

BRUCHPUNKTE UND LANGZEITRENDS VON WASSERSTANDSMESSUNGEN IM TIDEBEREICH DER DEUTSCHEN BUCHT

Sabine Jenning¹, Hartmut Hein², Stephan Mai², Holger Schüttrumpf¹

¹Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Deutschland,
Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52056 Aachen

²Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG, Deutschland, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz

E-Mail: jenning@iww.rwth-aachen.de, hein@bafg.de, mai@bafg.de, schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Um Anpassungsstrategien an sich verändernde klimatische Bedingungen zu entwickeln, müssen Zeitreihen über ihren Beobachtungszeitraum hinaus verlängert werden. Dafür sind Trendanalysen ein wichtiges Werkzeug, um verfügbare Datensätze in die Zukunft zu extrapolieren und daraus Informationen abzuleiten. Die Qualität der Daten ist für eine zuverlässige Prognose von großer Bedeutung. Insbesondere muss beachtet werden, dass sich das Umfeld der Messanlagen im Laufe der Zeit verändert haben kann. Unterliegen diese Messanlagen Veränderungen, wirkt sich das auf die Datenreihe ebenfalls aus, sowohl bei abrupten als auch bei langsamen Veränderungen. Diese können Bruchpunkte in den Zeitreihen bilden. In dieser Arbeit werden drei verschiedene Verfahren der Bruchpunktanalyse anhand von Pegelstandsmessungen im Tidebereich der Deutschen Bucht getestet und bewertet. Anschließend werden die Auswirkungen eines Bruchpunktes auf die Abschätzung des Trends gezeigt. Diese sind nicht unerheblich, je nachdem, ob der Bruchpunkt berücksichtigt wird oder nicht.

Einleitung

Der aktuelle Einfluss des klimatischen Wandels sowie der Einfluss durch Landhebungs- und Senkungsprozesse auf die Wasserstände und die Charakteristik der Tide in der Deutschen Bucht werden aus lokalen Pegelstandsmessungen und deren Auswertungen deutlich (Wahl et al., 2011; Hein et al., 2011a; Hein et al., 2011b). Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Raten des mittleren Meeresspiegelanstieges weltweit sowie explizit in der Deutschen Bucht.

Für jede lange Zeitreihe und somit auch für tidebeeinflusste Pegelstandsmessungen besteht die Möglichkeit, dass sich die Messbedingungen mit der Zeit ändern. Einige dieser Veränderungen geschehen plötzlich, beispielsweise durch einen Austausch der Messtechnik, einer Verlegung des Pegelstandortes oder durch Korrekturen des Pegelnullpunktes. Auf der anderen Seite treten oft auch langsame und kontinuierliche Veränderungen auf. Solche Veränderungen

können auf Umweltveränderungen zurückgeführt werden, als Beispiel seien regionale Änderungen der Morphologie genannt.

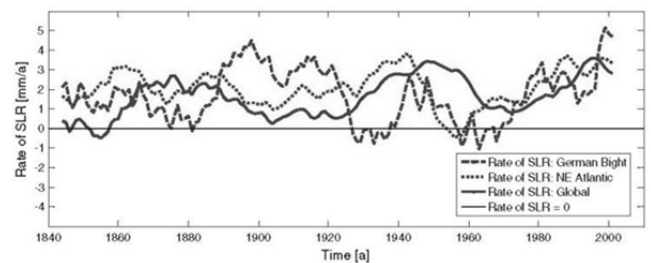


Abbildung 1: Raten des mittleren Meeresspiegelanstieges gemittelt für die Deutsche Bucht aus Wahl et al. (2011)

In der vorliegenden Untersuchung werden langfristige Veränderungen in den Charakteristiken der Tide der Wasserstraßen der südlichen Deutschen Bucht untersucht und präsentiert. Ziel der vorliegenden Analyse ist es zu zeigen, ob in den gemessenen und berechneten Zeitreihen der Tideparameter signifikante Trends enthalten sind, um die Prozesse der ablaufenden Veränderungen abzuleiten und diese besser verstehen zu können. Zum besseren Verständnis und als Informationszuwachs wird nicht nur der mittlere Meeresspiegel (vgl. Abbildung 1) betrachtet, sondern auch weitere charakteristische Parameter der Tidekurve. Eine wichtige Grundlage bei der Trenduntersuchung ist das Vorhandensein konsistenter Zeitreihen. Dabei stellt die Ermittlung von Bruchpunkten ein wichtiges Werkzeug dar. Werden solche Bruchpunkte in den Zeitreihen gefunden und eliminiert, können homogene Trends aufgestellt werden.

Datengrundlage

Für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes werden stellvertretend acht Pegel in der Deutschen Bucht analysiert. Die Pegelmessungen stammen aus den Archiven der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), die mit ihren umfangreichen, qualitätsgesicherten Zeitserien eine unverzichtbare Grundlage für die heutige und zukünftige Klimafolgenforschung bereitstellen. Zur

Anwendung kommen Zeitreihen der Tidehoch- und Tideniedrigwasserstände. Die gemessenen Werte sind qualitätsgeprüft und um den Pegelnullpunkt höhenkorrigiert (Sudau & Weiß, 2010). Die dadurch erreichte Verbesserung der Genauigkeit dieses Datensatzes zeigt Hein (2010).

Aus den Messwerten des Tidehoch- und des Tideniedrigwassers und den Angaben zu deren Höhe und deren zeitlichem Auftreten lassen sich weitere Parameter der Tide berechnen. Diese sind, definiert nach der DIN 4049-3 (1992), in Abbildung 2 dargestellt.

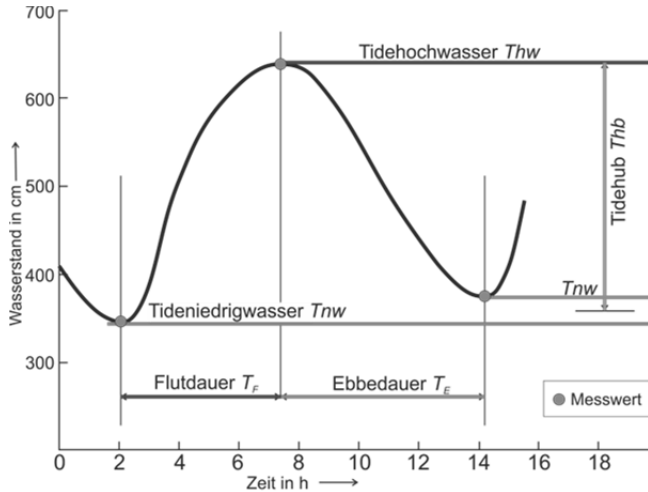


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Tidekurve nach DIN 4049-3 (1992)

Neben dem Tidehoch- (Thw) und dem Tideniedrigwasserstand (Tnw) werden weiterhin der Tidenhub (Thb) sowie die Flut- (T_F) und die Ebbedauer (T_E) untersucht. Somit kann die grundlegende Charakteristik der Tidekurve über diese 5 Parameter beschrieben werden und geht über die reine Betrachtung des mittleren Meeresspiegels hinaus.

Methoden der Bruchpunktanalyse

Es werden drei verschiedene Verfahren der Bruchpunktanalyse getestet und verglichen. Diese sind:

- der *standard normal homogeneity test* (SNHT) nach Alexandersson (1986),
- eine *nichtparametrische Variante* des SNHT (NPW) nach Reeves et al. (2006) und
- ein Ansatz basierend auf Fuzzy Logic.

Das grundlegende Prinzip der ersten beiden Verfahren ist, dass die Zeitreihen der Länge von n Werten auf den möglichen Zeitpunkt eines Bruches c anhand von Testhypothesen untersucht werden. Übersteigt eine berechnete Testgröße einen kritischen Wert, welcher meist von n und einem gewählten Signifikanzniveau abhängig ist, zeigt diese einen möglichen Bruchpunkt an. Dieses statistische Ergebnis muss anhand von Plausibilitätskontrollen belegt oder widerlegt werden.

Das erste gewählte Verfahren ist der *standard normal homogeneity test* (SNHT) nach Alexandersson (1986),

wobei die vorliegende Variante durch Reeves et al. (2006) überarbeitet wurde. Anhand von Gleichung (1) wird die Standardabweichung s_p vor (s_1) und nach (s_2) einem möglichen Bruchpunkt berechnet. Diese dient der Ermittlung der Testgröße T_c (vgl. Gleichung (2)), wobei die Mittelwerte vor (\bar{Y}_1) und nach (\bar{Y}_2) dem Bruchpunkt berücksichtigt werden. Anschließend wird das globale Maximum der Testgröße mit dem kritischen Wert T_{max}^2 verglichen und die Testhypothese angenommen oder abgelehnt (vgl. Gleichung (3)).

$$s_p = \left[\frac{(c-1)s_1^2 + (n-c-1)s_2^2}{n-2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$T_c = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2}{s_p \sqrt{c^{-1} + (n-c)^{-1}}} \quad (2)$$

$$T_{max}^2 = \max_{1 \leq c < n} T_c^2 \quad (3)$$

Das zweite Verfahren ist eine nichtparametrische Variante des SNHT, wobei nicht die Messwerte selbst, sondern deren Ränge r_t in die Analyse eingehen (NPW, benannt nach Reeves et al. (2006)). Gleichung (4) und (5) zeigen die Ermittlung der Testgröße W_c sowie die Berechnung des kritischen Wertes W_{max} .

$$W_c = 12 \frac{[\sum_{t=1}^c r_t - c(n+1)/2]^2}{c(n-c)(n+1)} \quad (4)$$

$$W_{max} = \max_{1 \leq c < n} W_c \quad (5)$$

Das dritte Verfahren einer Bruchpunktanalyse basiert auf einem Algorithmus, der einen Fuzzy Logic Ansatz beinhaltet. Dieses Verfahren wird im Laufe der Projektbearbeitung aufgestellt und weiterentwickelt. Dabei wird versucht, durch die Analyse zweier Pegel das Verhalten eines dritten Pegels vorherzusagen. Anschließend werden die berechneten Ergebnisse mit den Messwerten verglichen. Eine große Abweichung kann einen Hinweis auf einen Bruchpunkt am vorhergesagten Pegel geben.

Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

Ergebnisse Bruchpunktanalyse

Aus den Ergebnissen der Analysen werden zwei Dinge sichtbar. Zum einen werden Bruchpunkte zu unterschiedlichen Zeitpunkten an den jeweiligen Pegelstandorten detektiert, zum anderen tritt ein Ereignis in fast allen Ergebnissen der unterschiedlichen Pegel auf.

Die erste Beobachtung aus den Ergebnissen spiegelt die Veränderungen der Wasserwege durch lokale anthropogene Eingriffe wieder, wie beispielsweise Messstandortverle-

gungen. Im folgenden Abschnitt werden dazu beispielhaft einige Ergebnisse der Bruchpunktanalyse des Pegels Borkum Fischerbalje vorgestellt. Dieser befindet sich im Süden der westlichsten Ostfriesischen Insel Borkum (vgl. Abbildung 3).

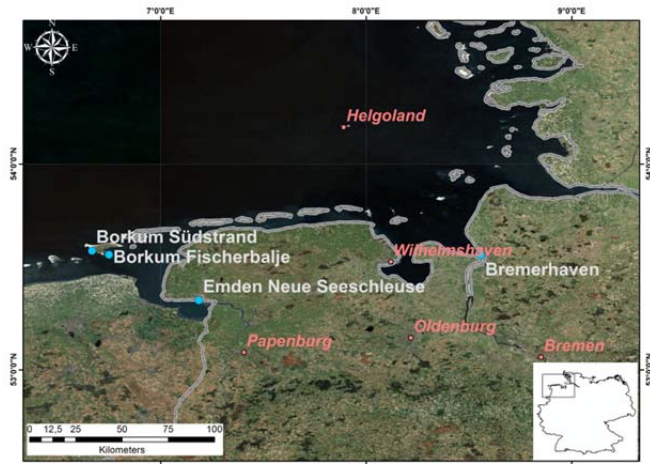


Abbildung 3: Lage der Pegel im Untersuchungsgebiet der Deutschen Bucht

Die Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der ersten beiden Bruchpunktanalyseverfahren SNHT (b) und NPW (c) für die Jahresmittelwerte (a) von Thw (blau) und Tnw (grün) für Borkum Fischerbalje im Zeitraum 1963 bis 2010. Die roten Punkte in (b) und (c) geben jeweils das Maximum der Testgrößen an, die auf einen möglichen Bruchpunkt hindeuten.

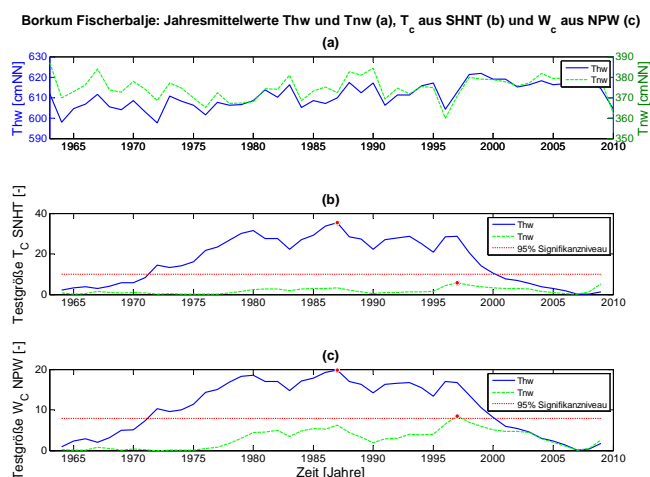


Abbildung 4: Pegel Borkum Fischerbalje, 1963 – 2010; (a) mittleres jährliches Thw (blau) und Tnw (grün); (b) Ergebnisse SNHT; (c) Ergebnisse NPW

Für beide getestete Algorithmen (SNHT und NPW) tritt das Maximum für die Zeitreihe des Tidehochwassers im Jahr 1987 auf. Da der höchste Punkt (roter Punkt) jeweils über der Signifikanzgrenze (rote Linie) liegt, deutet dies auf einen Bruchpunkt hin. Für die Zeitreihe des Tideniedrigwassers tritt das Maximum jeweils im Jahr 1997 auf. Da

der Punkt jedoch für den SNH Test unter der Signifikanzgrenze liegt, wird kein Bruchpunkt angezeigt. Für den zweiten Test NPW gilt das Ergebnis, dass in diesem Jahr zu 95 % (gewähltes Signifikanzniveau) ein Bruchpunkt in der Zeitreihe möglich ist. Jedoch ist im Pegelstammbuch für Borkum Fischerbalje kein Vermerk einer Veränderung zu diesen Zeitpunkten enthalten. Die Ursache für dieses Ergebnis muss im Rahmen der weiterführenden Plausibilitätskontrolle gefunden werden, unter der Berücksichtigung, dass die Daten bereits qualitätsgeprüft sind.

Die zweite Beobachtung aus den Ergebnissen der acht getesteten Pegel ist, dass die Testgrößen T_c und W_c in den Jahren 1979/1980 oft auch ein lokales Maximum aufweisen, teilweise ist dies auch das globale Maximum. Dies tritt bei verschiedenen Stationen verteilt über das gesamte Untersuchungsgebiet auf, so auch bei Borkum Fischerbalje (vgl. Abbildung 4 (b) und (c)). Dieses Verhalten kann als eine Veränderung der gesamten Tidecharakteristik in der Nordsee interpretiert werden, begründet beispielsweise durch den Einfluss der Nordatlantischen Oszillation (NAO). Es ist zu untersuchen, ob dieser Bruchpunkt in Studien des Ökosystems des Wattenmeers zu finden ist (Eriksson et al., 2010).

Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse der beiden gängigen Bruchpunktanalyseverfahren mit denen des Fuzzy Logic Ansatzes verglichen. Durch Fuzzy Logic werden Muster in Zeitreihen analysiert, anhand derer sich andere Zeitreihen berechnen lassen. Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt die Berechnungsergebnisse für die drei Pegel (vgl. Abbildung 3) Emden Neue Seeschleuse (EMDN), Borkum Südstrand (BORS) und Bremerhaven (BH) für Thw (a) und Tnw (b). Es werden jeweils zwei Pegel für das Antrainieren des Systems genutzt und anschließend Daten für den dritten Pegel durch Vorgabe des Zeitvektors berechnet. Das Berechnungszeitfenster verschiebt sich mit jeder Berechnungsschleife um einen Monat. Das heißt, der Trainingszeitraum wächst um einen Monat, während sich der Vorhersagezeitraum um diesen Monat verkürzt. Durch Vergleich der berechneten mit den tatsächlich gemessenen Werten lässt sich die Güte der Simulation über den Vergleich anhand der Standardabweichung prüfen. Diese Differenzen sind in Abbildung 5 dargestellt.

Zu Beginn der Graphen sind die Differenzen größer, da der Vorhersagezeitraum im Vergleich zum Trainingszeitraum sehr groß ist, das heißt, dem System weniger bekannt ist. Durch das Anwachsen des bekannten Zeitraumes mit jeder Berechnungsschleife ist zu erwarten, dass die Differenzen abnehmen. Ein großer Ausschlag der Differenz lässt hingegen eine Unregelmäßigkeit in der Datenreihe vermuten, was auf einen Bruchpunkt hindeuten kann.

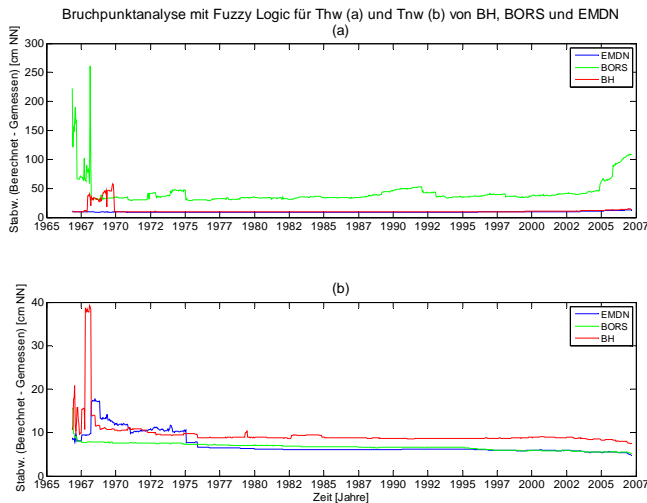


Abbildung 5: Beispielergebnis Bruchpunktanalyse mit Fuzzy Logic, Pegel Emden Neue Seeschleuse (EMDN), Borkum Südstrand (BORS) und Bremerhaven (BH) für Thw (a) und Tnw (b)

Die großen Ausschläge zu Beginn der Ergebnisdarstellung in Abbildung 5 können zum einen durch den kurzen Trainingszeitraum begründet sein, zum anderen können dies Hinweise auf Veränderungen an einem der Pegelstandorte sein. Auch das erneute Ansteigen der Abweichungen des Pegels Borkum Südstrand zum Ende des Untersuchungszeitraums (vgl. Abbildung 5 (a), grüne Linie) deutet auf Unregelmäßigkeiten am Pegel hin, was in einer anschließenden Plausibilitätskontrolle zu untersuchen ist.

Ergebnisse Trendanalyse

Treten sprunghafte Änderungen im System vor Ort auf, hat dies einen Einfluss auf die Untersuchung des Trends. Vor allem Langzeittrends unterscheiden sich signifikant, je nachdem ob ein Bruchpunkt berücksichtigt wird oder nicht. Die Abbildung 6 zeigt erneut die jährlichen Mittelwerte von Thw (a) und Tnw (b) des Pegels Borkum Fischerbalje im Zeitraum 1963 bis 2010. Die gestrichelte Linie gibt dabei den linearen Trend der Daten wieder, ohne den Bruchpunkt zu berücksichtigen. Die durchgezogene schwarze Linie zeigt hingegen den linearen Trend der am Bruchpunkt im Jahr 1987 (Thw) bzw. 1997 (Tnw) geteilten Datenreihen. Die Unterschiede der Trendbetrachtungen sind eindeutig zu erkennen. Bei der Zeitreihe des Tidehochwassers wird der Anstieg der Trendgeraden ohne Bruchpunktberücksichtigung im Vergleich zu dem Ergebnis überschätzt, wenn der Bruchpunkt beachtet wird. Bei der Zeitreihe des Tideniedrigwassers hingegen wird der Trend für den Beobachtungszeitraum nach dem Bruchpunkt (etwa ab 1997) unterschätzt, wird er nicht berücksichtigt. Diese Betrachtungen sind für eine Vorhersage über das zukünftige Verhalten eines Parameters besonders wichtig.

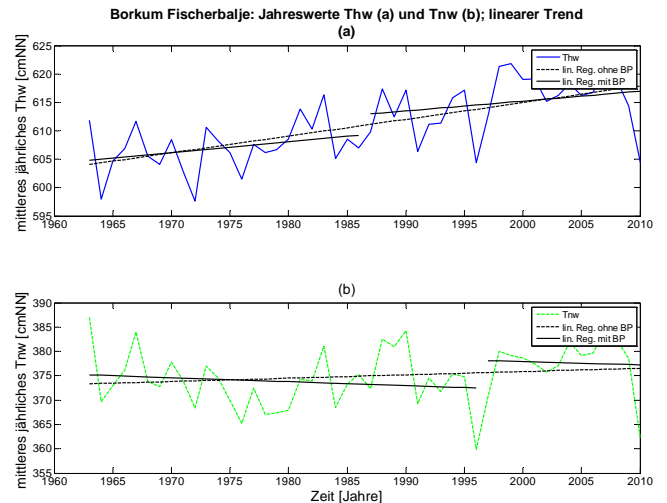


Abbildung 6: Pegel Borkum Fischerbalje, 1963 – 2010; Thw (a) und Tnw (b); Linearer Trend ohne (gestrichelte schwarze Linie) und mit (durchgezogene schwarze Linie) Berücksichtigung des Bruchpunktes (BP) 1987 (Thw) bzw. 1997 (Tnw)

Zusammenfassung

Um Anpassungsstrategien an sich verändernde klimatische Bedingungen zu entwickeln, müssen Zeitreihen über ihren Beobachtungszeitraum hinaus verlängert werden. Dies kann nur über die detaillierte Untersuchung der Vergangenheit geschehen. Eine essentielle Voraussetzung solche Prognosen zu erstellen, ist eine homogene und konsistente Datengrundlage. Bruchpunkte durch jegliche Veränderungen im System und dessen Verhalten beeinflussen diese Analysen und müssen aus diesem Grund im Zuge der Datenaufbereitung gefunden werden. Anschließend gilt es, geeignete Verfahren zu deren Berücksichtigung zu nutzen. Die gezeigten Veränderungen können insbesondere in stark lokal anthropogen modifizierten Wasserstraßen auftreten. Die Ergebnisse für den Pegel Borkum Fischerbalje als ein Beispiel tidebeeinflusster Pegelstandorte in der Deutschen Bucht verdeutlichen diesen Sachverhalt.

Danksagung

Den Rahmen der vorliegenden Untersuchung gibt die Kooperation des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Rahmen des Forschungsprogramms KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen), ein Ressortforschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).

Literaturliste

- Alexandersson, H. (1986): *A Homogeneity test applied to precipitation data*. In: Journal of Climatology, Vol. 6, No. 6, pp. 661-675.
- DIN 4049-3 (1992): Hydrologie. Teil 3: *Begriffe zur quantitativen Hydrologie*, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Eriksson, B.K., van der Heide, T., van de Koppel, J., Piersma, T., van der Veer, H.W., Olff, H. (2010): *Major changes in the ecology of the Wadden Sea: human impacts, ecosystem engineering and sediment dynamics*. Ecosystems 13: 752–764.
- Hein, H.; Weiß, R.; Barjenbruch, U.; Mai, S. (2010): *Uncertainties of tide gauges & the estimation of regional sea level rise*. Hydro 2010 Rostock – Warnemünde, Conference Proceedings.
- Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U. (2011a): *What tide gauges reveal about the future sea level*, Aqua Alta, Hamburg, Conference Proceedings.
- Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U. (2011b): *Coastal long term processes, tidal characteristics and climate change*, 5th International Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen, Conference Proceedings.
- Sudau, A., Weiß, R (2010): *Der Einfluss vertikaler Landbewegungen auf langwellige Wasserstandsänderungen*, 40. IWASA - Internationales Wasserbau-Symposium Aachen, 08. Januar 2010.
- Wahl, T.; Jensen, J.; Frank, T.; Haigh, I. (24.01.2011): *Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years*. In: Ocean Dynamics.
- Reeves, J.; Chen, J.; Wang, X. L.; Lund, R.; Lu, Q. Q. (2006): *A Review and Comparison of Changepoint Detection Techniques for Climate Data*. In: Appl.Meteor.Climatol, Vol. 46, pp. 900-915.