

**KFKI-VERBUNDPROJEKT**  
Modellgestützte Untersuchungen zu extremen  
Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)

**TEILVORHABEN**  
Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen  
Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Ostseeküste (MUSE Ostsee)



ABSCHLUSSBERICHT 1.4

**Statistische Extremwertanalyse von Wasserständen  
an der Deutschen Ostseeküste**

Autoren	Christoph Mudersbach, Jürgen Jensen
Institut	Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen
Bearbeitungszeitraum	01.07.2005 – 31.12.2008
Fördernummer	BMBF 03KIS052 / KFKI 84 (intern: WBL 177D)
Datum	03.06.2009
Version	2.0

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

Das Verbundprojekt wurde gefördert von:



© Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen (2009)

Kontakt:

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)  
der Universität Siegen  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen  
Paul-Bonatz-Str. 9-11  
57076 Siegen

Fon +49 (0)271 740 2172  
Fax +49 (0)271 740 2722  
E-Mail [juergen.jensen@uni-siegen.de](mailto:juergen.jensen@uni-siegen.de)  
Web [www.fwu.uni-siegen.de](http://www.fwu.uni-siegen.de)

Dieser Bericht steht im Internet als Download zur Verfügung:

<http://www.uni-siegen.de/fb10/fwu/wb/forschung/projekte/mustok/>

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Vorstellung des Forschungsvorhabens</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Beschreibung der Forschungsaufgabe</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Systembeschreibung Ostsee</b>	<b>5</b>
4.1	Lage und Hydrographie	5
4.2	Isostatik, Eustatik und mittlere Wasserstände	7
4.3	Wasserstände in der Ostsee	10
4.3.1	Gezeiteneinfluss	10
4.3.2	Füllungsgrad der Ostsee	12
4.3.3	Eigenschwingung	15
4.3.4	Windstau	15
4.4	Definition einer Sturmflut an der Deutschen Ostseeküste	16
<b>5</b>	<b>Pegeldaten</b>	<b>18</b>
5.1	Lage und Beschreibung der verwendeten Pegel	18
5.2	Flensburg	21
5.3	Eckernförde	22
5.4	Kiel-Holtenau	23
5.5	Neustadt i. H.	24
5.6	Travemünde	25
5.7	Wismar	26
5.8	Warnemünde	27
5.9	Stralsund	29
5.10	Sassnitz	30
5.11	Greifswald	31
5.12	Zusammenfassende Beschreibung der untersuchten Ostseepegel	33
5.13	Historische Extremwerte	35
5.14	Umrechnung auf einheitlichen Höhenbezug	41
<b>6</b>	<b>Analyse der Vorfüllung</b>	<b>42</b>
<b>7</b>	<b>Methodik der Extremwertstatistik</b>	<b>45</b>
7.1	Allgemeines	45
7.2	Rangstatistik und empirische Verteilungsfunktionen	46
7.3	Allgemeine Extremwertverteilung	48
7.4	Parameterschätzung der GEV	51
7.4.1	Allgemeines	51
7.4.2	L-Momente	51
7.4.3	Berücksichtigung von modellierten Extremwasserständen	53
7.4.3.1	Allgemeines	53

7.4.3.2	Parameter bei Vorgabe eines modellierten Extremwertes mit Eintrittswahrscheinlichkeit	54
7.5	Einbeziehung historische Extremwerte	54
7.6	Integrierte Extremwertstatistik	58
<b>8</b>	<b>Datenauswertungen</b>	<b>59</b>
8.1	Modellierte Extremereignisse	59
8.2	Vorbemerkungen zu den Pegelauswertungen	61
8.3	Flensburg	61
8.4	Eckernförde	62
8.5	Kiel-Holtenau	64
8.6	Neustadt	65
8.7	Travemünde	66
8.8	Wismar	68
8.9	Warnemünde	69
8.10	Stralsund	70
8.11	Sassnitz	71
8.12	Greifswald	72
<b>9</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>73</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>75</b>
<b>11</b>	<b>Weiterer Forschungsbedarf</b>	<b>76</b>
<b>12</b>	<b>Schrifttum</b>	<b>77</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>81</b>
A.1	Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Flensburg	81
A.2	Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Eckernförde	83
A.3	Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Kiel-Holtenau	85
A.4	Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Neustadt i.H.	87
A.5	Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Travemünde	89
A.6	Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Wismar	91
A.7	Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Warnemünde	93
A.8	Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Stralsund	95
A.9	Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Sassnitz	97
A.10	Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Greifswald	99
A.11	Tabellarische Übersicht der extremwertstatistischen Analysen	102

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Grundlegende Struktur des KFKI-Verbundprojektes MUSTOK	2
Abbildung 3.1:	Verwendete Datengrundlagen für die Extremwertstatistik	5
Abbildung 4.1:	Ostsee mit Anrainerstaaten	6
Abbildung 4.2:	Bathymetrie und morphologische Gliederung des Meeresbodens in der westlichen Ostsee (HUPFER ET AL. 2003)	6
Abbildung 4.3:	Meeresspiegelkurve für die südliche Ostseeküste, nach JANKE UND LAMPE (1999), in MEYER (2002)	7
Abbildung 4.4:	Vergleich typischer <i>Relativ Sea Level (RSL)</i> - Kurven aus dem südlichen und nördlichen Teil der Ostsee (MEYER 2002)	7
Abbildung 4.5:	Rezente Vertikalbewegungen der Erdkruste nach HARFF, FRISCHBUTTER ET AL. (2001) ,überarbeitet nach GARTESKY ET AL. (2001), in HUPFER ET AL. (2003)	8
Abbildung 4.6:	Anstieg der mittleren Wasserstände von Warnemünde und Cuxhaven zwischen den gewässerkundlichen Jahren 1856 und 2000 (HUPFER ET AL. 2003)	9
Abbildung 4.7:	Anstieg der mittleren Wasserstände von Warnemünde und Cuxhaven zwischen den gewässerkundlichen Jahren 1856 und 2005 (Datensatz FWU 2007)	10
Abbildung 4.8:	Einfluss der $M_2$ -Tide auf die Wasserstände der Ostsee ( <a href="http://www.ssc.erc.msstate.edu/Tides2D/Plots/bal_M2_da.gif">http://www.ssc.erc.msstate.edu/Tides2D/Plots/bal_M2_da.gif</a> )	11
Abbildung 4.9:	a) 1. EOF der monatlichen Wasserstands anomalien der Jahre 1981–1996 an 54 Stationen. b) (lokale) erklärte Varianz an jeder Station in Prozent. Die globale erklärte Varianz beträgt 79,6%. c) blau: 1. EOF-Koeffizient zum in a) gezeigten Muster. In rot und grün sind die Koeffizienten zur 1. EOF einer getrennten EOF-Analyse für die Nordsee und die Ostsee dargestellt. Die Zeitreihe für die Nordsee ist um -3 Einheiten in Y-Richtung verschoben, die der Ostsee um +3 Einheiten. Alle Zeitreihen sind so normiert, dass ihre Standardabweichung 1 beträgt. Dicke Linien entsprechen den über 2 Jahre tiefpassgefilterten Versionen der jeweiligen Zeitreihe. (JANSSEN 2002)	12
Abbildung 4.10:	a) 1. EOF der Monatsmittel der Wasserstands anomalien der Jahre 1979-1993. b) lokale erklärte Varianz. Die globale erklärte Varianz beträgt 85.2% (JANSSEN 2002)	13
Abbildung 4.11:	Mittlere Neigung der Meeresoberfläche der Ostsee, dargestellt durch Linien gleicher mittlerer Abweichung vom Mittelwasser von Kronstadt im <i>Baltic Levelling Polygon</i> in der Periode 1951-1976 (HUPFER ET AL. 2003)	15
Abbildung 5.1:	Standorte der untersuchten Ostseepegel	19
Abbildung 5.2:	Verfügbare Zeitreihenlängen der analysierten Ostseepegel	20
Abbildung 5.3:	Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Flensburg mit linearen Trends	21
Abbildung 5.4:	Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Eckernförde mit linearen Trends	22
Abbildung 5.5:	Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Kiel-Holtenau mit linearen Trends	23

Abbildung 5.6:	Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Neustadt i.H. mit linearen Trends	24
Abbildung 5.7:	Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Travemünde mit linearen Trends	25
Abbildung 5.8:	Korrelation der HW-Zeitreihen der Pegel Wismar und Travemünde	26
Abbildung 5.9:	Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Wismar mit linearen Trends	27
Abbildung 5.10:	Korrelation der HW-Zeitreihen der Pegel Warnemünde und Travemünde	28
Abbildung 5.11:	Korrelation der MW-Zeitreihen der Pegel Warnemünde und Travemünde	28
Abbildung 5.12:	Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Warnemünde mit linearen Trends	29
Abbildung 5.13:	Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Stralsund mit linearen Trends	30
Abbildung 5.14:	Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Sassnitz mit linearen Trends	31
Abbildung 5.15:	Korrelation der HW-Zeitreihen der Pegel Stralsund und Greifswald	32
Abbildung 5.16:	Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Greifswald mit linearen Trends	33
Abbildung 5.17:	Längsschnitt von Flensburg bis Sassnitz der Mittelwerte der MW- und HW-Zeitreihen von 1951 bis 2006	34
Abbildung 5.18:	Längsschnitt von Flensburg bis Sassnitz der linearen Trends der MW- und HW-Zeitreihen	35
Abbildung 5.19:	Zeitliche Entwicklung des Mittelwassers am Pegel Travemünde von 1826 bis 2006 mit linearen Trends von 1826 - 1900 und 1826 - 2006	37
Abbildung 5.20:	Vereinfachte Entwicklung des mittleren Wasserspiegels der Ostsee zur Beschickung historischer Wasserstandswerte	38
Abbildung 5.21:	Unterschiede zwischen Höhenbezugssystemen HN76 und NN	41
Abbildung 6.1:	Lage des Pegels Landsort	42
Abbildung 6.2:	Zeitreihe des Pegels Landsort vom 31.10.1886 bis 01.04.2006, 1-Stunden-Werte	43
Abbildung 6.3:	Analyse der Vorfüllungsereignisse am Pegel Landsort auf Basis der gefilterten Wasserstandszeitreihe; in rot sind die vorhandenen Vorfüllungsereignisse dargestellt, Definition Vorfüllungsereignis: Wasserstand > 15 cm ü. MW und Dauer > 20 Tage	44
Abbildung 6.4:	Mittlere Höhen der 145 identifizierten Vorfüllungsereignisse aus der gefilterten Wasserstandszeitreihe des Pegels Landsort von 1886 bis 2006	44
Abbildung 6.5:	Korrelation zwischen Dauer und Höhe der 145 identifizierten Vorfüllungsereignisse aus der gefilterten Wasserstandszeitreihe des Pegels Landsort von 1886 bis 2006	45
Abbildung 7.1:	Zur Definition von Extremwertverteilungen (qualitativ).	46
Abbildung 7.2:	Darstellung der Dichtefunktionen der GEV für unterschiedliche Werte der Krümmung k.	50
Abbildung 7.3:	Darstellung der Verteilungsfunktionen der GEV für unterschiedliche Werte der Krümmung k.	50

Abbildung 7.4:	Beispiel einer Informationserweiterung einer systematischen Pegelzeitreihenaufzeichnung durch historische Werte (verändert, nach ENGLAND 2003 in SCHUMANN 2007).	57
Abbildung 8.1:	Vergleich der aus EPS-Wetterlagen maximal modellierten Wasserständen mit Reanalyse- und Beobachtungswerten der Sturmflut von 12./13.11.1872	60
Abbildung 8.2:	Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Flensburg	62
Abbildung 8.3:	Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Eckernförde	63
Abbildung 8.4:	Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Kiel-Holtenau	64
Abbildung 8.5:	Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Neustadt i.H.	65
Abbildung 8.6:	Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Travemünde	67
Abbildung 8.7:	Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Wismar	68
Abbildung 8.8:	Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Warnemünde	69
Abbildung 8.9:	Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Stralsund	70
Abbildung 8.10:	Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Sassnitz	71
Abbildung 8.11:	Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Greifswald	72

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Am KFKI-Verbundprojekt beteiligte Institutionen	3
Tabelle 2.2:	Mitglieder der projektbegleitenden KFKI-Gruppe	4
Tabelle 4.1:	Sturmflutdefinitionen an der Deutschen Ostseeküste	17
Tabelle 5.1:	Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Flensburg	21
Tabelle 5.2:	Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Eckernförde	22
Tabelle 5.3:	Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Kiel-Holtenau	23
Tabelle 5.4:	Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Neustadt	24
Tabelle 5.5:	Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Travemünde	25
Tabelle 5.6:	Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Wismar	26
Tabelle 5.7:	Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Warnemünde	28
Tabelle 5.8:	Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Stralsund	29
Tabelle 5.9:	Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Sassnitz	30
Tabelle 5.10:	Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Greifswald	32
Tabelle 5.11:	Vergleich der in der Literatur angegebenen Extremwasserstände vom 12./13. November 1872 am Pegel Travemünde	39
Tabelle 5.12:	Zusammenfassung der in der Literatur vorhandenen Größenordnungen zu historischen Extremwasserständen an den untersuchten Pegelstandorten	40
Tabelle 5.13:	Systemdifferenzen zwischen HN76 und NN (alt) in Mecklenburg-Vorpommern in HUPFER ET AL. (2003)	42
Tabelle 7.1:	Verschiedene Formeln für <i>plotting positions</i> (nach STEDINGER ET AL. 1993).	47
Tabelle 8.1:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Flensburg	62
Tabelle 8.2:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Eckernförde	63
Tabelle 8.3:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Kiel-Holtenau	65
Tabelle 8.4:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Neustadt i.H.	66
Tabelle 8.5:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Travemünde	67
Tabelle 8.6:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Wismar	68

Tabelle 8.7:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Warnemünde	69
Tabelle 8.8:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Stralsund	70
Tabelle 8.9:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Sassnitz	71
Tabelle 8.10:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Greifswald	72

## Abbildungsverzeichnis des Anhanges

Abbildung A. 1:	V1 - Extremwertstatistik des Pegels Flensburg, Daten: HW (1921-2006)	81
Abbildung A. 2:	V2 - Extremwertstatistik des Pegels Flensburg, Daten: HW (1921-2006), historische Daten (1694 –1914)	81
Abbildung A. 3:	V3 - Extremwertstatistik des Pegels Flensburg, Daten: HW (1921-2006, 1-jährliche Extrema), historische Daten (1694-1914), modellierter Maximalwert	82
Abbildung A. 4:	V4 - Extremwertstatistik des Pegels Flensburg, Daten: HW (1921-2006, 1-jährliche Extrema), historische Daten (1694 -1914), Reanalyse 1872	82
Abbildung A. 5:	V1 - Extremwertstatistik des Pegels Eckernförde, Daten: HW (1921-2006)	83
Abbildung A. 6:	V2 - Extremwertstatistik des Pegels Eckernförde, Daten: HW (1921-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872)	83
Abbildung A. 7:	V3 - Extremwertstatistik des Pegels Eckernförde, Daten: HW (1921-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872), modellierter Maximalwert	84
Abbildung A. 8:	V4 - Extremwertstatistik des Pegels Eckernförde, Daten: HW (1921-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872), Reanalyse 1872	84
Abbildung A. 9:	V1 - Extremwertstatistik des Pegels Kiel-Holtenau, Daten: HW (1901-2006)	85
Abbildung A. 10:	V2 - Extremwertstatistik des Pegels Kiel-Holtenau, Daten: HW (1901-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1872)	85
Abbildung A. 11:	V3 - Extremwertstatistik des Pegels Kiel-Holtenau, Daten: HW (1901-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1872), modellierter Maximalwert	86
Abbildung A. 12:	V4 - Extremwertstatistik des Pegels Kiel-Holtenau, Daten: HW (1901-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1872), Reanalyse 1872	86
Abbildung A. 13:	V1 - Extremwertstatistik des Pegels Neustadt i.H., Daten: HW (1921-2006)	87
Abbildung A. 14:	V3 - Extremwertstatistik des Pegels Neustadt i.H, Daten: HW (1921-2006, 2-jährliche Extrema), modellierter Maximalwert	87
Abbildung A. 15:	V4 - Extremwertstatistik des Pegels Neustadt i.H, Daten: HW (1921-2006, 2-jährliche Extrema), Reanalyse 1872	88
Abbildung A. 16:	V1 - Extremwertstatistik des Pegels Travemünde, Daten: HW (1826-2006)	89
Abbildung A. 17:	V2 - Extremwertstatistik des Pegels Travemünde, Daten: HW (1826-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1044 – 1872)	89
Abbildung A. 18:	V3 - Extremwertstatistik des Pegels Travemünde, Daten: HW (1826-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1044 – 1872), modellierter Maximalwert	90
Abbildung A. 19:	V4 - Extremwertstatistik des Pegels Travemünde, Daten: HW (1826-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1044 – 1872), Reanalyse 1872	90
Abbildung A. 20:	V1 - Extremwertstatistik des Pegels Wismar, Daten: HW (1910-2006)	91

Abbildung A. 21: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Wismar, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304 – 1905)	91
Abbildung A. 22: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Wismar, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304 – 1905), modellierter Maximalwert	92
Abbildung A. 23: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Wismar, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304 – 1905), Reanalyse 1872	92
Abbildung A. 24: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Warnemünde, Daten: HW (1910-2006)	93
Abbildung A. 25: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Warnemünde, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1625 – 1905)	93
Abbildung A. 26: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Warnemünde, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1625 – 1905), modellierter Maximalwert	94
Abbildung A. 27: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Warnemünde, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1625 – 1905), Reanalyse 1872	94
Abbildung A. 28: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Stralsund, Daten: HW (1931-2006)	95
Abbildung A. 29: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Stralsund, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304– 1914)	95
Abbildung A. 30: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Stralsund, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304 – 1914), modellierter Maximalwert	96
Abbildung A. 31: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Stralsund, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304 – 1914), Reanalyse 1872	96
Abbildung A. 32: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Sassnitz, Daten: HW (1946-2006)	97
Abbildung A. 33: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Sassnitz, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1891 – 1914)	97
Abbildung A. 34: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Sassnitz, Daten: HW (1946-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1891 – 1914), modellierter Maximalwert	98
Abbildung A. 35: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Sassnitz, Daten: HW (1946-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1891 – 1914), Reanalyse 1872	98
Abbildung A. 36: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Greifswald, Daten: HW (1931-2006)	99
Abbildung A. 37: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Greifswald, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872 – 1914)	99
Abbildung A. 38: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Greifswald, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872 – 1914), modellierter Maximalwert	100
Abbildung A. 39: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Greifswald, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872 – 1914), Reanalyse 1872	100



# 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Extreme Sturmflutereignisse gefährden sowohl die deutsche Nordsee- als auch die Ostseeküste. Dabei sind die Küstengebiete aufgrund der intensiven Nutzung in der Regel sehr vulnerabel gegenüber solchen Ereignissen. Der Küstenschutz orientiert sich daher maßgeblich an extremen Ereignissen, wobei zum einen ein möglichst hohes Schutzniveau erreicht werden soll, zum anderen jedoch auch ökologische, ökonomische und touristische Ansprüche bedient werden müssen. Ein Schutz der Küsten gegen jede erdenklich hohe Sturmflut ist nicht möglich, womit bei allen Maßnahmen zugleich ein Restrisiko verbleibt, welches quantifiziert werden muss. Dies kann durch die detaillierte Analyse der Sturmflutereignisse und Zuordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten erfolgen.

Dem Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen oblag im KFKI-Verbundprojekt „Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)“ die Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmflutereignissen. Dabei wurden neben den beobachteten Wasserstandsdaten auch historische Extremereignisse und von den Projektpartnern berechnete synthetische Sturmflutereignisse in die Analysen mit einbezogen.

## 2 Vorstellung des Forschungsvorhabens

Für den Küstenschutz maßgebende extreme Sturmflutereignisse sind an der deutschen Ostseeküste nur mit Schwierigkeiten zu definieren, weil neben der jeweils bedeutsamen regionalen Festlegung derartiger Ereignisse auch die Ereignisse selbst wegen ihrer sehr geringen Wahrscheinlichkeit schwer erfassbar sind. Für die Bemessung von Küstenschutzanlagen besteht das Problem, regional maßgebende Seegangs- und Wasserstandsereignisse zu definieren und ein für die gesamte Ostseeküste gültiges Verfahren zur Festlegung von Bemessungsgrößen zu erarbeiten. Für die Bestimmung regionaler Bemessungsparameter müssen als Grundlage überregionale Bemessungsparameter bestimmt werden, die gleichzeitig Aussagen über Eintrittswahrscheinlichkeiten zulassen.

Zur Bearbeitung dieser Fragestellungen wurde das KFKI-Verbundprojekt

### **Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)**

genehmigt.

Das Verbundvorhaben MUSTOK wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmbf) unter den Fördernummern 03KIS052 (MUSE Ostsee), 03KIS053 (SEBOK A) und 03KIS054 (SEBOK B) von 07/2005 bis 12/2008 gefördert. Die fachliche Begleitung erfolgte durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI-Fördernummern 84-86).

Die Gesamtkoordination des Verbundprojektes MUSTOK oblag Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen (Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen). Die beteiligten Institutionen und die grundlegende Struktur des KFKI-Verbundprojektes sind Tabelle 2.1 und Abbildung 2.1 zu entnehmen.

Das Verbundprojekt MUSTOK gliederte sich in die drei folgenden Teilvorhaben:

- [1] **Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmhochwasserständen mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Ostseeküste (MUSE Ostsee)**
- [2] **Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee – Projektgebiet: Küste Schleswig-Holstein (SEBOK A)**
- [3] **Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee – Projektgebiet: Küste Mecklenburg-Vorpommern (SEBOK B)**

Die drei Teilvorhaben verfolgten im jeweiligen Ergebnis überregionale, regionale bzw. lokale Zielsetzungen. Während MUSE Ostsee eine weitergehende Einschätzung zum Auftreten von Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten und der damit verbundenen überregionalen Randbedingungen geben sollte, verfolgten SEBOK A/B das Ziel der Formulierung einer Methode zur Bestimmung örtlicher Bemessungen von Küstenschutzbauwerken. Alle Teilvorhaben gingen aber von der gleichen meteorologischen Datenbasis der bekannten Wetterabläufe und ihrer möglichen Variationen aus, die eine für alle Projekte benötigte überregionale modellgestützte Beschreibung der hydrodynamischen Reaktionen ermöglichte.



Abbildung 2.1: Grundlegende Struktur des KFKI-Verbundprojektes MUSTOK

Tabelle 2.1: Am KFKI-Verbundprojekt beteiligte Institutionen

<b>MUSTOK</b>	
<b>Teilvorhaben MUSE Ostsee</b>	
Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen (fwu)	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen (Teilvorhabenleiter MUSE Ostsee und Projektkoordinator MUSTOK)
Deutscher Wetterdienst (DWD)	Dr. Volker Renner / Dipl.-Met. Gudrun Rosenhagen
GKSS Forschungszentrum Geesthacht	Prof. Dr. Dr. Hans von Storch
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	Dr. Sylvin Müller-Navarra
<b>Teilvorhaben SEBOK A/B</b>	
Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Christian Albrechts-Universität Kiel (FTZ)	Prof. Dr. Roberto Mayerle (Teilvorhabenleiter SEBOK A)
Universität Rostock, Institut für Umweltingenieurwesen, Fachgebiet Küstenwasserbau	Dr.-Ing. Peter Fröhle (Teilvorhabenleiter SEBOK B)
Deutscher Wetterdienst (DWD)	Dipl.-Met. Gudrun Rosenhagen
Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz (LKN) Schleswig-Holstein, Husum	Dipl.-Ing. Michael Heinrichs
Staatliches Amt für Natur und Umwelt Rostock	Dipl.-Ing. Knut Sommermeier

Die Mitglieder der projektbegleitenden Gruppe des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), die von Herrn Dr. Jacobus Hofstede (MLUR, Kiel) geleitet wurde, sind in Tabelle 2.2 aufgeführt:

Tabelle 2.2: Mitglieder der projektbegleitenden KFKI-Gruppe

Mitglieder der KFKI-Projektgruppe	Institution
Dipl.-Ozean. Ralph Annutsch, i.R. (Gast)	
Dr. Norbert Blum	Forschungszentrum Jülich, Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Rostock
Dr.-Ing. Annette Ernst	Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Stralsund
Dr. rer. nat. habil. Gabriele Gönnert	Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG), Hamburg
Dipl.-Ing. Michael Heinrichs	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz (LKN) Schleswig-Holstein, Husum
Dr. Jacobus Hofstede (Obmann)	Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein (MLUR), Kiel
Dipl.-Ing. Ralf Kaiser	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Norderney
Dr. rer. nat. Elisabeth Rudolph	Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg
Dipl.-Ing. Knut Sommermeier	Staatliches Amt für Umwelt und Natur (StAUN) Mecklenburg-Vorpommern, Rostock
Dipl.-Ing. Frank Thorenz (Forschungsleiter Küste des KFKI)	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Norden

### 3 Beschreibung der Forschungsaufgabe

Die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen stellt eine Grundaufgabe der Hydrologie dar. Für Bemessungsaufgaben im Küsteningenieurwesen sind insbesondere die Eintrittswahrscheinlichkeiten von extrem hohen oder niedrigen Wasserstandsereignissen von Bedeutung. Dies wird durch eine Anwendung von extremwertstatistischen Methoden erreicht, wobei häufig Wahrscheinlichkeitsaussagen zu Wasserständen getroffen werden sollen, die bisher noch nicht eingetreten sind. Die ermittelte Extremwertverteilung muss also extrapoliert werden. Grundsätzlich basieren alle bekannten extremwertstatistischen Methoden auf der Analyse von beobachteten Daten. Um die Extrapolation der Verteilungsfunktionen nicht nur mathematisch, sondern auch physikalisch zu begründen, können neben den regelmäßig aufgezeichneten Wasserständen auch historische Angaben oder über numerische Modelle berechnete Extremereignisse in die Statistik mit einbezogen werden. Die vorliegende Forschungsaufgabe bestand darin, für die Deutsche Ostseeküste eine entsprechende Methodik zu entwickeln, mit der beobachtete Daten, historische Wasserstandsmarken und modellierte Extremereignisse in die Extremwertstatistik integriert werden können (Abbildung 3.1), um eine verlässlichere Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten zu erreichen.

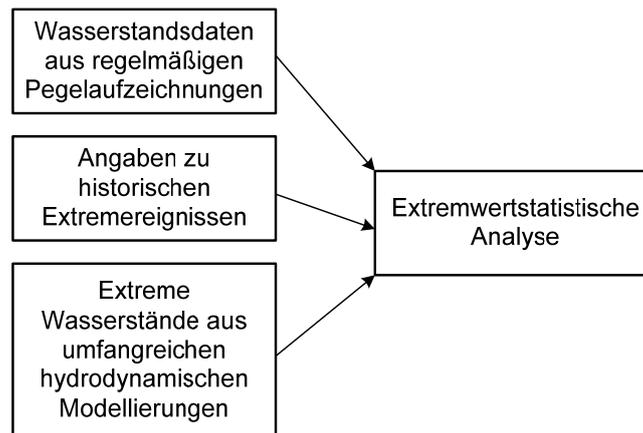


Abbildung 3.1: Verwendete Datengrundlagen für die Extremwertstatistik

Die vorliegenden Untersuchungen basieren im Wesentlichen auf beobachteten und historischen Wasserständen, die von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes zu Verfügung gestellt wurden und auf numerischen Modelluntersuchungen, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden (SCHMITZ 2007, BENKEL UND MEINKE 2008, BORK UND MÜLLER-NAVARRA 2009). Weiterhin bildeten vorhergehende Arbeiten zu extremen Wasserständen an der Deutschen Nordseeküste (JENSEN ET AL. 2006) eine wesentliche Grundlage.

## 4 Systembeschreibung Ostsee

### 4.1 Lage und Hydrographie

Die heutige Ostsee hat eine Fläche von ca. 415.000 km<sup>2</sup> (einschl. Kattegat) und eine Tiefe von bis zu 459 m (*Landsortief*), wobei die mittlere Tiefe etwa 52 m beträgt. Das Volumen wird mit ca. 22.000 km<sup>3</sup> beziffert und ist nur über Belte und Sunde indirekt über die Nordsee mit dem Atlantischen Ozean verbunden und gilt daher als kleines, intrakontinentales Nebenmeer des Atlantischen Ozeans (HUPFER ET AL. 2003, Abbildung 4.1).

Die Salinität der Ostsee nimmt von Westen nach Nordosten ab; im Skagerrak und Kattegat sind Salzgehaltswerte von 25 PSU (2,5 %) zu finden, im nordöstlichen Bereich sind demgegenüber lediglich Werte von 3 bis 5 PSU (0,3 % - 0,5 %) vorhanden. Das Ostseebecken besteht aus einer Reihe von Teilbecken (Abbildung 4.2), die durch Schwellen voneinander getrennt sind. Die wesentlichen Becken sind die Mecklenburger Bucht (mittlere Tiefe: 25 m), das Arkonabecken (mittlere Tiefe: 50 m), das Bornholmbecken (mittlere Tiefe: 100 m), das Gotlandbecken (mittlere Tiefe: 230 m) und der Bottnische Meerbusen (mittlere Tiefe: 120 m). Eine besondere hydrographische Bedeutung für die südwestliche Ostsee hat die Darßer Schwelle, die einen sprunghaften Höhenwechsel im Bodenprofil darstellt und nördlich von Rostock liegt. Die Darßer Schwelle stellt die Trennung zwischen Belt und Arkona Becken dar.

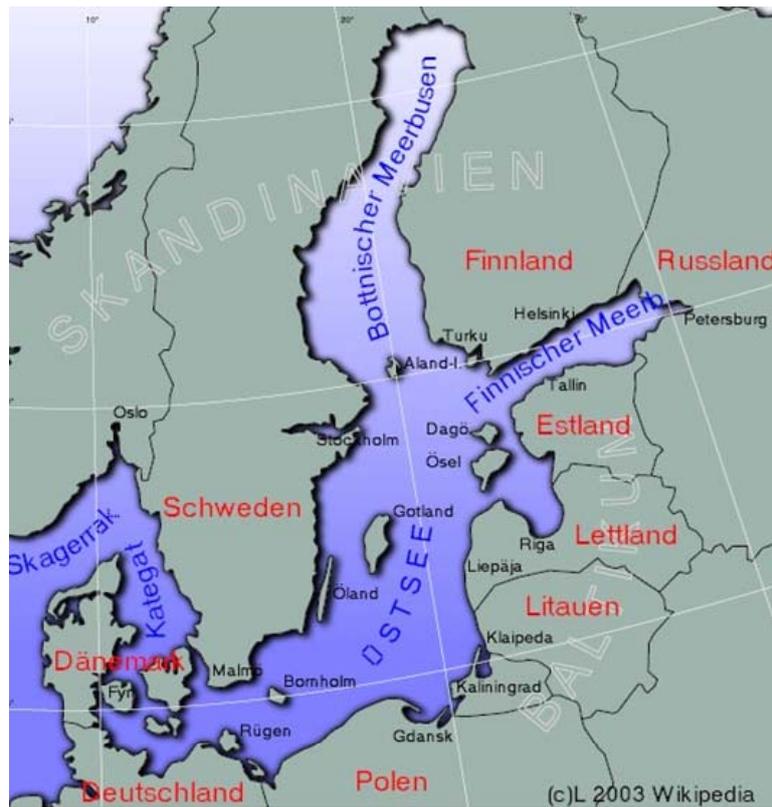


Abbildung 4.1: Ostsee mit Anrainerstaaten

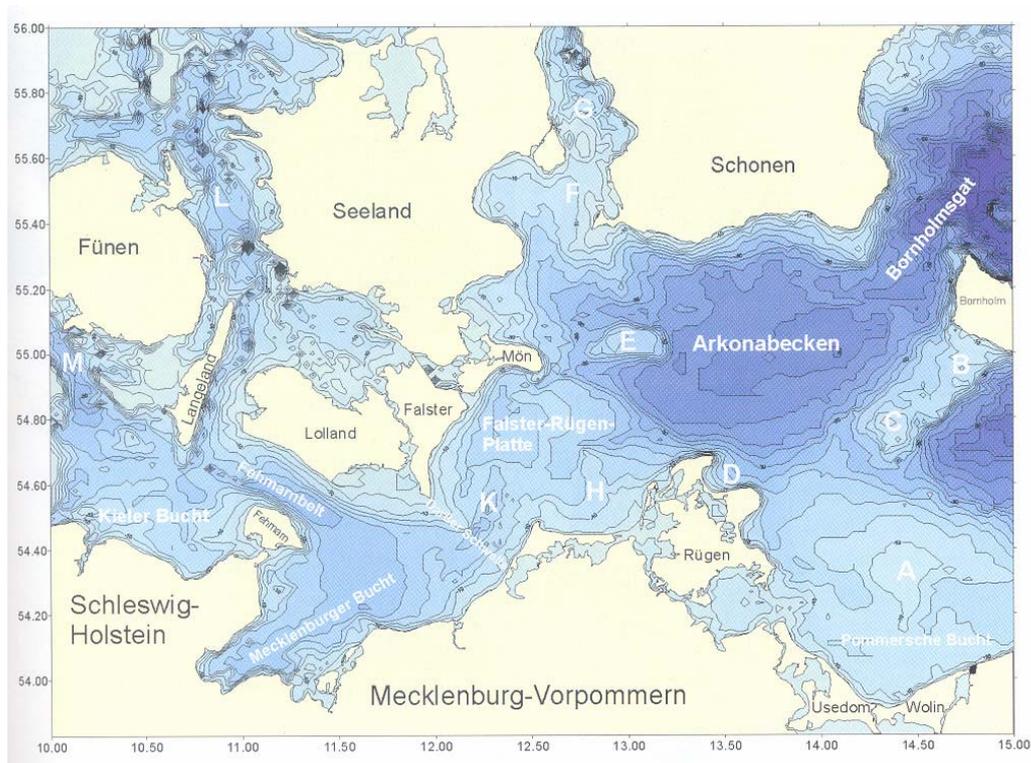


Abbildung 4.2: Bathymetrie und morphologische Gliederung des Meeresbodens in der westlichen Ostsee (HUPFER ET AL. 2003)

Die wesentlichen Zuflüsse der Ostsee sind die Oder (Deutschland / Polen), Weichsel (Polen), Memel (Litauen, Russland), Düna (Lettland), Newa (Russland) und Torneälven (Schweden).

## 4.2 Isostatik, Eustatik und mittlere Wasserstände

Nach MEYER (2002) beginnt die Geschichte der Ostsee ca. 13.000 BP (BP: *before present*). In Abbildung 4.3 ist die Entwicklung des Meeresspiegels ab ca. 8.000 BP dargestellt, in der ein schneller Anstieg des Meeresspiegels zu erkennen ist und als Littorina-Transgression bezeichnet wird. Während dieser Phase waren Anstiegsraten des Meeresspiegels von bis zu 2,5 cm/Jahr vorhanden, was zu einem „Ertrinken“ der Küste führte (MEYER 2002). Die nördliche Ostsee ist dagegen bis in die Gegenwart durch anhaltende Regression gekennzeichnet. Diese unterschiedliche Entwicklung spiegelt sich in gegenläufigen typischen Meeresspiegelkurven für die südliche und östliche Ostsee wieder (Abbildung 4.4).

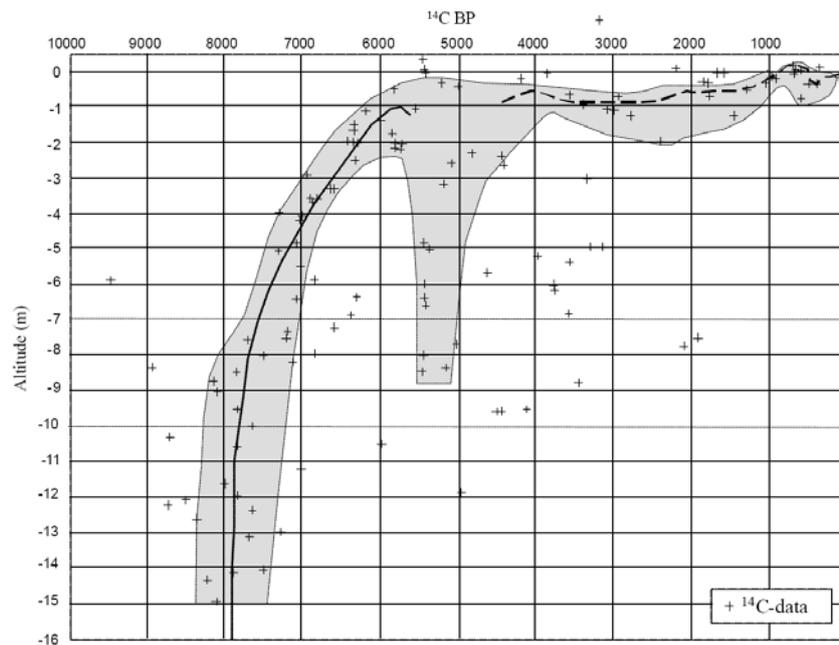


Abbildung 4.3: Meeresspiegelkurve für die südliche Ostseeküste, nach JANKE UND LAMPE (1999), in MEYER (2002)

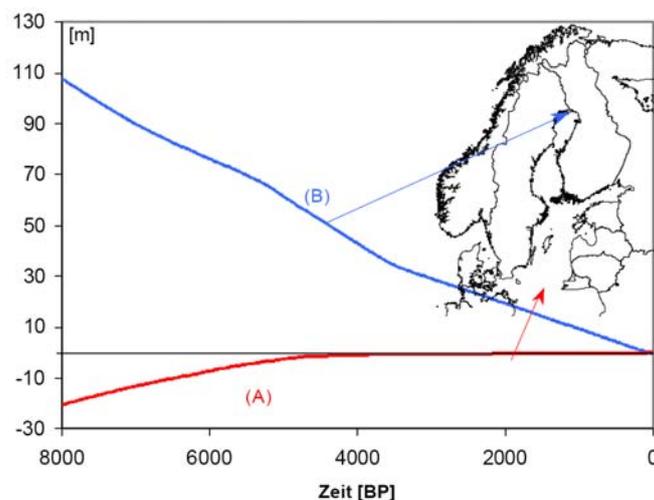


Abbildung 4.4: Vergleich typischer *Relativ Sea Level (RSL)*- Kurven aus dem südlichen und nördlichen Teil der Ostsee (MEYER 2002)

In Abbildung 4.5 ist eine aktuelle Darstellung der rezenten Erdkrustenbewegungen des Baltischen Raumes dargestellt, welche durch eine Landhebungszone im nördlichen Bereich geprägt ist, mit maximalen Hebungswerten im nördlichen Bottnischen Meerbusen von über 8 mm/Jahr. Diese Hebungszone ist von einer Landsenkungszone gürtelartig umgeben, welche die südliche und südöstliche Ostsee beeinflusst (HUPFER ET AL. 2003). In der Senkungszone sind im Mittel Werte von -0,5 bis -1,0 mm/Jahr zu finden, die auch für die Deutsche Ostseeküste gültig sind. In der Danziger Bucht (Polen) sind maximale Senkungswerte von -3,0 mm/Jahr zu finden (Abbildung 4.5).

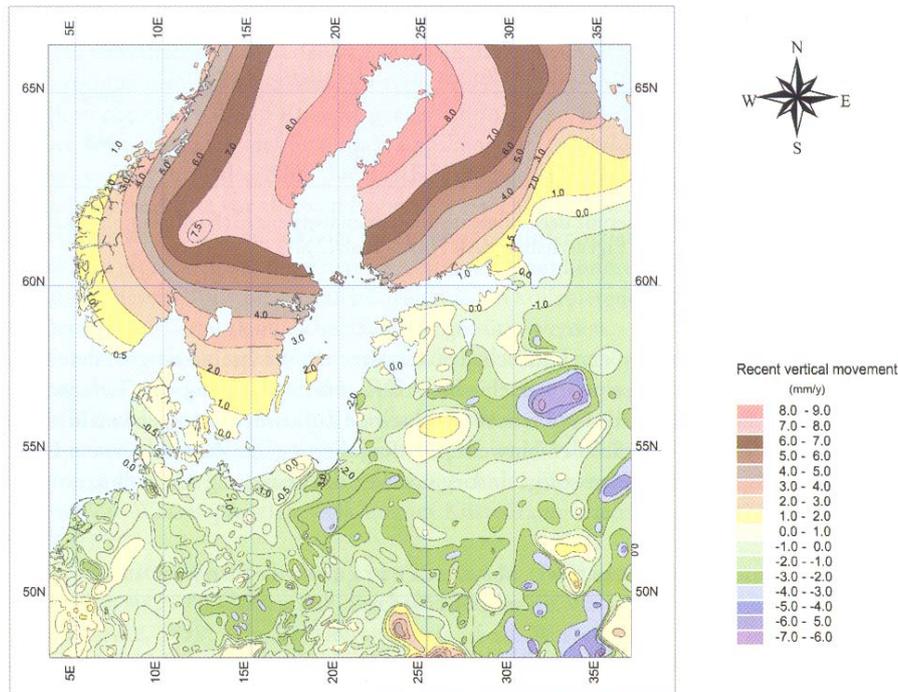


Abbildung 4.5: Rezente Vertikalbewegungen der Erdkruste nach HARFF, FRISCHBUTTER ET AL. (2001), überarbeitet nach GARTESKY ET AL. (2001), in HUPFER ET AL. (2003)

Durch eine Landhebung oder Landsenkung ergibt sich eine relative Änderung des mittleren Meeresspiegels. Ein Landsenkungsprozess (isostatischer Effekt) führt somit zu einem relativen Meeresspiegelanstieg, der zusätzlich von einem eustatischen Effekt (z.B. Meeresspiegelanstieg durch Temperaturanstieg infolge Klimaänderung) überlagert werden kann. Eine Trennung dieser beiden Einflüsse ist nicht möglich, jedoch können durch verschiedene Annahmen Abschätzungen der isostatischen Effekte erfolgen. HUPFER ET AL. (2003) analysierten dazu die Differenzen mittlerer Wasserstände von Pegeln in der nördlichen und südlichen Ostsee. Es wird davon ausgegangen, dass sich eustatische Effekte in einer Nord-Süd-Achse gleich ausprägen und damit vorhandene Trends in den ermittelten Differenzen auf isostatische Effekte zurückzuführen sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Differenzen des mittleren Wasserstandes zwischen Nord und Süd konstant kleiner werden und dies zum überwiegenden Teil auf Landhebungseffekte im Norden zurückzuführen ist.

Die Komplexität der Trennung von isostatischen und eustatischen Effekten wird an einem weiteren Vergleich der mittleren Wasserstände der Pegel Cuxhaven (Nordsee) und Warnemünde (Ostsee) deutlich (Abbildung 4.6). Es kann in einem ersten Schritt davon ausgegangen werden,

dass sich eustatische Änderungen am Pegel Cuxhaven und Warnemünde gleichermaßen auswirken. Des Weiteren ist die Nordseeküste nach bisherigem Kenntnisstand im Vergleich zur Ostseeküste als stabiler zu bezeichnen und weist Senkungsraten von 0 bis -0,5 mm/Jahr auf (HUPFER ET AL. 2003). Demnach ist der nach HUPFER ET AL. (2003) angegebene lineare Trend des Mittelwassers des Pegels Cuxhaven von  $S_{MTmw,Cux,1856-1996} = 2,394$  mm/Jahr im wesentlichen auf eustatische Effekte zurückzuführen. Der lineare Trend der Mittelwasserzeitreihe des Pegels Warnemünde von  $S_{MW,War,1856-1996} = 1,135$  mm/Jahr ist bei einer Senkungsrates von ca. -1,0 mm/Jahr jedoch nahezu allein mit isostatischen Effekten zu erklären, was im Umkehrschluss bedeutet, dass hier kaum eustatische Einflüsse vorhanden sind. Diese Aussage scheint jedoch aufgrund der physikalischen Wirkung von Temperaturerhöhung auf Wasser wenig wahrscheinlich.

Die Wasserstandsdaten des Pegels Warnemünde in HUPFER ET AL. (2003) berücksichtigen nicht die korrigierten Wasserstandswerte nach LWI (1992). In Abbildung 4.7 sind die mittleren Wasserstände der Pegel Cuxhaven und Warnemünde nach aktuellem Datenbestand dargestellt, wobei die Errechnung des mittleren Wasserstandes am Pegel Cuxhaven über das k-Wert Verfahren mit  $k = 0,47$  (JENSEN UND MUDERSBACH 2007) erfolgte. Hinsichtlich der linearen Trends ergeben sich jedoch qualitativ keine signifikanten Unterschiede. Für den Pegel Cuxhaven ergibt sich ein linearer Trend von  $S_{MTmw,Cux,1856-2005} = 2,10$  mm/Jahr und für Warnemünde  $S_{MW,War,1856-2005} = 1,38$  mm/Jahr. JENSEN UND MUDERSBACH (2007) errechneten auf Basis der vier Ostseepiegel Travemünde, Wismar, Warnemünde und Sassnitz einen durchschnittlichen linearen Trend des mittleren Wasserstandes an der Deutschen Ostseeküste von 1826 bis 2001 von  $S_{Ostsee,1836-2001} = 0,92$  mm/Jahr und bezogen auf die Datenbasis von 1965 bis 2001 einen Trend von  $S_{Ostsee,1965-2001} = 1,14$  mm/Jahr.

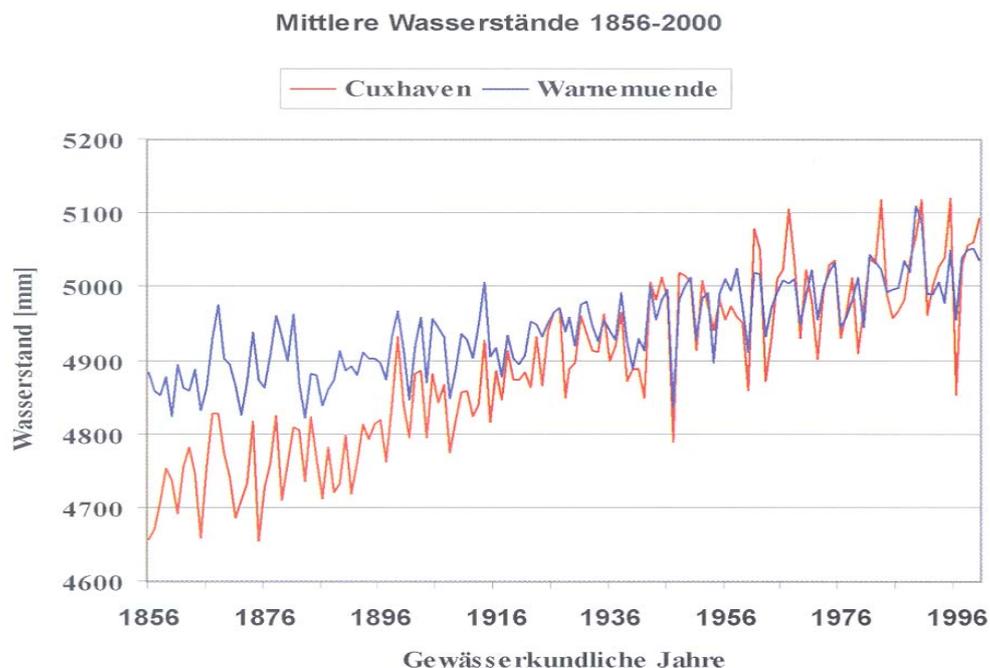


Abbildung 4.6: Anstieg der mittleren Wasserstände von Warnemünde und Cuxhaven zwischen den gewässerkundlichen Jahren 1856 und 2000 (HUPFER ET AL. 2003)

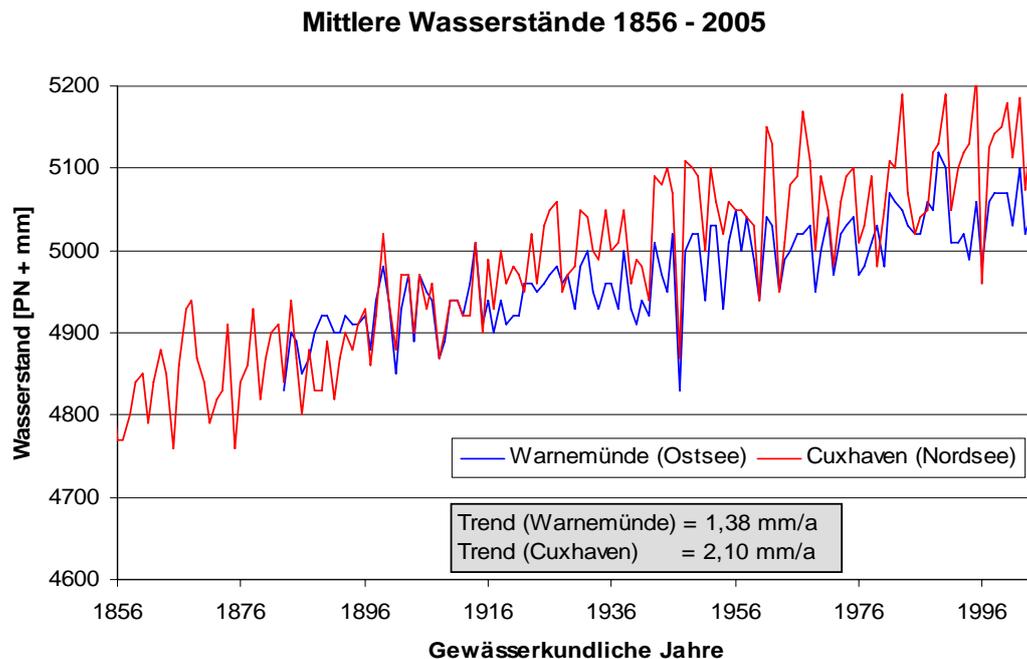


Abbildung 4.7: Anstieg der mittleren Wasserstände von Warnemünde und Cuxhaven zwischen den gewässerkundlichen Jahren 1856 und 2005 (Datensatz FWU 2007)

Hinsichtlich der Trennung von isostatischen und eustatischen Effekten und deren Einflüsse auf den mittleren Wasserstand der Ostsee kann festgehalten werden, dass diese Wechselwirkungen trotz zahlreicher Studien bislang nur unzureichend beschrieben sind. Für die vorliegende Aufgabenstellung sind jedoch die unterschiedlichen Angaben in den mittleren Wasserständen bezogen auf die hier untersuchten Extremwasserstände von untergeordneter Bedeutung.

### 4.3 Wasserstände in der Ostsee

Die Wasserstände an den Pegeln der Ostsee entstehen aus der Überlagerung verschiedener Anteile:

- Gezeiteneinfluss
- Füllungsgrad der Ostsee (auch: Vorfüllung)
- Eigenschwingungen
- Windstau

Diese vier Anteile werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben:

#### 4.3.1 Gezeiteneinfluss

Gezeiten werden primär durch die Anziehungskräfte und Fliehkräfte des Systems Erde – Sonne – Mond verursacht, wobei der durch den Mond verursachte Flutberg (halbtägige Mondgezeit  $M_2$ ) alle 12 Stunden und 50 Minuten an einem beliebigen Ort der Erde auftritt und der durch die Sonne verursachte Flutberg (halbtägige Sonnengezeit  $S_2$ ) alle 12 Stunden. Die Mondgezeit  $M_2$  ist

gegenüber der Sonnengezeit dominant und ist in etwa doppelt so groß (ZANKE 2002). Eine Gezeitenwelle prägt sich jedoch nur in Gewässern deutlich aus, die eine weite Ausdehnung in Ost-West-Richtung haben. Im Vergleich zum Atlantischen Ozean hat die Ostsee eine geringe Ost-West-Ausdehnung und ist zudem nur über einen schmalen Zugang indirekt mit dem Atlantischen Ozean verbunden. Während durch die großen offenen Ränder der Nordsee zum Atlantischen Ozean in kurzer Zeit großer Wasservolumina transportiert werden können, und somit auch die Gezeitenwelle in der Nordsee stark ausgeprägt ist, kann über den Kattegat und Skagerrak während einer halben Periode von 6 Stunden 25 Minuten nur ein sehr begrenztes Wasservolumen in die Ostsee transportiert werden, was zu einer starken Dämpfung der Gezeiten in der Ostsee führt.

Die Gezeitenwellen breiten sich von der Nordsee kommend über den Skagerrak, Kattegat und Belte aus, wobei die Amplituden tendenziell abnehmen. In der Beltsee betragen die Amplituden 7 bis 11 cm, in der westlichen Ostsee zwischen 0,5 und 5 cm und in den übrigen Gebieten der Ostsee sind Amplituden unterhalb von 3,5 cm vorhanden (Abbildung 4.8). Des Weiteren wurde auch für die Ostsee eine lange Gezeitschwingung mit einer Periode von 18,6 Jahren (Nodaltide) mit einer Amplitude in der westlichen Ostsee von 0,5 bis 3 cm nachgewiesen. „So interessant das Gezeitenphänomen in der Ostsee sein mag, so muss doch festgestellt werden, dass die mit ihnen verbundenen Wasserstandsschwankungen für die Belange der Praxis ohne Bedeutung sind“ (HUPFER ET AL. 2003). Weitere Ausführungen zu Gezeiten in der Ostsee sind SCHMAGER ET AL. (2008) zu entnehmen.

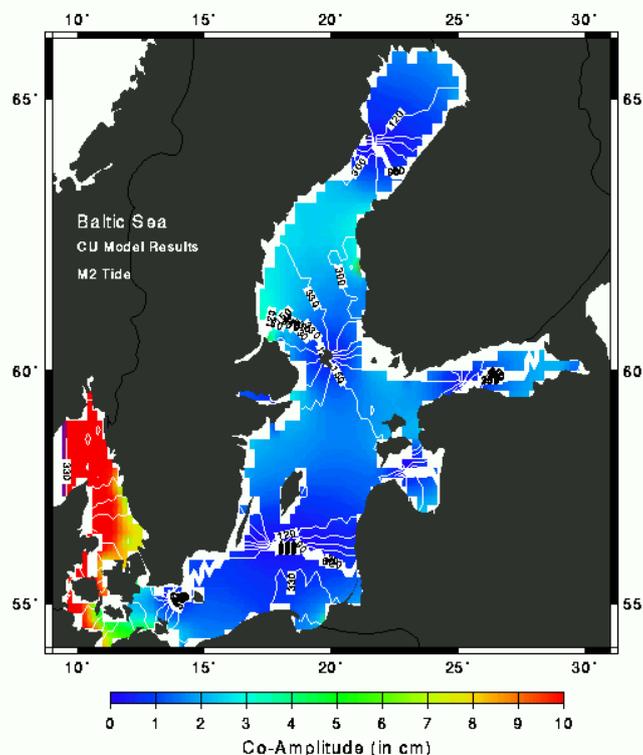


Abbildung 4.8: Einfluss der M<sub>2</sub>-Tide auf die Wasserstände der Ostsee ([http://www.ssc.erc.msstate.edu/Tides2D/Plots/bal\\_M2\\_da.gif](http://www.ssc.erc.msstate.edu/Tides2D/Plots/bal_M2_da.gif))

### 4.3.2 Füllungsgrad der Ostsee

Als Füllungsgrad (*auch*: Vorfüllung) der Ostsee wird der gemittelte Wasserstand der Ostsee über einen Zeitraum von Tagen bis Wochen angesehen. Dagegen wird als mittlerer Füllungsgrad der gemittelte Wasserstand über einen längeren Zeitraum (Jahre und mehr) angesehen. Aufgrund von Variationen des Ein- oder Ausstromes durch Belte und Sund kann der mittlere Wasserstand der Ostsee steigen oder sinken (HUPFER ET AL. 2003). So wird durch eine über Tage oder Wochen anhaltende Windlage aus westlicher Richtung Wasser von der Nordsee in die Ostsee transportiert, was zu einem Auffüllen des Ostseebeckens führt. Entgegengesetzte Windfelder bedingen ein geringeres Wasservolumen in der Ostsee. HUBER (2000) gibt an, dass nach Erfahrungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) eine Vorfüllung der Ostsee eine Mittelwassererhöhung um bis zu 50 cm verursachen kann. HUPFER ET AL. (2003) bestätigen diese Aussage im Wesentlichen und geben zusätzlich an, dass neben einer Erhöhung des Wasserstandes um 50 – 60 cm auch ein Absinken des Wasserstandes in der gleichen Größenordnung möglich ist.

HEYEN ET AL. (1996) kommen zu dem Schluss, dass die Ost-West-Komponente des Windschubes im Übergangsbereich von Nord- und Ostsee sowohl für Wasserstandsschwankungen in der Ostsee als auch in der Deutschen Bucht verantwortlich ist. JANSSEN (2002) analysiert durch die Auswertungen von 54 Pegelzeitreihen den Zusammenhang zwischen dem Wasserstand in der Nordsee und dem der Ostsee, insbesondere wird die Beeinflussung der Wasserstandsschwankung der Ostsee durch jene der Nordsee analysiert. Durch eine Komponentenanalyse (EOF: Empirische Orthogonalfunktion) der Zeitreihen zeigt JANSSEN (2002), dass sich die Wasserstände in Nord- und Ostsee in ihren langperiodischen Wasserstandsschwankungen ähnlich verhalten (Abbildung 4.9).

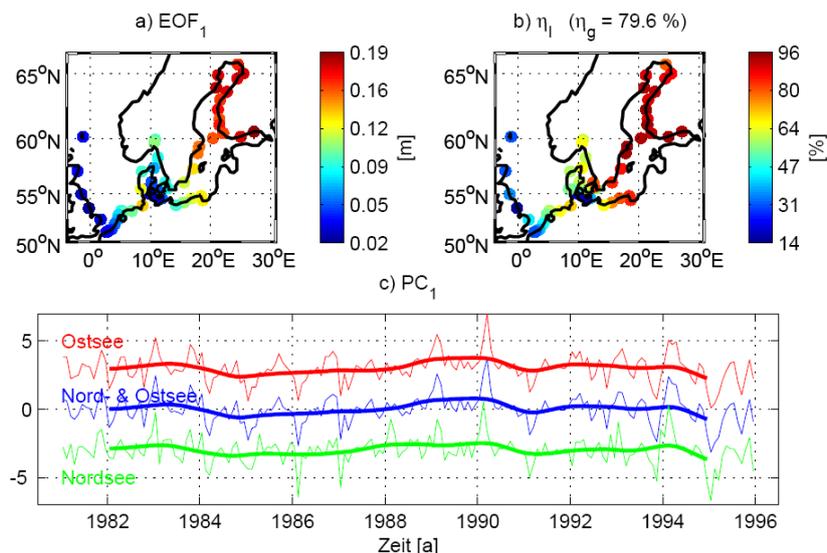


Abbildung 4.9: a) 1. EOF der monatlichen Wasserstandsabweichungen der Jahre 1981-1996 an 54 Stationen. b) (lokale) erklärte Varianz an jeder Station in Prozent. Die globale erklärte Varianz beträgt 79,6%. c) blau: 1. EOF-Koeffizient zum in a) gezeigten Muster. In rot und grün sind die Koeffizienten zur 1. EOF einer getrennten EOF-Analyse für die Nordsee und die Ostsee dargestellt. Die Zeitreihe für die Nordsee ist um -3 Einheiten in Y-Richtung verschoben, die der Ostsee um +3 Einheiten. Alle Zeitreihen sind so normiert, dass ihre Standardabweichung 1 beträgt. Dicke Linien entsprechen den über 2 Jahre tiefpassgefilterten Versionen der jeweiligen Zeitreihe. (JANSSEN 2002)

JANSSEN (2002) führt weiter aus, dass ein Zusammenhang zwischen den Wasserstandsschwankungen und der Stärke zonaler Winde über der Nordsee besteht. Starke westliche Winde führen zu einem Anstau des Wassers in der Deutschen Bucht sowie in der nord-östlichen Ostsee. Gleichzeitig wird der Wasserstand in der Beltsee erniedrigt, was einen barotropen Druckgradienten von der Nord- in die Ostsee erzeugt und somit einen Einstrom in die Ostsee begünstigt. Auf diese Weise wirken Schwankungen im zonalen Wind sowohl direkt auf den Wasserstand der Ostsee als auch indirekt über den Wasserstand in der Nordsee. Dass die Variabilität im Wasserstand der Ostsee vom Wasserstand in der Nordsee beeinflusst wird, verdeutlicht eine Kreuzkorrelationsanalyse der Zeitreihen von gezeitenbereinigten Tagesmittelwerten des Wasserstandes der Pegel Cuxhaven (Nordsee) und Landsort (Ostsee). Die Zeitreihen weisen eine maximale Korrelation von  $R = 0,51$  auf, wenn die Nordseewasserstände denen der Ostsee etwa 4 Tage vorauslaufen. Die Verzögerung von etwa 4 Tagen ist durch den limitierten Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee infolge der engen Meeresstraßen zu erklären. Der relativ geringe Korrelationskoeffizient resultiert im Wesentlichen aus den Unterschieden im hochfrequenten Anteil beider Zeitreihen. Der Wasserstand in der Nordsee weist deutlich größere Schwankungen im Periodenband unterhalb von 7 Tagen auf. Dieser Sachverhalt begründet sich auf der Tatsache, dass Belte und Sund als natürlicher Tiefpassfilter für die vom Kattegat ausgehenden Wasserstandsschwankungen der Ostsee wirken (CARLSSON 1998, SAMUELSSON UND STIGEBRANDT 1996 in JANSSEN 2002).

JANSSEN (2002) zeigt in Abbildung 4.10 einen deutlichen Unterschied in der Wasserstandsvariabilität von Nord- und Ostsee: Für die Ostsee lässt sich zu jedem Zeitpunkt ein (räumlich) mittlerer Wasserstand (der den Füllungsgrad oder Volumeninhalt der Ostsee beschreibt) berechnen, dessen zeitliche Schwankungen einen wesentlichen Beitrag zur Wasserstandsvariabilität an jedem Ort innerhalb der Mittelungsregion liefert; der also repräsentativ für die Gesamtregion ist. Hingegen ist die Berechnung eines (räumlich) mittleren Wasserstandes für die Nordsee wenig sinnvoll, da die zeitliche Variabilität dieses Mittelwertes nicht repräsentativ für die Gesamtregion ist.

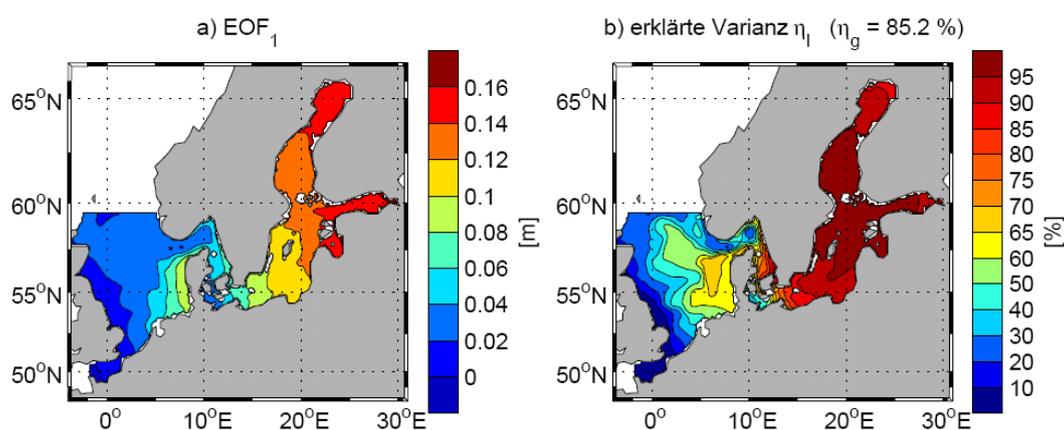


Abbildung 4.10: a) 1. EOF der Monatsmittel der Wasserstands anomalien der Jahre 1979-1993. b) lokale erklärte Varianz. Die globale erklärte Varianz beträgt 85.2% (JANSSEN 2002)

Die Untersuchungen von JANSSEN (2002) zeigen deutlich, dass die Variabilität der Ostseewasserstände zu großen Anteilen durch die Wasserstandsschwankungen der Nordsee begründet sind und die Ostsee im Vergleich zur Nordsee weniger schnelle Änderungen aufweist und damit durch Belte und Sunde ein gedämpftes System darstellt.

KOPPE (2001) führt aus, dass der Füllungsgrad der Ostsee durch die Höhe des Oberflächenwasserzuflusses sowie durch den Wasseraustausch mit der Nordsee bestimmt wird. Wegen der vornehmlich im östlichen Teil der Ostsee mündenden abflussreichen Flüsse und aus der Dominanz der Windrichtungen W bzw. SW neigt sich der Wasserspiegel der Ostsee unter mittleren Bedingungen von Ost nach West. Nach WEISE (1990) beträgt die mittlere Neigung des Wasserspiegels zwischen Timmendorf auf Poel ( $11^{\circ}23'$  geogr. Länge) und Ueckermünde ( $14^{\circ}03'$  geogr. Länge) 3,46 cm pro geographischem Längengrad, so dass der Wasserspiegel in Ueckermünde im Mittel rund 9 cm über dem von Timmendorf liegt. Bei über mehrere Tage wirkenden Starkwinden aus westlichen Richtungen kommt es zum verstärkten Einstrom von Nordseewasser und damit zu einem erhöhten Füllungsgrad der Ostsee. Der Prozess des Auffüllens der Ostsee dauert im Mittel zehn bis fünfzehn Tage an und erhöht den Wasserstand relativ zum Mittelwasserstand um bis zu 20 cm am Pegel Landsort (Insel südlich von Stockholm gelegen) (BAERENS, HUPFER 1995 in KOPPE 2001).

In HUPFER ET AL. (2003) sind Wasserstandswerte am Pegel Landsort von 1899 bis 1993 hinsichtlich des Füllungsgrades analysiert worden. Es zeigt sich, dass im Mittel ab dem 24. Tag vor dem Sturmflutseitelwasserstand eine signifikante Abweichung vom mittleren Füllungsgrad auftritt.

HUBER (2000) führt zusätzlich aus, dass in der Ostsee im Mittel ein permanentes Gefälle des Meeresspiegels von Norden nach Süden vorhanden ist. HUBER (2000) gibt die Größenordnung dieser Wasserspiegeldifferenz von St. Petersburg bis zur westlichen Ostsee mit ca. 15 cm an, welche durch den mittleren Windstau infolge der vorherrschenden Winde aus westlicher bis südwestlicher Richtung und dem vorhandenen Dichteunterschied zwischen Nord- und Südteil der Ostsee durch Zufluss von Süßwasser im nördlichen Teil resultiert. HUPFER ET AL. (2003) geben die mittlere Neigung zwischen den äußersten Enden des Bottnischen und Finnischen Meerbusens und den Übergängen zur Beltsee mit 18 bis 20 cm an (Abbildung 4.11). Dabei unterliegt diese grundsätzliche Oberflächenstruktur jahreszeitlichen Schwankungen.



Abbildung 4.11: Mittlere Neigung der Meeresoberfläche der Ostsee, dargestellt durch Linien gleicher mittlerer Abweichung vom Mittelwasser von Kronstadt im *Baltic Levelling Polygon* in der Periode 1951-1976 (HUPFER ET AL. 2003)

### 4.3.3 Eigenschwingung

Eine besondere Eigenschaft der Ostsee ist die Bildung von Eigenschwingungen (*frz.: Seiches*), die sich in Form von periodischen Wasserstandsschwankungen mit örtlich unterschiedlichen Amplituden an Pegeln bemerkbar machen. Aufgrund der mehr oder weniger geschlossenen Form des Ostseebeckens können starke Luftdruckänderungen oder schnell ziehende Starkwindfelder zu resonanten Eigenschwingungen führen. Im allgemeinen klingen die Eigenschwingungen rasch ab.

Die Ostsee verhält sich nach SAMUELSSON UND STIGEBRANDT (1996) in JANSSEN (2002) bezüglich Wasserstandsschwankungen für Perioden unterhalb eines Monats wie ein geschlossenes Becken mit Schwingungsbäuchen im Norden und Süden und einem Schwingungsknoten im zentralen Bereich der Ostsee, östlich von Stockholm. Aus dieser Tatsache heraus wird für Analysen des Füllungsgrades der Ostsee oftmals der Pegel Landsort (Schweden, südlich von Stockholm) verwendet, der im Schwingungsknoten der Ostsee liegt und somit Wasserstandsschwankungen infolge Eigenschwingungen weitgehend ausgeschlossen werden können (HUPFER ET AL. 2003).

### 4.3.4 Windstau

Die größten Wasserstandsschwankungen an den Ostseeküsten können infolge Windstau hervorgerufen werden. Durch die Schubspannung des Windes auf der Wasseroberfläche kommt

es zu einer Stauwirkung an den Küsten. Die Ausprägung des Staus ist stark von örtlichen Gegebenheiten abhängig. Besonders gefährdet sind die westliche Ostsee, der nördliche Bottnische Meerbusen und der innere Finnische Meerbusen (HUPFER ET AL. 2003). Die südwestliche Ostsee ist besonders von hohen Windstauwerten betroffen, wenn starke und langanhaltende Winde aus östlicher bis nordöstlicher Richtung wehen. Bei vorwiegenden Zugbahnen der Tiefdruckgebiete aus westlicher Richtung sind solche Bedingungen auf der Rückseite der Tiefdruckgebiete zu finden (SCHMITZ 2007). Windstauereignisse können Wasserstandsschwankungen von bis zu 3 m hervorrufen. Für weitergehende Ausführungen wird auf SCHMITZ (2007), BENKEL UND MEINKE (2008) und BORK UND MÜLLER-NAVARRA (2009) verwiesen.

#### 4.4 Definition einer Sturmflut an der Deutschen Ostseeküste

Die Begrifflichkeiten **Sturmhochwasser** und **Sturmflut** sind in der vorliegenden Bearbeitung gleichbedeutend. Nach DIN 4049-3 (1994) ist eine Sturmflut als ein durch starken Wind verursachtes Ansteigen des Wassers an der Meeresküste definiert und die Wasserstände einen bestimmten Wert überschreiten. Nach DIN 4049-3 (1994) wird die Einteilung der verschiedenen Sturmflutklassen nach der jährlichen Überschreitungszahl festgelegt. Danach gilt für die Ostseeküste:

Leichte Sturmflut:	Sturmflut mit Wasserständen der mittleren jährlichen Überschreitungszahl von 2 bis 0,2
Schwere Sturmflut:	Sturmflut mit Wasserständen der mittleren jährlichen Überschreitungszahl von 0,2 bis 0,05
Sehr schwere Sturmflut:	Sturmflut mit Wasserständen der mittleren jährlichen Überschreitungszahl unter 0,05

Nach HUPFER ET AL. (2003) wird neben der Einteilung in leichte, schwere und sehr schwere Sturmfluten auch die Terminologie leichte, mittlere und schwere Sturmfluten verwendet oder allgemeiner von Kategorie I, II und III gesprochen.

Die nach DIN 4049-3 (1994) erfolgte Definition von Sturmfluten nach dem Kriterium der mittleren jährlichen Überschreitungszahl ist jedoch nicht die einzige; so existieren auch in den Generalplänen Küstenschutz der Länder Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern unterschiedliche Kriterien zur Definition von Sturmfluten für die jeweiligen Küsten. In Schleswig-Holstein wird laut *Generalplan Küstenschutz* (MLR 2001) eine leichte Sturmflut zwischen 1,50 m und 2,00 m ü. NN, eine schwere Sturmflut zwischen 2,00 m und 2,50 m ü. NN und eine sehr schwere Sturmflut über 2,50 m ü. NN definiert. An der Küsten Mecklenburg-Vorpommerns liegen diese Werte laut *Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz* (MLU 2006) deutlich niedriger und betragen 1,00 m bis 1,40 m ü. NN für leichte, 1,41 m bis 1,70 m ü. NN für schwere und über 1,70 m ü. NN für sehr schwere Sturmfluten.

Darüber hinaus existiert eine Definition des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), die einheitlich für die gesamte Deutsche Ostseeküste gilt und eine leichte Sturmflut zwischen 1,00 m und 1,24 m ü. NN, eine schwere Sturmflut zwischen 1,25 m und 1,49 m ü. NN und eine sehr schwere Sturmflut über 1,50 m ü. NN definiert (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Sturmflutdefinitionen an der Deutschen Ostseeküste

Sturmflutdefinitionen an der Deutschen Ostseeküste							
		I		II		III	
		leichte Sturmflut		schwere (mittlere) Sturmflut		sehr schwere (schwere) Sturmflut	
	Kriterium	Schleswig-Holstein	Mecklenburg-Vorpommern	Schleswig-Holstein	Mecklenburg-Vorpommern	Schleswig-Holstein	Mecklenburg-Vorpommern
<b>Generalplan Küstenschutz Schleswig-Holstein (2001)</b>	Wasserstand ü. NN	1,50 - 2,00 m ü. NN		2,00 - 2,50 m ü. NN		> 2,50 m ü. NN	
<b>Generalplan Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern (2006)</b>	Wasserstand ü. NN		1,00 - 1,40 m ü. NN		1,41 - 1,70 m ü. NN		> 1,70 m ü. NN
<b>BSH-Klassifikation</b>	Wasserstand ü. MW	1,00 - 1,24 m ü. MW	1,00 - 1,24 m ü. MW	1,25 - 1,49 m ü. MW	1,25 - 1,49 m ü. MW	> 1,50 m ü. MW	> 1,50 m ü. MW
<b>DIN 4049-3 (1994)</b>	Mittlere jährliche Überschreitungszahl	2,0 - 0,2	2,0 - 0,2	0,2 - 0,05	0,2 - 0,05	< 0,05	< 0,05

In der vorliegenden Bearbeitung wurden für die statistischen Auswertungen die Jahreshauptwerte der Pegel verwendet, so dass die unterschiedlichen Definitionen zu Sturmfluten keine Auswirkungen auf die Analysen haben. Die Zeitreihe der Hochwasserereignisse (HW-Zeitreihe) ist damit der höchste gemessene Wasserstand eines jeden hydrologischen Jahres und besitzt dadurch ebenso viele Werte, wie zugrunde liegende Jahre. Der wesentliche Unterschied zu einer auf Grundlage der Sturmflutdefinition gebildeten Zeitreihe liegt darin, dass auch Werte mit in der Zeitreihe integriert sind, die nach o.g. Definitionen keine Sturmflut sind, jedoch den Maximalwert in einem Jahr darstellten (vgl. Abschnitt 5).

## 5 Pegeldata

### 5.1 Lage und Beschreibung der verwendeten Pegel

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden 10 Pegel an der schleswig-holsteinischen und mecklenburg-vorpommerschen Ostseeküste hinsichtlich extremer Wasserstände ausgewertet (Abbildung 5.1). An der schleswig-holsteinischen Küste sind dies die Pegel:

- Flensburg
- Eckenförde
- Kiel-Holtenau
- Neustadt i.H.
- Travemünde

An der Küste Mecklenburg-Vorpommerns sind dies die Pegel:

- Wismar
- Warnemünde
- Stralsund
- Sassnitz
- Greifswald

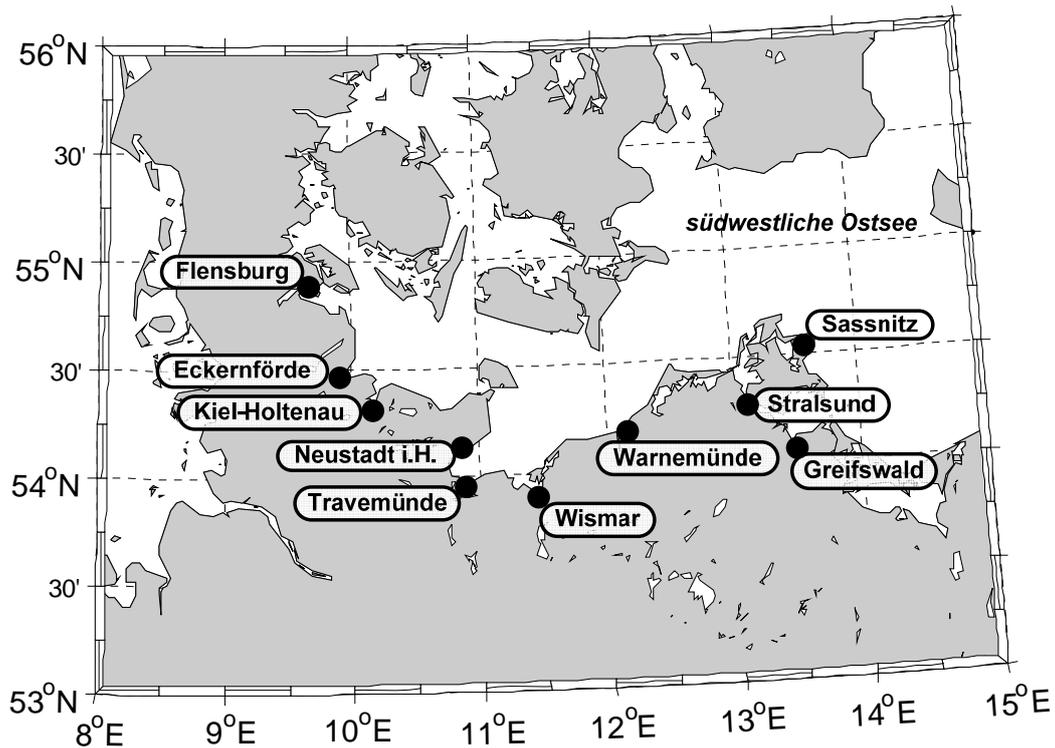


Abbildung 5.1: Standorte der untersuchten Ostseepiegel

Die Pegeldata stammen von folgenden Quellen:

- Bundesanstalt für Gewässerkunde (bfg), Koblenz
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MLUR) des Landes Schleswig-Holstein, Kiel
- Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Nord, Kiel
- Staatliches Amt für Umwelt und Natur (StAUN), Rostock
- Staatliches Amt für Umwelt und Natur (StAUN), Stralsund
- Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen

Als Datengrundlage standen die regelmäßigen Wasserstandsaufzeichnungen zur Verfügung, die in Form der Jahreshauptwerte analysiert wurden. Die Zeitreihe der Hochwasserereignisse (HW) besteht somit aus dem höchsten Wert eines hydrologischen Jahres. Beispiel:  $HW_{\text{Travemünde},2006}$  ist der höchste am Pegel Travemünde gemessene Wasserstand zwischen dem 01.11.2005 und dem 31.10.2006. Die Zeitreihe der mittleren Wasserstände (MW) ist der gemittelte Wert aller Messungen an einem Pegel. Vor der Einführung der automatisierten Wasserstandsmessung entspricht dieser Wert dem Wasserstand um 12 Uhr mittags. Die MW-Zeitreihe wird für die direkte Analyse der extremen Wasserstände nicht benötigt, jedoch erfolgt die Homogenisierung der HW-Zeitreihe mit dem Trend bzw. 19-jährigen gleitenden Mittelwert der MW-Zeitreihe.

Die verfügbaren Längen der Pegelzeitreihen sind an der Deutschen Ostseeküste unterschiedlich lang. Die längste Zeitreihe weist der Pegel Travemünde auf, die 1826 beginnt. Die Mehrzahl der Pegelzeitreihen beginnt zwischen 1901 und 1921, wobei die östlichen Pegel Stralsund und Sassnitz die kürzesten Zeitreihen aufweisen (Abbildung 5.2). Neben den regelmäßigen Wasserstandsdaten liegen für einige Pegel zusätzlich historische Extremwerte vor, die mit in die Analysen mit einbezogen wurden und hinsichtlich der Abschätzung extremer Zustände wichtige Bausteine innerhalb der Projektbearbeitung darstellen (vgl. Abschnitt 5.13). Alle Wasserstandsdaten mussten zunächst auf einen einheitlichen Höhenbezug umgerechnet werden (vgl. Abschnitt 5.14).

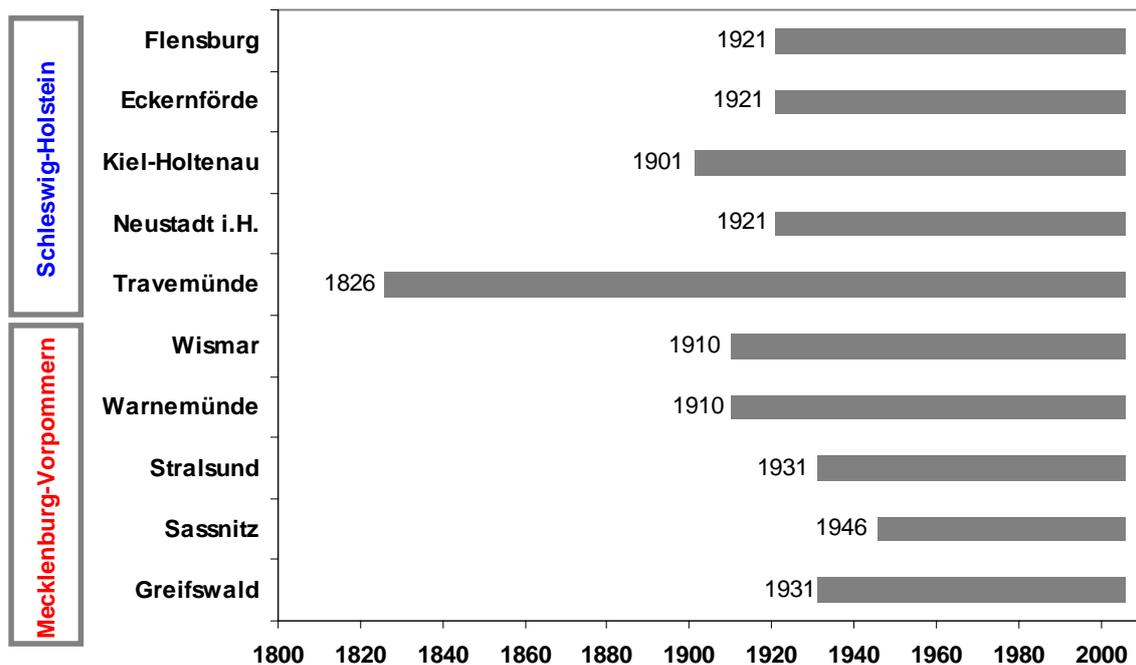


Abbildung 5.2: Verfügbare Zeitreihenlängen der analysierten Ostseepegel

In den nachfolgenden Abschnitten sind die Datengrundlagen der einzelnen Pegel mit wesentlichen statistischen Kennzahlen dargestellt. Neben den Mittelwerten und Trends der gesamten Zeitreihen, wurden für direkte Vergleichszwecke die Mittelwerte der MW- und HW-Zeitreihe für die Zeitspanne von 1951 bis 2006 berechnet. Dies entspricht dem dreifachen Wert der Periode der Nodaltide (56 Jahre = 3 x 18,6 Jahre) und es liegen für alle Pegel die Daten dieser Zeitspanne vor. Weiterhin werden die Korrelationsrechnungen für eventuell erforderliche Lückenschließungen innerhalb einer Zeitreihe dargestellt.

## 5.2 Flensburg

Die Zeitreihen der jährlichen Wasserstandshauptwerte für den Pegel Flensburg stehen von 1921 bis 2006 zur Verfügung. Die Zeitreihen weisen keine Datenlücken auf und können daher nach der Umrechnung auf Höhen über Normal-Null (NN) für die statistischen Analysen verwendet werden. Der Mittelwert der MW-Zeitreihe von 1921 bis 2006 liegt bei  $MMW_{1921-2006} = -4$  cmNN, während der Mittelwert von 1951 bis 2006  $MMW_{1951-2006} = -2$  cmNN beträgt. Die gesamte untersuchte MW-Zeitreihe hat einen linearen Trend von  $s_{MW} = 1,4$  mm/a. Der Mittelwert der Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) von 1921 bis 2006 liegt bei  $MHW_{1921-2006} = 116$  cmNN und von 1951 bis 2006 bei  $MHW_{1951-2006} = 117$  cmNN. Der lineare Trend der gesamten Zeitreihe beträgt  $s_{HW} = 0,5$  mm/a. Der höchste gemessene Sturmflutwasserstand am Pegel Flensburg innerhalb der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen ist im hydrologischen Jahr 1936 aufgetreten und beträgt  $HHW = 181$  cmNN (Tabelle 5.1, Abbildung 5.3).

Tabelle 5.1: Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Flensburg

Pegel Flensburg						
Zeitreihe	von	bis	Datenlücken	Mittelwert (gesamt) [cm NN]	Mittelwert (1951-2006) [cm NN]	Trend (gesamt) [mm/a]
Mittelwasser (MW)	1921	2006	-	-4	-2	1,4
Hochwasser (HW)	1921	2006	-	116	117	0,5

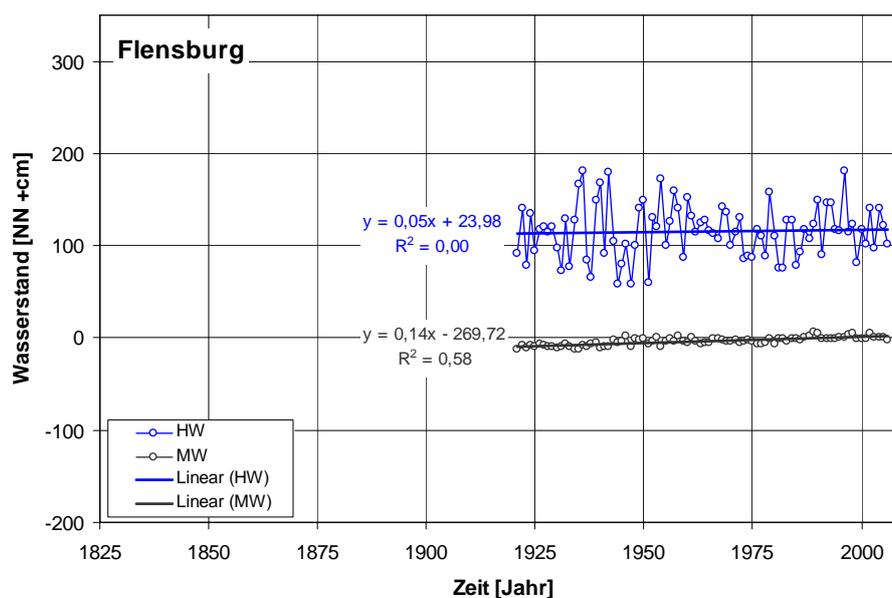


Abbildung 5.3: Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Flensburg mit linearen Trends

### 5.3 Eckernförde

Die Zeitreihen der jährlichen Wasserstandshauptwerte für den Pegel Eckernförde stehen von 1921 bis 2006 zur Verfügung. Die Zeitreihen weisen keine Datenlücken auf und können daher nach der Umrechnung auf Höhen über Normal-Null (NN) für die statistischen Analysen verwendet werden. Der Mittelwert der MW-Zeitreihe von 1921 bis 2006 liegt bei  $MMW_{1921-2006} = -4 \text{ cm NN}$ , während der Mittelwert von 1951 bis 2006  $MMW_{1951-2006} = -2 \text{ cm NN}$  beträgt. Die gesamte untersuchte MW-Zeitreihe hat einen linearen Trend von  $s_{MW} = 1,5 \text{ mm/a}$ . Der Mittelwert der Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) von 1921 bis 2006 liegt bei  $MHW_{1921-2006} = 118 \text{ cm NN}$  und von 1951 bis 2006 bei  $MHW_{1951-2006} = 125 \text{ cm NN}$ . Der lineare Trend der gesamten Zeitreihe beträgt  $s_{HW} = 3,4 \text{ mm/a}$ . Der höchste gemessene Sturmflutwasserstand am Pegel Eckernförde innerhalb der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen ist im hydrologischen Jahr 1996 aufgetreten und beträgt  $HHW = 198 \text{ cm NN}$  (Tabelle 5.2, Abbildung 5.4).

Tabelle 5.2: Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Eckernförde

Pegel Eckernförde						
Zeitreihe	von	bis	Datenlücken	Mittelwert (gesamt) [cm NN]	Mittelwert (1951-2006) [cm NN]	Trend (gesamt) [mm/a]
Mittelwasser (MW)	1921	2006	-	-4	-2	1,5
Hochwasser (HW)	1921	2006	-	118	125	3,4

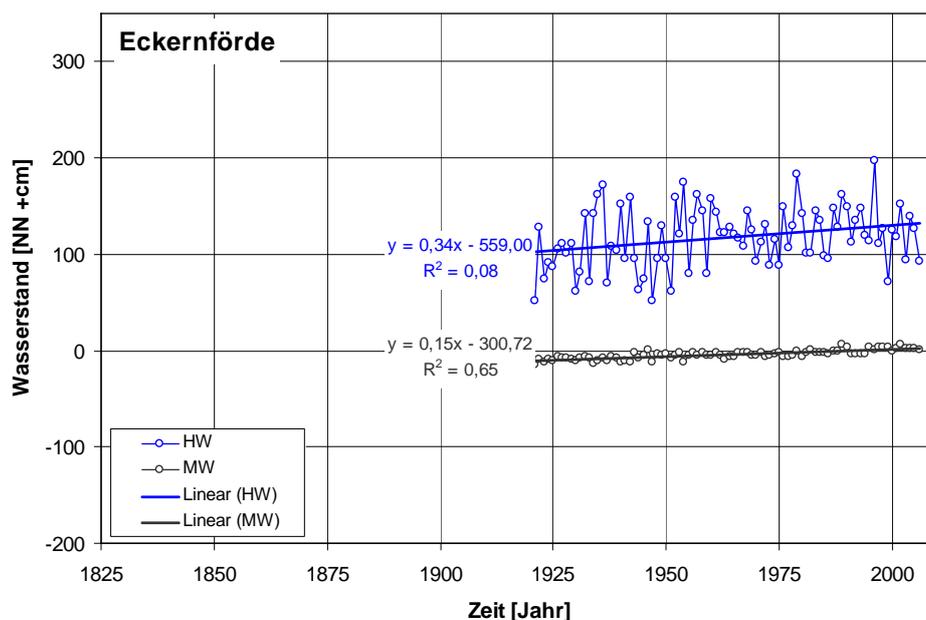


Abbildung 5.4: Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Eckernförde mit linearen Trends

### 5.4 Kiel-Holtenau

Die Zeitreihen der jährlichen Wasserstandshauptwerte für den Pegel Kiel-Holtenau stehen von 1901 bis 2006 zur Verfügung. Die Zeitreihen weisen keine Datenlücken auf und können daher nach der Umrechnung auf Höhen über Normal-Null (NN) für die statistischen Analysen verwendet werden. Der Mittelwert der MW-Zeitreihe von 1901 bis 2006 liegt bei  $MMW_{1901-2006} = -4 \text{ cmNN}$ , während der Mittelwert von 1951 bis 2006  $MMW_{1951-2006} = -1 \text{ cmNN}$  beträgt. Die gesamte untersuchte MW-Zeitreihe hat einen linearen Trend von  $s_{MW} = 1,3 \text{ mm/a}$ . Der Mittelwert der Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) von 1901 bis 2006 liegt bei  $MHW_{1901-2006} = 118 \text{ cmNN}$  und von 1951 bis 2006 bei  $MHW_{1951-2006} = 119 \text{ cmNN}$ . Der lineare Trend der gesamten Zeitreihe beträgt  $s_{HW} = -0,3 \text{ mm/a}$ . Der höchste gemessene Sturmflutwasserstand am Pegel Kiel-Holtenau innerhalb der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen ist im hydrologischen Jahr 1905 aufgetreten und beträgt  $HHW = 225 \text{ cmNN}$  (Tabelle 5.3, Abbildung 5.5).

Tabelle 5.3: Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Kiel-Holtenau

Pegel Kiel-Holtenau						
Zeitreihe	von	bis	Datenlücken	Mittelwert (gesamt) [cm NN]	Mittelwert (1951-2006) [cm NN]	Trend (gesamt) [mm/a]
Mittelwasser (MW)	1901	2006	-	-4	-1	1,3
Hochwasser (HW)	1901	2006	-	118	119	-0,3

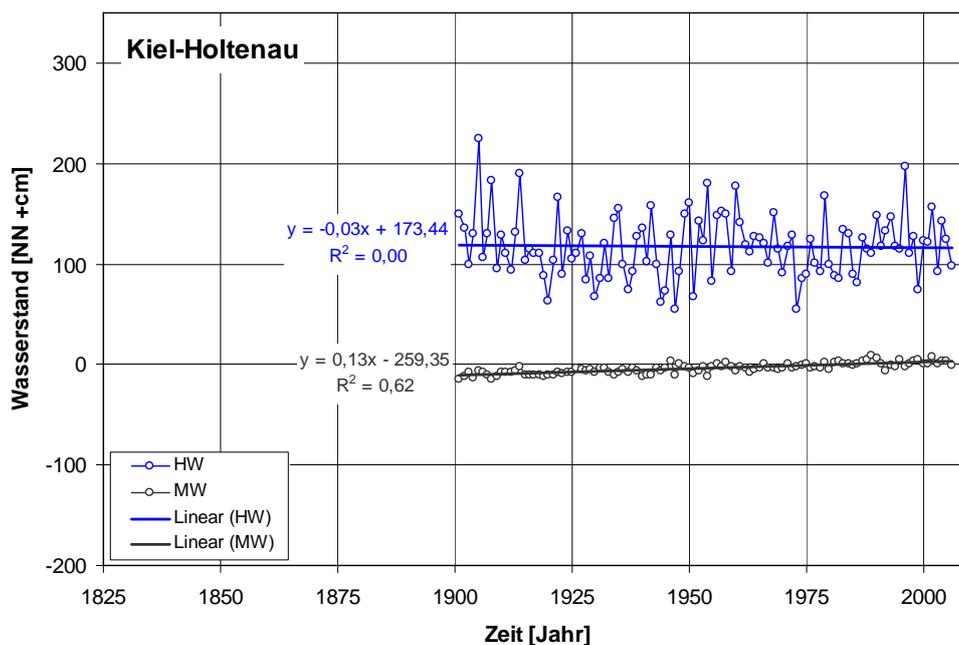


Abbildung 5.5: Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Kiel-Holtenau mit linearen Trends

## 5.5 Neustadt i. H.

Die Zeitreihen der jährlichen Wasserstandshauptwerte für den Pegel Neustadt in Holstein (i. H.) stehen von 1921 bis 2006 zur Verfügung. Die Zeitreihen weisen keine Datenlücken auf und können daher nach der Umrechnung auf Höhen über Normal-Null (NN) für die statistischen Analysen verwendet werden. Der Mittelwert der MW-Zeitreihe von 1901 bis 2006 liegt bei  $MMW_{1901-2006} = -3 \text{ cmNN}$ , während der Mittelwert von 1951 bis 2006  $MMW_{1951-2006} = -1 \text{ cmNN}$  beträgt. Die gesamte untersuchte MW-Zeitreihe hat einen linearen Trend von  $s_{MW} = 1,5 \text{ mm/a}$ . Der Mittelwert der Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) von 1901 bis 2006 liegt bei  $MHW_{1901-2006} = 115 \text{ cmNN}$  und von 1951 bis 2006 bei  $MHW_{1951-2006} = 124 \text{ cmNN}$ . Der lineare Trend der gesamten Zeitreihe beträgt  $s_{HW} = 4,4 \text{ mm/a}$ . Der höchste gemessene Sturmflutwasserstand am Pegel Neustadt i.H. innerhalb der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen ist im hydrologischen Jahr 1954 aufgetreten und beträgt  $HHW = 185 \text{ cmNN}$  (Tabelle 5.4, Abbildung 5.6).

Tabelle 5.4: Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Neustadt

Pegel Neustadt i.H.						
Zeitreihe	von	bis	Datenlücken	Mittelwert (gesamt) [cm NN]	Mittelwert (1951-2006) [cm NN]	Trend (gesamt) [mm/a]
Mittelwasser (MW)	1921	2006	-	-3	-1	1,5
Hochwasser (HW)	1921	2006	-	115	124	4,4

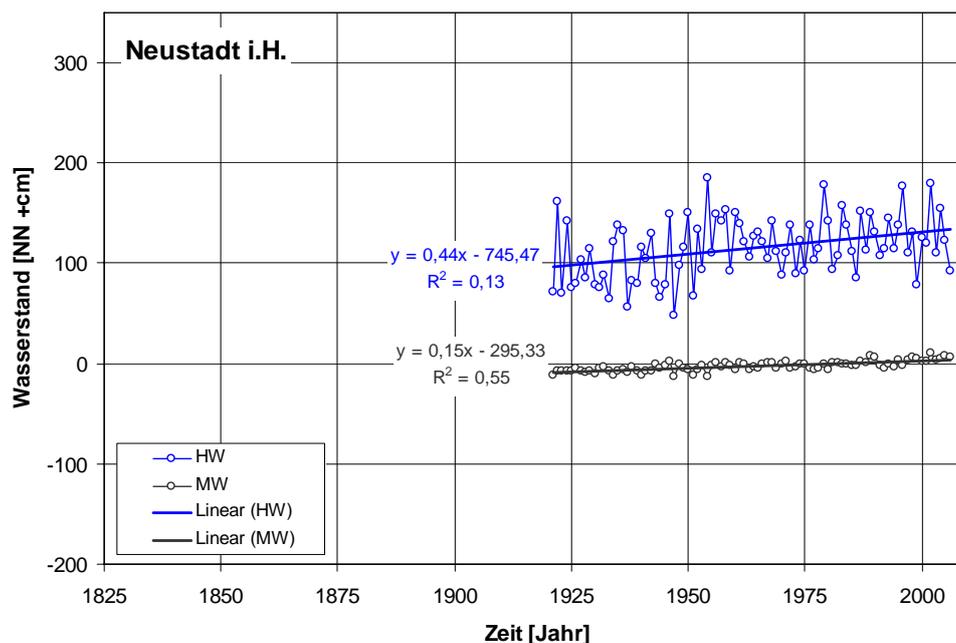


Abbildung 5.6: Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Neustadt i.H. mit linearen Trends

### 5.6 Travemünde

Die Zeitreihen der jährlichen Wasserstandshauptwerte für den Pegel Travemünde stehen von 1826 bis 2006 zur Verfügung. Die Zeitreihen weisen keine Datenlücken auf und können daher nach der Umrechnung auf Höhen über Normal-Null (NN) für die statistischen Analysen verwendet werden (JENSEN UND TÖPPE 1986, 1990). Der Mittelwert der MW-Zeitreihe von 1826 bis 2006 liegt bei  $MMW_{1826-2006} = -8 \text{ cm NN}$ , während der Mittelwert von 1951 bis 2006  $MMW_{1951-2006} = 1 \text{ cm NN}$  beträgt. Die gesamte untersuchte MW-Zeitreihe hat einen linearen Trend von  $s_{MW} = 1,3 \text{ mm/a}$ . Der Mittelwert der Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) von 1826 bis 2006 liegt bei  $MHW_{1826-2006} = 112 \text{ cm NN}$  und von 1951 bis 2006 bei  $MHW_{1951-2006} = 131 \text{ cm NN}$ . Der lineare Trend der gesamten Zeitreihe beträgt  $s_{HW} = 2,2 \text{ mm/a}$ . Der höchste gemessene Sturmflutwasserstand am Pegel Travemünde innerhalb der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen ist im hydrologischen Jahr 1873 aufgetreten und beträgt  $HHW = 316 \text{ m NN}$  (Tabelle 5.5, Abbildung 5.7).

Tabelle 5.5: Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Travemünde

Pegel Travemünde						
Zeitreihe	von	bis	Datenlücken	Mittelwert (gesamt) [cm NN]	Mittelwert (1951-2006) [cm NN]	Trend (gesamt) [mm/a]
Mittelwasser (MW)	1826	2006	-	-8	1	1,3
Hochwasser (HW)	1826	2006	-	112	132	2,2

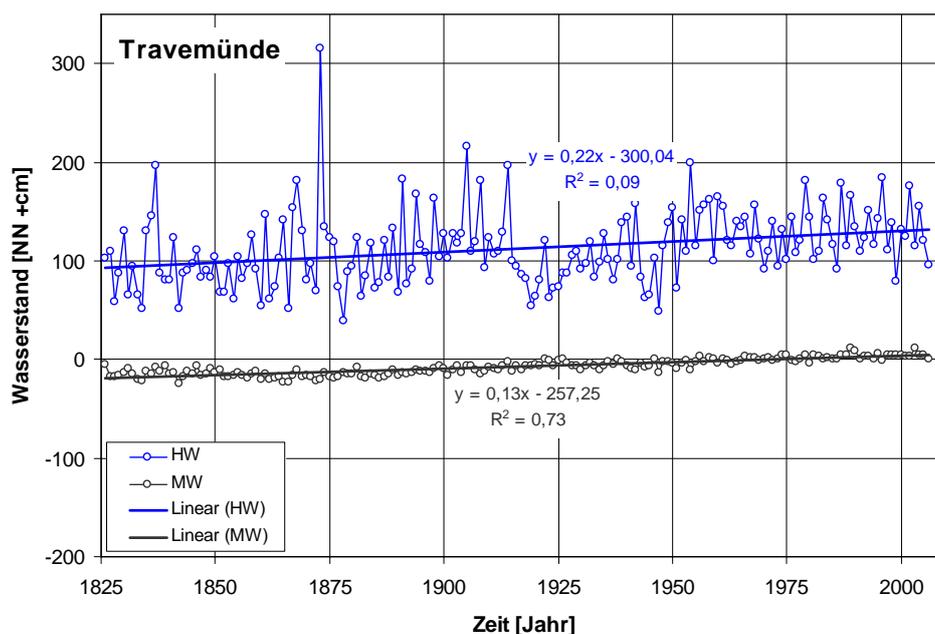


Abbildung 5.7: Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Travemünde mit linearen Trends

## 5.7 Wismar

Die Zeitreihen der jährlichen Wasserstandshauptwerte für den Pegel Wismar stehen von 1910 bis 2006 zur Verfügung. Die HW-Zeitreihe weist einige Datenlücken in den Kriegsjahren auf, welche für eine statistische Analyse über eine Korrelationsrechnung mit benachbarten Pegeln geschlossen werden. Eine Korrelation mit dem Pegel Travemünde hat den höchsten Korrelationskoeffizienten ergeben (HW: 70%), so dass diese Beziehung zur Lückenschließung verwendet wird (Abbildung 5.8). Der Mittelwert der MW-Zeitreihe von 1910 bis 2006 liegt bei  $MMW_{1910-2006} = 0$  cmNN, während der Mittelwert von 1951 bis 2006  $MMW_{1951-2006} = 3$  cmNN beträgt. Die gesamte untersuchte MW-Zeitreihe hat einen linearen Trend von  $s_{MW} = 1,5$  mm/a. Der Mittelwert der Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) von 1901 bis 2006 liegt nach Lückenschließung bei  $MHW_{1910-2006} = 127$  cmNN und von 1951 bis 2006 bei  $MHW_{1951-2006} = 133$  cmNN. Der lineare Trend der gesamten Zeitreihe beträgt  $s_{HW} = 2,4$  mm/a. Der höchste gemessene Sturmflutwasserstand am Pegel Wismar innerhalb der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen ist im hydrologischen Jahr 1914 aufgetreten und beträgt  $HHW = 211$  cmNN (Tabelle 5.6, Abbildung 5.9).

Tabelle 5.6: Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Wismar

Pegel Wismar						
Zeitreihe	von	bis	Datenlücken	Mittelwert (gesamt) [cm NN]	Mittelwert (1951-2006) [cm NN]	Trend (gesamt) [mm/a]
Mittelwasser (MW)	1910	2006	-	0	3	1,5
Hochwasser (HW)	1910	2006	1941, 1942, 1945	127	133	2,4

### Korrelation HW zur Lückenschließung

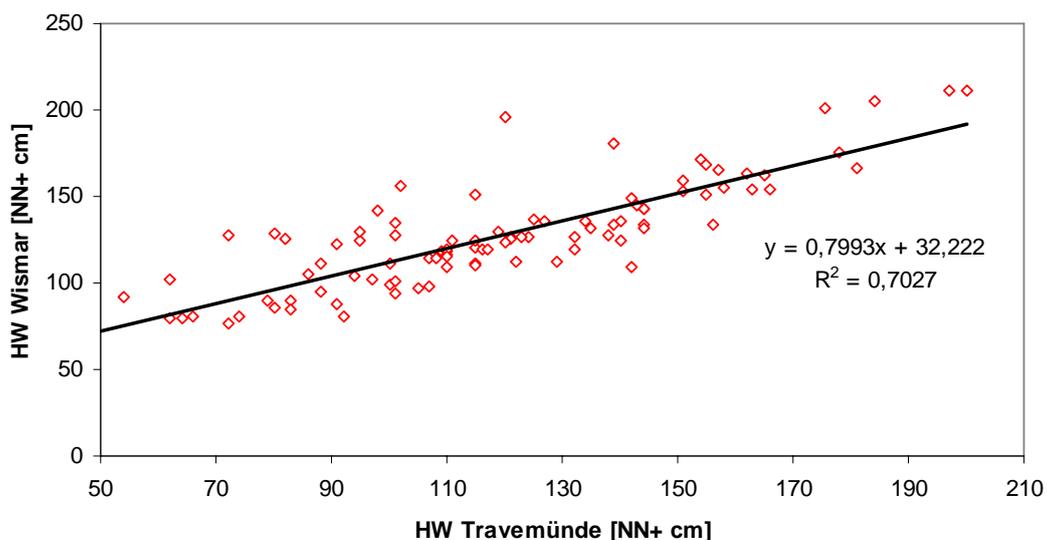


Abbildung 5.8: Korrelation der HW-Zeitreihen der Pegel Wismar und Travemünde

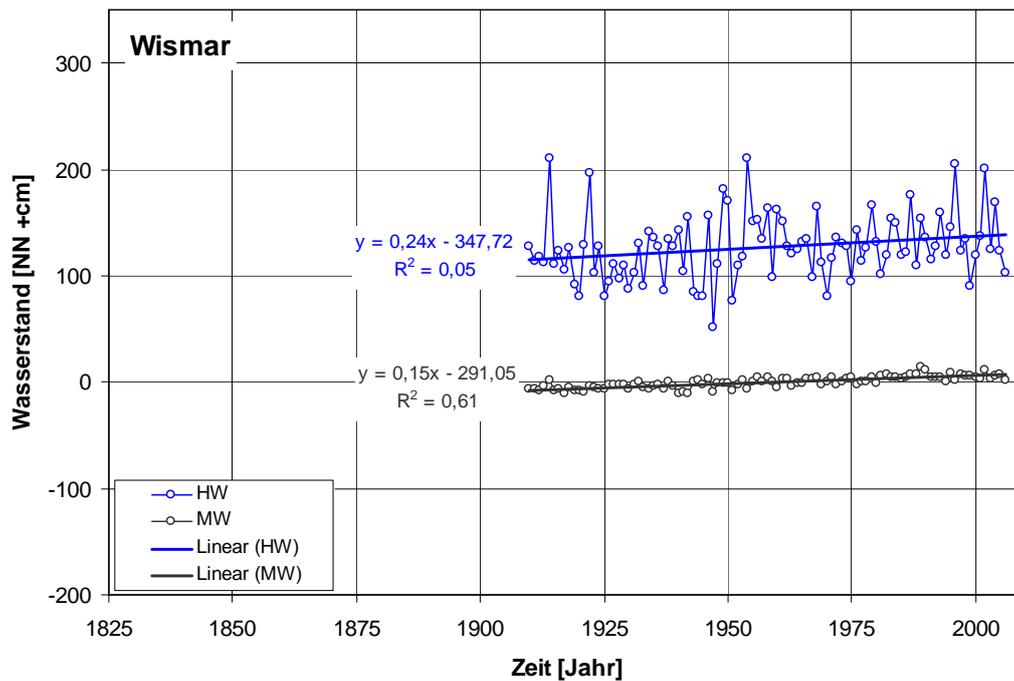


Abbildung 5.9: Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Wismar mit linearen Trends

## 5.8 Warnemünde

Die Zeitreihen der jährlichen Wasserstandshauptwerte für den Pegel Warnemünde stehen von 1910 bis 2006 zur Verfügung. Die Zeitreihen weisen zwei Datenlücken in 1932 (MW) und 1942 (HW) auf und werden für eine statistische Analyse über eine Korrelationsrechnung mit benachbarten Pegeln geschlossen. Eine Korrelation mit dem Pegel Travemünde hat die höchsten Korrelationskoeffizienten ergeben (HW: 56 %, MW: 79 %), so dass diese Beziehungen zur Lückenschließung verwendet werden (Abbildung 5.10, Abbildung 5.11).

Der Mittelwert der MW-Zeitreihe von 1910 bis 2006 liegt nach Lückenschließung bei  $MMW_{1910-2006} = -1$  cmNN, während der Mittelwert von 1951 bis 2006  $MMW_{1951-2006} = 2$  cmNN beträgt. Die gesamte untersuchte MW-Zeitreihe hat einen linearen Trend von  $s_{MW} = 1,3$  mm/a. Der Mittelwert der Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) von 1910 bis 2006 liegt bei  $MHW_{1910-2006} = 108$  cmNN und von 1951 bis 2006 bei  $MHW_{1951-2006} = 113$  cmNN. Der lineare Trend der gesamten Zeitreihe beträgt  $s_{HW} = 1,7$  mm/a. Der höchste gemessene Sturmflutwasserstand am Pegel Warnemünde innerhalb der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen ist im hydrologischen Jahr 1914 aufgetreten und beträgt  $HHW = 190$  cmNN (Tabelle 5.7, Abbildung 5.12).

Tabelle 5.7: Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Warnemünde

Pegel Warnemünde						
Zeitreihe	von	bis	Datenlücken	Mittelwert (gesamt) [cm NN]	Mittelwert (1951-2006) [cm NN]	Trend (gesamt) [mm/a]
Mittelwasser (MW)	1910	2006	1932	-1	2	1,3
Hochwasser (HW)	1910	2006	1942	108	113	1,7

### Korrelation HW zur Lückenschließung

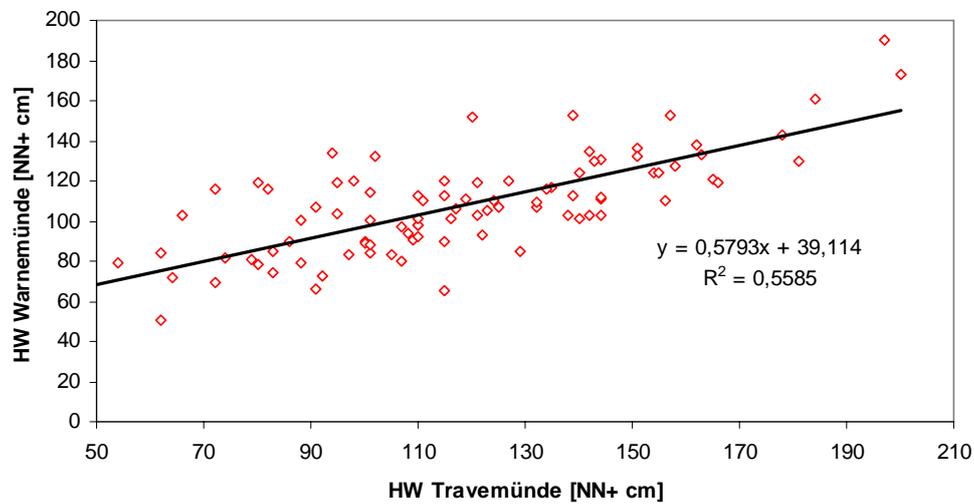


Abbildung 5.10: Korrelation der HW-Zeitreihen der Pegel Warnemünde und Travemünde

### Korrelation MW zur Lückenschließung

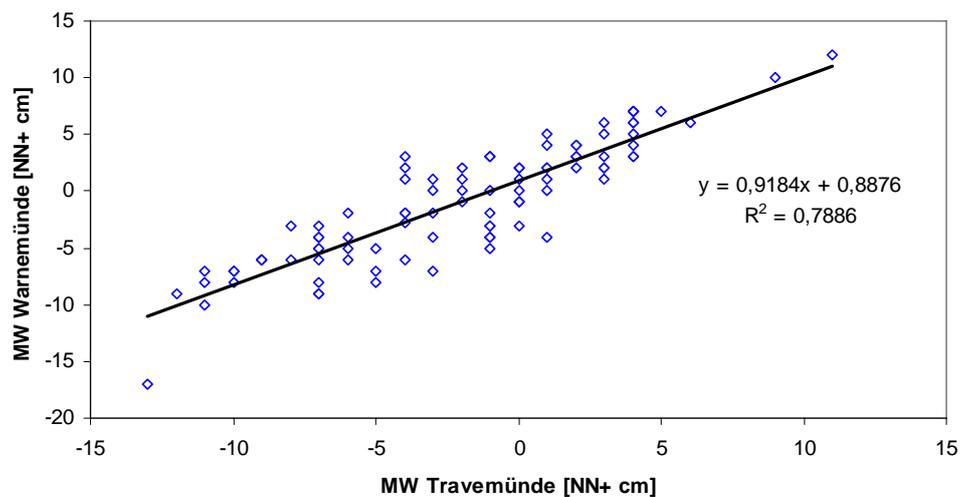


Abbildung 5.11: Korrelation der MW-Zeitreihen der Pegel Warnemünde und Travemünde

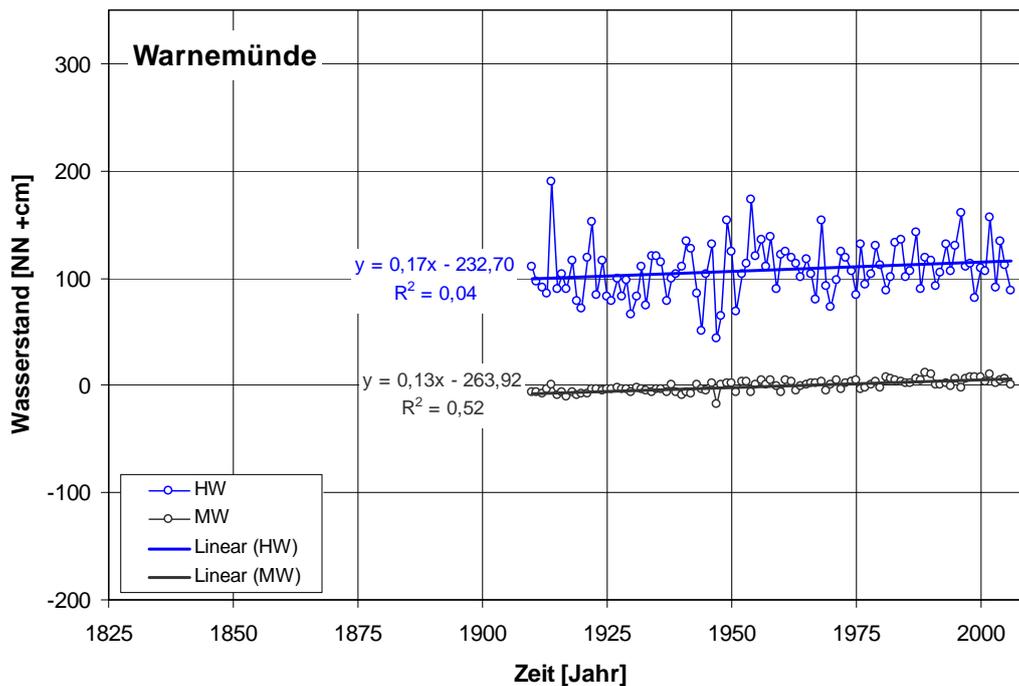


Abbildung 5.12: Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Warnemünde mit linearen Trends

### 5.9 Stralsund

Die Zeitreihen der jährlichen Wasserstandshauptwerte für den Pegel Stralsund stehen von 1933 bis 2006 zur Verfügung. Die Zeitreihen weisen keine Datenlücken auf und können daher nach der Umrechnung auf Höhen über Normal-Null (NN) für die statistischen Analysen verwendet werden. Der Mittelwert der MW-Zeitreihe von 1933 bis 2006 liegt bei  $MMW_{1933-2006} = -1 \text{ cmNN}$ , während der Mittelwert von 1951 bis 2006  $MMW_{1951-2006} = 0 \text{ cmNN}$  beträgt. Die gesamte untersuchte MW-Zeitreihe hat einen linearen Trend von  $s_{MW} = 0,9 \text{ mm/a}$ . Der Mittelwert der Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) von 1933 bis 2006 liegt bei  $MHW_{1933-2006} = 97 \text{ cmNN}$  und von 1951 bis 2006 bei  $MHW_{1951-2006} = 102 \text{ cmNN}$ . Der lineare Trend der gesamten Zeitreihe beträgt  $s_{HW} = 3,6 \text{ mm/a}$ . Der höchste gemessene Sturmflutwasserstand am Pegel Stralsund innerhalb der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen ist im hydrologischen Jahr 1996 aufgetreten und beträgt  $HHW = 162 \text{ cmNN}$  (Tabelle 5.8, Abbildung 5.13).

Tabelle 5.8: Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Stralsund

Pegel Stralsund						
Zeitreihe	von	bis	Datenlücken	Mittelwert (gesamt) [cm NN]	Mittelwert (1951-2006) [cm NN]	Trend (gesamt) [mm/a]
Mittelwasser (MW)	1933	2006	-	-1	0	0,9
Hochwasser (HW)	1933	2006	-	97	102	3,6

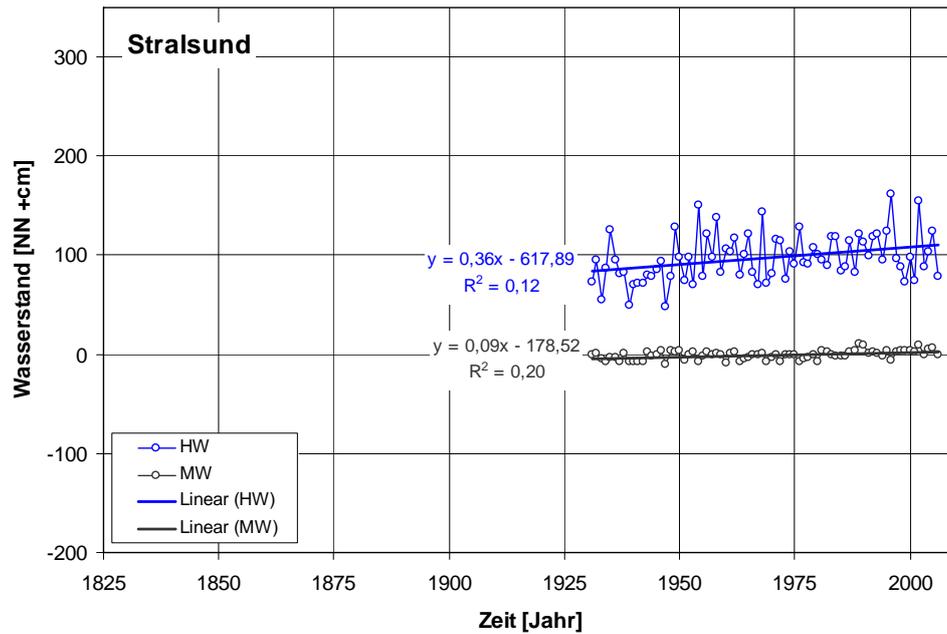


Abbildung 5.13: Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Stralsund mit linearen Trends

## 5.10 Sassnitz

Die Zeitreihen der jährlichen Wasserstandshauptwerte für den Pegel Sassnitz stehen von 1946 bis 2006 zur Verfügung. Die Zeitreihen weisen keine Datenlücken auf und können daher nach der Umrechnung auf Höhen über Normal-Null (NN) für die statistischen Analysen verwendet werden. Der Mittelwert der MW-Zeitreihe von 1946 bis 2006 liegt bei  $MMW_{1946-2006} = 1 \text{ cmNN}$ , ebenso beträgt der Mittelwert von 1951 bis 2006  $MMW_{1951-2006} = 1 \text{ cmNN}$ . Die gesamte untersuchte MW-Zeitreihe hat einen linearen Trend von  $s_{MW} = 0,4 \text{ mm/a}$ . Der Mittelwert der Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) von 1946 bis 2006 liegt bei  $MHW_{1946-2006} = 93 \text{ cmNN}$  und von 1951 bis 2006 ebenfalls bei  $MHW_{1951-2006} = 93 \text{ cmNN}$ . Der lineare Trend der gesamten Zeitreihe beträgt  $s_{HW} = 1,7 \text{ mm/a}$ . Der höchste gemessene Sturmflutwasserstand am Pegel Sassnitz innerhalb der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen ist im hydrologischen Jahr 1949 aufgetreten und beträgt  $HHW = 144 \text{ cmNN}$  (Tabelle 5.9, Abbildung 5.14).

Tabelle 5.9: Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Sassnitz

Pegel Sassnitz						
Zeitreihe	von	bis	Datenlücken	Mittelwert (gesamt) [cm NN]	Mittelwert (1951-2006) [cm NN]	Trend (gesamt) [mm/a]
Mittelwasser (MW)	1946	2006	-	1	1	0,4
Hochwasser (HW)	1946	2006	-	93	93	1,7

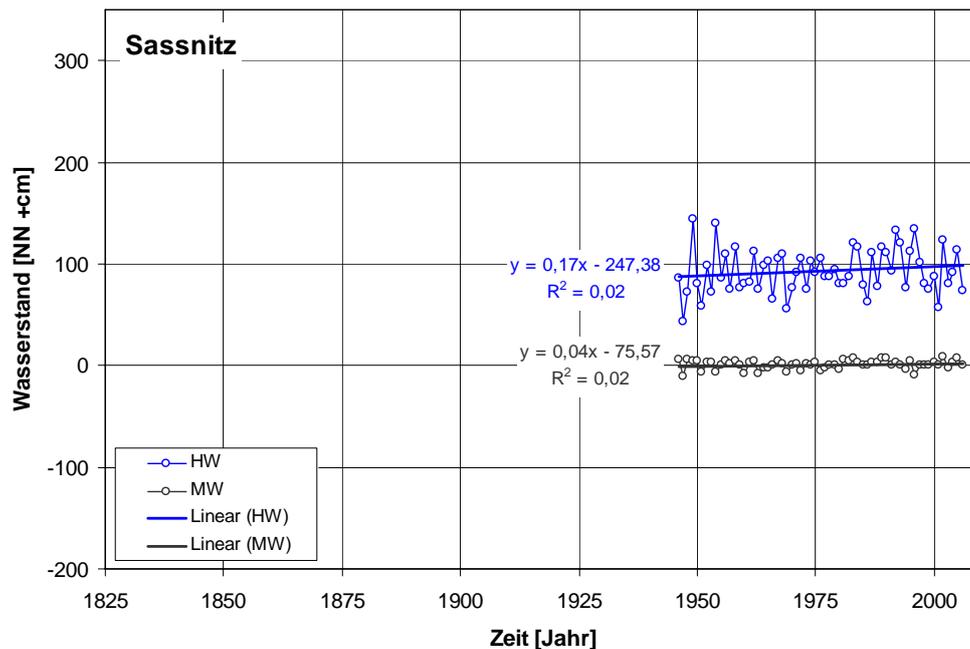


Abbildung 5.14: Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Sassnitz mit linearen Trends

## 5.11 Greifswald

Die Zeitreihen der jährlichen Wasserstandshauptwerte für den Pegel Greifswald stehen von 1931 bis 2006 zur Verfügung. Die Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) weist eine fünfjährige Datenlücke von 1941 bis 1945 auf, die über eine Korrelationsrechnung mit dem benachbarten Pegel Stralsund geschlossen wird. Für die HW-Zeitreihen zwischen den Pegeln Stralsund und Greifswald ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von 80%, so dass diese Beziehungen zur Lückenschließung verwendet werden (Abbildung 5.15).

Der Mittelwert der MW-Zeitreihe von 1931 bis 2006 liegt nach Lückenschließung bei  $MMW_{1931-2006} = 0$  cmNN; der Mittelwert von 1951 bis 2006 beträgt ebenfalls  $MMW_{1951-2006} = 0$  cmNN beträgt. Die gesamte untersuchte MW-Zeitreihe hat einen linearen Trend von  $s_{MW} = 0,7$  mm/a. Der Mittelwert der Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände (HW) von 1931 bis 2006 liegt bei  $MHW_{1931-2006} = 111$  cmNN und von 1951 bis 2006 bei  $MHW_{1951-2006} = 114$  cmNN. Der lineare Trend der gesamten Zeitreihe beträgt  $s_{HW} = 2,4$  mm/a. Der höchste gemessene Sturmflutwasserstand am Pegel Greifswald innerhalb der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen ist im hydrologischen Jahr 1949 aufgetreten und beträgt  $HHW = 180$  cmNN (Tabelle 5.10, Abbildung 5.16).

Tabelle 5.10: Statistische Kennwerte der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Greifswald

Pegel Greifswald						
Zeitreihe	von	bis	Datenlücken	Mittelwert (gesamt) [cm NN]	Mittelwert (1951-2006) [cm NN]	Trend (gesamt) [mm/a]
Mittelwasser (MW)	1931	2006		0	0	0,7
Hochwasser (HW)	1931	2006	1941-1945	111	114	2,4

### Korrelation HW zur Lückenschließung

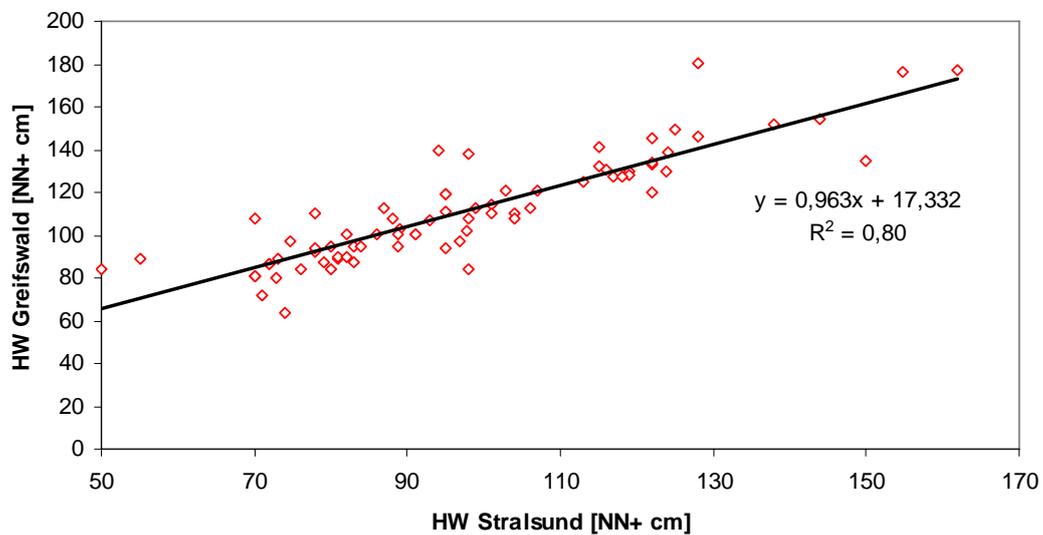


Abbildung 5.15: Korrelation der HW-Zeitreihen der Pegel Stralsund und Greifswald

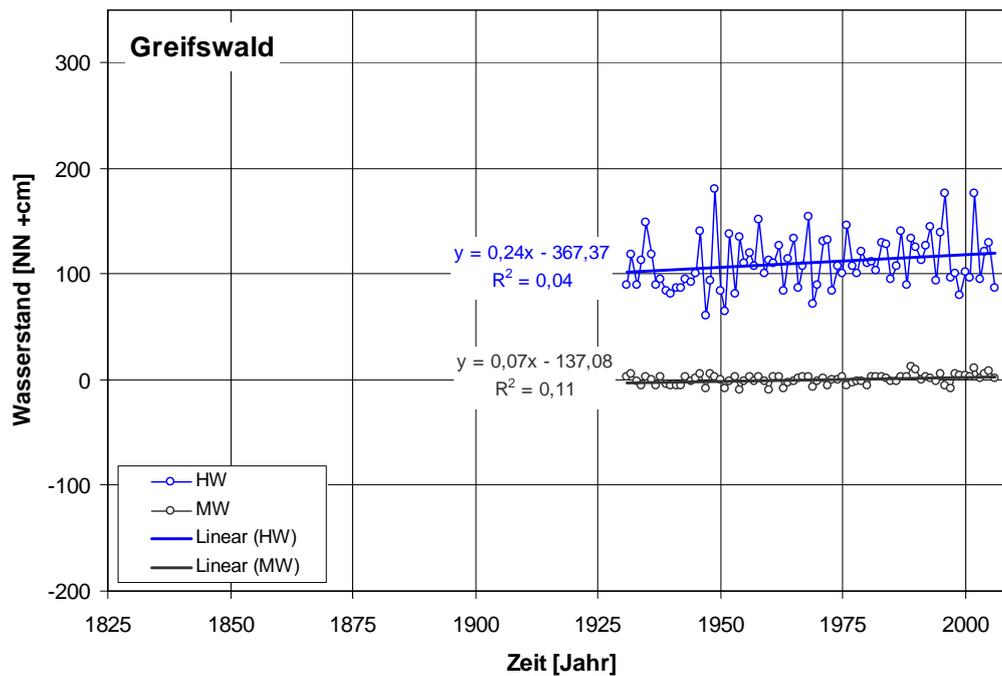


Abbildung 5.16: Darstellung der MW- und HW-Zeitreihe des Pegels Greifswald mit linearen Trends

## 5.12 Zusammenfassende Beschreibung der untersuchten Ostseepegel

In einer zusammenfassenden Betrachtung der Pegeldata ergeben sich je nach Lage des Pegels lokale Unterschiede und Besonderheiten. Der mittlere Wasserstand liegt im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes ca. 3 bis 5 cm unter dem mittleren Wasserstand des weiter östlich gelegenen Teils (Abbildung 5.17). Dies ist durch die permanente Neigung der Wasseroberfläche der Ostsee zu erklären (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Die Mittelwerte der HW-Zeitreihen von 1951 bis 2006 weisen große Schwankungen an den Pegeln auf. Es ist zu erkennen, dass die Pegel im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes im Mittel höhere Sturmflutwasserstände aufweisen, als im östlichen Teil (Abbildung 5.17). Des Weiteren ergibt sich für die Lage des Pegels zur Küstenlinie ein signifikanter Unterschied. Die Pegel Flensburg, Eckernförde, Kiel-Holtenau, Neustadt, Travemünde und Wismar liegen jeweils im Inneren einer Bucht oder Förde, in der sich die Windstauwirkungen stärker ausprägen und somit auch die Wasserstände höher auflaufen (*Buchtenstau*). Dieser Effekt ist an Pegeln, die mehr an der offenen Küstenlinie positioniert sind (Warnemünde, Sassnitz), nicht zu erkennen. Die Pegel Stralsund und Greifswald weisen ebenfalls im Mittel niedrigere Sturmflutwasserstände als die weiter westlich gelegenen Pegel auf. Dafür kann der geringere Windstau im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes ursächlich sein. Nach HUPFER ET AL. (2003) ist der maximal mögliche Windstau im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes wesentlich geringer, als im weiter westlich gelegenen Teil. HUPFER ET AL. (2003) nehmen aufgrund der unterschiedlich lokalen Ausprägungen von Wasserständen eine Unterteilung in Pegel an Innenküsten (I) und Außenküsten (A) vor, welche auch für die vorliegende Auswertung übernommen wird. Damit lassen sich die untersuchten Pegel in die zwei Kategorien aufteilen:

### Pegel mit Lage an Innenküste (I):

- Flensburg (I)
- Eckernförde (I)
- Kiel-Holtenau (I)
- Neustadt i.H. (I)
- Travemünde (I)
- Wismar (I)
- Stralsund (I)
- Greifswald (I)

### Pegel mit Lage an Außenküste (A):

- Warnemünde (A)
- Sassnitz (A)

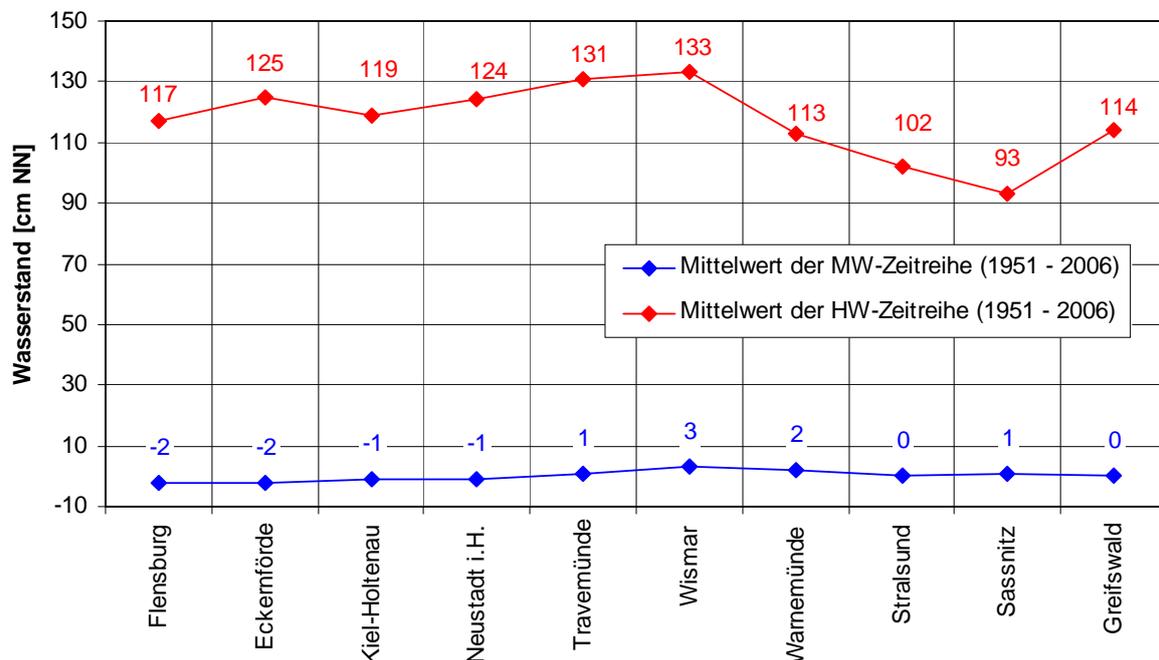


Abbildung 5.17: Längsschnitt von Flensburg bis Sassnitz der Mittelwerte der MW- und HW-Zeitreihen von 1951 bis 2006

In Abbildung 5.18 sind die linearen Trends der zur Verfügung stehenden Ostseepegel von Flensburg entlang der Küstenlinie bis Greifswald aufgetragen. Die Trends der MW-Zeitreihen liegen zwischen 0,4 und 1,5 mm/a, wobei tendenziell im westlichen Untersuchungsgebiet die höheren Trends vorzufinden sind. Wie in Abschnitt 4.2 bereits beschrieben, ist die Identifikation und Trennung der isostatischen und eustatischen Effekte in Bezug zum relativen

Meeresspiegelanstieg in der südwestlichen Ostsee nicht zweifelsfrei geklärt und kann auch im Rahmen der hier vorliegenden Bearbeitung nicht detailliert beantwortet werden. Entscheidend ist jedoch anzumerken, dass die Größenordnungen der Trends in Bezug auf die Ermittlung von extremen Wasserständen nur von untergeordneter Bedeutung sind. Die Trends der HW-Zeitserien schwanken in einem großen Bereich von  $-0,3$  bis  $4,4$  mm/a, was weniger in eustatischen und isostatischen Effekten, sondern vielmehr in der stochastischen Eigenart einer Extremwertzeitreihe begründet ist.

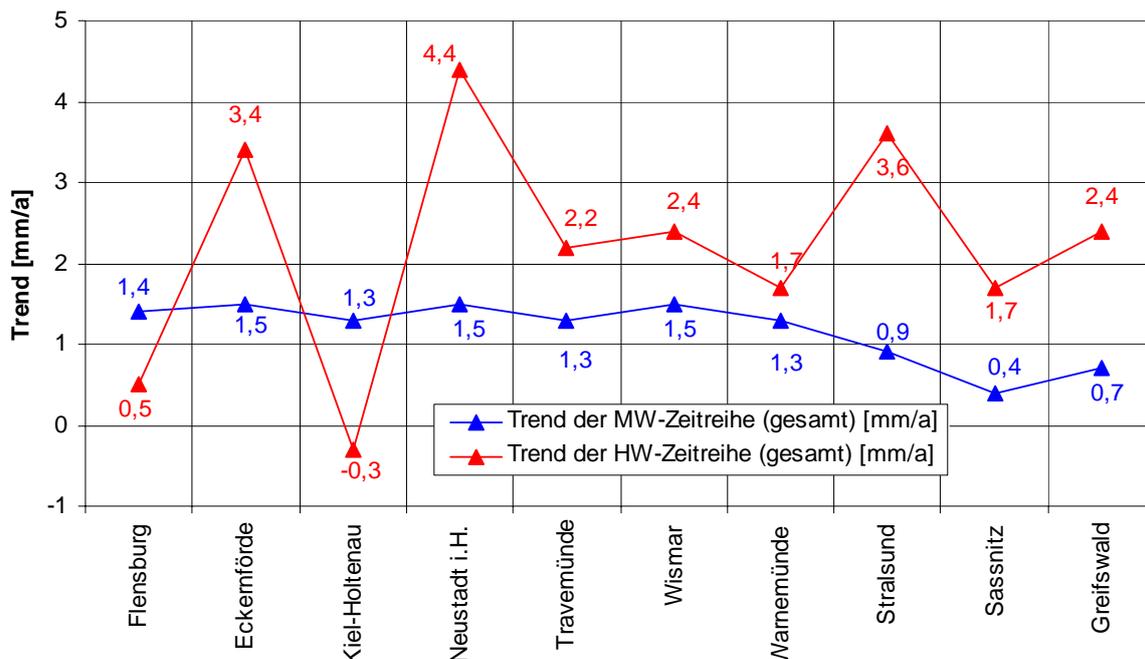


Abbildung 5.18: Längsschnitt von Flensburg bis Sassnitz der linearen Trends der MW- und HW-Zeitserien

### 5.13 Historische Extremwerte

Neben der Analyse von beobachteten Pegeldata ist die Einbeziehung von historischen Daten an der Ostsee von besonderer Bedeutung, um eine statistische Einordnung von extremen Wasserständen vornehmen zu können. Dies ist deswegen von Bedeutung, da die Sturmflut vom 12./13. November 1872 an der gesamten Deutschen Ostseeküste zu extrem hohen Wasserständen geführt hat, dieser Wert jedoch nicht in den Zeitraum der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen fällt und damit nicht in den Zeitreihen enthalten ist – bis auf Pegel Travemünde – und nur als historisch überlieferter Wert zur Verfügung steht. Weiterhin sind aus der früheren Überlieferung historische Hochwasserstandsmarken an verschiedenen Pegeln bekannt, die ebenfalls extreme Wasserstände erreicht haben.

Erste Überlieferungen über extreme Sturmflutwasserstände an der Ostsee stammen aus dem Jahr 1044 n.Chr., danach finden sich Angaben zu Sturmfluten in den Jahren 1304 und 1320. Es folgt wiederum eine größere zeitliche Lücke bis ins 17. Jahrhundert, wo ab dem Jahr 1625 einige detailliertere Aufzeichnungen zu hohen Wasserständen zu finden sind. Die Wasserstände sollen bei den genannten Ereignissen zwischen 2 m und  $>3$  m über dem Mittelwasser gelegen haben.

Ab dem 19. Jahrhundert liegen dann für viele Pegel genauere Aufzeichnungen vor, am Pegel Travemünde sogar schon regelmäßige Wasserstandswerte. Bei den historischen Ereignissen muss beachtet werden, dass in der Regel nicht die Höhe des Wasserstandes der Grund für die Überlieferung war, sondern vielmehr die damit einhergehenden katastrophalen Schäden oder Menschenverluste. So kann es auch vorkommen, dass ein eher niedriger Wasserstand, der aber zu schweren Schäden geführt hat, auch als katastrophale Sturmflut überliefert wird. Ebenso bleiben eventuell extrem hohe Ereignisse, die zu keinen Schäden geführt haben unerwähnt. Eine Zusammenstellung der in der Literatur vorhandenen historischen Wasserstandsmarken zu den untersuchten Pegelstandorten erfolgt in Tabelle 5.12.

Neben den Unsicherheiten der Höhenangaben von historischen Sturmfluten infolge einer nicht detaillierten Höhenmessung muss beachtet werden, dass die Höhenangaben in der Regel in Zentimetern oder Metern über Mittelwasser (MW) erfolgten, dies jedoch kein zeitlich konstanter Wert ist. Wie bereits Abbildung 5.17 zeigte, ist das Mittelwasser in Bezug auf NN-Höhen weder zeitlich noch örtlich eine konstante Größe. Aufgrund des positiven Trends des Mittelwassers zwischen 1 und 1,5 mm/a an den untersuchten Pegeln liegt das Mittelwasserniveau für zurückliegende Zeiträume unterhalb von 0 mNN. Betrachtet man die Entwicklung des Mittelwassers des Pegels Travemünde, so ergibt sich ein langfristiger Trend von 1826 bis 2006 von 1,3 mm/a (Abbildung 5.19), der dazu führen würde, dass bei einer Extrapolation dieses Trends in die Vergangenheit, der Mittelwasserstand um 1700 etwa 35 cm unter NN liegt. Damit müsste eine Wasserstandsmarke aus dem Jahr 1700 um ca. 35 cm reduziert werden, um einen korrekten Bezug zu NN-Höhen zu erhalten. Ein etwas anderes Bild stellt sich dar, wenn ein Trend aus der MW-Zeitreihe von 1826 bis 1900 berechnet wird. Hier ergibt sich ein zu vernachlässigender Trend von 0,09 mm/a, so dass das Niveau für das Mittelwasser für diesen Zeitraum näherungsweise als zeitlich konstant angesehen werden kann. Das Mittelwasser für den Zeitraum 1826 bis 1900 liegt ca. 15 cm unter NN, weshalb bei der Umrechnung auf NN-Höhen lediglich eine Korrektur von 15 cm erfolgen müsste. In der Literatur finden sich jedoch auch hierzu widersprüchliche Angaben. So wird z.B. in JENSEN UND TÖPPE (1990) für den Pegel Flensburg im Jahr 1694 ein Wasserstand von 270 cm ü.MW angegeben. Im *Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein* (MLR 2001) findet sich ein Wert von 270 cm ü.NN für das gleiche Ereignis. Hier hat offenbar keine entsprechende Umrechnung zwischen den Höhenbezugssystemen stattgefunden.

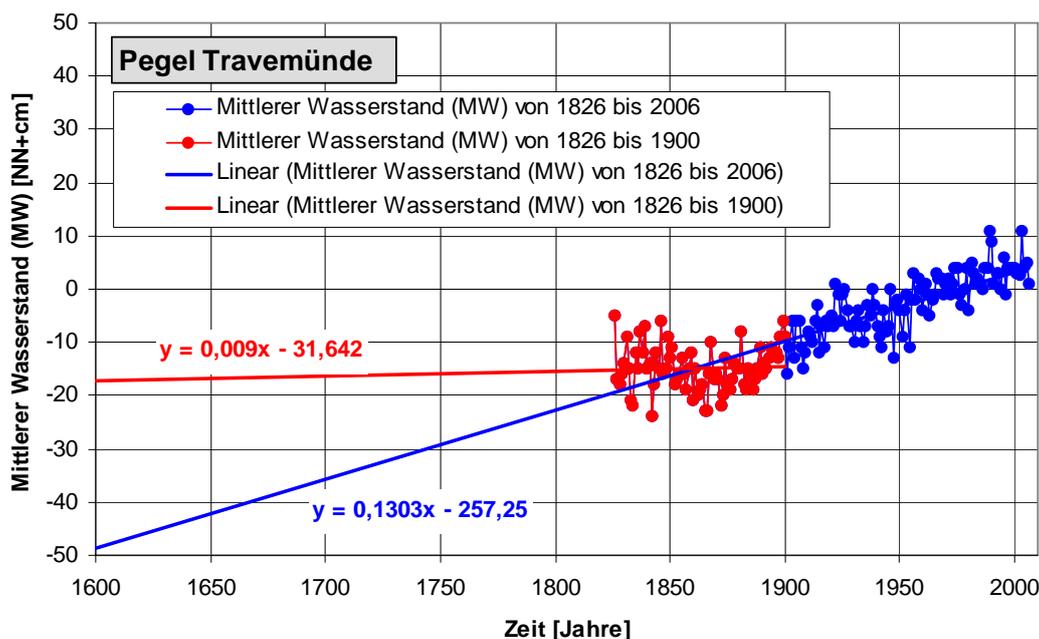


Abbildung 5.19: Zeitliche Entwicklung des Mittelwassers am Pegel Travemünde von 1826 bis 2006 mit linearen Trends von 1826 - 1900 und 1826 - 2006

Ein detaillierter Vergleich der in der Literatur angegebenen Scheitelwasserstände der Sturmflut vom 12./13. November 1872 ist in Tabelle 5.11 gegeben. Prinzipiell ist auch hier die Unterscheidung zwischen dem Höhenbezug zum Mittelwasserstand und zum Höhensystem NN zu sehen, jedoch ergeben sich trotzdem widersprüchliche Angaben. So ist im *Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein* (MLR 2001) ein Wert von 330 cm ü. NN für die Sturmflut 1872 angegeben, während JENSEN UND TÖPPE (1986) nach umfangreichen Analysen einen Wert von 316 cm ü. NN als maßgebend erachten. Auf Nachfrage beim Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume wird angegeben (HOFSTEDÉ 2007, pers. Mitteilung), dass auch im Ministerium der ermittelte Wert von JENSEN UND TÖPPE (1986) als richtig angesehen wird, jedoch der Wert von 330 cm ü. NN in der Bevölkerung bekannter ist und daher weiterhin im Generalplan Küstenschutz wiedergegeben wird.

Für eine statistische Analyse müssen Wasserstände prinzipiell auf das der Auswertung zugrunde liegende Bezugsjahr (hier: 2006) beschickt werden. Die Beschickung ist eine Korrektur der Wasserstände auf das im Bezugsjahr vorhandene Mittelwasserniveau. (Beispiel: Wenn der mittlere Wasserstand der Ostsee von 1850 bis 2006 um ca. 20 cm gestiegen ist, dann wird davon ausgegangen, dass ein Sturmflutwasserstand aus dem Jahr 1850 mit 150 cmNN im Jahr 2006 170 cmNN betragen könnte.) Aufgrund der ohnehin vorhandenen Unsicherheiten von historischen Extremwerten werden diese in der vorliegenden Arbeit über eine vereinfachte generalisierte Mittelwasserentwicklung der Ostsee auf das Jahr 2006 beschickt (Abbildung 5.20). Dabei wird angesetzt, dass bis zum Jahr 1850 das Mittelwasser 20 cm unter Normalnull liegt und von 1850 bis 2006 mit einer Steigung von 1,3 mm/a auf 0 mNN ansteigt (Anmerkung: Die Wasserstandsdaten der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen werden nicht mit der vereinfachten Entwicklung des Mittelwassers beschickt, sondern mit dem tatsächlichen Verlauf des Mittelwassers des jeweiligen Pegels.). In Tabelle 5.12 sind alle in der ausgewerteten Literatur zur

Verfügung stehenden historischen Sturmflutereignisse zusammengestellt, wobei zum Teil widersprüchliche Angaben vorhanden sind. Die jeweils für die statistischen Analysen verwendeten und auf das Jahr 2006 beschickten Extremwerte sind mit (\*) gekennzeichnet.

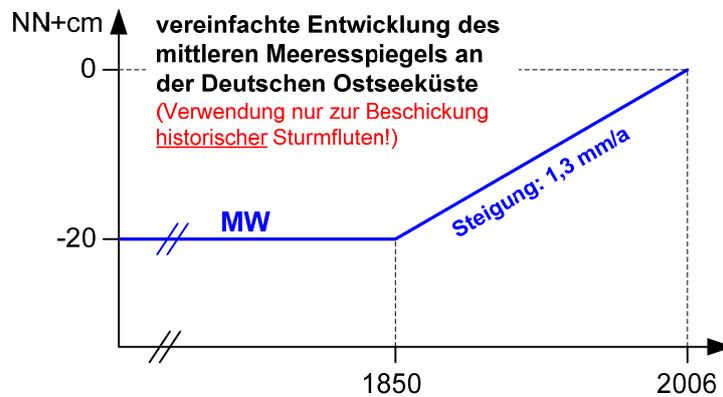


Abbildung 5.20: Vereinfachte Entwicklung des mittleren Wasserspiegels der Ostsee zur Beschickung historischer Wasserstandswerte

Tabelle 5.11: Vergleich der in der Literatur angegebenen Extremwasserstände vom 12./13. November 1872 am Pegel Travemünde

Die Wasserstände vom 12./13. November 1872 am Pegel Travemünde im Vergleich				
Wert	Einheit	Höhenbezugssystem	Anmerkungen	Quelle
330	cm	ü. NN	Es liegt keine Angabe vor, um welches NN-System es sich handelt (z.B. NN a.S, NN n.S)	nach [1] in: [2] [3]
332	cm	ü. MW	PN-Höhenlagen waren nicht amtlich festgestellt; MW wurde durch Aufzeichnungen am Pegel selbst ermittelt	[4]
338	cm	ü. MW		[4] in: [6]
340	cm	ü. MW		[7] in: [6]
316	cm	ü. NN n.S.	JENSEN & TÖPPE (1986) sagen aus, dass der oftmals erwähnte Wasserstand von 330 cm sich wahrscheinlich auf das damalige Mittelwasser bezieht.	[5]
316	cm	ü. NN	Es liegt keine Angabe vor, um welches NN-System es sich handelt (z.B. NN a.S, NN n.S)	[8]
318	cm	ü. NMW	NMW = 5,00 m ü. PN NMW = HN76 – 0,14 m NMW: derzeitiger Normal-Mittelwasserstand an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern, gültig seit 01.11.1985	[9]
334	cm	ü. ??		[10]
[1]	BAERENS, C.: Extremwasserstandsereignisse an der Deutschen Ostseeküste. Dissertation, Freie Universität Berlin, FB Geowissenschaften, Berlin, 1998			
[2]	HUPFER, P., HARFF, J., STERR, H. UND STIGGE, H.-J.: Die Wasserstände an der Ostseeküste, Die Küste, Sonderheft, Heft 66, Boyens & Co., Heide i.H., 2003			
[3]	MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE RÄUME, LANDESPLANUNG, LANDWIRTSCHAFT UND TOURISMUS DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN: Generalplan Küstenschutz, Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein, 2001			
[4]	BAENSCH: Die Sturmflut vom 12./13. November 1872 an den Ostseeküsten des Preußischen Staates, Zeitschrift für Bauwesen 23, 1875			
[5]	JENSEN, J. UND TÖPPE, A.: Zusammenstellung und Auswertungen von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 30. Jhg., Heft 4, 1986			
[6]	JENSEN, J. UND TÖPPE, A.: Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 34 Jhg., Heft 1/2, 1990			
[7]	PETERSEN, M. UND ROHDE, H.: Sturmflut. Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. K. Wachholtz Verlag, Neumünster, 1979			
[8]	BAERENS, C. UND HUPFER, P.: Extremwasserstände an der Deutschen Ostseeküste nach Beobachtungen und in einem Treibhausszenario, Die Küste, Heft 61, S. 47-72, Boyens & Co, Heide i.H., 1999			
[9]	STAATLICHES AMT FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ ROSTOCK: Sturmflutwasserstände an der Küste Mecklenburg-Vorpommern, pers. Mitteilung, 2005			
[10]	SCHUMACHER, W.: Flutkatastrophen an der deutschen Ostseeküste - Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft, Redieck & Schade, Rostock, 2003			

Tabelle 5.12: Zusammenfassung der in der Literatur vorhandenen Größenordnungen zu historischen Extremwasserständen an den untersuchten Pegelstandorten

Historische Wasserstandsdaten an der Deutschen Ostseeküste											
Jahr	Differenz des MW zu NN in [cm]	Flensburg	Eckernförde	Kiel-Holtenau	Neustadt	Travemünde	Wismar	Warnemünde	Stralsund	Sassnitz	Greifswald
1044	20					210 ü. NN [1] 230 ü. NN *					
1304	20					210 ü. NN [1] 230 ü. NN *	> 250 ü. MW [5] 250 ü. NN *		> 250 ü. MW [5] 250 ü. NN *		
1320	20					250 ü. NN [1] 320 ü. MW [5] 320 ü. NN *	> 250 ü. MW [5] 250 ü. NN *		> 250 ü. MW [5] 250 ü. NN *		
1625	20					280 ü. MW [1] 280 ü. NN [2] 287 ü. NMW [3] 280 ü. NN *	284 ü. NMW [3] 284 ü. NN *	282 ü. NMW [3] 282 ü. NN *			
1694	20	270 ü. MW [1] 270 ü. NN [2] 270 ü. NN *				265 ü. NN [1] 285 ü. NN *	284 ü. NMW [3] 284 ü. NN *				
1784	20					260 ü. NN [1] 280 ü. NN *					
1835	20	254 ü. MW [1] 254 ü. NN [2] 254 ü. NN *				regelmäßige Pegelmessungen					
1837	20					regelmäßige Pegelmessungen	204 ü. NMW [3] 204 ü. NN *				
1864	18					regelmäßige Pegelmessungen			182 ü. NMW [3] 180 ü. NN *		
1872	17	327 ü. MW [1] 308 ü. NN [2] 327 ü. NN *	340 ü. MW [1] 315 ü. NN [2] 340 ü. NN *	330 ü. MW [1] 297 ü. NN [2] 330 ü. NN *		regelmäßige Pegelmessungen	283 ü. NMW [3] 280 ü. NN [4] 297 ü. NN *	270 ü. NMW [3] 243 ü. NN [4] 270 ü. NN *	250 ü. NMW [3] 239 ü. NN [4] 256 ü. NN *		281 ü. NMW [3] 279 ü. NN *
1891	15					regelmäßige Pegelmessungen	171 ü. NMW [3] 167 ü. NN [4] 182 ü. NN *	150 ü. NMW [3] 148 ü. NN [4] 163 ü. NN *		147 ü. NMW [3] 144 ü. NN *	
1904	13	233 ü. MW [1] 223 ü. NN [2] 233 ü. NN *		regelmäßige Pegelmessungen		regelmäßige Pegelmessungen				212 ü. NMW [3] 209 ü. NN *	241 ü. NMW [3] 239 ü. NN *
1905	13			regelmäßige Pegelmessungen		regelmäßige Pegelmessungen	226 ü. NMW [3] 226 ü. NN *	188 ü. NMW [3] 188 ü. NN *	211 ü. NMW [3] 216 ü. NN [4] 229 ü. NN *		
1908	13	195 ü. MW [1] 157 ü. NN [2] 195 ü. NN *		regelmäßige Pegelmessungen		regelmäßige Pegelmessungen					
1914	12	167 ü. NN [2] 179 ü. NN *		regelmäßige Pegelmessungen		regelmäßige Pegelmessungen	regelmäßige Pegelmessungen	regelmäßige Pegelmessungen	233 ü. NMW [3] 231 ü. NN *	189 ü. NMW [3] 186 ü. NN *	226 ü. NMW [3] 224 ü. NN *

alle Angaben in [cm]

[1] Jensen, J. und Toppe, A.: Untersuchungen zu Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde, DGM 34, 1990, H. 1/2  
[2] Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein 2001  
[3] Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock, pers. Mitteilung, 2007  
[4] Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz des Landes Mecklenburg-Vorpommern  
[5] DIE KÜSTE, Heft 66 (2003)  
[6] WSA Lübeck  
\* auf das Jahr 2006 beschränkt und im Projekt MUSTOK verwendeter Wert

### 5.14 Umrechnung auf einheitlichen Höhenbezug

Vor der Verwendung von Pegelzeitreihen sind alle Daten auf einen einheitlichen Höhenbezug umzurechnen. An der Küste Schleswig-Holstein erfolgt die Angabe der Wasserstandshöhen in der Regel im Bezugssystem NN, während dies an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns im Höhensystem HN erfolgt. In der vorliegenden Untersuchung sind alle Wasserstandshöhen ins Bezugssystem NN umgerechnet worden. Die Umrechnung vom Höhen Bezugssystem HN in NN ist örtlich variabel, weshalb die örtliche Systemdifferenz berücksichtigt werden muss (Abbildung 5.21, Tabelle 5.13). Weitere ausführliche Informationen zu Höhensystemen und Umrechnungen an der Deutschen Ostseeküste sind zu finden in HUPFER ET AL. (2003).

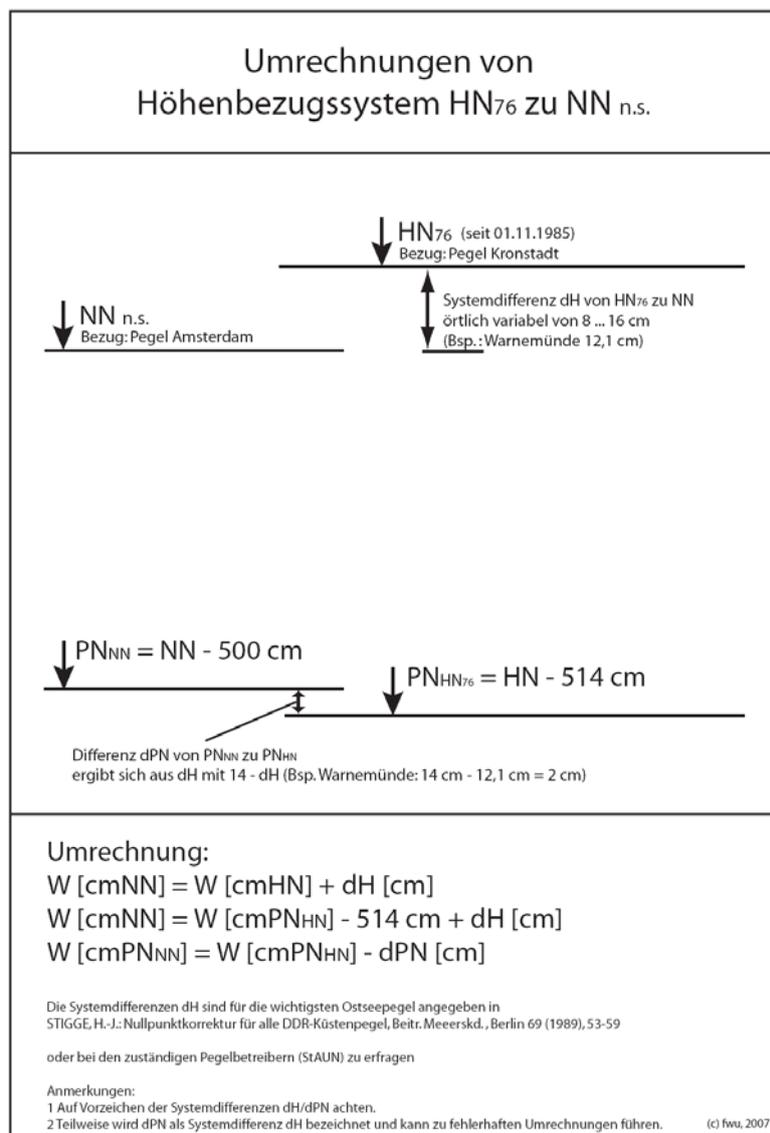


Abbildung 5.21: Unterschiede zwischen Höhenbezugssystemen HN76 und NN

Tabelle 5.13: Systemdifferenzen zwischen HN76 und NN (alt) in Mecklenburg-Vorpommern in HUPFER ET AL. (2003)

Ort	Systemdifferenz HN-NN alt (=Höhe in NN – Höhe in HN)	Betrag, um den die Pegellatte am 01.11.1985 abgesenkt, bzw. der Messwert erhöht wurde
Wismar	9,8 cm	4,2 cm
Warnemünde	12,2 cm	1,8 cm
Althagen	12,0 cm	2,0 cm
Barth	11,8 cm	2,2 cm
Neuendorf	11,0 cm	3,0 cm
Stralsund	11,8 cm	2,2 cm
Sassnitz	11,0 cm	3,0 cm
Greifswald	12,0 cm	2,0 cm
Koserow	9,7 cm	4,3 cm
Ueckermünde	14,2 cm	-0,2 cm

## 6 Analyse der Vorfüllung

Eine Einführung und Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zur Vorfüllung der Ostsee wurden bereits in Abschnitt 4.3.2 gegeben. Im Forschungsvorhaben MUSTOK ist eine Analyse der Vorfüllungen mit dem Ziel durchgeführt worden, die Größenordnungen anhand aktueller Wasserstandsdaten zu verifizieren.

Für die Analyse der Vorfüllung eignet sich der Pegel Landsort – südlich von Stockholm (Abbildung 6.1) –, da er sich in etwa im Knotenbereich der am häufigsten auftretenden einknotigen Eigenschwingung befindet, so dass dort der jeweilige Füllungszustand der Ostsee und die eintretenden Volumenänderungen in den Wasserstandsschwankungen günstig widerspiegelt werden (HUPFER ET AL. 2003).

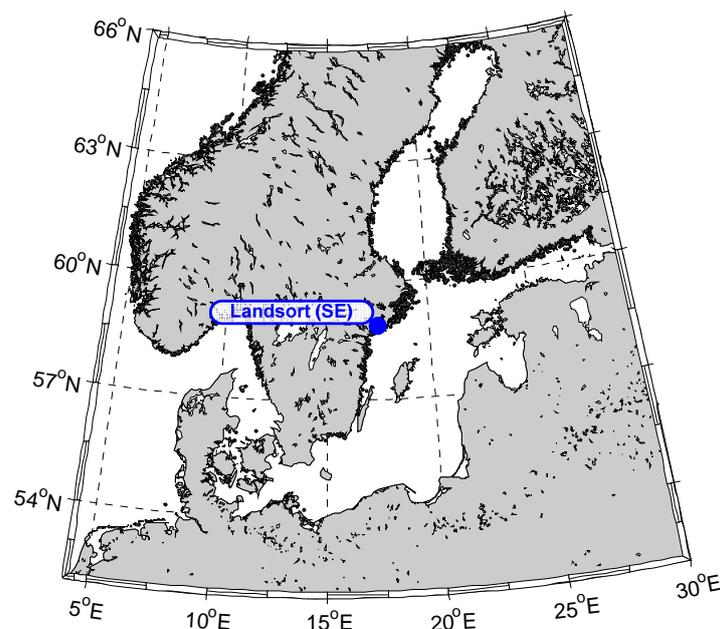


Abbildung 6.1: Lage des Pegels Landsort

Da keine einheitliche Definition des Begriffs Vorfällung existiert, musste diese zunächst im Projekt erfolgen. Nach umfangreicher Literaturrecherche, Abstimmungsgesprächen in der Projektgruppe und Sensitivitätsuntersuchungen wurde eine Vorfällung definiert als eine Wasserstandserhöhung um mindestens 15 cm ü. MW über mehr als 20 Tage am Pegel Landsort.

Die Zeitreihe des Pegels Landsort von 1886 bis 2006 (1-Stunden-Werte, Abbildung 6.2) wurde hinsichtlich dieser Definition analysiert, wobei zunächst ein Tiefpassfilter (gleitendes Mittel über 21 Tage) angewendet wurde (Abbildung 6.3). In der Zeitreihe von 1886 bis 2006 wurden 145 Vorfällungsereignisse identifiziert, wobei mittlere Wasserstandserhöhungen von 15 cm (per Definition) bis etwa 40 cm erreicht werden (Abbildung 6.4). Die Vorfällungsereignisse haben Dauern von 20 Tagen (per Definition) bis hin zu 119 Tagen. Aufgrund der zugrunde liegenden Zeitreihe über 121 Jahre tritt ein Vorfällungsereignis im Mittel 1,2-mal pro Jahr auf und erreicht als Mittelwert über alle Vorfällungsereignisse eine Höhe von 25 cm ü. MW. Eine durchgeführte Korrelation von Dauern und Wasserstandserhöhungen der Vorfällungsereignisse ergibt keine signifikante Korrelation (Korrelationskoeffizient = 23 %). Mit den vorliegenden Untersuchungen werden frühere Analysen im Wesentlichen bestätigt (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Untersuchungen von BORK UND MÜLLER-NAVARRA (2009) haben ergeben, dass die Vorfällung der Ostsee auf die Entstehung von extremen(!) Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste keinen signifikanten Einfluss hat. Eine gesonderte Berücksichtigung der Vorfällung in der extremwertstatistischen Analyse muss somit nicht erfolgen.

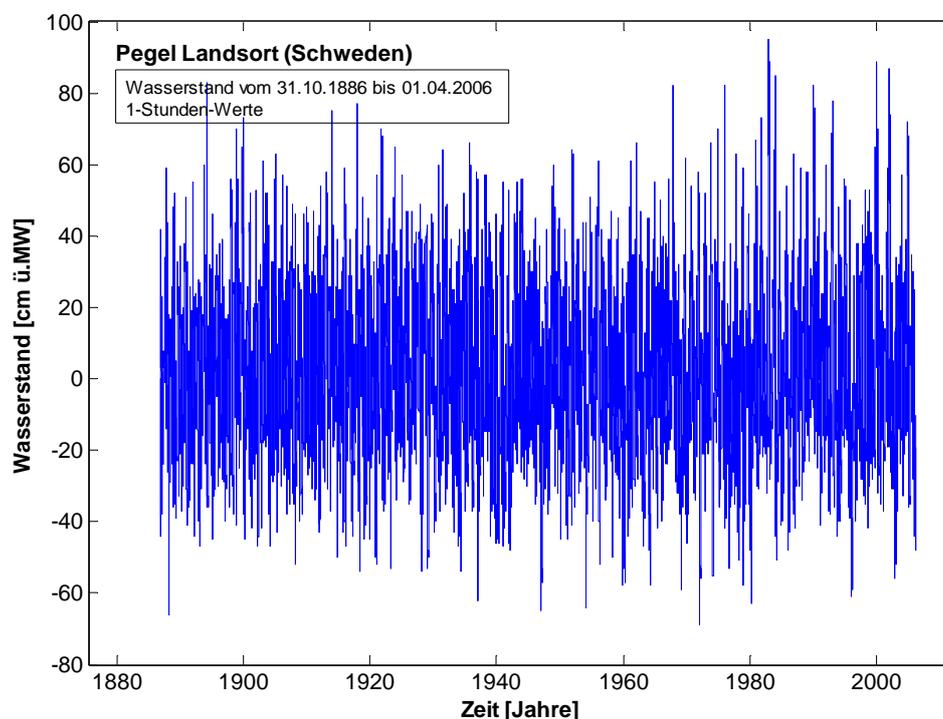


Abbildung 6.2: Zeitreihe des Pegels Landsort vom 31.10.1886 bis 01.04.2006, 1-Stunden-Werte

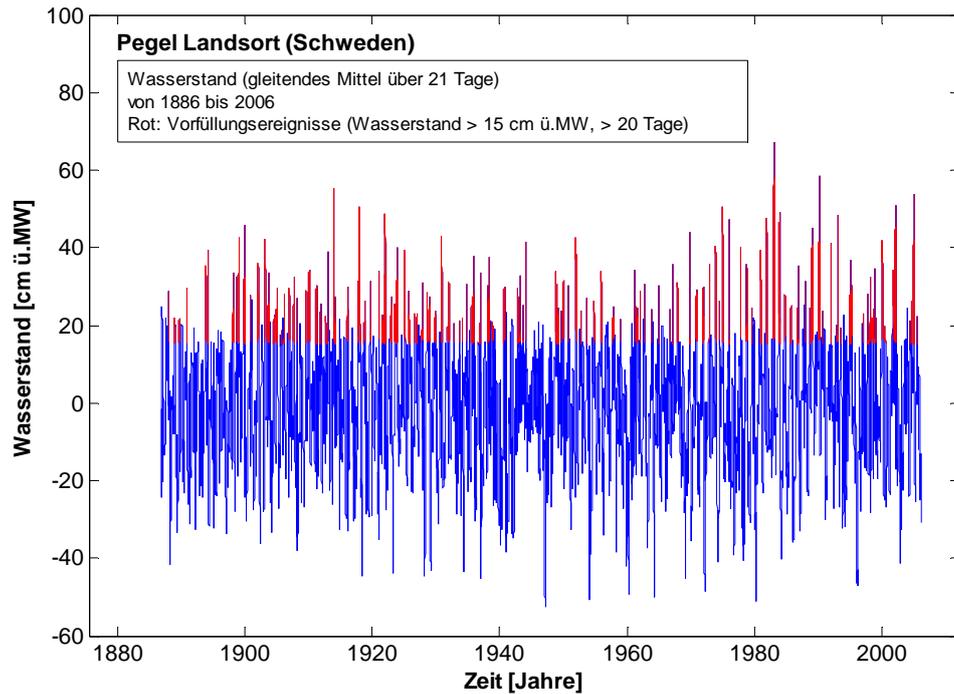


Abbildung 6.3: Analyse der Vorfüllungsereignisse am Pegel Landsort auf Basis der gefilterten Wasserstandszeitreihe; in rot sind die vorhandenen Vorfüllungsereignisse dargestellt, Definition Vorfüllungsereignis: Wasserstand > 15 cm ü. MW und Dauer > 20 Tage

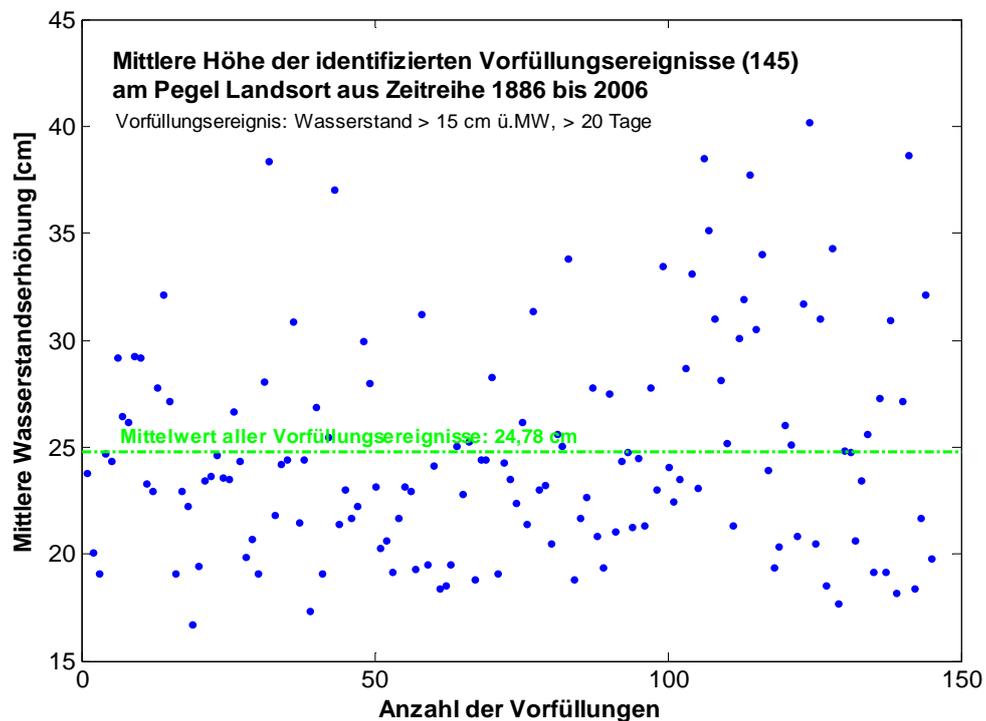


Abbildung 6.4: Mittlere Höhen der 145 identifizierten Vorfüllungsereignisse aus der gefilterten Wasserstandszeitreihe des Pegels Landsort von 1886 bis 2006

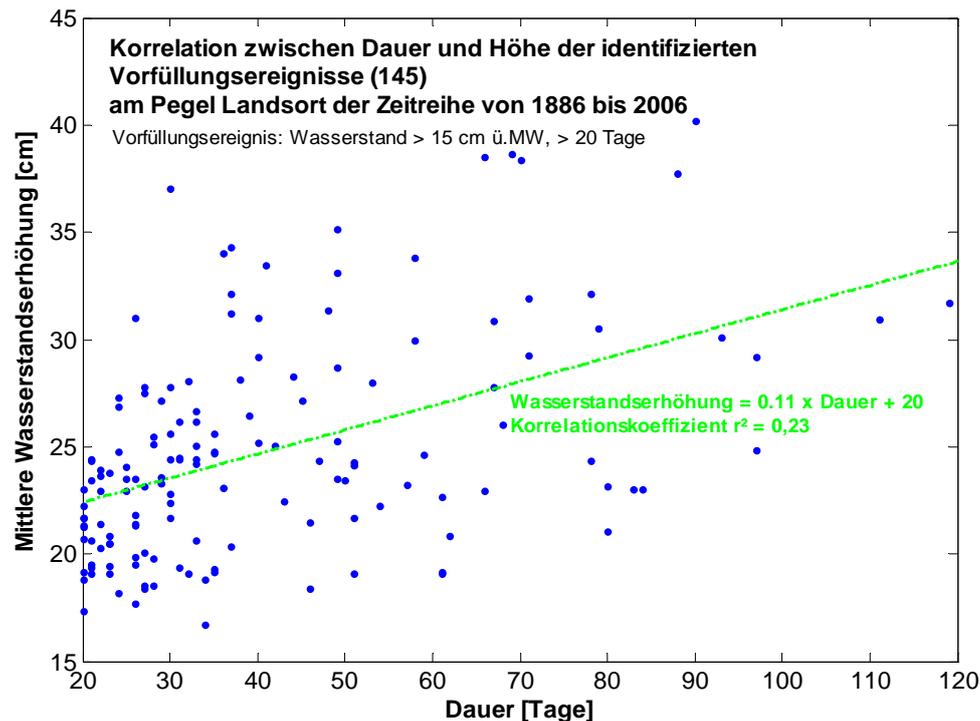


Abbildung 6.5: Korrelation zwischen Dauer und Höhe der 145 identifizierten Vorfüllungsereignisse aus der gefilterten Wasserstandszeitreihe des Pegels Landsort von 1886 bis 2006

## 7 Methodik der Extremwertstatistik

### 7.1 Allgemeines

Die Extremwertstatistik beschreibt nicht das komplette Verhalten einer Zufallsvariablen, sondern lediglich die Ausläufer (*engl.: tail*) der Verteilung, so dass nur Extremwerte (Maxima oder Minima) beschrieben werden (Abbildung 7.1). Im Folgenden wird die Beschreibung von Minima nicht weiter verfolgt, sondern ausschließlich auf Maxima Bezug genommen. Weitere Ausführungen zur Extremwertstatistik von Minima sind zum Beispiel zu finden in COLES (2001). Die Extremwerte werden entweder über ein Blockmodell oder ein Schwellenwertmodell aus der Menge der Zufallsvariablen gewonnen. Das in der Hydrologie gebräuchlichste Verfahren ist das Blockmodell, bei dem aus einer Menge von unabhängigen Zufallsvariablen die maximalen Werte eines Zeitabschnittes herausgefiltert werden (COLES 2001):

$$M_n = \max [X_1, \dots, X_n]$$

Gleichung 7.1

wobei  $[X_1, \dots, X_n]$   $n$  Zeitreihen mit regelmäßig aufgezeichneten Messwerten sein können. So kann  $X_i$  beispielsweise die Zeitreihe von stündlich gemessenen Wasserständen an einem Pegel über ein Jahr sein. Die über das Blockmodell gewonnene Zeitreihe  $M_n$  der Maxima wäre in dem genannten Beispiel somit die Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände an einem Pegel über  $n$  Jahre.

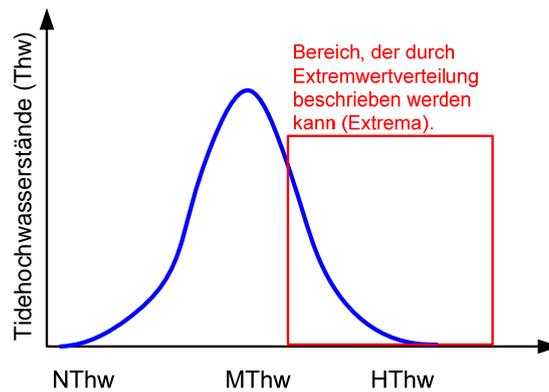


Abbildung 7.1: Zur Definition von Extremwertverteilungen (qualitativ).

Die Maxima einer Stichprobe sind immer im rechten auslaufenden Teil der Stichprobendichtefunktion zu finden. Auch wenn die zugrunde liegende Stichprobe nach dem Zentralen Grenzwertsatz einer Normalverteilung genügt, so lassen sich die Maxima  $M_n$  immer mit einer Extremwertverteilung beschreiben (FISHER UND TIPPETT 1928). Dies wird als *Hauptsatz der Extremwerttheorie* bezeichnet.

Da die Grundgesamtheit von  $M_n$  nicht bekannt ist und damit auch das grundlegende Systemverhalten nicht exakt beschrieben werden kann, muss dieses über die vorliegenden Stichproben abgeschätzt werden. Diese Vorgehensweise ist dann gerechtfertigt, wenn die Stichprobe des Umfangs  $n$  hinreichend groß ist, so dass angesetzt werden kann  $n \rightarrow \infty$ ; somit kann der Hauptsatz der Extremwerttheorie Anwendung finden.

Die Ausführungen machen deutlich, dass bei der Anwendung der Extremwerttheorie, immer ausgehend von einem unbekanntem Prozess, dieser über geeignete Daten und Methoden geschätzt werden soll. Eine Verifikation der Ergebnisse kann nur selten erfolgen, da der zugrunde liegende Prozess unbekannt ist und bleibt. Dennoch stellt die Extremwerttheorie ein für praktische Anwendungen unerlässliches Hilfsmittel dar, mit dem große und extreme Ereignisse hinsichtlich Größe und Eintrittswahrscheinlichkeit abgeschätzt werden können. Eine Alternative zur Extremwertstatistik ist bislang nicht entwickelt worden (COLES 2001).

## 7.2 Rangstatistik und empirische Verteilungsfunktionen

Die Grundlage der Extremwertstatistik bildet die Rangstatistik (auch: Ordnungsstatistik). Dabei werden die zu untersuchenden Daten  $x_i$  mit  $i=1 \dots n$  der Größe nach sortiert, so dass  $x_1$  der kleinste und  $x_n$  der größte Wert ist. Durch diesen Schritt geht der zeitliche Bezug der Daten verloren und es wird angenommen, dass die auszuwertenden Daten voneinander unabhängig sind und den gleichen Zeitabstand (*Aquidistanz*) aufweisen.

Ausgangssituation der Verfahren der empirischen Wahrscheinlichkeitsrechnung ist, dass bei vielen praktischen Anwendungen eine beliebige Messreihe vorliegt und die zugehörige Verteilungsfunktion nicht bekannt ist. Aus den vorliegenden Messwerten soll dann auf den zugrunde liegenden stochastischen Prozess geschlossen werden.

Aus der geordneten Stichprobe wird die empirische Verteilungsfunktion  $F(x)$  bestimmt, die eine Treppenfunktion darstellt. Diese ermittelte Verteilungsfunktion kann in einem sogenannten Wahrscheinlichkeitsnetz (auch: Wahrscheinlichkeitspapier) aufgetragen werden, woran anschließend eine Ausgleichsfunktion angepasst werden kann. Der Wert der empirischen Verteilungsfunktion wird auch als *plotting position (plp)* bezeichnet. Diese Verfahren der graphischen Ermittlung von Verteilungsfunktionen sind unter anderem ausführlich beschrieben in GUMBEL (1958).

Da in der hydrologischen Praxis oft nur eine Stichprobe zur Analyse zur Verfügung steht, ist auch jeder einzelne Wert  $F(x_i)$  der empirischen Verteilungsfunktion nur ein Schätzer für den Wert der Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit. Würden zum Beispiel 5 Stichproben vorliegen, so ergäben sich in der Regel auch 5 verschiedene Werte der empirischen Verteilungsfunktion für jeden einzelnen Messwert.

Sind die Stichproben der Größe nach sortiert mit

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n \tag{Gleichung 7.2}$$

so dass  $x_n$  das größte Element in der Stichprobe ist, dann ergibt sich die Unterschreitungswahrscheinlichkeit für das  $i$ -te Element einer Stichprobe zu

$$P_U = F_X(x_i) \tag{Gleichung 7.3}$$

Liegen verschiedene Stichproben vor, so ergibt sich der Erwartungswert der Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $P_U$  für das  $i$ -te Element aus (STEDINGER ET AL. 1993)

$$E[P_U] = \frac{i}{n+1} = plp \tag{Gleichung 7.4}$$

Diese Formel ist auch bekannt als WEIBULL-Formel. Darüber hinaus wurden für verschiedene Verteilungsfunktionen und Wahrscheinlichkeitsnetze (nicht logarithmiert, logarithmiert, doppelt-logarithmiert) verschiedene optimierte Formeln für *plotting positions* entwickelt, die allgemein die Form haben

$$plp = \frac{i - a}{n + b} \tag{Gleichung 7.5}$$

und sich nur in den Parametern  $a$  und  $b$  unterscheiden. In Tabelle 7.1 sind die bekanntesten Formeln mit Namen und Zielsetzung angegeben.

Tabelle 7.1: Verschiedene Formeln für *plotting positions* (nach STEDINGER ET AL. 1993).

Name	a	b	Zielsetzung
Weibull	0	1	Biasfreie Schätzung für alle Verteilungen
Cunnane	0,40	0,20	Biasfreie Schätzung der Quantile
Gringorten	0,44	0,12	Optimiert für Gumbel-Verteilung
Hazen	0,50	0	Häufig verwendete Schätzung

Neben der empirischen Ermittlung von *plotting positions* können diese auch über Monte-Carlo-Simulationen abgeleitet werden. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass über eine hohe Anzahl von erzeugten Realisationen der Erwartungswert der *plotting positions* über einfache Mittelwertbildung berechnet werden kann. GOEL UND DE (1993) haben über Monte-Carlo-Simulationen eine biasfreie *plotting position*-Formel für die Allgemeine Extremwertverteilung entwickelt, die den Krümmungsparameter  $k$  mit berücksichtigt

$$plp_{\text{Goel/De}} = \frac{i - 0,02 \cdot k - 0,32}{n - 0,04 \cdot k + 0,36} \quad \text{Gleichung 7.6}$$

In JENSEN ET AL. (2006) wurde gezeigt, dass für die Verwendung der Allgemeinen Extremwertverteilung (GEV) und eines doppelt-logarithmierten Maßstabes die über Monte-Carlo-Simulationen ermittelten *plotting positions* nahezu identisch sind mit den nach der Formel von GRINGORTEN ermittelten *plotting positions*. In der vorliegenden Arbeit wurde daher zur Vereinfachung der Berechnungen (Einsparung von Rechenzeit am PC) die Formel nach GRINGORTEN verwendet

$$plp_{\text{Gringorten}} = \frac{i - 0,44}{n + 0,12} \quad \text{Gleichung 7.7}$$

### 7.3 Allgemeine Extremwertverteilung

Die hier durchgeführte extremwertstatistische Analyse basiert auf der Allgemeinen Extremwertverteilung (*engl.: Generalized Extreme Value distribution, GEV*), die in den letzten Jahren insbesondere im Bereich der hydrologischen Statistik breite Anwendung findet, da sie verschiedene Klassen von hydrologischen Verteilungsfunktionen in einer Gleichung vereint. Der Vorteil besteht somit darin, im Vorfeld keine Festlegung auf eine bestimmte Klasse der Extremwertverteilungen vornehmen zu müssen. Die GEV basiert auf den Arbeiten von JENKINSON (1955). In den folgenden Jahren wurde die GEV verbreitet angewendet und Verfahren zur Parameterschätzung erarbeitet. Eine ausführliche Zusammenstellung der Arbeiten zur GEV ist in KOTZ UND NADARAJAH (2000) und COLES (2001) zu finden.

Die GEV ist definiert zu

$$GEV(x) = \left. \begin{array}{l} \exp \left[ - \left( 1 + k \cdot \frac{x-a}{b} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad \text{für } 1 + k(x-a)/b > 0 \\ \text{mit } -\infty < a < \infty, b > 0, -\infty < k < \infty \\ \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x-a}{b} \right) \right] \quad \text{für } -\infty < x < \infty, k = 0 \end{array} \right\} \quad \text{Gleichung 7.8}$$

Die drei Parameter der Allgemeinen Extremwertverteilung sind der Lageparameter  $a$ , der Streuungsparameter  $b$  und der Krümmungsparameter  $k$ . Der Krümmungsparameter  $k$  beschreibt maßgeblich die Form des rechten Endes der Verteilungsfunktion. Für den Fall  $k > 0$  besitzt die Funktion keinen oberen Grenzwert und entspricht damit dem Typ II der Klasse der Gumbel'schen Extremwertverteilungen. Das rechte Ende der Funktion hat eine auslaufende polynomische Form. Das linke Ende der Verteilungsfunktion ist begrenzt durch  $a - (b/k)$ . Für  $k < 0$  existiert eine obere Grenze der Funktion bei  $a - (b/k)$  und definiert somit den Typ III der Gumbel'schen Extremwertverteilungen. Der Spezialfall  $k = 0$  führt auf die bekannte Gumbel'sche Extremwertverteilung des Typ I, welche häufig auch nur als Gumbelverteilung bezeichnet wird und in einem doppelt-logarithmierten Wahrscheinlichkeitsplot eine Gerade ergibt. Es existiert ebenfalls kein oberer Grenzwert. Das rechte Ende der Verteilungsfunktion besitzt eine exponentielle Form (KOTZ UND NADARAJAH 2000).

Die GEV ist formelmäßig in der Literatur auch mit anderen Vorzeichen angegeben, so dass neben der in dieser Arbeit verwendeten Darstellung

$$\text{GEV}(x) = \exp \left[ - \left( 1 + k \cdot \frac{x - a}{b} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad \text{Gleichung 7.9}$$

auch die folgende Form der GEV zu finden ist:

$$\text{GEV}(x) = \exp \left[ - \left( 1 - k \cdot \frac{x - a}{b} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad \text{Gleichung 7.10}$$

Mit der Verwendung von Gleichung 7.10 kehren sich die Aussagen zum Krümmungsparameter  $k$  vorzeichenmäßig um. In Abbildung 7.2 sind die Dichtefunktionen der GEV beispielhaft für konstante Werte von  $a$  und  $b$  und für verschiedene Werte der Krümmung  $k$  dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Krümmung insbesondere das auslaufende Ende der Dichtefunktion beeinflusst. In Abbildung 7.3 sind in Analogie die zugehörigen Verteilungsfunktionen dargestellt. Auf der doppelt-logarithmierten Abszisse ergibt die GEV mit  $k = 0$  (Typ I) eine Gerade, wohingegen Werte für  $k \neq 0$  zu Krümmungen der Verteilungsfunktion führen. Nach mathematischer Definition wird eine Funktion als konvex bezeichnet, wenn die Funktionswerte  $\text{GEV}(x)$  zwischen zwei Punkten  $x_1$  und  $x_2$  unterhalb der Verbindungsgeraden zwischen diesen zwei Punkten liegen. Demnach ist die GEV vom Typ II als *konkav* und Typ III als *konvex* zu bezeichnen.

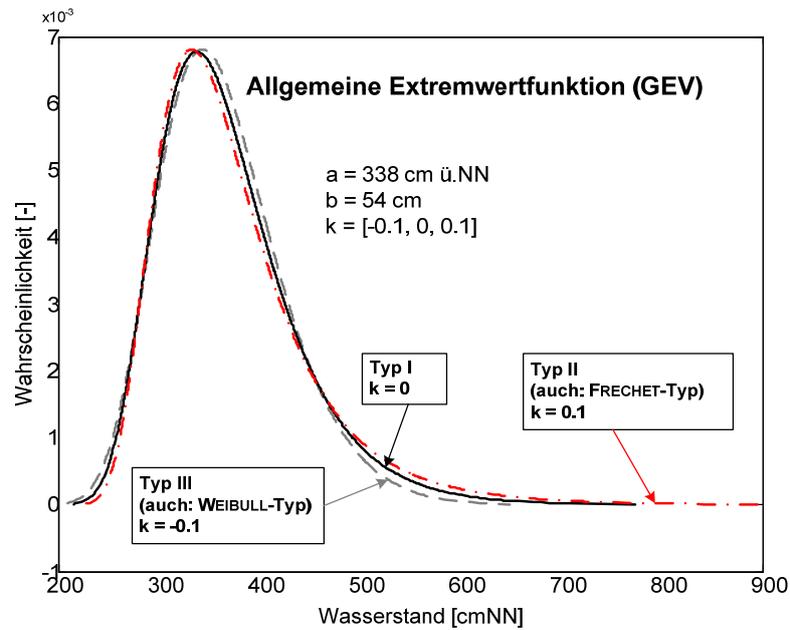


Abbildung 7.2: Darstellung der Dichtefunktionen der GEV für unterschiedliche Werte der Krümmung k.

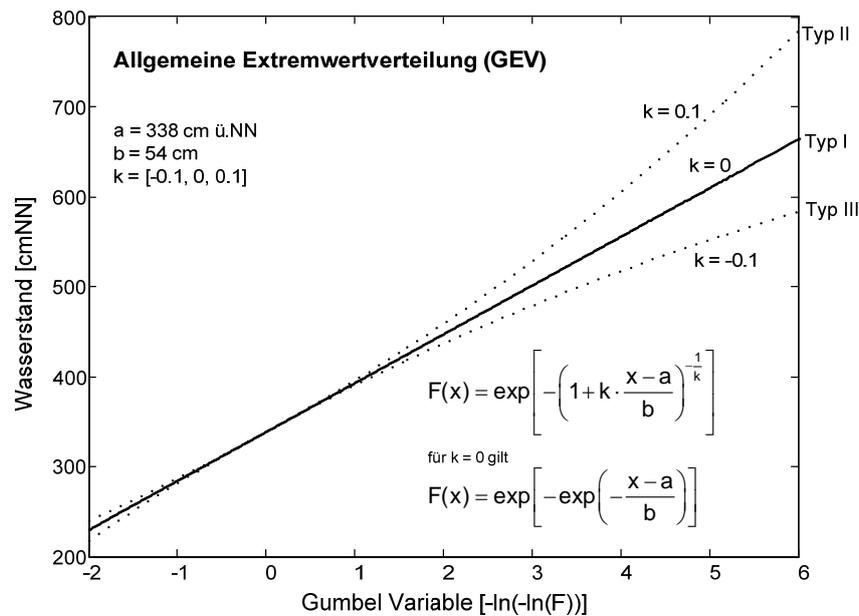


Abbildung 7.3: Darstellung der Verteilungsfunktionen der GEV für unterschiedliche Werte der Krümmung k.

Anwendungen der GEV finden sich zum Beispiel bei DE HAAN (1990), COLES UND TAWN (1990) und COLES (2001), die sich eingehend mit der Analyse von extremen Wasserständen und extremem Seegang an der Küste beschäftigt haben. Eine Anwendung der GEV auf Sturmflutwasserstände an der Deutschen Nordseeküste mit der Berücksichtigung von physikalischen Grenzzuständen ist bei JENSEN ET AL. (2006) zu finden.

## 7.4 Parameterschätzung der GEV

### 7.4.1 Allgemeines

Eine zentrale Aufgabe innerhalb der Extremwertanalyse ist die Bestimmung der Parameter der Verteilungsfunktion. Im Fall der GEV sind dies der Lageparameter  $a$ , der Streuungsparameter  $b$  und der Krümmungsparameter  $k$ . Da die Parameter nur aus einer oder mehreren Stichproben geschätzt und nicht aus der Grundgesamtheit abgeleitet werden können, spricht man von einer Parameterschätzung. Für die Parameterschätzung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, die von grafischen Verfahren bis hin zu numerisch komplexen Lösungsalgorithmen reichen. Die bekanntesten und meistgebräuchlichen numerischen Methoden sind die Momentenmethode (MM), die Methode der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente (*engl.: probability weighted moments*, PWM), die Methode der L-Momente (LM) und die Maximum-Likelihood-Schätzung (*engl.: maximum-likelihood-estimation*, MLE). Die GEV-Auswertungen in der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich mit den L-Momenten vorgenommen, die eine Weiterentwicklung der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente darstellen. STEDINGER ET AL. (1993) führen aus, dass bei der extremwertstatistischen Analyse von Hochwasserereignissen diese Methode die besten Ergebnisse liefert. Darüber hinaus haben die L-Momente insbesondere Vorteile bei der Schätzung der Parameter aus kleinen Stichprobenumfängen (vgl. KATZ ET AL. 2002).

### 7.4.2 L-Momente

Der Krümmungsparameter  $k$  der Allgemeinen Extremwertverteilung lässt sich nach STEDINGER ET AL. (1993) über folgende Gleichungen ermitteln

$$k = 7,8590 \cdot c + 2,9554 \cdot c^2$$

mit

$$c = \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)}$$

Gleichung 7.11

Der Lageparameter  $a$  und der Streuungsparameter  $b$  ergeben sich aus

$$a = \lambda_1 + \frac{b \cdot [\Gamma(1+k) - 1]}{k}$$

$$b = \frac{k \cdot \lambda_2}{\Gamma(1-k)(1 - 2^{-k})}$$

Gleichung 7.12

mit

$\Gamma(\cdot)$  Gammafunktion

Zur Lösung der genannten Gleichungen werden die L-Momente  $\lambda_1$  bis  $\lambda_3$  benötigt. HOSKING (1990) in HOSKING UND WALLIS (1997) entwickelte die Theorie der L-Momente auf Basis der Rangstatistik und definierte die L-Momente wie folgt:

$$\lambda_1 = E[X_{1:1}]$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} E[X_{2:2} - X_{1:2}]$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{3} E[X_{3:3} - 2X_{2:3} + X_{1:3}]$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{4} E[X_{4:4} - 3X_{3:4} + 3X_{2:4} - X_{1:4}]$$

Gleichung 7.13

Dabei ist  $E$  der Erwartungswert und  $X_{j:m}$  der  $j$ -kleinste Werte in einer Stichprobe vom Umfang  $m$ . Nach WANG (1996) können die L-Momente wie folgt interpretiert werden: Wenn in einer Stichprobe nur ein Wert vorhanden ist, dann gibt dieser Wert einen Hinweis auf den absoluten Betrag der Stichprobe. Liegen hingegen zwei Werte in einer Stichprobe vor, so gibt die Differenz dieser Werte einen Hinweis auf die Streuung. Bei drei vorhandenen Werten kann eine Aussage über die Asymmetrie der Stichprobe gemacht werden. Schließlich kann über vier Werte eine Abschätzung des Gesamtverhaltens vorgenommen werden. Werden viele Stichproben in dieser Art analysiert, so ist der Erwartungswert von  $\lambda_1$  ein Maß für die Lage und der Erwartungswert von  $\lambda_2$  ein Maß für die Streuung der Grundgesamtheit. Ein Maß für die Schiefe und Kurtosis kann abgeleitet werden über die Verhältnisse  $\tau_3$  und  $\tau_4$

$$\tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_4}$$

$$\tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2}$$

Gleichung 7.14

HOSKING (1990) in HOSKING UND WALLIS (1997) zeigte, dass die L-Momente mit folgender Beziehung über die wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente (*engl.: probability weighted moments PWM*) abgeleitet werden können

$$\lambda_1 = \beta_0$$

$$\lambda_2 = 2\beta_2 - \beta_0$$

$$\lambda_3 = 6\beta_3 - 6\beta_1 + \beta_0$$

$$\lambda_4 = 20\beta_4 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0$$

Gleichung 7.15

Nach WANG (1996) und SCHUMANN (2007) ergeben sich die wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente einer Zufallsvariable  $X$  mit der Verteilungsfunktion  $F(x)=P(X<x)$  wie folgt

$$\beta_r = \int_0^1 x(F)^r dF$$

Gleichung 7.16

Eine biasfreie Schätzung der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente für eine der Größe nach geordneten Stichprobe vom Umfang  $n$  kann nach LANDWEHR ET AL. (1979) berechnet werden aus

$$b_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)(i-2)\dots(i-r)}{(n-1)(n-2)\dots(n-r)} x_i$$

mit

Gleichung 7.17

$$r = 1 \dots (n-1)$$

$$(x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_n)$$

Eine Schätzung der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente  $b_0$  bis  $b_3$  kann somit über die Gleichungen erfolgen

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$$

$$b_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)}{(n-1)} \cdot x_i$$

Gleichung 7.18

$$b_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(i-1) \cdot (i-2)}{(n-1) \cdot (n-2)} \cdot x_i$$

$$b_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(i-1) \cdot (i-2) \cdot (i-3)}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3)} \cdot x_i$$

### 7.4.3 Berücksichtigung von modellierten Extremwasserständen

#### 7.4.3.1 Allgemeines

Bei extremwertstatistischen Auswertungen von Wasserstandszeitreihen kann oftmals eine Tatsache vorausgesetzt werden: Wasserstände können nicht bis ins Unendliche steigen. Insofern bilden Verteilungsfunktionen, die sich einem oberen Grenzwert asymptotisch annähern eine gute Grundlage. Wenngleich die Tatsache der Existenz eines Grenzwertes bekannt ist, ist es in vielen Fällen nicht möglich eine belastbare Schätzung dieses Grenzwertes vorzunehmen. Da die Festlegung eines Grenzwertes direkte Auswirkungen auf die Ergebnisse der Extremwertstatistik hat, kann eine leichtfertige Annahme eines Grenzwertes zu starken Verfälschungen der Ergebnisse führen. Zuverlässige und belastbare Aussagen zu Grenzzuständen können teilweise über prozessorientierte numerische Modelle abgeleitet werden. Im Binnenbereich erfolgt dies häufig über die Annahme eines „vermutlich größten Gebietsniederschlages“ (*engl.: probable maximum precipitation, PMP*), der über ein Niederschlags-Abflussmodell in einen Abfluss (*engl.: probable maximum flood, PMF*) transformiert werden kann. Zur Ermittlung des maximierten Gebietsniederschlages werden diejenigen Werte der einzelnen meteorologischen Parameter gesucht, deren Kombination zu einem physikalisch oberen Grenzwert des Niederschlages führt (DVWK 1983).

Im Bereich des Küsteningenieurwesens haben JENSEN ET AL. (2006) mithilfe von umfangreichen meteorologischen und hydrodynamischen Modellierungen extreme Belastungsszenarien für Sturmflutwasserstände an der Deutschen Nordseeküste ermittelt. Zur Simulation der sturmflutrelevanten Wetterlagen und der sich anschließenden Wasserstandsmodellierung wurden operationelle Vorhersagemodelle verwendet, die physikalisch konsistente Ergebnisse erzeugen.

Mit den durchgeführten Analysen wurden extreme Wasserstände ermittelt, die bis zu 1,40 m über den bisher höchsten bekannten Sturmflutwasserständen (Stand: 2006) liegen. Die Modellergebnisse konnten zwar nicht mit hinreichender Genauigkeit als absolute Obergrenzen von möglichen Sturmflutwasserständen definiert werden, jedoch wurden auf Grundlage der Gesamtheit der durchgeführten Simulationsstunden Wahrscheinlichkeiten bestimmt, die diesen Werten zugeordnet werden konnten. Es wurden mittlere Wiederkehrintervalle für die modellierten Extremwerte im Bereich von 100.000 Jahren ermittelt. Mit diesen Informationen konnte die Extrapolation der verwendeten GEV-Verteilung auf Grundlage physikalischer Annahmen verbessert werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden umfassende hydrodynamische Simulationen durchgeführt, um extreme Wasserstände an der Deutschen Ostseeküste ableiten zu können (BORK UND MÜLLER-NAVARRA 2009).

#### 7.4.3.2 Parameter bei Vorgabe eines modellierten Extremwertes mit Eintrittswahrscheinlichkeit

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens modellierten extremen Wasserstände stellen keine Obergrenzen im mathematischen Sinn mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $P_{\bar{U}} = 0$  dar, da diese auf realen Wetterlagen basieren und nicht auszuschließen ist, dass diese Werte übertroffen werden können. Diesen modellierten Werten können also nicht a priori Eintrittswahrscheinlichkeiten von  $P_{\bar{U}} = 0$  zugeordnet werden. Den Modellwerten  $\text{Max}_{\text{Modell}}$  wird aufgrund der Anzahl der im Projekt modellierten Vorhersagestunden eine Eintrittswahrscheinlichkeit  $P_{\text{MaxModell}}$  zugewiesen (vgl. Abschnitt 7.6). Die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $k$  für die Allgemeine Extremwertverteilung werden für diesen Fall zunächst wie in Abschnitt 7.4.2 beschrieben aus den L-Momenten geschätzt, wobei für den Krümmungsparameter  $k$  eine erneute Schätzung mit der Gleichung erfolgt:

$$P_{\text{MaxModell}} = \exp \left[ - \left( 1 + k_{\text{neu}} \cdot \frac{\text{Max}_{\text{Modell}} - a}{b} \right)^{\frac{1}{k_{\text{neu}}}} \right] \quad \text{Gleichung 7.19}$$

Um eine optimierte Anpassung der Verteilungsfunktion an die Daten zu erreichen, wird in der Analyse ein zusätzlicher Wichtungsfaktor  $w$  eingeführt, mit dem eine Wichtung der Krümmungsparameter  $k$  und  $k_{\text{neu}}$  auf Grundlage der Anpassungsgüte vorgenommen werden kann.

### 7.5 Einbeziehung historische Extremwerte

Als historische Ereignisse werden Ereignisse definiert, die nicht in den Zeitraum der systematischen Aufzeichnungen fallen. Informationen zu solchen historischen Ereignissen befinden sich zum Beispiel in lokalen Zeitschriften und Handaufzeichnungen. Der Grund der Erfassung dieser Ereignisse steht meist in einem Zusammenhang mit größeren Schäden an Gebäuden, Verlusten von Menschenleben oder Landverlusten.

Es ist zu beachten, dass die Genauigkeit der Höhenangaben historischer Ereignisse in der Regel deutlich geringer ist als die Genauigkeit aus systematischen Pegelaufzeichnungen. Zudem bedingen weitgehende Unkenntnis über Homogenität und Stationarität der Daten weitere Unsicherheiten. Die Anforderung der Homogenität kann zum Beispiel dadurch verletzt sein, dass die Küstenform anders aussah und sich heutige Wasserstände an gleicher Stelle deutlich anders ausprägen. Stationarität kann ebenfalls nicht vorausgesetzt werden, da über langfristige Trends, die zur Korrektur der Daten notwendig sind, bei weit zurückliegenden Daten oftmals keine Angaben vorhanden sind. Bevor historische Daten einer statistischen Analyse zugeführt werden, müssen diese entsprechend aufbereitet werden. Hierbei müssen Anforderungen, die an die Daten gestellt werden, überprüft werden. Die Prüfung sollte die Unabhängigkeit, die Homogenität, die Repräsentanz sowie die Freiheit von sogenannten Ausreißern mit einbeziehen (DWA 2008). Die zur Verfügung stehenden Informationsquellen müssen dahingehend sorgfältig analysiert werden, um eine entsprechende Korrektur der Daten vornehmen zu können. Es bleibt jedoch in der Praxis häufig die Tatsache bestehen, dass nicht alle Anforderungen, die an die Daten gestellt werden, hinreichend genau erfüllt werden können.

Trotzdem stellen historische Ereignisse eine wertvolle Zusatzinformation dar, die die statistische Analyse verbessern kann. DALRYMPLE (1960) in SCHUMANN (2007) stellte fest: *„...historische Hochwasser sind vermutlich die effektivsten Daten, um Hochwasserhäufigkeiten zu ermitteln und, falls diese Daten zuverlässig sind, sollte ihnen das größte Gewicht bei der graphischen Ermittlung der Hochwasserverteilungen gegeben werden.“* Einige methodische Ansätze zur Einbeziehung historischer Daten bei der Ermittlung von Bemessungswerten sind in DWA (2008) dargestellt, wobei auch der in der vorliegenden Arbeit verwendete Ansatz nach SCHUMANN (2007) erwähnt wird.

Die Zeitreihe der historischen Aufzeichnungen ist in der Regel eine partielle Zeitreihe, da meist für einen langen Zeitraum nur einige extreme Ereignisse überliefert wurden. Es stehen also deutlich weniger Werte zur Verfügung als zugrunde liegende Jahre. Wird die Zeitreihe der systematischen Pegelaufzeichnungen um diese Reihe ergänzt, so resultiert in der Summe auch eine partielle Zeitreihe. WANG (1990) veröffentlichte einen Ansatz zur Schätzung der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente für die Allgemeine Extremwertfunktion auf Basis einer partiellen Zeitreihe.

In der Regel basiert eine partielle Zeitreihe in der hydrologischen Statistik auf einem Schwellenwertverfahren (*engl.: peak over threshold*). Dabei wird das Datenkollektiv in einen Bereich oberhalb des Schwellenwertes  $x_0$  und einen Bereich unterhalb von  $x_0$  zerlegt. Der Datensatz oberhalb von  $x_0$  hat somit einen unteren Grenzwert bei  $x_0$ , während der Datensatz unterhalb von  $x_0$  einen oberen Grenzwert bei  $x_0$  vorweist.

Die wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente einer partiellen Zeitreihe  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$  mit einem unteren Grenzwert  $x_0$  ergeben sich aus

$$\beta'_r = \int_{F_0}^1 x(F) F^r dF \quad \text{Gleichung 7.20}$$

Dabei gilt als erwartungstreue Schätzung

$$b'_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)(i-2)\dots(i-r)}{(n-1)(n-2)\dots(n-r)} x_i$$

Gleichung 7.21

$$\text{mit } x_i = \begin{cases} 0 & x_i \leq x_0 \\ x_i & x_i > x_0 \end{cases}$$

Die wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente für den Datensatz mit einer oberen Grenze  $x_0$  ergeben sich aus

$$\beta_r'' = \int_0^{F_0} x(F) F^r dF$$

Gleichung 7.22

Hier berechnet sich der erwartungstreue Schätzer aus:

$$b_r'' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)(i-2)\dots(i-r)}{(n-1)(n-2)\dots(n-r)} x_i$$

Gleichung 7.23

$$\text{mit } x_i = \begin{cases} x_i & x_i \leq x_0 \\ 0 & x_i > x_0 \end{cases}$$

Dieser Ansatz zur Ermittlung von partiellen wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten kann verwendet werden, um historische Informationen in der Extremwertstatistik zu berücksichtigen (WANG 1990b, SCHUMANN 2007).

In Abbildung 7.4 ist die prinzipielle Methodik zur Erstellung der Datenkollektive aus systematischen und historischen Daten anhand eines Beispiels illustriert. Der Zeitraum  $s$  der systematischen Pegelaufzeichnungen wird um historische Informationen aus dem Zeitraum  $h$  erweitert. Der betrachtete Gesamtzeitraum ist damit  $n=h+s$ . Durch die Festlegung eines Grenzwertes  $x_0$  ergibt sich ein Datensatz oberhalb dieses Grenzwertes, der aus einer Anzahl von  $e'$  Überschreitungen des Grenzwertes im historischen Zeitraum  $h$  und einer Anzahl  $e$  Überschreitungen im Zeitraum der systematischen Pegelaufzeichnungen  $s$  besteht. Der Datensatz oberhalb des Grenzwertes hat somit insgesamt  $g=e'+e$  Elemente (SCHUMANN 2007).

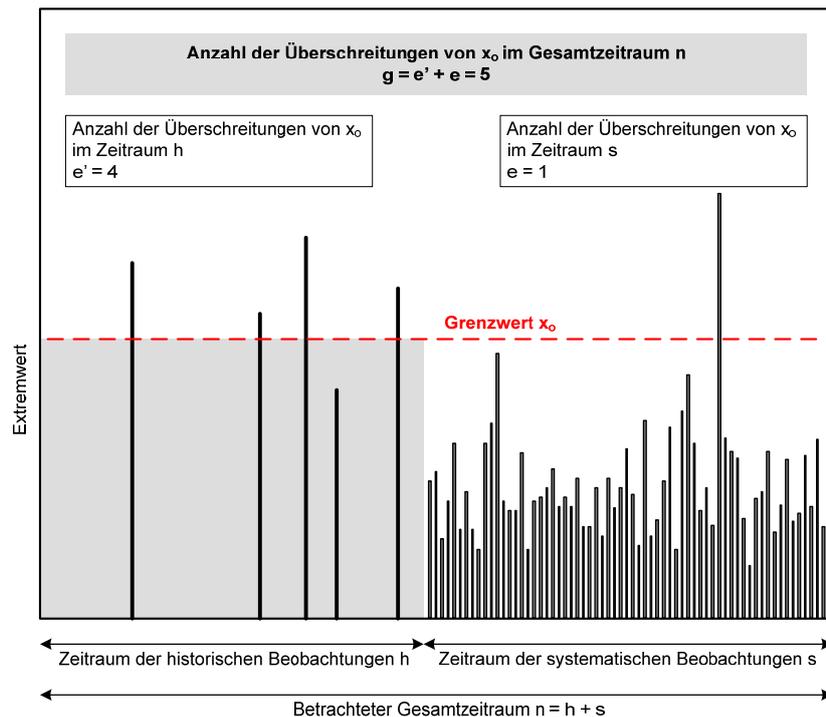


Abbildung 7.4: Beispiel einer Informationserweiterung einer systematischen Pegelzeitreihenaufzeichnung durch historische Werte (verändert, nach ENGLAND 2003 in SCHUMANN 2007).

Der Datensatz  $x^h$  oberhalb des Grenzwertes  $x_0$  wird der Größe nach sortiert und enthält dann die  $g$  Elemente:

$$x_{s-e+1}^h \leq x_{s-e+2}^h \leq \dots \leq x_{s-e}^h, \tag{Gleichung 7.24}$$

Dieser Datensatz kann Werte aus der systematischen Zeitreihenaufzeichnung enthalten, wenn sie über dem Grenzwert  $x_0$  liegen und somit als historische Ereignisse gewertet werden. In der Zeitreihe der systematischen Aufzeichnungen  $x_i$  werden diese Ereignisse durch Nullwerte ersetzt.

Die wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente  $\beta_r$  werden über eine Addition der partiellen wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente ermittelt:

$$\beta_r = \int_0^{F_0} x(F)F^r dF + \int_{F_0}^1 x(F)F^r dF = \beta_r'' + \beta_r' \tag{Gleichung 7.25}$$

Für  $\beta_r$  werden auch hier die erwartungstreuen Schätzer  $b_r$  verwendet, womit sich die partiellen wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente mit Einbeziehung der historischen Daten ergeben zu

$$b_r' = \frac{1}{n} \sum_{i=s-e+1}^{s+e'} \frac{(i-1)(i-2)\dots(i-r)}{(n-1)(n-2)\dots(n-r)} x_i^h \tag{Gleichung 7.26}$$

und

$$b_r'' = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \frac{(i-1)(i-2)\dots(i-r)}{(s-1)(s-2)\dots(s-r)} x_i$$

Gleichung 7.27

$$\text{mit } x_i = \begin{cases} x_i & x_i \leq x_0 \\ 0 & x_i > x_0 \end{cases}$$

Eine sich anschließende Addition führt zu

$$b_r = b_r' + b_r''$$

Gleichung 7.28

Die Bestimmung der L-Momente für die Allgemeine Extremwertverteilung erfolgt analog nach Abschnitt 7.4.2 über die von HOSKING (1990) in HOSKING UND WALLIS (1997) abgeleitete indirekte Methode über die wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente.

Als empirische Wahrscheinlichkeiten (*engl.: plotting positionen*) können die Formeln nach HIRSCH (1987), STEDINGER (1987) und SALAS ET AL. (1994) (alle in BAYLISS UND REED 2001) verwendet werden.

Die empirischen Wahrscheinlichkeiten für den Datensatz oberhalb des Grenzwertes  $x_0$  ergeben sich danach zu

$$p_i = \frac{i - 0,44}{g + 1 - 2 \cdot 0,44} \cdot \frac{g}{n} \quad \text{mit } i = 1, \dots, g$$

Gleichung 7.29

Die empirischen Wahrscheinlichkeiten für den Datensatz unterhalb des Grenzwertes  $x_0$  lassen sich ermitteln mit

$$p_i = \frac{g}{n} + \frac{n-g}{n} \cdot \frac{i-g-0,44}{s-e+1-2 \cdot 0,44} \quad \text{mit } i = g+1, \dots, g+s+e$$

Gleichung 7.30

## 7.6 Integrierte Extremwertstatistik

Die Zusammenführung von regelmäßigen Pegelaufzeichnungen, historischen Sturmfluten und modellierten Extremwasserständen in die Extremwertstatistik wird im Folgenden als *integrierte Extremwertstatistik* bezeichnet.

## 8 Datenauswertungen

### 8.1 Modellerte Extremereignisse

Innerhalb des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden extreme Sturmflutereignisse auf Grundlage theoretisch möglicher Sturmvetterlagen simuliert (SCHMITZ 2007, BORK UND MÜLLER-NAVARRA 2009). Der für den jeweiligen Pegel höchste modellierte Wert wird in die statistische Extremwertanalyse mit einbezogen (Abbildung 8.1), wobei diesem Wert eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet wird, die sich aus der Gesamtzahl der modellierten Vorhersagestunden ergibt. In den meteorologischen Analysen beträgt die Summe der modellierten Vorhersagestunden 11,8 Mio. (7,5 Mio + 4,3 Mio.) Stunden (SCHMITZ 2007); dies entspricht 1347 Jahren. Damit ist der jeweils höchste modellierte Wasserstand an einem Pegel der Höchstwert aus 1347 Jahren und hat somit eine empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit von  $P_U = 1 - 1/1347 = 0,999258/a$ .

Die aus den EPS-Wetterlagen (EPS: Ensemble Prediction System des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage, EZMW) modellierten extremsten Wasserstände liegen teilweise unter den auf das Jahr 2006 beschickten Wasserständen von 1872 (Abbildung 8.1). Dieser Sachverhalt wurde im Vorfeld der Untersuchungen nicht erwartet. Offenbar war bei der Sturmflut 1872 eine derart ungünstig wirkende Kombination von sturmflutrelevanten Faktoren gegeben, die sich in keiner der durchgeführten EPS-Simulationen widerspiegelt. Eine eindeutige Klärung und Begründung dieses Umstandes konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht erfolgen. Eine Erklärungsmöglichkeit ist, dass die Anzahl der EPS-Realisationen nicht groß genug war, um alle ungünstigsten Kombinationen von sturmflutrelevanten Faktoren widerspiegeln zu können. Eine höhere Anzahl von EPS-Realisationen konnte aufgrund von beschränkten Rechnerkapazitäten am EZMWF nicht erreicht werden.

Eine weitere im Projekt diskutierte Erklärungsmöglichkeit war, dass der extreme Wasserstand von 1872 durch eine sehr hohe Vorfüllung mit verursacht war. Tatsächlich war auch eine Vorfüllung zum Zeitpunkt der Sturmflut zu beobachten. Umfangreiche Modellsimulationen haben jedoch ergeben, dass eine Vorfüllung nur einen Einfluss auf mittlere und leicht erhöhte Sturmflutwasserstände hat. Ein Einfluss auf sehr extreme(!) Wasserstände konnte nicht nachgewiesen werden (BORK UND MÜLLER-NAVARRA 2009). Aufgrund dieser Ergebnisse musste die zweite Erklärungsmöglichkeit verworfen werden.

Da an manchen Pegeln die extremsten Wasserständen aus einer EPS-Simulation resultieren und an anderen Pegeln die Rekonstruktion der Sturmflut von 1872 zu extremsten Wasserständen führt, wurden für alle Pegel beide Extremwerte in die Statistik integriert. Der jeweilige Höchstwert aus den EPS-Simulationen wird mit  $Max_{Modell}$  bezeichnet und derjenige aus der Rekonstruktion von 1872 mit  $Rea_{1872}$ . Auch der Reanalysewert von 1872 ( $Rea_{1872}$ ) erhält in der Extremwertstatistik eine zugeordnete Unterschreitungswahrscheinlichkeit von  $P_U = 0,999258/a$ , da dieser als Höchstwert aller Realisationen angesehen wird.

In Abbildung 8.1 sind für jeden untersuchten Pegelstandort der auf das Jahr 2006 umgerechnete beobachtete Sturmflutwasserstand von 1872 aufgetragen (soweit verfügbar) und zugleich die Rekonstruktionen und jeweiligen Maximalwerte aus den EPS-Simulationen. Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass eine gute bis hinreichende Übereinstimmung der Reanalysewerte mit den beobachteten Wasserständen von 1872 erzielt werden konnte. Zum anderen ist zu sehen, dass die Maximalwerte aus den EPS-Simulationen an den Pegeln Flensburg bis Warnemünde unter den 1872 erreichten Wasserstandsmarken liegen und diese an den Pegeln Stralsund, Sassnitz und Greifswald darüber liegen.

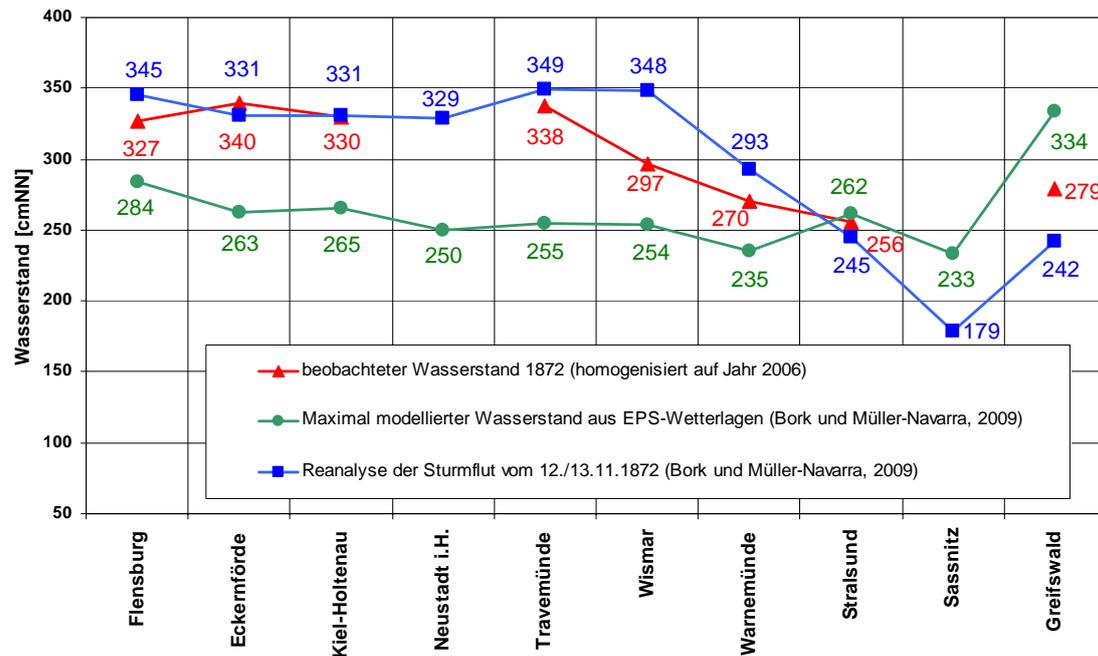


Abbildung 8.1: Vergleich der aus EPS-Wetterlagen maximal modellierten Wasserständen mit Reanalyse- und Beobachtungswerten der Sturmflut von 12./13.11.1872

## 8.2 Vorbemerkungen zu den Pegelauswertungen

Die Ausführungen in den folgenden Abschnitten fassen die Ergebnisse der Extremwertstatistik für alle untersuchten Pegel zusammen. An jedem Pegel (außer am Pegel Neustadt i.H.) wurden vier Varianten extremwertstatistisch analysiert:

- **V1:** Es wurden nur die Daten aus der Zeitspanne der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen einer extremwertstatistischen Analyse unterzogen.
- **V2:** Zusätzlich zur Variante V1 wurden historische Daten mit in die Extremwertstatistik integriert.
- **V3:** Variante 3 stellt eine weitere Ergänzung zur Variante V2 dar, da der jeweils höchste modellierte Wert ( $MAX_{Modell}$ ) aus den EPS-Simulationen mit berücksichtigt wurde.
- **V4:** In Variante 4 wurde statt des Wertes  $MAX_{Modell}$  der Reanalysewert der Sturmflut von 1872 ( $Rea_{1872}$ ) verwendet.

Die Ergebnisse der vier untersuchten Varianten sind grafisch und tabellarisch jeweils für die Jährlichkeiten  $T = 100, 200, 500, 1.000, 4.000$  und  $10.000$  Jahre dargestellt, wobei in den Abbildungen zusätzlich die oberen und unteren 95%-Konfidenzintervalle mit aufgeführt sind. Detaillierte Ergebnisse und die Verläufe der Verteilungsfunktionen für alle untersuchten Varianten sind dem Anhang zu entnehmen (Abbildung A. 1 bis Abbildung A. 39 und Abschnitt A 11).

## 8.3 Flensburg

Die Ergebnisse des Pegels Flensburg (Abbildung 8.2 und Tabelle 8.1) zeigen ähnliche Werte für die Varianten V1 und V2 bei allen Jährlichkeiten. Die Ergebnisse der Varianten V3 und V4 liegen im Vergleich dazu signifikant höher. Daraus leitet sich ab, dass die extremwertstatistische Analyse durch die Einbeziehung von historischen Daten am Pegel Flensburg nicht wesentlich beeinflusst wird. In der Abbildung A. 2 ist jedoch zu erkennen, dass die historischen Ereignisse nicht gut durch die angepasste Extremwertverteilung beschrieben werden. Dahingegen hat die zusätzliche Berücksichtigung der modellierten Extremereignisse  $MAX_{Modell}$  und  $Rea_{1872}$  einen signifikanten Einfluss auf die Extremwertanalyse. Grundsätzlich führt die Verwendung des Reanalysewertes  $Rea_{1872}$  zu höheren T-jährlichen Werten als die Verwendung des  $MAX_{Modell}$ -Wertes. Werden die modellierten Werte mit berücksichtigt, so wird gleichzeitig eine bessere Beschreibung der historischen Daten durch die Extremwertverteilung erreicht (vgl. Abbildung A. 3 und Abbildung A. 4).

Für weitere Betrachtungen wird empfohlen, die Ergebnisse aus den Varianten V3 und V4 zu verwenden, womit sich beispielsweise Werte für das 100-jährliche Ereignis von  $W_{100} = 224$  bis  $233$  cmNN ergeben.

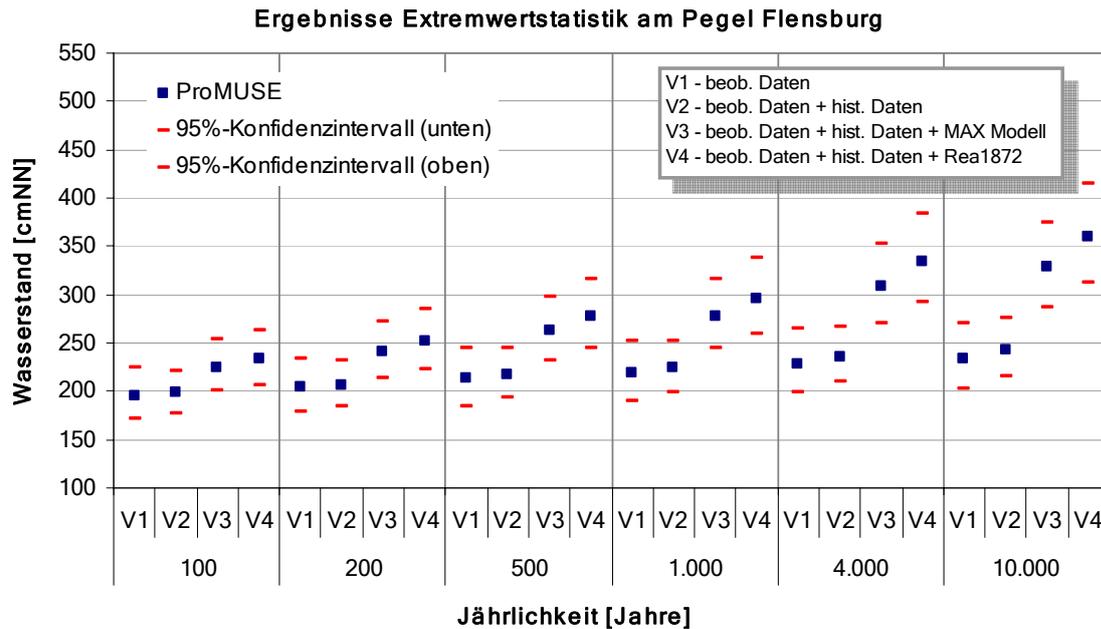


Abbildung 8.2: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Flensburg

Tabelle 8.1: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Flensburg

Flensburg		Wasserstand [cmNN]			
Eintrittswahrscheinlichkeit $P_E$ [1/a]	Jährlichkeit $T$ [Jahre]	V1	V2	V3	V4
		beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea1872
$1 \cdot 10^{-2}$	100	196	198	224	233
$5 \cdot 10^{-3}$	200	204	207	241	252
$2 \cdot 10^{-3}$	500	213	217	262	277
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	218	224	277	296
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	228	236	308	334
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	233	243	328	360

## 8.4 Eckernförde

Die Ergebnisse am Pegel Eckernförde (Abbildung 8.3 und Tabelle 8.2) zeigen jeweils von Variante V1 zu V4 eine Zunahme der T-jährlichen Wasserstände, wobei die Unterschiede bei den großen Jährlichkeiten (>1000 Jahre) sehr hoch werden. Beispielsweise sind bei den 10.000-jährlichen Ereignissen der Varianten V1 bis V4 Unterschiede von 1,42 m vorhanden. In der Abbildung A. 6 ist zu erkennen, dass das berücksichtigte historische Ereignis in der Variante V2 nicht hinreichend gut von der Extremwertverteilung beschrieben wird, dieses jedoch mit der Variante V3 und noch besser mit der Variante V4 erreicht werden kann (Abbildung A. 7 und Abbildung A. 8). Der Nachteil bei der Variante V4 besteht in einer nach oben gekrümmten Extremwertverteilung, die sich somit keinem Wasserstand asymptotisch annähert. Hier besteht zunächst scheinbar ein Widerspruch in der Analyse, da die aufgetretenen Wasserstände offenbar nur mit einer Form der Extremwertverteilung beschrieben werden können, die physikalisch nicht

begründet werden kann, da ein Wasserstand nicht bis ins Unermessliche steigen kann, sondern sich einem maximalen – aber weitgehend unbekanntem – Wasserstand annähern muss. Die nach oben offene Krümmung der Extremwertverteilung führt jedoch nur bei einer weiteren Extrapolation zu physikalisch unrealistischen Wasserständen. Aus diesem Grund ist wichtig anzumerken, dass aus Sicht der Autoren die Extremwertfunktion am Pegel Eckernförde nicht über die hier maximal verwendete Jährlichkeit von 10.000 Jahren hinaus extrapoliert werden sollte.

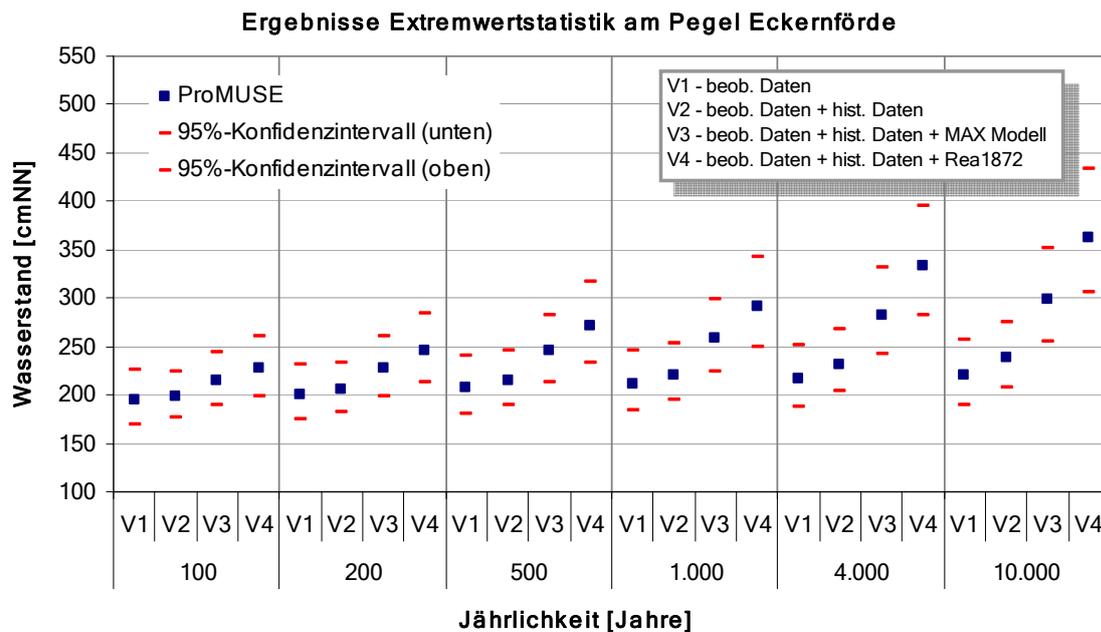


Abbildung 8.3: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Eckernförde

Tabelle 8.2: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Eckernförde

Eckernförde		Wasserstand [cmNN]			
Eintrittswahrscheinlichkeit $P_E$ [1/a]	Jährlichkeit $T$ [Jahre]	V1	V2	V3	V4
		beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea1872
$1 \cdot 10^{-2}$	100	195	198	214	227
$5 \cdot 10^{-3}$	200	201	206	227	245
$2 \cdot 10^{-3}$	500	208	215	245	271
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	212	221	258	291
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	217	232	283	333
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	220	238	298	362

## 8.5 Kiel-Holtenau

Die extremwertstatistischen Ergebnisse am Pegel Kiel-Holtenau (Abbildung 8.4 und Tabelle 8.3) zeigen im Vergleich zu den weiter nördlich gelegenen Pegeln Flensburg und Kiel ein anderes Verhalten in Bezug auf die Integration historischer Daten. Während beim 100-jährlichen Ereignis noch alle vier Varianten V1 bis V4 zu vergleichbaren Wasserständen führen, ist ab dem 200-jährlichen Ereignis ein zunehmender Unterschied zwischen der Variante V1 auf der einen Seite und den Varianten V2 bis V4 auf der anderen Seite zu erkennen. Dieser Unterschied ist unter anderem dadurch zu erklären, da für die Varianten V2 bis V4 keine jährlichen, sondern 4-jährliche Extrema verwendet wurden. Mit diesem Ansatz werden insbesondere niedrigere Ereignisse aus dem Datenkollektiv der jährlichen Maxima entfernt. Beispielsweise finden sich im Datensatz der jährlichen Maxima am Pegel Kiel-Holtenau etliche Ereignisse unterhalb von 100 cmNN, welche nicht die Definition einer Sturmflut erfüllen. Bei 4-jährlichen Datensatz sind diese Werte nicht mehr enthalten und es werden damit die extremen Verhältnisse realistischer beschrieben. Die Autoren empfehlen für die Festlegung T-jährlicher Wasserstände am Pegel Kiel-Holtenau die Ergebnisse aus den Varianten V2 bis V4. Dies führt beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand zu Werten von  $W_{100} = 218$  bis 234 cmNN.

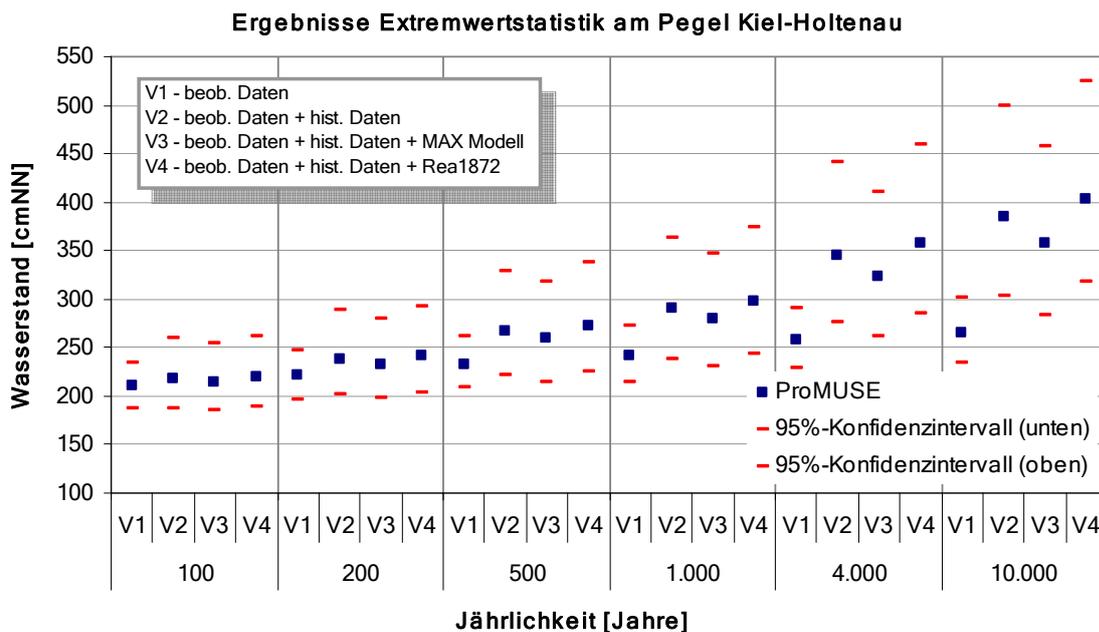


Abbildung 8.4: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Kiel-Holtenau

Tabelle 8.3: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Kiel-Holtenau

Kiel-Holtenau		Wasserstand [cmNN]			
Eintrittswahrscheinlichkeit $P_E$ [1/a]	Jährlichkeit $T$ [Jahre]	V1	V2	V3	V4
		beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea1872
$1 \cdot 10^{-2}$	100	210	218	215	220
$5 \cdot 10^{-3}$	200	221	238	233	242
$2 \cdot 10^{-3}$	500	233	267	259	273
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	242	291	279	298
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	257	345	324	358
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	266	385	357	403

### 8.6 Neustadt

Am Pegel Neustadt i.H. standen keine historischen Daten zu Hochwasserereignissen zur Verfügung, weshalb nur drei Datenkollektive (V1, V3 und V4) extremwertstatistisch ausgewertet werden konnten. Die Ergebnisse in Abbildung 8.5 und Tabelle 8.4 zeigen bei den Varianten V3 und V4 insbesondere bei den höheren Jährlichkeiten eine signifikante Erhöhung der T-jährlichen Ereignisse im Vergleich zur Variante V1. Grundsätzlich werden daher die Ergebnisse der Varianten V3 und V4 für weitere Betrachtungen empfohlen. Dies führt beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand zu Werten von  $W_{100} = 210$  bis 231 cmNN.

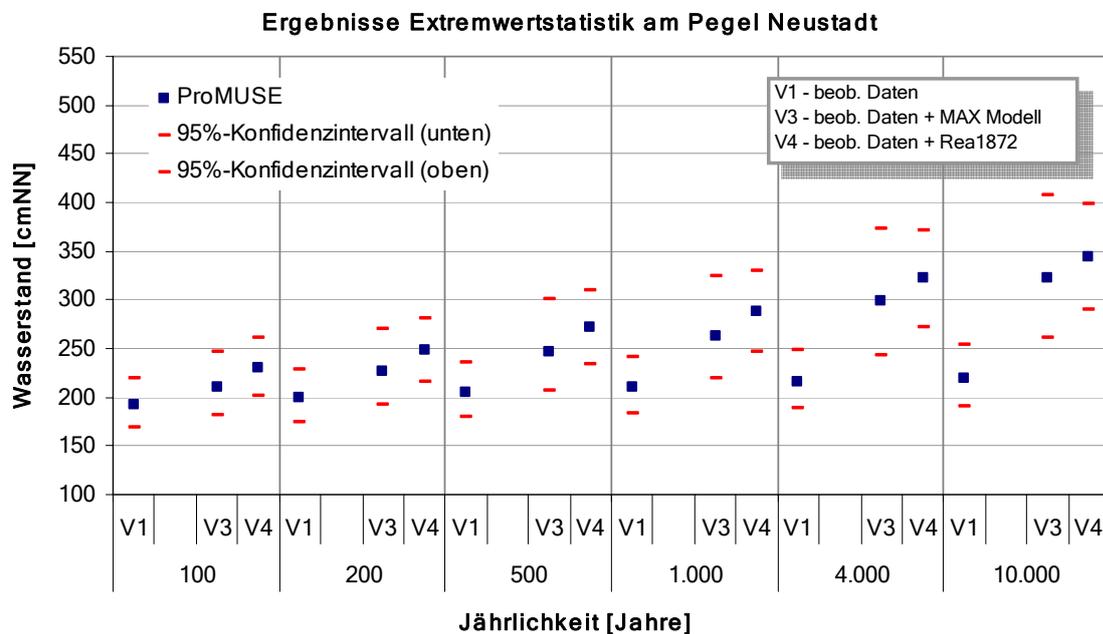


Abbildung 8.5: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Neustadt i.H.

Tabelle 8.4: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Neustadt i.H.

Neustadt		Wasserstand [cmNN]			
Eintrittswahrscheinlichkeit $P_E$ [1/a]	Jährlichkeit $T$ [Jahre]	V1	V2	V3	V4
		beob. Werte		beob. Werte + max. Modellwert	beob. Werte + + Rea1872
$1 \cdot 10^{-2}$	100	192	--	210	231
$5 \cdot 10^{-3}$	200	199	--	226	248
$2 \cdot 10^{-3}$	500	205	--	247	271
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	210	--	263	288
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	216	--	298	322
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	219	--	322	344

## 8.7 Travemünde

Der Pegel Travemünde (Abbildung 8.6 und Tabelle 8.5) stellt innerhalb aller untersuchten Pegelzeitreihen an der Deutschen Ostseeküste eine Besonderheit aufgrund seiner sehr langen Pegelzeitreihe dar. Die regelmäßigen Wasserstandsaufzeichnungen stehen seit 1826 zur Verfügung, womit die Sturmflut von 1872 innerhalb dieses Zeitraumes liegt. Historische Überlieferungen zu extremen Ereignissen reichen sogar zurück bis zum Jahr 1044. Die Problematik der statistischen Auswertung einer beobachteten Zeitreihe mit nur einem sehr extremen Ereignis wird am Pegel Travemünde sehr deutlich. Die Analyse der Variante V1 (Abbildung A. 16) zeigt, dass das größte Ereignis nicht mit der Extremwertverteilung beschrieben werden kann. Durch die Hinzunahme von weiteren historischen und modellierten Ergebnissen kann dies verbessert werden, wobei auch bei Variante V4 letztlich keine optimale Beschreibung der historischen Daten erreicht werden kann, insgesamt jedoch ein homogeneres Bild im Vergleich zur Variante V1 entsteht (Abbildung A. 17 bis Abbildung A. 19). Je nach Variante kann dem Extremereignis von 1872 somit eine Jährlichkeit von etwa 3.000 bis 10.000 Jahren zugeordnet werden. Für die weiteren Betrachtungen werden die Ergebnisse der Variante V4 empfohlen, die sich jedoch erst ab einer Jährlichkeit von etwa 1.000 Jahren signifikant von denjenigen der Variante V1 unterscheiden. Mit der Variante V4 ergibt sich für den auf das Jahr 2006 korrigierte Wasserstand der Sturmflut von 1872 eine Jährlichkeit von etwa 3400 Jahren.

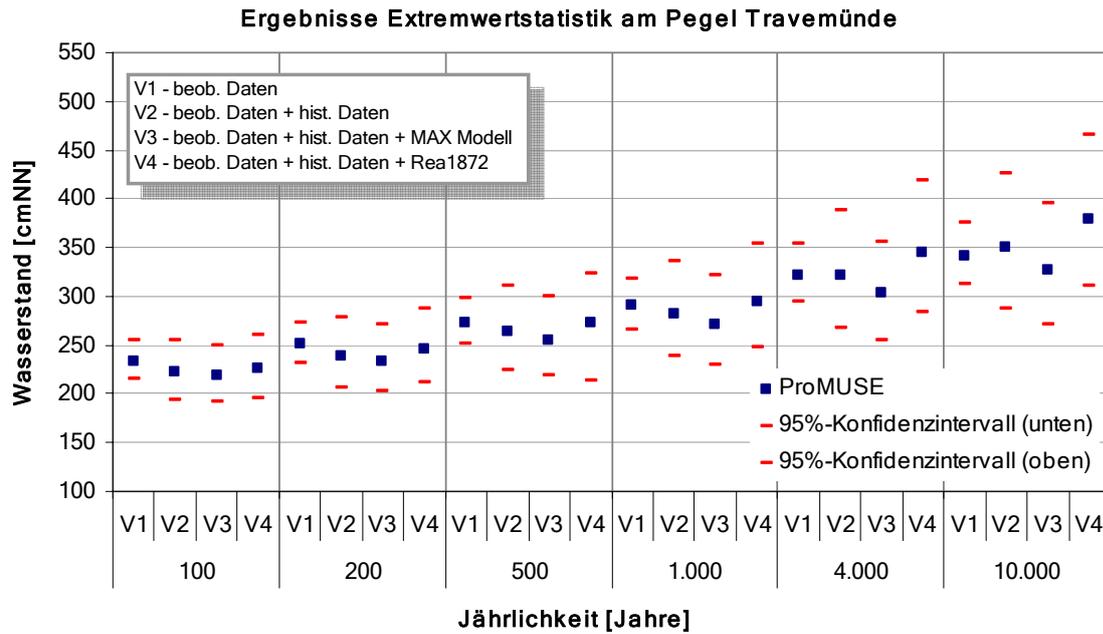


Abbildung 8.6: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Travemünde

Tabelle 8.5: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Travemünde

Travemünde		Wasserstand [cmNN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit $P_E$ [1/a]	Jährlichkeit $T$ [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea1872
$1 \cdot 10^{-2}$	100	234	222	218	226
$5 \cdot 10^{-3}$	200	251	239	234	245
$2 \cdot 10^{-3}$	500	273	263	255	273
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	290	282	271	295
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	322	322	304	344
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	342	350	327	379

## 8.8 Wismar

Die Ergebnisse des Pegels Wismar sind in Abbildung 8.7 und Tabelle 8.6 zusammenfassend dargestellt. Bei der Betrachtung aller vier berechneten Varianten fällt auf, dass sowohl die Varianten V1 und V3, als auch die V2 und V4 zu ähnlichen Ergebnissen führen. Dass die Variante V3 in etwa gleiche Ergebnisse wie V1 liefert ist in dem relativ niedrigen  $MAX_{Modell}$ -Wert begründet. Wie Abbildung A. 21 und Abbildung A. 23 entnommen werden kann, wird durch die Varianten V2 und V4 eine gute Beschreibung der beobachteten, historischen und modellierten Werte erreicht, weshalb diese Ergebnisse auch für weitergehende Betrachtungen empfohlen werden. Dies führt beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand zu Werten von  $W_{100} = 230$  bis 232 cmNN.

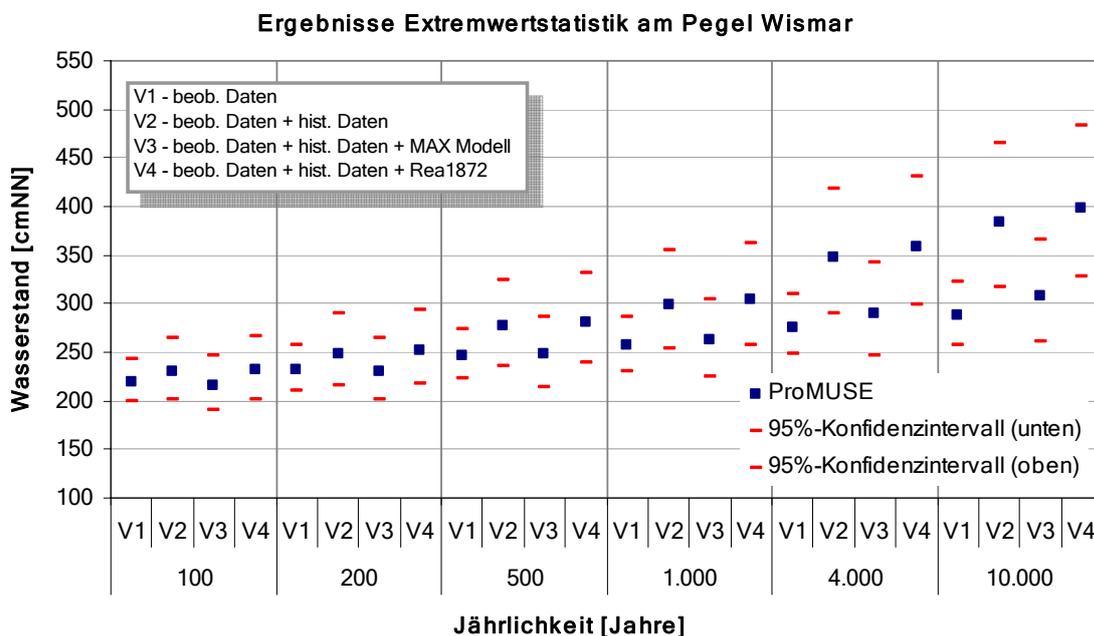


Abbildung 8.7: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Wismar

Tabelle 8.6: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Wismar

Wismar		Wasserstand [cmNN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit $P_E$ [1/a]	Jährlichkeit $T$ [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea1872
$1 \cdot 10^{-2}$	100	220	230	216	232
$5 \cdot 10^{-3}$	200	232	249	230	252
$2 \cdot 10^{-3}$	500	247	277	248	281
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	257	299	262	305
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	276	348	289	358
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	288	384	308	398

### 8.9 Warnemünde

Die extremwertstatistischen Analysen am Pegel Warnemünde (Abbildung 8.8 und Tabelle 8.7) zeigen für die Variante V4 signifikant höhere Wasserstandswerte als die Varianten V1 bis V3. Auch am Pegel Warnemünde liegt der maximal modellierte Wasserstandswert  $MAX_{Modell}$  unterhalb des 1872 aufgetretenen Wertes. Hieraus resultiert, dass die Variante V3 im Vergleich zur Variante V4 deutlich niedrigere Werte liefert. Aus Abbildung A. 27 wird deutlich, dass die Extremwertverteilung in Variante V4 sowohl die beobachteten, als auch die historischen und modellierten Werte gut beschreibt. Aus den vorliegenden Untersuchungen werden daher die Ergebnisse der Variante V4 für weitergehende Betrachtungen empfohlen. Dies führt beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand zu einem Wert von  $W_{100} = 197$  cmNN.

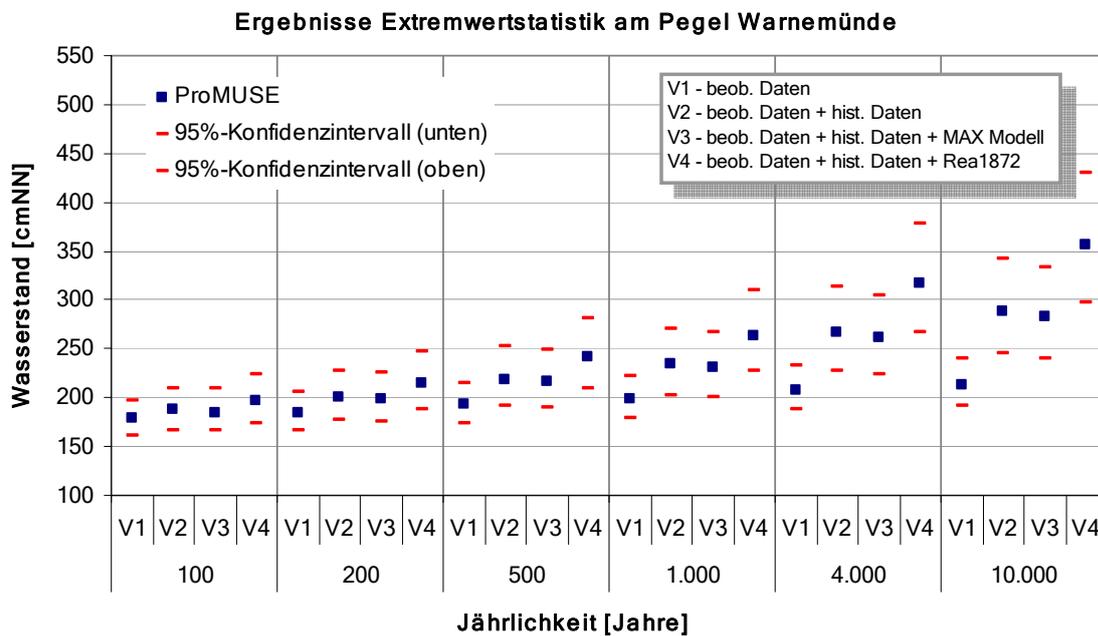


Abbildung 8.8: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Warnemünde

Tabelle 8.7: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Warnemünde

Warnemünde		Wasserstand [cmNN]			
Eintrittswahrscheinlichkeit $P_E$ [1/a]	Jährlichkeit $T$ [Jahre]	V1	V2	V3	V4
		beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea1872
$1 \cdot 10^{-2}$	100	178	187	185	197
$5 \cdot 10^{-3}$	200	185	200	198	215
$2 \cdot 10^{-3}$	500	193	219	216	242
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	199	234	230	264
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	208	266	261	317
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	213	289	282	357

## 8.10 Stralsund

Am Pegel Stralsund (Abbildung 8.9 und Tabelle 8.8) werden die historischen Sturmflutereignisse in der Variante V2 nur unzureichend durch die Extremwertverteilung beschrieben, was durch die Hinzunahme der modellierten Extremwerte (V3 und V4) deutlich verbessert werden kann. Darüber hinaus führen die beiden letztgenannten Varianten zu gleichwertigen Ergebnissen, so dass grundsätzlich die Ergebnisse der Varianten V3 und V4 für weitergehende Betrachtungen empfohlen werden. Dies führt beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand zu W<sub>100</sub> = 179 bis 182 cmNN.

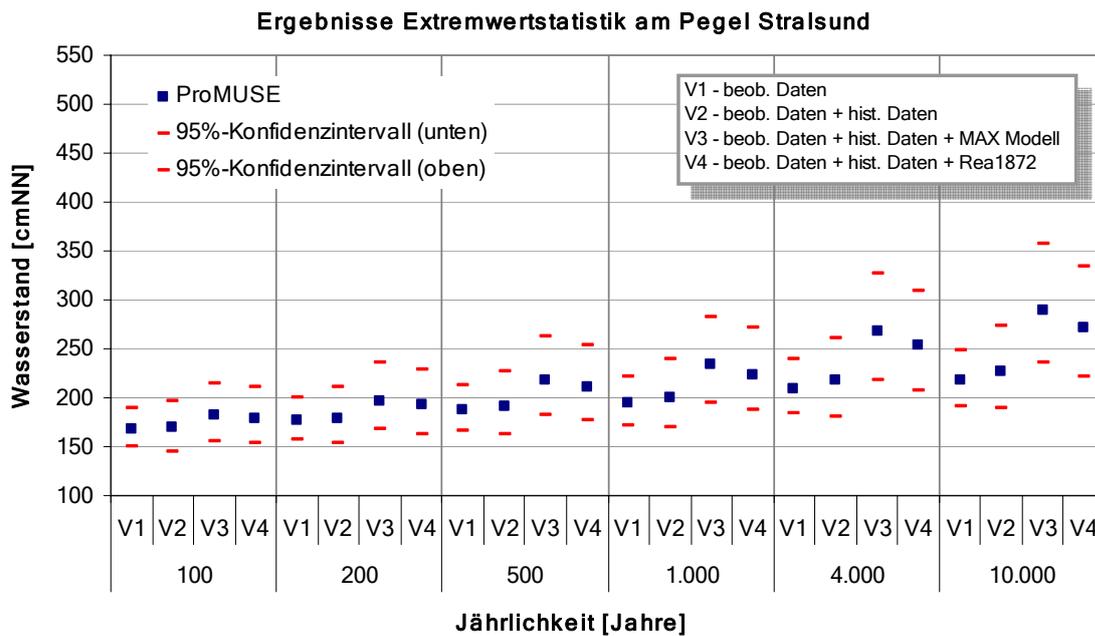


Abbildung 8.9: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Stralsund

Tabelle 8.8: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Stralsund

Stralsund		Wasserstand [cmNN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit $P_E$ [1/a]	Jährlichkeit $T$ [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea1872
$1 \cdot 10^{-2}$	100	168	169	182	179
$5 \cdot 10^{-3}$	200	177	179	197	193
$2 \cdot 10^{-3}$	500	188	191	218	211
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	195	200	234	224
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	209	217	267	253
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	218	227	289	271

### 8.11 Sassnitz

Am Pegel Sassnitz (Abbildung 8.10 und Tabelle 8.9) konnte ein maximaler Wert  $MAX_{Modell}$  modelliert werden, der signifikant über dem 1872 aufgetretenen Wasserstand liegt. Dies führt dazu, dass die Variante V3 zu höheren T-jährlichen Wasserständen führt als die Varianten V1, V2 und V4. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Variante V2 den implementierten historischen Wert nicht gut erfasst, so dass grundsätzlich die Ergebnisse der Variante V3 für weitergehende Betrachtungen empfohlen werden können, womit sich beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand ein Wert von  $W_{100} = 163$  cmNN ergibt.

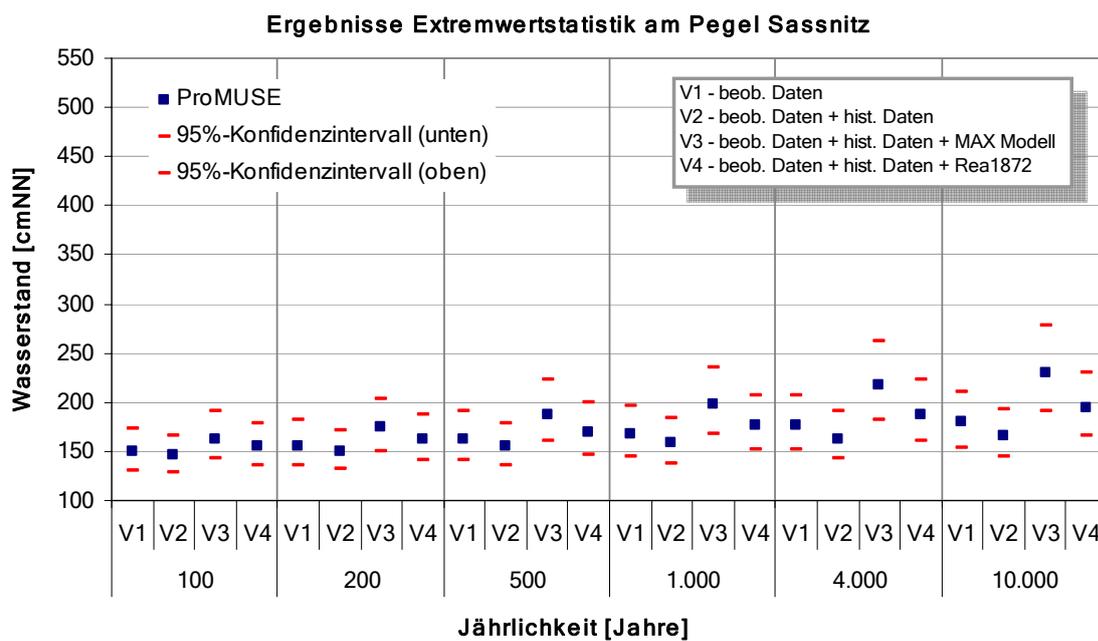


Abbildung 8.10: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Sassnitz

Tabelle 8.9: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Sassnitz

Sassnitz		Wasserstand [cmNN]			
Eintrittswahrscheinlichkeit $P_E$ [1/a]	Jährlichkeit $T$ [Jahre]	V1	V2	V3	V4
		beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea1872
$1 \cdot 10^{-2}$	100	150	146	163	155
$5 \cdot 10^{-3}$	200	156	150	174	162
$2 \cdot 10^{-3}$	500	163	155	187	170
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	168	158	197	177
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	176	163	217	187
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	180	166	229	194

## 8.12 Greifswald

Der Pegel Greifswald (Abbildung 8.11 und Tabelle 8.10) zeigt ein qualitativ sehr ähnliches Verhalten zum Pegel Sassnitz. Auch hier konnte ein  $MAX_{Modell}$ -Wert modelliert werden, der deutlich über dem Ereignis von 1872 liegt. Dementsprechend führt auch beim Pegel Greifswald die Variante V3 zu den höchsten T-jährlichen Wasserständen, weshalb analog zum Pegel Greifswald die Ergebnisse der Variante V3 für weitergehende Betrachtungen empfohlen werden können. Hiermit ergibt sich beispielsweise für den 100-jährlichen Wasserstand ein Wert von  $W_{100} = 204 \text{ cmNN}$ .

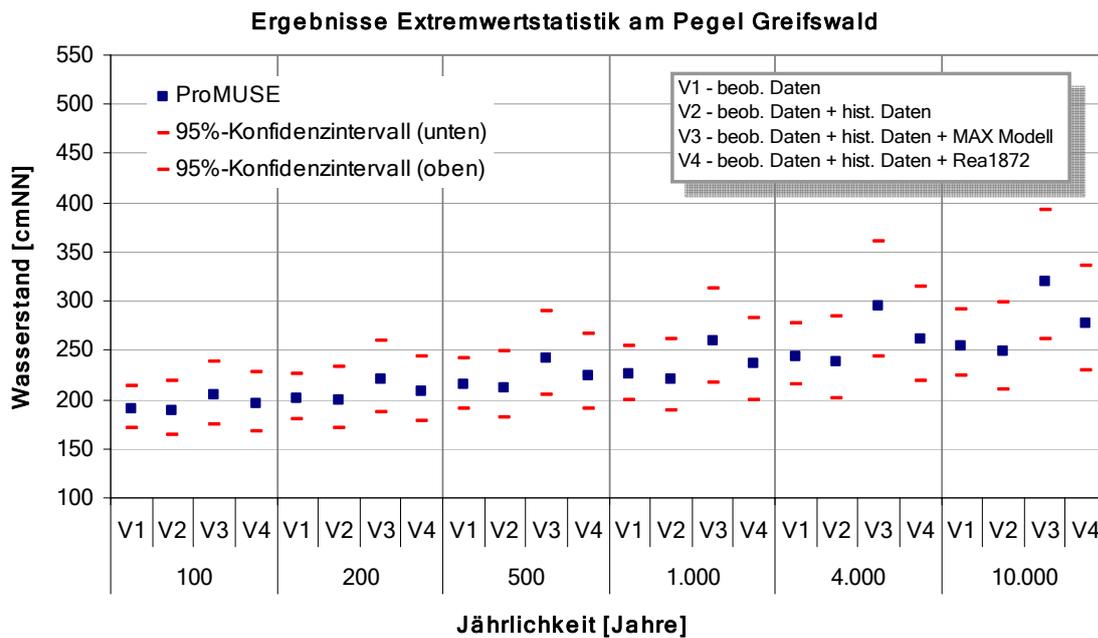


Abbildung 8.11: Darstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Greifswald

Tabelle 8.10: Zusammenstellung der Ergebnisse der Extremwertstatistik am Pegel Greifswald

Greifswald		Wasserstand [cmNN]			
		V1	V2	V3	V4
Eintrittswahrscheinlichkeit $P_E$ [1/a]	Jährlichkeit $T$ [Jahre]	beob. Werte	beob. Werte + hist. Daten	beob. Werte + hist. Daten + max. Modellwert	beob. Werte + hist. Daten + Rea1872
$1 \cdot 10^{-2}$	100	190	188	204	195
$5 \cdot 10^{-3}$	200	201	199	220	208
$2 \cdot 10^{-3}$	500	215	212	242	224
$1 \cdot 10^{-3}$	1.000	225	221	260	237
$2,5 \cdot 10^{-4}$	4.000	243	238	295	261
$1 \cdot 10^{-4}$	10.000	255	249	320	277

## 9 Diskussion der Ergebnisse

Eine Grundaufgabe der hydrologischen Extremwertstatistik besteht darin, Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen abzuleiten, die bisher noch nicht aufgetreten sind. Häufig liegen Datenreihen aus einer Beobachtungszeitspanne von 50 bis 100 Jahren vor, in seltenen Fällen auch darüber. Über die empirischen Wahrscheinlichkeiten ergibt sich daraus, dass Ereignisse mit einem mittleren Wiederkehrintervall (Jährlichkeit) von 50 bis 100 Jahren direkt abgeleitet werden können. Diese Wiederkehrintervalle sind jedoch für viele Bemessungsfragen zu gering. Im Bereich des Küsteningenieurwesens ist davon auszugehen, dass zukünftig auch Bemessungswasserstände mit mittleren Wiederkehrintervallen von bis zu 10.000 Jahren definiert werden müssen.

Die Verteilungsfunktionen müssen demnach über den Bereich der Beobachtungswerte hinaus extrapoliert werden. Nach DVWK (1999) ist eine Extrapolation bis zum 2,5- bis 3-fachen des Beobachtungszeitraumes zulässig. PUGH (2004) gibt eine zulässige Extrapolation bis zum 4-fachen des Beobachtungszeitraumes an. HAWKES ET AL. (2008) geben einen Überblick über stationäre Verfahren der Extremwertstatistik und diskutieren das Problem, wie aus hydrologischen Messungen über einige Jahrzehnte Bemessungsereignisse mit mittleren Wiederkehrintervallen von 1.000 bis 10.000 Jahren ermittelt werden können. Hierzu geben sie Empfehlungen hinsichtlich der zu verwendenden Verteilungsfunktionen und Parameterschätzungen, jedoch wird keine Einschränkung zur Extrapolationslänge vorgenommen. In STEDINGER ET AL. (1993) sind ebenfalls keine Angaben zu maximalen Extrapolationslängen vorhanden, wenngleich auf wachsende Unsicherheiten bei zunehmender Extrapolationslänge hingewiesen wird.

Für die in der Literatur angegebenen Beschränkungen des Extrapolationszeitraumes finden sich keine theoretisch begründeten Ansätze. Vielmehr basieren sie auf der Tatsache, dass bei der Verwendung unterschiedlicher Verteilungsfunktionen eine große Divergenz in den Ergebnissen auftritt, die über dem zulässigen Extrapolationszeitraum liegen. Die Extrapolation über den Bereich der beobachteten Daten hinaus kann entscheidend verbessert werden, wenn zusätzliche Informationen über extreme Ereignisse vorliegen und diese in die Extremwertstatistik integriert werden können. Solche zusätzlichen Informationen können historische Ereignisse sein, die vor Beginn der systematischen Aufzeichnungen stattgefunden haben und aufgrund ihrer besonderen Folgen (großflächige Überschwemmungen, starke Schäden) überliefert sind (vgl. Abschnitt 7.5). Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Extremwertstatistik ist die Einbeziehung physikalischer Grenzzustände (vgl. Abschnitt 7.4.3).

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass durch die Einbeziehung von weiteren Hochwasserinformationen im Vergleich zur alleinigen Analyse der aufgezeichneten Wasserstände signifikante Unterschiede in den Ergebnissen entstehen können. Wie in Abschnitt 7.6 dargestellt, lassen sich häufig historische Extremereignisse durch die alleinige Auswertung der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen nicht hinreichend gut statistisch beschreiben. Durch die angewendete integrierte Extremwertstatistik wird eine homogenere Beschreibung von beobachteten, historischen und modellierten Extremwasserständen erreicht. Insofern ist dies als eine

Verbesserung der statistischen Ergebnisse zu bewerten. Dabei ist jedoch auch zu beachten, dass sowohl die historischen, als auch die modellierten Extremereignisse Unsicherheiten beinhalten. Die Genauigkeit von historischen Wasserstandsaufzeichnungen ist deutlich geringer als diejenige, regelmäßiger Pegelaufzeichnungen. Bei den modellierten Extremereignissen besteht eine signifikante Unsicherheitsquelle in der Zuordnung einer möglichen Eintrittswahrscheinlichkeit. Zusammenfassend ist daher festzustellen, dass auch durch die Einbeziehung von historischen und modellierten Wasserständen Unsicherheiten bei der Extrapolation von Extremwertverteilungen vorhanden sind. Eine vergleichende Betrachtung der Ergebnisse unterschiedlicher Datenkollektive – wie sie in der vorliegenden Arbeit durch die Varianten V1 bis V4 vorgenommen wurde – hilft jedoch bei der Bewertung und Interpretation der Ergebnisse. Das Ergebnis der hier durchgeführten integrierten Extremwertstatistik besteht demnach nicht in der Festlegung eines T-jährlichen Wasserstandes auf genau einen deterministischen Wert, sondern in der Angabe eines Bereiches, der nach den vergleichenden Betrachtungen plausibel erscheint.

## 10 Zusammenfassung

Für den Küstenschutz maßgebende extreme Sturmflutereignisse sind an der deutschen Ostseeküste nur mit Schwierigkeiten zu definieren, weil neben der jeweils bedeutsamen regionalen Festlegung derartiger Ereignisse auch die Ereignisse selbst wegen ihrer sehr geringen Wahrscheinlichkeit schwer fassbar sind. Die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen stellt eine Grundaufgabe der Hydrologie dar. Diese werden durch extremwertstatistische Methoden berechnet, wobei häufig Wahrscheinlichkeitsaussagen zu Wasserständen getroffen werden sollen, die bisher noch nicht eingetreten sind. Die ermittelte Extremwertverteilung muss demzufolge extrapoliert werden. Grundsätzlich basieren alle bekannten extremwertstatistischen Methoden auf der Analyse von beobachteten Daten. Um die Extrapolation der Verteilungsfunktionen nicht nur mathematisch, sondern auch physikalisch zu begründen, können neben den regelmäßig aufgezeichneten Wasserständen auch historische Angaben oder über numerische Modelle berechnete Extremereignisse in die Statistik mit einbezogen werden. Die vorliegende Forschungsaufgaben bestand darin, für die Deutschen Ostseeküste eine entsprechende Methodik zu entwickeln, mit der beobachtete Daten, historische Wasserstandsmarken und modellierte Extremereignisse in die Extremwertstatistik integriert werden können, um eine verlässlichere Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten zu erreichen.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden 10 Pegel an der schleswig-holsteinischen und mecklenburg-vorpommerschen Ostseeküste hinsichtlich extremer Wasserstände ausgewertet. Dazu wurden zunächst die Zeitreihen der mittleren und jährlichen Höchstwasserstände zusammengestellt und vorhandene Datenlücken über Korrelationsrechnungen zu benachbarten Pegeln geschlossen. Darüber hinaus wurde eine intensive Literaturrecherche zu historischen Sturmfluten vorgenommen.

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Entwicklung einer extremwertstatistischen Methodik, bei der regelmäßige Pegelaufzeichnungen, historische Wasserstände und im Projekt modellierte Extremereignisse in der Statistik zusammen analysiert werden können. Dies wurde auf Basis der Allgemeinen Extremwertverteilung realisiert und als integrierte Extremwertstatistik bezeichnet. An jedem Pegel (außer am Pegel Neustadt i. H.) wurden vier Varianten (V1 bis V4) extremwertstatistisch analysiert. In Variante V1 wurden nur die Daten aus der Zeitspanne der regelmäßigen Pegelaufzeichnungen einer extremwertstatistischen Analyse unterzogen. Die Variante V2 berücksichtigte zusätzlich historische Daten. In den Varianten V3 und V4 wurden schließlich noch modellierte Extremszenarien in die Statistik mit einbezogen.

Durch die angewendete integrierte Extremwertstatistik wird eine homogenere Beschreibung von beobachteten, historischen und modellierten Extremwasserständen erreicht. Insofern ist dies als eine Verbesserung der bisherigen statistischen Verfahren zu bewerten. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass durch die Einbeziehung von weiteren Hochwasserinformationen in die Extremwertstatistik im Vergleich zur alleinigen Analyse der aufgezeichneten Wasserstände signifikant unterschiedliche Ergebnisse entstehen können. Bei der alleinigen Analyse der beobachteten Wasserstandsdaten kann beispielsweise dem Extremereignis

von 1872 am Pegel Travemünde eine Jährlichkeit von über 10.000 Jahren zugeordnet werden. Bei der zusätzlichen Berücksichtigung von historischen und modellierten Extremwasserständen kann eine Jährlichkeit von etwa 3400 Jahren angegeben werden; tendenziell zeigt sich diese Reduzierung der entsprechenden Jährlichkeiten bei allen untersuchten Pegelstandorten.

## 11 Weiterer Forschungsbedarf

Die vorliegenden Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf den gegenwärtigen klimatischen Zustand. Eventuelle Änderungen im hydrologischen System der Ostsee infolge eines Klimawandels sind nicht berücksichtigt und müssen in weiterführenden Forschungsarbeiten analysiert werden. Auch wenn im bearbeiteten Projekt Fortschritte hinsichtlich der Implementierung von historischen Hochwasserereignissen und modellierten Extremereignissen in die Extremwertstatistik erzielt wurden, ist u.a. in den folgenden Bereich ein weiterer Forschungsbedarf vorhanden:

- Berücksichtigung einer unterschiedlichen Gewichtung von historischen Ereignissen
- Festlegung eines gültigen Grenzwertes für die Kollektivbildung bei der Erstellung partieller Zeitreihen
- Berücksichtigung von Instationaritäten in der Extremwertstatistik (vgl. MUDERSBACH 2009)
- Detaillierte statistische Analysen zum Einfluss der Vorfüllung an der deutschen Ostseeküste

## 12 Schrifttum

- BAENSCH, P. (1875): Die Sturmflut vom 12./13. November 1872 an den Ostseeküsten des Preußischen Staates, Zeitschrift für Bauwesen 23
- BAERENS, C. UND HUPFER, P. (1999): Extremwasserstände an der Deutschen Ostseeküste nach Beobachtungen und in einem Treibhausszenario, Die Küste, Heft 61, S. 47-72, Boyens & Co, Heide i.H.
- BAERENS, C. (1998): Extremwasserstandsereignisse an der Deutschen Ostseeküste, Dissertation, Freie Universität Berlin, FB Geowissenschaften, Berlin
- BAYLISS, A.C. UND REED, D.W. (2001): The use of historical data in flood frequency estimation, Report to MAFF, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford
- BENKEL, A. UND MEINKE, I. (2008): Variation von sturmflutzeugenden Tiefdruckgebieten oder Sturmflutwetterlagen, Abschlussbericht 1.2 zum KFKI-Verbundprojekt *Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)*, Geesthacht
- BORK, I. UND MÜLLER-NAVARRA, S. (2009): Modellierung von extremen Sturmflutwasserständen an der Deutschen Ostseeküste, Die Küste, Sonderheft MUSTOK, in Vorbereitung
- COLES, S. (2001): An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer-Verlag, London
- COLES, S.G. UND TAWN, J. (1990): Statistics of coastal flood prevention, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 332, 457-476
- DE HAAN, L. (1990): Fighting the arch-enemy with mathematics, Statistica Neerlandica, 44, No. 2, 45-68
- DIN 4049-3 (1992): Hydrologie – Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Teil 3, Beuth Verlag, Berlin
- DVWK (1983): Beiträge zur Wahl des Bemessungshochwassers und zum „vermutlich größten Niederschlag“, DVWK-Schriften, 62, Parey Verlag, Berlin
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen, Merkblatt 251, Parey Verlag, Berlin
- DWA (2008): Erschließung und Einbeziehung historischer Informationen für die Ermittlung extremer Hochwasserabflüsse - Fallbeispiele und Empfehlungen, DWA-Themen
- FISHER, R.A. UND TIPPETT, L.H.C. (1928): Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample, Procs. Cambridge Philos. Soc., 24
- GOEL, N.K. UND DE, M. (1993): Development of unbiased plotting position formula for General Extreme Value distributions, Stochastic Hydrology and Hydraulics, 7, 1-13
- GUMBEL, E. J. (1958): Statistics of Extremes, Columbia University Press, New York
- HAWKES, P.J., GONZALES-MARCO, D., SANCHEZ-ARCILLA, A. UND PRINOS, P. (2008): Best practice for the estimation of extremes: A review, Journal of Hydraulic Research, Vol. 46, Extra Issue 2, 324-332

- HEYEN, H., E. ZORITA UND H. VON STORCH (1996): Statistical downscaling of winter monthly mean North Atlantic sea-level pressure to sea-level variations in the Baltic Sea, *Tellus*, 48A, 312–323
- HOSKING, J.R.M. UND WALLIS, J.R. (1997): *Regional frequency analysis*, Cambridge University Press, Cambridge
- HUBER, K. (2000): Hochwasserstände an Nord- und Ostseeküsten, in Zimmermann, C. (Hrsg.): *Risikomanagement im Küstenraum*, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, Heft 85, 15-26
- HUPFER, P., HARFF, J., STERR, H. UND STIGGE, H. J. (2003): Sonderheft: Die Wasserstände an der Ostseeküste, Entwicklung - Sturmfluten - Klimawandel, Kuratorium für Forschung und Küsteningenieurwesen (Hrsg.), *Die Küste* 66, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide i. Holstein
- JANSSEN, F. (2002): *Statistische Analyse mehrjähriger Variabilität der Hydrographie in Nord- und Ostsee - Möglichkeiten zur Validation und Korrektur systematischer Fehler eines regionalen Ozeanmodells*, Dissertation, Universität Hamburg
- JENKINSON, A. F. (1955): The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements, *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 81, 158-171
- JENSEN, J., MUDERSBACH, CH., MÜLLER-NAVARRA, S., BORK, I., KOZIAR, CH. UND RENNER, V. (2006): Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste, Kuratorium für Forschung und Küsteningenieurwesen (Hrsg.), *Die Küste*, 71, 123-167, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide i. Holstein
- JENSEN, J. UND MUDERSBACH, CH. (2007): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten, Themenheft: Küstensenarien, 81, Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde e.V., Leipzig
- JENSEN, J. UND TÖPPE, A. (1986): Zusammenstellung und Auswertungen von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826, *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 30. Jhg., Heft 4
- JENSEN, J. UND TÖPPE, A. (1990): Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde, *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 34. Jhg., Heft 1/2
- KATZ, R.W., PARLANGE, M.B. UND NAVEAU, P. (2002): Statistics of extremes in hydrology, *Water Resources*, 25, 1287-1304
- KOPPE, B. (2001): *Hochwasserschutzmanagement an der deutschen Ostseeküste*, Dissertation, Universität Rostock
- KOTZ, S. UND NADARAJAH, S. (2000): *Extreme Value Distribution - Theory and Applications*, Imperial College Press, Imperial College Press, London
- LANDWEHR, J.M., MATALAS, N.C. UND WALLIS, J.R. (1979): Probability weighted moments compared with some traditional, *Water Resources Research*, Vol. 15 No. 5, 1055-1064

- LWI (1992): Zum Mittelwasserstand, zu Verweilzeiten der Wasserstände und Sturmflutwahrscheinlichkeiten an der Küsten Mecklenburg-Vorpommerns, Bericht Nr. 755, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig
- MEYER, M. (2002): Modellierung der Entwicklung von Küstenlinien der Ostsee im Holozän - Wechselspiel zwischen Isostasie und Eustasie, Dissertation, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald
- MLR (2001): Generalplan Küstenschutz – Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein, Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein, Kiel
- MLU (2006): Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern, Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern
- MUDERSBACH, CH. (2009): Untersuchungen zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen mit Verfahren der instationären Extremwertstatistik – Methoden und Anwendungen auf Pegelwasserstände an der Deutschen Nord- und Ostseeküste, Dissertation, Universität Siegen
- PETERSEN, M. UND ROHDE, H. (1979): Sturmflut. Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. K. Wachholtz Verlag, Neumünster
- PUGH, D. (2004): Changing Sea Levels - Effects of Tides, Weather and Climate, Cambridge University Press, Cambridge
- SCHMAGER, G., FRÖHLE, P., SCHRADER, D., WEISSE, R. UND MÜLLER-NAVARRA, S. (2008): Sea state, Tides, in Feistel, R. et al. (eds.): State and Evolution of the Baltic Sea, 1952-2005. Wiley, 143-198
- SCHMITZ, R. (2007): Vorhersage von historisch aufgetretenen Stürmen über der Ostsee mithilfe des Ensemble Prediction System und COSMO, Abschlussbericht 1.1 zum KFKI-Verbundprojekt *Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)*, Offenbach
- SCHUMACHER, W. (2003): Flutkatastrophen an der deutschen Ostseeküste - Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft, Redieck & Schade, Rostock
- SCHUMANN, A. (2007): Anwendungen partieller wahrscheinlichkeitsgewichteter Momente zur Berücksichtigung historischer Ereignisse bei der Extremwertstatistik, Hydrology and Water Resources Management, Vol. 51 No. 2, 73-81
- STEDINGER, J.R. VOGEL, R.M. UND FOUFOULA-GEORGIU, E. (1993): Frequency Analysis of Extreme Events, in: Handbook of Hydrology, Maidment, D.R. (Ed.), McGraw-Hill Inc., New York
- WANG, O. J. (1996): Direct sample estimators of L moments, Water Resources Research, Vol. 32 No. 12, 3617-3619
- WANG, Q.J. (1990): Unbiased estimation of probability weighted moments and partial probability weighted moments from systematic and historical flood information and their application to estimating the GEV distribution, Journal of Hydrology, 120, 115-124
- WEISE, H. (1990): Rezente vertikale Erdkrustenbewegungen im südlichen Ostseeraum, Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde, Nr. 115, Potsdam.

ZANKE, U.C.E. (2002): Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer, Parey Verlag, Berlin

# A Anhang

## A.1 Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Flensburg

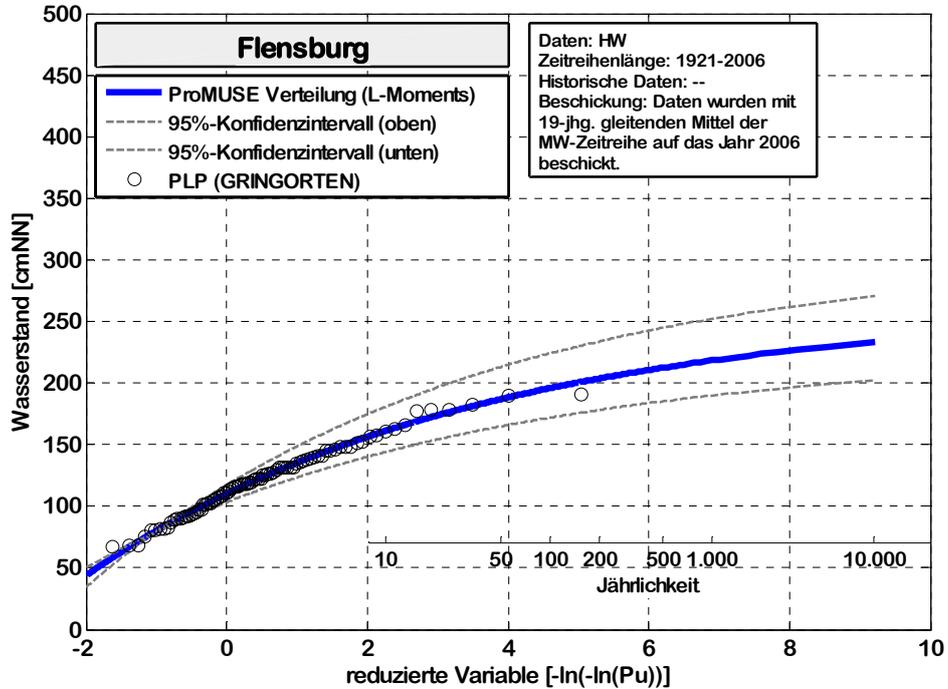


Abbildung A. 1: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Flensburg, Daten: HW (1921-2006)

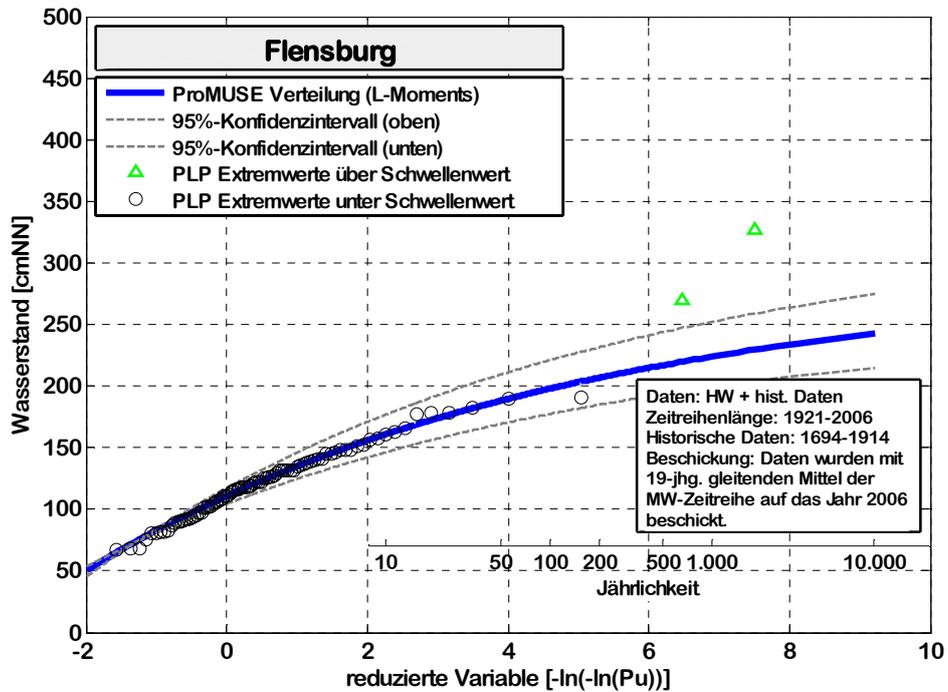


Abbildung A. 2: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Flensburg, Daten: HW (1921-2006), historische Daten (1694-1914)

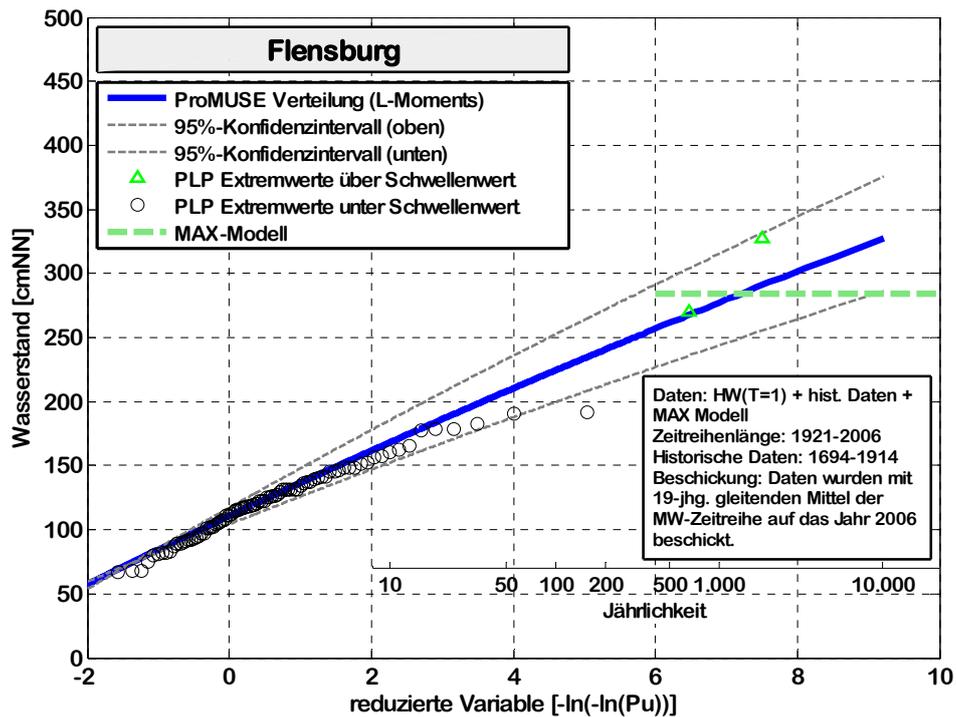


Abbildung A. 3: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Flensburg, Daten: HW (1921-2006, 1-jährliche Extrema), historische Daten (1694-1914), modellierter Maximalwert

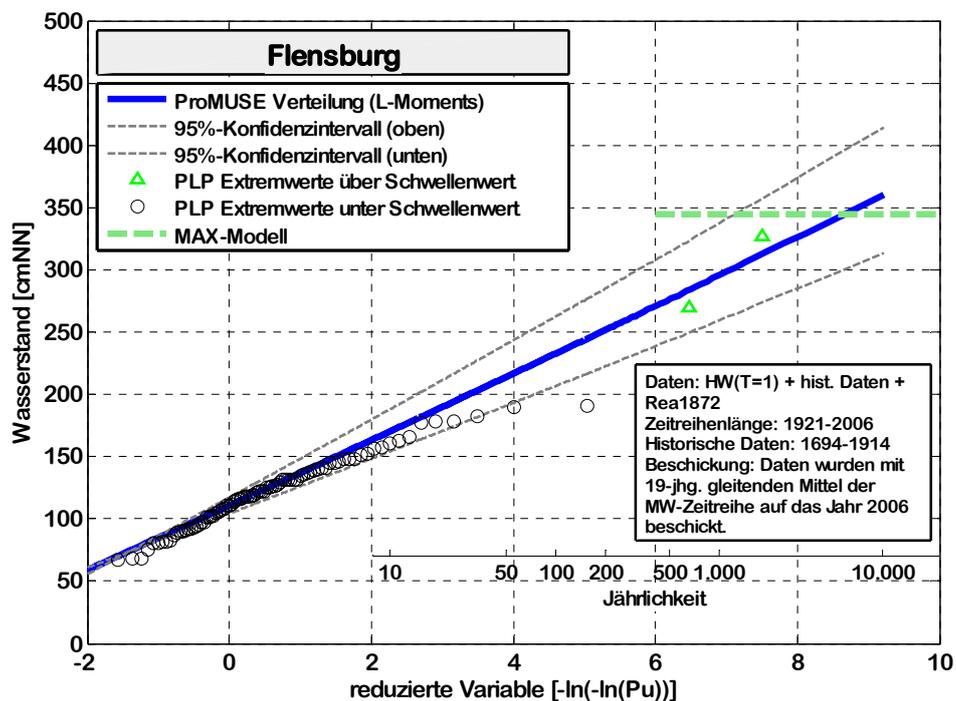


Abbildung A. 4: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Flensburg, Daten: HW (1921-2006, 1-jährliche Extrema), historische Daten (1694-1914), Reanalyse 1872

## A.2 Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Eckernförde

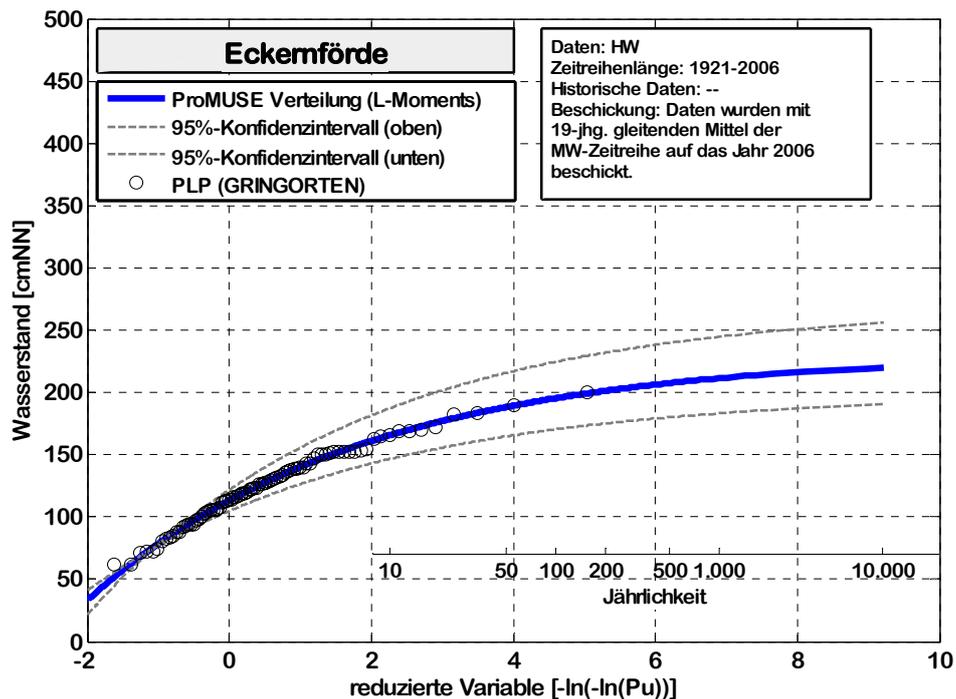


Abbildung A. 5: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Eckernförde, Daten: HW (1921-2006)

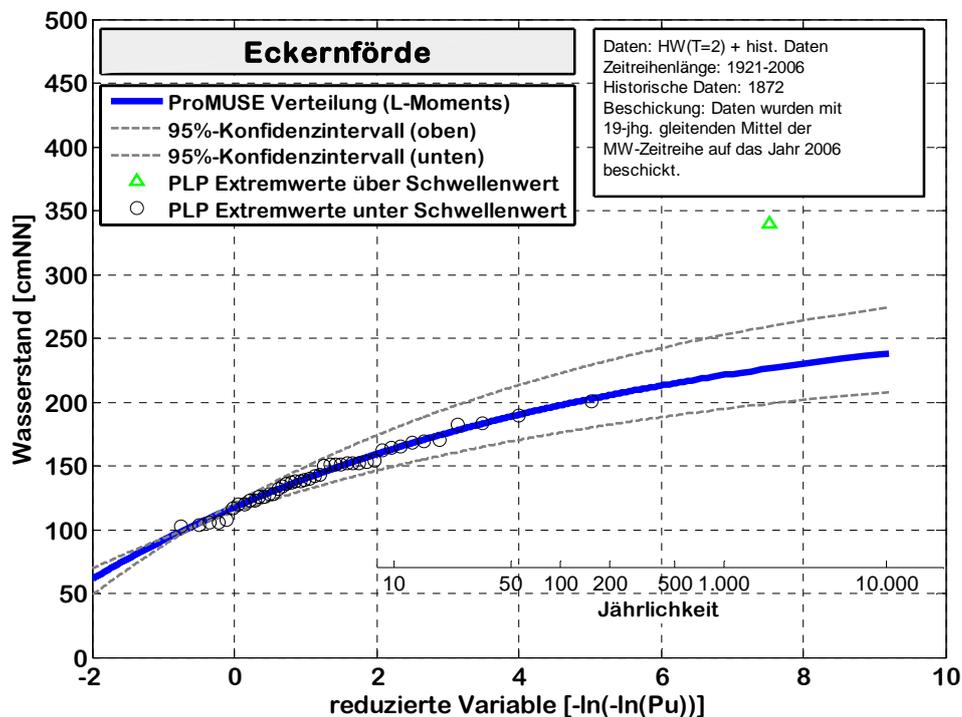


Abbildung A. 6: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Eckernförde, Daten: HW (1921-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872)

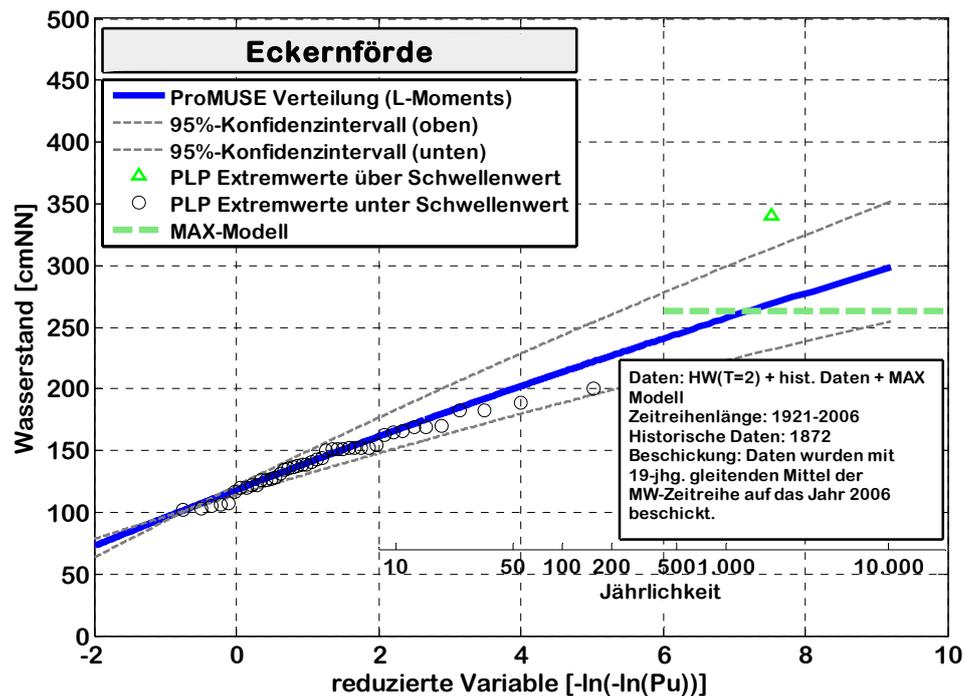


Abbildung A. 7: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Eckernförde, Daten: HW (1921-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872), modellierter Maximalwert

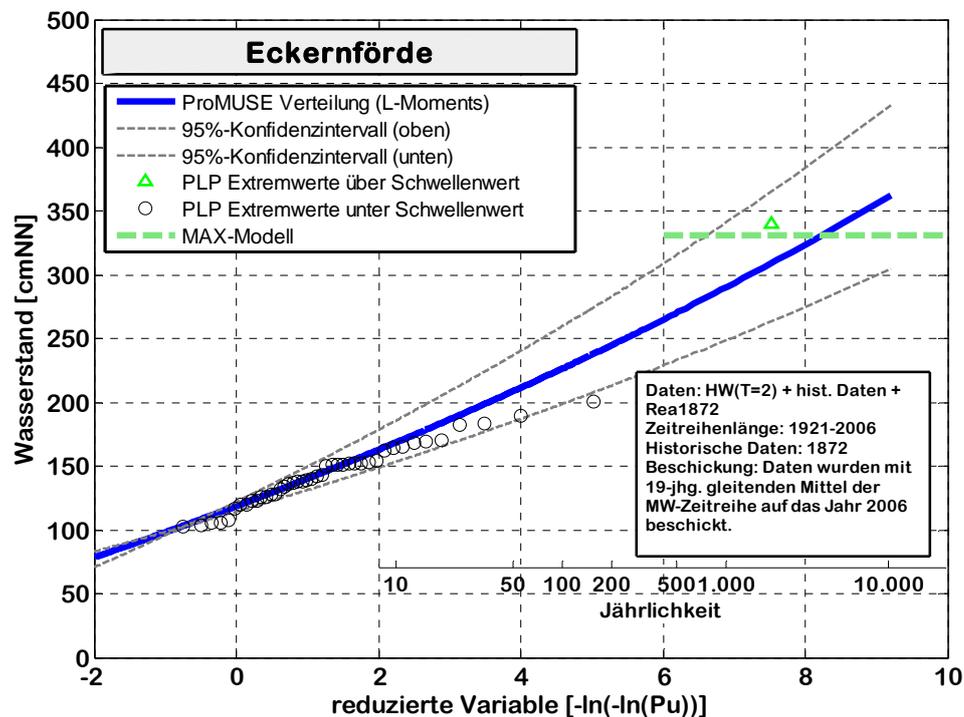


Abbildung A. 8: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Eckernförde, Daten: HW (1921-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872), Reanalyse 1872

### A.3 Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Kiel-Holtenau

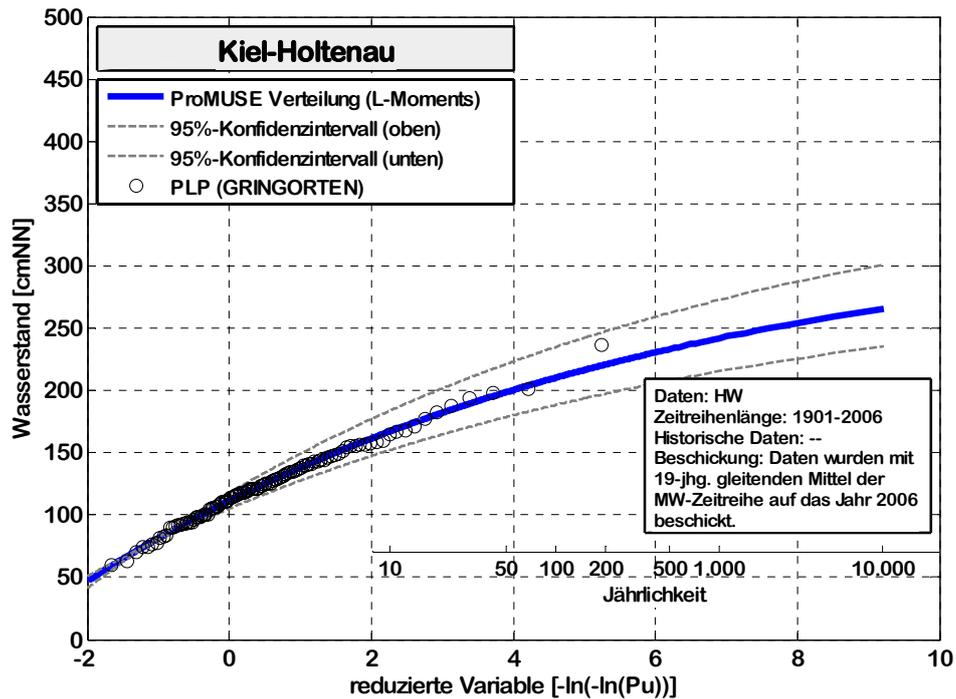


Abbildung A. 9: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Kiel-Holtenau, Daten: HW (1901-2006)

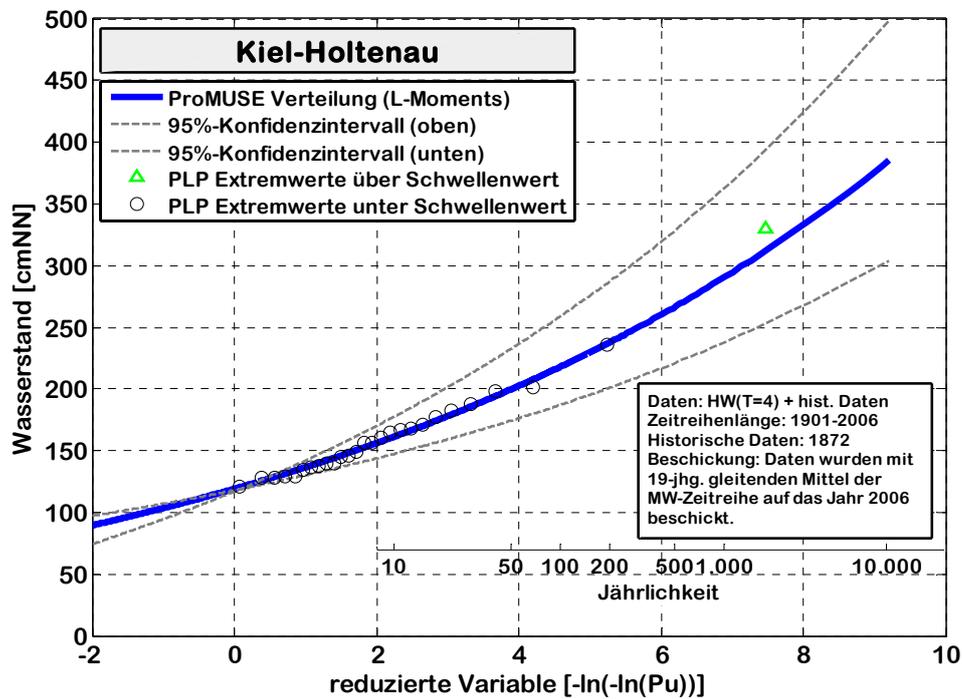


Abbildung A. 10: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Kiel-Holtenau, Daten: HW (1901-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1872)

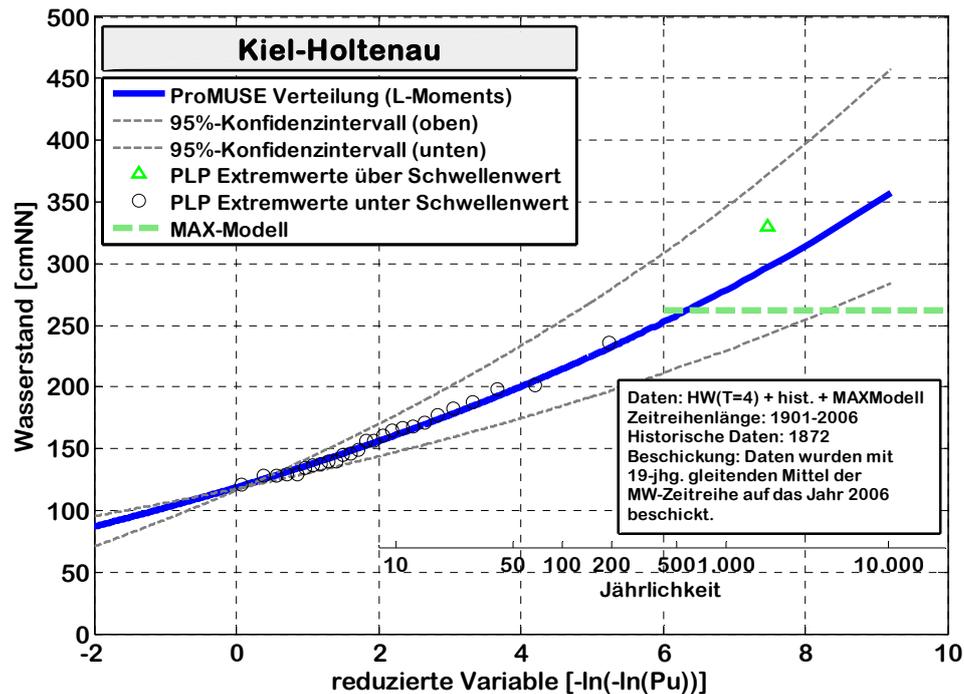


Abbildung A. 11: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Kiel-Holtenau, Daten: HW (1901-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1872), modellierter Maximalwert

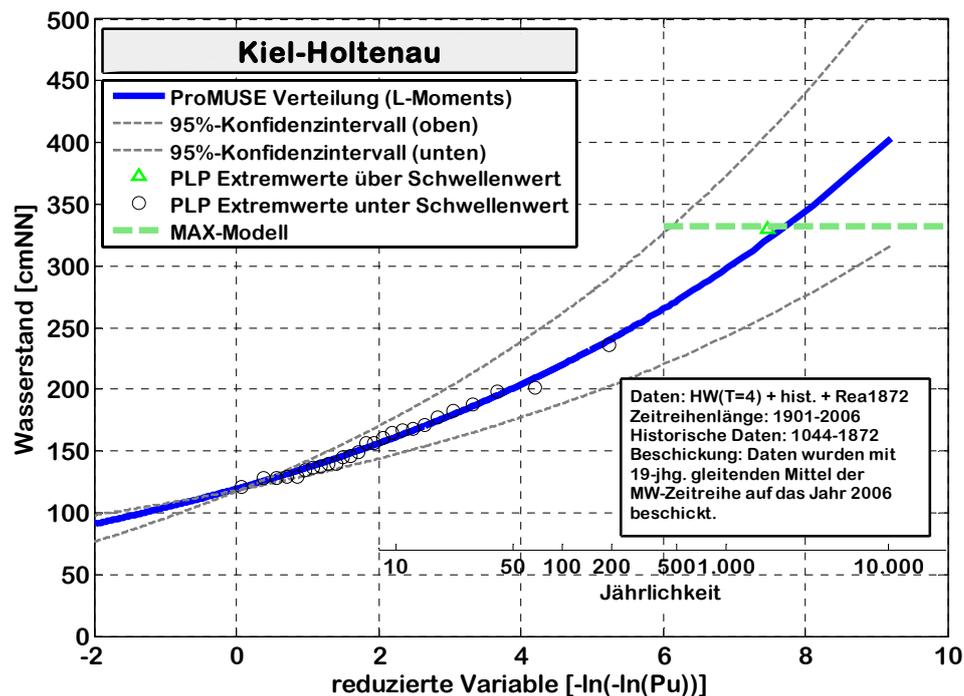


Abbildung A. 12: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Kiel-Holtenau, Daten: HW (1901-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1872), Reanalyse 1872

### A.4 Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Neustadt i.H.

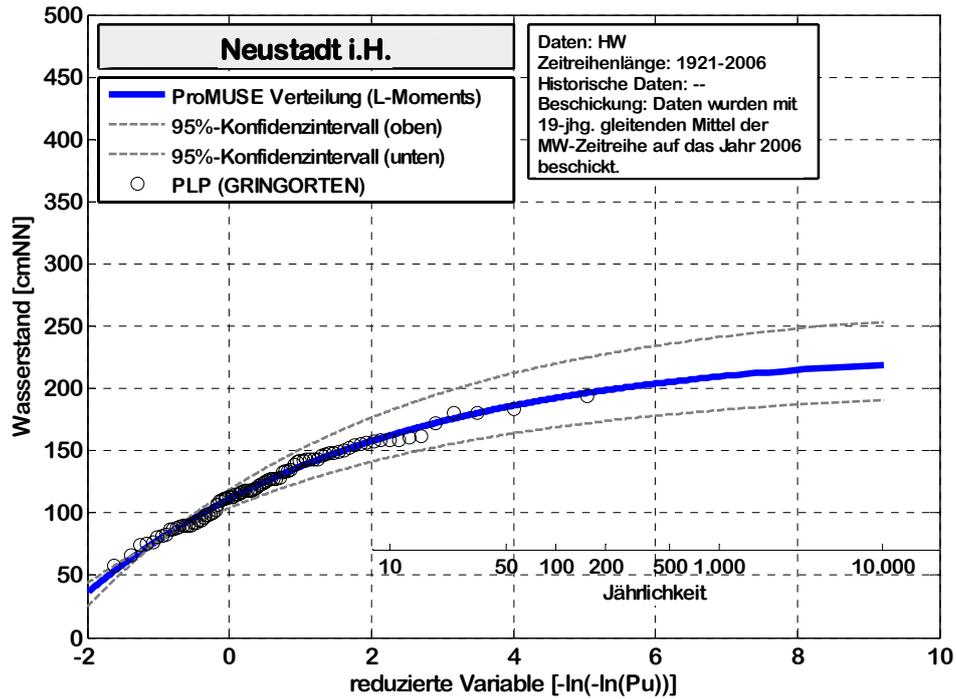


Abbildung A. 13: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Neustadt i.H., Daten: HW (1921-2006)

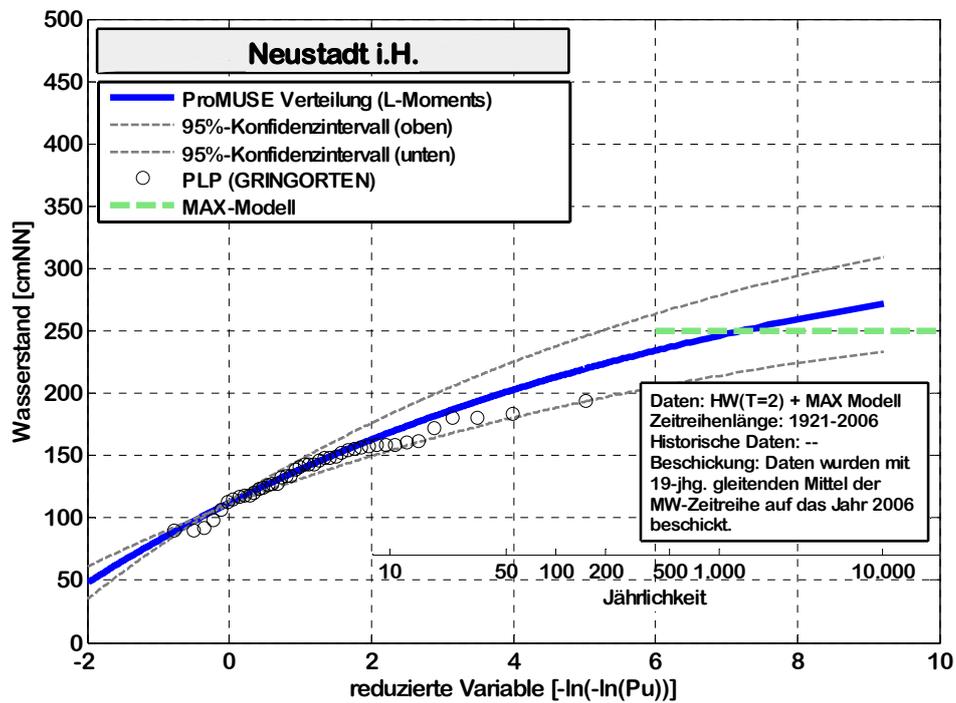


Abbildung A. 14: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Neustadt i.H., Daten: HW (1921-2006, 2-jährliche Extrema), modellierter Maximalwert

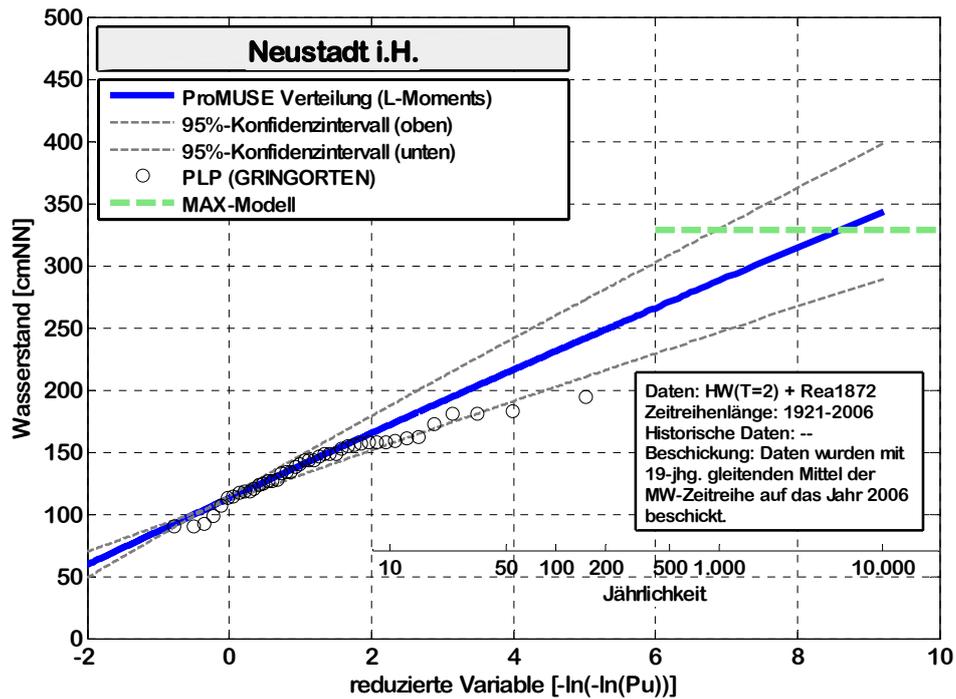


Abbildung A. 15: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Neustadt i.H., Daten: HW (1921-2006, 2-jährliche Extrema), Reanalyse 1872

### A.5 Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Travemünde

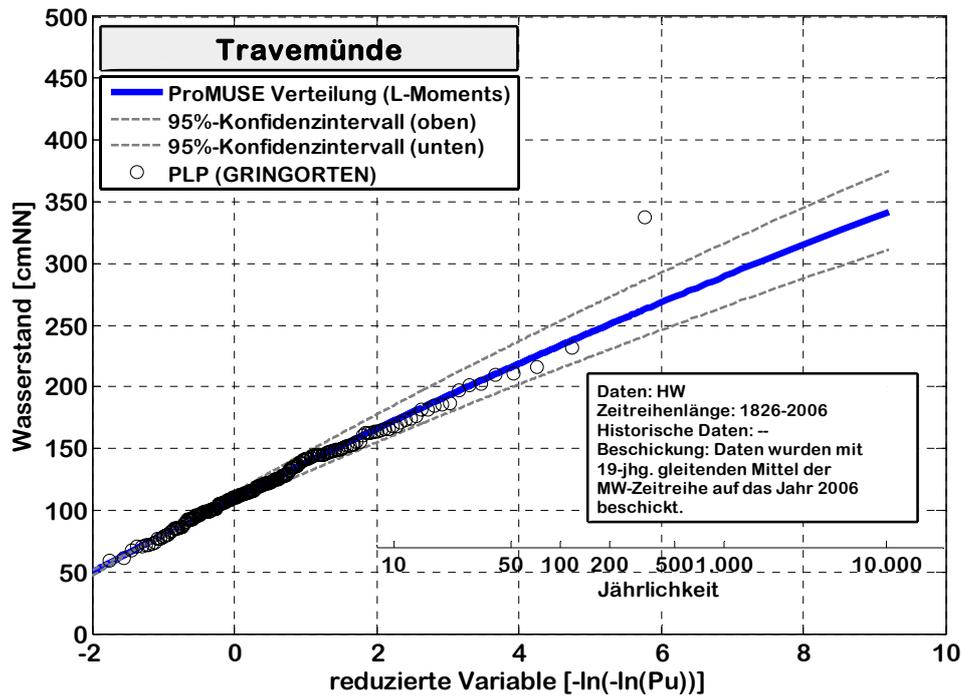


Abbildung A. 16: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Travemünde, Daten: HW (1826-2006)

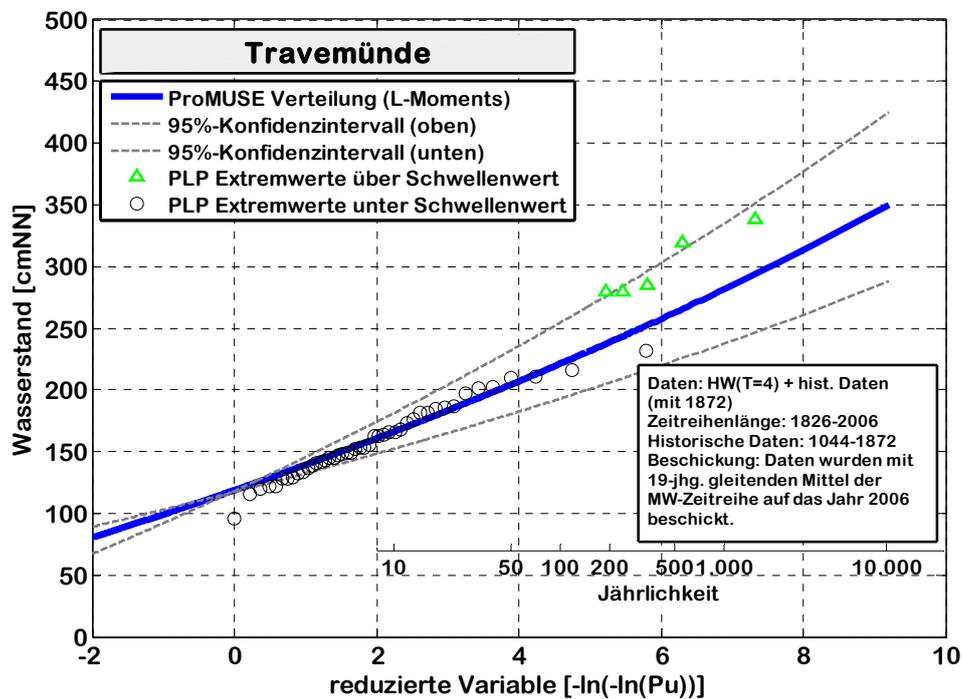


Abbildung A. 17: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Travemünde, Daten: HW (1826-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1044 - 1872)

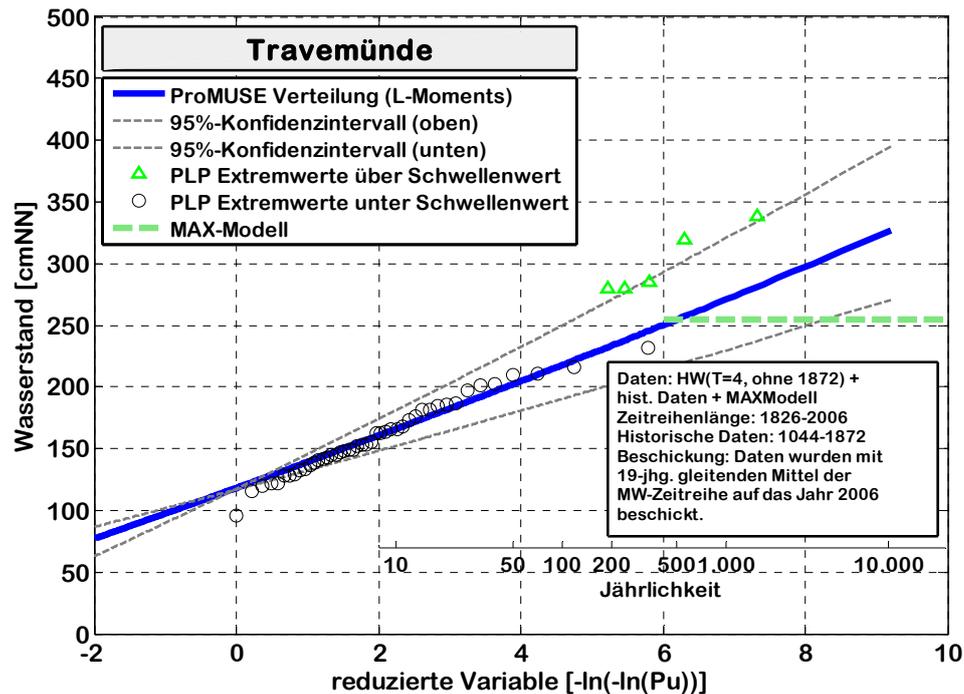


Abbildung A. 18: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Travemünde, Daten: HW (1826-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1044 - 1872), modellierter Maximalwert

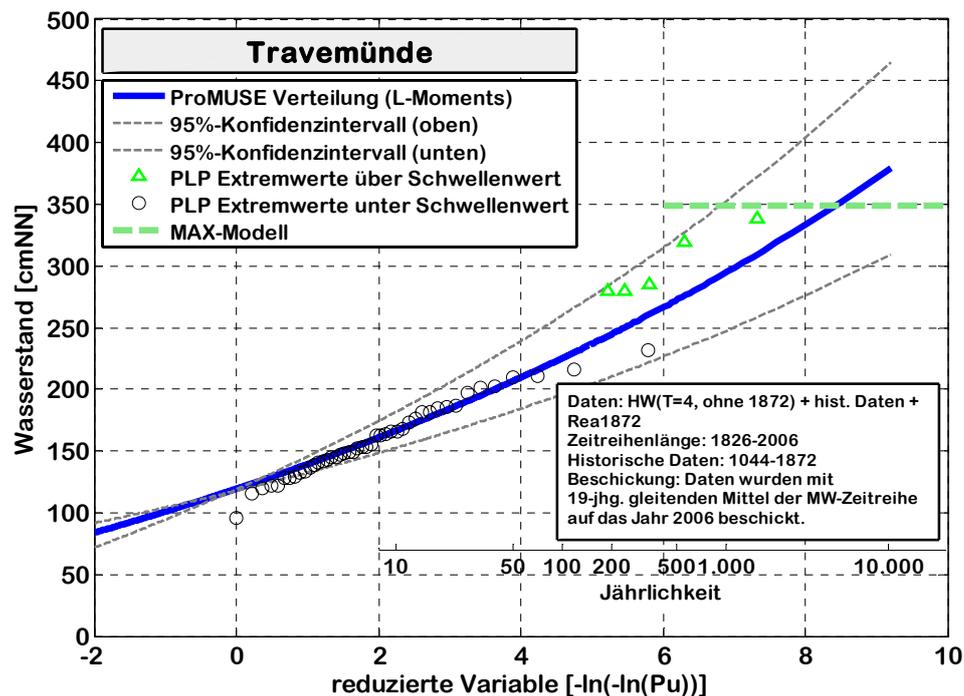


Abbildung A. 19: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Travemünde, Daten: HW (1826-2006, 4-jährliche Extrema), historische Daten (1044 - 1872), Reanalyse 1872

### A.6 Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Wismar

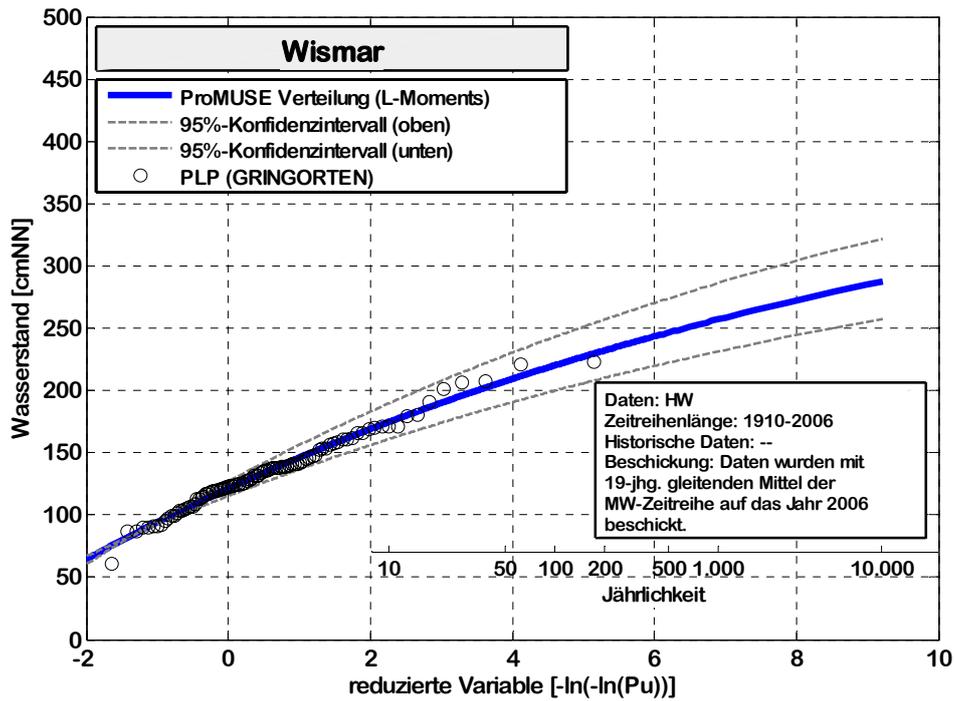


Abbildung A. 20: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Wismar, Daten: HW (1910-2006)

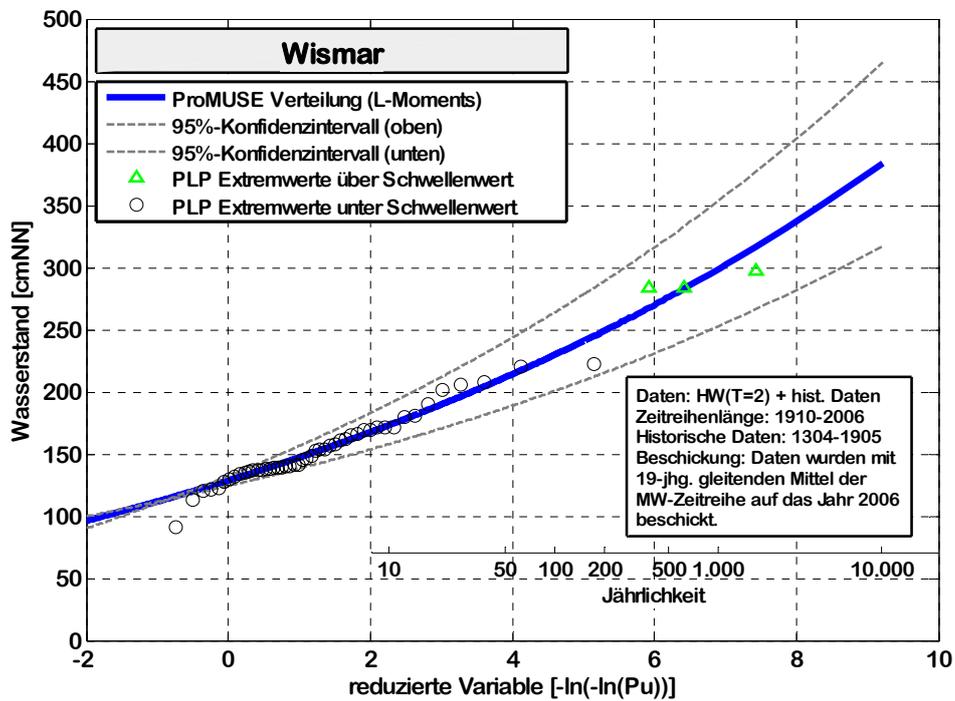


Abbildung A. 21: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Wismar, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304 - 1905)

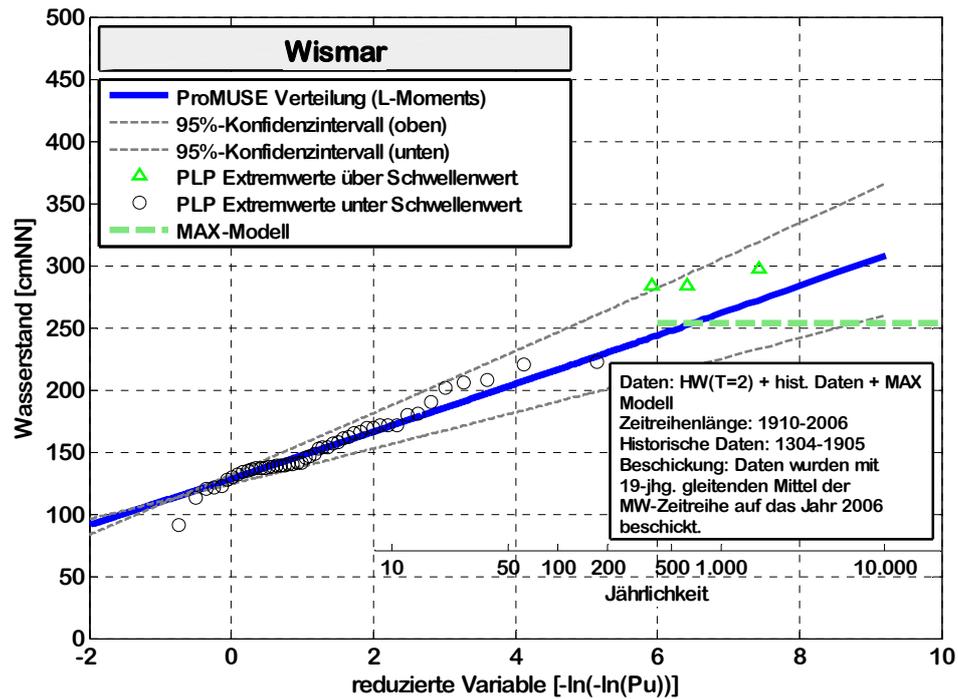


Abbildung A. 22: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Wismar, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304 - 1905), modellierter Maximalwert

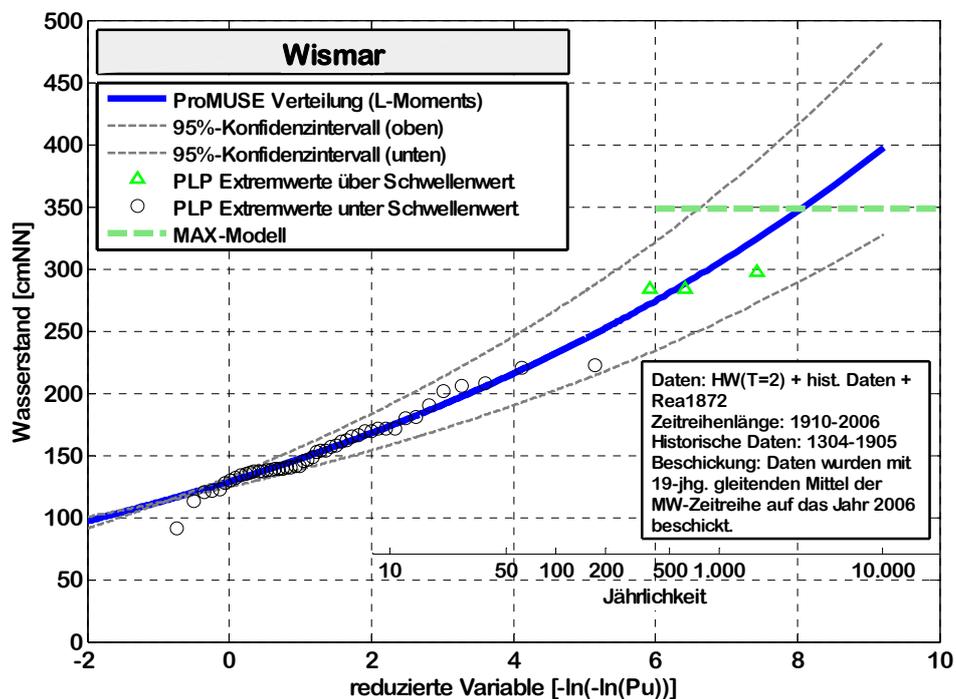


Abbildung A. 23: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Wismar, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304 - 1905), Reanalyse 1872

### A.7 Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Warnemünde

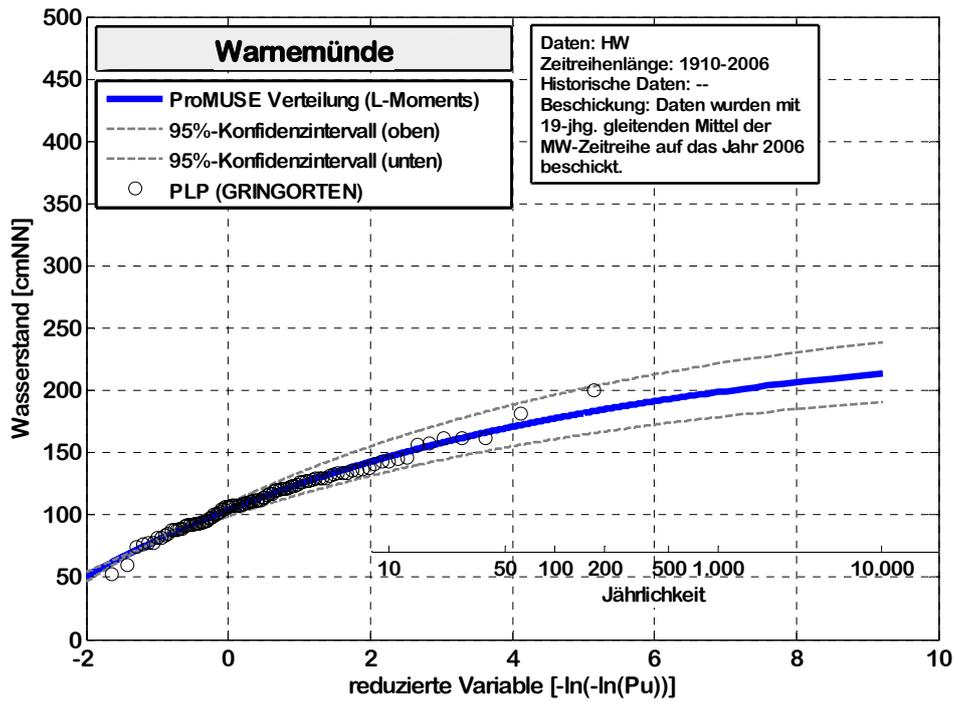


Abbildung A. 24: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Warnemünde, Daten: HW (1910-2006)

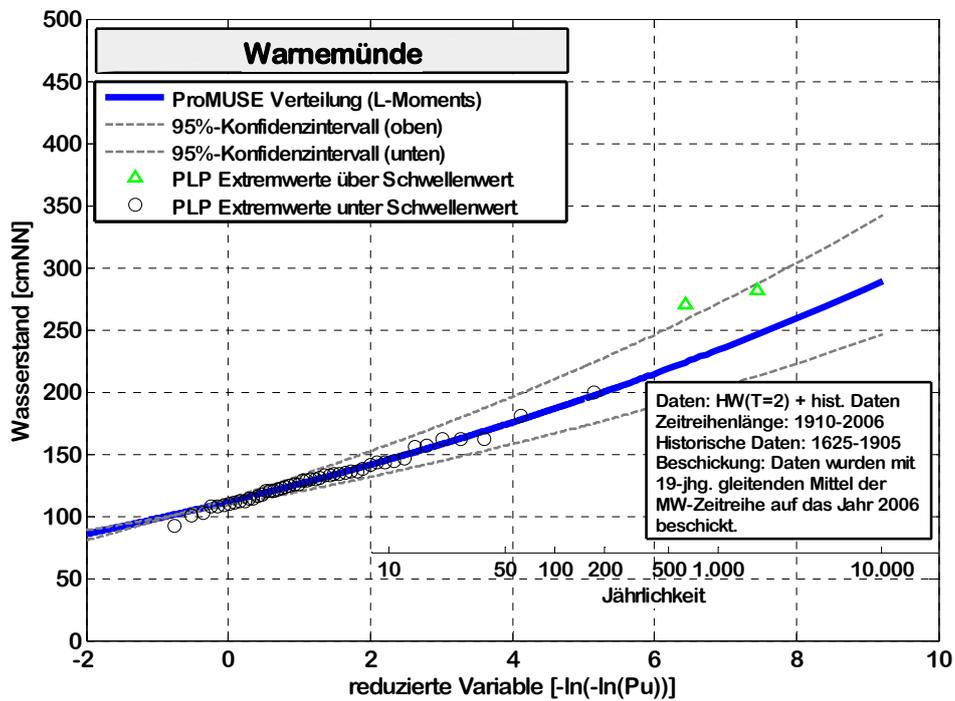


Abbildung A. 25: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Warnemünde, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1625 - 1905)

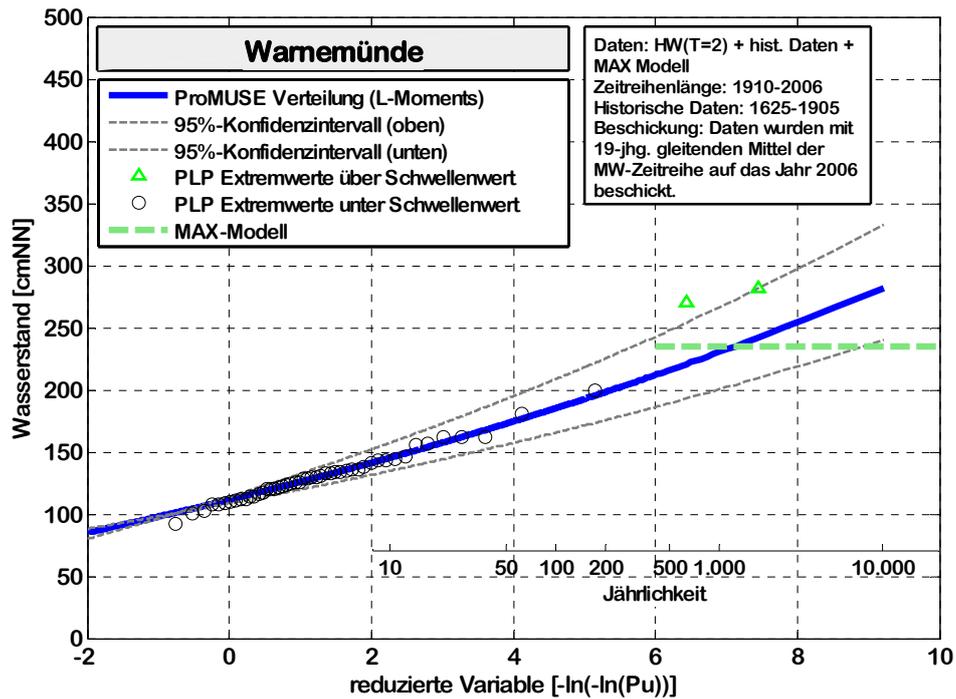


Abbildung A. 26: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Warnemünde, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1625 - 1905), modellierter Maximalwert

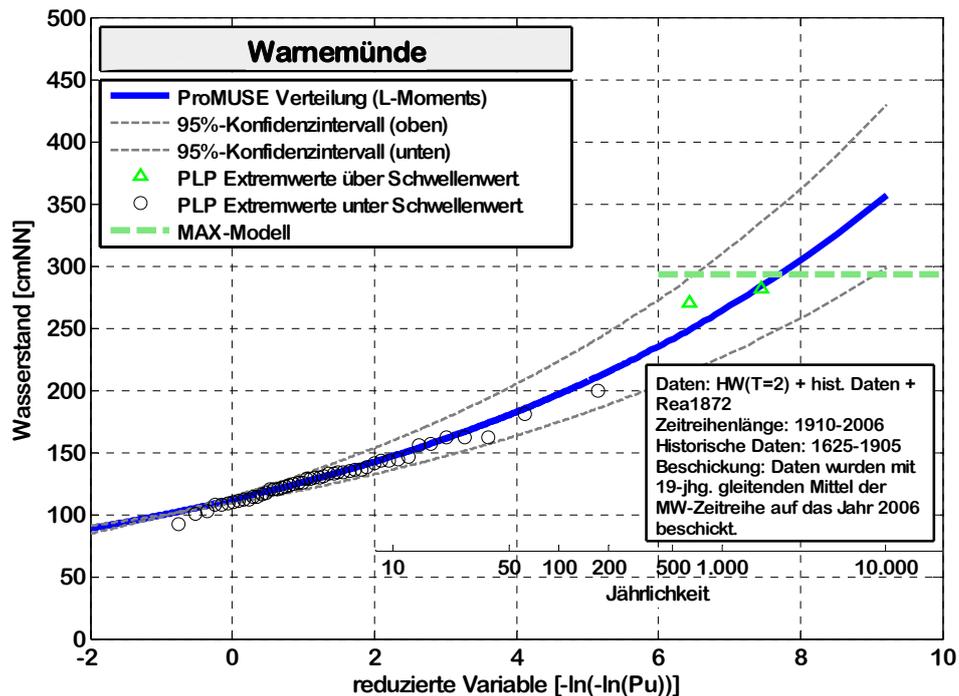


Abbildung A. 27: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Warnemünde, Daten: HW (1910-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1625 - 1905), Reanalyse 1872

### A.8 Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Stralsund

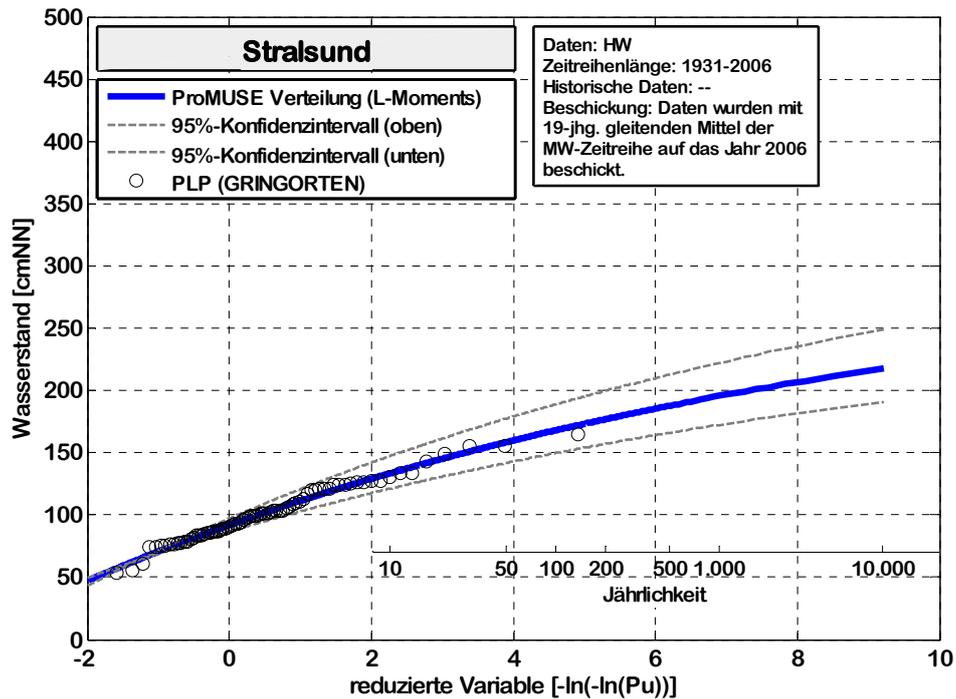


Abbildung A. 28: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Stralsund, Daten: HW (1931-2006)

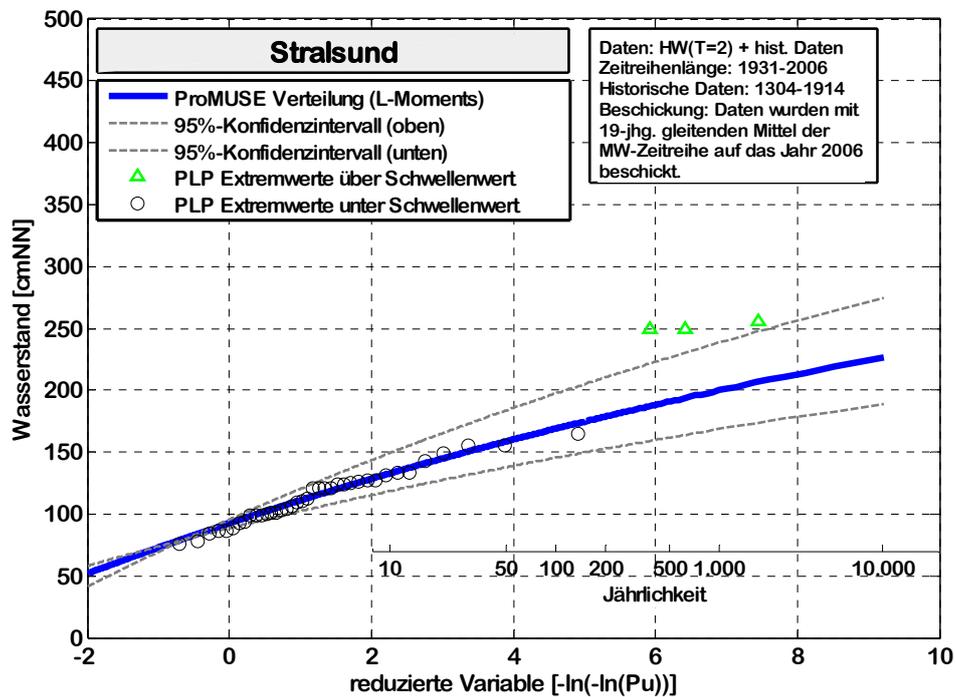


Abbildung A. 29: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Stralsund, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304-1914)

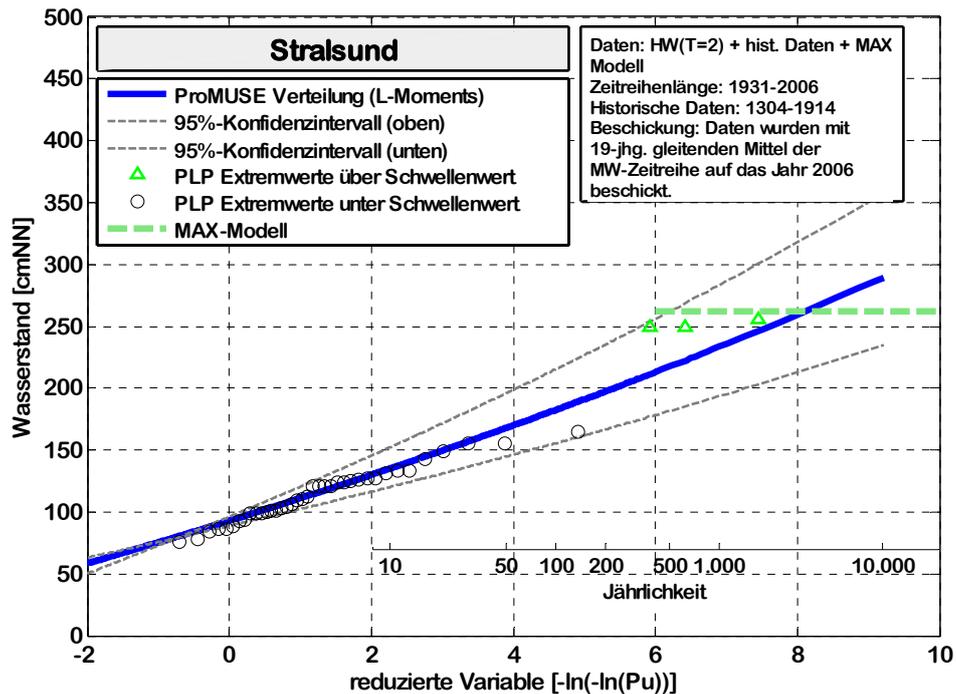


Abbildung A. 30: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Stralsund, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304 - 1914), modellierter Maximalwert

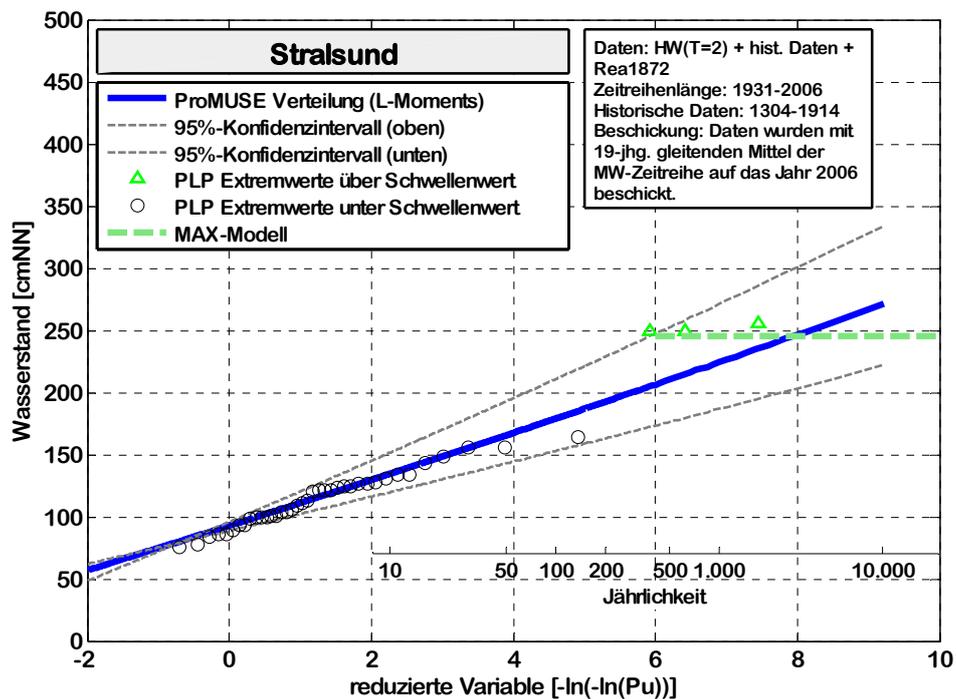


Abbildung A. 31: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Stralsund, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1304 - 1914), Reanalyse 1872

### A.9 Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Sassnitz

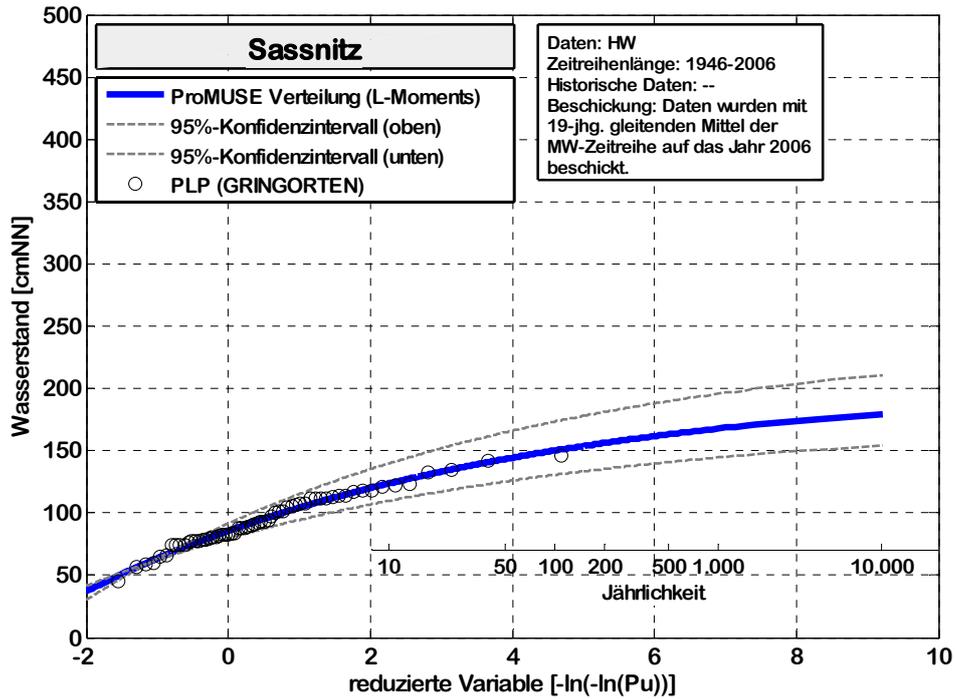


Abbildung A. 32: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Sassnitz, Daten: HW (1946-2006)

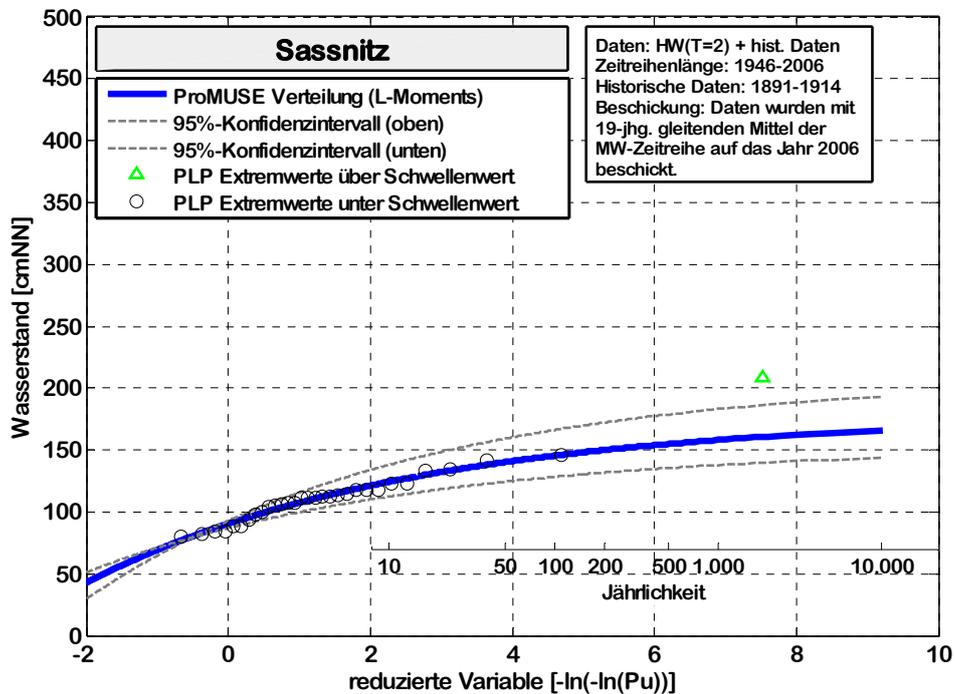


Abbildung A. 33: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Sassnitz, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1891 - 1914)

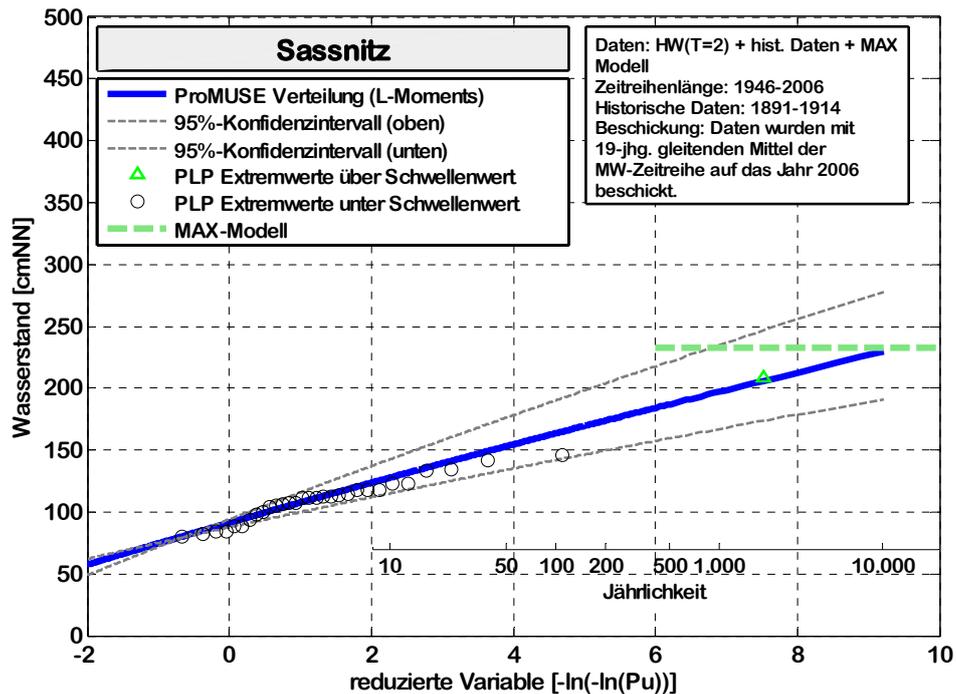


Abbildung A. 34: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Sassnitz, Daten: HW (1946-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1891 - 1914), modellierter Maximalwert

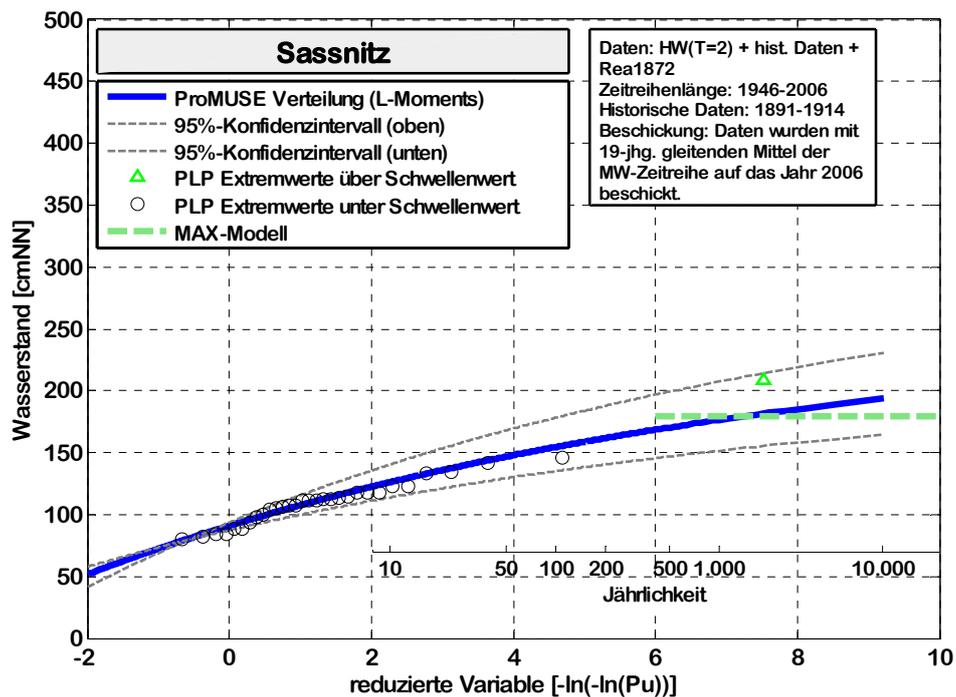


Abbildung A. 35: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Sassnitz, Daten: HW (1946-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1891 - 1914), Reanalyse 1872

### A.10 Ergebnisse der Extremwertstatistik für Pegel Greifswald

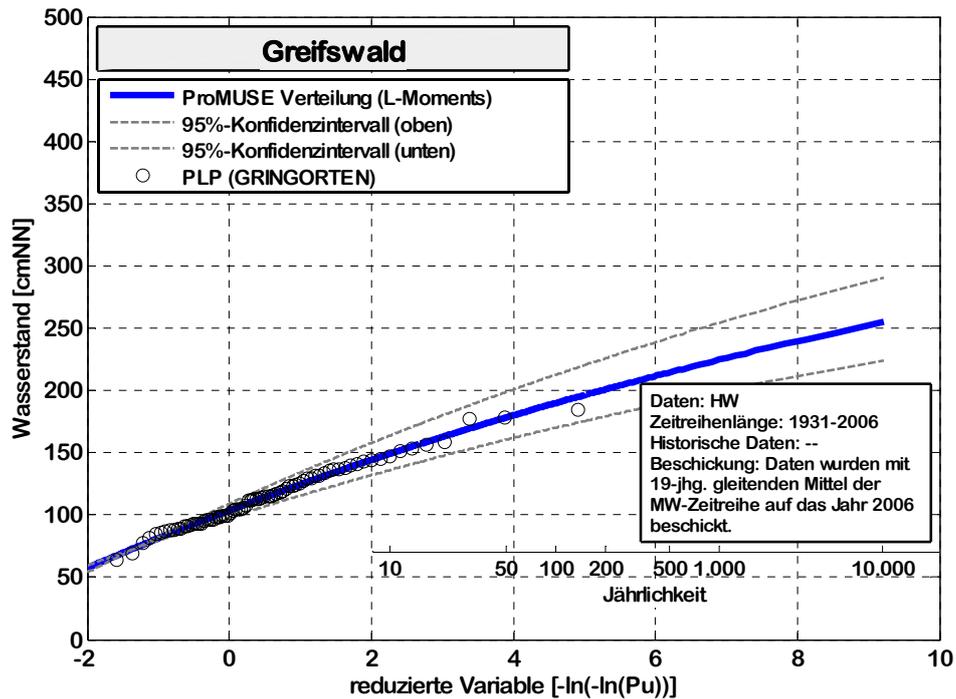


Abbildung A. 36: V1 - Extremwertstatistik des Pegels Greifswald, Daten: HW (1931-2006)

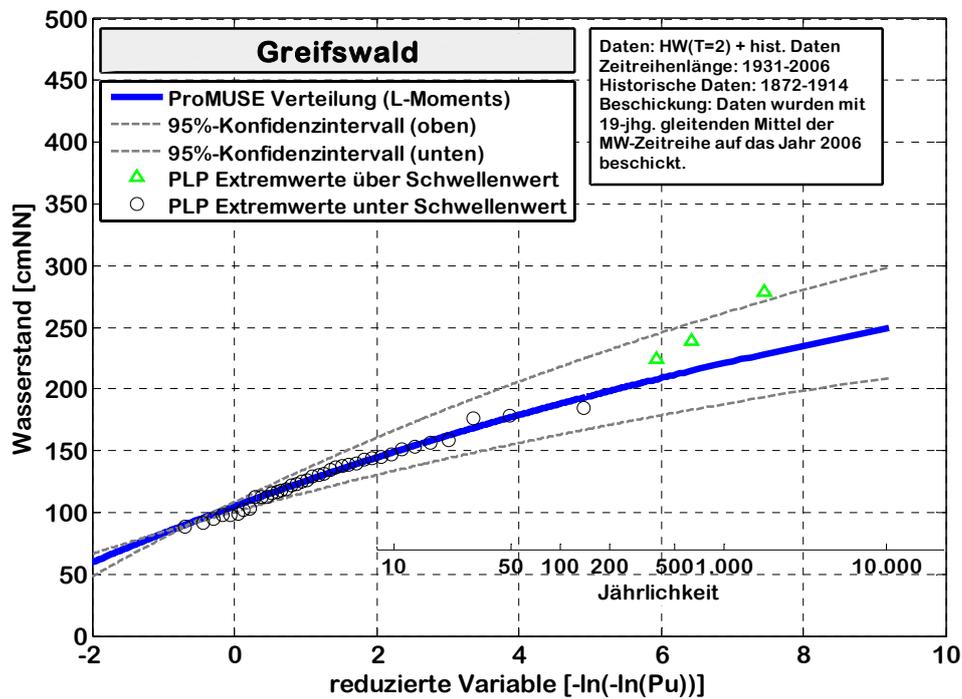


Abbildung A. 37: V2 - Extremwertstatistik des Pegels Greifswald, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872 - 1914)

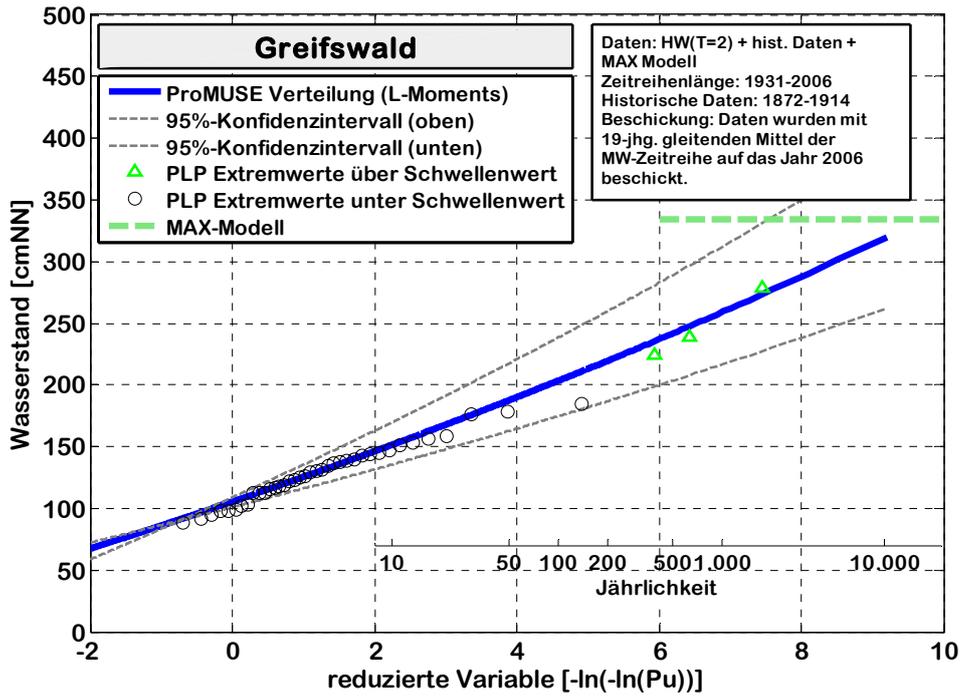


Abbildung A. 38: V3 - Extremwertstatistik des Pegels Greifswald, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872 - 1914), modellierter Maximalwert

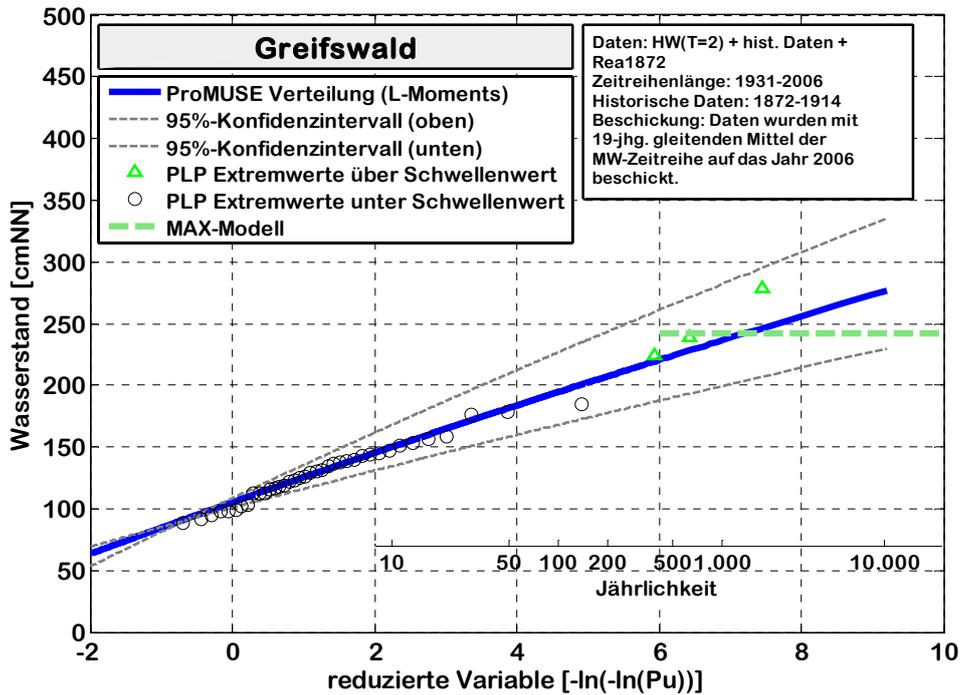


Abbildung A. 39: V4 - Extremwertstatistik des Pegels Greifswald, Daten: HW (1931-2006, 2-jährliche Extrema), historische Daten (1872 - 1914), Reanalyse 1872



## A.11 Tabellarische Übersicht der extremwertstatistischen Analysen

KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)

Teilvorhaben Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmflutereignissen mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Ostseeküste (MUSE Ostsee)

### Ergebnisse der extremwertstatistischen Analysen

Pegel	Variante	Zeitspanne historische Daten (hydrolog. Jahr)	Zeitspanne beobachtete Daten (hydrolog. Jahr)	beobachteter Wert 1872 (beschickt auf 2006)	Reanalyse 1872	Schwellenwert für hist. Daten	Wichtungsfaktor wk	Maximalmodellierter Wert MAX Modell	T-Jahres-Extrema	Wiederkehrintervall 100 Jahre	95%-Konfidenzintervall	Wiederkehrintervall 200 Jahre	95%-Konfidenzintervall	Wiederkehrintervall 500 Jahre	95%-Konfidenzintervall	Wiederkehrintervall 1.000 Jahre	95%-Konfidenzintervall	Wiederkehrintervall 4.000 Jahre	95%-Konfidenzintervall	Wiederkehrintervall 10.000 Jahre	95%-Konfidenzintervall
										[cmIII]	[cmIII]	[cmIII]	[cmIII]	[cmIII]	[cmIII]	[cmIII]	[cmIII]	[cmIII]	[cmIII]	[cmIII]	[cmIII]
Flensburg	beob. Daten	1694-1914	1921 - 2006	327	345	255	1,0	284	1	196	172 - 224	204	178 - 234	213	185 - 245	218	190 - 252	228	198 - 264	233	202 - 271
	beob. Daten + hist. Daten								1	198	177 - 221	207	185 - 232	217	194 - 244	224	199 - 252	236	210 - 267	243	215 - 275
	beob. Daten + hist. Daten + MAX Modell								1	224	200 - 253	241	213 - 272	262	231 - 297	277	244 - 316	308	270 - 352	328	286 - 375
	beob. Daten + hist. Daten + Rea1872								1	233	207 - 262	252	222 - 285	277	244 - 315	296	260 - 338	334	292 - 384	360	313 - 414
Eckernförde	beob. Daten	1873	1921 - 2006	340	331	330	1,0	263	1	195	170 - 225	201	175 - 232	208	180 - 240	212	183 - 245	217	188 - 252	220	190 - 256
	beob. Daten + hist. Daten								2	198	176 - 223	206	182 - 233	215	190 - 245	221	195 - 253	232	203 - 267	238	208 - 274
	beob. Daten + hist. Daten + MAX Modell								2	214	189 - 244	227	199 - 261	245	213 - 283	258	223 - 299	283	243 - 331	298	255 - 352
	beob. Daten + hist. Daten + Rea1872								2	227	199 - 260	245	213 - 284	271	233 - 316	291	249 - 342	333	282 - 395	362	305 - 433
Kiel-Holtenau	beob. Daten	1873	1901 - 2006	330	332	320	0,3	262	1	210	188 - 235	221	197 - 247	233	208 - 262	242	215 - 273	257	228 - 291	266	235 - 301
	beob. Daten + hist. Daten								4	218	187 - 259	238	201 - 288	267	222 - 329	291	238 - 364	345	276 - 441	385	304 - 499
	beob. Daten + hist. Daten + MAX Modell								4	215	185 - 254	233	198 - 280	259	215 - 317	279	230 - 346	324	261 - 411	357	284 - 458
	beob. Daten + hist. Daten + Rea1872								4	220	189 - 262	242	204 - 293	273	225 - 337	298	243 - 374	358	285 - 459	403	317 - 524
Neustadt	beob. Daten	1921 - 2006	329	250	0,85	250	0,85	250	1	192	169 - 220	199	174 - 228	205	179 - 236	210	183 - 241	216	188 - 249	219	190 - 254
	beob. Daten + hist. Daten								2	210	182 - 247	226	192 - 270	247	207 - 300	263	219 - 324	298	243 - 373	322	260 - 408
	beob. Daten + hist. Daten + Rea1872								2	231	202 - 260	248	216 - 281	271	233 - 309	288	246 - 330	322	272 - 371	344	289 - 398
Travemünde	beob. Daten	1044 - 1784	1826 - 2006	338	349	279	0,3	255	1	234	215 - 254	251	231 - 273	273	251 - 298	290	265 - 317	322	294 - 353	342	312 - 375
	beob. Daten + hist. Daten								4	222	193 - 255	239	206 - 278	263	224 - 310	282	238 - 336	322	267 - 388	350	288 - 425
	beob. Daten + hist. Daten + MAX Modell								4	218	191 - 250	234	202 - 271	255	218 - 300	271	230 - 321	304	254 - 365	327	271 - 395
	beob. Daten + hist. Daten + Rea1872								4	226	196 - 260	245	211 - 287	273	231 - 324	295	248 - 353	344	284 - 418	379	310 - 465
Wismar	beob. Daten	1304 - 1905	1910 - 2006	297	348	260	0,7	254	1	220	200 - 243	232	210 - 257	247	223 - 274	257	231 - 286	276	248 - 309	288	257 - 322
	beob. Daten + hist. Daten								2	230	201 - 264	249	215 - 289	277	236 - 325	299	253 - 354	348	290 - 418	384	317 - 465
	beob. Daten + hist. Daten + MAX Modell								2	216	190 - 246	230	201 - 264	248	214 - 287	262	225 - 305	289	246 - 342	308	260 - 366
	beob. Daten + hist. Daten + Rea1872								2	232	202 - 267	252	218 - 293	281	240 - 331	305	258 - 362	358	298 - 431	398	328 - 483
Warnemünde	beob. Daten	1625 - 1905	1910 - 2006	270	293	250	0,7	235	1	178	161 - 197	185	167 - 205	193	174 - 215	199	179 - 222	208	187 - 233	213	191 - 239
	beob. Daten + hist. Daten								2	187	167 - 210	200	177 - 228	219	192 - 252	234	203 - 271	266	228 - 313	289	246 - 342
	beob. Daten + hist. Daten + MAX Modell								2	185	166 - 209	198	176 - 225	216	189 - 248	230	200 - 267	261	224 - 305	282	240 - 333
	beob. Daten + hist. Daten + Rea1872								2	197	174 - 223	215	188 - 247	242	209 - 281	264	227 - 310	317	267 - 377	357	298 - 429
Stralsund	beob. Daten	1304 - 1914	1931 - 2006	256	245	245	0,7	262	1	168	150 - 189	177	157 - 200	188	166 - 213	195	172 - 222	209	184 - 239	218	191 - 249
	beob. Daten + hist. Daten								2	169	145 - 197	179	153 - 210	191	162 - 227	200	169 - 239	217	181 - 261	227	189 - 274
	beob. Daten + hist. Daten + MAX Modell								2	182	155 - 215	197	167 - 235	218	182 - 262	234	194 - 283	267	218 - 327	289	235 - 358
	beob. Daten + hist. Daten + Rea1872								2	179	153 - 211	193	163 - 229	211	177 - 253	224	187 - 271	253	208 - 309	271	222 - 334
Sassnitz	beob. Daten	1891 - 1914	1946 - 2006	179	200	200	0,7	233	1	150	131 - 173	156	135 - 181	163	141 - 190	168	145 - 196	176	151 - 206	180	154 - 211
	beob. Daten + hist. Daten								2	146	128 - 166	150	132 - 172	155	136 - 179	158	138 - 183	163	142 - 190	166	144 - 193
	beob. Daten + hist. Daten + MAX Modell								2	163	142 - 190	174	150 - 204	187	160 - 222	197	167 - 235	217	182 - 261	229	191 - 277
	beob. Daten + hist. Daten + Rea1872								2	155	135 - 178	162	141 - 188	170	147 - 199	177	152 - 207	187	160 - 222	194	165 - 230
Greifswald	beob. Daten	1873 - 1914	1931 - 2006	279	242	200	0,5	334	1	190	170 - 213	201	179 - 226	215	191 - 242	225	199 - 254	243	215 - 277	255	224 - 291
	beob. Daten + hist. Daten								2	188	163 - 218	199	171 - 232	212	181 - 249	221	188 - 262	238	201 - 285	249	209 - 299
	beob. Daten + hist. Daten + MAX Modell								2	204	175 - 239	220	187 - 260	242	204 - 290	260	217 - 313	295	244 - 360	320	262 - 393
	beob. Daten + hist. Daten + Rea1872								2	195	168 - 227	208	178 - 244	224	190 - 266	237	200 - 282	261	218 - 314	277	230 - 335