

Untersuchungen zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen mit Verfahren der instationären Extremwertstatistik

Methoden und Anwendungen auf Pegelwasserstände an der
Deutschen Nord- und Ostseeküste



Vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Siegen genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. Christoph Mudersbach

geboren am 26.06.1977 in Siegen

Referent: **Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen**
Universität Siegen

Korreferent: **Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf**
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Tag der Einreichung: 28.04.2009

Tag der mündlichen Prüfung: 16.07.2009

Kurzfassung

Viele Küstenregionen sind potenziell durch die Auswirkungen des globalen Klimawandels gefährdet, der sich im Anstieg des Meeresspiegels sowie teilweise in der Zunahme der Sturmfluthäufigkeit und -intensität zeigt.

Die Bemessung von Küstenschutzanlagen basiert in vielen Fällen auf Wasserständen, denen Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. Jährlichkeiten zugeordnet werden. Heute gebräuchlich sind Bemessungswerte mit Jährlichkeiten zwischen 100 und 10.000 Jahren. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten werden aus beobachteten Wasserstandsdaten mit Verfahren der Extremwertstatistik abgeleitet, wobei nicht nur Aussagen zu heutigen Zuständen, sondern auch zu zukünftigen Zeithorizonten getroffen werden müssen. Die klassischen statistischen Verfahren setzen voraus, dass die Zeitreihe der Wasserstände stationär (*über die Zeit konstant*) ist. Die Annahme von stationären Wasserstandszeitreihen kann im Zuge des Klimawandels unzutreffend sein. Liegt ein signifikantes instationäres Verhalten einer Zeitreihe vor, so können die klassischen stationären Methoden der Extremwertstatistik nicht verwendet werden. Entweder müssen die Instationaritäten aus den Zeitreihen entfernt werden, oder die Verfahren müssen auf einen instationären Ansatz erweitert werden. Die vorliegende Arbeit stellt eine Methodik zur Ermittlung von möglichen zukünftigen Änderungen in den Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen vor, bei der Trends in den Zeitreihen direkt bei der Ermittlung der Bemessungswerte berücksichtigt werden.

Die Abschätzung zukünftiger Eintrittswahrscheinlichkeiten ist mit einem instationären Ansatz der Allgemeinen Extremwertverteilung (GEV) möglich, wobei ein parametrischer Ansatz gewählt werden muss, um die Ergebnisse bis zu einem zukünftigen Zeithorizont extrapolieren zu können. Die Parameterschätzung erfolgt hierbei mit Hilfe einer zeitfensterbasierten Schätzung der L-Momente. Die L-Momente werden durch funktionale Zusammenhänge (linear oder nichtlinear) beschrieben und in die Zukunft extrapoliert. Dies wird als parametrischer Ansatz bezeichnet. Durch die vorgestellte Methodik können zu jedem beliebigen Zeitpunkt t die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen angegeben werden.

Anwendungen des instationären Extremwertansatzes auf die Pegel Cuxhaven (Nordsee) und Travemünde (Ostsee) zeigen, dass die Lageparameter der untersuchten jährlichen Extremwertzeitreihen in der Regel einen steigenden Trend aufweisen. An beiden Pegeln wird mittels des instationären Extremwertansatzes die Veränderung des 100-jährlichen Wasserstandes bis zum Jahr 2100 abgeschätzt. Zusätzlich wurden die Auswirkungen von möglichen Klimaszenarien auf zukünftige Bemessungswasserstände analysiert.

Grundsätzlich wird aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit empfohlen, die vorgestellte instationäre Extremwertmethode für die Abschätzung von zukünftigen Bemessungswerten zu verwenden.

Abstract

Many coastal regions are faced with the global climate change, which has effects on sea level rise and partially on increasing storm surge frequency and heights.

The design of coastal defence structures is mainly based upon water levels to which a certain occurrence probability (return period) is assigned. Nowadays, design levels with a return period between 100 and 10,000 years are common. The determination of the occurrence probabilities is done by an analysis of observed water level data based upon extreme value statistics. Thereby, not only statements of the actual occurrence probabilities are required, but also for future time horizons. The common statistical methods postulate a stationary behaviour (*no changes through time*) of the water level data, which needs to be analysed. However, in the context of climate change, it is possible, that this assumption would no longer hold and the results become doubtful. If a significant non-stationary behaviour of the water level data exists, the common statistical stationary methods may not be used any more. Either the non-stationarities have to be removed or the non-stationarities need to be integrated directly into the extreme value analysis. The present study introduces a method, where trends in the observed data can be integrated directly into the extreme value analysis, in order to determine future design water levels.

The projection of future design water levels can be realised by using a non-stationary approach of the Generalized Extreme Value (GEV) distribution. Thereby, a parametric approach for the parameter estimation have been applied in order to extrapolate the results to future time horizons. The parameter estimation has been realised by L-moments, based on time windows. The non-parametric processes of the L-moments have been described by functional relations in order to extrapolate them. This is called a parametric approach. By use of the introduced method it is possible to specify a T-year design level at any point of time.

Applications of the non-stationary method to the gauges Cuxhaven (North Sea) and Travemünde (Baltic Sea) show, that the location parameters of the analysed water level time series have a significant increasing trend. For both gauges the 100-year design levels have been calculated up to the time horizon 2100 by using the introduced non-stationary extreme value approach. Additionally, effects of projected climate scenarios on future design water levels have been analysed.

On basis of the presented results, the non-stationary extreme value approach may be recommended to determine future design water levels.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund und Veranlassung	1
1.2	Forschungsfragen und Zielsetzung	3
1.3	Struktur der Arbeit	5
1.4	Verwendete Daten	6
2	Stand der Wissenschaft zur Extremwertstatistik	8
2.1	Vorbemerkungen	8
2.2	Stationäre Methoden	8
2.3	Instationäre Methoden	12
2.4	Zusammenfassung und kritische Bewertung	18
3	Definitionen	20
3.1	Wahrscheinlichkeit	20
3.2	Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit	21
3.3	Eintrittswahrscheinlichkeit und Jährlichkeit	22
3.4	Risiko und Sicherheit	25
4	Erfordernis der Analyse von Eintrittswahrscheinlichkeiten	27
4.1	Allgemeines	27
4.2	Prozesse zur Entstehung einer Überflutung	28
4.3	Grundlagen zu probabilistischen Methoden	31
4.3.1	Probabilistische Bemessung nach Level I	33
4.3.2	Probabilistische Bemessung nach Level II und III	34
4.3.3	Probabilistische Bemessung nach Level IV	36
4.4	Zusammenfassung und kritische Bewertung	37
5	Zeitreihenanalysen	38
5.1	Allgemeines	38
5.2	Statistische Kenngrößen einer Zeitreihe	39
6	Stationarität und Unabhängigkeit von Zeitreihen	45
6.1	Allgemeines	45
6.2	Definition von Stationarität	46
6.3	Test auf Stationarität einer Zeitreihe	50
6.3.1	Allgemeines	50
6.3.2	Linearer Trend	52
6.3.3	Kolmogorov-Smirnov-Test	55
6.3.4	Zeitliche Entwicklung von Mittelwert und Standardabweichung	62
6.4	Test auf Unabhängigkeit einer Zeitreihe	70
6.5	Zusammenfassung und kritische Bewertung	73
7	Homogenisierung von Zeitreihen	75
7.1	Allgemeines	75
7.2	Homogenisierung über linearen Trend	77
7.3	Homogenisierung über gleitendes Mittel	78
7.4	Homogenisierung über Differenzenbildung	80

7.5	Auswirkungen von Instationaritäten des Lageparameters auf die Ergebnisse der stationären Extremwertstatistik	81
7.6	Zusammenfassung und kritische Bewertung	85
8	Stationäre Extremwertstatistik	86
8.1	Allgemeines	86
8.2	Rangstatistik und empirische Verteilungsfunktionen	87
8.3	Allgemeine Extremwertverteilung	89
8.4	Parameterschätzung der GEV	91
8.4.1	Allgemeines	91
8.4.2	Momentenmethode	92
8.4.3	Wahrscheinlichkeitsgewichtete Momente und L-Momente	93
8.4.4	Maximum-Likelihood-Schätzung	95
8.5	Extrapolation von Verteilungsfunktionen	96
8.6	Einbeziehung physikalischer Grenzzustände in die Extremwertanalyse	98
8.7	Einbeziehung historischer Ereignisse in die Extremwertanalyse	100
8.8	Integrierte stationäre Extremwertstatistik	104
8.9	Zusammenfassung und kritische Bewertung	106
9	Instationäre Extremwertstatistik	107
9.1	Allgemeines	107
9.2	Instationäre GEV-Verteilung	111
9.3	Methode der nicht-parametrischen instationären Extremwertstatistik	113
9.4	Methode der parametrischen instationären Extremwertstatistik	119
9.5	Einbeziehung von Klimaszenarien in die instationäre Extremwertstatistik	124
9.6	Zusammenfassung und kritische Bewertung	129
10	Unsicherheiten in Extremwertanalysen	130
10.1	Definition von Unsicherheiten	130
10.2	Quellen von Unsicherheiten	131
10.3	Rechnen mit Unsicherheiten	133
10.4	Beschreibung und Darstellung von Unsicherheiten	135
11	Anwendungen auf den Pegel Cuxhaven	137
11.1	Allgemeines	137
11.2	Test auf Stationarität	139
11.3	Stationäre vs. instationäre Extremwertstatistik	142
12	Anwendungen auf den Pegel Travemünde	149
12.1	Allgemeines	149
12.2	Test auf Stationarität	150
12.3	Stationäre vs. instationäre Extremwertstatistik	154
13	Fazit	162
13.1	Diskussion der erzielten Ergebnisse	162
13.2	Zielerfüllung und Antworten auf die Forschungsfragen	165
13.3	Offene Fragen und Forschungsbedarf	167
14	Zusammenfassung	169
15	Literatur	171

A	Anhang	179
A.1	Matlab-Skripte	179
A.2	Daten	180

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Veranlassung

Viele Küstenregionen sind potenziell durch die Auswirkungen des globalen Klimawandels gefährdet, der sich im Anstieg des Meeresspiegels sowie teilweise in der Zunahme der Sturmfluthäufigkeit und -intensität zeigt (vgl. MÜNCHENER RÜCK 2005, WOTH ET AL. 2006, BINDOFF ET AL. 2007, JENSEN UND MUDERSBACH 2007a, MEEHL ET AL. 2007, NICHOLLS ET AL. 2007, GROSSMANN ET AL. 2007). Die Folgen einer verstärkten Gefährdung der Küstengebiete sind schwerwiegend, da etwa 23% der Weltbevölkerung weniger als 100 km von der Küste entfernt leben (Höhenniveau: <100 m über Meeresspiegel) und diese Gebiete eine dreifach höhere Bevölkerungsdichte aufweisen als im weltweiten Mittel (NICHOLLS ET AL. 2007).

Um den schon immer vorhandenen Gefährdungen der Küsten und den zukünftig durch Klimaveränderung zu erwartenden Gefährdungen (z.B. Meeresspiegelanstieg, Veränderung der Sturmflutdynamik) entgegenzuwirken, sind Küstenschutzkonzepte und mittel- bis langfristige Anpassungsstrategien notwendig, die den entsprechenden sozio-ökonomischen und ökologischen Gegebenheiten in den Küstenregionen Rechnung tragen. Küstenschutz hat somit die Aufgabe, eine nachhaltige Wertschöpfung und ein dauerhaftes Siedeln in Küstenregionen zu gewährleisten, wobei die erforderlichen Maßnahmen in einem ökologisch verträglichen Gesamtkonzept integriert sein müssen.

Für die Belange des Küstenschutzes sind insbesondere Erkenntnisse über die Entwicklung des mittleren Meeresspiegelanstieges und über gegenwärtige und zukünftige Sturmfluthöhen bzw. -häufigkeiten von Bedeutung. Die Methoden zur Bemessung von Küstenschutzanlagen basieren neben anderen Faktoren auf einem definierten Bemessungswasserstand, der von amtlicher Seite festgelegt wird. Bemessungswasserstände werden im Allgemeinen durch Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Jährlichkeiten T definiert. Heute gebräuchlich sind Bemessungswerte mit Jährlichkeiten zwischen 100 und 10.000 Jahren (z.B. EAK 2007). Die zugeordneten Wasserstände werden über statistische Analysen von beobachteten Wasserstandszeitreihen abgeleitet. Dabei werden in der Regel nicht alle Wasserstände, sondern nur die höchsten Werte in einem Zeitraum (z.B. einem Jahr) oder all jene über einem vorgegebenen Schwellenwert einer extremwertstatistischen Analyse zugeführt. Die Ergebnisse der Statistik sind zunächst für den gegenwärtigen Zeitpunkt gültig. Für Bauwerke müssen jedoch Aussagen zu Bemessungswerten über die gesamte Lebensdauer des Bauwerkes

getroffen werden. Es muss also abgeschätzt werden, wie sich die Bemessungswerte über die Zeit verändern können.

Aus der Analyse von beobachteten Wasserstandsdaten ist vielfach zu erkennen, dass signifikante Trends in den Zeitreihen vorhanden sind, sodass erwartet werden kann, dass auch zukünftig Änderungen auftreten. Diese Trends könnten durch einen Klimawandel mitunter noch verstärkt werden. Eine konkrete Planungsaufgabe im Küsteningenieurwesen lässt sich demnach wie folgt beschreiben: *Ein 100-jährlicher Bemessungswasserstand an einem Pegel beträgt heute 500 cmNN. Wie hoch wird dieser Wert im Jahr 2100 sein?*

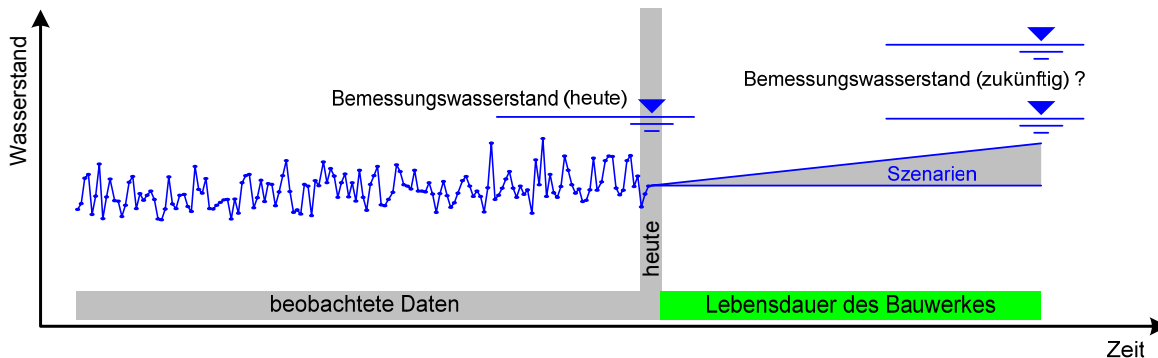


Abbildung 1.1: Prinzipskizze zur Problematik der Abschätzung zukünftiger Bemessungswasserstände.

Gegenwärtig wird diese Frage dadurch beantwortet, dass auf den für das heutige Datum gültigen Bemessungswert ein Zuschlag addiert wird, der dem erwarteten Anstieg des mittleren Meeresspiegels bis zum Bemessungszeitpunkt entspricht (z.B. EAK 2007). Dies ist ein pragmatischer Ansatz, der jedoch zwei wesentliche Schwächen aufweist: Zum einen kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Trend des Meeresspiegelanstieges auch repräsentativ für den Trend der T-jährlichen Wasserstände ist und zum anderen ist die Zuordnung einer Eintrittswahrscheinlichkeit nicht mehr möglich, wenn ein deterministischer Wert auf den Bemessungswasserstand aufgeschlagen wird.

Die vorliegende Arbeit stellt eine Alternative zu dem bisher verwendeten Ansatz vor, bei der Trends in den Zeitreihen direkt bei der Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen berücksichtigt werden. Dazu werden die bekannten Verfahren der stationären (*über die Zeit konstant*) Extremwertstatistik auf eine instationäre (*über die Zeit variabel*) Methode erweitert. Die instationäre Extremwertstatistik führt dazu, dass sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten mit der Zeit ändern und damit Tendenzen zur zukünftigen Entwicklung abgeschätzt werden können.

Dazu wird ein parametrischer instationärer Ansatz der Allgemeinen Extremwertverteilung (GEV), basierend auf der Parameterschätzung mit L-Momenten, verwendet. Dieser zugrunde gelegte Ansatz zur Parameterschätzung wird nicht vergleichend anderen Parameterschätzmethoden gegenübergestellt, da das Ziel der Arbeit nicht darin liegt, eine

biasoptimierte¹ neue Parameterschätzung zu entwickeln. Der Schwerpunkt der Analysen liegt vielmehr auf einem Ansatz, der es erlaubt, die Ergebnisse der Extremwertstatistik in die Zukunft zu extrapolieren und damit Abschätzungen von zukünftigen Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen für konkrete ingenieurtechnische Planungs- und Bemessungsaufgaben vornehmen zu können. Eine Extrapolation von extremwertstatistischen Ergebnissen ist immer mit Unsicherheiten verbunden, die sich aus verschiedenen Quellen zusammensetzen. Der Bias der Parameterschätzung stellt eine dieser Unsicherheitsquelle dar, die jedoch nach Meinung des Verfassers im Vergleich zu den übrigen Unsicherheiten (vgl. Abschnitt 10) von untergeordneter Bedeutung ist.

Neben der Bemessung von neuen Küstenschutzanlagen ist die Überprüfung von bestehenden Anlagen eine wesentliche Aufgabe im Ingenieurwesen. Die Überprüfung sollte mit neuesten Methoden erfolgen und die folgenden Fragen beantworten: *Wie sicher sind heute die bestehenden Küstenschutzmaßnahmen und wie zuverlässig werden sie in Zukunft schützen, wenn sich Klima und Nutzungen verändern?* (KORTENHAUS UND OUMERACI 2002)

Die Deutsche Nord- und Ostseeküste sowie die Ästuarare sind in der Regel durch Deiche geschützt, die im Laufe der Jahre immer wieder an den aktuellen Erkenntnisstand angepasst wurden. Die Hauptdeichlinie an Nord- und Ostsee ist in Deutschland etwa 1400 km lang und erreicht Höhen von 3,5 mNN bis 6,0 mNN an der Ostsee und 6,5 mNN bis 10,0 mNN an der Nordsee (SCHÜTTRUMPF 2001).

Alle Anstrengungen des Küsteningenieurwesens richten sich darauf, den Sicherheitsstandard für die Küstenschutzanlagen auf einem möglichst hohen Niveau zu halten, um Gefahren für Leib und Leben durch eine Sturmflut weitestgehend zu vermeiden. Es ist jedoch entscheidend zu beachten, dass es einen absoluten Schutz niemals geben kann. Ein Versagensfall oder das Überschreiten der Bemessungsgrößen kann nie ausgeschlossen werden, womit immer ein Restrisiko vorhanden ist. Moderne Bemessungskonzepte konzentrieren sich daher auf die Minimierung des Restrisikos, soweit dies technisch und ökonomisch durchführbar ist. Die Quantifizierung des Restrisikos erfolgt über probabilistische Ansätze, die Wasserstände mit zugeordneten Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. Jährlichkeiten als einen wesentlichen Eingangsparameter benötigen.

1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung

Die einleitenden Ausführungen zeigen, dass die Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen eine zentrale Bedeutung für aktuelle und zukünftige Bemessungskonzepte im Küsteningenieurwesen hat. Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, die Änderungen von Eintrittswahrscheinlichkeiten über die Zeit zu analysieren und damit zu verbesserten Bemessungsgrundlagen zu gelangen. Dabei werden Verfahren der stationären und

¹ Bias = Erwartungstreue. Die Parameter einer Verteilungsfunktion werden aus den beobachteten Daten geschätzt, weshalb diese auch als Schätzer bezeichnet werden. Die Abweichung der Schätzer von ihrem Erwartungswert wird als Bias bezeichnet. Ziel einer Biasoptimierung ist somit den Bias zu minimieren, so dass eine möglichst erwartungstreue Schätzung der Parameter entsteht.

instationären Extremwertstatistik angewendet und weiterentwickelt. Die übergeordneten Forschungsfragen der Arbeit lauten damit:

- Wie können zukünftige Bemessungsereignisse belastbarer abgeschätzt werden?
(Bsp: Welche Höhe hat ein 100-jährlicher Wasserstand an einem Pegel im Jahr 2100?)
- Wie verändern sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten des Belastungsparameters Wasserstand über die Zeit?
- Welche Unterschiede ergeben sich aus einer instationären Extremwertstatistik im Vergleich zu einem stationären Ansatz?
- Wie können Klimaszenarien in die Extremwertstatistik integriert werden?

Zur Beantwortung dieser Fragen müssen zunächst Grundlagen geschaffen werden. Die Forschungsfragen hierzu lauten:

- Wie können Instationaritäten in Zeitreihen identifiziert werden, damit ein instationärer Extremwertansatz gerechtfertigt ist?
- Welche statistischen Verfahren sind zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfragen geeignet?
- Wie groß sind die Unsicherheiten in den Ergebnissen von statistischen Analysen?

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Anwendung von instationären Verfahren der Extremwertstatistik, um die übergeordneten Forschungsfragen beantworten zu können und um Vergleiche zwischen stationären und instationären Methoden ableiten zu können. Dabei liegt der Schwerpunkt der Arbeit nicht auf der Ableitung von ausschließlich sehr seltenen Extremereignissen (z.B. Jährlichkeit $(T) > 1.000$ Jahre), sondern auf der Abschätzung der zeitlichen Entwicklung von mittleren und seltenen Ereignissen.

Instationaritäten in Zeitreihen können vielfältige Ursachen und Formen haben. Grundsätzlich ist zwischen sprunghaften Änderungen in den Zeitreihen und stetigen Änderungen zu unterscheiden. Sprunghafte Änderungen können zum Beispiel durch kurzfristige Setzungen am Pegel und Baumaßnahmen im unmittelbaren Bereich des Pegels entstehen. Stetige Änderungen in den Wasserstandszeitreihen können ihre Gründe in langfristigen Landsenkungen, morphologischen Umlagerungsprozessen oder in klimatischen Änderungen haben (BINDOFF ET AL. 2007). In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus ausschließlich auf stetige Veränderungen in Zeitreihen gelegt.

Die Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten extremer Wasserstände erfolgt in der vorliegenden Arbeit durch die statistische Analyse gemessener Wasserstandsdaten. Grundsätzlich existieren weitere Methoden, wie zum Beispiel die Trennung des gemessenen Wasserstandes in das deterministische Gezeitensignal und den stochastisch geprägten Windstau. Hierbei werden die resultierenden Windstauereignisse statistisch analysiert. Die

Ergebnisse der Windstaustatistik müssen dann wiederum mit der astronomischen Tide überlagert werden, um zu einem resultierenden Wasserstand zu gelangen. Die Überlagerung von Gezeitensignal und Windstau erfolgt in der Regel durch einen stochastischen Ansatz (PUGH 2004). Die stochastische Überlagerung der Parameter berücksichtigt jedoch keine physikalischen Zusammenhänge. Beispielsweise prägt sich ein Windstau um Tidehochwasser anders aus, als um Tideniedrigwasser. Obwohl die Trennung des Wasserstandes in die Anteile Gezeitensignal und Windstau zunächst mathematisch korrekt ist, da nur das stochastisch geprägte Windstausignal extremwertstatistisch ausgewertet wird, sind in den Endergebnissen aufgrund der nicht berücksichtigten physikalischen Zusammenhänge größere Unsicherheiten enthalten. Aus diesem Grund wird diese Methodik in der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt.

1.3 Struktur der Arbeit

In Abschnitt 1 wird eine Einleitung in das Thema und die zu beantwortenden Forschungsfragen gegeben. Abschnitt 2 fasst den Stand der Wissenschaft zur stationären und instationären Extremwertstatistik zusammen, wobei der Schwerpunkt auf hydrologische Anwendungen und Methoden gelegt wird. Da die Begrifflichkeiten in der Statistik eine entscheidende Rolle spielen (z.B. Überschreitungswahrscheinlichkeit, Unterschreitungswahrscheinlichkeit, Jährlichkeit), werden in Abschnitt 3 Definitionen zu häufig verwendeten Begriffen gegeben. Die in der vorliegenden Arbeit analysierten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen bilden nur ein Element in einem Bemessungskonzept für Küstenschutzwerke. Um den Gesamtzusammenhang, in dem sich diese Arbeit befindet, besser erfassen zu können, sind in Abschnitt 4 die unterschiedlichen Bemessungskonzepte für Küstenschutzanlagen dargestellt. Die Grundlage der statistischen Untersuchungen bilden beobachtete Wasserstandsdaten. Grundlegende Merkmale und Parameter einer Zeitreihe werden in Abschnitt 5 knapp erläutert, um die zu analysierenden Daten in ihrer Struktur erfassen und beschreiben zu können. Instationäre Extremwertmethoden können nur dann plausibel angewendet werden, wenn die zu analysierende Zeitreihe auch ein instationäres Verhalten aufweist. Es muss also eine eingehende Prüfung auf Stationarität oder Instationarität der Zeitreihe erfolgen. Dazu werden in Abschnitt 6 verschiedene Methoden vorgestellt. In Abschnitt 7 werden Methoden der Homogenisierung von Zeitreihen vorgestellt, die Anwendung finden müssen, wenn instationäre Zeitreihen mit einer stationären Extremwertverteilung analysiert werden sollen. Die instationäre Extremwertstatistik ist als eine Erweiterung der stationären Extremwertstatistik zu betrachten, weshalb in Abschnitt 8 zunächst die gebräuchlichen Methoden zur stationären Extremwertstatistik eingehend erläutert werden. Die Erweiterung auf einen instationären Ansatz wird in Abschnitt 9 dargestellt. Mit allen extremwertstatistischen Analysen sind unweigerlich Unsicherheiten verbunden, die bestenfalls quantitativ, aber mindestens qualitativ beschrieben werden müssen. In Abschnitt 10 befasst sich mit grundlegenden Aspekten zu Unsicherheitsquellen und ihrer Beschreibung. In den Abschnitten 11 und 12 sind die vorgestellten Methoden auf Wasserstandsdaten an den Pegeln Cuxhaven (Nordsee) und Travemünde (Ostsee) angewendet

worden. Die Arbeit schließt mit einem Fazit (Abschnitt 13) und der Zusammenfassung (Abschnitt 14).

1.4 Verwendete Daten

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Datensätze der Pegel Cuxhaven und Travemünde (Abbildung 1.2) sind in vielen Veröffentlichungen und Forschungsprojekten (z.B. JENSEN ET AL. 2006 und JENSEN UND MUDERSBACH 2009) zur Wasserstandsanalyse verwendet worden und sind als qualitativ hochwertig zu bewerten. Die Daten sind der Pegeldatenbank des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen entnommen und stammen ursprünglich von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes.

Für den Pegel Cuxhaven stehen regelmäßige Wasserstandsaufzeichnungen seit 1849 zur Verfügung. Der Pegel Cuxhaven hat aufgrund seiner zentralen Lage in der Deutschen Bucht eine wesentliche Bedeutung in der Wasserstandsanalyse und wird vielfach als Referenzpegel für die Deutsche Nordseeküste herangezogen. Aus diesem Grund wurde der Pegel Cuxhaven auch als Fallbeispiel für die vorliegende Arbeit ausgewählt. Für den Pegel Cuxhaven wurden folgende plausibilisierte und auf einen einheitlichen Höhenbezug (NN) umgerechnete Daten verwendet:

- Jahreswerte der höchsten Tidehochwasserstände (HThw) von 1849 bis 2007
- Jahreswerte der mittleren Tidehochwasserstände (MThw) von 1849 bis 2007

Der Pegel Travemünde weist die längste Zeitreihe regelmäßiger Wasserstandsbeobachtungen aller deutschen Küstenpegel auf. Regelmäßige Wasserstandswerte sind seit dem Jahr 1826 verfügbar. Durch die stark unterschiedliche Gliederung der Deutschen Ostseeküste (z.B. Steilküsten, Boddenküsten) kann der Pegel Travemünde zwar nicht als Referenzpegel für die gesamte Ostseeküste angesehen werden, jedoch kommt diesem Pegel durch die sehr lange Datenreihe und deren gute Dokumentation (z.B. JENSEN UND TÖPPE 1990) eine wichtige Bedeutung für Bemessungsfragen an der Deutschen Ostseeküste zu. Aufgrund des nicht signifikanten Gezeiteneinflusses an der Deutschen Ostseeküste (Tidehub ≈ 10 cm, HUPFER ET AL. 2003), spricht man nicht von Tidehochwasserständen, sondern allgemein von Hochwasserständen. Die Zeitreihe der jährlichen Höchstwasserstände wird demnach mit HW und nicht mit HThw bezeichnet. Entsprechend wird der mittlere Wasserstand mit MW benannt. Für den Pegel Travemünde wurden folgende plausibilisierte und auf einen einheitlichen Höhenbezug (NN) umgerechnete Daten verwendet:

- Jahreswerte der Höchstwasserstände (HW) von 1826 bis 2007
- Jahreswerte des mittleren Wasserstandes (MW) von 1826 bis 2007

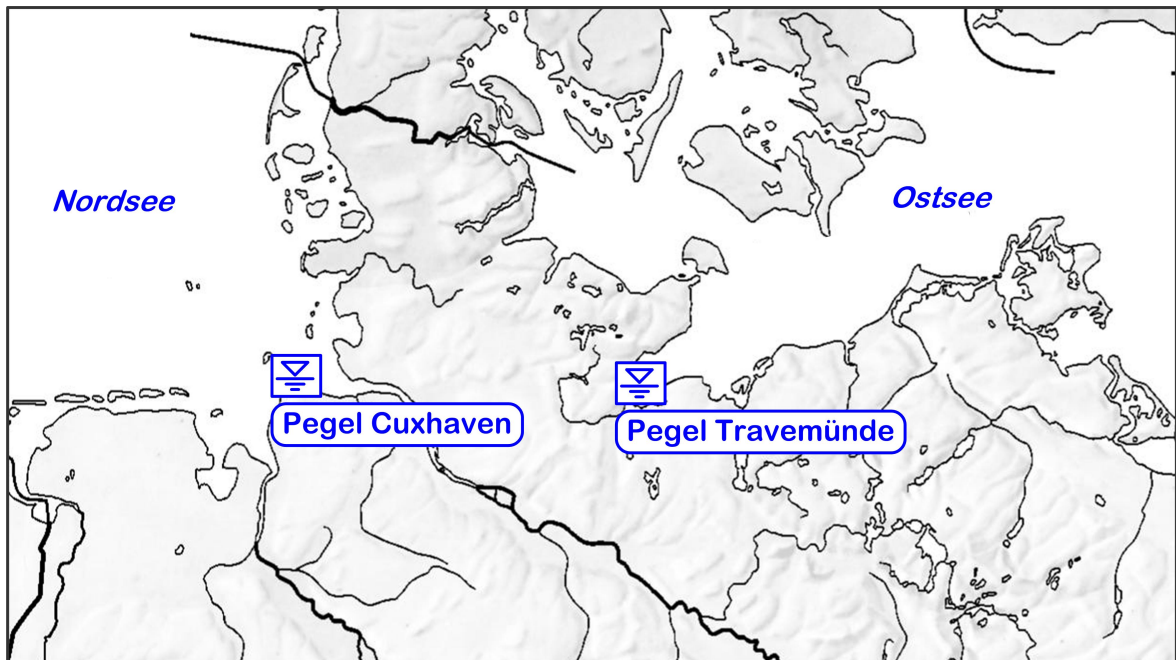


Abbildung 1.2: Lage der Pegel Cuxhaven und Travemünde.

Zur Verdeutlichung der vorgestellten Methoden sind sowohl bei den Fallbeispielen in den Abschnitten 11 und 12 als auch in den Abschnitten 4 bis 10 konkrete Daten verwendet worden. In den letztgenannten Abschnitten handelt es sich um grundlegende Analysen zu Eigenschaften von Wasserstandszeitreihen und Stationaritätsbedingungen. Diese wurden an den Zeitreihen der jährlichen Höchstwasserstände (HT_{hw}) bzw. mittleren Hochwasserstände (M_{Thw}) des Pegels Cuxhaven von 1849 bis 2005 veranschaulicht. Vergleichende Betrachtungen zeigen, dass sich gleichwertige Ergebnisse auch mit Zeitreihen anderer Pegel oder aktualisierter Zeitreihen erzielen lassen. Für die in den Abschnitten 11 und 12 dargestellten Fallbeispiele wurden bis zum Jahr 2007 aktualisierte Datensätze verwendet, um konkrete Ergebnisse der Extremwertstatistik auf möglichst aktuelle Datensätze zu stützen. Die verwendeten unterschiedlichen Längen der Zeitreihen sind dem Sachverhalt geschuldet, dass innerhalb eines mehrjährigen Forschungsvorhabens nicht alle Analysen zum letztmöglichen Zeitpunkt erstellt werden können.

14 Zusammenfassung

Viele Küstenregionen sind potenziell durch die Auswirkungen des globalen Klimawandels gefährdet, der sich im Anstieg des Meeresspiegels sowie teilweise in der Zunahme der Sturmfluthäufigkeit und -intensität zeigt. Die Folgen einer verstärkten Gefährdung der Küstengebiete sind schwerwiegend, da etwa 23% der Weltbevölkerung weniger als 100 km von der Küste entfernt leben (Höheniveau: <100 m über Meeresspiegel) und diese Gebiete eine dreifach höhere Bevölkerungsdichte aufweisen als im weltweiten Mittel.

Für die Belange des Küstenschutzes sind insbesondere Erkenntnisse über die Entwicklung des mittleren Meeresspiegelanstieges und über gegenwärtige und zukünftige Sturmfluthöhen bzw. -häufigkeiten von Bedeutung. Die Methoden zur Bemessung von Küstenschutzanlagen basieren, neben anderen Faktoren, auf einem Bemessungswasserstand, der von amtlicher Seite festgelegt wird. Dieser Bemessungswasserstand wird durch Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Jährlichkeiten T definiert. Heute gebräuchlich sind Bemessungswerte mit mittleren Jährlichkeiten zwischen 100 und 10.000 Jahren. Die zugeordneten Wasserstände werden über statistische Analysen von beobachteten Wasserstandszeitreihen abgeleitet.

Die Annahme von stationären Wasserstandszeitreihen kann im Zuge des Klimawandels unzutreffend sein. Insbesondere muss davon ausgegangen werden, dass sich die Eigenschaften von hydrometrischen Zeitreihen in Zukunft anders ausprägen können als in der Gegenwart. Die Parameter einer hydrometrischen Zeitreihe (z.B. Wasserstand) können dann nicht als stationär angesetzt werden, sondern sie ändern sich über die Zeit. Dieses Verhalten wird als instationäres Verhalten bezeichnet (vgl. Abschnitt 6). Liegt ein signifikantes instationäres Verhalten einer Zeitreihe vor, so können die klassischen stationären Methoden der Extremwertstatistik nicht verwendet werden, sondern sie müssen auf einen instationären Ansatz erweitert werden.

Die vorliegende Arbeit stellt eine Methodik zur Ermittlung von zukünftigen T -jährlichen Bemessungswasserständen vor, bei der Trends in den Zeitreihen direkt bei der Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen berücksichtigt werden. Dazu werden die bekannten Verfahren der stationären (*über die Zeit konstant*) Extremwertstatistik auf eine instationäre (*über die Zeit variabel*) Methode erweitert, wobei ein pragmatischer Ansatz verwendet wird. Die instationäre Extremwertstatistik führt dazu, dass sich die Bemessungswerte mit der Zeit ändern und damit Tendenzen zur zukünftigen Entwicklung abgeschätzt werden können.

Die Abschätzung zukünftiger Änderungen in Eintrittswahrscheinlichkeiten in Wasserständen ist mit einem parametrischen instationären Ansatz der Allgemeinen Extremwertverteilung (GEV), basierend auf der Parameterschätzung mit L-Momenten, möglich. Die Parameterschätzung erfolgt hierbei auf einer zeitfensterbasierten Schätzung der L-Momente. Die L-Momente werden durch funktionale Zusammenhänge (linear oder nichtlinear) beschrieben und in die Zukunft extrapoliert. Dies wird als parametrischer Ansatz bezeichnet. Durch die vorgestellte Methodik können zu jedem beliebigen Zeitpunkt t die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserstandsereignissen angegeben werden.

Anwendungen des instationären Extremwertansatzes auf die Pegel Cuxhaven und Travemünde zeigen, dass die Lageparameter der untersuchten jährlichen Extremwertzeitreihen in der Regel einen steigenden Trend aufweisen. Die Streuungsparameter weisen keine oder nur geringe Trends auf. Hierdurch steigen die T-jährlichen Bemessungswerte in der Regel mit der Zeit an. Am Pegel Cuxhaven kann über die instationäre Extremwertstatistik der 100-jährliche Wasserstand im Jahr 2007 zwischen 497 cmNN und 513 cmNN angegeben werden. Im Jahr 2100 liegt dieser zwischen 518 cmNN und 554 cmNN. Am Pegel Travemünde beträgt der über die instationäre Extremwertstatistik ermittelte 100-jährliche Wasserstand im Jahr 2007 etwa 236 cmNN bis 247 cmNN. Im Jahr 2100 sind es 262 cmNN bis 287 cmNN (vgl. Abschnitte 11 und 12).

Durch die Verwendung eines parametrischen Ansatzes in der instationären Extremwertstatistik können Klimaszenarien in der Analyse berücksichtigt werden. Dabei werden nicht die in den Daten selbst enthaltenen Trends in die Zukunft extrapoliert, sondern es werden die aus Klimaszenarien prognostizierten Trends verwendet. Die Unsicherheiten in den Analysen sind jedoch als groß zu bewerten, da zum einen die Klimaszenarien selbst große Unsicherheiten enthalten und zum anderen nicht unmittelbar angenommen werden kann, dass zum Beispiel der prognostizierte Meeresspiegelanstieg auch repräsentativ für das Verhalten der extremen Wasserstände ist.

Grundsätzlich wird aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit empfohlen, die vorgestellte instationäre Extremwertmethode für die Abschätzung von zukünftigen Bemessungswerten zu verwenden. Dies leitet sich insbesondere aus den nachfolgend genannten Gründen ab:

- Über die direkte Implementierung von Trends in die Extremwertstatistik müssen keine gesonderten Annahmen zu einem zu erwartenden Meeresspiegelanstieg zur Ermittlung zukünftiger Bemessungswerte getroffen werden.
- Aus der instationären Extremwertstatistik ergeben sich für jeden beliebigen Zeitpunkt t direkt Wasserstände mit zugeordneten Eintrittswahrscheinlichkeiten.
- Die instationäre Extremwertstatistik auf Basis des vorgestellten parametrischen Ansatzes erlaubt die Berücksichtigung von Klimaszenarien, womit die Auswirkungen möglicher zukünftiger Änderungen an den Deutschen Küsten auf Bemessungswasserstände abgeschätzt werden können.