 %	117
Wismar	14	12 %	17	14 %	17	14 %	27	23 %	23	19 %	22	18 %	120
Warnemünde	11	14 %	8	10 %	12	15 %	17	22 %	15	19 %	16	20 %	79
Sassnitz	5	13 %	7	18 %	6	15 %	10	25 %	6	15 %	6	15 %	40

Sturmniedrigwasser													
Flensburg	16	12 %	26	20 %	24	18 %	25	19 %	21	16 %	20	15 %	132
Kiel-Holtenau	11	14 %	13	16 %	15	19 %	16	20 %	15	19 %	9	11 %	79
Travemünde	12	16 %	9	12 %	16	21 %	15	19 %	15	19 %	10	13 %	77
Wismar	10	17 %	5	8 %	10	17 %	14	23 %	11	18 %	10	17 %	60
Warnemünde	2	9 %	3	13 %	5	22 %	4	17 %	4	17 %	5	22 %	23
Sassnitz	0	0 %	2	25 %	2	25 %	2	25 %	1	13 %	1	13 %	8

An den Buchtenpegeln sind im Untersuchungszeitraum im Mittel 120 Sturmhochwasserereignisse eingetreten. Demgegenüber stehen lediglich 79 Sturmhochwasserereignisse in Warnemünde bzw. 40 Sturmhochwasserereignisse am Pegel Sassnitz. Dies entspricht einem Anteil von 63 bis 69 % an leichten Sturmhochwasserereignissen im Betrachtungszeitraum für die Buchtenpegel und 80 % in Warnemünde bzw. gar 95 % in Sassnitz. Es wurde lediglich ein Ereignis der Kategorie sehr schwer (SIV) detektiert, welches laut Stundendaten am 03-11-1995 um 22 Uhr in Wismar einen Höchstwasserstand von 2.03 m NHN erreichte.

Während die Buchtenpegel bei den HW-Ereignissen weitgehend einheitliche Häufigkeiten aufweisen (Ausnahmen sind Warnemünde und Sassnitz), zeigt sich bei Betrachtung der Statistik der Niedrigwasser ein inhomogeneres Bild. Mit 138 Ereignissen treten an der Station Flensburg fast doppelt so viele Niedrigwasserereignisse auf wie an den anderen Buchtenpegeln (~70). Darüber hinaus ist der Anteil an Niedrigwassern der Kategorie NI im Vergleich zu Hochwassern der Kategorie SI in Flensburg kleiner. Die Stationen Sassnitz und Warnemünde weisen nahezu keine Ereignisse extremer als NI und insgesamt unter 20 % der Anzahl der Ereignisse in Flensburg auf. Ursachen für die Unterschiede können mit der Lage des Pegels in der Bucht (tiefer) sowie der Binnengewässerabflüsse in die Förden begründet werden (geringer).

Werden nun die Ereignisse der 60 betrachteten Jahre (1957–2016) in 10-Jahresabschnitte unterteilt, siehe Tabelle 6, wird deutlich, dass im Falle der Hochwasser in den ersten drei Jahrzehnten im Beobachtungszeitraum verhältnismäßig einheitliche Sturmhochwasserhäufigkeiten ermittelt wurden. Ab Mitte der achtziger Jahre nimmt die Anzahl der Sturmhochwasserstände und auch der Sturmniedrigwasserstände merklich zu. Maximal wurden in der Dekade 1987 bis 1996 30 Sturmhochwasserereignisse am Pegel Flensburg beobachtet. In den beiden Dekaden nach 1996 wurden wieder weniger Sturmhochwasser beobachtet, jedoch mehr als in den ersten drei Dekaden (1957–1966, 1967–1976 und 1977–1986). Dies könnte u. a. am Anstieg des mittleren Meeresspiegels liegen, welcher zu einer generellen Erhöhung der Wasserstände und damit indirekt auch zu erhöhten Sturmhochwasserständen führt. Auf Basis der im Vorhaben AMSeL Ostsee ermittelten mittleren MSL Anstiegsraten von ~1.2 mm/a (Kelln et al. 2019) kommt es innerhalb des Betrachtungszeitraums jedoch lediglich zu wenigen Zentimetern absolutem Meeresspiegelanstieg. Eine adäquate Erklärung für den Anstieg von ~50 auf etwa 70 Ereignisse in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums, mittlere und schwere Ereignisse eingeschlossen, liefert dies nicht. Hieraus kann im Umkehrschluss abgeleitet werden, dass in den letzten drei Dekaden vor 2017 eine höhere Sturmhochwasseraktivität geherrscht haben muss.

Insgesamt lassen sich drei Dekaden erhöhter Sturmhochwasseraktivität detektieren und eine langfristige Entwicklung ist in Form einer Erhöhung der Häufigkeit leichter Sturmhochwasser zu verzeichnen. Bei Reduktion der Daten um ein 19j-gleitendes Mittel werden keine signifikanten Trends mehr nachgewiesen. Die mittlere Eintrittshäufigkeit einer hier betrachteten Dekade liegt für die Buchtenpegel bei ~20 Ereignissen/Dekade, in Warnemünde bei 13 Ereignissen/Dekade und in Sassnitz bei 7 Ereignissen/Dekade.

4.4 Verweilzeiten

Zur Untersuchung der Auswirkungen von Extremwasserständen sind (insbesondere an den Ostseeküsten) die Verweilzeiten der Wasserstände bedeutsam. Der Energieeintrag eines Sturmhochwasserereignisses auf die Nord- und Ostseeküste ist vergleichbar groß, weil

die im Vergleich zur Nordsee geringeren Wasserstände an der Ostsee deutlich höhere Verweilzeiten aufweisen (können). Die langen Verweilzeiten bei Ostseesturmhochwassern tragen maßgeblich zu Küstenveränderungen bei. So sind bspw. Hochwasserschutzdünen gefährdet, die bereits bei Wasserständen, die den Dünenfuß erreichen, abgetragen werden (Weisse und Meinke 2017) und auch Steilküsten, welche eine Aushöhlung, später eine Kappung und anschließend einen Abtrag der entstehenden Kliffhalden erfahren (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz MV 2009).

Im Rahmen von AMSeL_Ostsee B sind Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der Verweilzeiten und Wellenenergien durchgeführt worden. Die hier diskutierten Ergebnisse beziehen sich rein auf Verweilzeiten. Für die Auswertungen sind die sechs bereits zuvor betrachteten Stationen (Flensburg, Kiel-Holtenau, Travemünde, Wismar, Warnemünde und Sassnitz) mit stündlichen Wasserstandsdaten im Zeitraum 1957 bis 2016 ausgewählt worden. Für die polnischen Pegelstationen liegen keine sinnvoll auszuwertenden hochaufgelösten Daten vor. Diese sind jedoch für eine Analyse der Verweilzeiten notwendig (Patzke und Fröhle 2019, Jensen et al. 2010).

Die Verweilzeit ist als diejenige Dauer definiert, die ein Wasserstand über bzw. unterhalb eines definierten Niveaus verbleibt. Untersuchungen vor AMSeL_Ostsee zu Verweilzeiten an der südlichen Ostsee wurden von Meinke (1998) für Warnemünde und von Weidemann (2014) für verschiedene deutsche Ostseestationen auf Basis von Modellrechnungen durchgeführt. In beiden Arbeiten wurde eine Zunahme der jährlichen Verweilzeiten im Bereich leichter Sturmhochwasser nachgewiesen, eine Signifikanz wurde jedoch nicht festgestellt. Die Zunahme der jährlichen Verweilzeiten wird dabei nicht auf erhöhte Verweildauern je Ereignis, sondern auf eine Zunahme der Häufigkeit leichter Sturmhochwasser zurückgeführt (s. a. Kapitel 4.3).

Die in AMSeL_Ostsee B durchgeführte Analyse der Verweilzeiten wurde auf jährlicher Basis mit einer Vor-Klassifizierung der auf NHN bezogenen Wasserstandsdaten in Höhenstufen von $\delta h = 0.25$ m durchgeführt. Die Wahl der Höhenstufe entspricht bei klassischen Deichprofilen in etwa einem Meter Deichbreite. Die zeitliche Entwicklung (linearer Trend) der Verweilzeiten wurde für Höhenstufen von 0.25 m, für Sturmflutklassen nach BSH (s. Kapitel 4.3) sowie für Wasserstände größer 1 m NHN untersucht.

Die Ergebnisse zu den jährlichen Verweilzeiten im Zeitraum 1957 bis 2016 für Wasserstände größer 1 m NHN sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Teilung der Balken (schwarz SI, rot SII, gelb SIII&SIV) erfolgt nach den Sturmhochwasserklassen SI bis SIII/SIV (Kapitel 4.3). Die maximale Verweildauer größer 1 m NHN liegt bei den Pegeln Flensburg, Travemünde und Wismar bei etwa 130 h. Die Wasserstände in Kiel-Holtenau (149 h) und Warnemünde (221 h) verweilen deutlich länger in den Sturmflutklassen. Erheblich geringer liegt Sassnitz (43 h).

Die Ergebnisse der maximalen jährlichen Verweildauern je Pegel sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Sturmhochwasser dauern damit teilweise bis zu fünfmal so lange an wie extreme Sturmflutserien an der Nordsee, die z. B. zu maximalen Verweilzeiten von 43 h am Pegel Borkum führen (Weisse et al. 2019).

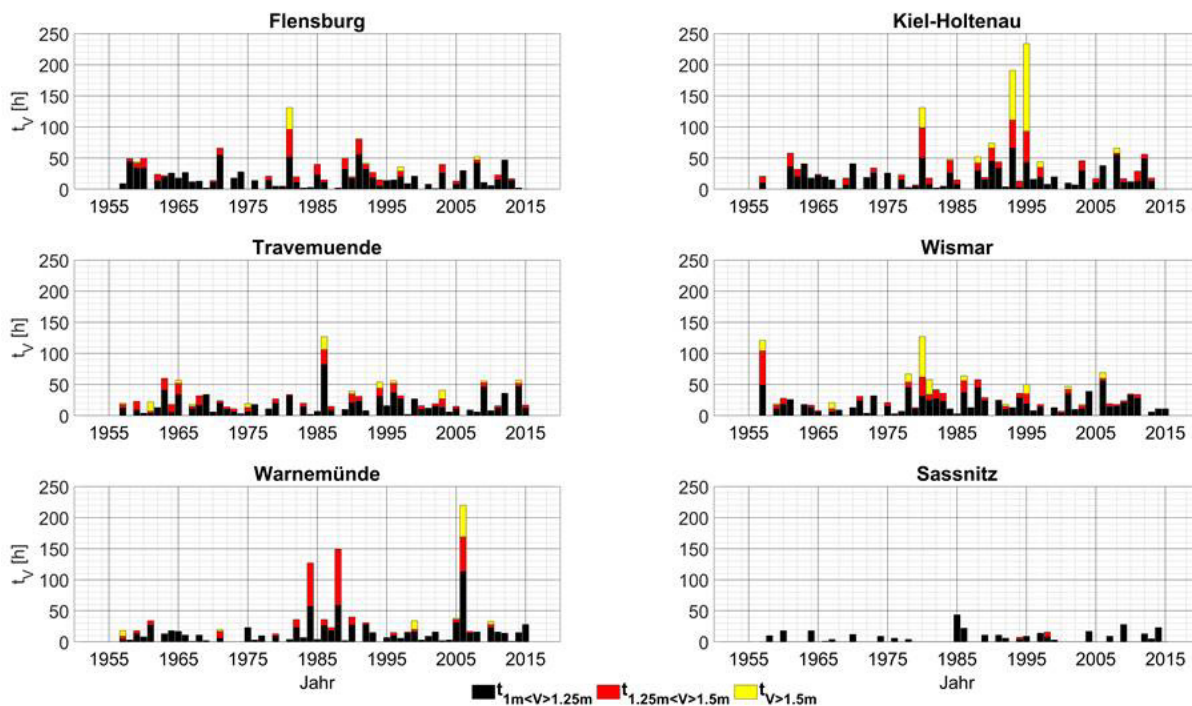


Abbildung 13: Jährliche Verweilzeiten von Wasserständen > 1 m NHN im Zeitraum 1957–2016.

Tabelle 8: Maximale Verweilzeiten in den Sturmhochwasserklassen SI bis SV (Verweilzeit auf Sturmhochwasserniveau), SI, SII und SIII-SIV.

Bereich	Flens- burg	Kiel-Hol- tenau	Travemuende	Wismar	Warnemuende	Sassnitz
Max. SI-SIV [h]	131	234	127	127	221	43
Jahr	1981	1995	1986	1980	2006	1985
Max. SI [h]	56	66	82	56	113	43
Jahr	1991	1993	1986	2006	2006	1985
Max. SII [h]	44	50	24	55	90	8
Jahr	1981	1995	1986	1957	1988	1998
Max. SIII/SIV [h]	35	141	21	65	51	0
Jahr	1981	1995	1986	1980	2006	[-]

Die sich aus der Analyse ergebenden mittleren Verhältnisse über den Gesamtzeitraum lassen sich wie folgt zusammenfassen: Der Großteil der gemessenen Wasserstände liegt im Bereich um den mittleren Wasserstand. So verweilt der Wasserstand in 75 % der Zeit in den Klassen $-0.25 \text{ m} \leq dh \leq +0.25 \text{ m}$ NHN und bereits 95 % Zeitanteil fallen auf den Wasserstandsbereich $-0.5 \text{ m} \leq dh \leq +0.5 \text{ m}$ NHN. Im Mittel liegt der Wasserstand lediglich in 0.2 % der Zeit innerhalb einer der Sturmhochwasserklassen mit Wasserständen größer 1 m NHN, was rd. 18 h/Jahr entspricht. Die korrespondierenden extremen Niedrigwasserstände kleiner -1 m NHN nehmen mit im Mittel etwa 0.6 % (rd. 53 h/Jahr) einen fast dreimal so hohen Anteil ein. Es ist anzumerken, dass die in den höheren Klassen ermittelten Verweilzeiten sich lediglich aus einer geringen Anzahl (zumeist ≤ 3) von Einzeleignissen (stationsabhängig) ergeben. Nur am Pegel Wismar wurden Verweilzeiten ($< 10 \text{ h}$) der Kategorie sehr schwere Sturmflut mit Wasserständen $> 2 \text{ m}$ NHN ermittelt. Extreme Niedrigwasserstände im Bereich kleiner -2 m NHN wurden dagegen für mehrere Stationen ermittelt.

Zur Analyse der zeitlichen Entwicklung der Verweilzeiten wurden die linearen Trends der jährlichen Verweilzeiten bei unterschiedlicher Klasseneinteilung ermittelt. Für die Einteilung in Sturmhochwasserklassen nach BSH sowie für Verweilzeiten der Wasserstände im Bereich größer 1 m NHN sind die berechneten Trends bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % jedoch nicht signifikant.

Um eine vergleichende Betrachtung mit den für die gesamte Ostsee akquirierten Daten zu vollziehen, sind Daten weiterer Stationen einbezogen worden. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 14 dargestellt. Hierbei sind die Zeitreihen von der Beobachtungsdauer her nicht einheitlich umfangreich, wobei dennoch darauf geachtet wurde ausschließlich möglichst ähnlich lange Zeitreihen einzubeziehen. Außerdem ist zusätzlich eine Reduktion der Zeitreihen um ihr 19-jährliches gleitendes Mittel durchgeführt worden, um den Einfluss des Meeresspiegelanstiegs möglichst gering zu halten. Zu Vergleichszwecken wurde auch der Datensatz der Station Esbjerg hinzugezogen, welche sich als dem Skagerrak nahegelegene Nordseestation für Vergleiche anbietet. Als wesentliche Erkenntnis daraus ist festzuhalten, dass die Verschiebung der Verweilzeiten in der Ostsee im Bereich der mittleren Wasserstände dem Trend des Anstiegs des mittleren Meeresspiegels folgt, während die Verweilzeiten an der betrachteten Nordseestation in Esbjerg vorwiegend oberhalb des Mittelwassers zunehmen.

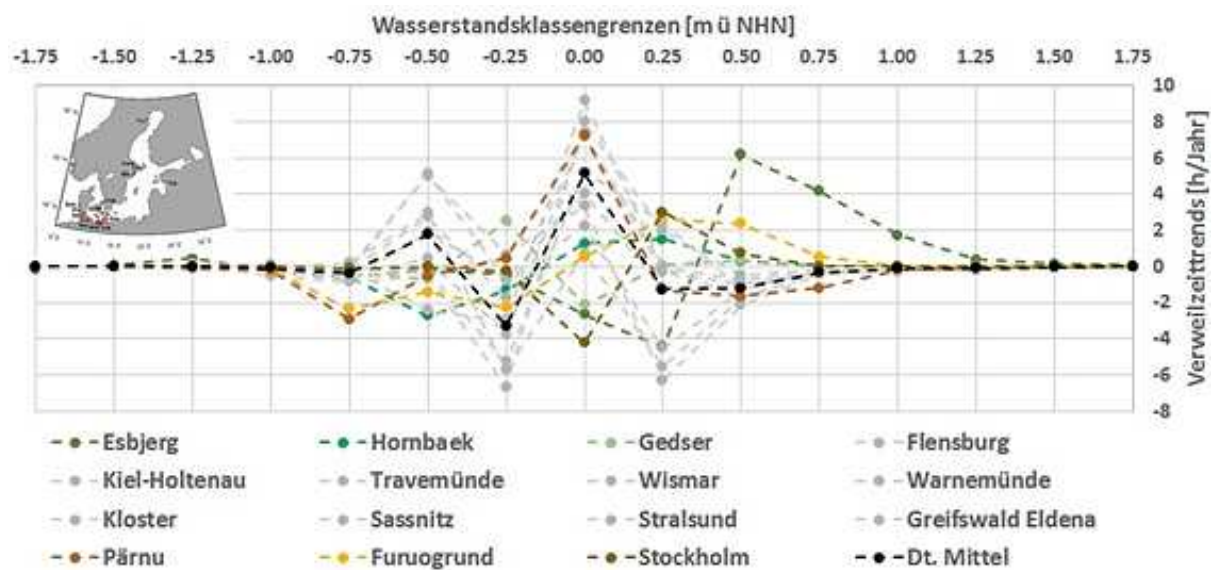


Abbildung 14: Lineare Trends der Verweilzeiten in Wasserstandsklassen mit $dh = 0,25$ m; Wasserstandsdaten von 12 Pegelstationen im Raum deutsche und erweiterte Ostseeküste, MSL-korrigiert.

4.5 Extremwertstatistik

Für ausgewählte Extremwertstichproben für deutsche und polnische Pegelstationen an der südlichen und südwestlichen Ostseeküste wurden Analysen durchgeführt, um Wasserstände mit definierten Eintrittswahrscheinlichkeiten und deren mögliche zeitliche Veränderung abzuschätzen.

Dargestellt werden Ergebnisse für die Stationen in Flensburg, Kiel-Holtenau, Travemünde, Wismar, Warnemünde, Sassnitz, Swinoujście, Kolobrzeg und Gdansk. Die maximale Stichprobengröße ist durch den jeweils abgedeckten Zeitraum mit Jahresextremwerten festgelegt. Die Zeiträume sind in Tabelle 3 angegeben, die verwendeten Extremwertzeitreihen

sind in Abbildung 6 dargestellt (Jahreswert von 1872 exkludiert). Die Arbeiten im Rahmen der extremwertstatistischen Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zusammenstellung von möglichst langen Reihen der jährlich größten Hochwasserereignisse (Abbildung 6 ohne 1872)
- Anpassung einer Vielzahl von Verteilungsfunktionen und Wahl einer Verteilungsfunktion für Vergleiche (GEV)
- Konvergenzuntersuchungen für die Zusammenstellung von Stichproben mit lediglich „seltenen“ Ereignissen; d. h. die größten Ereignisse aus N Jahren
- Anpassung, Darstellung und Auswertung mit gewählten Verteilungsfunktion für eine Vielzahl von Pegelstationen
- Untersuchung einer möglichen zeitlichen Veränderung durch die gleitende Anpassung von Verteilungsfunktionen an die Stichproben

Für die Wahl einer spezifischen Verteilungsfunktion als Grundlage für die extremwertstatistische Bewertung einer Zeitreihe oder eines Zeitreihenkollektivs sowie auch für die Ableitung von extremwertstatistisch charakteristischen Größen (z. B. Hochwasserwerte für definierte Wiederkehrintervalle) kann keine eindeutige mathematisch/statistische Begründung geliefert werden (Fröhle 2000, EAK 2002, Reiss und Thomas 2007, Maniak 2016). Man bedient sich daher in der Regel zunächst einer Auswahl von einigen bewährten Verteilungsfunktionen, um die Werte für bestimmte Wiederkehrintervalle zu bestimmen. Die finalen Werte werden dann auf der Grundlage von Bewertungsroutinen (statistische Testverfahren, Konfidenzintervalle, subjektiv-visuelle Bewertung der Anpassung, etc.) festgelegt.

Nach Zusammenstellung der Extremwertzeitreihen (a) wurden fünf gängige Verteilungsfunktionen (Log-Normalverteilung, generalisierte Extremwertverteilung, Extremwertverteilung Typ I, Weibull-Verteilung, Pearson-III Verteilung) an die Daten angepasst, um eine geeignete Verteilungsfunktion für Vergleiche untereinander zu wählen (b). Beispielhaft hierfür sind in Abbildung 15 die Ergebnisse für die Station Travemünde aufgezeigt. Durch die Anpassung einer Vielzahl an Verteilungsfunktionen kann außerdem die Spannweite möglicher Abweichungen der Wasserstände für bestimmte Wiederkehrintervalle geschätzt werden. In Konvergenzuntersuchungen wurde anschließend der Einfluss der Stichprobenauswahl (n höchste/niedrigste Wasserstände eines Jahres) auf die Höhe des ermittelten Wasserstandes eines Wiederkehrintervalls untersucht (c).

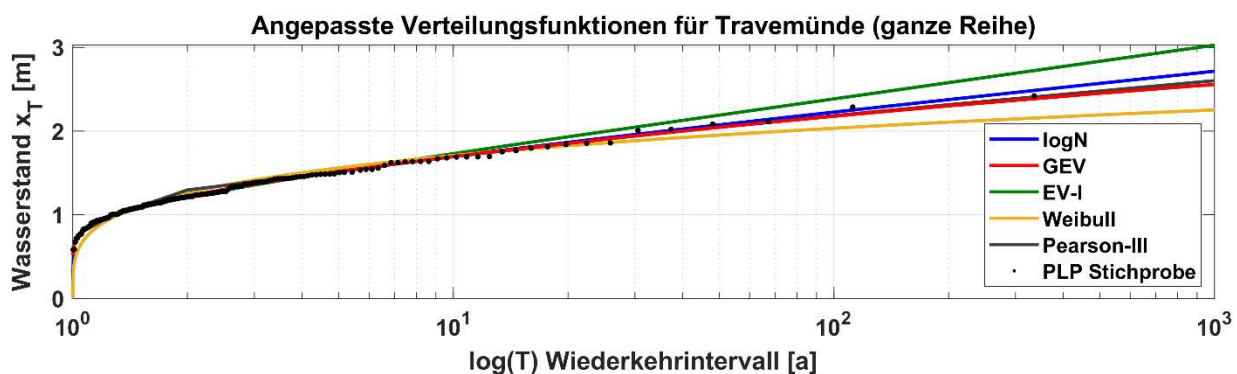


Abbildung 15: Ang. Verteilungsfunktionen an die Daten der Station Travemünde, 1826–2016.

Das Ereignis mit den bislang höchsten aufgezeichneten Wasserständen vom 11./12. November 1872 kann extremwertstatistisch nur schwer eingeordnet werden (Riemer 2015, Oumeraci et al. 2012, Mudersbach und Jensen 2009a, Sztobryn et al. 2005, BACC II Author

Team 2015). Es wird daher aus der weiteren extremwertstatistischen Betrachtung ausgeschlossen und als Ausreißer bzw. einer anderen Grundgesamtheit zugehörig betrachtet. Auf der Grundlage der für die vorgenannten Pegel durchgeführten Untersuchungen wird anschließend ein Wiederkehrintervall für das Ereignis von 1872 abgeleitet.

Im vorliegenden Artikel werden die Ergebnisse der Anpassung von Verteilungsfunktionen an die jährlichen Extremwasserstände vorgestellt (s. a. Patzke und Fröhle 2019). Aus der Analyse der Anpassungen der Verteilungsfunktionen an die Daten wurde die generalisierte Extremwertverteilung (GEV) als geeignet für einen Stationsvergleich ausgewählt (d). Die Wahl der Bestimmung der Plotting Positionen (PLP) ist in den entwickelten Routinen frei bestimmbar, für die aktuelle Analyse sind die PLP nach Weibull mit einem Wert $a = 0.5$ ermittelt worden (EAK 2002, Fröhle 2000). Für eine extremwertstatistische Betrachtung müssen die Daten auf das Jahr bezogen werden, dem die Analyse zugrunde liegen soll (hier 2016). Der Ansatz folgt der Grundannahme, dass ein vor 100 Jahren auftretendes Ereignis mit einem Scheitelwert von 1.5 m NHN unter denselben Bedingungen bei einem um 15 cm erhöhten Mittelwasser heute mit 1.65 m NHN auflaufen würde. Ähnlich zum Ansatz von Mudersbach und Jensen (2008) wird für diese Form der Auswertung eine vereinfachte Annahme der Mittelwasserentwicklung vorgenommen. Die Zeitreihen werden vor der extremwertstatistischen Auswertung um den GIA-Effekt und den linearen Trend von 1.5 mm/a, ermittelt aus Monatsmittelwertzeitreihen der gesamten Ostsee, korrigiert. Es ist wichtig festzuhalten, dass die ermittelten Wasserstände mit seltenen Wiederkehrintervallen sensitiv in Bezug auf die verwendete Methodik sind. Das heißt, dass methodische Änderungen (Stichprobe, Verteilungsfunktion, Betrachtungszeitraum, Bezugsjahr, zugrunde gelegter Meeresspiegelanstieg) Abweichungen insbesondere bei abgeleiteten Wasserständen für seltene Extremereignisse hervorrufen. Dies wird als ursächlich für Unterschiede zu ermittelten Extremwasserständen bestimmter Wiederkehrintervalle anderer Autoren (z. B. Generalplan Küstenschutz SH und Regelwerk Küstenschutz MV) angesehen. Im vorliegenden Fall werden die Ursachen für Unterschiede der Extremwerte mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit zu den Regelwerken der Länder Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern veröffentlichten Referenz- bzw. Bemessungshochwasserstände auf eine unterschiedliche Methodik bei der Einbeziehung des säkulären Meeresspiegelanstiegs, bei der Reduktion um GIA-Effekte, bei der Korrektur von dokumentierten Einzelereignissen (s. Kapitel 3.2), Rundungseffekten und letztlich auch durch eine veränderte Datengrundlage erklärt.

Exemplarisch für die Ergebnisse ist hier die Anpassung der GEV an die Wasserstandsdaten für die Station Travemünde in Abbildung 16 dargestellt. Entsprechend der Auswertung würde für das im Jahr 1872 eingetretene Ereignis ein Wiederkehrintervall von mehreren tausend Jahren ermittelt werden. Die in der Stichprobe enthaltenen höchsten Hochwasserstände weisen Wiederkehrintervalle von bis zu 400 Jahren auf. Für das niedrigste Niedrigwasserereignis der Stichprobe aus dem Jahre 1912 mit einem gemessenen Wasserstand von -2.04 m NHN wird ein statistisches Wiederkehrintervall von ca. 400 Jahren ermittelt.

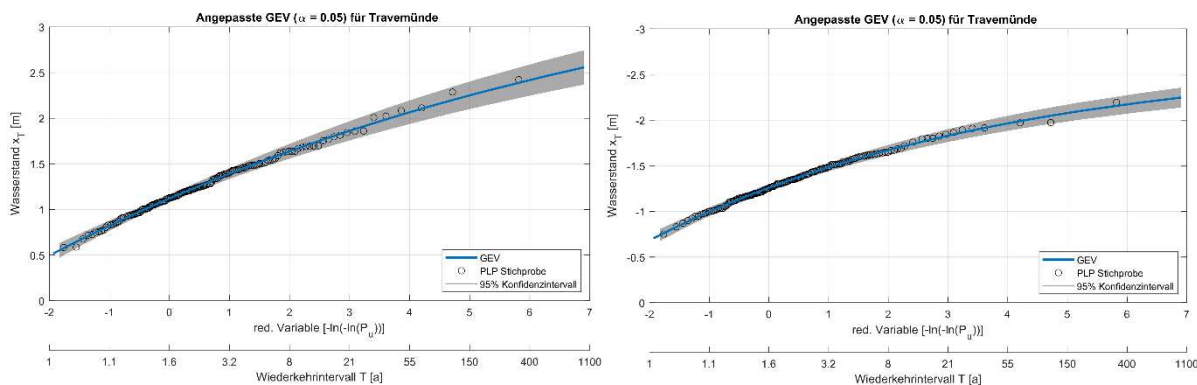


Abbildung 16: Angepasste gen. Extremwertverteilung der jährlichen Maximalwerte (links) und Minimalwerte (rechts) der Station Travemünde aus dem Zeitraum 1826–2016 (ohne 1872).

In Tabelle 9 sind die aus den Anpassungen der GEV ermittelten Wasserstände für fünf Wiederkehrintervalle aufgeführt. Auf mögliche Gründe für Unterschiede zu den von den Ländern MV und SH angegebenen Hochwasserständen mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (HW200 oder RHW) wurde im vorigen Absatz eingegangen.

Wie Tabelle 9 zeigt, fallen die Niedrigwasser im westlichen Teil der südlichen Ostsee deutlich niedriger aus. Dies ist auf den in Richtung Ost abnehmenden Tideeinfluss sowie den geringeren Buchteneinfluss auch in den eher östlichen Bereichen zurückzuführen.

Tabelle 9: Auf Basis der GEV ermittelte Wasserstände [m ü NHN] für 9 Pegelstationen der südwestlichen Ostseeküste im gesamten verfügbaren Zeitraum (s. Tabelle 3).

Station	Maxima					Minima				
	HW5	HW10	HW50	HW100	HW200	HW5	HW10	HW50	HW100	HW200
Flensburg	1.51	1.64	1.85	1.92	1.97	-1.57	-1.71	-1.97	-2.07	-2.15
Kiel-Holtenau	1.56	1.72	2.04	2.16	2.27	-1.42	-1.57	-1.87	-1.99	-2.10
Travemünde	1.52	1.69	2.05	2.18	2.30	-1.58	-1.71	-1.95	-2.04	-2.11
Wismar	1.63	1.81	2.18	2.32	2.46	-1.45	-1.58	-1.85	-1.94	-2.03
Warnemünde	1.36	1.51	1.79	1.89	1.99	-1.31	-1.43	-1.65	-1.72	-1.79
Sassnitz	1.20	1.35	1.66	1.79	1.91	-1.03	-1.14	-1.36	-1.45	-1.53
Swinemünde	1.26	1.41	1.74	1.89	2.03	-1.04	-1.13	-1.32	-1.39	-1.46
Kolobrzeg	1.31	1.49	1.92	2.11	2.31	-1.06	-1.16	-1.34	-1.40	-1.46
Gdansk	1.15	1.27	1.52	1.61	1.70	-0.84	-0.93	-1.08	-1.13	-1.17

Der Bereich Darßer Schwelle/Rügen sorgt als natürliche Barriere zusätzlich für Unterschiede zwischen den westlich und östlich auftretenden extremen Niedrigwassern. Westlich des Pegels Sassnitz fallen die Niedrigwasser beispielsweise min. 20 cm niedriger aus als östlich von Sassnitz. Alle Stationen, mit Ausnahme von Danzig (Gdansk), weisen im Mittel alle fünf Jahre Wasserstände von -1 m NHN auf. Im Vergleich sind die Hochwasserereignisse insgesamt gleichmäßiger über die Stationen verteilt. Dies ist auf meist die gleichen Entstehungsursachen (Stürme, Beckenschwingung) zurückzuführen. Unterschiede lassen sich vielfach aus der lokalen Küstenform ableiten. Die höchsten Hochwasserstände ergeben sich für die Station in Wismar, obwohl beispielsweise der Buchteneinfluss aufgrund der Lage des Pegels in Flensburg ähnlich hoch sein müsste. Maßgeblich scheinen hier die höheren Windwirkklängen gegenüber der durch die dänischen Inseln geschützten Flensburger Bucht. Auch in Travemünde werden hohe Extreme beobachtet, da die Wasserstände auch

hier vorwiegend durch die hohen Windwirklängen von Nord-Ost in die Mecklenburger Bucht hervorgerufen werden. Basierend auf der hier vorgestellten Auswertung weisen die deutschen Stationen in Kiel-Holtenau, Travemünde und Wismar sowie die polnischen Stationen in Swinoujscie und Kolobrzeg Wasserstände > 2 m NHN für ein Wiederkehrintervall von 200 Jahren auf.

Zudem wurde im Vorhaben die zeitliche Veränderlichkeit der Wasserstände definierter Wahrscheinlichkeiten untersucht, in dem die gewählten Verteilungsfunktionen innerhalb eines Zeitfensters angepasst und jeweils gleitend um ein Jahr verschoben werden (e). Für jedes Zeitfenster werden die Wasserstände bestimmter Wiederkehr extrapoliert, um deren zeitliche Entwicklung beurteilen zu können. Sensitivitätsstudien haben ergeben, dass sich für die Wahl der Fensterlänge ein Vielfaches der Nodaltide anbietet. Die periodischen Schwankungen der Nodaltide (18.6 a) werden geglättet und der Fokus auf darüber hinaus gehende langperiodische Schwankungen gelegt. Eine vergleichbare Auswertung mit umfassender Beschreibung des Vorgehens („langlebiger Chronist“) und seiner theoretischen Hintergründe hat Führböter (1976) für Pegel der deutschen Nordseeküste vorgenommen. Durch die Verschiebung des Zeitfensters mit jeder Anpassung kann eine zeitlich abhängige (instationäre) Betrachtung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten vorgenommen werden, ohne dass die grundsätzliche Forderung nach Stationarität der Stichproben für jede einzelne Stichprobe aufgehoben wird.

Die Zeitfensterlänge wurde auf 38 Jahre festgelegt, um einen Ausgleich zwischen möglichst großer Fensterbreite bzw. Einzelstichprobengröße, der Anzahl der möglichen Fenster über die max. Zeitreihenlänge und der Einbeziehung der Nodaltide zu erzielen.

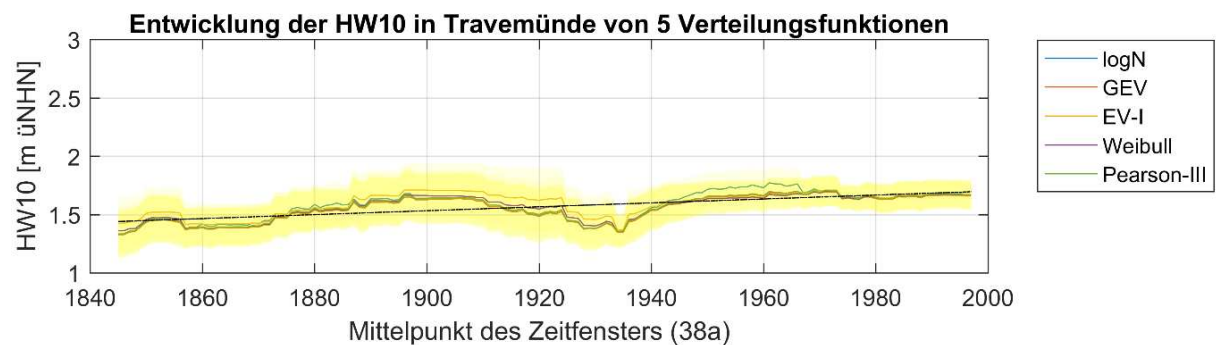


Abbildung 17: Zeitliche Entwicklung der Wasserstände mit einer Wiederkehr von $T = 10$ Jahren an der Station Travemünde.

Für jedes Zeitfenster wurden die zuvor aufgezeigten fünf Verteilungsfunktionen (Abbildung 15) an die Stichprobe angepasst. Um das Maß der Unbestimmtheit eines Hochwasserstandes für eine vorgegebene Überschreitungswahrscheinlichkeit zu beurteilen, wurden außerdem für jede Verteilungsfunktion die Konfidenzgrenzen ($\alpha = 5\%$) ermittelt und grafisch aufgetragen (gelbe Zone).

Im Ergebnis der Untersuchungen wird festgehalten, dass die Güte der Anpassung für die verschiedenen Stichproben schwankt. Durch die Verschneidung der ermittelten Konfidenzgrenzen lässt sich in der gewählten Darstellung jedoch eine Kernzone ermitteln, welche den wahrscheinlichen Wertebereich aufzeigt, siehe Abbildung 17. Die dort aufgetragenen HW-Werte wurden aus den angepassten Verteilungsfunktionen ermittelt und jeweils zur Mitte des betrachteten Zeitfensters in das Diagramm eingetragen. Aufgetragen über

den Verlauf der Zeitfenstermittelpunkte ergibt sich schlussendlich die instationäre Entwicklung der Wasserstände eines gleichbleibenden Wiederkehrintervalls (Abbildung 17). Neben einem langfristigen positiven Trend wird zudem eine längerfristige Periodizität von ca. 70 Jahren in den Daten beobachtet.

Abbildung 18 zeigt eine Gegenüberstellung der ermittelten zeitlichen Entwicklung der HW5 sowie der HW100 für die Stationen in Flensburg, Kiel-Holtenau, Travemünde, Wismar und Warnemünde. Die unterschiedliche Eingangslänge der Zeitreihen beeinflusst dabei den abgedeckten Bereich der Ergebnisse. Es ist zu beachten, dass von den in Tabelle 3 angegebenen Zeitreihenlängen durch die Betrachtung von Teilzeitreihen in Form von Zeitfenstern auf beiden Seiten eine halbe Zeitfensterlänge entfällt. Abbildung 18 ist zu entnehmen, dass der lineare Trend die Entwicklung des HW5 für die ausgewählten Pegel insbesondere für die Zeitfenster nach etwa 1930 recht gut wiedergibt und dass die Trendraten für das HW5 ab etwa 1930 durchgängig positiv sind.

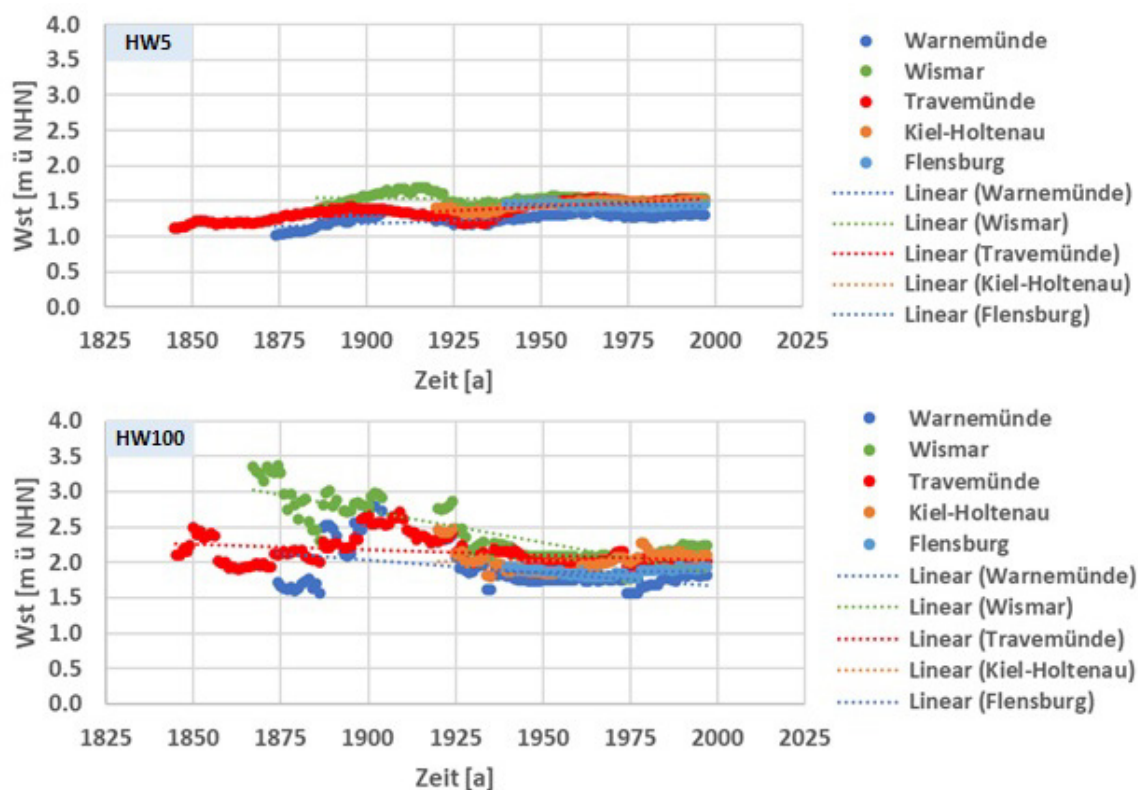


Abbildung 18: Zeitliche Entwicklung der Wasserstände mit einem Wiederkehrintervall von 5 (oben) und 100 Jahren (unten) an ausgewählten Pegelstationen der Ostseeküste.

Der zeitliche Verlauf des HW5 für Travemünde zeigt ein relatives Minimum zu Beginn etwa der 1930er Jahre, welches sich in abgeschwächter Weise in den Ergebnissen aus Kiel-Holtenau, Wismar und Warnemünde bestätigt. Die Ergebnisse der Station Flensburg beginnen erst ab 1940. Die zeitliche Entwicklung der HW100-Werte folgt für keine der ausgewählten Stationen einem eindeutigen linearen Trend, weil die Unsicherheiten insbesondere für die Stichproben der Zeitfenster bis 1925 zu großen Schwankungen in den Ergebnissen führen.

Der zeitliche Verlauf der HW100-Werte zeigt demgegenüber erst für den Zeitraum nach etwa 1975 einen weitgehend linearen Anstieg für alle Pegel. Zwischen etwa 1940 und 1975 sind die HW100-Werte recht konstant. Vor 1940 sind die Werte stark variabel mit

einem Maximum etwa um die oder kurz nach der Jahrhundertwende zum 20. Jahrhundert. Die für diesen Zeitraum ermittelten HW100-Werte liegen teilweise bis zu 1 m höher als die HW100-Werte für das letzte Zeitfenster (1978–2016). Ursächlich hierfür sind die teilweise sehr extremen Hochwasser im Zeitfenster um die Jahrhundertwende (u. a. 1872, 1882, 1904, 1913). Weitere Zeiträume, in denen in der Ostsee statistisch seltene Stürme so konzentriert aufgetreten sind, wurden nach der Jahrhundertwende (1900) nicht wieder beobachtet.

Bei allen dargestellten Reihen ist zu beobachten, dass die Differenzen zwischen den Anpassungsfunktionen größer werden je weiter in die Historie geschaut wird. Auch wenn in diesem Projekt und in zahlreichen Arbeiten zuvor die Qualität der sehr alten Wasserstandsdaten verbessert wurde, zeigt sich in dieser Auswertung (erneut) recht deutlich, dass weiterhin Optimierungsbedarf besteht. Anders ist es nicht zu erklären, dass mit Beginn der Verfügbarkeit von hochaufgelösten Wasserstandsdaten das sich ergebende stationsübergreifende Verhalten für Extrapolationen von bis zu 100 Jahren Wiederkehr nahezu gleich verläuft, obwohl zuvor Schwankungen von bis zu 2 m ermittelt wurden.

Tabelle 10: Ermittelte lineare Langzeittrends [mm/s] der zu einem Wiederkehrintervall zugewiesenen Wasserstände und Beurteilung der Signifikanz des Trends, Ablehnung mit $H = 0$ bei $p > 5\%$.

Station	HW5		HW10		HW50		HW100	
	Trend [mm/a]	Signifikanz [H;p]	Trend [mm/a]	Signifikanz [H;p]	Trend [mm/a]	Signifikanz [H;p]	Trend [mm/a]	Signifikanz [H;p]
Flensburg	-0,5	1;0,008	-1,8	1;0	-4,8	1;0	-6,0	1;0
Kiel-Holtenau	2,5	1;0	1,6	1;0	0,4	0;0,5	-0,1	0;0,58
Travemünde	2,3	1;0	1,9	1;0	0,9	1;0	0,5	0;0,08
Wismar	-0,3	0;0,73	-1,3	1;0	-3,3	1;0	-4,3	1;0
Warnemünde	1,5	1;0	1,0	1;0	-0,1	1;0,25	-0,7	1;0,03
Sassnitz	1,3	1;0	0,2	1;0,001	-3,0	1;0	-4,6	1;0

Die Tabelle 10 zeigt die ermittelten linearen Wasserstandstrends (vgl. vorstehende Anmerkungen) für die gesondert untersuchten Wiederkehrintervalle. Wichtig bei der Interpretation ist, dass die zugrunde liegende Zeitreihenlänge (s. Tabelle 3) in den Eingangsdaten bei dem Vergleich der Ergebnisse nicht außer Acht gelassen wird. Während die Trends grundsätzlich große Unterschiede aufweisen, zeigen sich dennoch zwei qualitative Unterschiede. Zum einen sind die ermittelten Trends der HW5 überwiegend positiv mit Raten größer > 1 mm/s (Ausnahmen sind Flensburg und Wismar mit gering negativen Trendraten). Zum anderen nimmt der Trend für alle Stationen zu den selteneren Ereignissen hin ab, sodass die Trends der HW100 mit Ausnahme von Travemünde alle (teils deutlich) im negativen Bereich liegen. Wie bereits diskutiert, existieren jedoch weiterhin Unsicherheiten bei den verfügbaren historischen Informationen der Extremwasserstände. Weitere verfügbare historische Daten und Informationen sollten digitalisiert und verwendet werden.

5 Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben AMSeL_Ostsee B wurde im Wesentlichen das Ziel verfolgt, langfristige Aufzeichnungen von möglichst hochaufgelösten Wasserstandsdaten zu akquirieren, aufzubereiten und innerhalb der Projektgruppe zur Verfügung zu stellen sowie die gewonnenen Wasserstandsdaten hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung von Extremereignissen

auszuwerten und zu bewerten. Im Ergebnis des Vorhabens wurden die folgenden Forschungsziele erreicht.

Datenakquise, Datenaufbereitung und Bereitstellung

- Im Projektverlauf wurden Wasserstandsdaten von 185 Pegelstationen in bis zu zehn verschiedenen zeitlichen Auflösungen und 17 verschiedenen Ausgangsdatenformaten aus neun Ländern akquiriert.
- Diese Daten wurden hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit bewertet und, wenn benötigt, in eine für das Projekt aufgebaute MySQL-Datenbank einheitlich formatiert integriert. Über die Datenbank von AMSeL_Ostsee sind 484 Datensätze mit Zeitreihen von 185 Stationen verfügbar. Zusätzlich sind Metadaten (zeitl. Auflösung, Lokation, Start- und Endzeitpunkt, Küsten-Km, Pegelnummer, Stationsnummer/-code, Innen-/Außenküste (nur dt.), verfügbare Bezugshöhen der Daten, Datenquelle) abrufbar.
- Für hochaufgelöste Wasserstandsdaten wurde ein Plausibilisierungsverfahren entwickelt und auf hochaufgelöste deutsche Wasserstandsdaten angewandt. Auf Basis der Ergebnisse wurden bereits offizielle Wasserstandsdaten angepasst.
- Die Recherchen zu Pegelreferenzen haben für Daten der Station Travemünde für drei historische Ereignisse eine Änderung der Wasserstände um bis zu 50 cm ergeben.
- Neben Wasserstandsdaten wurden altimetrische Daten sowie Daten zur Landhebung im Ostseeraum akquiriert und bearbeitet. Während die Anwendung altimetrischer Daten auf die Analyse der langzeitlichen Entwicklung von Extremereignissen an Küstenpegeln nicht oder nur bedingt geeignet ist (kurzer verfügbarer Zeitraum, ungenau in Küstennähe) wurden die Einflüsse der Landbewegungen aus GPS und GIA Daten miteinander verglichen, quantifiziert und in die Analysen einbezogen.

Statistische Analyse der zeitlichen Entwicklung extremer Ereignisse unter Einbeziehung des MSL

- Für die Beurteilung der zeitlichen Entwicklung von Extremwasserständen wurden für Stationen der südlichen und südwestlichen Ostseeküste sowie der gesamten Ostseeküste Zeitreihen extremer Hochwasser- und Niedrigwasserereignisse zusammengestellt, aufbereitet und ausgewertet.
- Die linearen Trendraten der zusammengestellten Extremwertzeitreihen wurden auf verschiedenen Zeitskalen mit und ohne den Einfluss vertikaler Landbewegungen untersucht. Die Ergebnisse der Betrachtung der südlichen und südwestlichen Ostsee ergeben nach Korrektur des GIA-Einflusses für alle Betrachtungszeiträume Trendraten die oberhalb derer des mittleren Meeresspiegelanstiegs liegen. Je kürzer der Betrachtungszeitraum gewählt wurde, desto größer sind die ermittelten Trendraten. Für einen Zeitraum von ca. 100 Jahren (1910–2006) ergibt sich ein mittlerer säkularer Anstieg der Hochwasserstände in der südlichen und südwestlichen Ostsee von 2,42 mm/a.
- Die Ermittlung der linearen Trendraten sowie die mittleren Verhältnisse der monatlichen Extremwerte wurden auf Basis der verfügbaren hochaufgelösten Stundenwertzeitreihen realisiert. Für extreme Hochwasserereignisse ergibt sich insbesondere für den Monat März eine stationsübergreifend hohe Trendrate zwischen 2 mm/a und 6 mm/a. Extreme Niedrigwasser zeigen im April und Juli ein auffälliges Trendverhalten. Die niedrigsten Niedrigwasser treten an allen Stationen im Mittel im Monat

Januar ein. Gleiches gilt für die extremen Hochwasserereignisse. Die höchsten Hochwasser wurden im Mittel gleichermaßen in Flensburg, Travemünde und Kiel-Holtenau beobachtet, wogegen die niedrigsten Niedrigwasser eindeutig an der Station Flensburg beobachtet wurden.

- Die Analyse hinsichtlich der Sturmfluthäufigkeiten zeigt, dass etwa 70 % der an den Buchtenpegeln eintretenden Extremereignisse Sturmhochwasser der Kategorie SI und etwa 25 % der Kategorie SII sind. Nur wenige Ereignisse liegen darüber. Insgesamt sind im Betrachtungszeitraum (1957–2016) ca. 120 Sturmhochwasserereignisse eingetreten (Warnemünde und Sassnitz geringer). Extreme Niedrigwasser traten mit Abstand am häufigsten am Pegel Flensburg (138) und am seltensten in Sassnitz (8) auf. Leichte Sturmhochwasser weisen steigende Trendraten auf, die sich jedoch nicht als signifikant erwiesen haben.
- Die Auswertung der jährlichen Verweilzeiten in Sturmhochwasserklassen (> 1 m NHN) für die betrachteten deutschen Pegelstationen hat mit im Mittel etwa 30 h/Jahr die längsten Verweildauern für den Pegel Kiel-Holtenau ergeben. Für die anderen Stationen ergeben sich vergleichbare Werte (20–30 h/Jahr) mit Ausnahme Sassnitz (5 h/Jahr). Für keine der untersuchten Sturmhochwasserklassen wurden signifikante Trends in den Verweilzeiten nachgewiesen.
- In den extremwertstatistischen Untersuchungen wurde über einen Vergleich von jeweils fünf angepassten Verteilungsfunktionen die generalisierte Extremwertverteilung (GEV) als geeignete Verteilungsfunktion zur Anpassung an die verfügbaren Extremwertzeitreihen ausgewiesen. Die Wasserstände für wichtige Wiederkehrintervalle (u. a. 5, 10, 50, 100, 200 Jahre) wurden durch Anpassung der GEV ermittelt und dargestellt. Der Pegel Wismar weist mit 2.32 m NHN die höchsten Wasserstände für ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren auf. Die betrachteten polnischen Pegelstationen zeigen aufgrund der Lage und Küstenform deutlich geringere Wasserstände für seltene Extremereignisse. Westlich von Rügen liegen die Wasserstände für extreme Niedrigwasserereignisse mit Wiederkehrintervallen von 100 Jahren bei etwa -1.80 m NHN, östlich von Rügen bei etwa -1.3 m NHN.
- Analysen zur zeitlichen Änderung der Extremwasserstände definierter Wiederkehrintervalle (HW5, HW10, HW50, HW100) haben für die betrachteten Zeitreihen teils signifikante Trends mit Raten von 1–2 mm/a ergeben. Die Höhe des Trends nimmt mit sinkender Eintrittswahrscheinlichkeit ab. Gleichzeitig haben die Untersuchungen den weiterhin hohen Bedarf an hochwertigen, zusätzlichen Informationen für historische Zeitreihen deutlich gemacht.

6 Literaturverzeichnis

Ågren, J.; Svensson, R.: Postglacial Land Uplift Model and System Definition for the New Swedish Height System RH 2000. Lantmäteriet, Gävle, 2007.

Ågren, J.; Svensson, R.: The Height System RH 2000 and the Land Uplift Model NKG2005LU. Paper. Lantmäteriet, Geodetic Research Department, 2011.

Augath, W.; Ihde, J.: Definition and Realization of Vertical Reference Systems. The European Solution EVRS/ EVRF 2000. In: Proceedings of FIG XXII International Congress, Washington, 2002.

BACC II Author Team: Second assessment of climate change for the Baltic Sea Basin. SpringerOpen, Cham, 1 online resource xxxviii, 2015.

Baerens, C.: Extremwasserstandereignisse an der deutschen Ostseeküste. Dissertation. Freie Universität Berlin, Berlin, Geowissenschaften, 1998.

Bogdanov, V. I.: Mean monthly series of sea level observations (1777–1993) at the Kronstadt gauge. Finnish Geodetic Institute, Kirkkonummi, [1 volume], 2000.

Duphorn, K.; Kliewe, H.; Niedermeyer, R. O.; Janke, W.; Werner, F. (Hg.): Die deutsche Ostseeküste. Bornträger, Berlin, Stuttgart, 1995.

EAK: Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken, 2002.

Ekman, M.: The world's longest continued series of sea level observations. In: Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH), 127, 1, 73–77, <https://doi.org/10.1007/BF00878691>, 1988.

Feistel, R.; Nausch, G.; Wasmund, N.: State and Evolution of the Baltic Sea, 1952–2005. A detailed 50-Year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology and Marine Environment Wiley-Interscience, New Jersey, 2008.

Fröhle, P.: Messung und statistische Analyse von Seegang als Eingangsgröße für den Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küstenwasserbaus. Dissertation. Universität Rostock, Rostock, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, 2000.

Führböter, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. On the time-dependent changes of the probability of extreme storm floods at the German North Sea coast In: Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau, 51, 1–94. 1976.

Furmanczyk, K.: Morze. Lad Wzajemne Relacje Print Group Daniel Krzanowski, Szczecin, 2008.

Gönnert, G.; Graßl, H.; Kelletat, D.; Kunz, H.; Probst, B.; Storch, H. von; Sündemann, J. (Hg.): Klimaänderung und Küstenschutz, 2004.

Hahn, A.; Rietschel, E.: Langjährige Wasserstandsbeobachtungen an der Ostsee. In: VI. Baltische Hydrologische Konferenz, 1938.

Hünicke, B.; Luterbacher, J.; Pauling, A. und Zorita, E.: Regional differences in winter sea level variations in the Baltic Sea for the past 200 yr. In: Tellus A, 60, 2, 384–393. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00298.x>, 2008.

Hupfer, P.; Harff, J.; Sterr, H.; Stigge, H.-J.: Die Wasserstände an der Ostseeküste. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, 2003.

Bork, I.; Müller-Navarra, S. H.: Simulation und Analyse extremer Sturmfluten an der Deutschen Ostseeküste. Abschlussbericht 1.3 In: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2009.

Jensen, J.; Frank, Th.; Wahl, Th.; Dangendorf, S.: Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste. AMSeL_KFKI_Bericht Abschlussbericht Projektbericht. Universität Siegen, Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, 2010.

- Jensen, J.; Töppe, A.: Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 4, 99–107. 1986.
- Jivall, L.; Norin, D.; Lilje, M.; Lidberg, M.; Wiklund, P.; Engberg, L. E.; Kempe, C.; Ågren, J.; Engfeldt, A.; Steffen, H.: National Report of Sweden to the EUREF 2016 Symposium. geodetic activities at Lantmäteriet In: EUREF 2016 Symposium, 2016.
- Kannenbergh, E.-G.: Extrem-Wasserstände an der deutschen Beltseeküste im Zeitraum 1901 bis 1954. In: Schriften des naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig Holstein, 1, 1956.
- Kelln, J.; Dangendorf, S.; Gräwe, U.; Jensen, J.: Entwicklung des mittleren Meeresspiegels entlang der südwestlichen Ostseeküste. In: Die Küste, 91, 2022.
- Kelln, J.; Dangendorf, S.; Jensen, J.: AMSeL_Ostsee A. Analyse vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger Wasserstände in der südwestlichen Ostsee Abschlussbericht. Universität Siegen, Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, 2019.
- Koppe, B.: Hochwasserschutzmanagement an der deutschen Ostseeküste. Dissertation. Universität Rostock, Rostock, Institut für Wasserbau, 2002.
- Krüger, G.: Über Sturmfluten an den deutschen Küsten der westlichen Ostsee : mit besonderer Berücksichtigung der Sturmflut vom 30./31. Dezember 1904. Abel, Greifswald, 1910.
- Kühnen, P. D.: Das Mittelwasser der Ostsee und das Mittelwasser der Nordsee. bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona, Swinemünde, Pillau, Memel und bei Bremerhaven in den Jahren 1898–1910. P. Stankiewicz Buchdruckerei, Berlin, 1916.
- LAWA: Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder. Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und Ulrich Barjenbruch, 2018.
- Liebsch, G.: Aufbereitung und Nutzung von Pegelmessungen für geodätische und geodynamische Zielstellungen. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 1997. Beck, München, 1997.
- LUV MV: Regelwerk Küstenschutz MV. Vermessungsrichtlinie und digitale Datenformate Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz MV, Schwerin, 2009.
- Mahzoum, A.: Analysis of seasonal extreme sea levels along the German Baltic Sea coast based on high frequency water level data. Projektarbeit. TU Hamburg, Hamburg, Institut für Wasserbau, 2018.
- Maniak, U.: Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- Meinke, I.: Das Sturmflutgeschehen in der südwestlichen Ostsee - dargestellt am Beispiel des Pegels Warnemünde. Diplomarbeit. Philipps Universität, Marburg, Fachbereich Geographie, 1998.
- Meissner, O.: Kurze und lange Wasserstandsänderungen der Ostsee. In: Die Naturwissenschaften, 1924, 45, 933–935, 1924.

Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz MV: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Übersichtsheft Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmungen und Ausblick. 2009.

Montag, H.: Die Wasserstände an den ehemaligen Pegelstationen des Geodätischen Instituts Potsdam bis 1944. In: Arbeiten aus dem Geodätischen Institut Potsdam, Nr. 5, 1964.

Mudersbach, C.; Jensen, J.: Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten extremer Sturmflutwasserstände an der Deutschen Ostseeküste. In: MUSTOK Workshop 2008, 2008.

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

Mudersbach, C.; Jensen, J.: Statistische Extremwertanalyse von Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste. In: Die Küste, Sonderheft MUSTOK, 75, 2009b.

Oumeraci, H.; Gönnert, G.; Jensen, J.; Kortenhaus, A.; Fröhle, P.; Burzel, A.; Gerkensmeier, B.; Wahl, T.; Mudersbach, C.; Naulin, M.; Ujehyl, G.; Pasche, E.; Dassanayake, D. R.: Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten – Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel (ExtremRisK). BMBF, Leichtweiß-Institut Braunschweig (LWI); Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg-Harburg (IWB-TUHH); fwu; Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG), 133 S., 2012.

Paschen, F. (Hg.): IV. Theil. Die Geometrischen Nivellements. Mit 9 lithografischen Tafeln. Großherzogliches Ministerium des Innern, Großherzogliche Mecklenburgische Landesvermessung, Schwerin, 1882.

Patzke, J.; Fröhle, P.: 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 Wasserstandsänderungen Abschlussbericht. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, Institut für Wasserbau, 2019.

Patzke, J.; Salecker, D.; Fröhle, P.: AMSeL Ostsee. Zusammenstellung kritischer Wasserstandsverläufe im Hinblick auf die Plausibilisierung von Wasserstandsdaten TUHH, Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg-Harburg (IWB-TUHH), Hamburg, 2016.

Patzke, J.; Salecker, D.; Fröhle, P.: AMSeL Ostsee. Entwicklung einer Plausibilisierungsmethodik für Wasserstandsdaten der Ostsee und Zusammenstellung potentiell unplausibler Wasserstandsverläufe für ausgewählte Ostseepiegel Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg-Harburg (IWB-TUHH), Hamburg, 2017.

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, 1, 111–149, <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.082503.144359>, 2004.

Reiss, R.-D.; Thomas, M.: Statistical Analysis of Extreme Values. With Applications to Insurance, Finance, Hydrology and Other Fields Birkhäuser Verlag AG, Basel, <https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7399-3>, 2007.

- Richter, A.; Dietrich, R.; Wendt, J.: Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee. KFKI. In: Die Küste, 71, 33–59, 2006.
- Riemer, J.: Fachplan Küstenschutz Ostseeküste. Grundlagen Hydrologie LKN Schleswig Holstein, Landesamt für Küsten- und Naturschutz (LKN), 2015.
- Sacher, M.; Ihde, J.; Liebsch, G.; Mäkinen, J.: EVRF2007 as Realization of the European Vertical Reference System, 2007.
- Salecker, D.; Gruhn, A.; Fröhle, P.: HoRisK - B: Belastungen von Küstenschutzanlagen und Konsequenzen des Versagens im Bereich der Ostseeküste. Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg-Harburg (IWB-TUHH), Institut für Wasserbau, Hamburg, 2014.
- Santamaría-Gómez, A.; Gravelle, M.; Collilieux, X.; Guichard, M.; Míguez, B. M.; Tiphaneau, P.; Wöppelmann, G.: Mitigating the effects of vertical land motion in tide gauge records using a state-of-the-art GPS velocity field. In: *Global and Planetary Change*, 98–99, 6–17, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.007>, 2012.
- Seibt, W.: Das Mittelwasser der Ostsee bei Swinemünde. Mit 8 Tafeln. In: Königliches Preussisches Geodätisches Institut, 1881.
- Seibt, W.: Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde. Mit 9 Tafeln. In: Königliches Preussisches Geodätisches Institut, 1885.
- Seibt, W.: Das Mittelwasser der Ostsee bei Swinemünde. Zweite Mittheilung In: Königliches Preussisches Geodätisches Institut, 1890.
- Seidel, J.: Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg Vorpommern, 1994.
- SONEL: Système d'Observations du Niveau des Eaux Littorales. www.SONEL.org, GLOSS, www.SONEL.org, Stand: 21.04.2016.
- Sztobryn, M.; Weidig, B.; Stanislawczyk, I.; Holfort, J.; Kowalska, B.; Mykita, M.; Kanska, A.; Krzysztofik, K.; Perlet, I.: Niedrigwasser in der südlichen Ostsee. (westlicher und mittlerer Teil) Berichte des BSH Nr. 45. 45, 2009.
- Sztobryn, M.; Stigge, H.-J.; Wielbinska, D.; Weidig, B.; Stanislawczyk, I.; Kanska, A.; Krzysztofik, K.; Kowalska, B.; Letkiewicz, B.; Mykita, M.: Sturmfluten in der südlichen Ostsee. (westlicher und mittlerer Teil) BSH, Rostock, 2005.
- Uhlig, S.: Entwicklung statistischer Verfahren für Ringversuche, Methodvalidierung und Auswertung von marinen Daten Teilvorhaben II: Zusammenstellung und Bewertung von statistischen Verfahren zur Auswertung von biologischen und chemischen Daten in der MUDAB. Umweltbundesamt, 2002.
- Vestøl, O.; Agren, J.; Steffen, H.; Kierulf, H.; Lidberg, M.; Oja, T.; Rüdja, A.; Kall, T.; Saaranen, V.; Engsager, K.; Jepsen, C.; Liepins, I.; Paršeliūnas, E.; Tarasov, L.: NKG2016LU, an improved postglacial land uplift model over the Nordic-Baltic region. Vortrag, Working Group of Geoid and Height Systems, 30.06.2016.
- Weidemann, H.: Klimatologie der Ostseewasserstände: Eine Rekonstruktion von 1948 bis 2011. Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg, Fachbereich Geowissenschaften, 2014.

Weisse, R.; Grabemann, I.; Gaslikova, L.; Meyer, E.; Tinz, B.; Fery, N.; Möller, T.; Rudolph, E.; Brodhagen, T.; Arns, A.; Jensen, J.; Ulm, M.; Ratter, B.; Schaper, J.: Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen: Das EXTREMENESS Projekt. 7. In: Die Küste, 87, 39–45, <https://doi.org/10.18171/1.087110>, 2019.

Weisse, R.; Meinke, I.: Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang. In: Brasseur, G., Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. (Hg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, 78–85, 2017.

Westphal, P. D. A.: Das Mittelwasser der Ostsee. bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona und Swinemünde in den Jahren 1882–1897 Mit zwei Tafeln. P. Stankiewicz Buchdruckerei, Berlin, 1900.

Woodworth, P. L.; Hunter, J. R.; Marcos, M.; Caldwell, P.; Menéndez, M.; Haigh, I.: Towards a global higher-frequency sea level dataset. In: *Geoscience Data Journal*, 3, 2, 50–59, <https://doi.org/10.1002/gdj3.42>, 2016a.

Woodworth, P. L.; Hunter, J. R.; Marcos Moreno, M.; Caldwell, P. C.; Menendez, M.; Haigh, I. D.: GESLA (Global Extreme Sea Level Analysis) high frequency sea level dataset – Version 2., 2016b.

Wöppelmann, G.; Marcos, M.: Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. In: *Reviews of Geophysics*, 54, 1, 64–92. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>, 2016.