



CoastDoc 2010

Beiträge zum 1. Doktorandenseminar CoastDoc, Universität Siegen

CoastDoc 2010

Beiträge zum 1. Doktorandenseminar CoastDoc, Universität Siegen

Erscheinungsort: Siegen
Erscheinungsjahr: 2011
D 476

**Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen
Heft 2 | 2011**

Herausgeber:
Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)
der Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57076 Siegen

Druck:
UniPrint, Universität Siegen

ISSN 1868-6613

Vorwort

Am 13. und 14. Oktober 2010 fand erstmalig das Doktorandenseminar „CoastDoc“ am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) an der Universität Siegen statt; die thematische Klammer war dabei „*Coastal Engineering*“.

Unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen trafen sich Doktoranden, die verschiedenste Dissertationsvorhaben auf dem Gebiet des Küsteningenieurwesens bearbeiten. Ziel des interuniversitären Doktorandenseminars ist der über die eigenen Institutsgrenzen hinausgehende Gedankenaustausch zu aktuellen Forschungsthemen. Die Doktoranden kamen aus Forschungseinrichtungen bzw. Universitäten: der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, der Technischen Universität (TU) Braunschweig, der Universität Rostock und der Universität Siegen sowie dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht. Zudem nahmen an dem Seminar interessierte Mitarbeiter und Studierende der Universität Siegen teil.



Teilnehmer des 1. CoastDoc-Seminars (von links nach rechts): Prof. Jürgen Jensen, Manuel Gröschel, Sebastian Grimm, Fabian Gier, Thomas Wahl, Jens Bender, Arne Arns, Sönke Dangendorf, Dr. Christoph Mudersbach, Frauke Albrecht, Andreas Burzel, Dörte Salecker, Marc Krüger, Dilani Dassanayake

Im Rahmen der Veranstaltung stellten die Doktoranden Ergebnisse ihrer laufenden Promotionsvorhaben vor, an die sich eine Diskussionsrunde anschloss. Der Austausch von Informationen und die Diskussion der Ergebnisse brachten neue Denkanstöße und Anregungen für die eigenen Arbeiten. Die Themenpalette reichte von statistischen Untersuchungen zur Bestimmung von Belastungen auf Küstenschutzbauwerke, über Analysen von hydrologischen Zeitreihen im Hinblick auf Meeresspiegelanstieg und Instationaritäten, Untersuchungen zu Schutzkomponenten der Halligen, die Akzeptanz von Risiken bei Sturmfluten, die Generierung synthetischer Hochwasserganglinien bis hin zu physikalischen Modellversuchen zur Belastung von Deckwerken. Im Vergleich zu anderen

Doktorandenseminaren mit sehr breiter thematischer Ausrichtung, bot die engere thematische Orientierung mit fachlicher Nähe sehr viel Raum für Diskussionen.

Ein „Come-Together“ am ersten Abend des 2-tägigen Seminars rundete die Veranstaltung ab. Der Austausch von Informationen und die Gespräche waren wertvolle Erfahrungen, sodass der Kontakt in Zukunft weiter gepflegt werden soll. „CoastDoc 2010“ wurde von allen Beteiligten als sehr gelungene Veranstaltung bewertet, die unbedingt weitergeführt werden sollte. Das nächste „CoastDoc“-Seminar findet voraussichtlich im Oktober 2011 im Leichtweiß-Institut der Universität Braunschweig statt.

In dem vorliegenden Heft 2 der Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt ist ein Großteil der vorgestellten Arbeiten zusammengefasst. Die sechs Beiträge spiegeln eine hohe Qualität wieder und tragen zu einer universitätsübergreifenden strukturierten Doktorandenentwicklung bei. Den Autoren danke ich für die Beiträge und wünsche ihnen eine erfolgreiche Weiterentwicklung ihrer dargestellten Forschungen.

Siegen im Mai 2011

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Jensen', with a large, stylized initial 'J'.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

Inhaltsverzeichnis

Statistisch-probabilistische Untersuchungen zu zeitabhängigen Belastungen aus Wasserstand und Seegang auf Küstenschutzbauwerke (Thomas Wahl und Jürgen Jensen)	1
Regionale Meeresspiegeländerungen in der Deutschen Bucht (Frauke Albrecht, Thomas Wahl, Jürgen Jensen und Ralf Weisse)	14
Developing sustainable coastal protection- and management strategies for Schleswig-Holstein's Halligen considering climate change (ZukunftHallig) (Arne Arns und Jürgen Jensen)	24
Untersuchungen zur Detektion von Instationaritäten in küstenhydrologischen Zeitreihen (Sönke Dangendorf und Jürgen Jensen)	32
Risk Acceptance for Extreme Events in a Changing Climate – What is “safe enough”? (Andreas Burzel and Hocine Oumeraci)	43
Methodologies for the Evaluation of Intangible Losses Due to Coastal Flooding (D.R. Dassanayake and H. Oumeraci).....	51
Generierung synthetischer Hochwasserganglinien (Jens Bender, Christoph Mudersbach und Jürgen Jensen)	63

Statistisch-probabilistische Untersuchungen zu zeitabhängigen Belastungen aus Wasserstand und Seegang auf Küstenschutzbauwerke

Thomas Wahl und Jürgen Jensen

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden im Wesentlichen statistische Verfahren zur Ableitung der hydrodynamischen Randbedingungen für Risikoanalysen im Küstenraum vorgestellt. Die dargestellten Ergebnisse zu beobachteten Änderungen im mittleren Meeresspiegel deuten auf eine Beschleunigungstendenz über die letzten Jahrzehnte hin, die jedoch nicht als ungewöhnlich bezeichnet werden kann. Gleichzeitig zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den beobachteten Änderungen in der Deutschen Bucht und im globalen Mittel des Weltozeans. Unter Verwendung eines stochastischen Sturmflutgenerators wird eine große Anzahl an Sturmflutszenarien für den Standort Hörnum simuliert, welche für Risikoanalysen genutzt werden können. Hierdurch werden sowohl die Unsicherheiten, als auch der erforderliche Rechenaufwand reduziert. Mit Hilfe eines auf Copula-Funktionen basierenden multivariaten statistischen Modells werden die beobachteten und simulierten Sturmflutverläufe statistisch ausgewertet. Dabei werden die Parameter Sturmflutscheitelwasserstand und Sturmflutfülle (engl. storm surge intensity) berücksichtigt. Abschließend werden verschiedene höherdimensionale Copula-Modelle vorgestellt, die es erlauben im nächsten Schritt und je nach Untersuchungsgebiet zusätzlich die Seegangsverhältnisse in die statistischen Analysen einzubeziehen.

Keywords: Risikoanalysen, Mean Sea Level, Sturmfluten, Seegang, multivariate Statistik

1 Hintergrund und Forschungsbedarf

Risikoanalysen bzw. risikobasierte Bemessungsverfahren haben in den letzten Jahren sowohl im Binnen- als auch im Küstenbereich an Bedeutung gewonnen (Schuhmann 2011). Eine der Hauptaufgaben bei der Durchführung von Risikoanalysen besteht in der Ermittlung der hydrodynamischen Randbedingungen, welche als Eingangsgröße für die nachfolgenden Untersuchungen dienen. Ein weit verbreiteter und häufig genutzter Ansatz für Risikoanalysen besteht in dem so genannten Source-Pathway-Receptor Konzept (SPR-Konzept; Oumeraci (2004), Burzel et al. (2010)). Wie aus Abbildung 1 ersichtlich wird, werden dabei zunächst die einzelnen Risikofaktoren untersucht (Source), bevor Analysen zum Versagen der Hochwasserschutzsysteme (Pathway) und den potentiell entstehenden Schäden im Hinterland (Receptor) erfolgen. Für Risikoanalysen in Küstengebieten müssen dabei verschiedene Parameter bzw. Belastungsgrößen berücksichtigt und später im Rahmen einer statistischen Analyse kombiniert betrachtet werden.

Beim Mean Sea Level (MSL) handelt es sich um eine quasi-statische Belastung für die Küstenschutzbauwerke, da mögliche Änderungen vergleichsweise langsam von statten gehen. Besonders in den letzten Jahren wurden vermehrt Anstrengungen unternommen, mögliche zukünftige Meeresspiegeländerungen auf Basis von Modellstudien (zusammengefasst in Mehl et al. 2007) oder semi-empirischen Modellen (z.B. Vermeer und Rahmstorf 2009, Grinsted et al. 2010) abzuleiten. Dabei lag der Fokus in der Regel auf globalen Studien, als deren Ergebnis entsprechende globale Meeresspiegel-szenarien

ermittelt wurden. Die Tatsache, dass die regionalen Änderungen je nach geographischer Lage signifikant von den Änderungen im globalen Mittel abweichen können ist bekannt, wird jedoch häufig vernachlässigt. Im Rahmen weniger Studien wurden Versuche unternommen, regionale Szenarien für Gebiete im weiteren räumlichen Zusammenhang mit der Deutschen Bucht abzuleiten. So z.B. von Katsman et al. (2008 und 2011) für den Nord-Ost-Atlantik bzw. die niederländische Küste und von Lowe et al. (2009) für den Bereich Groß Britannien. Bei den in unregelmäßigen Abständen auftretenden Sturmfluten kommt es im Bereich der Deutschen Bucht zu teilweise stark erhöhten Wasserständen, welche über mehrere Stunden oder wenige Tage hinweg anhalten und die Küstenschutzbauwerke entsprechend belasten. Im Vergleich zum MSL handelt es sich demnach um eine eher dynamische Belastung. Gleiches gilt für die durch Windwellen hervorgerufenen Energieeinträge in die Küstenschutzbauwerke, wie z.B. Deiche oder Dünen. Während das bei Sturmfluten vorherrschende Seegangsklima (vorrangig signifikante Wellenhöhen und -perioden) in einigen Untersuchungsgebieten eine wichtige Rolle spielt, so kann es bei anderen durchaus vernachlässigt werden (z.B. im Leebereich von Inseln).

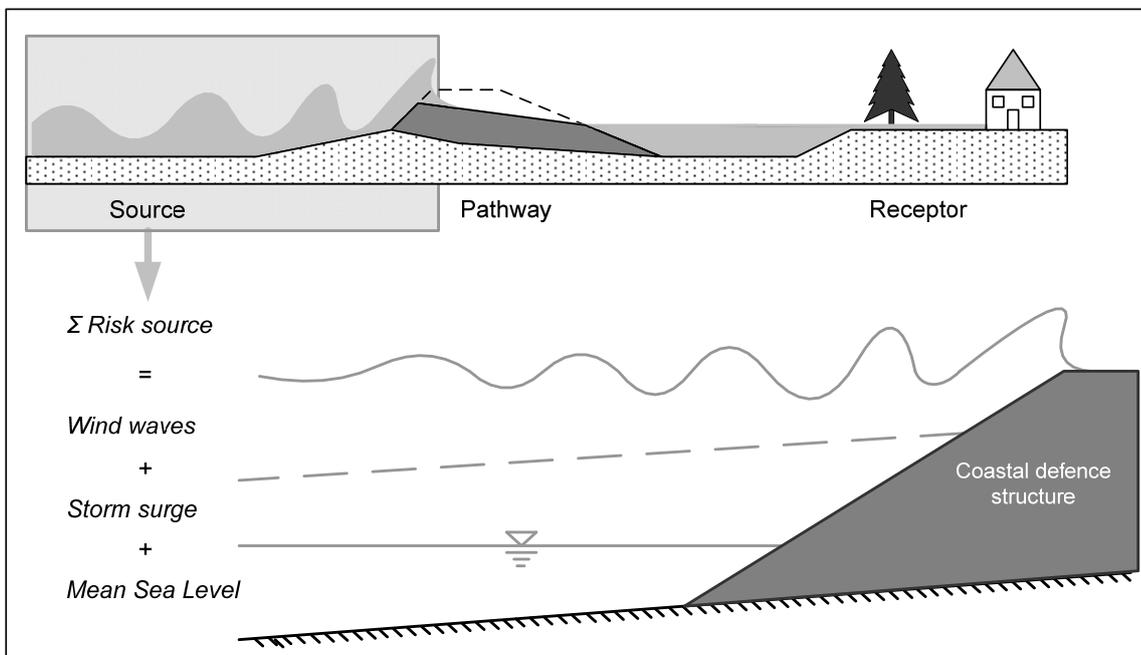


Abbildung 1: Source-Pathway-Receptor Konzept und zu berücksichtigende Belastungsparameter für Risikoanalysen im Küstenbereich

Entsprechend der obigen Ausführungen zu den verschiedenen Risikoquellen, die es im Rahmen einer Risikoanalyse zu erfassen gilt, sollen die hier vorgestellten Ergebnisse in erster Linie zur Beantwortung der folgenden drei Forschungsfragen beitragen:

(1) Wie hat sich der MSL im Bereich der Deutschen Bucht seit Mitte des 19. Jahrhunderts verändert und lassen sich aus den Analysen Rückschlüsse darüber ziehen, auf welche Weise mögliche zukünftigen Änderungen im Rahmen von heute durchgeführten Untersuchungen zu berücksichtigen sind?

(2) Können statistische Verfahren dazu beitragen, den enormen Rechenaufwand zu reduzieren, der i.d.R. notwendig ist, um belastbare Randbedingungen in Form einer

Vielzahl von Sturmflutszenarien (unterschiedlicher Charakteristik) für integrierte Risikoanalysen bereitzustellen?

(3) Was sind die relevanten Parameter, die bei statistischen Auswertungen im Rahmen von Risikoanalysen idealer Weise zu berücksichtigen sind und welche multivariaten statistischen Modelle stehen hierfür zur Verfügung?

Im folgenden Abschnitt werden die für die Untersuchungen genutzten Daten und die angewendeten Methoden kurz vorgestellt, bevor in Abschnitt 3 die Ergebnisse zu den einzelnen Fragestellungen dargestellt sind. In Abschnitt 4 sind die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und der weitere Forschungsbedarf ist dargelegt. Aufgrund des begrenzten Umfangs wird an mehreren Stellen auf andere bereits veröffentlichte Arbeiten zu den einzelnen Themenkomplexen verwiesen, in denen detailliertere Informationen enthalten sind.

2 Daten und Methoden

2.1 Mean Sea Level Analysen

In Abbildung 2 ist das Untersuchungsgebiet Deutsche Bucht inklusive aller für die Analysen berücksichtigten Pegelstandorte dargestellt. Wie zu erkennen ist, wurden insgesamt 13 Pegel bzw. deren verfügbare Daten in die Untersuchungen einbezogen (siehe auch Jensen 2000). Hierbei handelt es sich nach heutigem Kenntnisstand um Pegel, die qualitativ hochwertige Daten bereitstellen und dementsprechend vergleichsweise wenig (z.B. durch Baumaßnahmen) beeinflusst sind.

Im ersten Schritt wurden alle verfügbaren Datensätze für die dargestellten Pegel bei den unterschiedlichen Dienststellen recherchiert, bevor diese einer zusätzlichen einheitlichen Plausibilisierung zugeführt wurden. Dabei wurden u.a. die im KFKI-Projekt IKÜS (Wanninger et al. 2009) festgestellten Pegeloffsets zur Homogenisierung an die Daten angebracht. Aus den hochaufgelösten Zeitreihen (mind. Stundenwerte), die für die meisten Pegel lediglich über die letzten 10 bis 15 Jahre verfügbar sind, wurden MSL-Werte direkt über Mittelwertbildung der homogenisierten Daten errechnet. Mit Hilfe des k-Wert Verfahrens (unter Berücksichtigung von auf Stationarität geprüften k-Werten) wurden Tidehalbwasserzeitreihen in MSL-Zeitreihen überführt, wobei sich erstere aus der Mittelung der verfügbaren langen Scheitelwertzeitreihen ergeben. Die so generierten MSL-Jahreswertzeitreihen wurden unter Berücksichtigung parametrischer Verfahren (lineare Trend- und Korrelationsanalysen) und nicht-parametrischer Verfahren (singuläre Systemanalyse in Kombination mit Monte-Carlo-Autoregressive Padding (MCAP)) analysiert. Dabei wurden sowohl die Einzelzeitreihen aller Pegel, als auch verschiedene „synthetische Zeitreihen“ berücksichtigt. Diese ergeben sich aus der Mittelung einer größeren Anzahl einzelner Pegel (z.B. gesamte Deutsche Bucht, Schleswig-Holstein, Niedersachsen). Detaillierte Informationen zu den MSL-Analysen, der Datenaufbereitung und den genutzten Methoden sind in Jensen et al. (2010 und 2011) und Wahl et al. (2010a und 2011a) zu finden. Weitere Verfahren zur Generierung synthetischer Pegelzeitreihen sowie der Vergleich zu dem hier genutzten Ansatz sind in Albrecht et al. (2011) enthalten.

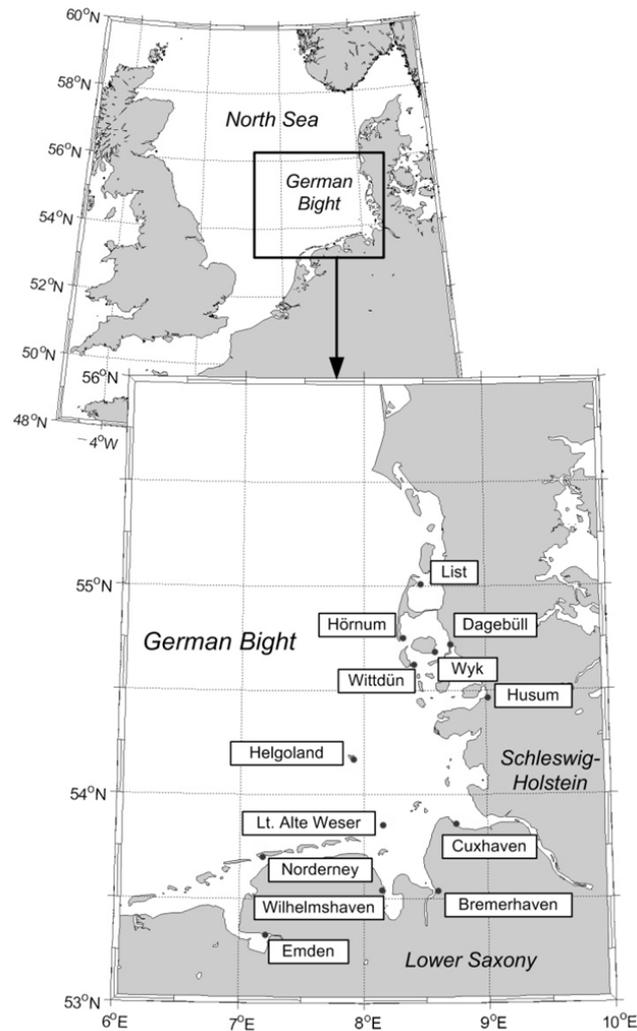


Abbildung 2: Untersuchungsgebiet Deutsche Bucht und für die Mean Sea Level Analysen verwendete Pegel

2.2 Stochastische Sturmflutsimulation

Aus Abbildung 3 geht hervor, dass es dringend erforderlich ist, eine größere Anzahl von Sturmflutszenarien (mit unterschiedlicher Charakteristik bzgl. Sturmfluthöhe und Sturmflutverlauf) im Rahmen einer Risikoanalyse zu berücksichtigen. Zunächst besteht das Ziel darin, eine Risikokurve, wie sie in Abbildung 3 (links) beispielhaft dargestellt ist, zu approximieren. Dabei lassen sich die Unsicherheiten durch die Berücksichtigung einer möglichst großen Anzahl an Sturmflutszenarien (in Abb. 3 wurden aus Darstellungsgründen 4 Szenarien berücksichtigt) reduzieren und die Detektion ggf. vorhandener Unstetigkeitsstellen ist möglich. Das Gesamtrisiko ergibt sich aus der Integration der Risikokurve. Aus diesem Grund sind Sturmfluten mit vergleichsweise niedrigen Scheitelwasserständen (Schaden ~ 0) für die Risikoanalyse ebenso von untergeordneter Bedeutung wie sehr extreme Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (Überflutungswahrscheinlichkeit ~ 0) (siehe Abb. 3, rechts). Das Generieren einer großen Anzahl von Sturmflutszenarien mit unterschiedlichen Charakteristiken ist sowohl unter Anwendung numerischer Modellsimulationen (z.B. Jensen et al. 2006), als auch auf Basis empirischer Analysen (z.B. Gönnert et al. 2010)

eine sehr zeitaufwendige Aufgabe und daher im Rahmen von Risikoanalysen nur bedingt leistbar. Aus diesem Grund sollen hier einige Ergebnisse vorgestellt werden, die unter Verwendung eines stochastischen Sturmflutgenerators erzielt wurden. Diese können zusätzlich zu Modellergebnissen und Ergebnissen aus empirischen Analysen direkt für Risikoanalysen genutzt werden.

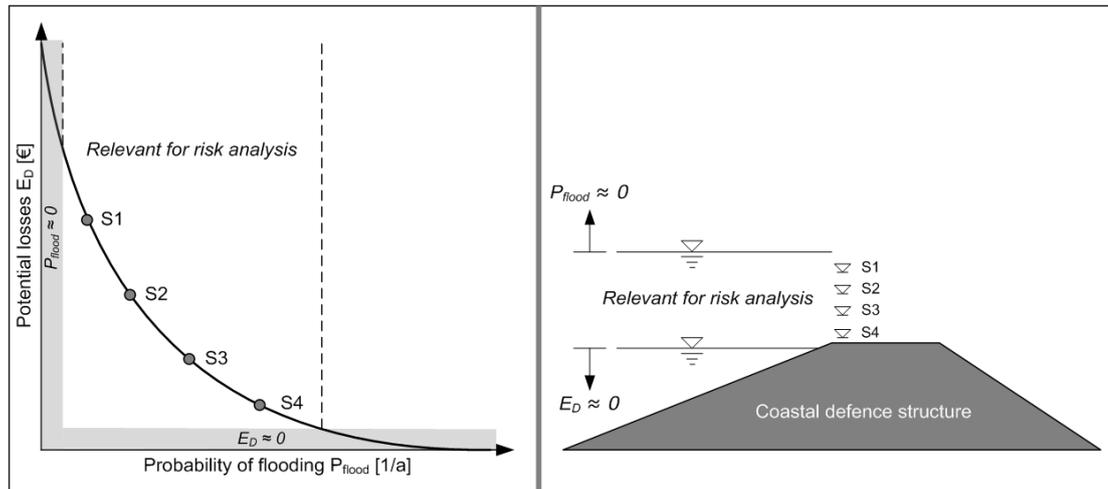


Abbildung 3: Schadensersparfunktion (links) und Bedeutung verschiedener Sturmflutszenarien für Risikoanalysen (rechts)

Bei der stochastischen Sturmflutsimulation erfolgt zunächst die Parametrisierung aller beobachteten Sturmflutereignisse, wobei für die vorliegende Studie immer von 3 Tiden je Sturmflutereignis ausgegangen wird. Ein Sturmflutereignis besteht demnach aus einer Vortide, einer Haupttide und einer Nachtide. Die Parametrisierung eines solchen Ereignisses erfolgt unter Verwendung von insgesamt 25 Parametern. Dies sind die Tidehoch- und Tideniedrigwasser (7 Parameter), die Wasserstände jeweils eine Stunde vor und nach den Scheiteln (12 Parameter) und die Zeitabstände zwischen zwei aufeinander folgenden Scheitelpunkten (6 Parameter). Im nächsten Schritt wird unter Berücksichtigung verschiedener Verteilungsfunktionen (Normalverteilung, LogNormalverteilung, Generalisierte Pareto Verteilung, Weibullverteilung etc.) jeweils die am besten geeignete Verteilung zur Beschreibung der 25 Parameter-Zeitreihen (als Ergebnis der Parametrisierung) ermittelt. Basierend auf den Verteilungsfunktionen, die als am besten passend identifiziert wurden, erfolgt eine große Anzahl von Monte-Carlo Simulationen. Hieraus ergibt sich für jeden der 25 Parameter eine sehr große Anzahl an Realisationen. Die vorhandenen Abhängigkeiten zwischen einzelnen Parametern werden auf Basis der Beobachtungen empirisch modelliert und auf die Simulationsergebnisse übertragen. Im letzten Schritt wird auf Basis der kubisch hermiten Interpolation, einem splinebasierten Verfahren, eine große Anzahl an synthetischen Sturmflutszenarien auf Basis der Realisationen der 25 Parameter rekonstruiert. Empirisch abgeleitete Filterfunktionen sorgen dafür, dass besonders stark deformierte synthetische Ereignisse aus dem Kollektiv eliminiert werden. Dabei wurde nachgewiesen, dass die Berücksichtigung der Filterfunktionen (mit Ausnahme der Obergrenze, siehe Abschnitt 3.2) keinen Einfluss auf die nachfolgenden statistischen Analysen hat. Detailliertere Informationen zu dem hier genutzten Ansatz zur stochastischen Sturmflutsimulation sind in Wahl et al. (2010b) und Wahl et al. (2011b) enthalten.

2.3 Multivariate statistische Analysen

Das Ziel der statistischen Analyse besteht darin, Überschreitungswahrscheinlichkeiten bzw. Wiederkehrintervalle für die Sturmflutszenarien zu berechnen, die für die Risikoanalyse ausgewählt wurden. In früheren Studien wurden dabei i.d.R. ausschließlich die maximalen Sturmflutwasserstände berücksichtigt und ausgewertet (z.B. Jensen et al. 2006). Gerade im Rahmen von Risikoanalysen ist der Sturmflutwasserstand jedoch nicht der einzige Parameter, der die Versagenswahrscheinlichkeiten der Hochwasserschutzsysteme und die potentiellen Schäden im Hinterland beeinflusst. Neben dem maximalen Wasserstand spielt die Fülle (oder Intensität) des Ereignisses eine entscheidende Rolle. So ist es z.B. durchaus möglich, dass eine vergleichsweise niedrige Sturmflut, bei der jedoch mehrere erhöhte Tiden hintereinander auftreten, für größere Schäden verantwortlich ist als eine deutlich höhere Sturmflut, bei der der Maximalwasserstand jedoch nur über einen sehr kurzen Zeitraum erreicht wird. Aus diesem Grund soll die Sturmflutfülle hier zusätzlich in die statistischen Betrachtungen einfließen und ist definiert als die Fläche zwischen dem beobachteten Sturmflutverlauf (über drei Tiden hinweg) und einem festgelegten Schwellenwert (hier: Normal Null (NN)). Zur Ermittlung der gemeinsamen Eintrittswahrscheinlichkeiten der beiden Parameter Sturmflutscheitelwasserstand und Sturmflutfülle wird die Gumbel-Copula genutzt, welche sich auf Basis von verschiedenen Anpassungstests als am besten geeignet für den hier berücksichtigten Datensatz (Sturmflutscheitelwasserstand und Sturmflutfülle aller beobachteten und stochastisch simulierten Sturmflutereignisse) erwiesen hat. Durch die Verwendung von Copula-Funktionen ist es möglich die beiden Parameter einer gemeinsamen statistischen Auswertung zuzuführen, obwohl diese unterschiedlich verteilt und voneinander abhängig sind. Weitere Erläuterungen zu dem hier genutzten multivariaten statistischen Modell sind in Wahl et al. (2010b und 2011b) enthalten.

3 Ergebnisse

3.1 Mean Sea Level Analysen

Aus den linearen Trendanalysen auf Basis der verfügbaren Zeitreihen wurden über weite Teile der betrachteten Zeitperioden Trends in der Größenordnung von 2 mm/a ermittelt. Lediglich für den vergleichsweise kurzen Zeitraum von 1971 bis 2008 ergeben sich stärkere positive Trends in der Größenordnung von ca. 3 bis 4 mm/a. In allen ermittelten Trends sind gewisse Anteile enthalten, die sich durch vertikale Landbewegungen, im Falle der Deutschen Bucht durch Landsenkungen, ergeben. Letztere wurden von Jensen et al. (2011) in erster Näherung in der Größenordnung von 0,5 bis 1 mm/a für die meisten berücksichtigten Pegel abgeschätzt.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Auswertung der synthetischen MSL-Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht. Für die Konstruktion dieser Zeitreihe wurden alle 13 Einzelzeitreihen berücksichtigt. Die Einflüsse durch vertikale Landbewegungen sind nicht berücksichtigt, so dass die dargestellte Zeitreihe als repräsentative relative MSL-Zeitreihe für das Untersuchungsgebiet Deutsche Bucht angesehen werden kann. Abbildung 4 (oben)

zeigt die Zeitreihe der ermittelten MSL-Jahreswerte und die Ergebnisse der Glättung (SSA in Kombination mit MCAP; siehe auch Wahl et al. 2010a). In Abbildung 4 (unten) sind die jährlichen MSL-Anstiegsraten dargestellt, die sich aus der 1. Ableitung der geglätteten Zeitreihe ergeben. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich der (relative) MSL in der Deutschen Bucht in dem hier berücksichtigten Zeitraum von 1843 bis 2008 nicht gleichmäßig verändert hat. Während bis ca. 1880 ein relativ konstanter Anstieg zu beobachten war, gab es im Anschluss eine Phase mit deutlich höheren Anstiegsraten, bevor ab ca. 1930 erneut geringere Raten zu verzeichnen waren. Seit ca. 1970 ist erneut eine Beschleunigungstendenz zu erkennen, so dass die zuletzt beobachteten jährlichen Anstiegsraten mit ca. 5 bis 6 mm/a vergleichsweise hoch jedoch nicht ungewöhnlich sind. Hieraus lässt sich die Empfehlung ableiten, die verfügbaren Beobachtungsdaten in regelmäßigen Abständen in der hier dargestellten (oder ähnlicher) Weise auszuwerten, um zeitnah prüfen zu können, ob die zuletzt beobachtete Beschleunigung weiter anhält, stagniert oder sich gar umkehrt.

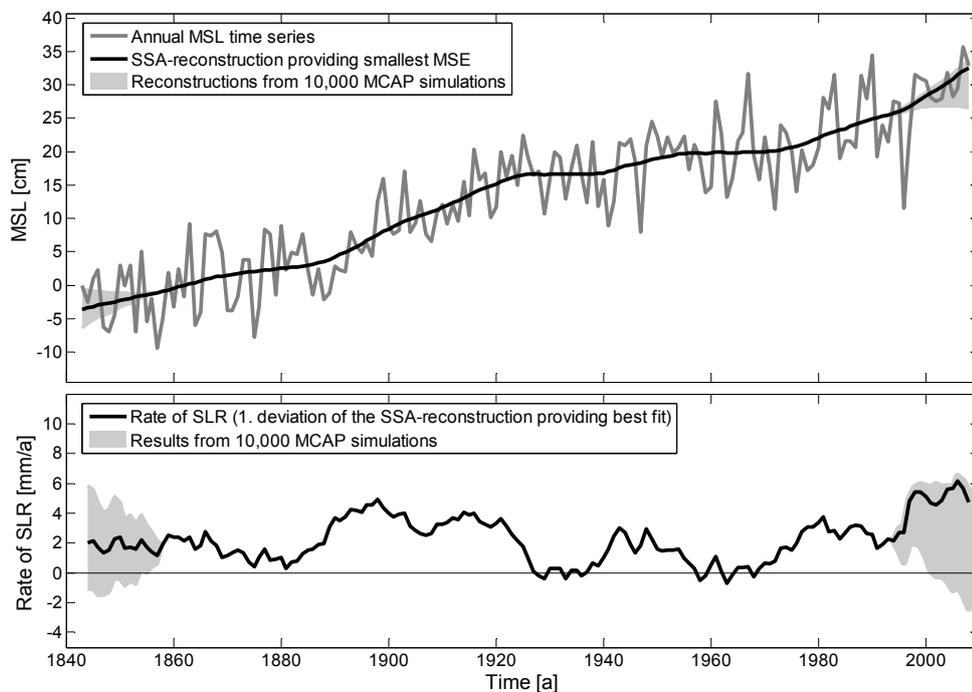


Abbildung 4: Synthetischer Pegelzeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht. Oben: Relative MSL-Jahreswertzeitreihe und Glättung. Unten: Relative MSL-Anstiegsraten

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs der MSL-Rekonstruktion für die Deutsche Bucht mit einer Nord-Ost-Atlantik und einer globalen MSL-Rekonstruktion (Jevrejeva et al. 2006). Dargestellt sind 20-jährige gleitende Korrelationskoeffizienten, die sich für die Zeitreihenpaare Deutsche Bucht – Nord-Ost-Atlantik und Deutsche Bucht – Global ergeben.

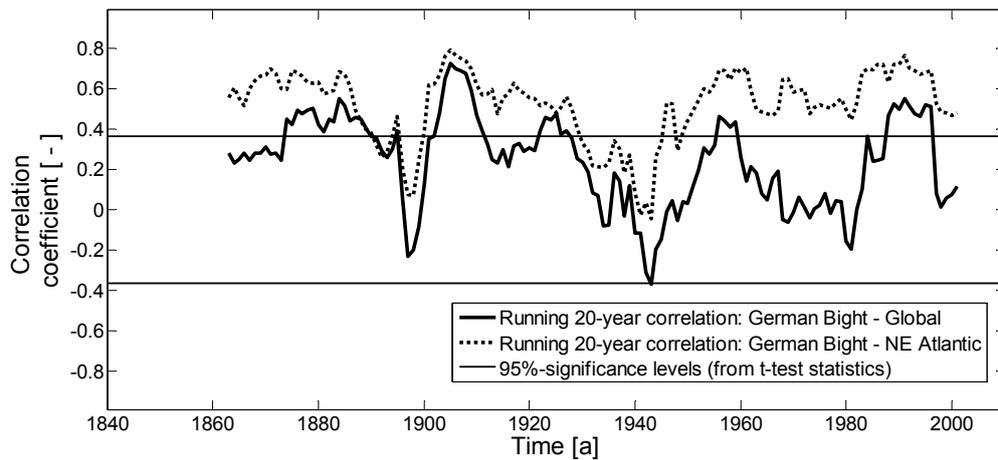


Abbildung 5: 20-jährige gleitende Korrelationskoeffizienten für verschiedene MSL Rekonstruktionen: Deutsche Bucht vs. Nord-Ost-Atlantik; Deutsche Bucht vs. Global

Es zeigt sich, dass zwischen den Rekonstruktionen für die Deutsche Bucht und den Nord-Ost-Atlantik für die meisten hier betrachteten 20-jährigen Perioden signifikante Zusammenhänge (95% Signifikanzniveau) bestehen. Im Gegensatz lassen sich nur für wenige Perioden signifikante Zusammenhänge zwischen dem beobachteten MSL in der Deutschen Bucht und der globalen MSL-Rekonstruktion nachweisen. Dieses Erkenntnis wirft die Frage nach der Belastbarkeit von globalen Meeresspiegelszenarien für regionale bzw. lokale Küstenschutzplanungen auf und verdeutlicht gleichzeitig den Bedarf für aussagekräftige regionale Meeresspiegelszenarien. Vorerst sollte neben den vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) veröffentlichten globalen Szenarien auch auf regionale Szenarien zurückgegriffen werden, die für Gebiete abgeleitet wurden die im räumlichen Zusammenhang mit der Deutschen Bucht stehen (z.B. Katsmann et al. 2008 und 2011; Lowe et al. 2009).

3.2 Stochastische Sturmflutsimulation

Abbildung 6 (links) zeigt beispielhaft die Ergebnisse der stochastischen Sturmflutsimulation auf Basis der Beobachtungsdaten am Pegel Hörnum (zwischen 1936 und 2008). Wie in Abschnitt 2 beschrieben, werden die simulierten Sturmflutverläufe durch die zwei maßgebenden Parameter Sturmflutscheitel (x-Achse) und Sturmflutfülle (y-Achse) repräsentiert.

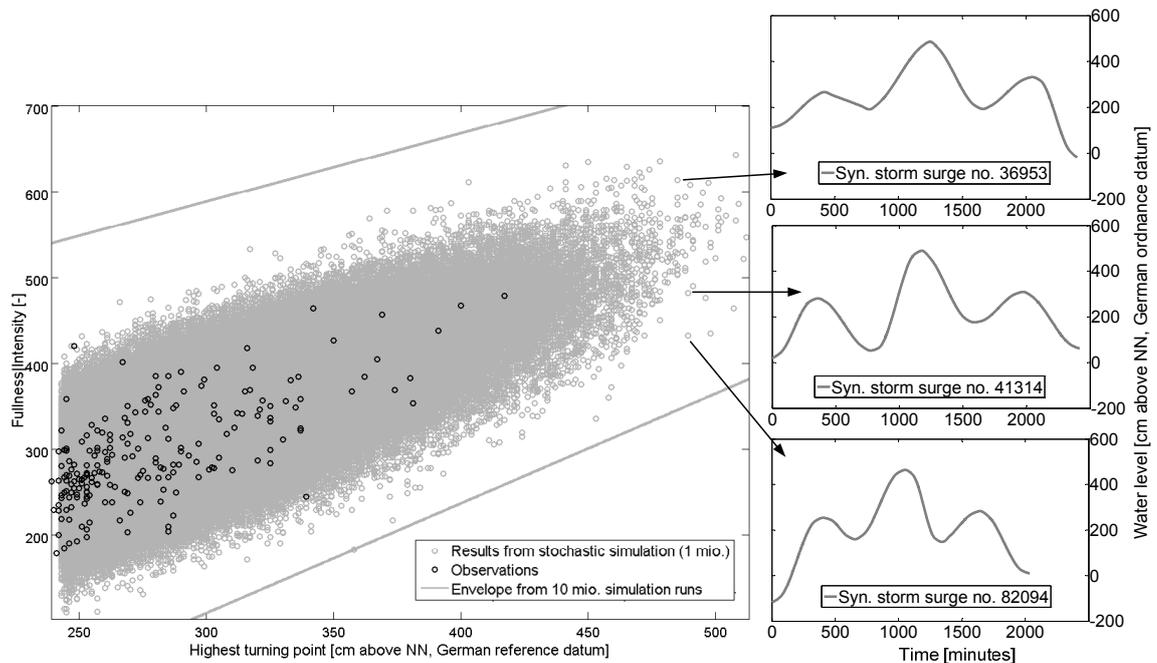


Abbildung 6: Beobachtete und stochastisch simulierte Sturmflutereignisse am Pegel Hörnum (links) und ausgewählte simulierte Sturmflutverläufe (rechts)

In der Abbildung sind die beobachteten Ereignisse den stochastisch simulierten Ereignissen gegenübergestellt, wobei augenscheinlich eine ähnliche Abhängigkeitsstruktur in den beiden Datensätzen vorhanden ist. Bei den Simulationen wurde eine Obergrenze von 513 cmNN berücksichtigt (Gabriele Gönnert, pers. comm.), welche sich aus aufwendigen empirischen Untersuchungen zu den einzelnen Sturmflutanteilen (Astronomie, Windstau, Fernwelle) und deren nicht-linearer Überlagerung ergeben hat (siehe auch Gönnert et al. 2010). Abbildung 6 (rechts) zeigt beispielhaft drei der simulierten Sturmflutverläufe, die alle eine ähnliche Scheitelhöhe, jedoch deutlich unterschiedliche Füllen aufweisen. Es sei darauf hingewiesen, dass alle Punkte in dem in Abbildung 6 dargestellten Scatterplot solche Sturmflutszenarien repräsentieren, welche als Zeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute zur Verfügung stehen. Diese Szenarien (bzw. eine Auswahl) mit deutlich unterschiedlichen Charakteristiken können zusätzlich zu Ergebnissen aus numerischen Modellstudien oder empirischen Analysen direkt für die Risikoanalyse berücksichtigt werden.

3.3 Multivariate statistische Analysen

Unter Verwendung des in Abschnitt 2.3 beschriebenen multivariaten statistischen Modells basierend auf der Gumbel-Copula, ergeben sich die in Abbildung 7 dargestellten kombinierten Überschreitungswahrscheinlichkeiten. Für die Ermittlung der Randverteilungen werden alle beobachteten und simulierten Realisationen der beiden Sturmflutparameter berücksichtigt. Die dargestellten Dichtefunktionen basieren auf Kerndichteschätzern, welche eine optimale Anpassung, jedoch aufgrund ihrer Eigenschaft als nicht-parametrische Funktionen keine weitere Extrapolation zulassen (z.B. Karmarkar und Simonovic 2008). Auf Basis des Konturplots mit den kombinierten Überschreitungswahrscheinlichkeiten kann jedem beliebigen Sturmflutereignis (als

Ergebnis empirischer Studien oder stochastischer oder numerischer Simulationen) eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Neben den Sturmflutszenarien selbst, gehen auch diese Eintrittswahrscheinlichkeiten in die anschließende Ermittlung der Überflutungswahrscheinlichkeit und damit in die Ermittlung des Risikos ein.

Gleichzeitig ist es auf Basis der hier dargestellten Ergebnisse möglich, eine große Anzahl an Sturmflutszenarien aus dem Gesamtkollektiv zu extrahieren, die zwar unterschiedliche Verläufe aber alle dieselbe Eintrittswahrscheinlichkeit aufweisen. Diese Vorgehensweise kann z.B. dann in Betracht gezogen werden, wenn ausgewählte Standorte bzw. Bauwerke, wie Flughäfen oder Kraftwerksstandorte, auf ihre Sicherheit gegenüber Sturmflutereignissen mit bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeiten überprüft werden sollen.

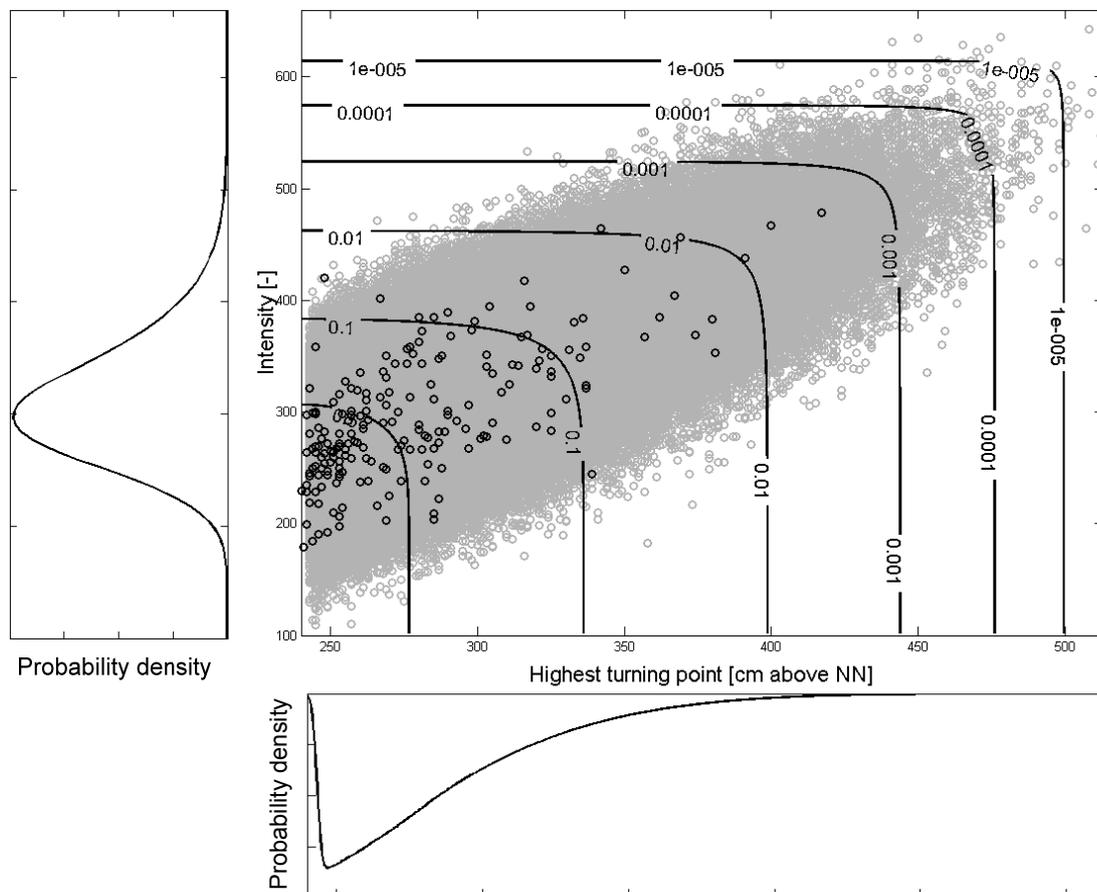


Abbildung 7: Ergebnisse der univariaten (Randverteilungen) und multivariaten statistischen Analysen auf Basis der beobachteten und simulierten Sturmflutszenarien

4 Fazit und Ausblick

Bezug nehmend auf die eingangs gestellten Forschungsfragen können die folgenden wesentlichen Aussagen auf Basis der dargestellten Ergebnisse formuliert werden:

- (1) Der MSL in der Deutschen Bucht ist seit ca. Mitte des 19. Jahrhunderts um einige Dezimeter angestiegen, wobei die Änderungen nicht kontinuierlich verlaufen sind, sondern es immer wieder zu Phasen mit höheren und Phasen mit geringeren Anstiegsraten

gekommen ist. Eine Beschleunigungstendenz, die über die letzten Dekaden hinweg zu beobachten ist, führt zu derzeit hohen Anstiegsraten. Unter Berücksichtigung aller verfügbaren Daten, können diese jedoch derzeit nicht als ungewöhnlich bezeichnet werden. Der Vergleich mit einer globalen MSL-Rekonstruktion zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Beobachtungen in der Deutschen Bucht und im globalen Mittel des Weltozeans. Hieraus wird die Empfehlung abgeleitet, für regionale und lokale Küstenschutzplanungen neben globalen Meeresspiegelszenarien auch auf regionale Szenarien zurückzugreifen.

(2) Der hier vorgestellte stochastische Sturmflutgenerator bietet die Möglichkeit, die Unsicherheiten bei Risikoanalysen zu reduzieren, wobei gleichzeitig der erforderliche zeitliche Rechen- und Arbeitsaufwand (z.B. im Vergleich zur Verwendung numerischer Modelle) minimiert wird. Neben Risikoanalysen bieten sich weitere Anwendungsfälle, für die ein sehr großes Kollektiv unterschiedlicher synthetischer Sturmflutverläufe von Wert ist.

(3) Durch die Berücksichtigung von Copula-Funktionen im Rahmen der statistischen Analysen bietet sich die Möglichkeit neben dem Sturmflutscheitel weitere maßgebende Parameter, wie die Sturmflutfülle, in die Betrachtungen einzubeziehen. Abbildung 8 zeigt verschiedene höherdimensionale Copula-Modelle, die es im nächsten Schritt ermöglichen weitere Parameter, wie z.B. die signifikante Wellenhöhe, in die Analysen einfließen zu lassen.

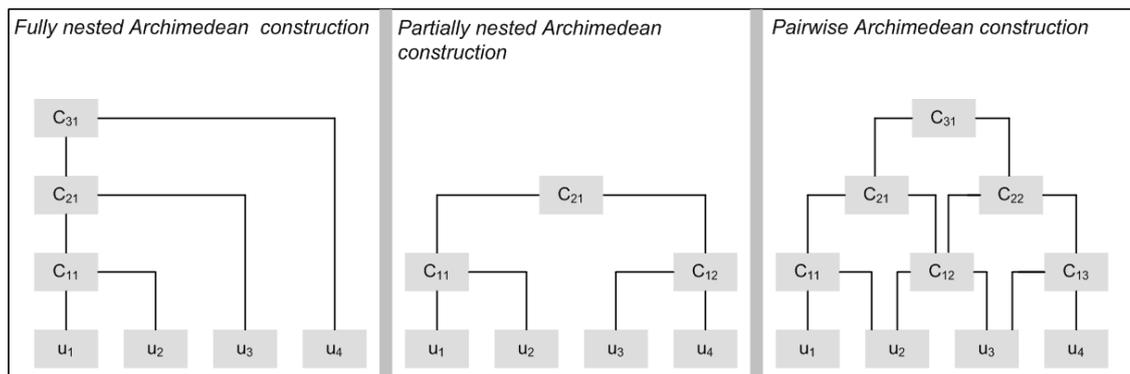


Abbildung 8: Verschiedene höherdimensionale Copula-Modelle

5 Danksagung

Die hier dargestellten Ergebnisse zu Änderungen des mittleren Meeresspiegels sind zu großen Teilen im Rahmen des vom BMBF geförderten KFKI-Forschungsvorhabens AMSeL (Fördernummer 03KIS068) entstanden. Die Erkenntnisse zur stochastischen Sturmflutsimulation und der multivariaten statistischen Analyse sind Zwischenergebnisse des vom BMBF geförderten Forschungsverbundvorhabens XtremRisk (Fördernummer 03F0483B).

6 Literatur

Albrecht, F., Wahl, T., Jensen, J., Weisse, R. (2011): Determining sea level change in the German Bight, *Ocean Dynamics*, zur Veröffentlichung angenommen.

Burzel, A., Dassanayake, A., Naulin, M., Kortenhuis, A., Oumeraci, H., Wahl, T., Mudersbach, C., Jensen, J., Gönner, G., Sossidi, K., Ujeyl, G., Pasche, E. (2010): Integrated flood risk analysis for extreme storm surges, *Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China, 2010 (Retrieved from <http://journals.tdl.org/ICCE/>).

Gönner, G., Buß, Th., Thumm, S. (2010): Coastal Protection in Hamburg due to climate change. An example to design an extreme storm surge event. In: *Proceedings of the First International Conference "Coastal Zone Management of River Deltas and Low Land Coastlines"*, Alexandria, Egypt.

Grinsted, A., Moore, J.C., Jevrejeva, S. (2010): Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Clim Dyn*, 34, 461-471, doi: 10.1007/s00382-008-0507-2.

Jensen, J. (2000): Extremereignisse an Nord- und Ostseeküsten - Ermittlung von Bemessungsereignissen. *Internationaler Workshop Risikomanagement im Küstenraum*, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85.

Jensen, J., Mudersbach, Ch., Bork, I., Müller-Navarra, S.H., Koziar, Ch. and Renner, V. (2006): Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste, *Die Küste*, Heft 71, Boyens Medienverlag, Heide i. Holstein.

Jensen, J., Wahl, T., Frank, T. (2010): Improved estimates of sea level change in the south-eastern North Sea since 1844, *Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China, (Retrieved from <http://journals.tdl.org/ICCE/>).

Jensen, J., Frank, T., Wahl, T. und Dangendorf, S. (2011): Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste, Abschlussbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben AMSeL (online verfügbar unter: <http://www.kfki.de/home/de>).

Jevrejeva, S., Grinsted, A., Moore, J.C., Holgate, S. (2006): Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. *J. Geophys. Res.*, 111, C09012. doi:10.1029/2005JC003229.

Karmakar, S.; Simonovic, S. P. (2008): Bivariate flood frequency analysis: Part 1 - Determination of marginals by parametric and nonparametric techniques. *Journal of Flood Risk Management*, 1, 190–200.

Katsman, C.A., Hazeleger, W., Drijfhout, S.S., van Oldenborgh, G.J., Burgers, G.J.H. (2008): Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt *Climatic Change*, 2008.

Katsman, C.A., Sterl, A., Beersma, J.J., van den Brink, H.W., Hazeleger, W. and 15 co-authors (2011): Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood

protection strategies for a low-lying delta - the Netherlands as an example, *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-011-0037-5.

Lowe, J. A., Howard, T. P., Pardaens, A., Tinker, J., Holt, J., Wakelin, S., Milne, G., Leake, J., Wolf, J., Horsburgh, K., Reeder, T., Jenkins, G., Ridley, J., Dye, S., Bradley, S. (2009): UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 2009.

Meehl GA, Stocker TF, Collins WD, Friedlingstein P, Gaye AT, Gregory JM, Kitoh A, Knutti R, Murphy JM, Noda A, Raper SCB, Watterson IG, Weaver AJ, Zhao Z-C (2007): Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Oumeraci, H. (2004): Sustainable coastal flood defences: scientific and modelling challenges towards an integrated risk-based design concept. Proc. First IMA International Conference on Flood Risk Assessment, IMA - Institute of Mathematics and its Applications, Session 1, Bath, UK, pp. 9-24.

Schumann, A. (2011): Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Theorie und Praxis. In: Blöschl und Merz (Hrsg.): *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*; Heft 30.11, ISBN: 978-3-941897-79-3.

Vermeer, M. and Rahmstorf, S. (2009): Global sea level linked to global temperature. doi: 10.1073/pnas.0907765106.

Wahl, T., Jensen, J., Frank, T. (2010a): On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10:171-179. doi:10.5194/nhess-10-171-2010.

Wahl, T., Jensen, J., Mudersbach, C. (2010b): A multivariate statistical model for advanced storm surge analyses in the North Sea, *Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China, 2010* (Retrieved from <http://journals.tdl.org/ICCE/>).

Wahl, T., Jensen, J., Frank, T., Haigh, I.D. (2011a): Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years, *Ocean Dynamics* DOI: 10.1007/s10236-011-0383-x (online first).

Wahl, T., Jensen, J., Mudersbach, C. (2011b): Stochastic storm surge simulation and the multivariate statistical assessment of the results via Copula functions, 34th IAHR world congress, Brisbane, Australia, 2011 (accepted).

Wanninger, L., Rost, C.; Sudau, A., Weiss, R., Niemeier, W., Tengen, D., Heinert, M., Jahn, C. H., Host, S., Schenk, A.: Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken, *Die Küste*, Heft 76, 2009.

Regionale Meeresspiegeländerungen in der Deutschen Bucht

Frauke Albrecht*, Thomas Wahl**, Jürgen Jensen**, Ralf Weisse*

*Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Max-Planck-Str. 1,
21502 Geesthacht

** Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Universität Siegen, Paul-Bonatz-Str. 9-11,
57076 Siegen

Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Meeresspiegeländerungen der Deutschen Bucht wurde eine künstliche Zeitreihe, aus den zur Verfügung stehenden Pegeldaten, erzeugt, die den Meeresspiegel der deutschen Bucht repräsentieren soll. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Methoden verwendet. Die erste Methode basiert auf den Mitteln der einzelnen Pegeldaten und die zweite auf einer Hauptkomponentenanalyse. Beide Methoden führen zu ähnlichen Ergebnissen. Auf Grund unserer Untersuchungen kommen wir zu dem Ergebnis, dass der Meeresspiegel der Deutschen Bucht in dem Zeitraum von 1924 bis 2008 zwischen 1,64mm/J und 1,74mm/J gestiegen ist. Die längste zur Verfügung stehende Zeitreihe ist die von Cuxhaven, welche bis 1843 zurück geht. Es wurde untersucht, in wie weit diese Zeitreihe repräsentativ ist für die gesamte Deutsche Bucht, mit dem Ergebnis, dass dies nicht der Fall ist – zumindest ab 1924. Für den Zeitraum vor 1924 können wir leider keine Aussage machen, was insbesondere zu Unsicherheiten bei der Frage führt, ob es in den letzten Jahren einen außergewöhnlich hohen Anstieg im Trend gegeben hat. Um dekadische Änderungen wahrzunehmen, wurde dies mit Hilfe von gleitenden 20- und 37-jährigen Trends untersucht. Es stellte sich heraus, dass es tatsächlich einen beschleunigten Anstieg gegeben hat in den letzten Jahren, dass dieser jedoch im Vergleich zu früheren Perioden nicht außergewöhnlich hoch ist.

Keywords: regionale Meeresspiegeländerung, Deutsche Bucht, Rekonstruktionsmethoden, beschleunigter Meeresspiegelanstieg

1 Einführung

Die Änderung des globalen Meeresspiegels (GMSL) ist von großem Interesse – sowohl in der Wissenschaft als auch in der Öffentlichkeit. Dies ist nicht verwunderlich, da ein Anstieg des Meeresspiegels starke Auswirkung auf Küstenregionen hätte. Der Anstieg des GMSL wurde auf 1,7mm/J für das 20. Jahrhundert geschätzt (Bindoff et al. 2007) und es wird davon ausgegangen, dass er für die Zukunft noch höher sein wird (Meehl et al. 2007). Seit dem Jahr 1993 stehen Satellitendaten für diese Untersuchungen zur Verfügung, wegen des relativ kurzen Zeitraums ist es jedoch schwierig aus den Satellitendaten allein aussagekräftige Schlussfolgerungen zu ziehen. Church et al. (2004) haben diese mit den Pegeldaten kombiniert, um sowohl eine räumliche Auflösung als auch eine Zeitreihe für den GMSL zu bekommen. Mit Hilfe dieser Zeitreihe wurde später untersucht, ob es in jüngerer Vergangenheit einen beschleunigten Anstieg gegeben hat (Church et al. 2006, 2007). Dies wurde mit Hilfe von gleitenden 20-jährigen Trends gemacht, bei denen außergewöhnlich hohe Werte in den letzten Perioden gefunden wurden. Dahingegen haben Jevrejeva et al. (2006, 2008) einen Ansatz gewählt, in dem sie allein Pegeldaten zur Konstruktion einer Zeitreihe des GMSL verwendet haben. Sie haben in dem Zeitraum von

1993 bis 2004 einen Trend von 2,4mm/J festgestellt, gleichzeitig aber angemerkt, dass es auch in anderen Perioden einen solch hohen Trend gegeben hat.

Da der Meeresspiegel stark von regionalen Faktoren abhängig ist, ist es notwendig unterschiedliche Gebiete der Welt separat zu betrachten. Wir betrachten hier speziell mit der Deutschen Bucht einen Teil der Nordsee. Die Untersuchungen der Deutschen Bucht beschränken sich bisher meist auf mittlere Hoch- bzw. Niedrigwasser, sowie auf den mittleren Tidenhub (Jensen et al. 1992; Lassen 1995; Jensen and Mudersbach 2007). Wahl et al. (2008, 2010) untersuchten den mittleren Meeresspiegel an einzelnen Pegeln.

In dieser Arbeit stellen wir nun zwei Methoden vor, um eine Zeitreihe für den Meeresspiegel der gesamten Deutschen Bucht zu konstruieren, die wir anschließend detailliert analysieren und vergleichen. Die Untersuchungen sind ausführlich wiederzufinden in Albrecht et al. (in review).

2 Daten und Methoden

Bei denen für unsere Untersuchungen verwendeten Daten handelt es sich um Pegeldata. Die betrachteten Orte sind in Abbildung 2.1 angegeben. Von den insgesamt 15 Pegeln wurden 13 innerhalb des AMSeL (Mean Sea Level and Tidal Analysis at the German North Sea Coastline) Forschungsprojektes aufgearbeitet. Die genauen Methoden hierzu können in Wahl et al. (2010) nachgelesen werden. Die Orte Borkum und Büsum wurden in diesem Projekt nicht weiter verfolgt, da es Unstimmigkeiten in den Daten gab. Der Ansatz der Hauptkomponentenanalyse (EOF-Analyse) um den regionalen Meeresspiegel (RMSL) zu rekonstruieren, rechtfertigt allerdings diese Daten hier dennoch zu verwenden (siehe Kapitel 3.1).

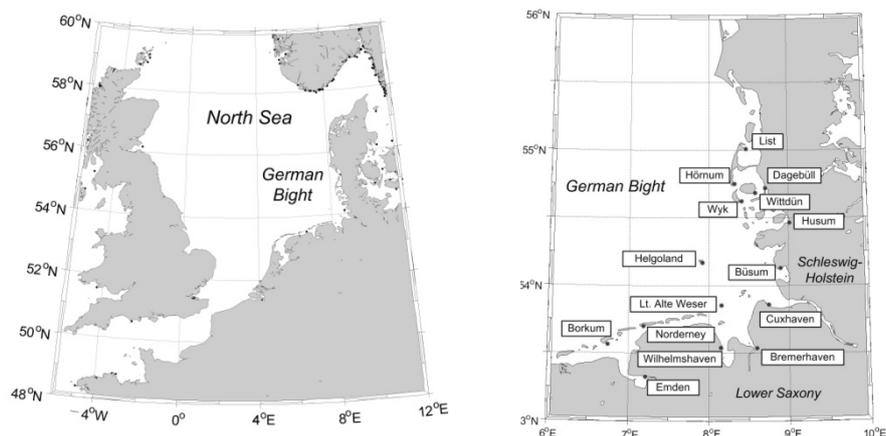


Abbildung 2.1: Untersuchungsgebiet; Nordsee (links) und untersuchte Pegel in der deutschen Bucht (rechts).

Um aus den verschiedenen Pegeldata eine einzige Zeitreihe zu konstruieren, die den RMSL der Nordsee repräsentiert, gehen wir von zwei unterschiedlichen Ansätzen aus, die wir anschließend miteinander vergleichen. Im ersten Ansatz (im Weiteren als Mittelwert-Ansatz bezeichnet) werden zunächst die jährlichen linearen Trends für jede Zeitreihe

berechnet, diese werden dann über die Orte gemittelt und anschließend aufaddiert. Damit erhalten wir eine Zeitreihe, die den RMSL der Deutschen Bucht wiedergibt.

Der zweite Ansatz basiert auf einer EOF-Analyse. Dieser Ansatz beruht auf der Idee, dass der Meeresspiegel das gemeinsame Signal aller Pegel ist und individuelle Schwankungen einzelner Pegel herausgefiltert werden sollten. In der EOF-Analyse wird das gemeinsame Signal durch das Muster mit der größten erklärten Varianz beschrieben und die zeitliche Änderung entlang dieses Signals durch die erste Hauptkomponente. Wenn wir nun davon ausgehen, dass Baumaßnahmen genau solche individuellen Schwankungen sind, dann sollten diese hauptsächlich in den höheren Mustern der EOF-Analyse sichtbar sein, während das gemeinsame Signal durch das erste Muster beschrieben wird. Deshalb definieren wir die zum ersten Muster gehörige Zeitreihe als den RMSL und bezeichnen dies als EOF-Ansatz. Eine detaillierte Beschreibung der EOF-Analyse ist in von Storch und Zwiers (1998) zu finden.

Die Qualität, der sich daraus ergebenden Zeitreihe ist stark von der erklärten Varianz des ersten Musters abhängig. Wie sich in Kapitel 3.1 zeigen wird, liegt diese in allen sinnvollen Rekonstruktionen über 90%.

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich beider Ansätze

In Kapitel 2 wurden die beiden Methoden zur Konstruktion einer künstlichen Zeitreihe, die den RMSL erläutert. In Abbildung 3.1 ist nun das Ergebnis aus beiden Ansätzen zu sehen. Beide Zeitreihen haben einen Korrelationskoeffizienten von nahezu 1 in den gemeinsamen Zeitperioden 1936 – 2008 und 1924 – 2008. Auch die linearen Trends sind sehr ähnlich, wie man in Tabelle 3.1 sehen kann. Diese beiden Kurven werden wir im Folgenden detailliert erläutern und diskutieren.

Der Hauptunterschied beider Ansätze kommt zum Vorschein, wenn Daten für einen gewissen Zeitraum fehlen. Der Mittelwertansatz berücksichtigt nur die Daten, die zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhanden sind, während im EOF-Ansatz die Daten aller Zeitreihen zu jedem Zeitpunkt berücksichtigt werden. Insbesondere heißt das, dass im Mittelwertansatz zu verschiedenen Zeitpunkten, unterschiedliche Mittel miteinander verglichen werden. Im EOF-Ansatz gehen wir davon aus, dass die zum ersten Muster zugehörige Zeitreihe die zeitliche Änderung des gemeinsamen Signals aller Pegel wiedergibt, während Schwankungen an einzelnen Stationen herausgefiltert werden. Um diese Annahme zu stärken, wurde folgender Test durchgeführt: Wir haben für den Zeitraum 1924 – 2008 eine EOF-Analyse der in Abbildung 3.1 zu sehenden Pegel durchgeführt. Die sich daraus ergebene Zeitreihe haben wir verglichen mit dem Ergebnis der EOF-Analyse aus den gleichen Daten, wobei jedoch bei dem Pegel Bremerhaven ab dem Jahr 1972 ein Sprung von 0.06m dazu addiert wurde. Dieser Wert entspricht der Standardabweichung der gesamten Zeitreihe von Bremerhaven. Der Vergleich zeigt, dass die dabei entstehenden Muster sowie die dazu gehörige Zeitreihe der ersten EOF nahezu identisch sind. Beide Muster haben eine erklärte Varianz von 90% und die Zeitreihen haben einen Korrelationskoeffizienten von nahezu 1. Die Unterschiede beider EOF-Analysen werden in

den höheren EOFs größer. Dieser Test (nicht gezeigt) unterstützt unsere Annahme und ist auch der Grund, warum bei dem EOF-Ansatz, im Gegensatz zum Mittelwertansatz alle 15 Pegel verwendet werden. Ein Nachteil des EOF-Ansatzes ist, dass die sich aus der Analyse ergebene Zeitreihe vom betrachteten Zeitraum abhängig ist. Allerdings haben Tests über verschiedene Zeiträume ergeben, dass die Unterschiede sehr klein sind.

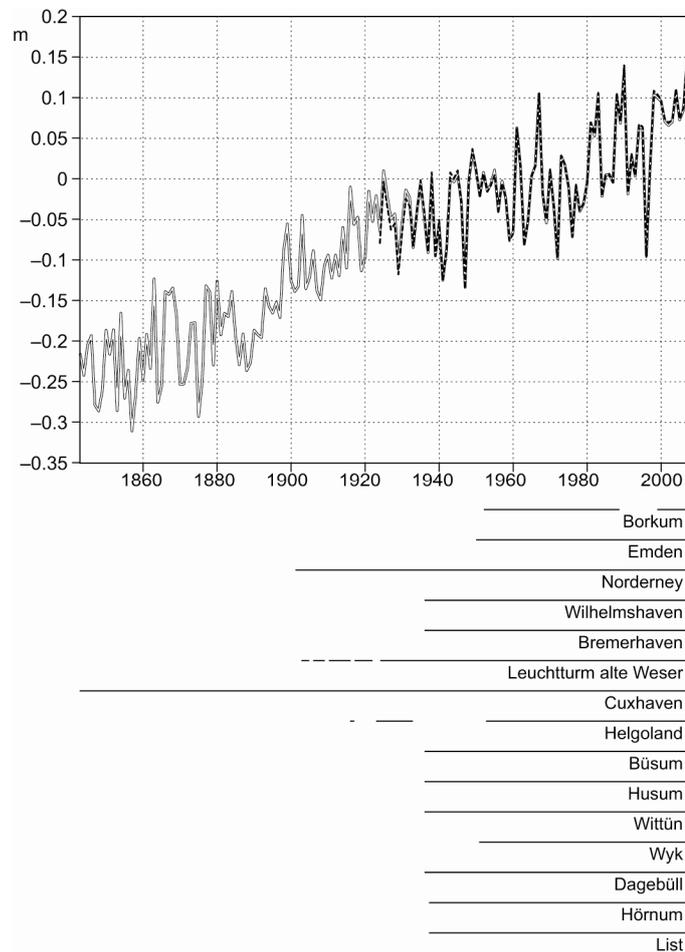


Abbildung 3.1: RMSL der Deutschen Bucht aus zwei unterschiedlichen Ansätzen. Mittelwertansatz 1843 – 2008 (Doppelstrich), EOF-Ansatz 1924 – 2008 (schwarz-gestrichelt), sowie die Datenverfügbarkeit der einzelnen Pegel.

Tabelle 3.1: Lineare Trends von den RMSL Abschätzungen

Methode	1936 - 2008	1924 – 2008	1843 -2008
Mittelwertansatz 1843 – 2008	1,98mm/J	1,64mm/J	2,0mm/J
EOF-Ansatz 1924 – 2008	1,95mm/J	1,74mm/J	-
Cuxhaven 1843 – 2008	2,07mm/J	1,93mm/J	2,28mm/J

Da einige der zur Verfügung stehenden Daten Lücken aufweisen, untersuchen wir wie sich diese Lücken auf die beiden Methoden zur Konstruktion des RMSL auswirken. Im Mittelwertansatz ist jeweils nur der Zeitraum betroffen, in dem die Daten fehlen, wohingegen sich die Fehldaten beim EOF-Ansatz auf den gesamten Zeitraum auswirken können. Da dieser durch die Fehldaten verursachte Effekt nicht im Allgemeinen

abgeschätzt werden kann, führen wir zwei Tests durch. Als erstes nehmen wir die 11 Zeitreihen, die für den Zeitraum 1937 – 2008 keine Lücken aufweisen und führen mit diesen Daten eine EOF-Analyse durch. Dieses Ergebnis bezeichnen wir im Folgenden als „Wahrheit“. Um die Situation des gesamten Datensatzes zu simulieren werden danach künstlich Lücken, die eine Länge von 13 bis 25 Jahren haben, in diese Zeitreihen eingefügt. Mit diesen Daten führen wir wiederum eine EOF-Analyse durch und vergleichen das Ergebnis mit unserer „Wahrheit“. In allen Tests haben die sich ergebenden Zeitreihen einen Korrelationskoeffizienten von mehr als 0.99 und die linearen Trends unterscheiden sich um weniger als 0.1mm/J. Bei dem zweiten Test vergleichen wir unsere „Wahrheit“ mit dem Ergebnis der EOF-Analyse von allen Pegeln für den Zeitraum 1936 – 2008. Hier sind nicht nur die resultierenden Zeitreihen nahezu identisch, sondern auch die Muster. In allen beschriebenen EOF-Analysen hat das erste Muster eine erklärte Varianz von mehr als 90%. Aus den Testergebnissen schließen wir, dass in unserem Fall der Gewinn der zusätzlichen Daten größer ist als der mögliche Fehler durch fehlende Daten.

Unsere bisherigen Ergebnisse rechtfertigen eine Zeitreihe für den RMSL für den Zeitraum 1936 – 2008 und eine wichtige Frage ist, ob es sinnvoll ist weiter als 1936 zurück zu gehen, da uns davor lediglich drei Pegel zur Verfügung stehen, die alle in Niedersachsen liegen. Ab dem Jahr 1924 sind diese drei Pegel ohne Lücken. Dies ist also der Zeitraum, den wir als nächstes untersuchen. Die erklärte Varianz des ersten Musters der EOF-Analyse aller Pegel von 1924 – 2008 liegt bei über 90% und stimmt mit dem Muster für den Zeitraum 1936 – 2008 überein. Die beiden zugehörigen Zeitreihen haben für den gemeinsamen Zeitraum einen Korrelationskoeffizienten von nahezu 1. Diese Untersuchung führt zu der Schlussfolgerung, dass der EOF-Ansatz von 1924 an sinnvoll ist. In Abbildung 3.1 kann man sehen, dass sich beide Ansätze in den Anfangsjahren unterscheiden. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass der Mittelwertansatz für diesen Zeitraum lediglich drei Pegel mittelt, wohingegen der EOF-Ansatz das Signal aller Pegel beinhaltet. Gehen wir weiter als 1924 zurück, dann sinkt die erklärte Varianz auf 76% und die Fehldaten beeinflussen das Muster derart, dass der Pegel Cuxhaven eine wesentlich höhere Amplitude hat (nicht gezeigt).

3.2 Ist der Pegel Cuxhaven repräsentativ für die Deutsche Bucht?

Im letzten Absatz haben wir beide Methoden zur Rekonstruktion des RMSL miteinander verglichen und gezeigt, dass der EOF-Ansatz für den Zeitraum 1924 – 2008 sinnvoll ist. Da beide Ansätze sehr ähnliche Ergebnisse zeigen, stellt sich die Frage, ob man dem Mittelwertansatz für den Zeitraum vor 1924 trauen kann. Da dieser für die ersten 58 Jahre allein aus der Zeitreihe des Pegels Cuxhaven besteht, führt dies zu der Frage, ob Cuxhaven repräsentativ ist für die Deutsche Bucht, d.h. ob es ausreicht allein den Pegel von Cuxhaven zu betrachten. Der Korrelationskoeffizient zwischen der Zeitreihe von Cuxhaven und beiden RMSL Rekonstruktionen liegt bei 0.92, sowohl für den Zeitraum 1936 – 2008 als auch für den Zeitraum 1924 – 2008. Wie man in Tabelle 3.1 sieht, ist der lineare Trend für Cuxhaven in allen Zeiträumen etwas höher als der des RMSL, aber sie sind immer noch vergleichbar.

Bei der Untersuchung des mittleren Meeresspiegels sind wir vor allem an dekadischen Änderungen interessiert. Abbildung 3.2 zeigt die 20- und 37-jährigen Trends von unseren

Rekonstruktionen und dem Pegel Cuxhaven, wobei der Anfangspunkt von jedem 20- bzw. 37-jährigen Trend jeweils um ein Jahr nach oben verschoben wird. 20-jährige Trends wurden gewählt, da dies ein üblicher Zeitraum in der Literatur ist und uns vergleichbare Ergebnisse liefert. Die zusätzlich Betrachtung der 37-jährigen Trends liegt daran, dass dies eine in Deutschland verbreitete Zeitspanne ist (z.B.: Jensen et al. (1992), Jensen und Mudersbach (2004, 2007)), da dies zweimal der Periode der Nodaltide entspricht. Nach Konstruktion sind die Trends des Mittelwertansatzes und des Pegels Cuxhaven am Anfang identisch. Vom Jahr 1955 an sind in den 20-jährigen Trends Differenzen von bis zu 3,7mm/J zu sehen. In den 37-jährigen Trends treten die größten Differenzen in den 1950er Jahren auf und haben einen Höchstwert von 1,8mm/J. Dies deutet an, dass der lokale Meeresspiegel am Pegel Cuxhaven zumindest heutzutage von dem RMSL der Deutschen Bucht abweicht.

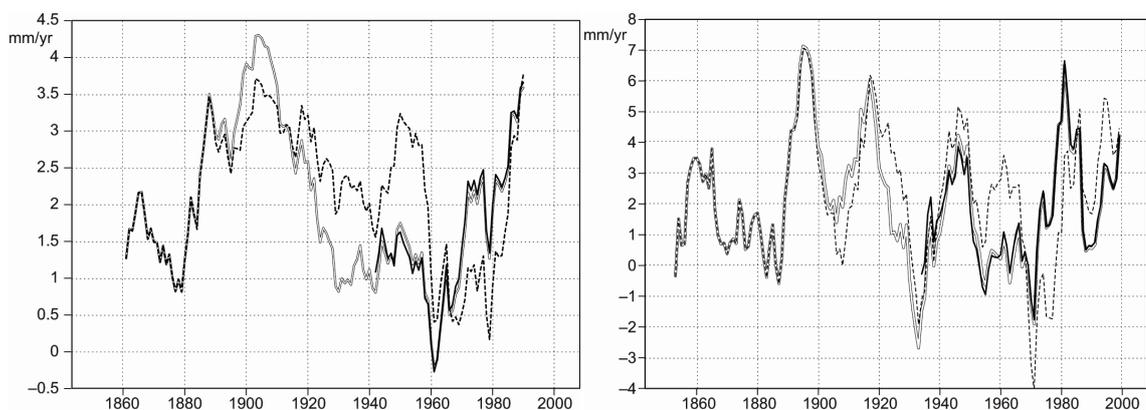


Abbildung 3.2: 20- (links) und 37-jährige (rechts) gleitende Trends der RMSL der Deutschen Bucht. grau: Mittelwertansatz, schwarz: EOF-Ansatz, gestrichelt: Cuxhaven. Der Trend ist jeweils zentriert auf die Mitte der Periode aufgetragen.

Ein Grund für diese Abweichungen könnte sein, dass der Pegel Cuxhaven durch Baumaßnahmen oder Ähnliches beeinflusst wurde. Dies könnte bedeuten, dass Cuxhaven durchaus repräsentativ war bevor diese Baumaßnahmen durchgeführt wurden. Um das zu analysieren untersuchen wir die Residuen aus dem EOF-Ansatz und dem Pegel Cuxhaven. Diese sind in Abbildung 3.3 zu sehen. Wenn diese Residuen klein sind und um Null schwanken erscheint es plausibel, dass der Pegel unbeeinflusst ist. In unserem Fall sieht man, dass es über den gesamten Zeitraum Trends gibt und teilweise große Ausschläge. Die Annahme, dass der Pegel durch Baumaßnahmen oder Ähnlichem beeinflusst wurde, wird damit gestärkt. Leider lässt sich diese Analyse nur bis zu dem Jahr 1924 durchführen. Über den Zeitraum davor können wir demnach keine Aussage machen und es ist immer noch möglich, dass Cuxhaven für diesen Zeitraum repräsentativ war.

Wir schlussfolgern also, dass Cuxhaven zumindest ab dem Jahr 1924 nicht mehr als repräsentativ für die Deutsche Bucht angenommen werden sollte. Dieses Ergebnis passt zu der Aussage, dass die EOF-Analyse andere Ergebnisse liefert, wenn man weiter als 1924 zurück geht, wo die Daten von Cuxhaven stärkeren Einfluss erhalten.

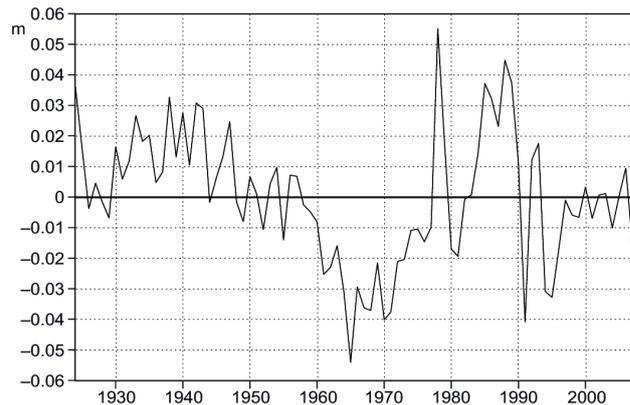


Abbildung 3.3: Residuen aus dem EOF-Ansatz und der Zeitreihe von Cuxhaven für 1924 - 2008

3.3 Beschleunigungsverhalten in der Deutschen Bucht

In diesem Abschnitt betrachten wir noch einmal die in Abbildung 3.2 dargestellten 20- und 37-jährigen Trends der beiden Rekonstruktionen des RMSL und der Zeitreihe von Cuxhaven. Allerdings wollen wir uns jetzt auf die Frage konzentrieren, ob in den letzten Jahren ein beschleunigter Anstieg zu erkennen ist.

In Kapitel 3.1 haben wir gesehen, dass beide Methoden zur Rekonstruktion des RMSL sehr ähnliche Ergebnisse für den gemeinsamen Zeitraum von 1924 – 2008 liefern. Wenn wir jetzt die gleitenden 20- und 37-jährigen Trends miteinander vergleichen, dann ergibt sich für die 20-jährigen Trends ein Korrelationskoeffizient von 0,98 und für die 37-jährigen Trends ein Korrelationskoeffizient von 0,99 für den jeweils gemeinsamen Zeitraum. Wie in Kapitel 3.1 erläutert, unterscheiden sich die beiden Rekonstruktionen für den RMSL in den Anfangsjahren. Dies ist auch in den 20-jährigen Trends zu sehen. In den ersten drei Perioden sind die Differenzen mit bis zu 1,2mm/J recht groß, in allen folgenden liegt der Unterschied jedoch bei weniger als 0,5mm/J. In den 37-jährigen Trends liegen alle Differenzen unterhalb von 0,3mm/J. Da der Mittelwertansatz 81 Jahre früher beginnt als der EOF-Ansatz hat er den großen Vorteil, dass aus einer Analyse dieser langen Zeitreihe wesentlich bessere Schlüsse gezogen werden können. Da diese Zeitreihe für die ersten 58 Jahre lediglich aus den Daten von Cuxhaven besteht und wir in Kapitel 3.2 nicht zeigen konnten, dass Cuxhaven repräsentativ ist für die Deutsche Bucht, müssen wir mit Aussagen, die aus dem Anfangszeitraum resultieren, vorsichtig sein. Abbildung 3.2 zeigt, dass sowohl bei den 20- als auch bei den 37-jährigen Trends alle Zeitreihen am Ende steigen. Das heißt, es ist tatsächlich ein beschleunigter Anstieg in den letzten Jahren zu beobachten. Allerdings sieht man in den 20-jährigen Trends, dass es solche hohen und sogar höhere Trends auch schon in der Vergangenheit gegeben hat. Im EOF-Ansatz weist die Periode um das Jahr 1981 (1971 – 1990) einen Trend von 6,7mm/J auf. Wohingegen die letzte Periode um das Jahr 1999 (1989 – 2008) einen Trend von 4,2mm/J hat. Ähnlich ist es im Mittelwertansatz. Hier hat die letzte Periode ebenfalls einen Trend von 4,2mm/J und der Hochpunkt im Jahr 1981 hat einen Wert von 6,5mm/J. Wenn wir den Anfangsjahren des Mittelwertansatzes trauen, dann gab es zwei weitere Hochpunkte in der Periode um 1895 und um 1917 mit einem Wert von 7,1mm/J bzw. 6mm/J. Bei den 37-jährigen Trends ist die Situation etwas anders. Im EOF-Ansatz steigt der Trend von der Periode um 1979 (1961 – 1997) mit einem Wert von 1,3mm/J bis zu der letzten Periode um

1990 (1972 – 2008) mit einem Wert von 3,7mm/J. Der höchste Trend in der gesamten Periode davor liegt um das Jahr 1977 (1959 – 1995) mit einem Trend von 2,5mm/J. Im Mittelwertansatz steigt der Trend vom der Periode um das Jahr 1979 mit einem Wert von 1,3mm/J auf 3,6mm/J für die letzte Periode. Wenn wir nur den Zeitraum betrachten, den beide Rekonstruktionen gemeinsam haben, dann liegt der höchste Wert in dem Zeitraum davor ebenfalls um das Jahr 1977 mit einem Wert von 2,4mm/J, wenn wir jedoch die gesamte Zeitreihe des Mittelwertansatzes betrachten, dann gab es in der Periode um das Jahr 1904 (1886 – 1922) einen Hochpunkt mit einem Trend von 4,3mm/J, welcher höher ist als der Trend der letzten Periode mit 3,6mm/J.

Obwohl wir in Kapitel 3.2 nicht zeigen konnten, dass Cuxhaven repräsentativ ist für die Deutsche Bucht, betrachten wir diese Zeitreihe hier dennoch, da sie die am längsten zurückreichende Zeitreihe ist, die uns zur Verfügung steht. Auch der Pegel Cuxhaven zeigt, wie die beiden Rekonstruktionen, sowohl in den 20- als auch in den 37-jährigen Trends einen Anstieg zum Ende hin. In den 20-jährigen Trends gibt es mehrere Hochpunkte (1895, 1917, 1946, 1986 und 1994), die einen höheren Trend aufweisen als die letzte Periode um das Jahr 1999, die einen Wert von 4,4mm/J hat. Die letzte Periode der 37-jährigen Trends hat einen Wert von 3,8mm/J. In dieser Kurve gibt es zwei weitere Hochpunkte. Zum einen um das Jahr 1950 (1932 – 1968) mit einem Trend von 3,2mm/J und zum anderen um das Jahr 1903 (1885 – 1921) mit einem Trends von 3,7mm/J. Beide Trends liegen unterhalb des Trends der letzten Periode, aber die Differenz, besonders zu dem Hochpunkt um 1903 ist klein.

Insgesamt sehen wir, dass alle Zeitreihen, die der beiden Rekonstruktionen und die des Pegels von Cuxhaven sowohl für die 20- als auch für die 37-jährigen Trends steigen. In den 20-jährigen Trends sehen wir jedoch, dass es für alle Zeitreihen auch schon früher derart hohe und sogar höhere Trends gegeben hat. Bei den 37-jährigen Trends ist die Situation nicht ganz klar. Wenn wir hier lediglich den gerechtfertigten Zeitraum ab 1924 betrachten, dann sind die Trends der letzten Perioden in der Tat außergewöhnlich hoch. Nur wenn wir den Anfangszeitraum des Mittelwertansatzes und des Pegels Cuxhaven miteinbeziehen, sehen wir, dass dies nicht der Fall ist. Obwohl wir den Mittelwertansatz für diesen Zeitraum nicht rechtfertigen können, wäre es dennoch unverantwortlich die einzige lange Zeitreihe, die uns zur Verfügung steht, nicht zu verwenden. Wir können demnach zumindest schlussfolgern, dass die hohen Trends der letzten Perioden nicht außergewöhnlich hoch sind für die Zeitreihe von Cuxhaven. Die Betrachtungen führen leider nicht zu einer eindeutigen Aussage, aber dennoch nehmen wir an, dass sie hinreichend dafür sind zu sagen, dass es sich sehr wahrscheinlich nicht um einen außergewöhnlich hohen Anstieg in den letzten Jahren handelt.

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der regionale Meeresspiegel der Deutschen Bucht anhand zweier unterschiedlicher Methoden rekonstruiert und analysiert. Beide Ansätze liefern sehr ähnliche Ergebnisse, was uns davon ausgehen lässt, diese Ergebnisse als zuverlässig ansehen zu können.

Da unser Hauptinteresse dekadische Änderungen des Meeresspiegels sind, untersuchen wir hauptsächlich dekadische Trends. Insbesondere kann man hier sehen, dass ein großer Korrelationskoeffizient auf jährlicher Skala nicht unbedingt bedeuten muss, dass auch die dekadische Variabilität ähnlich ist.

Ein Teil der Analyse beschäftigt sich mit der Frage, ob der Pegel Cuxhaven repräsentativ ist für die Deutsche Bucht. Diese Frage kann leider nicht gänzlich beantwortet werden, aber die Untersuchungen der Trends, sowie der Residuen der Zeitreihe Cuxhaven und dem EOF-Ansatz, führen zu der Annahme, dass dies – zumindest ab dem Jahr 1924 – nicht der Fall ist. Die hier angewendeten Methoden könnten jedoch auf andere Pegel angewendet werden, um zu untersuchen ob ein anderer Pegel ein besserer Proxy für den Meeresspiegel der Deutschen Bucht ist. Falls sich solche Pegel finden, wäre dies nützlich für zukünftige Digitalisierungsarbeiten, da man sich auf diese Pegel beschränken könnte.

Die Frage, ob es in der jüngeren Vergangenheit einen beschleunigten Anstieg gegeben hat, wird ebenfalls mit Hilfe der dekadischen Trends analysiert. Hier kommt der Vorteil des Mittelwert-Ansatzes deutlich zum Tragen, da dieser weiter in die Vergangenheit zurück reicht. Die Untersuchung der beiden Ansätze und der Zeitreihe von Cuxhaven führen zu der Schlussfolgerung, dass es zwar einen beschleunigten Anstieg gegeben hat in den letzten Jahren, dieser aber nicht außergewöhnlich hoch ist.

5 Literatur

Albrecht F, Wahl T, Jensen J, Weisse R (in review) Regional mean sea level changes in the German Bight in the 20th century. *Ocean Dynamics*

Bindoff NL, Willebrand J, Artale V, Cazenave A, Gregory J, Gulev S., Hanawa K, Le Quere C, Levitus S, Nojiri Y, Shum CK, Talley LD, Unnikrishnan A. (2007) Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Church JA, White NJ, Coleman R., Lambeck K., Mitrovica JX (2004) Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950 – 2000 period. *J Clim* 17:2609 – 2625

Church JA, White NJ (2006) A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophys Res Lett* 33, L01602. doi:10.1029/2005GL024826

Church JA, White NJ, Aarup T, Wilson WS, Woodworth PL, Domingues CM, Hunter JR, Lambeck K (2007) Understanding global sea levels: past, present and future *Sustain Sci* 3(1):9 – 22, doi:10.1029/2005GL024826

Jensen J, Mügge HE, Schönfeld W (1992) Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. *Die Küste* 53:211 – 275

Jensen J and Mudersbach C (2007) Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den deutschen Küsten. In: *Berichte zur Deutschen Landeskunde, Themenheft:*

Küstenszenarien, Band 81, Heft 2: 99 – 112, edited by: Glaser R, Schenk W, Vogt J, Wießner R, Zepp H, Wardenga U, Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde e.V., Leipzig

Jevrejeva S, Moore JC, Grinsted A, Woodworth PL, 2006: Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. *J Geophys Res* 111, C09012, doi:10.1029/2005JC003229

Jevrejeva S, Grinsted A, Woodworth PL (2008) Recent global sea level acceleration started over 200 years ago? *Geophys Res Lett* 35, L08715, doi:10.1029/2005GL033611

Lassen H, (1995) Interpretation von Wasserstandsänderungen in der deutschen Bucht auf der Basis der Ergebnisse eines KFKI-Projekts. *Die Küste* 57:122 – 134

Meehl GA, Stocker TF, Collins WD, Friedlingstein P, Gaye AT, Gregory JM

Meehl GA, Stocker TF, Collins WD, Friedlingstein P, Gaye AT, Gregory JM, Kitoh A, Knutti R, Murphy JR, Noda A, Raper SCB, Watterson IG, Weaver AJ and Zhao ZC (2007) Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

von Storch H and Zwiers F (1998) *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University press

Wahl T, Jensen J, Frank T (2008) Changing Sea Level and Tidal Dynamics at the German North Sea Coastline. *Proc. of the Coastal Cities Summit 2008 – Values and Vulnerabilities*, St. Petersburg, Florida, USA

Wahl T, Jensen J, Frank T (2010) On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:171 – 179. doi:10.5194/nhess-10-171-2010

Developing sustainable coastal protection- and management strategies for Schleswig-Holstein's Halligen considering climate change (ZukunftHallig)

- Subproject A: Hydrodynamic analyses in the region of the Halligen -

Arne Arns und Jürgen Jensen

Research Institute for Water and Environment (fwu), Dept. Hydraulic Engineering
University of Siegen

Abstract

Within the joint research project "ZukunftHallig", an interdisciplinary team of researchers are investigating the future development of the Halligen considering climate change. The project aims for the development of new impulses to sustainable coastal protection- and management strategies, focusing on the protection and preservation of the Halligen. In subproject A, the hydrodynamic forcing of today and under future conditions as well as morphological and sedimentological changes will be investigated. Therefore, local sea levels and extreme water levels as well as their interaction are going to be analysed. In a first step, a method was adapted for testing all tide gauge data for homogeneity. Subsequent, methods are investigated that allow combining incomplete and erroneous as well as complete data set for further analyses.

Zusammenfassung

Im Verbundforschungsvorhaben "ZukunftHallig" untersucht eine interdisziplinäre Forschergruppe die zukünftige Entwicklung der Halligen unter sich ändernden klimatischen Bedingungen. Das Ziel der geplanten Untersuchungen ist die Entwicklung von Impulsen für nachhaltige Küstenschutz- und Bewirtschaftungsstrategien. Dabei stehen insbesondere der Erhalt und die Bedeutung der Halligen im nordfriesischen Wattenmeer im Fokus der Untersuchungen. Im Rahmen des Projektes werden dabei sowohl heutige, als auch zukünftige klimatische Randbedingungen berücksichtigt. Im Teilprojekt „ZukunftHallig A“ sollen hierzu die hydromechanischen Belastungen unter heutigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen sowie die morphologischen und sedimentologischen Veränderungen an und auf den Standorten betrachtet werden. In einem ersten Schritt wurde eine Methode zur Detektion von Inhomogenitäten in Wasserstandszeitreihen adaptiert. Darauf aufbauend werden Methoden entwickelt, die eine Kombination von fehlerhaften, unvollständigen und vollständigen Daten ermöglichen, um anschließend unterschiedlichen Analysen zugeführt werden zu können.

Keywords: inhomogeneities, gap filling, data management, erroneous data

1 Introduction

With an area of approximately 9.000 km², the depositional coastline of the Wadden Sea is one of the world's largest intertidal wetlands. In 2009, the Wadden Sea was added to UNESCO's World Heritage List. Besides its ecological and historico-cultural relevancy, the Wadden Sea itself is an important element of coastal protection. Surrounded by the North Sea, the Wadden Sea includes 10 marsh islands called Halligen. These small islands are a natural phenomenon, which is unique worldwide. Although the Halligen are inhabited by around 350 residents, the Halligen have no dikes. Consequently, the Halligen are inundated up to 50 times a year. In order to protect themselves from these inundations,

houses are built on dwelling mounds. Residents learned to cope with these extreme conditions, but as time goes by, the Halligens' shapes and conditions are gradually negatively affected, especially in consequence of rising sea levels. According to Katsman et al. (2008), sea level is predicted to rise by 40 cm to 80 cm by 2100 for the northeast Atlantic (see also Wahl et al. 2011). Among others, these changes are directly affecting the ability of disturbance regulation of the Wadden Sea while ocean currents and sediment fluxes are influenced and the Halligens' flooding frequency increases. Coastal ecosystems are known to be dynamic with a certain capacity of compensating changes in Mean Sea Level (MSL) by non-linear feedback mechanisms. However, observations are indicating limits in this adaptability (Kirwan et al. 2010). The intention of the research project is to gain insight into the processes involved in the evolution of the Halligen, which is the basis for an effective and sustainable protection strategy. Simultaneously the demands but also the worries of the Hallig residents have to be considered

In subproject A, the hydrodynamic forcing of today and under future conditions as well as morphological and sedimentological changes will be investigated. Therefore, local sea levels and extreme water levels as well as their interaction are going to be analysed. For estimating the future sedimentation on the Halligen, analyses on both the duration and the depth of inundations and their correlation with sedimentological data is of particular interest.

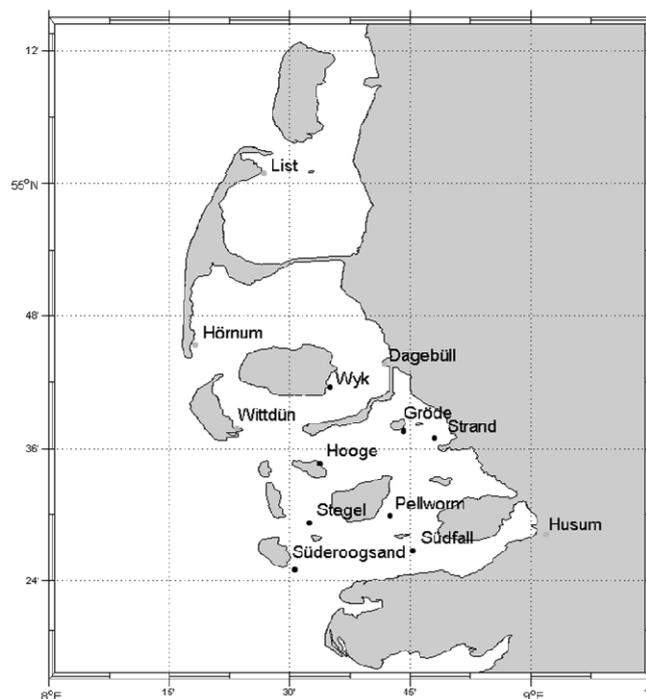


Figure 1: Study area, grey dots indicate gauges managed by federal agencies, black dots are state agency managed gauges

2 Study area

The study area is located at Schleswig-Holsteins coastline, the most northern part of Germany (see Figure 1). As the gauges are located in a shallow part of the North Sea, they are all influenced by shallow water effects. Therefore the gauge at Heligoland will be

included in the investigations and serve as a deep water reference. Due to the comprehensive work schedule, the study will only be conducted for three of the overall ten existing Halligen exemplarily. These are Langeneß, Nordstrandischmoor and Hooge. Because the Halligen have no proper dikes, the investigations will include two diked Islands in Lower Saxony, further west of Schleswig-Holstein. Hence the System-dependent behaviour shall be derived.

3 Data

The research will be based on a huge number of tide gauges located all over the study area. Almost all gauges managed by federal agencies (light grey dots in Figure 1) provide high resolution data with 1-minute sampling rates starting in the mid 1990's and tidal highs and lows starting from the mid 30's. In contrast most state agency managed gauges (black dots in Figure 1) are less consistent and discontinuous. In a first step, all data were tested for homogeneity.

As stated in Aguilar et al. (2003), in a homogeneous climate time series all variability and changes are caused by variations in climate. Actually, tide gauge data sets are affected by a number of non-climatic factors as i.e. changes in instruments, locations or observation techniques but also erroneous recordings or data management techniques. In consequence these data sets are technically speaking unrepresentative of climate variations and can bias a time series. It is therefore desirable to remove or at least to detect inhomogeneities for quantifying possible errors they may cause. Because climate data contains a large variability, it is a difficult task to detect inhomogeneities, especially if their magnitude is small compared to climate related variations. Based on the candidate-reference system, which is widely used in other disciplines of climatology, possible errors in data can be detected. The classical approach uses the difference or ratio between a candidate and a reference time series. The reference is typically a virtual station resulting from averaging nearby stations (Aguilar et al. 2003).

Within "ZukunftHallig" this approach has been adapted to tide gauge time series. Instead of building a virtual reference, the data itself is used and compared to the candidate time series on different time scales. Analyses of the data from all gauges in the study area (according to Figure 1) are showing a significant dependency, meaning correlation coefficient values considerably above 0.9. This correlation has a time dependent variability indeed, but shows an almost cyclic pattern in all.

In Figure 2 the candidate-reference system is shown, whereas Dagebüll is the candidate and Wittdün as well as Husum are the references. The time scale under consideration for this example is of 24 hours. As one can see, the correlation (middle- and lower depiction) varies in a certain range within time, but there is no conspicuous deviation visible.

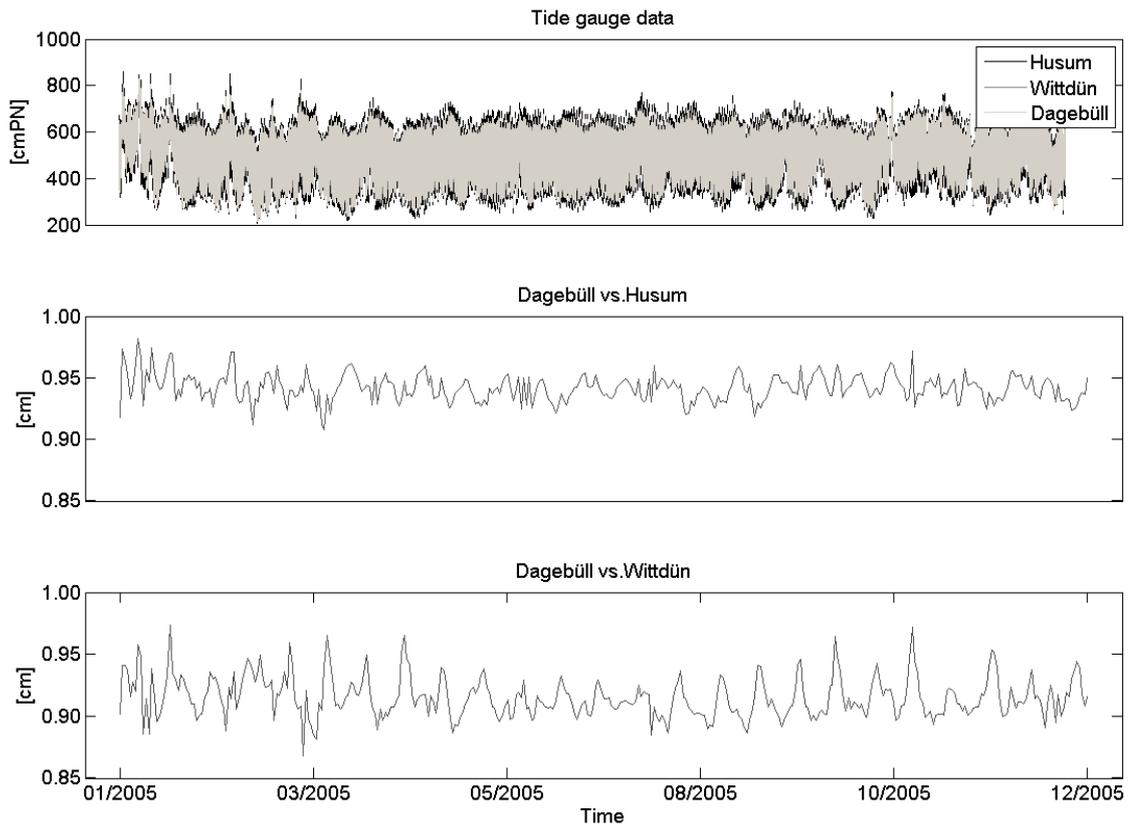


Figure 2: Candidate-reference method for detecting inhomogeneities in tide gauge data. The patterns in the middle- and lower depiction are indicating that there is no inhomogeneity in the three data set extracts.

Applying this technique to a longer period and a larger quantity of tide gauges, the pattern is likely to differ from the above shown. As one can see in Figure 3, the variability of the correlation coefficients is larger. Again Dagebüll serves as candidate while Hörnum, Husum, List and Wyk are the references. While in the represented resolution Dagebüll vs. Hörnum does not show notably deviations, Dagebüll vs. List and especially Dagebüll vs. Husum as well as Dagebüll vs. Wyk show a remarkable decrease in correlation coefficients for certain periods. These conspicuous spots are indicating inhomogeneities in the data. Due to their appearance in only one of each depiction of Figure 3, the inhomogeneity is in the reference series under consideration. If the point would occur in each individual depiction, the error is attributed to the candidate time series.

In Figure 4, the point at the far right of the comparison of Dagebüll vs. Husum is shown in detail. As one can see, the Husum time series is erroneous on July 29th, 2009. After detection the erroneous period can be deleted or corrected by applying a reliable gap filing method.

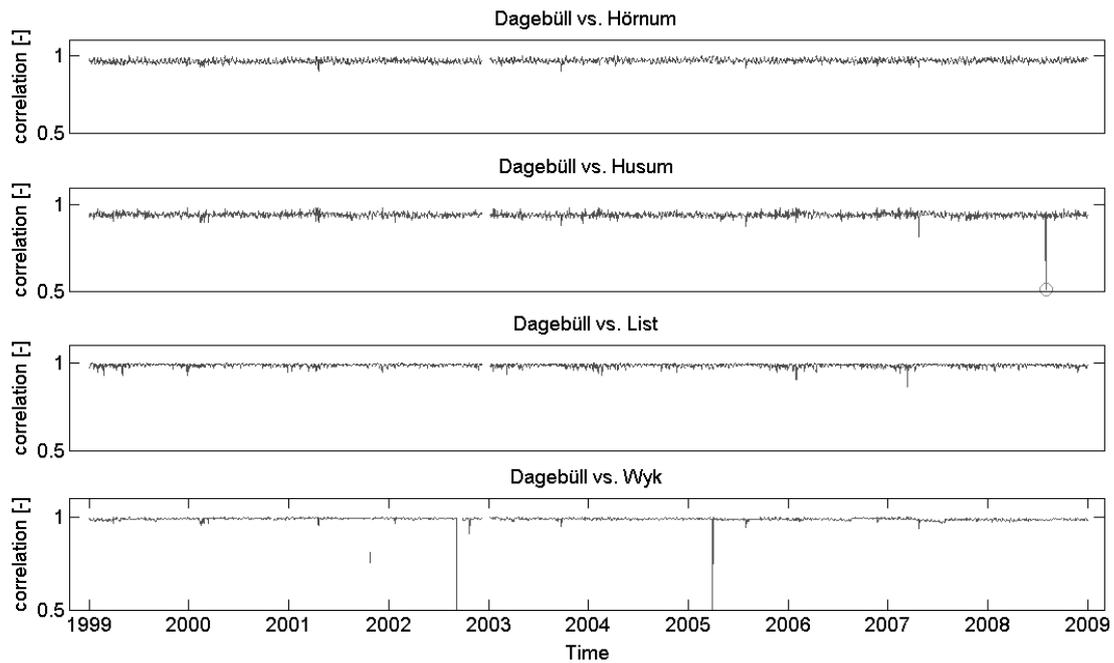


Figure 3: Candidate-reference method applied to eleven years five gauges. Large deviations are indicating inhomogeneities.

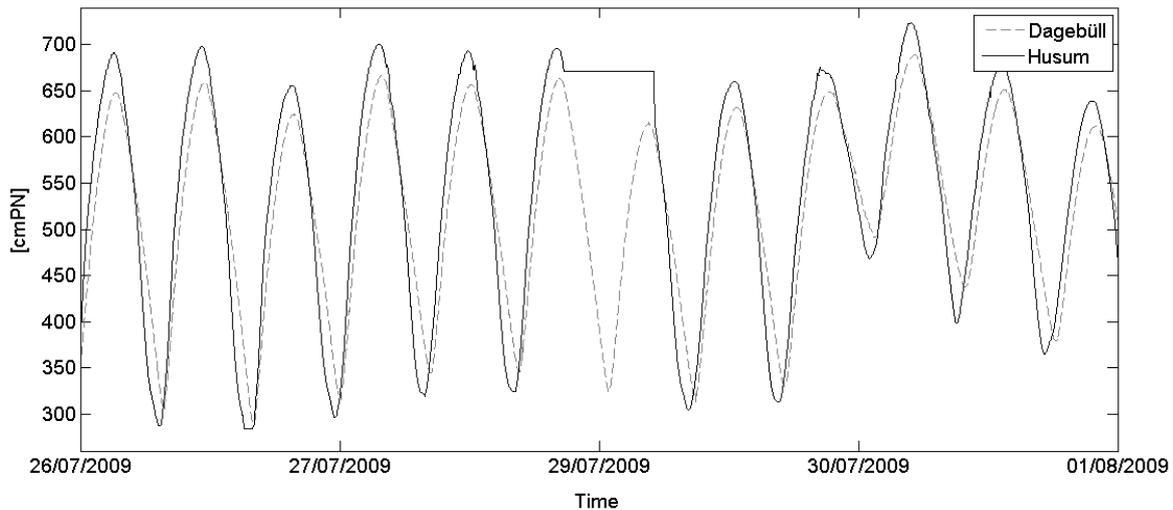


Figure 4: Detailed depiction of the rightmost point of Figure 3 of the comparison of Dagebüll vs. Husum.

4 Gap Filling

Within „ZukunftHallig“ we aim at combining as much tide gauge information as possible as a basis for deriving the future development of the Halligen. To obtain reliable knowledge of the evolution of water levels and tidal characteristics in the investigation area, a method will be developed which allows combining these different data sets.

The first approach is to homogenise all data sets and, depending on sensitivity studies, fill gaps with a proper method which allows a quantification of the error produced by building synthetic data (see also Jensen et al. 1992).

Filling longer gaps in time series is a difficult task in coastal engineering and has been subject of many investigations. Most prominent approaches are based on neural networks, spectral analyses or regression models and combinations of the previously mentioned. While none of these methods are able to exactly reproduce missing data, it is therefore important to be able to quantify the error of the reproduction.

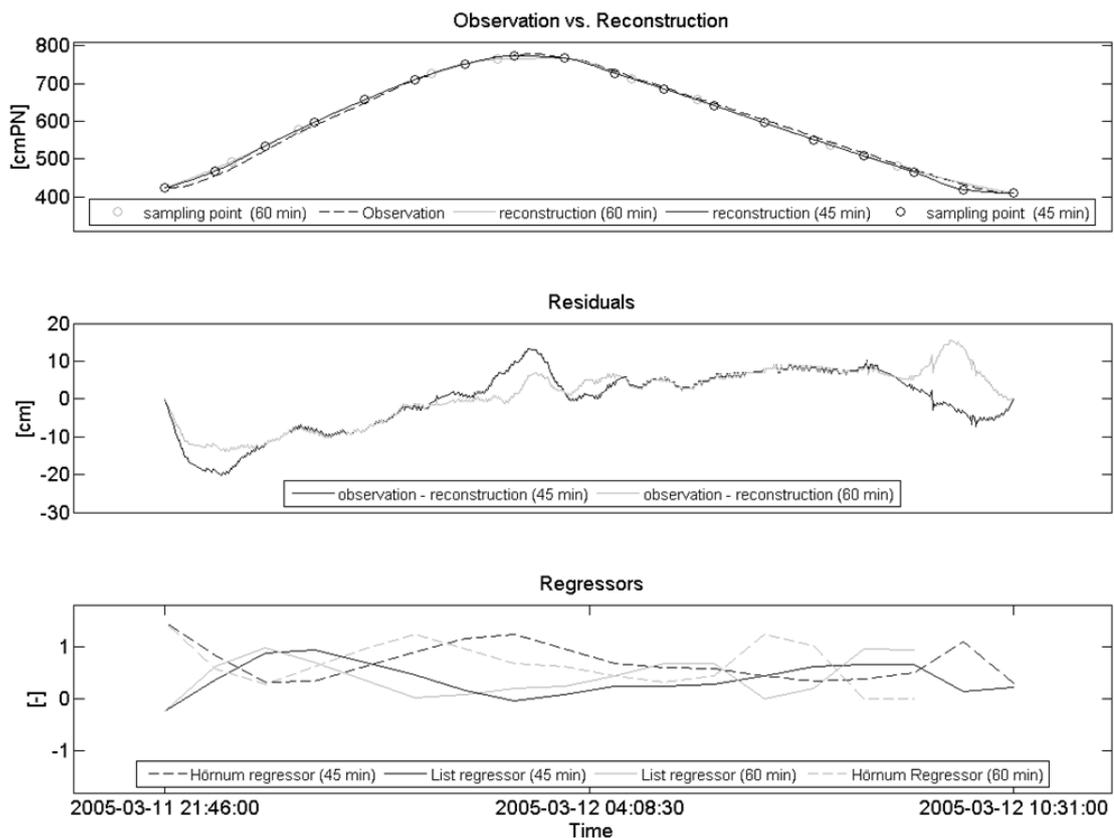


Figure 5: Observation and reconstruction of the candidate (Dagebüll). In the middle the Residuals are shown while the lower figure shows the regressors for each reference station (Hörnum and List) in this example.

Considering these standards, currently a method is being tested, which is based on a multiple regression model, which for itself is differentiated in various time parameters. In this parametric multiple-regression-model, from a period of a candidate station as well as from the reference stations several parameters are selected. For each of these parameters a multiple regression model, including all available data within a certain time span of the reference stations and the candidate, is built. In the upper depiction of Figure 5, the parametric-multiple-regression model based reconstruction for the candidate (Dagebüll) as well as the original time series of the candidate is shown. In the example above, the

parameters where chosen to be equidistant points every 60 or 45 minutes, starting with a tidal low water. The depiction in the middle of Figure 5 is showing the residuals between the original series and the reconstruction; the lower one shows the regressors of the current example, which have to be multiplied with the associated reference for generating the reconstructed time series. The results give reason to expect a good approximation to original time series, especially compared to other commonly used approaches as e.g. the simple linear regression model.

The upcoming task is to optimise the time span between parameters as well as number of references that have to be included in the model. Hereafter gaps can be filled up while at the same time errors can be quantified and included in analyses.

5 Usage and relevancy

Using the candidate-reference based detection method proposed in passage 3 of this paper, enables to automatically reveal inhomogeneities. The time scale considered in this method can vary between different units such as years, months, weeks, days and even tides. Depending on the time scale the method is applied, it is possible to detect the actual tide the inhomogeneity is starting from. However it is difficult to detect long term changes with the candidate-reference method. In that case other techniques have to be considered. For further information see e.g. Mudersbach (2010).

Using information about inhomogeneities enables to reproduce certain periods by using e.g. the parametric-multiple-regression model introduced in passage 4 of this paper. By combining these methods, scrappy data sets as at most Hallig gauges are present, can be filled while statistic errors can be quantified. Especially in regions where only small data is available, this method enables to build synthetic data. By this means it is possible to reconstruct a certain amount of data necessary to conduct special analysis techniques.

6 Literature

Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T., Wieringa, J. (2003): Guidelines on climate metadata and homogenization. World Meteorological Organization.

Jensen, J., Mügge, H. E., Schönfeld, W. (1992): Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. Die Küste, Heft 53.

Katsman, C.A., Hazeleger, W., Drijfhout, S.S., van Oldenborgh, G.J., Burgers, G.J.H. (2008): Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt Climatic Change.

Kirwan, L. M., Guntenspergen, G. R., D'Alpaos, A., Morris, J. T., Mudd, S. M., Temmerman, S. (2010): Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level. In: Geophysical Research Letters, Vol. 32., doi:10.1029/2010GL045489.

Liebig, W. (1994): Schließen von Lücken in Pegelaufzeichnungen. Die Küste, Heft 56.

Mudersbach, C. (2010): 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. Siegen.

Wahl, T., Jensen, J., Frank, T., Haigh, I.D. (2011): Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years, Ocean Dynamics DOI: 10.1007/s10236-011-0383-x (online first).

Untersuchungen zur Detektion von Instationaritäten in küstenhydrologischen Zeitreihen

Sönke Dangendorf und Jürgen Jensen

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen

Zusammenfassung

Die Auswertung von aufgezeichneten Wasserstandsdaten ist von grundsätzlicher Bedeutung bei der Bemessung von Küstenschutzbauwerken. Für die Wahl adäquater Bemessungswerte ist es daher notwendig, auf homogene und anthropogen möglichst unbeeinflusste Datensätze zurückgreifen zu können. Durch vielfältige bauliche Maßnahmen an den Küsten und Ästuaren ist dies nicht immer gegeben. Die Auswirkungen anthropogener Veränderungen an der Küste auf Wasserstandsdaten lassen sich zwar vermuten, sind aber bisher nur unzureichend Gegenstand von Untersuchungen gewesen. Der im Beitrag vorgestellte Standard Normal Homogeneity Test ermöglicht die Detektion von Bruchpunkten in Wasserstandsdaten mit jährlicher Auflösung. Mit Hilfe homogener Referenzpegel lassen sich anthropogene Bruchpunkte sehr genau datieren und quantifizieren.

Keywords: *Bruchpunkte, Baumaßnahmen, Instationaritäten, Monte Carlo Simulation*

1 Einführung

Wasserstandsdaten bilden die Grundlage für die Ermittlung von statistisch ermittelten Bemessungswasserständen als Belastungsgrößen für die Dimensionierung von Küstenschutzbauwerken. Für die Ermittlung adäquater Bemessungswasserstände sind exakte und homogene Messreihen unabdingbar. In längeren Klima- und Wasserstandszeitreihen ist die direkte Verwertbarkeit des Datenmaterials nicht immer gegeben. Sind die Daten lokal anthropogen beeinflusst, kann dies zu fehlerhaften Beeinflussungen bis hin zu vollständigen Verfälschungen innerhalb der statistischen Analyse führen. Solche Instationaritäten können vielfältige Ursachen und Ausprägungen haben. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen sprungartigen und trendartigen Veränderungen. Sprungartige Veränderungen können zum Beispiel durch kurzfristige Setzungen am Pegel oder Baumaßnahmen verursacht werden. Trendartige Veränderungen können in Wasserstandszeitreihen aus langfristigen Landsenkungen, morphologischen Umlagerungsprozessen oder klimatischen Änderungen resultieren (Jensen, J. 1985). Diese Studie, die im Rahmen einer Diplomarbeit am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen erstellt wurde, befasst sich vordergründig mit sprungartigen Veränderungen.

Ein Beispiel für eine solche sprungartige Veränderung findet sich in Abbildung 1. Bei der hier untersuchten Messreihe handelt es sich um eine Stichprobe einer synthetischen Wasserstandszeitreihe, welche in Stichprobenmitte über einen vertikalen Sprung verfügt. Führt man ohne vorangehende Homogenisierung eine lineare Regression durch, erhält man eine Regressionsgerade, welche die tatsächliche Entwicklung nur unzureichend bzw. falsch wiedergibt. Während die Regressionsgerade für die gesamte Messreihe signifikant ansteigt, ist die trendartige Entwicklung der beiden Teilzeitreihen vor und nach dem Sprung

gegenläufig, also signifikant abfallend. Der Trend der gesamten Messreihe wird demnach ausschließlich durch den Sprung in Stichprobenmitte verursacht.

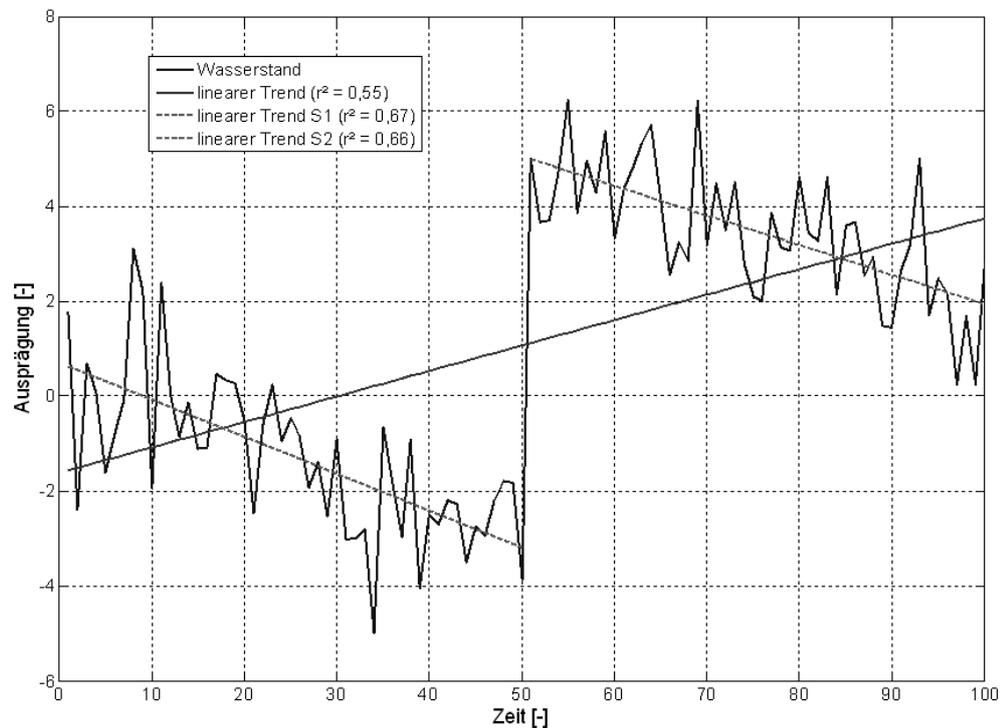


Abbildung 1: Auswirkungen eines vertikalen Sprunges auf die statistische Analyse

Übertragen auf die Frage der Ermittlung adäquater Bemessungswasserstände als Belastungsgrößen, würde eine solche Messreihe ohne Homogenisierung fehlerhafte Ergebnisse und Erkenntnisse liefern. Somit besteht also die Gefahr, dass es entweder zu einer Überdimensionierung des Bauwerks mit erheblichem einhergehendem monetärem Mehraufwand oder zu einer Unterschätzung der Wasserstände kommt, was wiederum ein erhöhtes Risiko von Bauwerksversagen zur Folge hätte.

2 Statistische Verfahren

Zur Detektion solcher sprunghaften Instationaritäten stehen unterschiedliche statistische Verfahren zur Verfügung (Ducré-Robitaille et al. 2003). Bei dem hier verwendeten Verfahren handelt es sich um den Standard Normal Homogeneity Test (SNHT). Der Test stellt in der Hydrologie und Klimaforschung eines der gängigsten und robustesten Verfahren zur Detektion von sprunghaften Instationaritäten dar (Ducré-Robitaille et al. 2003). Der SNHT basiert auf der grundlegenden Arbeit von (Hawkins 1977), wurde von (Alexanderson 1986) auf klimatologische Messreihen angewendet und von (Reeves et al. 2007) weiter modifiziert. Sie verwenden den Test zur Detektion eines einzelnen Sprunges im Mittelwert einer standardnormalverteilten Zeitreihe und überprüfen die Nullhypothese:

$$H_0 : Z_i \in N(0,1) \quad i \in \{1, \dots, n\}.$$

Gleichung 1

gegen eine Alternativhypothese H_1

$$H_1: \left\{ \begin{array}{l} Z_i \in N(\mu_1, 1) \quad i \in \{1, \dots, k\} \\ Z_i \in N(\mu_2, 1) \quad i \in \{k+1, \dots, n\} \end{array} \right\} \quad \text{Gleichung 2}$$

in der μ_1 und μ_2 die Erwartungswerte der beiden Teilzeitreihen vor und nach dem bekannten Bruchpunkt k darstellen. Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit der Alternativhypothese H_1 an einer unbekanntenen Stelle k , wird jeder Punkt der Messreihe als potentieller Bruchpunkt mit Hilfe der Teststatistik

$$T_{\max} = \max_{1 \leq k < n} |T_c| \quad \text{mit} \quad T_c = \frac{\bar{z}_1 - \bar{z}_2}{s_p \sqrt{k^{-1} + (n-k)^{-1}}}. \quad \text{Gleichung 3}$$

in der z_1 und z_2 die arithmetischen Mittel der Teilstichproben bilden, getestet. Die Standardabweichung ermittelt sich über

$$s_p = \left[\frac{(k-1)s_1^2 + (n-k-1)s_2^2}{n-2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Gleichung 4}$$

Der Zeitpunkt k , an dem der Wert der Teststatistik T_c maximal wird, ist der wahrscheinlichste Bruchpunkt. Überschreitet die Teststatistik ein definiertes Signifikanzniveau, kann der Bruchpunkt als statistisch signifikant bewertet werden.

3 Anwendbarkeit auf Wasserstandsdaten am Beispiel der Deutschen Bucht

Zwar wurde der SNHT speziell für klimatologische Messreihen entwickelt, jedoch ist die Anwendbarkeit auf Wasserstandsdaten nicht ohne weitere grundlegende Untersuchungen gegeben. Eine besondere Schwierigkeit liegt bei den vorliegenden Messreihen in der großen Varianz. Hierfür ist zu prüfen, wie groß ein Sprung sein muss, um ihn signifikant detektieren zu können.

Die Erfassung der Anwendungsgrenzen erfolgt in dieser Studie mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen (MC-Simulationen). Die Basis der MC-Simulationen bilden deterministische Wasserstandsmodelle, auf deren Grundlage je nach Verteilung der Daten gleichverteilte Stichproben ausgelost werden. Bei der Betrachtung der jährlichen Wasserstände kann hier von einer Normalverteilung der Daten ausgegangen werden. Somit bilden der Lageparameter und das Streuungsmaß die Grundlage für die Erzeugung eines Kollektivs, bestehend aus 10.000 synthetischen normalverteilten Zeitreihen der Länge $n = 100$. Mit einem Umfang von 10.000 synthetischen Zeitreihen wurden hinreichend genaue Ergebnisse erzielt. Anhand der 10.000 synthetischen Zeitreihen lassen sich in der Folge unterschiedliche Untersuchungen durchführen, welche für die Ermittlung der Anwendungsgrenzen des Verfahrens von großer Bedeutung sind. Dabei steht vor allem die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Detektion einer Sprungstelle bei unterschiedlichen Sprunghöheniveaus ($0,25\sigma$ bis 2σ) im Vordergrund. Hierfür werden die stationären synthetischen Zeitreihen mit künstlichen Bruchpunkten an definierten Stellen (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50) versehen und ausgewertet. Wird ein Bruchpunkt innerhalb eines Intervalls von +/- zwei Jahren um den wahren Bruchpunkt herum detektiert,

wird dieser als Treffer notiert. Summiert man nach Abschluss der Simulationen alle Treffer und teilt sie durch die Anzahl der durchgeführten Simulationen erhält man die Trefferquote

$$\text{Trefferquote} = \frac{\text{Anzahl der Treffer (x)}}{\text{Anzahl der Simulationen}} \quad \text{Gleichung 5}$$

Da die Wasserstandsdaten der Deutschen Bucht ein hohes Maß an Periodizität und Trends aufweisen (Wahl et al. 2010), werden die Trefferquoten für unterschiedliche Wasserstandsmodelle ermittelt. Im Rahmen dieser Studie werden die Trefferquoten für zwei unterschiedliche Modelle vorgestellt (Abbildung 2), anhand derer sich die Stärken und Schwächen des SNHT gut ableiten lassen. In Modell a wird ein vertikaler Bruchpunkt eingefügt, der die Zeitreihe in zwei stationäre Teilzeitreihen aufteilt. In Modell b hingegen wird die Zeitreihe zusätzlich zu dem vertikalen Bruchpunkt mit einem Trend in der Teilzeitreihe nach dem Bruchpunkt beschickt. Dieser Trend entspricht, in Bezug auf gemessenen Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht, im Mittel einem Anstieg von ca. 0,2 cm/a. Der Bruchpunkt teilt die Zeitreihe in diesem Modell also in eine stationäre Teilzeitreihe vor und eine instationäre Teilzeitreihe nach dem Sprung.

Die Auswertung der 10.000 synthetischen Zeitreihen nach Modell a mit dem SNHT ergeben die in Abbildung 3 dargestellten Trefferquoten für unterschiedliche Sprunghöhen und Stichprobenstellen. Trefferquoten gleicher Sprunghöhe sind linear miteinander verbunden. Aus den Trefferquoten wird deutlich, dass der Test große Sprünge sehr sensitiv detektieren kann. Unabhängig von der Stichprobenstelle des Bruchpunktes können für Bruchpunkte mit Sprunghöhe der zweifachen Standardabweichung rund 94 % aller Bruchpunkte richtig detektiert werden. Mit abnehmender Sprunghöhe sinkt die Trefferquote deutlich ab. So erhält man für Sprunghöhen der 0,5 fachen Standardabweichung eine Trefferquote von nur noch rund 25 %. Je kleiner die Sprunghöhe also im Vergleich zur Varianz einer Stichprobe wird, desto kleiner wird die Chance für eine korrekte Detektion der Sprungstelle. Im Hinblick auf die Wasserstandsdaten der Deutschen Bucht bedeutet dies, dass vertikale Bruchpunkte mit 6 bis 7 cm Sprunghöhe in über 60 % aller Fälle korrekt detektiert werden können.

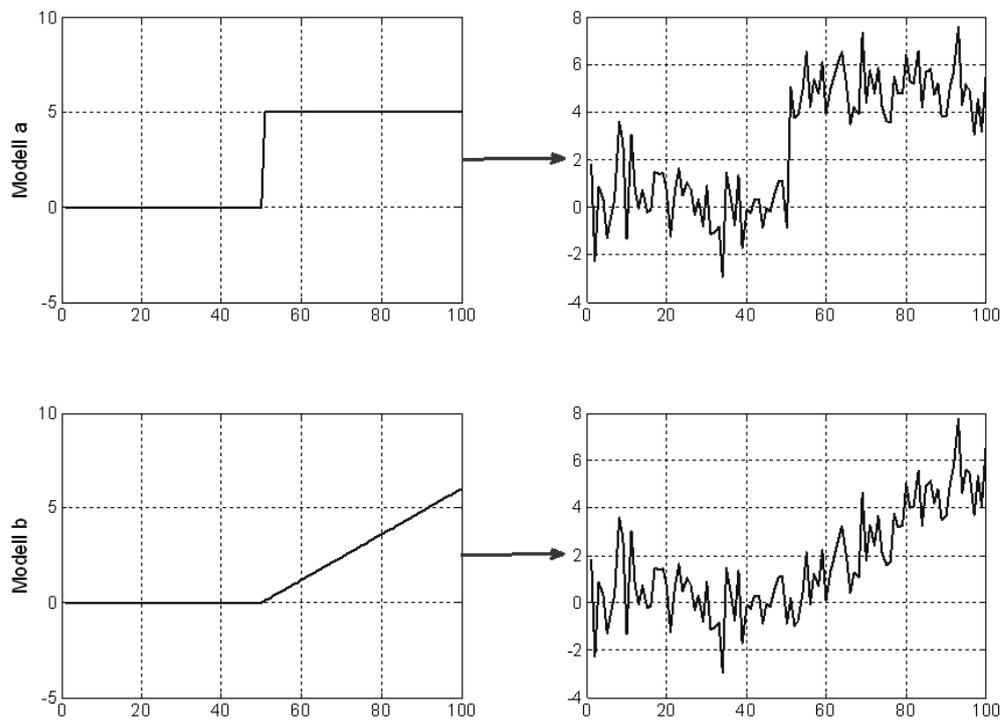


Abbildung 2: Superposition der Modelle a und b mit den synthetischen Zeitreihen aus den MC-Simulationen

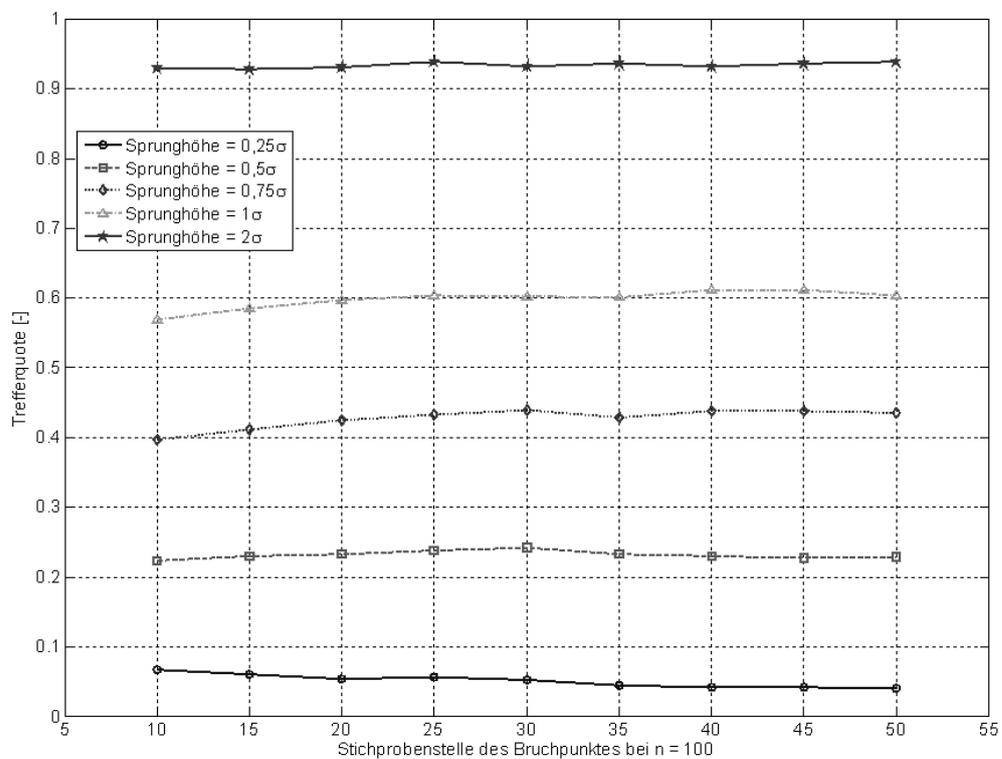


Abbildung 3: Trefferquoten für Sprünge unterschiedlicher Größe in Modell a

Da Da bei der Ermittlung der Trefferquoten nur diejenigen detektierten Bruchpunkte berücksichtigt werden, die sich innerhalb des definierten Intervalls um den wahren Bruchpunkt herum befinden, bekommt man keinerlei Information darüber, ob Bruchpunkte außerhalb dieser Grenzen mit einer zeitlichen Verschiebung detektiert werden konnten. Um auch diese Bereiche erfassen zu können, werden alle in den 10.000 Zeitreihen detektierten Bruchpunkte als absolute Häufigkeiten in ein Balkendiagramm aufgetragen. Als Ergebnis erhält man ein Trefferbild, welches alle detektierten Bruchpunkte über die gesamte Länge der synthetischen Zeitreihen wiedergibt. In Abbildung 4 ist ein solches Trefferbild beispielhaft für einen Sprung der Höhe $\Delta h = 0,5\sigma$ in Stichprobenmitte dargestellt. Das Trefferbild verdeutlicht, dass der SNHT erheblich mehr Bruchpunkte detektieren kann, als aus den Trefferquoten hervor geht. So können unabhängig von der zeitlichen Einordnung rund 99% aller Bruchpunkte gefunden werden. Jedoch lassen sich nur rund 24 % aller detektierten Veränderungen richtig erfassen. Würde man bei den Trefferquoten also das Zeitintervall erhöhen, würden auch deutlich mehr Treffer notiert. Das Problem besteht hier in der richtigen zeitlichen Einordnung einer Veränderung. Durch die natürliche Variabilität der Messreihen, kann es zu zeitlich verzögerten oder verfrühten Detektionen kommen. Kommt es also zufällig zum Zeitpunkt eines Sprunges zu einem extrem niedrigen Ereignis, wird der Sprung erst dann wieder sichtbar, wenn sich die Wasserstände wieder auf einem mittleren Niveau befinden, da sich der Sprung und der Einfluss des extremen Ereignisses gegenseitig neutralisieren.

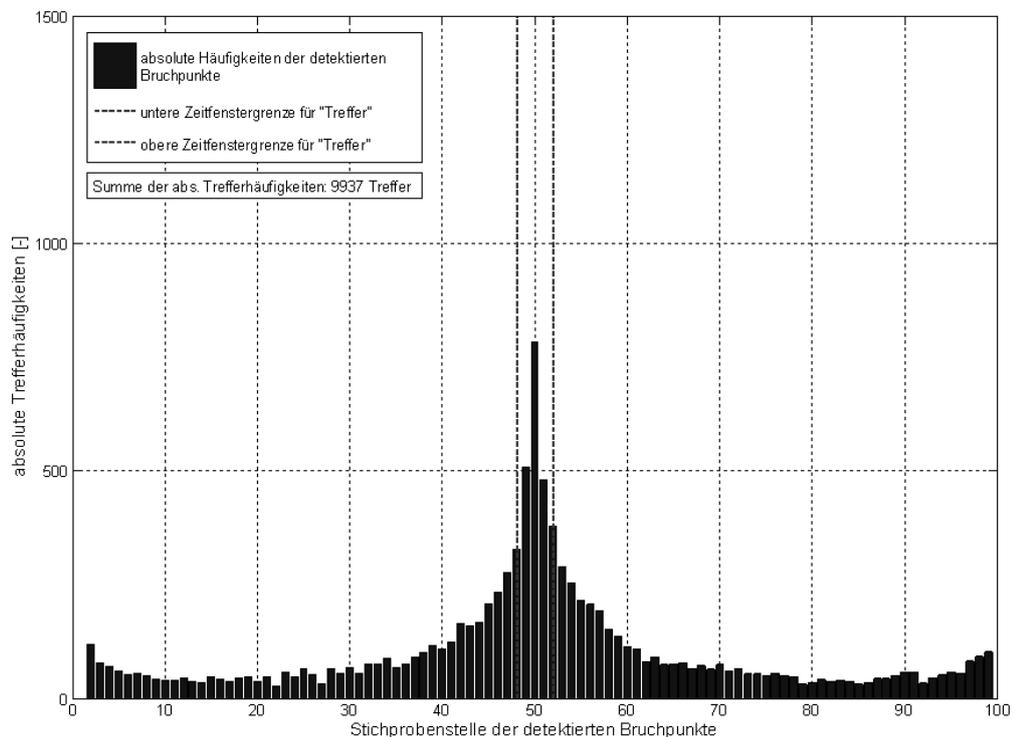


Abbildung 4: Darstellung des Trefferbilds für einen Sprung der Höhe $\Delta h = 0,5\sigma$ in Stichprobenmitte in Modell a

Die Trefferquoten und das Trefferbild für Modell b sind in Abbildung 5 gemäß der für Abbildung 4 erläuterten Methode abgebildet. Die Trefferquoten sinken hier im Vergleich

zum Modell a deutlich ab. So lassen sich in Stichprobenmitte für Sprunghöhen der zweifachen Standardabweichung nur noch rund 62 % aller Bruchpunkte in Stichprobenmitte richtig detektieren. Richtung Stichprobenrand reduziert sich die Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Detektion der Bruchpunkte und vor allem für geringere Sprunghöhen tendieren die Trefferquoten gegen 0 %. Je weiter ein Bruchpunkt also Richtung Stichprobenrand angeordnet ist, desto geringer wird die Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Detektion. Ursache für die verringerten Trefferquoten sind die Trends in der zweiten Teilzeitreihe nach dem Bruchpunkt. Trends sorgen ebenso wie Sprünge für eine Veränderung des Mittelwerts. Da diese Veränderung allerdings allmählich eintritt und der SNHT nicht zwischen Sprung und Trend unterscheiden kann, kommt es zu einer verzögerten Detektion der Sprungstelle. Wie stark der Einfluss von Trends auf die exakte Detektion von Bruchpunkten ist, zeigt sich auch im Trefferbild dieses Modells (Abbildung 5). Der SNHT detektiert in allen untersuchten Zeitreihen einen Bruchpunkt, ordnet diesen jedoch zeitlich falsch ein. So kommt es für einen Sprung an Stichprobenstelle 50 mit einer Sprunghöhe $\Delta h = 0,5\sigma$ innerhalb der Intervallgrenzen nur zu Trefferquoten von rund 5 %. Rund 95 % aller Bruchpunkte werden verzögert in einem Intervall zwischen Stichprobenstelle 53 und 87 detektiert. Der Einfluss des Trends in der zweiten Teilzeitreihe verstärkt sich bei Bruchpunkten in Richtung Stichprobenrand, da der Umfang der zweiten Teilzeitreihe im Vergleich zur ersten Teilzeitreihe zu nimmt.

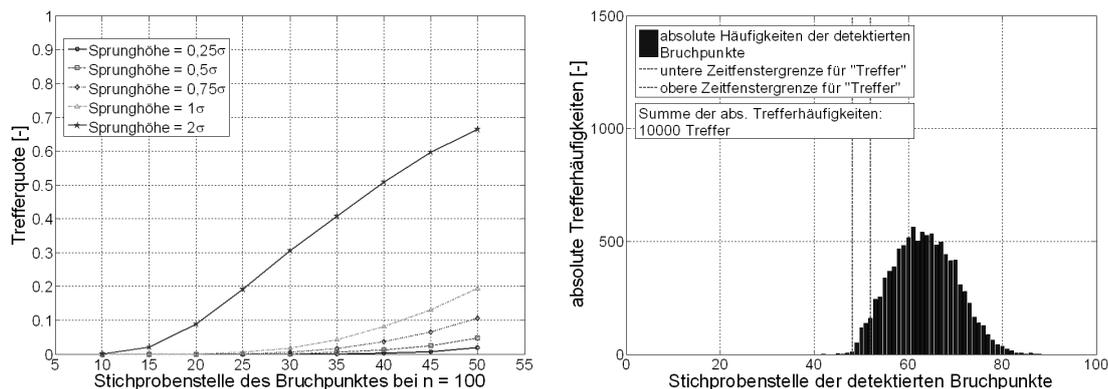


Abbildung 5: Trefferquoten für Sprünge unterschiedlicher Größe in Modell c (links) und das zugehörige Trefferbild für einen Sprung der Höhe $\Delta h = 0,5\sigma$ in Stichprobenmitte (rechts)

Die Untersuchungen verdeutlichen, dass der SNHT zwar sehr sensibel Veränderungen in Wasserstandsdaten detektieren kann, jedoch Probleme mit der exakten zeitlichen Einordnung einer Veränderung hat. So muss vor allem bei vorhandenen Trends sehr genau geprüft werden, wann und wie stark es zu einer sprunghaften Veränderung gekommen ist. Mit Hilfe von Metadaten und Referenzzeitreihen lassen sich solche Veränderungen besser zeitlich einordnen. Für die praktische Anwendung der Verfahren bleibt also festzuhalten, dass eine gut dokumentierte Pegelgeschichte mit qualitativ hochwertigen Metadaten Grundvoraussetzung für die exakte zeitliche Einordnung einer solchen Veränderung ist.

4 Anwendung Pegel Büsum

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus den MC-Simulationen wurde der SNHT auf die mittleren jährlichen Tideniedrigwasser (MTnw) des Pegels Büsum angewendet. Seit Ende der siebziger Jahre lässt sich dort eine zu den Nachbarpegeln abweichende Tendenz beobachten. Mügge und Jensen (1991) untersuchten diesen Umstand und führten diese Veränderung auf eine große Baumaßnahme, der Eindeichung der Meldorfer Bucht aus dem Jahr 1978, zurück. Dieser Umstand soll nun im Folgenden mit Hilfe des SNHT anhand längerer Zeitreihen und einiger Modifikationen des Verfahrens näher untersucht werden.

Das untersuchte Datenkollektiv umfasst die MTnw der Jahre 1936-2007. Um potentielle Sprungstellen innerhalb der Zeitreihe zu detektieren, kann ein einfacher Algorithmus verwendet werden. Zunächst wird der Test über die gesamte Länge der Zeitreihe durchgeführt. Wird eine Sprungstelle statistisch signifikant nachgewiesen, dient die Sprungstelle als Teilungspunkt für zwei weitere Teilzeitreihen, die noch einmal gesondert ausgewertet werden. Dieser Algorithmus wird so lange wiederholt, bis dass keine weitere Sprungstelle detektiert werden kann. Für die MTnw des Pegels Büsum kann so eine signifikante Sprungstelle nachgewiesen werden. Dieser befindet sich im Jahr 1980 (Abbildung 6).

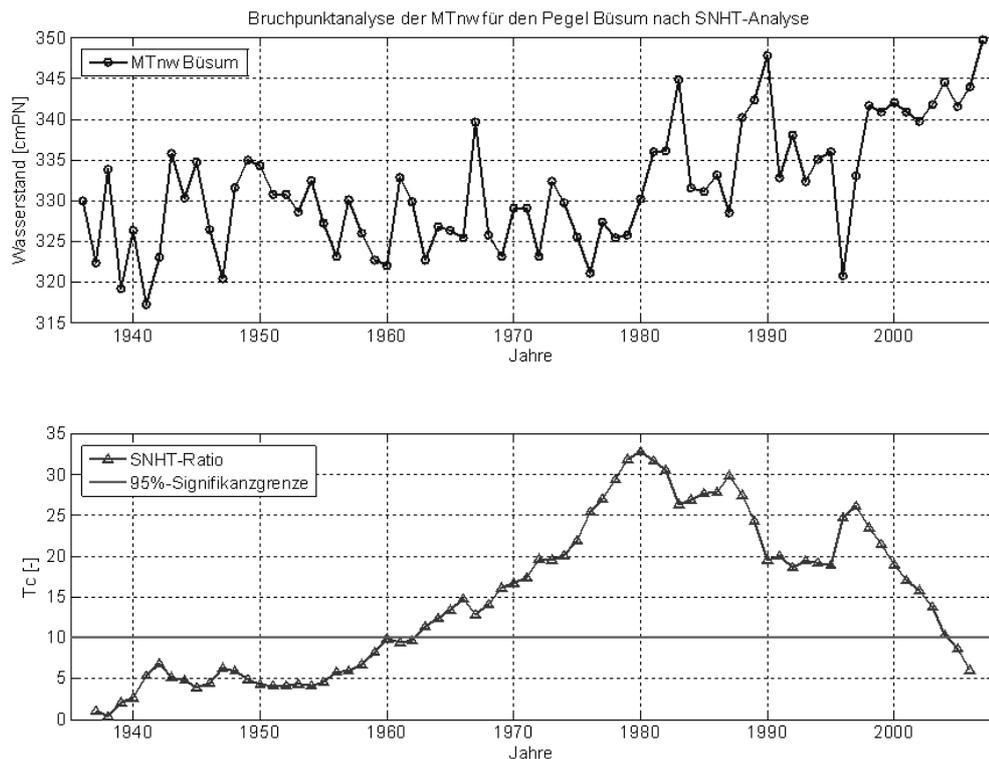


Abbildung 6: Ergebnisse des SNHT für die gesamte Zeitreihe (oben) mit einem Maximum der Teststatistik im T_c Jahr 1980 (unten)

Um eine zeitlich bessere Einordnung zu ermöglichen, werden Cuxhaven und Helgoland als Referenzpegel in die Untersuchung mit einbezogen. Die beiden Pegel sind einerseits soweit von der Baumaßnahme entfernt, dass man eine Beeinflussung ausschließen kann,

andererseits wurden sie in der Vergangenheit schon zahlreichen Untersuchungen unterzogen. Man geht hier also von einer Homogenität der Daten aus.

Der Vergleich der MTnw in Büsum mit denen der Pegel Cuxhaven und Helgoland in Abbildung 7 ergibt, dass die Zeitreihen bis Ende der Siebziger Jahre einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Ab 1978, dem Jahr der Eindeichung, zeigt der Pegel Büsum jedoch eine abweichende Entwicklung. Der Umstand, dass der SNHT diese Veränderung erst 1980 detektiert, kann darauf zurückgeführt werden, dass in den Jahren 1978 und 1979 extrem niedrige MTnw zu beobachten sind. Durch diese extremen Ereignisse fällt der Sprung im Datensatz zunächst nicht auf. So kann die Veränderung erst dann detektiert werden, wenn sich die MTnw wieder auf ein relativ normales Niveau eingependelt haben.

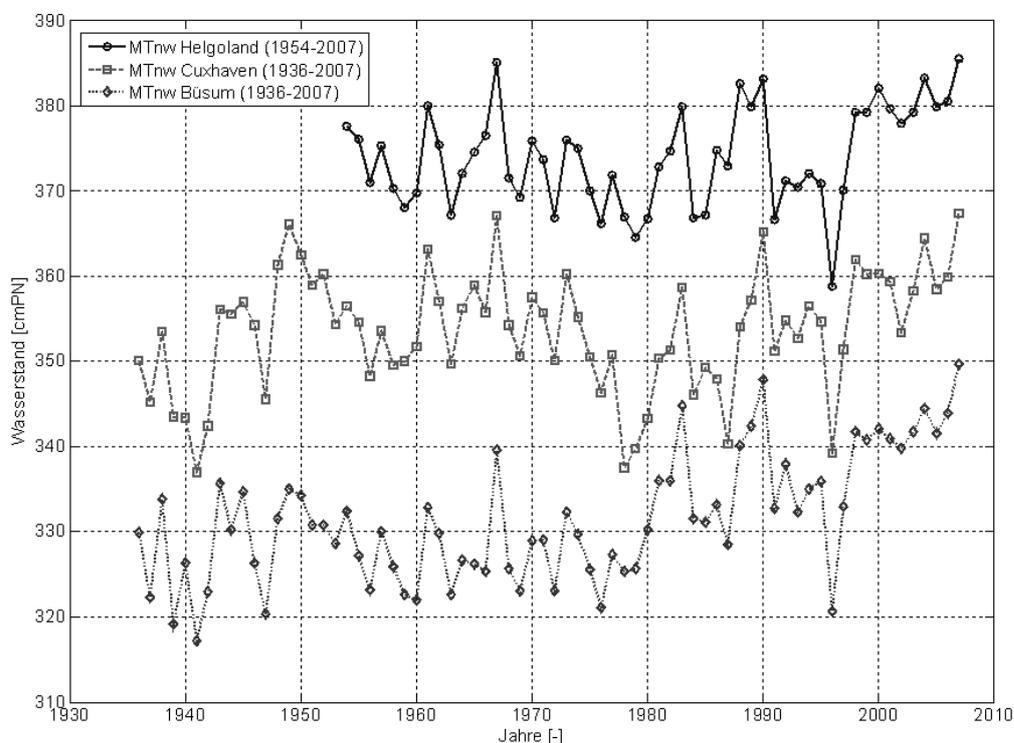


Abbildung 7: Vergleich der MTnw des Pegels Büsum und den Referenzpegeln Cuxhaven und Helgoland

Der Sprung im Jahr 1978 zeigt sich ebenfalls bei der Betrachtung der Korrelationsbeziehungen unterschiedlicher Referenzzeiträume (Z1, Z2, Z3) in Tabelle 1. Während in den beiden Zeiträumen vor und nach dem Bruchpunkt „starke“ bis „sehr starke Korrelationen“ zwischen allen Pegeln zu verzeichnen sind, sinkt die Korrelation bei der Betrachtung des gesamten Zeitraums zwischen den Pegeln Büsum und Cuxhaven bzw. Büsum und Helgoland stark ab. Dies kann als deutliches Zeichen für einen Sprung gewertet werden.

Tabelle 2: Übersicht über die Korrelationskoeffizienten (r) der drei Pegel untereinander vor der Eliminierung der Sprungkomponente

Pegel	Z1 (1954-2007)	Z2 (1954-1978)	Z3 (1979-2007)
Büsum vs. Cuxhaven	0.68	0.87	0.95
Büsum vs. Helgoland	0.79	0.92	0.93
Cuxhaven vs. Helgoland	0.85	0.91	0.85

Zur Ermittlung der Sprunghöhe wird die Entwicklung der Referenzpegel mit einbezogen. Damit kann verhindert werden, dass trendartige Entwicklungen die Ermittlung der Sprunghöhe beeinflussen. Für den Pegel Büsum lässt sich unter Berücksichtigung der Referenzpegel eine Sprunghöhe von rund 8,9 cm errechnen. Dieser Sprung muss im Rahmen einer Homogenisierung aus dem Datensatz zur weiteren Verarbeitung eliminiert werden. Prüft man an dem homogenisierten Datensatz erneut die Korrelationsbeziehungen zu den beiden Nachbarpegeln (Tabelle 2), fällt auf, dass sich die Korrelationen des gesamten Zeitraums auf ein ähnliches Niveau einpendeln, wie in den beiden Referenzzeiträumen Z1 und Z2. Die Homogenisierung kann somit als erfolgreich abgeschlossen betrachtet werden.

Tabelle 3: Übersicht über die Korrelationskoeffizienten (r) der drei Pegel untereinander nach Eliminierung der Sprungkomponente

Pegel	Z1 (1954-2007)	Z2 (1954-1978)	Z3 (1979-2007)
Büsum vs. Cuxhaven	0.92	0.87	0.95
Büsum vs. Helgoland	0.93	0.92	0.93
Cuxhaven vs. Helgoland	0.85	0.91	0.83

5 Zusammenfassung

Die von Tidepegeln aufgezeichneten Wasserstandszeitreihen bilden die Grundlage für viele Bemessungsaufgaben im Küsteningenieurwesen. Voraussetzung dabei ist, dass die betrachteten Zeitreihen von hoher Qualität und weitgehend unbeeinflusst sind. In den Zeitreihen enthaltene langfristige Trends sind ebenso zu berücksichtigen, wie kurze durch menschliche Eingriffe hervorgerufene Veränderungen. Um eine korrekte statistische Analyse zu ermöglichen, muss die Art und Ausprägung solcher Veränderungen bekannt sein.

Eine Möglichkeit zur Detektion sprunghafter Veränderungen bietet der SNHT. Die Ergebnisse der MC-Simulationen zeigen, dass der SNHT statistisch signifikant und sehr sensitiv Sprünge in Wasserstandszeitreihen detektieren kann, bei geringen Sprunghöhen durch die große natürliche Variabilität innerhalb der Wasserstandsdaten allerdings Probleme mit der genauen zeitlichen Zuordnung der Veränderung bekommt. Ähnliche Probleme weist der SNHT auf, wenn einzelne Teilzeitreihen vor und nach dem Bruchpunkt mit Trends behaftet sind. Da der Test nicht zwischen trendartiger und sprunghafter Veränderung unterscheiden kann, kommt es durch Trends zu verzögerten oder verfrühten

Detektionen. Daher sollten im Rahmen einer Bruchpunktanalyse immer Referenzpegel und eine gut dokumentierte Pegelgeschichte mit in die Betrachtung einbezogen werden. Für die praktische Anwendung ist es daher empfehlenswert, sich vor der eigentlichen Analyse trendstationäre Bedingungen zu schaffen. Dies kann zum Beispiel durch eine Eliminierung des Säkular Trends oder eine Residualbetrachtung mit Referenzpegeln geschehen.

Die vorgestellten Untersuchungen wurden alle an Jahreswerten durchgeführt. Viele anthropogene Beeinflussungen (z.B. Schiefstellung durch Schiffskollision) treten häufig jedoch über kürzere Zeiträume auf. Eine solche Beeinflussung lässt sich in Jahreswerten also nicht mehr detektieren. Daher ist es für die Zukunft wichtig, Verfahren wie den SNHT auf höher aufgelöste Datensätze zu übertragen. Dabei steigt der Einfluss von Autokorrelation und Periodizität innerhalb der Daten stark an. Wie sich Autokorrelation und Periodizität auf den SNHT auswirkt, muss also weiter untersucht werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass der SNHT ein sensitives Verfahren zur Detektion von Sprungstellen darstellt. Der Vorteil des Verfahrens liegt vor allem in der einfachen Handhabung und der hohen Sensitivität bei trendstationären Zeitreihen. Mit Bruchpunktanalysen wie dem SNHT lassen sich Inhomogenitäten in Wasserstandszeitreihen im Nachhinein detektieren. Somit kann mit Hilfe solcher Verfahren ein Beitrag zu homogeneren Messreihen im Gebiet der Deutschen Bucht geliefert werden.

6 Literatur

Alexanderson, H. (1986): A homogeneity test applied to precipitation data, *Journal of Climatology*, Vol. 6, 661-675

Ducré-Robitaille, J.F., Vincent, L.A., Boulet, G. (2003): Comparison of techniques for detection of discontinuities in temperature series, *International Journal of Climatology*, Vol. 23, 1087-1101

Hawkins, D.M. (1977): Testing a sequence of observations for a shift in location, *Journal of American Statistical Association*, Vol. 72, 180-186

Jensen, J. (1985): Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste, Dissertation, TU Braunschweig

Mügge, H.E., Jensen, J. (1991): Untersuchungen zum Pegelstandort Büsum, *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 35. Jahrgang, Heft 1, 13-21

Reeves, J., Chen, J., Wang, X.L., Lund, R., Lu, Q. (2007): A review and comparison of changepoint detection techniques for climate data, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 46, 900-915

Wahl, T., Jensen, J., Frank, T. (2010): On analysing sea level rise in the German Bight since 1844, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, 1-9

Risk Acceptance for Extreme Events in a Changing Climate – What is “safe enough”?

Andreas Burzel and Hocine Oumeraci

Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen,
Technische Universität Braunschweig

Zusammenfassung

Extreme Überflutungen verursachen immer wieder verheerende sozio-ökonomische und ökologische Schäden. Konstruktive Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos reichen dabei oft nicht mehr aus, da die Bemessung, z.B. von Bauwerken, aufgrund wirtschaftlicher und weiterer Machbarkeitserwägungen nicht für Extremereignisse mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten ($P < 10^{-6}$) erfolgen kann. Deshalb müssen andere Maßnahmen ergriffen werden, um das verbleibende Risiko bestmöglich zu bewältigen. In diesem Zusammenhang muss auch deutlich gemacht werden, dass ein Nullrisiko nicht erreicht werden kann. Es muss daher untersucht werden, welches Restrisiko durch Extremereignisse von der Gesellschaft noch akzeptiert wird und welche Maßnahmen geeignet sind, das Risiko auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren. Besonders im Küstenraum, wo Extremsturmfluten aufgrund der Vielfalt der Einflussfaktoren und deren nichtlinearen Wechselwirkungen sowie des Einflusses von Klimaänderungen hochgradig stochastisch und daher im Sinne einer langfristigen Prognose nicht vorhersagbar sind, stellen diese Untersuchungen eine große Herausforderung dar. Der Beitrag beschäftigt sich mit den Auswirkungen extremer Ereignisse im Küstenraum und diskutiert die Notwendigkeit des Risikomanagements unter Berücksichtigung der Risikoakzeptanz.

Keywords: Risk Acceptance, Extreme Events, Storm Surges, Coastal Flood Risk, Flood Risk Management

1 Introduction

On March 11th 2011, an earthquake with a 9.0 magnitude has been registered near the coast of Japan (JMA, 2011). Even though this is the highest magnitude which has been ever recorded, the earthquake itself led to relatively low damages in Japan.

Approximately two hours later, a 16-meter tsunami hit major parts of the Japanese coastline and caused extreme losses. Several prefectures in the North of Japan have been destroyed completely. Until now, 10,000 fatalities have been confirmed and more than 16,000 people are still missing (NHK World, 2011). Japanese authorities expect that more than 28,000 fatalities have been caused due to this extreme event. In addition, a nuclear power plant failed and large amounts of radioactive material have been released. The accident has been assessed as a ‘major event’ according to the International Nuclear Event Scale (WNN, 2011).

Extreme natural events such as earthquakes, hurricanes, or flooding, among others, frequently led to major damages at the society and their properties. According to Kron (2010), worldwide 850 natural catastrophes were observed in 2009. However, extreme natural events can neither be influenced nor prevented (Kron, 2010). Therefore, dealing with risk due to extreme events is one of the current key challenges, as this issue is increasingly becoming more significant due to population growth, climate change,

urbanisation and other developments on a global scale, resulting in more complex risk constellations (Merz, 2008).

On the other hand, people and societies might not accept risks induced by extreme events. It can be seen that in case of extreme losses, risk is perceived as not acceptable, even though the occurrence probability is very low (Geerts, 2005). In this case, the level of safety is generally perceived as not safe enough. Therefore, it is necessary to investigate the relationship between extreme events and risk acceptance. However, especially in coastal areas *“most difficulties encountered in the vulnerability analysis and risk acceptance assessment primarily arise from the high degree of complexity and multi-disciplinarity of the various processes (...) involved”* (Oumeraci, 2004). Hence, methods must be developed or adapted to account for the peculiarities and constraints in coastal areas accordingly.

2 Extreme Events in Coastal Areas

Coastal areas have an outstanding importance as settlement areas, economic hubs and areas of ecological diversity (WBGU, 2006). However, extreme events, such as storm surges, cyclones or seismic sea waves, have led to noteworthy damages and catastrophes in the past. According to Oumeraci (2004), *“worldwide, coastal, river and flash floods are responsible for more than 50% of the fatalities and for about 30% of the economic losses caused by all natural disasters.”*

In this context, in 2007 the European Union published the Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks. The purpose of this Directive is *“to establish a framework for the assessment and management of flood risks, aiming at the reduction of the adverse consequences for human health, the environment, cultural heritage and economic activity associated with floods”* (European Commission, 2007). Hereby, *“flood risk means the combination of the probability of a flood event and of the potential adverse consequences for human health, the environment, cultural heritage and economic activity associated with a flood event”* (European Commission, 2007).

According to Kron (2010), coasts are the riskiest places due to the following reasons:

- Coasts are directly or indirectly threatened by most natural perils.
- People and values increasingly grow and have already reached a dramatic concentration on the coasts.
- Coastal protection has already reached a very high level, but still cannot provide a security which is perceived as safe enough by the people exposed.

In the future, climate change will lead to significant changes and damages in coastal areas, which will cause relevant outcomes for human beings (WBGU, 2006). During the 20th century, socio-economic vulnerability of high developed countries such as Germany increased considerably due to coastal settlement, complex infrastructure (harbours, industry, vacation centres) and expansion of recreation and tourism (Sterr, 2007). This implies that economic damages, which can be caused by storm surges, sea level rise and coastal erosion, will by far exceed the 19th century level (WBGU, 2006).

Moreover, according to OECD estimations, in 2050 more than two-thirds of the world population will live in coastal areas (Sterr, 2007). This also implies that risk due to flooding is permanently increasing in coastal zones. Therefore, risk management concepts are strongly needed for coastal areas, which also consider the level of the accepted risk in order to develop measures for risk reduction. The aim is to reduce the risk to an acceptable level, since it will be impossible to eliminate it completely. The evaluation of risk acceptance must be embedded as an integral part of a risk management framework under consideration of events with low probabilities and high consequences. For this purpose, the following steps will be required:

- Characterisation and classification of extreme events,
- Specification of a risk management framework for extreme events,
- Development of a framework and methods for risk acceptance,
- Integration of the risk acceptance in risk analysis and management.

3 Risk Management

Risk management means the systematic application of management policies, procedures and practices to the tasks of analysing, evaluating, controlling and monitoring risk (ASNZL, 2004; ISO, 2007). Risk management is *“an iterative process consisting of steps that, when undertaken in sequence, enable continuous improvement in decision-making”* (ASNZL, 2004). According to Kafka (1999), in a quantitative risk assessment process there are three typical questions:

- (1) what can happen (Scenarios S_i),
- (2) how likely is that to happen (Probabilities P_i), and
- (3) if it does happen, what are the consequences (Consequences C_i)?

Therefore, risk can be seen as a function of hazard, values at risk and vulnerability (Kron, 2010). Hereby, hazard can be defined as: *“some aspect of the physical environment that threatens the well-being of individuals and their society”* (Nigg, 1996).

In addition, a disaster can be defined as occurring only *“when the built and social environments are so disrupted that the resources of the social system are overwhelmed and the system is unable to meet the demands placed on it for goods and services that are routinely expected by its citizens”* (Nigg, 1996). As stated in Blaikie (1994), *“hazards are natural, disasters not.”* This means that disasters are not determined by nature but by the society and its vulnerability, this means, how the society deals with unexpected natural events (Merz, 2008).

Consequently, risk due to extreme events is the interaction of hazard and vulnerability. Hereby, hazard encompasses the natural event and its characteristics such as spatial extension, intensity and probability of occurrence (Merz, 2008). In contrast to the term hazard, which describes the possibility of damages, risk takes the potential damages and the probability of its occurrence into account (OcCC, 2003).

According to European Commission (2007), *“it is feasible and desirable to reduce the risk of adverse consequences, especially for human health and life, the environment, cultural heritage, economic activity and infrastructure associated with floods.”* Therefore, the analysis of risk due to flooding should follow the concept of the risk source-pathway-receptor model as described in Oumeraci (2004), including:

- the prediction of flood risk based on scenarios,
- the assessment of tolerable flood risks (both components, damages and probabilities), and
- the management of residual risk as an integral part of the overall design process.

4 Risk Acceptance

Studies have shown that risk means different things to different people. *“When experts judge risk, their responses correlate highly with technical estimates of annual fatalities. Lay people can assess annual fatalities if they are asked to (and produce estimates somewhat like the technical estimates)”* (Slovic, 1987). Therefore, risk management is a complex subject since each stakeholder places a different value on the probability of harm occurring and its severity (ISO, 2007). In contrast to the risk of flooding which can be assessed and calculated, the level of risk which is perceived and accepted by the society or individuals is unknown.

It is supposed that there is a residual risk R_R which has to be managed, while R_R is smaller than the total risk R_T . A certain level of risk $R_A = R_T - R_R$ is accepted by the society. The accepted flood risk $R_{A,f}$ can be defined as the product of the accepted probability of flooding $P_{A,f}$ and the related accepted damages and losses $D_{A,f}$ as given in Oumeraci and Kortenhaus (2009). However, $P_{A,f}$ and $D_{A,f}$ have to be assessed separately, since non-reversible losses such as fatalities are generally perceived as not acceptable, even though the occurrence probability is very low (Geerts, 2005). The accepted risk $R_{A,f}$ can also be defined as the risk that an individual or a group is willing to accept on its own decision and as a result of their everyday, intuitive risk assessment (Heinimann et al., 2005).

However, so far there is no generic and well-accepted methodology for the assessment of risk acceptance. On the other hand, the consideration of risk acceptance is an important step in order to develop efficient strategies for risk mitigation. Since risk acceptance is unknown in practice, the decision making by the responsible authorities is not transparent and normally not directly discussed with the people concerned. Nevertheless, the society might have learned from recent extreme events, that there is no zero risk but always a residual risk associated with every human activity and every natural event.

In all affected areas there should be a specific residual risk, either accepted by the affected population or based on a consensus, which has to be evaluated (Plate, 2000). As the level of tolerable risk might differ from region to region, from culture to culture and from risk source to risk source, the development of a single generic standard methodology to assess the level of risk acceptance for any specific local conditions is hardly possible. Therefore, *“research should be oriented towards developing consistent methods and models (...) but*

also a robust and transparent framework with the required modelling and analysis tools for the assessment of acceptable flood risks” (Oumeraci, 2004). Moreover, an integrated approach is strongly required to ensure that all processes and conflicting interests, which may affect one or both risk components (hazard and vulnerability), are properly assessed and accounted for (Oumeraci, 2004).

5 Assessment of Risk Acceptance

For the assessment of risk acceptance, different methods are available. The methods are usually based on questionnaires or interviews, which evaluate the level of risk acceptance directly or indirectly. The used methods depend on the subject matter, i.e. tangible or intangible damages. According to Jacob (2011), one of the main problems is to enable people to deal with the subject of interest, if they realize that risk really exists. Therefore, the level of risk acceptance cannot be evaluated directly. Instead, carefully chosen questions about the personal attitude and behaviour must be asked in order to derive any useful statements about risk acceptance.

For the evaluation of risk acceptance, the following methods are available:

- quantitative methods: standardised questionnaires, online questionnaires,
- qualitative methods: guided interviews, unstructured interviews, expert interviews,
- evaluation of results from recent studies,
- workshops and group discussions.

For each method listed above, there are advantages and limitations. Since the results vary depending on the chosen method, this must be considered for the validation of the results. At all, the application of evaluation methods requires information about the existing risks, which have to be judged by the society or individuals as acceptable or not.

One possibility for this judgement is the ALARP-principle (As Low As Reasonably Practicable), which enables the classification of risks into different acceptance levels. This involves the definition of the following elements (Sayers, 2002):

- an upper-bound on individual or societal risk levels, beyond which risks are deemed unacceptable;
- a lower-bound on individual or societal risk levels, below which risks are deemed not to warrant concern;
- an intermediate region between (i) and (ii) above, where further individual and societal risk reduction are required to achieve a level deemed ‘as low as reasonably practicable’.

The application of the ALARP-principle after the risk assessment should be an essential step in risk management, not only in coastal regions. *“Within the flood and coastal defence industry however, decision-making typically takes place within the ALARP region where practicability is translated as justifiable on a national economic basis”* (Sayers, 2002). This implies that currently economical cost benefit analyses are used for the assessment of risk

acceptance. Nevertheless, especially for extreme events, cost benefit analyses are not an appropriate measure. Moreover, it is necessary to explicitly account for uncertainties in both components of the acceptable flood risk. *“This is particularly important for high risks near the upper bound of the ALARP-zone where large uncertainties might shift the assessed acceptable risk outside the ALARP-zone”* (Oumeraci, 2004).

6 Summary and future outlook

The assessment and consideration of risk acceptance is a vital issue and must therefore be an integral part of any risk analysis and risk management process. Particularly for risks associated with extreme events not only the acceptance level of risk, but also the acceptance of both elements of risk, probability and damages, should be evaluated separately.

Recent natural events clearly showed that extreme events can lead to disastrous damages which overwhelm the resilient capacities of the society. Since zero risk cannot practically be achieved, sustainable risk reduction measures for extreme events must be developed. This also means that risk is reduced to an acceptable level and the residual risk is properly managed. For this reason, risk acceptance must be assessed and considered in the overall risk analysis and risk management cycle.

There are different methods available for risk assessment. However, it is not exactly known how to evaluate risk acceptance. Different methods might produce different results. Moreover, the confrontation of people with the existence of extreme risks might cause biases. Therefore, different evaluation methods must be tested and compared in order to ensure robust outcomes.

The ALARP-principle enables the categorisation of risk acceptance within acceptance zones and allows the decision, if risk must be reduced to an acceptable level. For this reason, risk assessment as a first step must produce comprehensible outcomes in order to allow the concerned people to judge, whether they accept this risk or not.

Further research is needed to develop a risk management framework which particularly focuses on the consideration of risk acceptance for extreme events. In a first step, experiences from other field of technology, such as nuclear applications, chemical industry, transportation, and medicine will be critically reviewed and evaluated. Later on, a risk management framework for coastal flooding will be proposed and applied.

7 References

- ASNZL (2004): Australian/New Zealand Standard - Risk Management, Standards Australia, Standards New Zealand, 38 p.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. and Wisner B. (1994): At risk - natural hazards, people's vulnerability and disasters. London
- European Commission (2007): Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council on the Assessment and Management of Flood Risks, 8 p.

- Geerts, R. (2005): Probabilistische Risikobewertung, Erfahrungsbericht. Präsentation Workshop Risikomanagement, Bonn, 2005, available at http://www.sfk-taa.de/publikationen/andere/ws_risiko.pdf
- Heinimann, H.R., Hollenstein, K., and Plattner, T. (2005): Risikobewertung von Naturgefahren. Schlussbericht. Herausgegeben von Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich ETHZ. Available online at http://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat_pdf/alle/R0670d.pdf
- ISO (2007): International Standards Organisation (ISO), Medical devices, Application of risk management to medical devices, 90 p.
- Jacob, K. (2011): Akzeptanz von Flutrisiken, Methoden zur Ermittlung der Risikoakzeptanz in überflutungsgefährdeten Gebieten. Diploma Thesis, in preparation
- JMA (2011): The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, First report. Available online at http://www.jma.go.jp/jma/en/News/2011_Earthquake_01.html
- Kafka, P. (1999): How safe is safe enough? - An unresolved issue for all technologies. In: G.I. Schuëller, P. Kafka (eds.) Safety and Reliability, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 385-390
- Kron, W. (2010): Coasts, places of high (and increasing) risk. Presentation on the Storm Surges Congress (SSC) 2010 – Risk and Management of current and future Storm Surges, Hamburg, Germany
- Merz, B. (2008): Risikomanagement extremer Naturereignisse. Geographie und Schule, 171, pp. 4-10
- NHK World (2011): Death toll as of Saturday. Available Online at http://www3.nhk.or.jp/daily/english/27_05.html
- Nigg, J.M. (1996): The social impacts of extreme physical events. Invited plenary paper American Geophysical Union Meeting, Baltimore, Maryland. pp. 19-24
- OcCC (2003): Extreme Events and Climate Change, Organe consultatif sur les changements climatiques / Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Bern
- Oumeraci, H. (2004): sustainable coastal flood defences: Scientific and modelling challenges towards an integrated risk-based design concept. Keynote Lecture. Proceedings IMA international conference on flood risk assessment, University of Bath, UK. pp 9-24
- Oumeraci, H. & Kortenhaus, A. (2009): Überflutungsrisiko der Küsten in Europa - Konzepte, Forschung, Ergebnisse und Zukunft. Ernst & Sohn Special "Hochwasserschutz und Katastrophenmanagement," 6/2009, pp. 27-32
- Plate, E. (2002): Risikoanalyse im Hochwasser- und Küstenschutz. Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen (Hrsg.): Risikomanagement im Küstenraum. Beiträge zum internationalen Workshop. pp. 1–14
- Sayers, P., Gouldby, B. & Simm, J. (2002): Risk, performance and uncertainty in flood and coastal defence - A Review. Report SR568, HR Wallingford. Available online at:

[http://www.safecoast.org/editor/databank/File/risk, performance and uncertainty in flood defence.pdf](http://www.safecoast.org/editor/databank/File/risk_performance_and_uncertainty_in_flood_defence.pdf)

Slovic, P. (1987): Perception of risk. *Science*, 236 (4799), pp. 280-285

Sterr, H. (2007): Folgen des Klimawandels für Ozeane und Küsten. 12 p. Available online at: <http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/86/PDF/86.pdf>

WBGU (2006): Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Die Zukunft der Meere - zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten, Berlin, 114 p.

WNN (2011): Fukushima moved to level 7. *World Nuclear News*, 2011, Available online at http://www.world-nuclear-news.org/RS_Fukushima_moved_to_Level_7_1204111.html

Methodologies for the Evaluation of Intangible Losses Due to Coastal Flooding

D.R. Dassanayake and H. Oumeraci

Leichtweiß-Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources (LWI), Technische Universität Braunschweig, Germany, (dilani.dassanayake@tu-braunschweig.de)

Abstract

Coastal flooding is one of the most devastating natural disasters, which may increase due to the effects of sea level rise and storm surges associated with climate change. Therefore, flood risk analysis has become an important area in current research studies. Flood risk can be calculated as the product of probability of a flood event and the associated losses. Flood losses are categorized as tangible and intangible depending on whether or not the losses can be assessed in monetary values. This paper attempts to discuss the available knowledge and the proposed methodologies for the evaluation of intangible losses due to coastal flooding. Within this study, the most important intangible losses, i.e. loss of life, physical injuries, psychological impacts, cultural losses and environmental losses are considered. Although the evaluation of loss of life due to flooding has been paid much attention in past research work, other intangible losses were not considered as important and therefore no systematic approaches for the evaluation are available. In this study, it is suggested that the available approaches for the evaluation of loss of life can be adopted whereas other intangible losses need new methodologies for the evaluation.

Keywords: Flood risk, intangible losses, social losses, environmental losses, loss evaluation, monetary valuation

1 Introduction

Coastal flooding is one of the devastating natural disasters in the recent past and it may further increase due to the possible impact of climate change on both sea level rise and storm surges. Further, human settlements are more concentrated in the coastal zones due to the economic benefits arising from ocean navigation, coastal fisheries, tourism and recreation. It is found that around 40% of the world's population lives within 100 km of the coast which may lead to increase the damage due to coastal flooding (Stal et. al, 2008). Oumeraci (2004) mentions that the coastal, river and flash floods result in more than 50% of the fatalities and about 30% of the economic losses caused by all natural disasters. Since the value of the coastal ecosystems represents almost 40% of the value of all marine and terrestrial ecosystems (Oumeraci, 2004), protection of coastal ecosystems is as vital as minimisation of the social and economic losses arising from coastal floods. In this context, prediction of the flood risk plays a major role.

Flood risk is defined as "the combination of the probability of a flood event and of the potential adverse consequences for human health, the environment, cultural heritage and economic activity associated with a flood event" (De Bruijn and Klijn, 2009). For the prediction, analysis and management of flood risk, the risk source-pathway-receptor approach as depicted in Figure 1.1 is used (Oumeraci, 2004).

Flood losses can be categorized as tangible and intangible depending on whether or not the losses can be assessed in monetary values (Smith and Ward, 1998). The category of intangible losses, which is the focus of this study, is further classified as social and

environmental losses. Under social losses, loss of life, physical and psychological impacts, and cultural losses are taken into consideration while the damages to ecosystems and their services are considered under environmental losses. This paper attempts to summarize the available knowledge on the evaluation of intangible losses due to flooding and to propose candidate methodologies for the future work.

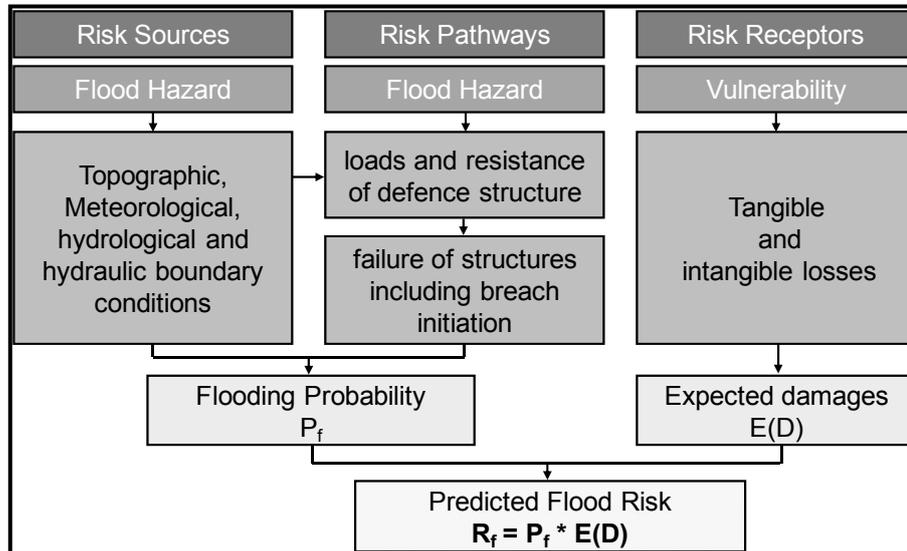


Figure 1.1: Flood risk analysis using risk source-pathway-receptor approach (adapted from Oumeraci, 2004)

2 Evaluation of Intangible Losses

2.1 Loss of life and Physical Injuries

The history of the estimation of loss of life due to natural hazards goes far back. Friedman (1975) is one of the earliest studies, which estimated the number of fatalities by means of the number of damaged residencies due to flooding (Aboelata and Bowles, 2005). Until then, several methodologies have been developed for the estimation of loss of life due to flooding, considering different characteristics of flood, flood prone area and population. Table 2.1 provides a summary of most relevant previous studies related to the estimation of loss of life and physical injuries.

Table 2.1: Most relevant studies on the estimation of loss of life and physical injuries (modified from Dassanayake and Oumeraci, 2010)

Reference	Method of Evaluation
Friedman (1975)	Estimated the number of fatalities by the number of damaged residencies
McCann et al. (1985)	Developed a loss of life model based on the location of the population at risk measured by its distance from a dam. This model was further developed to incorporate other variables such as flood depth, population distribution, and effectiveness of warning and evacuation processes
Brown and Graham (1988)	Developed a loss of life model based on the analysis of 24 historic dam failures and flash floods, including statistical data on population at risk and warning time
Abt et al. (1989)	Conducted laboratory experiments to investigate the human stability in flood flows considering stream velocity, flow depth, and weight/ height of pedestrians
Waarts (1992)	Developed relationships for the relationship between the water depth and the mortality based on data from 1953 flood event in the Netherlands
Penning-RowSELL et al. (2005)	Loss of life and physical injuries are estimated using flood characteristics (water depth, velocity and speed of onset), flood prone area characteristics (nature of the area, availability of flood warning) and population characteristics (presence of very old and disabled people)
Jonkman et al. (2008)	Developed the loss of life model using flood characteristics (flood depth, flow velocity and rise rate), evacuation data (flood arrival time, available and required time for evacuation) and mortality functions

Since a number of approaches are already developed for the estimation of loss of life, it is proposed to examine the suitability of available approaches for this study. In-depth analysis of the suitability of above model has led to the selection of the approaches by Penning-RowSELL et al. (2005) and Jonkman et al. (2008) for further consideration. The Penning RowSELL et al. (2005) approach is mainly considered as it accounts not only for the loss of life, but also for physical injuries. Further, a geographic information system (GIS) based loss of life model will be developed for the approach of Penning-RowSELL et al. (2005) for the Hamburg-Wilhelmsburg study area (Burzel et al., 2010). Moreover, developing a GIS based evacuation model, spatial analysis will also be conducted by using Jonkman et al. (2008) approach for loss of life.

2.2 Psychological Health Impacts

Numerous studies have been carried out to estimate the number of victims with psychological disorders following natural disasters. Prevailing causes for the psychological impacts are the direct exposure to the disaster and the incurred damages including physical injuries, property damages and the loss of relatives and friends. Figure 2.1 attempts to briefly summarize the information on the percentage of people with

psychological impacts collected in previous studies. Here, the percentages related to people with three types of mental disorders: Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD), anxiety and depression, and percentage of people with one or more disorders are provided.

These data have been collected within one year following a flood disaster by conducting questionnaire surveys and interviews among flood victims within the period from 1989 to 2004. The sample sizes (as illustrated in Figure 2.1) vary in the range from 61 to 1452 people. Some researchers have focused only on the overall mental health of the affected people (e.g. Norris et al., 1999; Tunstall et al., 2006), while others (e.g. David et al., 1996; Mason et al., 2010) have considered the different types of psychological disorders mentioned above. As Figure 2.1 shows, the total psychological impacts due to flooding can vary in the range from 10% up to 80% of the population exposed to the disaster.

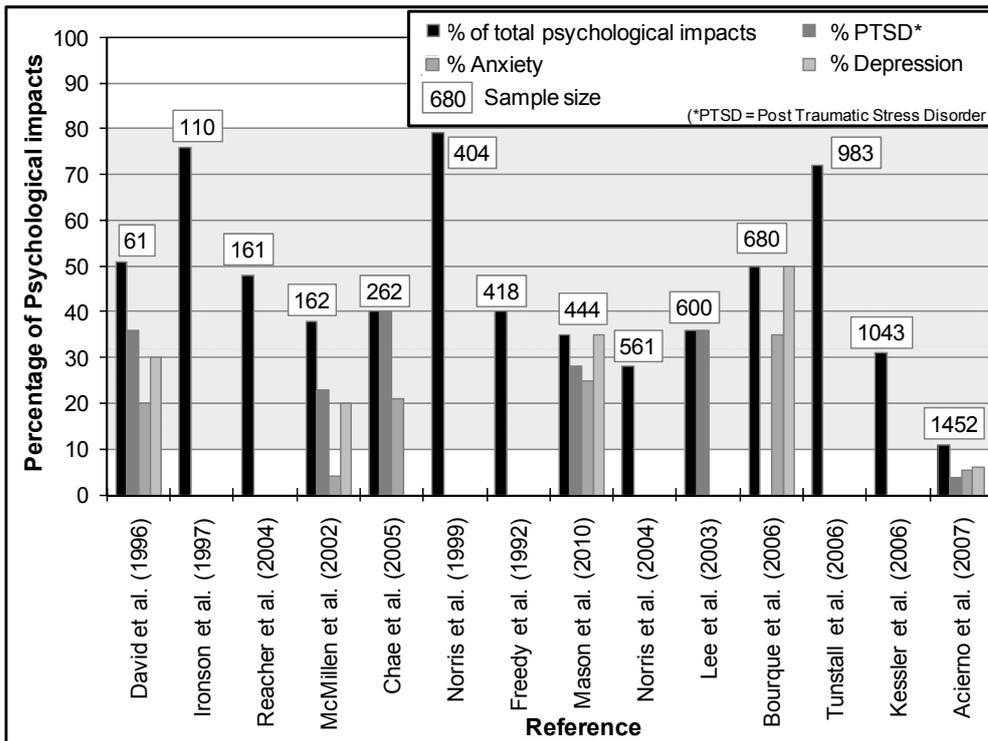


Figure 2.1: Percentage of people with psychological impacts exposed to flood disaster

A new methodology for the estimation of psychologically impacted population is proposed, as there are no systematic approaches readily available for practical applications. This approach is developed based on the two causes for mental disorders of impacted people due to flooding. The first cause is the level of flood losses including economic losses, loss of other people and level of physical injuries. Scores (1-3) are allocated for each type of losses depending on the severity and by aggregating the three scores, a flood loss factor is calculated. The second cause for the psychological impacts is the direct experience (or contact) with flood water, which mainly results in anxiety of the affected people. Here, the direct exposure factor is estimated allocating a score (1-3) based on the percentage of evacuated population in the area. From the multiplication of the flood loss and the direct exposure factors, psychological impact vulnerability is estimated as a percentage of the total population in the hazard area.

2.3 Cultural Losses

Cultural assets are classified in past research work based on several factors. For example, ECLAC (2003) has identified three main categories; public historic heritage buildings, private historic heritage buildings and non-heritage public cultural infrastructure while the classification mentioned in Malla (2006) has two types of cultural property, movable and immovable. Considering the previous classifications, in this study, cultural assets will be considered for two main categories; heritage assets and non-heritage assets. Within these two categories, both movable and immovable properties are taken into account.

An earlier attempt to estimate the flood damage to historic buildings has been made by Rodakowski (1978). He suggested that the replication cost is suitable for the damage estimation. ECLAC (2003) suggests to use repair and replacement cost for the damaged heritage buildings, based on experts' judgements. Further, indirect monetary valuation has also been proposed in previous studies for the assessment of losses to cultural assets (e.g. Vecvagars, 2006).

The losses to cultural assets can be assessed using two features: the level of physical damage to cultural assets and the level of cultural value of each asset. The physical damage of cultural buildings, like for residential buildings, can be assessed based on the flood depth and flow velocity. A five point scale (very low, low, medium, high and very high) is defined for the physical damages to cultural assets based on the damage criteria, including flood depth and velocity. The cultural value of an asset is however much more difficult to assess as it represents the combination of historic, social, symbolic, aesthetic, spiritual, recreational and educational value of that asset. The level of cultural value of heritage assets is determined using its level of significance to the community and its age. On the other hand, the level of cultural value of non-heritage assets is estimated based on the site visitation. In both cases, the level of cultural value is assessed in a five point scale: from very low to very high. Finally, a cultural loss assessment matrix is defined based on the level of physical damage and the level of cultural value (Table 2.2).

Table 2.2: Cultural Loss Assessment Matrix (modified from Nicoll, 2008)

Level of Cultural value	Level of physical damage				
	No/Very low	low	Medium	High	Very high
No/Very low	No/Very low	Very low	Low	Low	Medium
Low	Very low	Low	Low	Medium	Medium
Medium	Very low	Low	Medium	Medium	High
High	Very low	Low	Medium	High	Very high
Very high	Low	Medium	High	Very high	Very high

2.4 Environmental Losses – Damages to Ecosystems and their Services

Ecosystem Services are defined in many ways. Based on the previous definitions, the definition of the ecosystem services used in this study is that the ecosystem services are the ecosystem functions providing benefits to the human well-being. Several classifications of the ecosystem services were proposed (e.g. Costanza et al., 1997; de Groot et al., 2002), and among them, MEA (2005) classification has been widely used in research

studies (e.g. Hein et al., 2006; Turner et al., 2010) due to its simplicity and efficiency. In fact, MEA's classification is based on four categories of ecosystem services: provisioning, regulating, cultural and supporting.

So far, very limited research studies have been carried out in order to investigate the flood impacts on the environment and the ecosystems. Systematic research studies on environmental impact assessment of floods can hardly be found in the published literature, possibly because the assessment of environment losses is not considered as important (Gautam and van der Hoek, 2003). Environmental impacts can be diverse and wide-ranging. They may consist of destruction to flora and fauna, and damage to rare or endangered species, natural recreational resources, and scenic resources. Moreover, data and results on the degree of degradation of ecosystems and on their possible regeneration after the flood event (ecosystem resilience) are very scarce (Chee, 2004), thus making an assessment more complicated.

ECLAC (2003) has proposed a qualitative assessment of environmental impacts using six impact categories; zero, insignificant or minimal, moderate, severe, very severe and total impact. Further, it is also suggested to quantify the magnitude of the environmental impacts, for example, the length of beach damaged, the reduction in the volume of fishery catches, the presence of pollutants in the water etc. Moreover, the monetary assessment of environmental damages is also mentioned as an option for the evaluation of losses.

In order to assess the environmental losses, damages to ecosystem services are considered in this study. The services provided by each ecosystem are defined considering their functions and the available knowledge on ecosystem services. Using inundation models and flood data, the percentage damage in each ecosystem due to considered flooding scenarios and hence the percentage damage to each ecosystem can be estimated for different flooding scenarios. In this analysis, only provisioning, regulating and cultural services of ecosystems will be considered. Supporting services are supporting for the production of other ecosystem services, have indirect or very long term impacts on people and can therefore implicitly be included in the analysis of the other three services.

3 Monetary Valuation of Intangible Losses

3.1 Available Monetary Valuation Approaches for the Assessment of Social Losses

Messner et al. (2006) mention that there are two generic ways of deriving monetary values for social losses: to ask people what value they would put on those impacts (stated preferences) or to assume those values from what can be observed (revealed preferences). Numerous techniques are available for estimating the people's willingness to pay (WTP). Generally, stated preference methods, such as contingent valuation and choice modelling techniques, measure demand by examining the individual's stated preference for goods or services relative to other goods or services. On the other hand, revealed preference methods, such as travel-cost and hedonic price method, determine the demand for goods or services by examining the purchase of related goods in the private market place (Zhai, 2006). In analysing intangible social flood losses, the use of the above mentioned behavioural techniques as well as non-behavioural valuation methods such as

life quality index and Human capital approach has extensively been reported in the literature (e.g. Jongejan et al., 2005).

3.2 Available Monetary Valuation Approaches for the Assessment of Losses in Environment/ Ecosystem Services

Ecosystem services valuation is mainly based on the assumption that individuals are willing to pay (WTP) for the services and are willing to accept (WTA) compensation to forgo that service (Farber et al., 2002). Based on the preferences, ecosystem services valuation techniques can be identified in two categories; revealed preferences and stated preferences. Revealed preferences, which are mainly based on observed behaviour, can be further divided as market-based (such as market price method, factor of production, replacement cost and defensive expenditure) and surrogate markets (e.g. travel cost and hedonic price methods) (Pagiola, 2005). Stated preferences (contingent valuation and choice modelling, same as for social losses) are regarded as non-market based and draw data from people's responses to hypothetical questions (e.g. Turner et al., 2010).

3.3 Preferred Monetary Valuation Approaches

For the monetary valuation of intangible losses, either (i) the available approaches can be directly used, (ii) approaches can be combined or (iii) they can be further developed depending on the specified requirements. The available approaches and preferred approaches for this study are summarized in Table 3.1. More details and justification of the preferences are given in Dassanayake and Oumeraci (2010).

Table 3.1: Available and Preferred Approaches for the Monetary Valuation of Intangible Losses

Damage Category		Available Valuation Approaches	Preferred Approaches
Social Losses	Loss of Life	Contingent Valuation Choice Modelling Human Capital Approach Life Quality Index	Combination of Contingent Valuation and Life Quality Index approaches
	Physical Health Impacts	Contingent Valuation Choice Modelling	Combination of Contingent Valuation Choice Modelling
	Psychological Health Impacts	Contingent Valuation Anxiety-Productivity-Income Approach	Anxiety-Productivity- Income Approach
	Cultural Losses	Contingent Valuation Travel Cost Method Hedonic Price Method	Both Travel Cost and Hedonic Price Method
Environmental Losses	Provisioning Services	Market Price Method	Market Price Method
	Regulating Services	Contingent Valuation Replacement Cost Method Defensive Expenditures Cost of Illness	Both Contingent Valuation and Replacement Cost Method
	Cultural Services	Contingent Valuation Travel Cost Method Hedonic Price Method	Both Travel Cost and Hedonic Price Methods

4 Summary and Future Outlook

The work presented in this paper is essentially the output of a comprehensive critical review and analysis of the available knowledge on the evaluation of intangible losses due to coastal flooding (Dassanayake and Oumeraci, 2010). Within this study, the categories of intangible losses considered are loss of life, physical injuries, psychological health impacts, cultural losses and environmental losses.

The development of several approaches for the estimation of loss of life due to flooding in past research studies illustrates the relevance and complexity of the topic. Among these, two approaches seem to be promising for the evaluation of loss of life within this study: those of Penning Rowsell et al. (2005) and Jonkman et al. (2008). Within Penning Rowsell et al. (2005) approach, physically injured population will also be estimated. Since no systematic approaches are available for the evaluation of psychological impacts, cultural and environmental losses, new methodologies have to be proposed. Further, indirect monetary valuation approaches will also be used for the estimation of intangible losses in monetary terms.

As the final step of this research study, the intangible losses will have to be integrated in the overall risk assessment together with tangible losses. Here, the possible integration methodologies have to be identified for both cases, where the intangible losses are estimated in non-monetary and monetary terms, since the tangible losses are generally presented in monetary value. Further, it is also expected to explore the possibility of use of available computer tools for the assessment of risk assessment in order to comparatively analyse the effect of the intangible losses on the overall risk by applying different approaches.

Acknowledgement: Financial support provided for the first author by German Academic Exchange Service (DAAD) is greatly acknowledged.

5 References

Aboelata, M.A. and Bowles, D.S. (2005): LIFESim: A Model for Estimating Dam Failure Life Loss. Report to Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers and Australian National Committee on Large Dams. Institute for Dam Safety Risk Management, Utah State University, USA. 274p.

Abt, S.R.; Wittier, R.J.; Taylor, A. and Love, D.J. (1989): Human stability in a high flood hazard zone. *Water Resources Bulletin* 25(4), pp.881-890.

Acierno, R.; Ruggiero, K.J.; Galea, S.; Resnick, H.S.; Koenen, K.; Roitzsch, J.; de Arellano, M.; Boyle, J. and Kilpatrick, D.G. (2007): Psychological Sequelae Resulting From the 2004 Florida Hurricanes: Implications for Postdisaster Intervention. *American Journal of Public Health* 97(S1), pp.S103-S108.

Bourque, L.B.; Siegel, J.M.; Kano, M. and Wood, M.M. (2006): Weathering the Storm: The Impact of Hurricanes on Physical and Mental Health. *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science* 604, pp.129-151.

Brown, C.A. and Graham, W.J. (1988): Assessing the threat to life from dam failure. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 24 (6), pp.1303 – 1309.

Burzel, A., Dassanayake, D.R., Naulin, M., Kortenhaus, A., Oumeraci, H., Wahl, Th., Mudersbach, C., Jensen, J., Gönner, G., Sossidi, K., Ujeyl, G., and Pasche, E. (2010): Integrated Flood Risk Analysis for Extreme Storm Surges (XtremRisk). Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering (ICCE) 2010, Shanghai, China, 12p.

Chae, E.H.; Kim, T.W.; Rhee, S.J. and Henderson, T.D. (2004): The Impact of Flooding on the Mental Health of Affected People in South Korea. *Community Mental Health Journal* 41(6), pp.633-645.

Chee, Y.N. (2004): An ecological perspective on the valuation of ecosystem services. *Biological Conservation* 120, pp.549–565.

Costanza, R.; D'arge, R.; De Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R.V.; Paruelo, J.; Raskin, R.G.; Sutton, P. and van den Belt, M. (1997): The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, pp.253–260.

Dassanayake, D. R. and Oumeraci, H. (2010): Framework and Methods for the Evaluation of Intangible Losses and their Integration in Coastal Flood Risk Analysis. State of the art report. Leichtweiß-Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources, Technische Universität Braunschweig.

David, D.; Mellman, T.A.; Mendoza, L.M.; Kulick-Beli, R.; Ironson, G. and Schneiderman, N. (1996): Psychiatric Morbidity Following Hurricane Andrew. *Journal of Traumatic Stress*, 9(3), pp.607-612.

De Bruijn, K.M. and Klijn, F. (2009): Risky places in the Netherlands: a first approximation for floods, *Journal of Flood Risk Management* 2, pp.58–67.

De Groot, R. S.; Wilson, M. A. and Boumans, R. M. J. (2002): A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41, pp.393-408.

ECLAC - Economic Commission for Latin America and the Caribbean, (2003): Handbook for Estimating the Socio-economic and Environmental Effects of Disasters. United Nations and the World Bank.

Farber, S.; Costanza, R. and Wilson, M. (2002): Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecological Economics* 41, pp.375–392.

Freedly, J.R.; Shaw, D.L.; Jarrell, M.P. and Masters, C.R. (1992): Towards an Understanding of the Psychological Impact of Natural Disasters: An Application of the Conservation Resources Stress Model. *Journal of Traumatic Stress* 5 (3), pp. 441-454.

Friedman, D. G. 1975. Computer simulation in natural hazard assessment. Institute of Behavioral Science, University of Colorado, Boulder, Colorado, 194 p. (cited by Aboelata and Bowles, 2005).

Gautam, K.P. and van der Hoek, E.E. (2003): Literature study on environmental impacts of floods, Delft Cluster-Publication: DC1-233-13.

Hein, L.; van Koppen, K.; de Groot, R.S. and van Ierland, E.C. (2006): Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics* 57, pp.209-228.

Ironson, G.; Wynings, C.; Schneiderman, N.; Baum, A.; Rodriguez, M.; Greenwood, D.; Benight, C.; Antoni, M.; Laperriere, A.; Huang, H.S.; Klimas, N. and Fletcher, M.A. (1997): Posttraumatic Stress Symptoms, Intrusive Thoughts, Loss, and Immune Function After Hurricane Andrew. *Psychosomatic Medicine* 59, pp.128-141.

Jongejan, R.B.; Jonkman, S.N. and Vrijling, J.K. (2005): Methods for the economic valuation of loss of life, Proceedings of Conference on International Law and Management of Large-Scale Risks, 2005, Montreal, Canada.

Jonkman, S.N.; Vrijling, J.K. and Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2008): Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method. *Natural Hazards* 46, pp.353–389.

Kessler, R.C.; Galea, S.; Jones, R.T. and Parker, H.A. (2006): Mental illness and suicidality after Hurricane Katrina. *Bulletin of the World Health Organization* 84, pp.930-939.

- Lee, I. S.; Hah, Y. S.; Kim, K. J.; Kim, J. H.; Kwon, Y. H.; Park, J. K. and Lee, N. Y. (2003): A field study of posttraumatic stress disorder in a community after typhoon Rusa. *Journal of the Korean Academy of Nursing*, 33, pp.829–838.
- Malla, B. (2006): Classification of Cultural Property and Their Conservation. *Orissa Review*, pp.61-64.
- Mason, V.; Andrews, H. and Upton, D. (2010): The psychological impact of exposure to floods. *Psychology, Health & Medicine* 15(1), pp.61–73.
- McCann, M.W. Jr.; Franzini, J. B.; Kavazanjian, E. Jr. and Shah, H.C. (1985): Preliminary safety evaluation of existing dams vol. 1 and 2. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Report No. 69 and 70.
- McMillen, C.; North, C.; Mosley, M. and Smith, E. (2002): Untangling the Psychiatric Comorbidity of Posttraumatic Stress Disorder in a Sample of Flood Survivors. *Comprehensive Psychiatry* 43(6), pp.478-485.
- MEA, Millennium Ecosystem Assessment (2003) Ecosystems and Human Well-being, A framework for assessment. Millennium Ecosystem Assessment Series, Island Press, Washington D.C.
- Messner, F.; Penning-Rowsell, E.; Green, C.; Meyer, V.; Tunstall, S. and van der Veen, A. (2006) Guidelines for Socio-economic Flood Damage Evaluation, Integrated Flood Risk Analysis and Management Methodologies. FLOODsite Project Report, HR Wallingford, UK.
- Nicoll, C. (2008): Appendix E: Cultural heritage impact assessment, Environmental Statement, Town Farm Quarry Extension to existing sand and gravel workings, and subsequent restoration to agriculture, woodland and nature conservation, Supporting statement. Hanson Quarry Products Europe Ltd.
- Norris, F.H.; Murphy, A.D. Baker, C.K. and Perilla, J.L. (2004): Postdisaster PTSD Over Four Waves of a Panel Study of Mexico's 1999 Flood. *Journal of Traumatic Stress* 17(4), pp.283–292.
- Norris, F.H.; Perilla, J.L.; Riad, J.K.; Kaniasty, K and Lavizzo, E.A. (1999): Stability and change in stress, resources, and psychological distress following natural disaster: Findings from hurricane andrew. *Anxiety, Stress. and Coping* 12, pp.363-396.
- Oumeraci, H. (2004): sustainable coastal flood defences: Scientific and modelling challenges towards an integrated risk-based design concept. Keynote Lecture. IMA international conference on flood risk assessment, University of Bath, UK.
- Pagiola, S.; von Ritter, K. and Bishop, J. (2005): How much is an Ecosystem worth? assessing the economic value of conservation. The World Bank, IUCN - The World Conservation Union and The Nature Conservancy. Available online at <http://www.jncc.gov.uk/page-4024>.
- Penning-Rowsell, E.; Floyd, P.; Ramsbottom, D. And Surendran, S. (2005): Estimating Injury and Loss of Life in Floods: A Deterministic Framework. *Natural Hazards* 36, pp.43–64.

Reacher, M.; McKenzie, K.; Lane, C.; Nichols, T.; Kedge, I.; Iversen, A.; Hepple, P.; Walter, T.; Laxton, C. and Simpson, J. (2004): Health impacts of flooding in Lewes: a comparison of reported gastrointestinal and other illness and mental health in flooded and non-flooded households. *Communicable disease and public health* 7(1).

Rodakowski, R. (1978): A proposed method of evaluating flood damages to historic homes – an externality approach. *Water Resources Bulletin* 14 (6), American Water Resources Association.

Smith, K. and Ward, R. (1998): *Floods: Physical processes and human impacts*. John Wiley and Sons, Chichester, UK.

Stal, J.; Paulsen, S.; Pihl, L.; Rönnbäck, P; Söderqvist, T. and Wennhage, H. (2008): Coastal habitat support to fish and fisheries in Sweden: Integrating ecosystem functions into fisheries management. *Ocean and Coastal Management* 51, pp.594–600.

Tunstall, S.; Tapsell, S.; Green, C.; Floyd, P. and George, C. (2006): The health effects of flooding: social research results from England and Wales. *Journal of Water and Health* 4(3), pp.365-380.

Turner, R.K.; Morse-Jones, S. and Fisher, B. (2010): Ecosystem valuation: A sequential decision support system and quality assessment issues. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1185(1), pp.79-101.

Vecvagars, K. (2006): Valuing damage and losses in cultural assets after a disaster: concept paper and research options. *Focal Point on Disaster Evaluation, Mexico*.

Waarts, P.H. and Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2004): Risk management of large scale floodings, *HERON* 49 (1) 26p.

Zhai, G. (2006): Public Preference and Willingness to Pay for Flood Risk Reduction, A better integrated management of disaster risks: Toward resilient society to emerging disaster risks in mega-cities, Eds., S. Ikeda, T. Fukuzono, and T. Sato, pp.57–87.

Generierung synthetischer Hochwasserganglinien

Jens Bender, Christoph Mudersbach und Jürgen Jensen

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen

Zusammenfassung

Eine Möglichkeit zur Generierung extremer synthetischer Abflussganglinien bietet die Hochwassermerkmal-Simulation nach MUNLV (2004). Das Verfahren basiert auf der Auswertung von beobachteten Abflussdaten und kombiniert statistische und deterministische Ansätze zur Berechnung von einzelnen Hochwasserganglinien. Zur analytischen Beschreibung der Ganglinien werden insgesamt vier Parameter verwendet: der Hochwasserscheitel (Q_S), die Anlaufzeit (t_A), ein Formparameter des ansteigenden Astes (m_{an}) und ein Formparameter des absteigenden Astes (m_{ab}). Die statistische Beschreibung der Parameter erfolgt durch die Verwendung von Verteilungsfunktionen, wodurch dem Anwender mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation die Möglichkeit gegeben wird, beliebig viele Ganglinien mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten zu generieren.

Das hier vorgestellte Verfahren weist jedoch einige Unzulänglichkeiten auf, die ein adequates Modellieren von Hochwasserganglinien nur eingeschränkt zulassen.

Keywords: synthetische Hochwasserganglinien, Hochwassermerkmal-Simulation, Speicherbemessung, DIN 19700, Bemessungsabflüsse

1 Einführung

Die im Jahr 2004 überarbeitete DIN 19700 (Teil 11 und 12) fordert für die Dimensionierung und Überprüfung von Stauanlagen und deren Entlastungsbauwerken die Verwendung von extremen Hochwasserganglinien. Während in der alten DIN 19700 (1984) der Bemessungsansatz lediglich die Verwendung von extremen Scheitelabflüssen vorsah, soll mit der Verwendung von Ganglinien eine genauere Aussage über stauinhaltsmaximierende Zuflüsse getroffen werden können.

Über die Art und Weise der Generierung synthetischer Ganglinien finden sich in der DIN 19700 (2004) keine Angaben. In dem Merkblatt „Ermittlung von Bemessungsabflüssen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen“ des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV 2004) wird eine Form der Hochwassermerkmal-Simulation vorgestellt, um synthetische Bemessungsganglinien zu generieren.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten für synthetische Hochwasserganglinien finden sich auch beispielsweise in der Bemessung von Sielbauwerken oder in der Überlagerung von binnen- und seeseitigen Hochwasserereignissen in tidebeeinflussten Gewässern wieder.

Die Anwendung auf ein Fallbeispiel in Bender (2010) haben jedoch Unzulänglichkeiten des Verfahrens aufgezeigt, bestimmte Ganglinienformen zu simulieren. Diese Unzulänglichkeiten sollen in diesem Beitrag aufgezeigt und diskutiert, sowie mögliche Lösungsansätze vorgestellt werden.

1.1 Hochwassermerkmal-Simulation

Eine Hochwasserganglinie kann mithilfe von verschiedenen Parametern, wie z.B. Scheitel (Q_S), Anlaufzeit (t_A), Hochwasserfülle (V_S), die Form der Ganglinie, Hochwasserdauer D , etc., mathematisch vereinfacht beschrieben werden. Die Parameter können an beobachteten Hochwasserereignissen abgeschätzt und die statistischen Eigenschaften und Abhängigkeiten der Parameter analysiert werden. Bei einer Unabhängigkeit der Parameter kann eine eindimensionale Verteilungsfunktion verwendet werden; bei voneinander abhängigen Parametern hingegen, müssen entweder Regressionsanalysen oder mehrdimensionale Verteilungsfunktionen angewendet werden (Klein, 2009).

Die Parameter können in einer geeigneten mathematischen Funktion, den sogenannten Ganglinienfunktionen, zusammengeführt und so für weitere numerische Anwendungen verwendet werden.

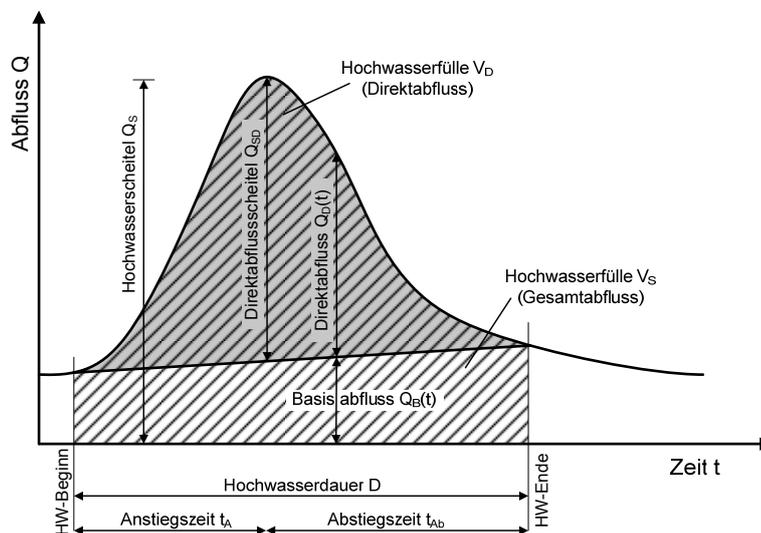


Abbildung 1: Hochwasserwelle mit charakteristischen Parametern (erweitert nach Klein (2009))

Das Konzept der Hochwassermerkmalsimulation nach MUNLV (2004) beruht auf dem Ansatz die Form einer Hochwasserwelle anhand folgender vier Parameter mathematisch zu beschreiben:

- Hochwasserscheitel - Q_S
- Anlaufzeit - t_A
- Formparameter des ansteigenden Astes - m_{an}
- Formparameter des absteigenden Astes - m_{ab}

Wobei die Formparameter m_{an} und m_{ab} Eingangsparameter für mathematische Funktionen sind, die die Form des an- bzw. absteigenden Astes der Hochwasserwelle beschreiben.

1.2 Ganglinienfunktionen

1.2.1 Allgemein

Zur Beschreibung von Hochwasserganglinien mit analytischen Funktionen findet sich in der Literatur eine ganze Reihe von Ansätzen. Die häufigste Anwendung finden hier Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, wie z.B. die Gammaverteilung, die Betaverteilung, die Pearson III-Verteilung die Frechét-Verteilung, die Weibull-Verteilung und die Log-Normal-Verteilung. In Deutschland ist die in Dyck (1980) beschriebene Kozeny-Funktion weit verbreitet. Die Funktion entspricht in ihrer Form der Gamma-Verteilung.

Häufig findet auch die Kombination verschiedener Funktionen Anwendung, indem eine den ansteigenden Ast und die andere den absteigenden Ast der Ganglinie beschreibt. Lohr (2003) verwendet zum ersten Mal die Kombination der Kozeny-Funktion für den ansteigenden Ast und einen hyperbolischen Verlauf für den absteigenden Ast. Diese Kombination wurde auch in MUNLV (2004) übernommen.

1.2.2 Kozeny-Funktion

Die Kozeny-Funktion definiert sich nach Dyck (1980) zu

$$Q(t) = (Q_S - Q_B(t)) \cdot \left(\left(\frac{t}{t_A} \right)^{m_{an}} \cdot e^{-m_{an} \left(1 - \frac{t}{t_A} \right)} \right) + Q_B(t). \quad \text{Gleichung 2}$$

Mit

t: Zeit (0...t_A) [sec, min, h, d,...]

t_A: Hochwasseranlaufzeit [sec, min, h, d,...]

Q(t): Gesamtabfluss zur Zeit t [m³/s]

Q_B(t): Basisabfluss, über die Zeit t = const. [m³/s]

Q_S: Scheitelabfluss [m³/s]

m_{an}: Parameter zur Beschreibung der Wellenform [-]

Der Einfluss des Formparameters m_{an} auf die Form der Standardganglinie ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

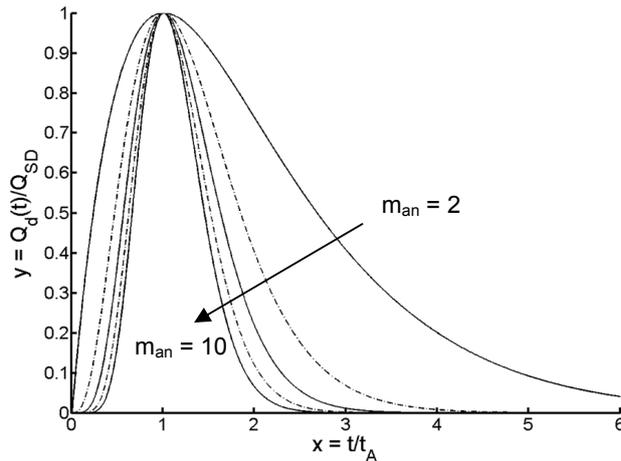


Abbildung 2: Einfluss des Formparameters m_{an} der Kozeny-Funktion auf die Beschreibung der Standardganglinie, erweitert nach Klein (2009)

Es ist zu erkennen, dass bei kleinem m_{an} die Ganglinie schnell ansteigt und nach Erreichen des Scheitels vergleichsweise flach abfällt. Mit zunehmendem Wert von m steigt die Ganglinie zunächst verzögert an, fällt nach dem Hochwasserscheitel aber schnell wieder ab.

1.2.3 Ganglinienfunktion nach Lohr

Für die Beschreibung des absteigenden Astes wird in Lohr (2003) und MUNLV (2004) ein hyperbolischer Verlauf nach Leichtfuss & Lohr (1999) mit dem Formparameter m_{ab} angesetzt:

$$Q_D(t) = Q_0 \cdot \left(1 - \frac{(e^k)^a - (e^{-k})^a}{(e^k)^a + (e^{-k})^a} \right) \quad \text{Gleichung 3}$$

mit

$$k = \frac{t_s + t}{b + m_{ab} \cdot (t_s + t)} e \quad \text{Gleichung 4}$$

und

$$t_s = \frac{1}{\frac{2}{\ln\left(2 \cdot \frac{Q_0}{Q_S} - 1\right)} - m_{ab}} \quad \text{Gleichung 5}$$

Mit

t: Zeit [sec, min, h, d,...]

t_s : Startposition im ablaufenden Ast

b: Achsenabschnitt (i.d.R. = 1) [-]

m_{ab} : Parameter zur Beschreibung des absteigenden Astes ($0,05 < m_{ab} < 0,4$) [-]

a : Stauchung ($0,95 < a < 1$), i.d.R. 1 [-]

$Q(t)$: Gesamtabfluss zur Zeit t [m^3/s]

Q_0 : Definierter Maximalabfluss [m^3/s]

Q_S : Scheitelabfluss [m^3/s]

Als Parameter werden in der Gleichung lediglich der Scheitelabfluss Q_S und der Formparameter m_{ab} verwendet. Alle anderen Größen sind Konstanten, die wie oben angegeben definiert sind.

Der zu definierende Maximalabfluss ist eine reine Rechengröße, die zu Anfang der Parameterermittlung einmal festgelegt werden muss. Als Beispiel nennt Lohr (2003) einen Richtwert von $Q_0 = 2 \cdot \text{HHQ}$.

Abbildung stellt den Einfluss des Formparameters m_{ab} auf die Beschreibung des absteigenden Astes der Ganglinienfunktion dar. Der ansteigende Ast wird durch die Standardganglinie der Kozeny-Funktion mit $m_{an} = 1$, $t_A = 1$ und $Q_D/Q_{SD} = 1$ abgebildet.

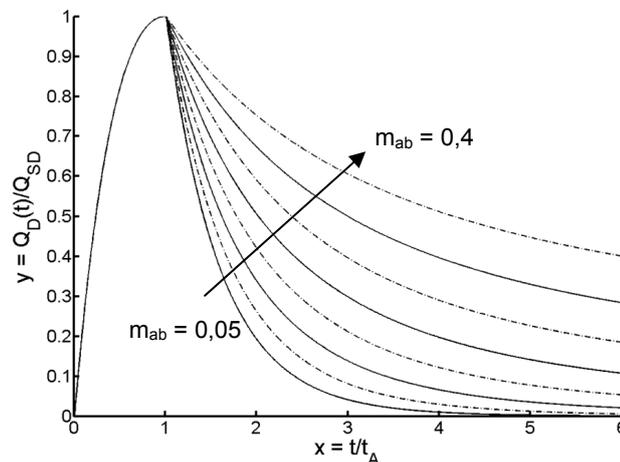


Abbildung 3: Einfluss des Formparameters m_{ab} auf die Beschreibung des hyperbolischen Verlaufs des absteigenden Astes der Standardganglinie (mit $m_{an} = 1$)

Es ist zu erkennen, dass je kleiner der Wert m_{ab} ist, desto steiler fällt die Hochwasserwelle ab und konvergiert schnell gegen Null. Bei größerem m_{ab} verläuft der absteigende Ast flacher und konvergiert wesentlich langsamer gegen Null.

2 Parameterermittlung

Die Ermittlung der Parameter sollte bei ausreichender Datengrundlage nach MUNLV (2004) wenigstens saisonal getrennt durchgeführt werden. Dabei wird zwischen Sommer (Mai – Oktober) und Winter (November bis April) unterschieden. Dies erlaubt im Wesentlichen die Erfassung der unterschiedlichen Hochwasserwellenformen im Sommer (z.B. durch Starkniederschlagsereignisse induziert) und im Winter (z.B. durch Schneeschmelze induziert). Bei ausreichend langen Pegelaufzeichnungen, bzw. ausreichend vielen erfassten Hochwasserereignissen kann die zeitliche Auflösung der Parameterermittlung auch höher gewählt werden. Aussagen über die minimal notwendige Anzahl von Hochwasserereignissen liefert MUNLV (2004) nicht.

Für die Parameterermittlung werden alle Ereignisse herangezogen, die einen bestimmten Grenzwert überschreiten. Diese Methode der Datengewinnung wird auch als POT-Verfahren bezeichnet (*engl. Peak Over Threshold*).

Als sinnvollen Grenzwert gibt MUNLV (2004) alle Hochwasserereignisse mit

$$Q_S \geq 2 \cdot MQ$$

Gleichung 6

an.

Ergänzend zu dieser Anforderung an die Hochwasserereignisse wird für die Parameterermittlung noch die hydrologische Unabhängigkeit der Hochwasserwellen vorausgesetzt, da eine Hochwasserwelle, die durch eine Vorherige beeinflusst ist, weder in Form noch in Scheitel repräsentativ für das Einzugsgebiet sein kann.

Für die Feststellung der Unabhängigkeit zweier aufeinanderfolgender Hochwasserscheitel liefert die Pegelvorschrift der LAWA (1997) Empfehlungen. Demnach sind zwei Ereignisse voneinander unabhängig, wenn der zeitliche Abstand zwischen zwei Scheiteln wenigstens 7 Tage beträgt und/oder die Differenz des zweiten Scheitelwertes und des dazwischen liegenden Wellentals größer als die Differenz zwischen Wellental und mittleren Abflusses ist, wie Abbildung 4 verdeutlicht.

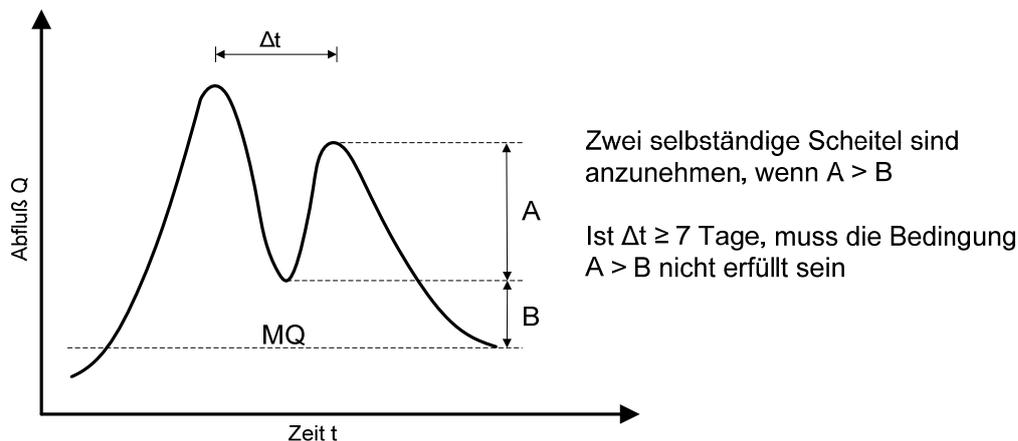


Abbildung 4: Kriterien für statistisch und hydrologisch unabhängige Hochwasserscheitelwerte nach LAWA (1997)

In Bacchi et al. (1992) gelten zwei aufeinanderfolgende Hochwasserscheitel dann als unabhängig, wenn der zeitliche Abstand zwischen beiden Gipfeln Δt wenigstens 20-mal so groß ist wie die Scheitelanstiegszeit t_A des zweiten Scheitels und/oder das Wellental Q_{\min} zwischen den Scheiteln höchstens 20 % des ersten Scheitels $Q_{S,1}$ beträgt. Abbildung 5 stellt diese Kriterien beispielhaft an einem Hochwasserereignis dar.

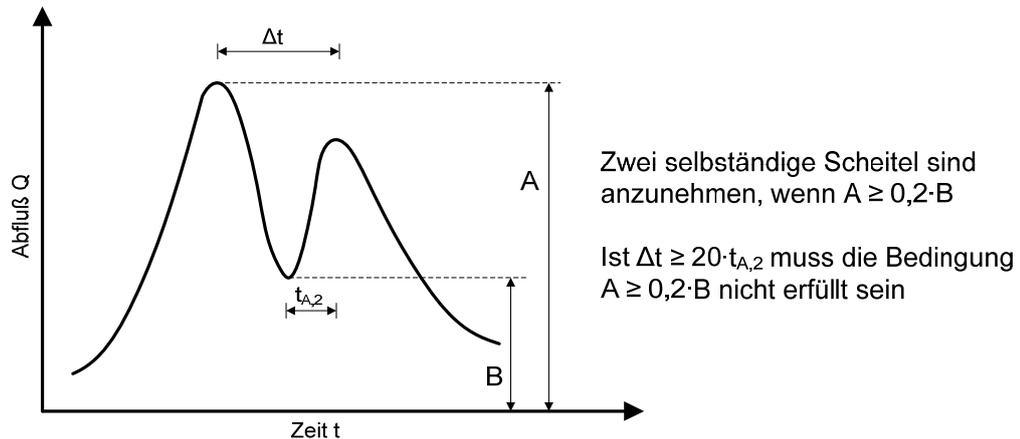


Abbildung 5: Kriterien für statistisch und hydrologisch unabhängige Hochwasserscheitelwerte nach Bacchi et al. (1992)

Um eine maximale Anzahl an hydrologisch unabhängigen und repräsentativen Hochwasserscheiteln für die statistische Auswertung zu erhalten, werden die Kriterien der hydrologischen Unabhängigkeit aus beiden Ansätzen kombiniert. Somit gilt ein Hochwasserereignis als unabhängig, wenn das Wellental Q_{\min} zwischen zwei Scheiteln höchstens 20 % des ersten Scheitels $Q_{S,1}$ beträgt. Diese Bedingung muss nicht erfüllt sein, wenn der zeitliche Abstand zwischen den zwei Scheiteln wenigstens 7 Tage beträgt. Diese Kombination der beiden Ansätze wird auch in dem Modell von Klein (2009) gewählt.

2.1 Hochwasserscheitel Q_S

In Deutschland liefert das DVWK-Merkblatt (1999) Empfehlungen für die Datengewinnung, Datenprüfung, die Wahl einer Verteilungsfunktion und schließlich die Verifizierung der Ergebnisse. Entsprechend dem Merkblatt sollten für die Durchführung einer Extremwertstatistik ausreichend lange Beobachtungszeitspannen (Pegelaufzeichnungen) zur Verfügung stehen. Als Orientierung gibt DVWK (1999) Beurteilungskriterien der Beobachtungszeitspannen für die extremwertstatistische Auswertung an. Die Aussagekraft einer statistischen Analyse hängt sehr stark von der Länge der zugrunde gelegten Beobachtungszeitspanne ab.

Sowohl nach DVWK (1999) als auch nach MUNLV (2004) sind für die statistische Analyse von Hochwasserereignissen grundsätzlich folgende Verteilungsfunktionen geeignet:

- Allgemeine Extremwertverteilung
- Extremwertverteilung Typ 1 (Gumble-Verteilung)
- Pearson- Typ 3-Verteilung
- Weibullverteilung
- Logarithmische Normalverteilung
- Logarithmische Pearson-Typ 3-Verteilung

Ein grundlegendes Problem bei der Extremwertstatistik besteht jedoch darin, dass verschiedene an eine Stichprobe angepasste Verteilungsfunktionen im Extrapolationsbereich für Ereignisse mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit sehr hohe

Abweichungen ergeben. So kann die Zuordnung eines Abflusses zu einer bestimmten Jährlichkeit nur mit einer u.U. sehr großen Ungenauigkeit erfolgen. Daher wird empfohlen, bei der Aufstellung von Hochwasserstatistiken durch den Vergleich zu nahegelegenen Pegeln eine regional gültige Verteilungsfunktion zu finden. So kann eine größere Datenmenge zur Bestimmung der richtigen Verteilungsfunktion verwendet werden (DVWK 1999). Weitere Pegelbeobachtungen liegen häufig jedoch nicht vor, so dass die Möglichkeit der Ermittlung einer regionalgültigen Verteilungsfunktion nicht durchführbar ist.

In Vogel & Wilson (1996) sind Studien zu extremen Hochwasserereignissen weltweit zusammengetragen worden. Bei den aufgeführten Studienergebnissen herrscht allgemeine Übereinstimmung, dass die Verteilung von jährlichen maximalen Abflüssen am ehesten mit der Allgemeinen Extremwertverteilung angenähert werden kann. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen von Mudersbach (2009).

Bei partiellen Zeitreihen hingegen, die mit POT-Verfahren gewonnen werden, gilt z.B. nach Coles (2001) und Hawkes et al. (2008) die Ansicht, dass die GEV nicht anzuwenden ist; die allgemeine Pareto-Verteilung jedoch zu guten Ergebnissen führt. Daher wird zur statistischen Analyse der Hochwasserscheitelwerte sowohl auf die GEV als auch auf die GPD zurückgegriffen. Dabei kommt die am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen entwickelte Software ProMUSE (Jensen et al. 2006) zum Einsatz.

2.2 Scheitelanstiegszeit t_A und Hochwasserdauer D

Die Scheitelanstiegszeit ist definiert als die Zeit, die von Beginn des Hochwasserereignisses bis zum Erreichen des Scheitelwertes vergeht (vgl. Abbildung). Die Scheitelanstiegszeit ermittelt sich also aus der Differenz der Zeit des Hochwasserscheitels und dem Beginn der Hochwasserwelle zu

$$t_A = t(Q_S) - t(Q_B) \quad \text{Gleichung 7}$$

Äquivalent dazu ergibt sich die Dauer des absteigenden Astes t_{Ab} der Welle aus der zeitlichen Differenz des definierten Hochwasserendes und des Scheitels zu

$$t_{Ab} = t(Q_E) - t(Q_S) \quad \text{Gleichung 8}$$

Die gesamte Dauer des Hochwasserereignisses D definiert sich somit zu

$$D = t_A + t_{Ab} \quad \text{Gleichung 9}$$

Der Beginn eines Hochwasserereignisses ist durch den i.d.R. steilen Anstieg der Hochwasserganglinie relativ einfach zu bestimmen. In der Untersuchung von Bender (2010) hat sich ein Steigungsgradient von 0.015 über eine Differenz von 10 Abflusswerten als optimal herausgestellt. Bei der Anwendung auf andere Abflussdaten muss dieses Kriterium möglicherweise angepasst werden.

Das Hochwasserende ist durch den flacheren Abfall der Ganglinie hingegen schwieriger zu definieren. Klein (2009) wählt das Ende in seinem Modell über ein Abbruchkriterium für den Steigungsgradienten der Rückgangskurve. In den vorliegenden Untersuchungen hat sich die Definition des Hochwasserendes als erstes potentielles Minimum der geglätteten Ganglinienfunktion nach dem Hochwasserscheitels als praktikabel erwiesen. Bei der

Glättung wird ein pseudo-Gauß'scher Filter mit einer Weite von 100 Messwerten angewendet. Je nach Auflösung der vorliegenden Abflusszeitreihe müssen die Parameter der Glättung bei der Anwendung auf andere Einzugsgebiete ggf. angepasst werden um sinnvolle Ergebnisse zu erhalten.

2.3 Formparameter des ansteigenden und absteigenden Astes m_{an} und m_{ab}

Wie in Abschnitt 1 bereits angesprochen, wird die Form der Hochwasserwelle in den ansteigenden Ast und den absteigenden Ast aufgeteilt. Für die Ermittlung des Formparameters m_{an} des ansteigenden Astes wird die Kozeny-Funktion (Gleichung 1) an alle detektierten Hochwasserereignisse angepasst. Die Ermittlung des optimalen Wertes für m_{an} erfolgt über die Berechnung der kleinsten Fehlerquadrate (*engl. Root Mean Square Error, RMSE*).

Der Wertebereich für m_{an} liegt nach MUNLV (2004) etwa zwischen 1 und 10. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass auch Werte $\gg 10$ auftreten können. Daher wird der Wertebereich im vorliegenden Modell zu $1 \leq m_{an} \leq 30$ mit einem Intervall von 0,1 festgelegt.

Nach der Ermittlung des Formparameters m_{an} für alle Hochwasserereignisse wird dem gewonnenen Datenkollektiv eine Verteilungsfunktion angepasst. Auch hier bestimmt der geringste RMSE die passende Funktion.

Analog zur Ermittlung des Datenkollektivs für m_{an} wird die Bestimmung des Formparameters m_{ab} des hyperbolisch absteigenden Astes nach (Gleichung 3) ermittelt. Der sinnvolle Wertebereich für den Formparameter m_{ab} liegt nach Lohr (2003) und MUNLV (2004) bei $0,05 \leq m_{ab} \leq 0,4$. Das gewählte Untersuchungsintervall beträgt hier 0,01.

3 Generierung synthetischer Hochwasserganglinien

Nach Abschluss der Parameterermittlung können aus den gewonnenen Verteilungsfunktionen der vier Parameter mithilfe der Monte-Carlo-Simulation beliebig viele Hochwasser generiert werden. Dazu wird aus den Verteilungsfunktionen für die Anlaufzeit t_A , der Form des ansteigenden bzw. absteigenden Astes der Ganglinie (m_{an} bzw. m_{ab}) und des Hochwasserscheitels Q_S jeweils ein Wert mithilfe einer normal verteilten Zufallszahl unabhängig voneinander gezogen. Unter Verwendung der Kozeny-Funktion und der hyperbolischen Funktion nach Lohr lässt sich so eine vollständige Hochwasserwelle berechnen. Dieser Prozess lässt sich beliebig oft wiederholen und somit eine unbeschränkte Anzahl von synthetischen Hochwasserganglinien erzeugen. Die Jährlichkeit der erzeugten Ganglinie wird nach MUNLV (2004) durch die Jährlichkeit des zugehörigen Hochwasserscheitels Q_S definiert.

Die Anzahl der zu erzeugenden Hochwasserereignisse steht in direkter Abhängigkeit zu der zu erreichenden Eintrittswahrscheinlichkeit des Bemessungshochwassers. So sind für die Generierung eines HQ_{1000} nach MUNLV (2004) wenigstens 1000 Hochwasserwellen zu generieren. Die Güte der Ergebnisse steigt bei der Monte-Carlo-Simulation jedoch mit der Anzahl der Versuche, so dass nach Martin & Pohl (2008) demnach eine größere Anzahl von generierten Wellen anzustreben ist.

Der Vorteil der Generierung vieler Hochwasserwellen besteht darin, dass das gesamte Spektrum der Ereignisse für den untersuchten Standort weitgehend wiedergegeben wird (Lohr 2003).

4 Einschränkungen des Verfahrens

Während der Anwendung zeigten sich einige Schwachstellen, bzw. Anwendungsgrenzen der Hochwassermerkmal-Simulation nach dem Verfahren wie es in MUNLV (2004) dargestellt ist. Diese Anwendungsgrenzen beruhen im Wesentlichen auf der Unzulänglichkeit, bestimmte Formen von Hochwasserganglinien abbilden zu können.

4.1 Mehrgipflige Hochwasserereignisse

Das vorgestellte Verfahren lässt sich ausschließlich zur Generierung eingipfliger Hochwasserganglinien verwenden. Zwei-, bzw. mehrgipflige Ereignisse können nicht modelliert werden. Jedoch verweist die DIN 19700 Teil 10 (2004) ausdrücklich auf die Berücksichtigung von mehrgipfligen Hochwasserereignissen, sofern mit solchen in dem jeweils betrachteten Einzugsgebiet gerechnet werden kann.

Die Frage der Modellierung mehrgipfliger Ereignisse wurde bereits in Klein (2009) aufgegriffen. Es wurde ein Verfahren entwickelt, welches durch die Anwendung multivariater Statistik eine Überlagerung mehrerer Kozeny-Funktionen erlaubt.

4.2 Flach ansteigende Wellenformen

Wie in Abschnitt 2 bereits diskutiert, wurden bei der Parameterermittlung auch ansteigende Hochwasseräste mit einem m_{an} -Wert $\gg 10$ detektiert. Das liegt darin begründet, dass mit der Kozeny-Funktion lediglich relativ steile Anstiegsformen beschrieben werden können. Da mit steigendem m_{an} -Wert nur die Verzögerung des Anstiegs definiert wird, können flache Wellenanstiege nur annäherungsweise durch die Wahl eines hohen m_{an} -Wertes beschrieben werden. Nachfolgende Abbildung 6 stellt die Problematik anhand eines Beispiels dar.

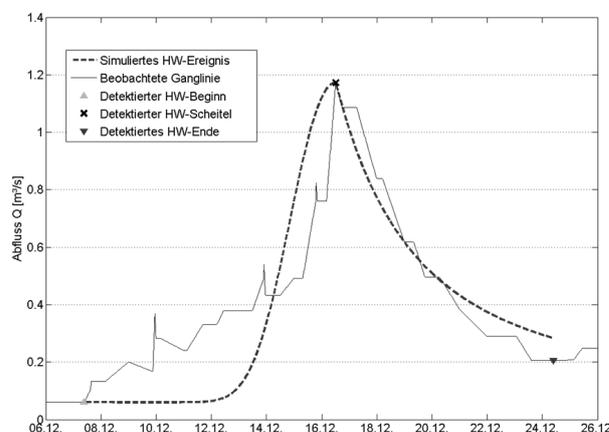


Abbildung 6: Beispiel für ein Hochwasserereignis mit $t_A = 220$ h und daraus resultierendem $m_{an} = 30$

Es ist zu sehen, dass der Hochwasserbeginn anhand des stetig steigenden Abflusses richtig detektiert worden ist, jedoch steigt die Ganglinie nicht sehr steil an. Die automatisierte Anpassung des simulierten ansteigenden Astes erfordert die Wahl eines hohen m_{an} -Wertes, um die Summe der Fehlerquadrate möglichst gering zu halten. Dies resultiert in einem zeitlich sehr stark verzögerten Anstieg der simulierten Ganglinie.

4.3 Lang andauernde Scheitelwerte

Eine weitere Unzulänglichkeit der Hochwassermerkmalsimulation nach MUNLV (2004) besteht darin, dass mit der Kombination der Kozeny-Funktion und der hyperbolischen Funktion nach Lohr (1999) keine länger andauernde Hochwasserscheitelwerte simuliert werden können. Bei der Bearbeitung wurden mehrere Hochwasserereignisse detektiert, bei denen der Spitzenabfluss über einen längeren Zeitraum gleichbleibend verläuft.

Nachfolgende Abbildung zeigt ein solches beobachtetes Ereignis, sowie die angepassten synthetischen Ganglinie. Zur besseren Veranschaulichung wird der Bereich des Scheitelabflusses auf der rechten Seite der Abbildung 7 nochmals vergrößert dargestellt.

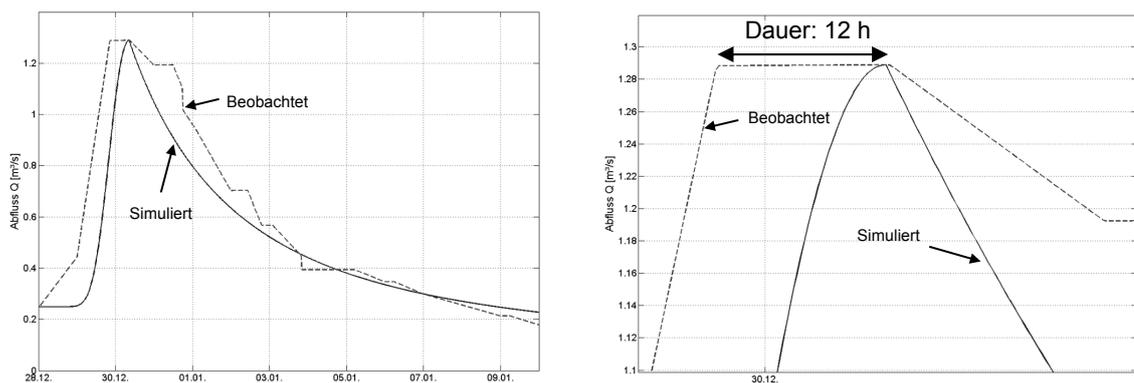


Abbildung 7: Beobachtete Hochwasserganglinie mit lang andauerndem Scheitelabfluss und die angepasste synthetische Ganglinie - gesamtes Ereignis (links) und Vergrößerung des Scheitels (rechts)

Man erkennt, dass der Scheitelwert richtig detektiert worden ist. Jedoch steigt die Welle zunächst steil an, erreicht den maximalen Abfluss aber erst nach einem sehr langsamen Anstieg im Bereich des Scheitelabflusses mit einer Dauer von 12 Stunden. Die synthetische Ganglinie kann dieses „Plateau“ allerdings nicht nachbilden. Dies resultiert in einer unrealistisch geringen Maximalbelastung und kann, je nach Zielsetzung der Modellierung, zu nicht belastbaren Ergebnissen führen.

Die Einführung eines fünften Parameters, der die Dauer eines länger andauernden Scheitels beschreibt (Scheiteldauer t_{Qs}), könnte diese Unzulänglichkeit beseitigen. Vorausgesetzt die statistische Unabhängigkeit kann zwischen der Scheiteldauer und den übrigen vier Parametern nachgewiesen werden, lässt sich durch die Einbindung dieses zusätzlichen Merkmals die Hochwassermerkmal-Simulation um eine wichtige Facette erweitern.

5 Abschließende Bewertung der Ergebnisse

Zusammenfassen lässt sich die Hochwassermerkmal-Simulation nach dem Verfahren von MUNLV (2004) als geeignetes Werkzeug zur Generierung für einfach geformte Hochwasserganglinien verwenden. Für die Abbildung komplexerer Ganglinienformen ist das Verfahren jedoch nicht geeignet. Daher besteht noch Forschungsbedarf um auch Ganglinien abbilden zu können, die relativ flach ansteigen und eine längere Scheiteldauer aufweisen.

6 Literatur

Bacchi, B., A. Brath & N. T. Kottegoda (1992): Analysis of Relationships Between Flood Peaks and Flood Volumes Based on Crossing Properties of River Flo Processes. *Water Resources Research* 28(10), S. 2773-2782.

Bender, J. (2010): Entwicklung eines stochastischen Speicherraumbewirtschaftungsmodells. Master-Arbeit. Universität Siegen. Unveröffentlicht.

Coles, S. (2001): An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values. Springer Verlag. London.

DIN 19700 (1984): Stauanlagen: Teil 10 – Gemeinsame Festlegungen, Teil 11 – Talsperren, Teil 12 – Hochwasserrückhaltebecken. Beuth Verlag GmbH. Berlin.

DIN 19700 (2004): Stauanlagen: Teil 10 – Gemeinsame Festlegungen, Teil 11 – Talsperren, Teil 12 – Hochwasserrückhaltebecken. Beuth Verlag GmbH. Berlin.

DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Heft-Nr. 251. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK). Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.

Dyck, S. (1980): Angewandte Hydrologie. Teil 1 & 2, VEB Verlag für Bauwesen. Berlin

Hawkes, P. J.; D. Gonzalez-Marco; A. Sánchez-Arcilla, P. Prinos (2008): Best practice for the estimation of extremes: A review. *Journal of Hydraulic Research*, 46-2, 324–332.

Jensen, J., C. Mudersbach, S. Müller-Navarra, I. Bork, C. Koziar & V. Renner (2006): Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, 71.

Klein, B (2009): Ermittlung von Ganglinien für die risikoorientierte Hochwasserbemessung von Talsperren. Schriftenreihe Hydrologie/Wasserwirtschaft. Ruhr-Universität Bochum.

LAWA (1997): Pegelvorschrift – Stammtext. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Bonn und Berlin: 1997.

Leichtfuss, A. & H. Lohr (1999): Die stochastisch-deterministische Generierung extremer Abflusszustände. In: Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete. Tagungsband zum Kolloquium am 4. und 5. März 1999. FG Wasserbau und Wasserwirtschaft. Universität Kaiserslautern.

Martin, H. & Pohl, R. (2008): Technische Hydromechanik 4 – Hydraulische und numerische Modelle. 2. Auflage. Huss Verlag, München.

Lohr, H. (2003): Generierung extremer Abflüsse für die Stauanlagenbemessung. Wasser und Abfall 7-8, S. 20-24.

Mudersbach, C. (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. Siegen.

MUNLV (2004): Ermittlung von Bemessungsabflüssen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen. Merkblatt, Band 46. Korrigierte Fassung von 2010. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV). Düsseldorf.