

Interpretation von Wasserstandsänderungen in der Deutschen Bucht auf der Basis der Ergebnisse eines KFKI-Projektes

Von HORST LASSEN

Zusammenfassung

Die vorgestellte Modellerweiterung zur Tidebetrachtung in der südöstlichen Nordsee soll die Bedeutung des Pegels Helgoland aufgrund der geographischen Lage in der Deutschen Bucht gegenüber den Küstenpegeln hervorheben, da hier im freien Meer im Gegensatz zum Küstenbereich eine große Zahl von Einflußfaktoren auf den Tideablauf fehlen. Eben diese besonderen örtlichen Einwirkungen auf die Gezeiten in der Küstenregion ermöglichen hier keinerlei eingehende Interpretationen oder Rückschlüsse auf künftige Entwicklungen des mittleren Meeresspiegels (MSL). Daher gehen weitere Überlegungen von der Maxime aus, die Entwicklung der Helgoländer Wasserstände denen der Küstenpegel gegenüberzustellen. Grundlage dieser Bearbeitungsstrategie sind die auf NN beschickten Helgoländer Wasserstände ($HN = NN + 26 \text{ cm}$) mit Ableitung jährlicher Meeresspiegelhöhen sowie die Bestimmung jährlicher Meeresspiegelhöhen für weitere Küstenpegel, um aus diesen säkulare Trendrichtungen des MSL mit einfach linearen Regressionen abzuleiten.

Die Analyse säkularer Schätzwerte zum MSL-Anstieg zeigt, daß der Helgoländer MSL-Trend mit Ausnahme des Außenweser-Bereiches teilweise um 30 % bis 50 % kleiner ist als in der Küstenregion. Eine weitere detaillierte Betrachtung zum MSL-Trend läßt erkennen, daß die Resultate von den zur Auswertung herangezogenen Ausgangsdaten MThw oder MSL signifikant beeinflußt werden. So liefern MSL-Regressionsfunktionen – erstellt auf MThw-Basis – einen wesentlich größeren MSL-Trend als jene auf MSL-Basis. Dies hat aufgrund des zuvor geschilderten Sachverhalts zur Folge, daß es schwierig wird, Größenordnungen vorliegender MSL-Prognosen, die auf MThw-Basis ermittelt sind, als repräsentativ anzusehen.

Inhalt

1. Einleitung und Problemstellung	122
2. Mittlerer Meeresspiegel (MSL)	122
3. k-Faktor	124
4. Ergänzung fehlender Wasserstände	125
5. Pegel Helgoland	127
5.1 Helgoländer – PN (HN)	127
5.2 Helgoländer k-Faktor und MSL	128
5.3 Ergebnisse	128
6. Weitere Pegel	129
7. Interpretation	131
8. Danksagung	134
9. Schriftenverzeichnis	134

1. Einleitung und Problemstellung

Bei Wasserstandsvergleichen stößt man auf die Schwierigkeit, daß es keine Qualitätsmerkmale für gemessene Wasserstände gibt. Die erreichbare Genauigkeit ist eine Funktion zusätzlicher Parameter wie Dichte, Aufzeichnungsart, Registriergenauigkeit und Nivellementsausführung zur PN-Bestimmung sowie der PN-Fortführung. Es kann daher nicht immer von einer konstanten Meßgenauigkeit für Wasserstände über alle Epochen ausgegangen werden. Der herkömmliche Verfahrensablauf säkularer Gezeitenanalysen ist inflexibel. Es besteht große Abhängigkeit zwischen Art und Weise, wie Daten für die Berechnung aufbereitet werden, dem verwendeten Rechenprogramm und der Auslegung. Änderungen im Datenformat bringen unweigerlich differente Trendanalysen mit sich. Mit den steigenden Anforderungen an Feinstrukturen unterschiedlicher Wasserstandsentwicklungen im Bereich der südöstlichen Nordsee liegt der Gedanke nahe, den mittleren Meeresspiegel (MSL), abgeleitet aus mittleren Tiden, und den Pegel Helgoland als Meßstation der freien See in diese Betrachtungen einzubeziehen. Zur Demonstration der Tideentwicklung im Bereich der südöstlichen Nordsee ist der Pegel Helgoland als Bezugsstation für Wasserstände der Küstenpegel Cuxhaven, Wilhelmshaven, Norderney, Roter Sand/Alte Weser, Bremerhaven, Husum, Büsum, Dagebüll, Wittdün und List (Abb. 1) der geeigneteren Pegel, weil die Gezeiten hier nicht – wie im Küstenbereich – durch die Wirkung einer großen Zahl von Faktoren auf den Tideablauf – u. a. die Topographie des Küstenvorfeldes – überlagert werden.

2. Mittlerer Meeresspiegel (MSL)

Eine Definition des MSL gibt das Symposium für internationale Küstengeodäsie 1970. Danach ist die ruhende, d. h. die von allen astronomischen und meteorologischen Störungen befreite Meeresoberfläche angenähert (bis auf quasikonstante Effekte, etwa durch Strömungen) eine Niveauläche des Schwerkraftpotentials (Geoid) und wird als Referenzfläche für geodätische Höhen benutzt. Nach DIN 4049, 1. Teil, wird der Wasserstand der waagerechten Schwerlinie einer mittleren Tidekurve als Tide-Mittelwasserstand (MTmw) bezeichnet, wobei für mittleres Tide-Mittelwasser besser die internationale Bezeichnung „mittlerer Meeresspiegel“ (Mean Sea Level) verwendet werden sollte (Abb. 2).

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bestimmt MSL aus Jahreswasserständen. Dazu werden stündliche Wasserstände des Jahres zusammengefaßt und hieraus ein repräsentatives MSL des betreffenden Pegelortes abgeleitet. Diese Methode erfordert eine geschlossene Aufzeichnungsreihe. Das Mittel entspricht den von periodischen – im wesentlichen die der M2- und S2-Gezeit – befreiten Wasserständen und damit dem MSL. Weitere Gezeitenkräfte haben auf die MSL-Höhe nur eine relativ kleine Wirkung und können daher vernachlässigt werden, zumal die Methoden zur Bestimmung dieser periodischen und zeitlichen Störungen im Gezeitenablauf teilweise recht mühsam und nicht genügend genau sind, um deren absolute Auswirkung zu erkennen bzw. abzuschätzen. Ohne Beseitigung dieser Abweichungen im Gezeitenablauf soll sich nach LAUKART (1981) eine Regressionsfunktion erst in größeren Zeitabschnitten stabilisieren (> 30 Jahre). Im Gegensatz zu dieser international üblichen MSL-Berechnungsmethode werden in diesem Bericht MSL-Höhen aus örtlichen mittleren Tidekurven ermittelt. Die grundlegenden Beziehungen zwischen diesen beiden Methoden zur MSL-Ableitung und die erreichbaren Genauigkeiten werden bei LASSEN (1989) und LASSEN, SIEFERT (1991) behandelt.

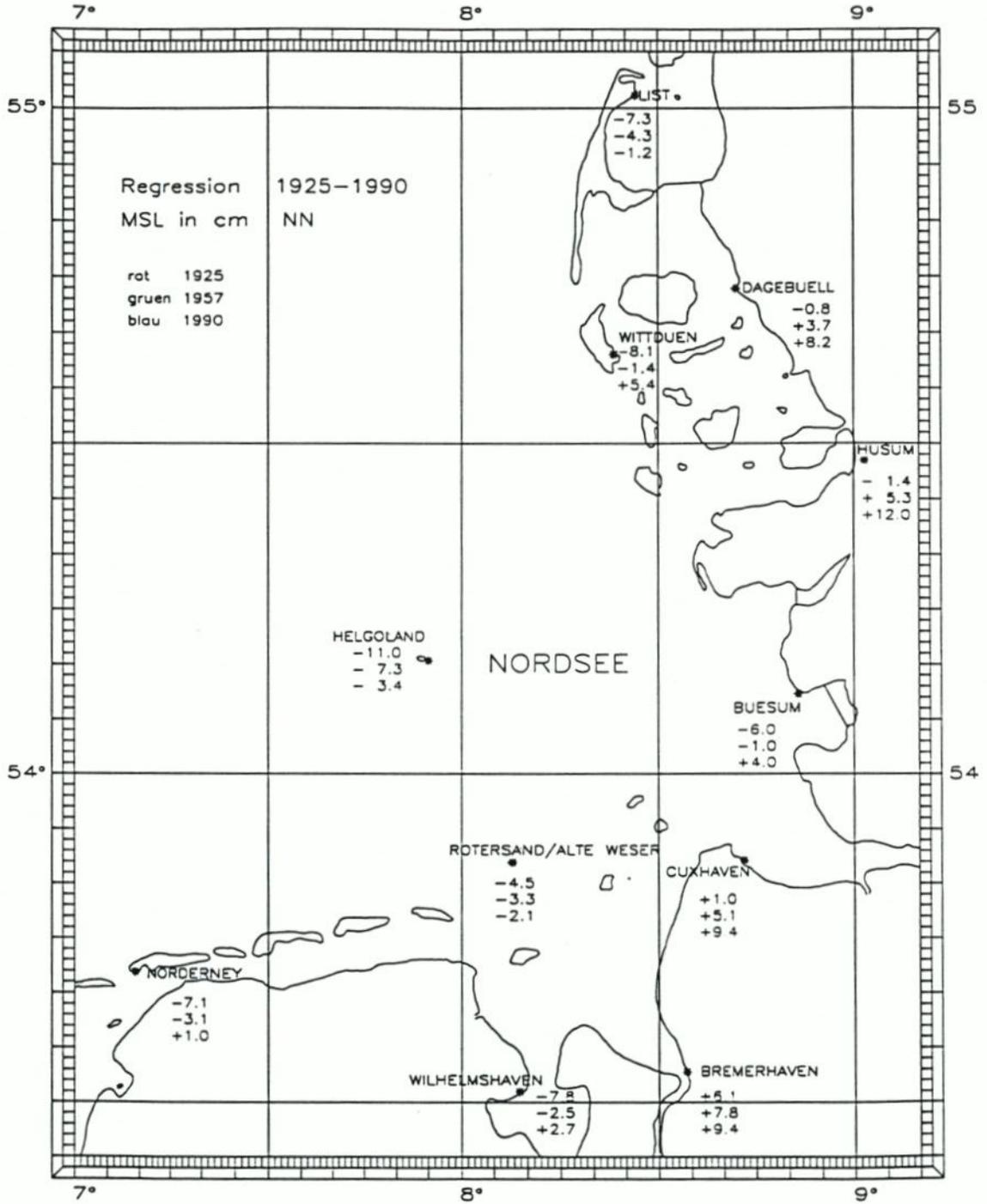


Abb. 1: Übersichtsplan mit Darstellung abgeleiteter MSL-Höhen 1925, 1957 und 1990 aus den linearen Regressionen

Tab. 1: k-Faktoren verschiedener Pegel

Pegel	k-Faktor
Helgoland	0,4784
Cuxhaven	0,4694
Wilhelmshaven	0,4599
Norderney	0,4853
L. T. Roter Sand	0,4855
L. T. Alte Weser	0,4784
Bremerhaven	0,4592
Husum	0,4393
Büsum	0,4702
Dagebüll	0,4288
Wittdün	0,4457
List	0,4460

4. Ergänzung fehlender Wasserstände (Lücken in Aufzeichnungen)

Detaillierte Betrachtungen zur statistisch fundierten Ermittlung der MSL-Entwicklung in der südöstlichen Nordsee erfordern für alle Pegel dieser Analyse gleichlautende Stichprobenumfänge gewässerkundlicher Jahreswerte (1925–1990). Um dies in der vorliegenden Untersuchung realisieren zu können, ist es erforderlich, fehlendes Datenmaterial in Pegelaufzeichnungen (Aufzeichnungslücken) über Bezugspegel nach statistischen Methoden abzuleiten. In diesem Fall liefert die multiple Regression die beste Schätzung für fehlende Jahreswerte, weil diese Methode eine funktionale Abhängigkeit zwischen der Zielgröße (Daten des Anschlußpegels) und den dazugehörigen Einflußgrößen (Daten mehrerer Bezugspegel) unterstellt. Das hier verwendete Auswerteprogramm paßt eine lineare Gleichung der Form

$$t = a + bx + cy + dz$$

an eine Datenmenge $[(x_i, y_i, z_i, t_i)]$ mit $i = 1, 2, \dots, n$ nach der Methode der kleinsten Quadrate an. Die Regressionskoeffizienten a, b, c und d werden durch die Lösung des Gleichungssystems geschätzt. Auf Grundlage multipler Regressionen werden fehlende Daten in gewässerkundlichen Zeitreihen der Pegel Helgoland (Tab. 2), Büsum (Tab. 3), Wittdün (Tab. 4) und List (Tab. 5) ergänzt.

Zur Verdeutlichung des Sachverhalts werden für Helgoland nach Auflösung des Ausgleichungsschemas Regressionsgleichungen zur Ableitung fehlender MSL- und MThw-Jahresmittel aufgrund des Analysezeitraumes 1925 bis 1990 angegeben.

Den Buchstaben t = Helgoland, w = Cuxhaven, x = Wilhelmshaven, y = Norderney, z = Büsum werden gewässerkundliche Jahresmittel zugeordnet.

Die Regressionsgleichung für MSL lautet:

$$t = -7.966 + 0.351w + 0.317x + 0.096y + 0.150z.$$

Die Regressionsgleichung für MThw lautet:

$$t = -13.332 + 0.037w + 0.282x + 0.347y + 0.167z.$$

Aus den Gleichungen läßt sich leicht ablesen, daß die Helgoländer MSL-Schätzung von dem Cuxhavener und Wilhelmshavener MSL sehr stark beeinflusst wird, während bei der

Tab. 2: Pegel Helgoland, errechnete Jahresmittel (Höhen in cm NN)

Jahr	MThw	MTnw	MSL	
1919	95	-130	-12,6	
1920	97	-130	-11,6	
1921	95	-127	-11,2	
1922	98	-132	-12,0	
1923	104	-126	- 6,0	
1924	101	-132	-10,4	MThw
1945	106	-124	- 4,0	106
1946	103	-126	- 6,6	103
1947	82	-139	-23,7	83
1948	102	-119	- 3,7	95
1949	102	-121	- 4,7	101
1950	100	-119	- 4,8	100
1951	94	-129	-12,7	94
1952	107	-123	- 3,0	105

nach Jensen
et al., 1992

MThw-Schätzung eine deutliche Abhängigkeit von dem Norderneyer und Wilhelmshavener MThw vorhanden ist.

Die Genauigkeit der Ergebnisse kann einmal nach dem Determinationskoeffizienten R^2 beurteilt werden, einem Gütemaß für die lineare Beziehung. Mit einem erreichten $R^2 > 0.9$ wird eine gute Übereinstimmung der Daten erlangt. Weitere Genauigkeitsabschätzungen können mit den Daten des Anschlußpegels vor und nach der Aufzeichnungslücke angestellt werden, weil sich diese auch mit den Gleichungen nachvollziehen lassen. Aus den Abweichungen zwischen den beobachteten und errechneten Daten, also verbleibende Restfehler, werden Standardabweichungen < 2 cm ermittelt. Damit dürfte die Genauigkeit der errechneten Daten nur unerheblich besser oder schlechter als die der beobachteten Daten sein. Ein anderes Modell zur statistisch mathematischen Schätzung fehlender Daten in Aufzeichnungsreihen verwenden JENSEN et al. (1992). Mit der sog. KFKI- μ -Verteilung werden für Helgoland die fehlenden MThw-Jahresmittel 1945 bis 1952 berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 gesondert aufgeführt. Bis auf das Jahr 1948 führen die beiden Verfahren im Endergebnis auf das gleiche Resultat, obwohl sich die Auswertekonzepte sowie Datenbasen grundsätzlich unterscheiden. Die KFKI- μ -Verteilung beruht auf Daten des Leuchtturmes Roter Sand am Rande des Küstenvorfeldes. Das Auswertemodell basiert auf der funktionalen Abhängigkeit von Einzelwerten, die als Eingangsgrößen in die Auswertung eingehen und deren Ungenauigkeiten sich voll auf das Endergebnis auswirken. So liegt z. B. das MThw-Jahresmittel Roter Sand 1948 nicht im Trend der Küstenpegel, dies führt gegenüber der Mehrfachausgleichung zur Abweichung der Helgoländer MThw-Schätzung 1948. Es ist daher leicht einzusehen, daß Datenungenauigkeiten eines Pegels bei einer gemeinsamen Ausgleichung aller Basisdaten mehrerer Pegel nur einen geringen Einfluß auf das Endergebnis haben. Es erscheint daher weitaus sinnvoller bei Füllung größerer Datenlücken in Tide-Aufzeichnungsreihen die multiple Regression einzusetzen, weil sie einen gesicherten und vertieften Einblick in das großräumige Tidegeschehen der s. o. Nordsee erlaubt.

Nach Darlegung wesentlicher Merkmale zur Bestimmung fehlender Daten in Aufzeichnungsreihen mit Hilfe einer multiplen Regression am Beispiel Pegel Helgoland, werden diese für die Pegel Büsum, Wittdün und List nicht weiter diskutiert, da sie im wesentlichen denen der Helgoländer, auch in der Genauigkeit, in etwa ähnlich sind. Die errechneten Schätzwerte dieser Pegel enthalten Tab. 3 bis 5.

Tab. 3: Pegel Büsum, errechnete Jahresmittel (Höhen in cm NN)

Jahr	MTnw	Jahr	MTnw
1925	-168	1928	-174
1926	-168	1929	-176
1927	-166	1930	-170

Tab. 4: Pegel Wittdün, errechnete Jahresmittel (Höhen in cm NN)

Jahr	MThw	MTnw
1925	103	-132
1926	104	-132
1927	104	-130
1928	91	-137
1929	93	-140
1930	94	-137

Tab. 5: Pegel List, errechnete Jahresmittel (Höhen in cm NN)

Jahr	MThw	MTnw
1925	68	- 90
1926	70	- 89
1927	70	- 87
1928	58	- 96
1929	58	-100
1930	59	- 94

Hinweis:

Alle Wasserstände und deren Ergebnisse zu diesem Bericht beziehen sich auf die Äquivalenzfläche NN. Zwischen Helgoländer Null (HN) und NN besteht folgende Beziehung $HN = NN + 26 \text{ cm}$ (LASSEN, 1989). Die gewässerkundlichen Jahresmittel sind den Änderungen der mittleren Wasserstände an der Nordseeküste entnommen (JENSEN, 1984).

Für diesen Bericht sollen folgende Bezeichnungen gelten:

- r = Korrelationskoeffizient der Stichprobe
- $\overline{\text{MThw}}$ = Mittelwert der Zeitreihe (cm NN bzw. cm)
- b = Regressionskoeffizient (Steigungsmaß)
- R^2 = Determinationskoeffizient

5. Pegel Helgoland

5.1 Helgoländer Pegel-Null (HN)

Ausführliche Hinweise zu verschiedenen HN-Bestimmungen gibt LOHRBERG (1987). Dieser Mitteilung ist auch die bemerkenswerte Feststellung zu entnehmen, daß die Wiederherstellung des Höhennetzes auf Helgoland nach 1945 durch vorgefundene Höhepunkte ge-

lungen ist. Damit ist für HN eine eindeutige örtliche Zuordnung von 1925 bis 1990 gegeben. Die damit verbundene Frage, ob HN über die Zeit als hinreichend konstant gelten kann, wird durch die ausgeglichenen Helgoländer MSL- und MThw-Jahresmittel der multiplen Regression bestätigt. Bei den Jahreswerten zeigen sich keine eindeutigen Sprungstellen zwischen den errechneten und beobachteten Jahreswerten. Auch die Vertikalbewegungen aufgrund der Hebungstendenzen des Salzstockes, auf dessen Oberfläche Helgoland liegt, sind sehr gering und dürften kaum Werte von 2 bis 4 cm/J. erreichen und haben daher wenig Einfluß auf HN (LASSEN u. LINKE, 1984).

Zu verbesserten Kenntnissen über die Abweichung HN zu NN kommen neuere Untersuchungen. Grundlage dieser Differenzbestimmungen sind MSL und GPS (Global Positioning System). Aus MSL-Ergebnissen 1975/79 und 1982/86 und deren Veränderungen im Küstenvorfeld mit weiteren Extrapolationen in die Nordsee ergibt sich ein Niveauunterschied NN/HN = 26 cm (LASSEN, 1989). In den letzten Jahren sind GPS-Messungen immer mehr in den Vordergrund der Verfahren zur Höhenbestimmung getreten. Im Sommer 1991 führte das Institut für Erdmessung der TU Hannover GPS-Messungen zur Ableitung der Höhendifferenz NN zu HN durch. Aus zehn Küstenpegeln berechnet sich diese Differenz im Mittel zu + 27 cm. Dieser Wert ist noch kritisch zu bewerten, jedoch spricht die geringe Streuung für die erreichte Qualität der GPS-Lösung und der Qualität des Geoids auf dem Festland (Bericht Institut f. Erdmessung, 1992).

Entschluß: Die Helgoländer Wasserstände werden um + 26 cm an NN angepaßt.

(Im Juni 1995 veröffentlichte Ergebnisse zum Höhenanschluß des Pegels Helgoland vom Institut für Erdmessung der Uni Hannover konnten für diese Untersuchung nicht mehr berücksichtigt werden).

5.2 Helgoländer k-Faktor und MSL

Die Ergebnisse der nach beiden Lösungsmethoden bestimmten MSL-Höhen und k-Faktoren – einmal Mittelbildung aus stündlichen Wasserständen oder aus mittleren Tidekurven – zeigen keine Widersprüche.

	Ableitung aus stdl. Wasserstandsordinaten (BSH) Mittel 1953–1986	Ableitung aus mittleren Tidekurven Mittel 1925, 1936 . . . 1986
MSL	-6,8 cm NN	-7,4 cm NN
K	0,47845	0,48040

5.3 Ergebnisse

Nach Beseitigung des Lückenproblems in der Aufzeichnungsreihe ist es erstmals möglich, die Tideentwicklung im Meeresbereich in zusammenhängenden Zeitabschnitten von 66 und 80 Jahren (1925 bis 1990 und 1911 bis 1990) vorzustellen. Der Trend einiger Tidebereiche ist in Tab. 6 angegeben:

Tab. 6: Pegel Helgoland, Mittelwerte und Regressionskoeffizienten

Tidebereich Steigungsmaß	Regressionsergebnisse der Zeitreihen	
	1925-1990	1911-1990
$\overline{\text{MThw}}$	103,0	102,0 cm NN
b	0,189	0,172
$\overline{\text{MTnw}}$	-127,9	-128,1 cm NN
b	0,023	0,024
$\overline{\text{MThb}}$	231,0	230,9 cm
b	0,166	0,148
$\overline{\text{MSL}}$	- 7,4	- 7,9 cm NN
b	0,117	0,106

Die Regressionskoeffizienten (b) 1925 bis 1990 unterschieden sich kaum von denen der Zeitreihe 1911 bis 1990. Die Säkularvariation MThw mit 19 cm/J. ist um ~55 % größer als die des MSL mit 12 cm/J. Beim MTnw ist nur ein geringer Anstieg zu verzeichnen.

Tab. 7 enthält die der Jahreszahl zuzuordnenden MSL-Höhen, die nach einfacher linearer Regression berechnet sind.

Tab. 7: Helgoländer MSL-Höhen in cm NN, () berechnete Höhen außerhalb des Analysenzeitraumes

Regression Zeitreihe	Jahr MSL-Höhe					
	1900	1911	1925	1957	1990	2000
1925-1990	(-15)	(-12,1)	-11,0	-7,3	-3,4	(-2,3)
1911-1990	(-15)	-12,1	-10,6	-7,2	-3,7	(-2,6)

Die Auswertung der langjährigen Helgoländer Wasserstandsaufzeichnungen präzisieren einen signifikanten säkularen Anstieg des Meeresniveaus in den den Berechnungen zugrundeliegenden Zeiträumen.

Der diesem Bericht zugrundeliegende Analysezeitraum 1925 bis 1990 beruht auf der Tatsache, daß für Helgoland etwa ab 1925 zuverlässige Wasserstandsdaten zur Verfügung stehen (ROHDE, 1982). Diese Basis ermöglicht zeitgleiche Gegenüberstellungen von MSL-Trendrichtungen in der südöstlichen Nordsee. Darüber hinaus errechnete Regressionsergebnisse verschiedener Zeiträume dienen als zusätzliche Information.

6. Weitere Pegel

Unter dem Begriff „weitere Pegel“ sind alle diejenigen Pegel zu verstehen, die außer Helgoland unter 1 genannt sind.

Der Rahmen dieses Überblicks zur MSL-Entwicklung in der südöstlichen Nordsee zwingt zur Beschränkung auf das Wesentliche. Aus diesem Grund wird die Betrachtung der MSL-Trendrichtungen der Ausgangspegel auf die numerischen Resultate der Tab. 8 begrenzt. Zum Verständnis sachlicher Zusammenhänge werden nachfolgend erwähnenswerte Infor-

mationen zum k-Faktor sowie zur Aufbereitung und Auswertung von Wasserständen für einige Pegel gegeben.

Die Ableitungen des Cuxhavener k-Faktors und MSL nach der Methode des BSH und nach der der mittleren Tidekurve differieren nur wenig.

	Ableitung aus stdl. Wasserstandsordinaten (BSH) Mittel 1953-1986	Ableitung aus mittleren Tidekurven Mittel 1866, 1907, 1916, 1926 ... 1986, 1987, 1988, 1991
MSL	+6,5 cm NN	+4,0 cm NN
k	0,46944	0,47117

Bei der mittleren Höhe des MSL ist eine gewisse Abweichung vorhanden, die damit zusammenhängt, daß die Mittelwerte aus unterschiedlichen Bestimmungszeiträumen hergeleitet sind. Diese wirken sich bei Berechnung der k-Faktoren nicht aus, wie die kleine k-Differenz zeigt. Sie bewirkt bei einem Thb von 3 m einen Unterschied in den MSL-Höhen von ~0,005 m, d. h. der Cuxhavener k-Faktor ist über die Zeit als konstant anzusehen. Für die Cuxhavener MSL-Ableitung ist der k-Faktor des BSH eingesetzt worden.

LAUKART (1981) vergleicht Lattenablesungen des Pegels Wilhelmshaven von 1878 bis 1917 mit der sog. Tide-Regelkurve und leitet aus den Resultaten das Tide-Mittelwasser (MSL) ab. Hieraus läßt sich ein mittlerer k-Faktor errechnen, der sich von dem aus mittleren Tidekurven 1925/26, 1935/36 ... 1986 ergebenden Faktor nicht signifikant unterscheidet. Die mit $k = 0,4599$ bestimmten jährlichen MSL-Höhen können damit als repräsentativ für den Zeitraum 1878 bis 1990 angesehen werden.

k 1878 bis 1917	= 0,4602
k mittl. Tidek.	= 0,4586
k Mittel	= 0,4599

Das zentrale Problem bei Herstellung einer kontinuierlichen Wasserstandsreihe von 1911 bis 1990 im Außenweser-Bereich für die Leuchttürme Roter Sand (RS) und Alte Weser (AW) - 1964 erfolgte die Umstellung des Pegelbetriebes von RS auf AW - liegt in PN-Unsicherheiten von RS, die in der schwierigen Höhenübertragung vom Festland zum exponiert gelegenen Standort RS sowie bei Messungen im Turm zu suchen sind. Einen weiteren Schritt zur Lösung des Problems „PN-Höhendifferenz RS/AW“ liefern MSL-Vergleiche zwischen beiden Pegelorten. Am Rande des Küstenvorfeldes zum Tiefwasserbereich der Nordsee wird der Einfluß der Topographie auf den örtlichen Tideablauf kleiner. Daher kann man von der Hypothese ausgehen, daß MSL RS und MSL AW bei einer Entfernung von etwa 3 km auf einer Ebene liegen. Aus den MSL-Relationen RS 1955/56, 1963/64 und AW 1976 und 1986 zu den gut dokumentierten zeitgleichen MSL-Höhen Helgoland und Cuxhaven wird eine PN-Abweichung AW minus RS von + 16 cm abgeleitet. Für diese Analyse wird PN RS um -16 cm korrigiert. So ist das Datenkollektiv RS bis 1964 nahezu an den NN-Horizont angeglichen. Aus den mittleren Tidekurven errechnet sich der k-Faktor wie folgt:

k Roter Sand, Mittelwert 1955/56 und 1964/65	= 0,4855 (0,481)*
k mittl. Tidek.	= 0,4784 (0,473)*

*nach Lorberg (1955 und 1980).

Die Ausgleichsgeraden der Tidebereiche zeigen in ihrem Verlauf keine Inhomogenitäten. Dies deutet darauf hin, daß die Anpassung der Wasserstände RS an AW annähernd verwirklicht ist.

In Bremerhaven sind die Wasserstände entlang der Weser an verschiedenen Orten aufgezeichnet worden. In der Annahme, daß sich dieser angesprochene Nachteil in der Wasserstandsregistrierung nicht nachteilig auf die Ergebnisse auswirkt, werden die jährlichen MSL-Höhen mit $k = 0,4592$ bestimmt.

k Mittel 1898, 1899 und 1900	= 0,4610 (ermittelt aus stdl. Wasserstandsordinaten)
k aus mittleren Tidekurven 1976 und 1986	= 0,4573
k Mittel	= 0,4592

Die MSL-Bestimmung der Pegel Norderney, Büsum, Husum, Wittdün, Dagebüll und List basieren auf k-Faktoren, die sich aus den betreffenden mittleren Tidekurven 1976 und 1986 ergeben. Weitere Berechnungen zusätzlicher k-Faktoren, verteilt über den Analysezeitraum, um die Werte 1976 und 1986 als identisch für den Analysezeitraum ansehen zu können, würden den Rahmen dieser Untersuchung überschreiten und sind daher unterblieben. Eine Genauigkeitsabschätzung von k, abgeleitet aus mittleren Tidekurven, kann daher nur am Pegel Wittdün demonstriert werden, in der Annahme, daß sie auch für die anderen Pegel zutrifft.

Pegel Wittdün	Jahr	k-Faktor
	1935/36	0,4421
	1955/56	0,4458
	1965/66	0,4453
	1976	0,4448
	1986	0,4500
	1992	0,4471
	1993	0,4449
	Mittel	0,4457

Die k-Faktoren geben einen pauschalen Einblick in die Stabilität dieses Wertes über den Analysezeitraum.

7. Interpretation

Die durchgeführten Datenaufbereitungen bis zur MSL-Bestimmung für die unter 1 genannten Pegel in den vorhergehenden Abschnitten erlaubt es entsprechend der Zielsetzung, die MSL-Entwicklung in der südöstlichen Nordsee zu betrachten. Vorliegende säkulare Trendnachweise der Meeresoberfläche beruhen im wesentlichen auf Verfolgung jährlicher MThw über eine vorgegebene Epoche. Es sind meist örtlich begrenzte und zu kurzfristige Untersuchungen, deren Ergebnisse oft allzu schnell verallgemeinert werden.

Aus den Untersuchungen geht hervor, daß eine augenfällige Abhängigkeit der Ergebnisse von aufzudeckenden Bewegungsvorgängen des MSL von der verwendeten Datenbasis vorhanden ist. Die Resultate der Tab. 8 offenbaren dies deutlich. Bei allen Pegeln unterscheidet sich der jeweilige MThw-Trend in einer nicht unerheblichen Bandbreite von dem zeitgleichen MSL-Trend. Daraus ist abzuleiten, daß eine erstellte MSL-Prognose auf

Tab. 8: Zusammenstellung säkularer Tideentwicklungen

Pegel	Zeitraum	Säkulare Entwicklungen in cm/J.			MSL
		MThw	MTnw	MThb	
Helgoland	1925-1990	18,9	2,3	16,6	11,7
	1911-1990	17,2	2,4	14,9	10,6
Cuxhaven	1925-1990	23,8	1,0	23,5	12,7
	1911-1990	23,6	3,6	18,8	14,9
	1860-1990				18,1
Wilhelmshaven	1925-1990	32,4	- 4,3	37,7	16,1
	1911-1990	30,8	- 2,7	33,4	17,6
	1873-1990				18,1
Norderney	1925-1990	13,9	11,3	2,6	12,5
	1911-1990	18,0	8,1	8,1	13,2
	1891-1990				18,4
Roter Sand/ Alte Weser	1925-1990	9,0	-10,7	20,4	3,7
	1911-1990	12,3	- 6,0	18,9	6,6
	1903-1990				5,0
Bremerhaven	1925-1990	31,0	-24,9	55,9	5,1
	1911-1990	24,9	-22,6	47,5	4,3
	1881-1990				8,8
Husum	1925-1990	36,1	1,3	35,0	20,7
	1911-1990	32,4	1,3	31,3	18,5
Büsum	1925-1990	24,1	5,9	18,4	15,8
Dagebüll	1936-1990	48,4	-32,9	81,1	13,8
Wittdün	1925-1990	41,6	- 3,6	46,5	20,8
List	1925-1990	25,4	- 9,5	34,9	9,3

MThw-Basis nicht denselben Erwartungswert liefert, wie eine, die sich auf MSL-Daten bezieht.

Dies war Veranlassung, die viel zu wenig bekannten MSL-Höhen von Helgoland und Cuxhaven des BSH in die Tidebetrachtungen einzubeziehen, teilweise zu ergänzen und durch weitere MSL-Bestimmungen für die unter 1 genannten Pegel zu vervollständigen.

Die mathematisch-statistische Verarbeitung vorliegender MSL-Daten ergibt ein unterschiedliches Spektrum von Regressionskoeffizienten im Untersuchungsbereich der südöstlichen Nordsee. So ist der Säkulartrend des MSL, abgeleitet aus den linearen Regressionen 1925 bis 1990, von Helgoland, Cuxhaven, Norderney und List mit 10 cm bis 13 cm etwa gleich. Für Wilhelmshaven, Büsum und Dagebüll betragen diese um 15 cm und erreichen bei Husum und Wittdün Größen von mehr als 20 cm. Ganz außer der Reihe liegen die Steigungen der MSL-Ausgleichsgeraden im Außenweser-Bereich. Für Bremerhaven und RS/AW beträgt der Trend nur bis zu 5 cm. Der MThw-Trend weicht zwischen diesen beiden Pegeln um etwa 70 % ab. Ebenso auffällig ist die anders geartete säkulare MTnw-Entwicklung zwischen dem Elbe- und Weserästuar. Während im Außenelbe-Bereich kaum ein MTnw-Trend feststellbar ist, er ist sogar fast gleich mit dem Helgoländer, wird für die Außenweser eine Absenkung des MTnw abgeleitet. Für den Küstenbereich zwischen Elbe und Weser werden auch höhere MSL-Höhen ausgewiesen. Sie steigen sowohl von der Jade wie auch von der

Dithmarscher Küste nach Bremerhaven und Cuxhaven um 6 cm bis 10 cm an (Abb. 1). Einer der Gründe hierfür könnten Dichteunterschiede im Mündungsbereich von Elbe und Weser gegenüber dem seewärtigen Bereich der südöstlichen Nordsee sein.

Damit bleiben noch eine Reihe von Fragen zur Erforschung eines signifikanten MSL-Anstiegs offen, die nur durch systematische und analytische Untersuchungen in einer großräumigen Gezeitenstruktur von der freien See über das Küstenvorfeld bis zur Küstenregion gelöst werden können. Die bislang für verschiedene Küstenorte nach einfach linearen MThw-Regressionen ermittelten säkularen MSL-Trends können wegen ihrer Begrenztheit in der Aussage nichts Entscheidendes zu einem großräumigen MSL-Trend beitragen. Ein realistischer Schätzwert zur Beurteilung des MSL-Anstiegs ist m. E. z. Z. der des Helgoländer-MSL mit 12 cm/J. aus dem vorliegenden Analysezeitraum.

Es muß aber auch darauf hingewiesen werden, daß die vorliegenden Analyseergebnisse auch vom Auswerteschema, der Datengenauigkeit und der Datenaufbereitung abhängig sind. Die Voraussetzung für einen gesicherten Rechengang zur Bestimmung einer großräumigen MSL-Struktur der südöstlichen Nordsee ist, daß die zu den Stichproben gehörenden Pegel-daten der Arbeitshypothese gleichgewichtig sind. Diese Annahme kann nur dann berechtigt sein, wenn die verwendeten unterschiedlichen Pegeltypen (wobei auf die Aufzeichnungsunsicherheiten der Luftdruckpegel hingewiesen wird), das PN (einheitlicher Niveaubezug, zeitgleicher Ursprung der Anschlußnivelements, Widersprüche im Haupthöhennetz der Landesaufnahme), die Pegelstandorte (Setzungstendenzen, Standortwechsel), die Auswertung der Pegelbögen, im Mündungsbereich der Flüsse der Abfluß des Oberwassers (Dichteschwankungen) und die Mittelbildung von Jahreswerten aus vollständigen gewässerkundlichen Tideaufzeichnungen als gleich angesehen werden können. Diese Klassifizierungsqualitäten treffen bei keinem der Pegel vollständig zu. Sie sind besonders bei älteren Tideergebnissen etwa vor 1936 zu beachten, wobei sich die PN-Fortführung wegen Inhomogenitäten im deutschen Haupthöhennetz (DHHN) als besonders kritisch herausstellen kann. Daher können die berechneten MSL-Höhen nur als gute Schätzwerte betrachtet werden, die aber keinen Einfluß auf festgestellte Bewegungstendenzen des MSL haben.

Die intensiven MSL-Untersuchungen beantworten auch die Frage nach einer großräumigen Überprüfung von Höhepunkten im DHHN entlang der deutschen Nordseeküste mit MSL. Wegen des unterschiedlichen MSL-Anstiegs vom Meeresbereich zur Küstenregion (LASSEN, 1980) und den nachgewiesenen wechselnden Wirkungsgraden der Meteorologie auf Wasserstände im Küstenbereich erscheint es nicht möglich, eine Überprüfung der Landeshöhepunkte mit MSL durchzuführen. Dagegen sind in lokalen Bereichen in einem gewissen Umkreis zu einem bestimmten Pegel NN- bzw. PN-Vergleiche zu weiteren Pegeln mit MSL durchführbar.

In dem vorliegenden Regressionsmodell zum MSL-Anstieg sind fehlende Jahreswerte mit der multiplen Regression nachträglich in die Datenreihe eingerechnet. Diese Methode beinhaltet die gemeinsame Ausgleichung von Datensätzen mehrerer Pegel zur Ableitung der Regressionsfunktion, mit deren Hilfe die fehlenden Jahresmittel abgeleitet werden. Die errechnete Information ist aufgrund der Rechenoperation mit Daten mehrerer Bezugspegel korreliert. Dies führt mit einer großräumigen Tidebetrachtung zu einer Steigerung der Zuverlässigkeit ermittelter Schätzwerte. Für alle durchgeführten multiplen Regressionen ist der Determinationskoeffizient $>0,9$ und demonstriert damit die Verlässlichkeit dieses statistischen Schätzverfahrens für die vorliegende Analyse.

8. Danksagung

Das fachliche Interesse an dieser Arbeit durch Herrn Dipl.-Oz. ANNUTSCH, BSH, und Herrn Prof. Dr.-Ing. SIEFERT, Strom und Hafengebäude Hamburg, hat wesentlich zum Gelingen dieses Vorhabens beigetragen.

9. Schriftenverzeichnis

- GÖHREN, H.: Tidewasserstände und Windstau im Elbmündungsgebiet. Hamb. Küstenf., H. 3, 1968.
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Instituts, H. 83, 1984.
- JENSEN, J., MÜGGE, H. E. u. SCHÖNFELD, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 53, 1992.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. Die Küste, H. 50, 1989.
- LASSEN, H. u. SIEFERT, W.: Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee – Säkularer Trend und Verhältnisse um 1980. Die Küste, H. 52, 1991.
- LASSEN, H. u. SIEFERT, W.: Zur Windstauentwicklung in der südöstlichen Nordsee. Die Küste, H. 53, 1992.
- LAUKART, W.: Ermittlung langfristiger Wasserstandsänderungen aus Pegelregistrierungen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 1044, 1981.
- LEONHARD, T.: Zur Berechnung von Höhenänderungen in Norddeutschland. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 152, 1988.
- LIETZ, U.: Zum Nullpunkt Pegel Roter Sand und Alte Weser, DGM 30, H. 213, 1986.
- LOHRBERG, W.: Pegel-Nullpunkt Helgoland, DGM 31, H. 4, 1987.
- LOHRBERG, W.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste, DGM 33, H. 5/6, 1989.
- ROHDE, H.: Zur Geschichte des Pegels Helgoland, DGM 26, H. 5, 1982.
- SIEFERT, W.: Zur Meßgenauigkeit der Pegelaufzeichnungen in der Außenelbe, Hamb. Küstenf., H. 13, 1970.
- Uni Hannover: Präziser Höhenanschluß des Pegels Helgoland. Zwischenbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben. Institut für Erdmessung, April 1992.
- WSA Bremerhaven: Interner Schriftverkehr zum Pegel Roter Sand und Alte Weser.