Die Küste, 52 (1991), 191-204

Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Wasserstandszeitreihen von deutschen Nordseepegeln*

Von Wolfgang Schönfeld und Jürgen Jensen

Zusammenfassung

Die Hauptkomponentenanalyse ist eine statistische Methode, die es gestattet, mehrere Zeitreihen gemeinsam auszuwerten und die in diesen Zeitreihen enthaltenen Informationen zu untersuchen. Weiterhin können die Größe eines gemeinsamen Signals, gemessen an der Gesamtvarianz, und die Anteile der einzelnen Zeitreihen am gemeinsamen Signal ermittelt werden. Die Hauptkomponenten selbst können als Zeitreihen angesehen und entsprechend ausgewertet werden. Dies kann, wie im vorliegenden Fall, zu einer erheblichen Verminderung des Untersuchungsaufwands führen.

Bei der Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Zeitreihen von jährlich gemittelten Scheitelwasserständen von 13 Pegeln in der Deutschen Bucht entfallen beim MThw mehr als 90 % und beim MTnw ca. 75 % der Gesamtvarianz auf die 1. Hauptkomponente. Daher wird für die Betrachtung der allgemeinen Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht nur die 1. Hauptkomponente herangezogen.

Lineare Regressionen, angewandt auf die mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse errechneten Zeitreihen, ergeben für das MThw mittlere Anstiegsraten von 0,25 cm/a (1881–1989), 0,31 cm/a (1936–1989) und 0,38 cm/a (1953–1989). Der stärkste Anstieg ist demnach in den Jahren nach 1950 zu verzeichnen. Das MTnw an der deutschen Nordseeküste sank nach diesen Berechnungen im Mittel um 0,06 cm/a (1936–1989) bis 0,07 cm/a (1953–1989). Diese Untersuchungen bestätigen weitestgehend die bisherigen Aussagen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht.

Summary

The Principal Component Analysis (PCA) is a statistical method for evaluating several time series simultaneously. It is also possible to determine the amplitude of a common signal using the total variance and the contribution of each time series to the common signal. The Principal Components can be evaluated themselves as time series. A substantial computation reduction can be achieved by means of PCA.

PCA has been applied to annually averaged time series of tidal high and low water levels of 13 tide gauges in the German Bight. The first Principal Component represents 90 % of total variance for high water times series and 75 % of total variance for low water time series. Thus only the first Principal Component has been used for investigating the overall tidal level development in the German Bight.

Linear regressions revealed mean trends of tidal high water rises of 0.25 cm/a (1881–1989), 0.31 cm/a (1936–1989) and 0.38 cm/a (1953–1989). The strongest rise occurred after 1950. The results for tidal low water showed decreasing mean trends of 0.06 cm/a (1936–1989) to 0.07 cm/a (1953–1989).

Inhalt

1. Einleitung 192
2. Darstellung der Methode 193
3. Ergebnisse der Untersuchungen 198

* Zwischenbericht zum KFKI-Projekt „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht".

3.1 Verteilung der Gesamtvarianz 199
3.2 Zeitreihen der Hauptkomponenten 200
4. Schlußbetrachtung 203
5. Schriftenverzeichnis 204

1. Einleitung

Analysen von Wasserstandszeitreihen an verschiedenen Pegeln in der Deutschen Bucht ergeben für die Wasserstandsentwicklung auf der Grundlage von jährlichen Mittelwerten folgende Aussage: Für das mittlere Tidehochwasser (MThw) ist bei allen Pegeln ein Anstieg zu verzeichnen, der sich in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts verstärkt hat. Das mittlere Tideniedrigwasser (MTnw) zeigt ein annähernd konstantes Verhalten bzw. weist seit 1950 im Mittel einen negativen Trend auf (JENSEN, 1984). Die mit linearer Regression ermittelten Trends für das MThw und MTnw an 13 Pegelstandorten an der deutschen Nordseeküste, auf Inseln und in den Ästuaren der Tideflüsse sind für verschiedene Zeiträume in Tabelle 1 (vgl. JENSEN und SCHÖNFELD, 1990) dargestellt.

Tabelle 1: Lineare Trends für verschiedene Untersuchungszeiträume an Pegeln in der Deutschen Bucht (JENSEN und SCHÖNFELD, 1990)

Pegel	MThw-Trend [cm/a]				MTnw-Trend [cm/a]		
	1971 1989 (19 a)	1953 1989 (37 a)	1936 1989 (54 a)	1881 1989 (109 a)	1971 1989 (19 a)	1953 1989 (37 a)	1936 1989 (54 a)
Borkum	0,37	0,24	0,26	–	0,38	0,10	0,12
Norderney	0,42	0,26	0,16	–	0,33	0,02	0,07
Emden	0,82	0,44	0,29	–	0,24	−0,23	−0,03
Helgoland	0,57	0,22	–	–	0,39	−0,01	–
Lt. Alte Weser	0,57	0,42	0,38	–	0,57	0,12	0,13
Wilhelmshaven	0,61	0,30	0,29	0,26	0,34	−0,03	−0,05
Bremerhaven	0,46	0,28	0,31	0,23	0,03	−0,41	−0,24
Cuxhaven	0,69	0,37	0,28	0,25	−0,16	−0,19	−0,06
Büsum	0,79	0,45	0,26	0,16	0,68	0,24	0,07
Husum	0,89	0,52	0,37	0,31	0,82	−0,03	−0,03
Wittdün	0,65	0,46	–	–	0,56	−0,03	–
Dagebüll	0,99	0,57	0,46	0,25	0,60	−0,24	−0,35
List	0,69	0,30	0,23	–	0,53	0,01	0,05

Die Entwicklung der Scheitelwasserstände führt zu einem verstärkten Anstieg des Tidehubs, während das Tidehalbwasser (T½w) in geringerem Maße als das Thw ansteigt. Das T½w entspricht zwar nicht direkt dem Mean Sea Level (MSL), da es aber einen konstanten Versatz beinhaltet (vgl. LASSEN, 1989), sind die linearen Trends des T½w mit denen des MSL identisch.

Aus Tabelle 1 geht weiterhin hervor, daß die berechneten Veränderungen sowohl in Abhängigkeit vom betrachteten Zeitraum als auch von Pegelstandort zu Pegelstandort stark variieren. So beträgt für die in Tabelle 1 untersuchten Pegelstandorte und Zeiträume der maximale Säkularanstieg des Thw 0,99 cm/a (Dagebüll, 1971–1989) und der minimale 0,16 cm/a (Norderney, 1936–1989 bzw. Büsum, 1881–1989). Beim Tnw treten ähnliche Unterschiede auf.

Die Küste, 52 (1991), 191-204

Trotz der genannten Unterschiede weisen die Wasserstandszeitreihen der Pegel an der deutschen Nordseeküste und an den Mündungen der Tideflüsse sehr viele Gemeinsamkeiten auf. Diese gemeinsamen Merkmale können mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse extrahiert und untersucht werden.

Die Hauptkomponentenanalyse (Faktorenanalyse, Eigenanalyse oder Analyse empirischer Orthogonalfunktionen) ist eine „statistische Methode zur Ableitung hypothetischer Größen aus einer Menge beobachteter Variablen" (ÜBERLA, 1971). Das Verfahren wurde am Anfang dieses Jahrhunderts entwickelt und vornehmlich in der Psychologie und in den Sozialwissenschaften angewandt. Seit Ende der 50er Jahre findet diese Methode zunehmend Einsatz auch in den Naturwissenschaften wie Meteorologie (LORENZ, 1959, SPETH und DETLEFSEN, 1979) und Geologie (AUBREY, 1979). Untersuchungen von Wasserstandszeitreihen mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse wurden u. a. von TÖRNEVIK (1977), AUBREY und EMERY (1983), NYBERG (1983) und DE VALK (1988) vorgenommen.

2. Darstellung der Methode

Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse können mehrere verschiedene Zeitreihen $y(t,x)$ – oder andere Datensätze – gemeinsam als Summe von Orthogonalfunktionen dargestellt werden.

$$y(t,x) = \sum_{n=1}^{N} a_n(t) \cdot e_n(x)$$

Die Funktionen $a_n(t)$ sind für alle Orte (x) gleich und nur von der Zeit abhängig, die Funktionen $e_n(x)$ nur von den Orten. Auf diese Weise kann die räumliche und die zeitliche Variabilität eines Datensatzes $y(t,x)$ unabhängig voneinander untersucht werden.

Die algebraischen Grundlagen der Hauptkomponentenanalyse sollen hier nur kurz beschrieben werden; eine ausführliche Beschreibung dieser Methode ist z. B. in PREISSENDORFER (1988) zu finden.

Die Meßwerte werden zunächst in einer Matrix[1] dargestellt. So sei $\mathbf{Y} = y(t,x)$ eine Matrix von Meßwerten, die an $x = 1 \ldots N$ Orten zu $t = 1 \ldots M$ Zeitpunkten gemessen und von denen die zeitlichen Mittelwerte der einzelnen Zeitreihen $\mathbf{y}(t)$ subtrahiert wurden. Aus dieser Matrix kann eine „Streumatrix" $\mathbf{S}$ berechnet werden, deren Elemente die Summen der Abweichungsquadrate sind (Varianzen bzw. Kovarianzen $\cdot$ [M − 1]):

$$\mathbf{S} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}' \qquad \mathbf{Y}' = \text{transponierte Matrix von } \mathbf{Y}$$

oder

$$s_{x,x'} = \sum_{t=1}^{M} y(t,x) \cdot y(t,x') \qquad x,x' = 1 \ldots N$$

Die Streumatrix hat die Dimension (N·N) und ist symmetrisch. Mit Hilfe der Gleichung

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{e} = l \cdot \mathbf{e}$$

können nun die Eigenwerte l und die Eigenvektoren $\mathbf{e}$ bestimmt werden. Die Matrix $\mathbf{S}$ besitzt N Eigenvektoren $\mathbf{e}_i = [e_i(1),\ldots, e_i(N)]$, $i = 1 \ldots N$. Die Eigenvektoren werden hier als „Empirische Orthogonalfunktionen" (EOF) bezeichnet: „empirisch", weil sie aus den Daten

[1] Großbuchstaben, fett gedruckt, bezeichnen Matritzen, Kleinbuchstaben, fett gedruckt, bezeichnen Vektoren.

abgeleitet wurden, und „orthogonal", weil sie räumlich unkorreliert sind (PREISSENDORFER, 1988):

$$\sum_{x=1}^{N} e_i(x) \cdot e_j(x) = \delta_{ij} \qquad i,j = 1 \ldots N$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ für } i = j \\ 0 \text{ für } i \neq j \end{cases}$$

Mit Hilfe der EOFs können die Hauptkomponenten oder Amplituden $a_i(t)$ des Datensatzes bestimmt werden:

$$a_i(t) = \sum_{x=1}^{N} y(t,x) \cdot e_i(x) / \sqrt{N} = \mathbf{Y}' \cdot \mathbf{e_i} / \sqrt{N}$$

Der Faktor $1/\sqrt{N}$ dient der Normierung. Die Funktionen $a_i(t)$ können nun selbst als Zeitreihen angesehen werden. Sie sind zeitlich unkorreliert und enthalten Informationen über die Varianz des Datensatzes entlang den Richtungen $\mathbf{e_i}$:

$$\sum_{t=1}^{M} a_i(t) \cdot a_j(t) = l_i/N \cdot \delta_{ij}$$

l_i sind die Eigenwerte der Matrix **S**. Die Summe der Eigenwerte ist gleich der Summe der Abweichungsquadrate.

Mit den Hauptkomponenten und empirischen Orthogonalfunktionen kann nun der ursprüngliche Datensatz wieder rekonstruiert bzw. können die Daten als Summe von Orthogonalfunktionen dargestellt werden:

$$y(t,x) = \sum_{i=1}^{N} a_i(t) \cdot e_i(x) \cdot \sqrt{N}$$

Wird diese Summation nur bis $K < N$ durchgeführt, so enthält der rekonstruierte Datensatz $\tilde{y}(t,x)$ den Anteil der Varianz des ursprünglichen Datensatzes, der den ersten K Eigenwerten entspricht.

Die Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Wasserstands-Zeitreihen soll nun anhand eines kleinen Zahlenbeispiels näher erläutert werden. Für dieses Beispiel wurden die jährlichen MThw der Pegel Helgoland, Cuxhaven und Dagebüll für den Zeitraum von 1975 bis 1985 ausgewählt. In Abb. 1a, b, c sind zunächst die Zeitreihen eines jeden Pegels einzeln als Abweichung der jährlichen MThw vom Mittelwert dargestellt.

Die Matrix **Y** der Eingangsdaten für die Hauptkomponentenanalyse hat dann folgendes Aussehen:

Jahr	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
HEL	2,1	−3,9	−1,9	2,1	−5,9	0,1	2,1	4,1	10,1	−4,9	−4,9
CUX	1,5	−9,5	−7,5	2,5	−6,5	2,5	7,5	6,5	11,5	−2,5	−6,5
DAG	−0,1	−9,1	−7,1	−0,1	−9,1	0,9	4,9	4,9	14,9	0,9	−1,1

(Abweichungen vom Mittelwert in cm)

Mittelwerte:

HEL : 112,9 cm
CUX : 148,5 cm
DAG : 130,1 cm

Die Küste, 52 (1991), 191-204

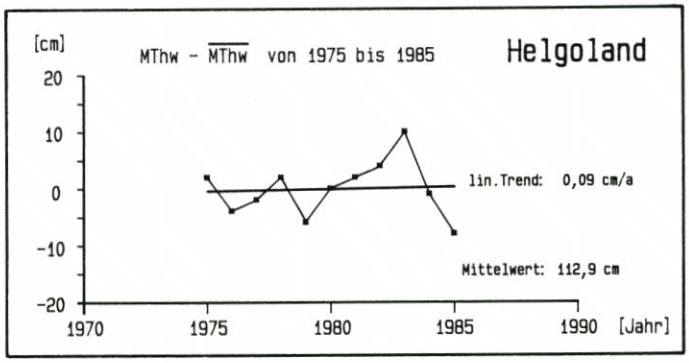

Abb. 1a: Abweichung des MThw vom Mittelwert am Pegel Helgoland von 1975 bis 1985

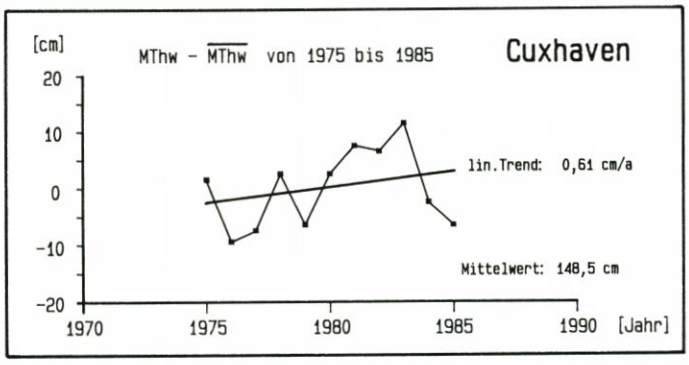

Abb. 1b: Abweichung des MThw vom Mittelwert am Pegel Cuxhaven von 1975 bis 1985

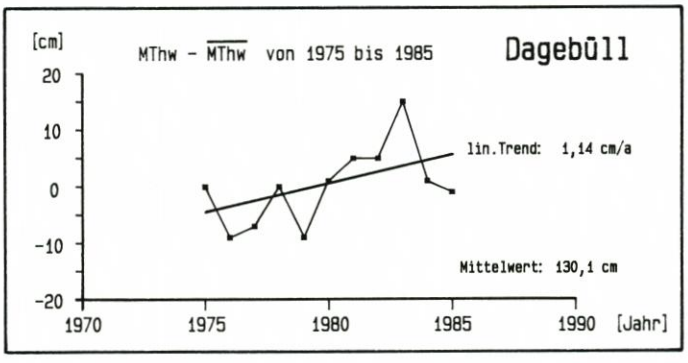

Abb. 1c: Abweichung des MThw vom Mittelwert am Pegel Dagebüll von 1975 bis 1985

Da die Mittelwerte bereits subtrahiert worden sind, kann die Streumatrix **S** durch $\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}'$ berechnet werden:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 482{,}7 & 445{,}5 & 300{,}9 \\ 445{,}5 & 488{,}9 & 284{,}2 \\ 300{,}9 & 284{,}2 & 233{,}6 \end{bmatrix}$$

Von dieser Matrix werden nun die Eigenwerte l und die Eigenvektoren **e** berechnet:

Eigenwerte: 1123,68 52,84 28,76 Σ 1205,27

Eigenvektoren: $\begin{bmatrix} 0{,}643 \\ 0{,}640 \\ 0{,}422 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} -0{,}273 \\ 0{,}705 \\ -0{,}655 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} 0{,}716 \\ -0{,}306 \\ -0{,}628 \end{bmatrix}$

In der Hauptdiagonalen der Matrix **S** stehen die Summen der Abweichungsquadrate (= Varianzen · [M − 1]). Die Summe der Varianzen, also die Gesamtvarianz ($\tilde{\sigma}^2$), ist gleich der Summe der Eigenwerte. Der durch die jeweilige Hauptkomponente „erklärte" Anteil der Gesamtvarianz entspricht dem Anteil des dazugehörigen Eigenwertes an der Summe der Eigenwerte [$l_i/\Sigma l_i = \tilde{\sigma}^2(i)/\sigma^2$]. Im vorliegenden Beispiel enthält die 1. Hauptkomponente 93,0 %, die 2. Hauptkomponente 4,6 % und die 3. Hauptkomponente 2,3 % der Gesamtvarianz (Tabelle 2).

Tabelle 2: Hauptkomponenten der Pegelzeitreihen Helgoland, Cuxhaven und Dagebüll

Jahr	1. HK	2. HK	3. HK
1975	1,07	−1,10	−0,13
1976	−7,79	−0,77	−0,92
1977	−5,82	−1,02	−1,17
1978	1,44	−1,26	0,27
1979	−7,16	−0,48	1,04
1980	1,32	−0,09	0,82
1981	5,14	−0,01	1,46
1982	5,26	−0,61	0,32
1983	12,26	0,40	−1,54
1984	−1,74	2,57	0,57
1985	−3,97	2,39	−0,73

Die Hauptkomponenten erhält man durch die Matrixmultiplikation $\mathbf{Y}' \cdot \mathbf{e}_i$. Die Rangfolge richtet sich nach der Größe der Eigenwerte.

Die Hauptkomponenten können nun als Zeitreihen des gemeinsamen Signals, das in diesen drei Pegeln enthalten ist, interpretiert werden (Abb. 2).

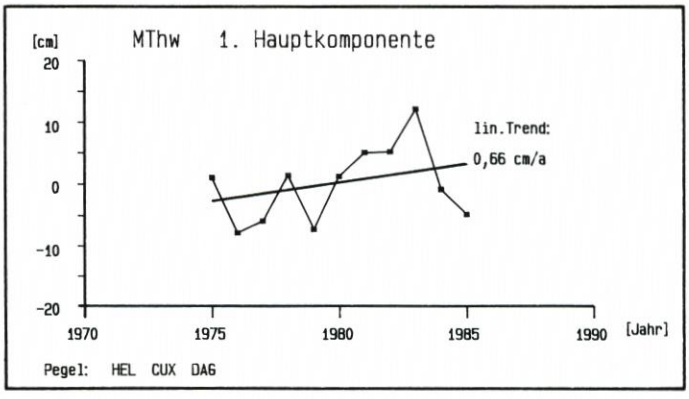

Abb. 2: Zeitreihe der 1. Hauptkomponente

Die Küste, 52 (1991), 191-204

Die 1. Hauptkomponente repräsentiert den größten Anteil an der Gesamtvarianz, die 2. Hauptkomponente den größten Anteil an der verbleibenden Varianz usw. . . . Die Zeitreihen sind untereinander unkorreliert und besitzen jeweils die maximale (Rest-)Varianz.

Für die Interpretation soll hier als Vergleichsmaßstab die Steigung der Regressionsgeraden dienen, die den linearen Trend über den betrachteten Zeitraum beschreibt. Danach ergibt sich für die 1. Hauptkomponente ein mittlerer Anstieg des MThw von 0,66 cm/a. Demgegenüber besitzen die einzelnen Zeitreihen Anstiege von 0,61 cm/a in Cuxhaven, 1,14 cm/a in Dagebüll und 0,09 cm/a auf Helgoland. Die Verteilung des Signals der 1. Hauptkomponente auf die einzelnen Pegel (Abb. 3) zeigt, daß der Anteil des Pegels Helgoland geringer ist als die Anteile der anderen beiden Pegel. Dies erklärt einen Teil der Differenz zwischen der 1. Hauptkomponente und der Zeitreihe des Pegels Helgoland. Ein weiterer Teil der Differenz kann durch die Hinzunahme der 2. Hauptkomponente (Abb. 4) erklärt werden. Diese hat einen Trend von 0,34 cm/a. Die räumliche Verteilung (Abb. 5) zeigt einen großen negativen Beitrag des Pegels Helgoland und einen positiven Beitrag des Pegels Dagebüll. Für Helgoland ergibt der negative Beitrag der 2. Hauptkomponente eine Verminderung des Anstiegs der 1. Hauptkomponente, und für Dagebüll bewirkt der positive Beitrag eine Erhöhung des Anstiegs der 1. Hauptkomponente. Der Rest der Varianz wird durch die 3. Hauptkomponente erklärt, so daß auf diese Weise die ursprünglichen Daten rekonstruiert werden können.

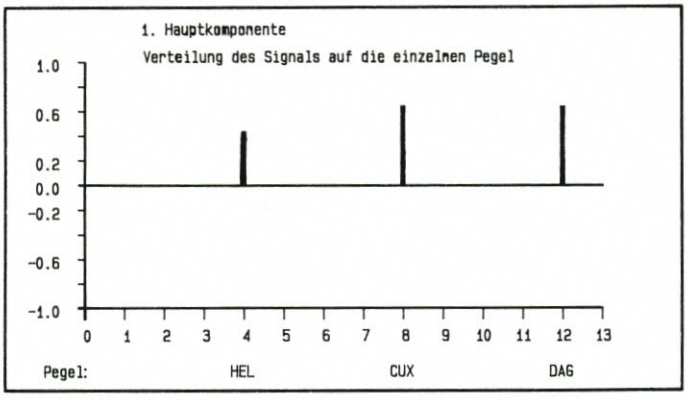

Abb. 3: Verteilung des Signals der 1. Hauptkomponente auf die einzelnen Pegel

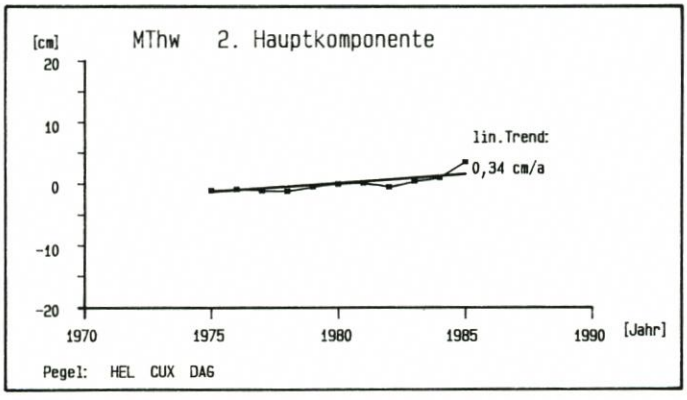

Abb. 4: Zeitreihe der 2. Hauptkomponente

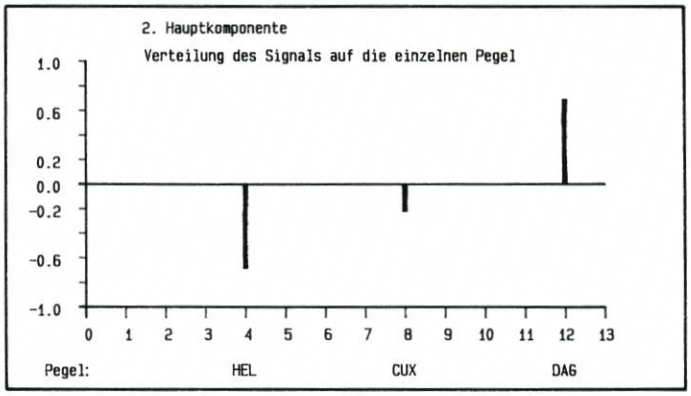

Abb. 5: Verteilung des Signals der 2. Hauptkomponente auf die einzelnen Pegel

3. Ergebnisse der Untersuchungen

Diesen Untersuchungen liegen lückenlose Zeitreihen der Jahresmittelwerte des MThw und des MTnw von 13 Pegeln an der deutschen Nordseeküste zugrunde. Die Berechnung der Jahresmittelwerte erfolgte aus korrigierten Zeitreihen halbtägiger Scheitelwerte aus dem KFKI-Projekt „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht" (vgl. JENSEN, MÜGGE U. VISSCHER, 1988). Zur Vergrößerung der Datenbasis wurden weitere Jahresmittelwerte aus JENSEN (1984) herangezogen. Insgesamt bilden die in Tabelle 3 dargestellten Pegel und Zeiträume die Grundlage der in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen. Die Jahresangaben beziehen sich auf „Abflußjahre" (vom 1. 11. des Vorjahres bis 31. 10.).

Tabelle 3: Pegel und Zeiträume, für die lückenlose Zeitreihen der Jahresmittelwerte vorliegen

Pegel	(Kurzbez.)	MThw-Zeitreihe	MTnw-Zeitreihe
Borkum	(BOR)	1931–1989	1931–1989
Norderney	(NOR)	1891–1989	1891–1989
Emden	(EMD)	1901–1989	1901–1989
Helgoland	(HEL)	1953–1989	1953–1989
Lt. Alte Weser	(LTW)	1901–1989	1901–1989
Wilhelmshaven	(WIL)	1873–1989	1901–1989
Bremerhaven	(BRV)	1881–1989	1881–1989
Cuxhaven	(CUX)	1855–1989	1855–1989
Büsum	(BUE)	1871–1989	1931–1989
Husum	(HUS)	1868–1989	1906–1989
Wittdün	(WIT)	1952–1989	1952–1989
Dagebüll	(DAG)	1874–1989	1936–1989
List	(LIS)	1931–1989	1931–1989

Wegen der unterschiedlichen Zeiträume, für die lückenlose Wasserstands-Zeitreihen vorliegen, wurde die Hauptkomponentenanalyse auf drei verschiedene Zeiträume angewandt. In die erste Auswertung wurden alle verfügbaren Pegelzeitreihen mit einbezogen. Da die Wasserstandsdaten des Pegels Helgoland erst seit 1953 vorliegen, beschränkt sich dieser Zeitraum auf die 37 Jahre von 1953 bis 1989. Eine Auswertung über einen Zeitraum von 54

Die Küste, 52 (1991), 191-204

Jahren (1936 bis 1989) kann durchgeführt werden, wenn die Pegel Helgoland und Wittdün nicht in die Analyse mit einbezogen werden.

Schließlich wurde die Hauptkomponentenanalyse noch auf eine lange Zeitreihe von 109 Jahren, beginnend im Jahre 1881, angewandt. Hier wurde nur das MThw der Pegel Wilhelmshaven, Bremerhaven, Cuxhaven, Büsum, Husum und Dagebüll betrachtet. Darüber hinaus wurden in einer weiteren Hauptkomponentenanalyse die niedersächsischen Pegel einschließlich Bremerhaven und die schleswig-holsteinischen Pegel für die Zeiträume von 1953 bis 1989 und von 1936 bis 1989 getrennt untersucht.

Die Länge der Untersuchungszeiträume entspricht mit 37, 54 und 109 Jahren in etwa einem Vielfachen von 18,6 Jahren, so daß die durchgeführten Trendberechnungen durch diesen langperiodischen Anteil des astronomischen Gezeitenpotentials (Nodaltide) nicht bzw. nur sehr gering beeinflußt werden.

3.1 Verteilung der Gesamtvarianz

Wie in Kap. 2 dargestellt, gibt eine Betrachtung der Eigenwerte und der Eigenvektoren Aufschluß darüber, welchen Anteil die einzelnen Hauptkomponenten an der gesamten Varianz des Eingangsdatensatzes repräsentieren und wie diese Varianz auf die Pegel verteilt ist.

Die Summe der Eigenwerte der Streumatrix ist gleich der Gesamtvarianz aller in die Hauptkomponentenanalyse eingehenden Zeitreihen. Somit entspricht die Größe eines jeden Eigenwertes dem Anteil an der Gesamtvarianz, der in der dazugehörigen Hauptkomponente enthalten ist. Die prozentualen Anteile der ersten drei Eigenwerte, bezogen auf die Gesamtvarianz, sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Anteile der Hauptkomponenten an der Gesamtvarianz für die untersuchten Zeiträume

Zeitraum	Hauptkomponente	MThw Varianzanteil	MTnw Varianzanteil
37 Jahre (1953–1989)	1	92,8 %	78,8 %
	2	2,9 %	10,5 %
	3	1,2 %	5,1 %
54 Jahre (1936–1989)	1	93,0 %	76,0 %
	2	2,6 %	10,9 %
	3	1,3 %	5,3 %
109 Jahre (1881–1989)	1	94,5 %	–
	2	2,0 %	–
	3	1,4 %	–

Der 1. Eigenwert besitzt den größten Anteil an der Gesamtvarianz. Somit repräsentiert auch die 1. Hauptkomponente einen entsprechenden Teil des bei allen Pegeln gemeinsam vorhandenen Signals. Beim MThw ist der prozentuale Anteil des 1. Eigenwertes größer als beim MTnw, d. h., das gemeinsame Gezeitensignal ist beim Tidehochwasser stärker ausgeprägt. Der geringere Anteil beim Tideniedrigwasser ist dadurch zu erklären, daß hier regionale Effekte der einzelnen Pegel in den Zeitreihen stärker hervortreten (vgl. SIEFERT, 1982). In den höheren Hauptkomponenten ist die restliche Varianz enthalten, die auf regionale Besonderheiten an den Pegelstandorten zurückzuführen ist.

Die Eigenvektoren enthalten Informationen über die Anteile der einzelnen Pegel am Signal der Hauptkomponenten. Der Beitrag des 1. Eigenvektors ist für alle betrachteten Zeiträume bei allen Pegeln positiv und von gleicher Größenordnung. Dies zeigt, daß alle Pegel etwa zu gleichen Teilen in die 1. Hauptkomponente eingehen (Abb. 6).

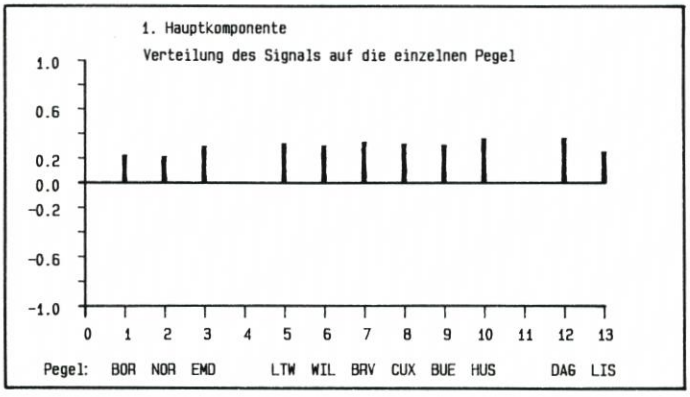

Abb. 6: Anteile der einzelnen Pegel am Signal der 1. Hauptkomponente des MThw (Zeitreihe von 1936 bis 1989)

Beim MTnw ist die räumliche Verteilung nicht so gleichmäßig wie beim MThw. Wie auch schon bei der Betrachtung der Eigenwerte zu erkennen war, spiegelt sich hier der größere Anteil des Gezeitensignals im MThw wider. Die Eigenvektoren der höheren Hauptkomponenten sind sowohl im Betrag als auch im Vorzeichen uneinheitlich. Diese Hauptkomponenten repräsentieren in erster Linie lokale Effekte an den einzelnen Pegeln. Im folgenden wird daher für die Betrachtung der allgemeinen Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht nur die 1. Hauptkomponente herangezogen.

3.2 Zeitreihen der Hauptkomponenten

Die Zeitreihen der 1. Hauptkomponente zeigen das gemeinsame Signal, das in allen Pegelzeitreihen enthalten ist. Für den 54jährigen Zeitraum (1936–1989) sind diese Zeitreihen in den Abb. 7a und 7b für das MThw und MTnw dargestellt. Jahre mit extremen Wasserständen, wie z. B. 1947 und 1983, sind in der 1. Hauptkomponente gut zu erkennen. Neben den Zeitreihen sind auch die Regressionsgeraden eingezeichnet; sie geben den linearen Trend der Wasserstandsänderungen über den betrachteten Zeitraum wieder.

In Tabelle 5 sind die Trends (Regressionskoeffizienten) der 1. Hauptkomponenten für alle untersuchten Zeiträume wiedergegeben.

Die Trends des MThw weisen eine deutliche Abhängigkeit vom betrachteten Zeitraum auf. Die am weitesten zurückreichende Zeitreihe (1881–1989) beinhaltet den geringsten und die kürzeste Zeitreihe (1953–1989) den größten Anstieg. Die Trends der 1. Hauptkomponente des MTnw ergeben bei einem Vergleich der 37jährigen mit der 54jährigen Zeitreihe keine signifikanten Veränderungen.

Die Trends der 1. Hauptkomponenten für das MThw stehen im Einklang mit dem von mehreren Autoren (vgl. Siefert, 1982, Führböter und Jensen, 1985) festgestellten beschleunigten Anstieg des MThw in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts. Zur Prüfung dieses

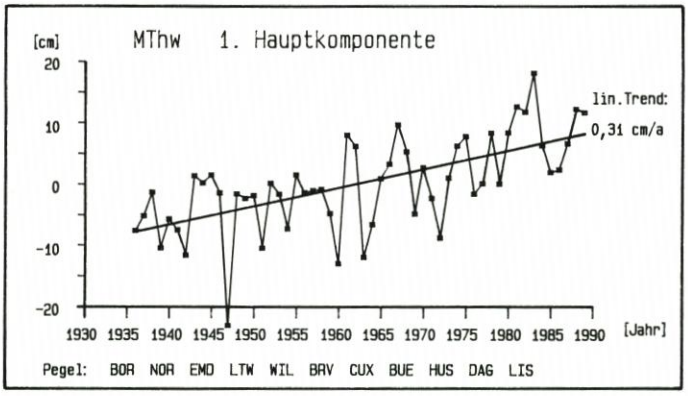

Abb. 7a: Zeitreihe der 1. Hauptkomponente des MThw von 11 Pegeln über 54 Jahre (1936–1989)

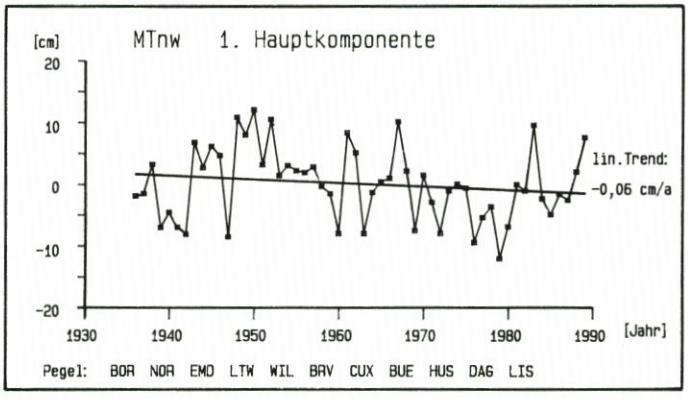

Abb. 7b: Zeitreihe der 1. Hauptkomponente des MTnw von 11 Pegeln über 54 Jahre (1936–1989)

Tabelle 5: Steigung der Ausgleichsgeraden (linearer Trend) der 1. Hauptkomponente

Zeitraum	MThw [cm/a]	MTnw [cm/a]
37 Jahre (1953–1989)	0,38	– 0,07
54 Jahre (1936–1989)	0,31	– 0,06
109 Jahre (1881–1989)	0,25	–

Phänomens wurde die 109jährige Zeitreihe für das MThw in zwei Teilzeitreihen von 1881–1950 und von 1950–1989 aufgeteilt. Die 1. Hauptkomponente dieser Teilzeitreihen zeigt vor 1950 einen Trend von 0,22 cm/a, nach 1950 erreicht der mittlere Anstieg fast den doppelten Wert, für den Zeitraum von 1950 bis 1989 wurden 0,40 cm/a errechnet.

Für einen weiteren Vergleich wurden MThw-Zeitreihen der Mittelwerte von bis zu 10 Pegeln herangezogen (Jensen, 1984, Führböter, 1986). In Abb. 8 ist die Zeitreihe der Mittelwerte, beginnend 1855, und in Abb. 9 die der 1. Hauptkomponente von 6 Pegeln seit 1881 dargestellt. Für die 25 Jahre von 1959 bis 1983 ermittelten Jensen (1984) und Führböter (1986) einen Anstieg des MThw von 16,0 cm/25a und für das MTnw ein Absinken von

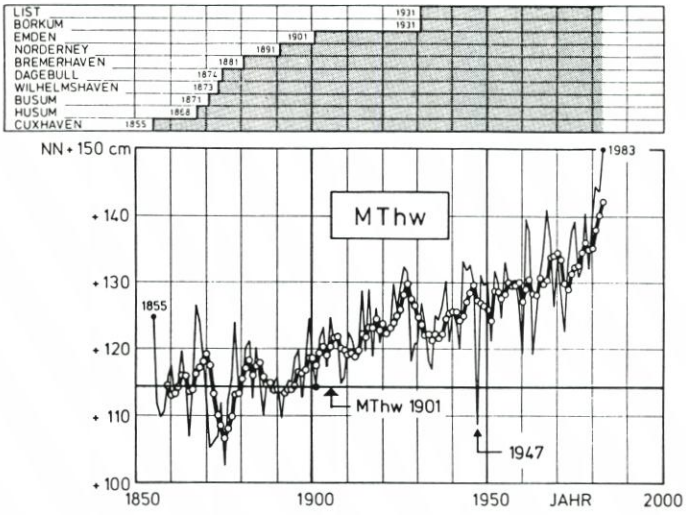

Abb. 8: Jährliche und fünfjährige MThw an der deutschen Nordseeküste als Mittel aus bis zu 10 Pegelstationen (FÜHRBÖTER, 1986)

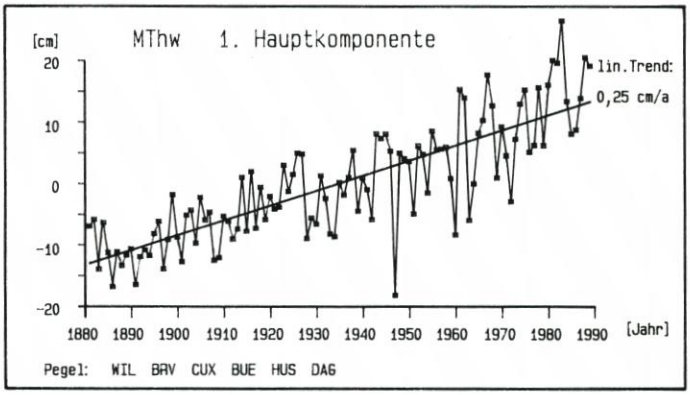

Abb. 9: Zeitreihe der 1. Hauptkomponente des MThw von 6 Pegeln über 109 Jahre (1881–1989)

3,0 cm/25a. Die 1. Hauptkomponente einer entsprechenden Zeitreihe ergibt fast identische Ergebnisse, und zwar 15,5 cm/25a für das MThw und −3,0 cm/25a für das MTnw. Auch dieser Vergleich zeigt die große Abhängigkeit der Trends vom Untersuchungszeitraum.

Auffallende Ergebnisse liefert die Gegenüberstellung der Trends in den Hauptkomponenten der niedersächsischen Pegel mit Bremerhaven und der schleswig-holsteinischen Nordseepegel für die beiden Zeiträume von 37 und 54 Jahren (Tabelle 6). Der Anstieg des MThw ist danach an der schleswig-holsteinischen Westküste durchweg größer als an der niedersächsischen Nordseeküste. Auch die Zunahme dieses Anstiegs in der 37jährigen Zeitreihe ist an den schleswig-holsteinischen Pegeln größer. Völlig anders verlaufen die Trends des MTnw. Während über den Zeitraum von 54 Jahren ein stärkeres Absinken des MTnw an den schleswig-holsteinischen Pegeln zu verzeichnen ist, ist es bei der kürzeren Zeitreihe genau umgekehrt. Für den Zeitraum von 1953 bis 1989 ist das Absinken des MTnw an den niedersächsischen Pegeln größer.

Die Küste, 52 (1991), 191-204

Tabelle 6: Vergleich der Trends der 1. Hauptkomponente der niedersächsischen und der schleswig-holsteinischen Pegel

Zeitraum	Niedersachsen		Schleswig-Holstein	
	MThw [cm/a]	MTnw [cm/a]	MThw [cm/a]	MTnw [cm/a]
37 Jahre (1953–1989)	0,33	−0,12	0,46	−0,03
54 Jahre (1936–1989)	0,29	−0,02	0,34	−0,13

Weiterhin zeigt eine Betrachtung der Eigenwerte, daß das gemeinsame Signal an den Pegeln an der niedersächsischen Küste schwächer ist als bei den schleswig-holsteinischen Pegeln. Dies läßt vermuten, daß vor der niedersächsischen Küste regionale Effekte eine größere Rolle spielen als vor der schleswig-holsteinischen Westküste.

4. Schlußbetrachtung

Die Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht wird beeinflußt durch astronomisch bedingte periodische Schwankungen, einen langfristigen Trend und einen stochastischen Anteil.

Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse bestätigen im wesentlichen die von mehreren Autoren dargestellte langfristige Entwicklung der Wasserstände in der Deutschen Bucht. Für das MThw ist bei allen Pegeln ein Anstieg zu verzeichnen, der sich in den letzten Jahrzehnten erheblich verstärkt hat. Das MTnw weist, nachdem es in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zunächst leicht absank, in den vergangenen 19 Jahren einen positiven Trend auf. Die bisherige Entwicklung könnte mit diesem Hinweis auf ein Ansteigen des MTnw jedoch eine Veränderung erfahren, die zu einem Anstieg des MSL führt. Die Entwicklung der Scheitelwasserstände führte nach 1950 zu einer starken Zunahme des Tidehubs. Das Tidehalbwasser, als Approximation für den mittleren Meeresspiegel, steigt in geringerem Maße als das MThw. Es bleibt allerdings abzuwarten, inwieweit sich die beträchtlichen Änderungen, die innerhalb der letzten Jahrzehnte stattgefunden haben, fortsetzen.

Neben globalen Aussagen zur Wasserstandsentwicklung in einem bestimmten Seegebiet, wie sie mit der Hauptkomponentenanalyse oder durch Mittelbildung getroffen werden können, sind Untersuchungen zu lokalen Effekten, wie z. B. Untersuchungen der Wasserstandsentwicklung in den Tideflüssen und Ästuaren, von großer Bedeutung.

Weitere genaue Beobachtungen und Analysen der Wasserstände sind gerade in Hinblick auf die Auswirkungen von möglichen Klimaveränderungen dringend notwendig. Dies betrifft sowohl die kontinuierliche Fortschreibung und Kontrolle der Wasserstands-Zeitreihen als auch die Untersuchung von historischen Daten.

Diese Untersuchung wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht" des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) durchgeführt. Das Projekt wird vom Bundesminister für Forschung und Technologie unter dem Förderzeichen MTK 0338 gefördert.

5. Schriftenverzeichnis

AUBREY, D. G.: Seasonal Patterns of Onshore/Offshore Sediment Movement. Journal of Geophysical Research, Vol. 84, No. C10, 1979.

AUBREY, D. G. and EMERY, K. O.: Eigenanalysis of recent United States Sea levels. Continental Shelf Research, Vol. 2, No. 1, 1983.

FÜHRBÖTER, A.: Veränderungen des Säkularanstiegs an der deutschen Nordseeküste. Wasser und Boden, 9, 1986.

FÜHRBÖTER, A. u. JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 42, 1985.

JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. d. Leichtweiss-Instituts f. Wasserbau der TU Braunschweig, H. 83, 1984.

JENSEN, J., MÜGGE, H. E. u. VISSCHER, G.: Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 47, 1988.

LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südlichen Nordsee. Die Küste, H. 50, 1989.

LORENZ, E. N.: Prospects for Statistical Weather Forecasting; Final Report, Statistical Forecasting Project, Dpt. of Meteorol., Mass. Inst. of Tech., Boston, 1959.

NYBERG, L.: Sea Level Forecasts with an EOF Model. In: Sündermann, J., Lenz, W. (eds.), North Sea Dynamics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1983.

PREISSENDORFER, R. W.: Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography. Elsevier, Amsterdam, New York, 1988.

SIEFERT, W.: Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen. Die Küste, H. 37, 1982.

SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. Die Küste, H. 42, 1985.

SPETH, P. and DETLEFSEN, H.: Empirical Orthogonal Functions of Sea Level Pressure and Sea Surface Temperatures for the Upwelling Areas off Northwest Africa. DHZ 32, H. 4., 1979.

TÖRNEVIK, H.: Application of EOF to sea level forecasting. E.C.M.W.F., Workshop on the use of Empirical Orthogonal functions in Meteorology, 1977.

ÜBERLA, K.: Faktorenanalyse. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971.

DE VALK, C.: Hoofdkomponenten-analyse van meetreeksen. Waterloopkundig laboratorium, H. 535, 1988.