

Schließen von Lücken in Pegelaufzeichnungen

VON WOLFGANG LIEBIG

Zusammenfassung

Durch Ausfälle an Pegeln können Lücken in den Wasserstandsaufzeichnungen entstehen. Diese fehlenden Werte müssen rechnerisch erzeugt werden. Es sind verschiedene Verfahren zum Schließen von Pegellücken vorgeschlagen worden, bei denen nur die Scheitelwerte ersetzt werden. Hier soll jedoch ein Verfahren vorgestellt werden, mit dem die gesamte Lücke in der Ganglinie geschlossen werden kann. Dies ist für Untersuchungen in der Küstenforschung von großem Interesse. So benötigen z. B. mathematische und hydraulische Tidemodelle kontinuierliche Wasserstandsaufzeichnungen. Ebenso sind bei der Berechnung des Tidemittelwertes und für die Beschickung von Peilungen lückenlose Tidekurven erforderlich.

Das hier vorgestellte Verfahren arbeitet mit einem Bezugspegel. Die Tidekurve des Bezugspegels wird mit Hilfe der Spektralanalyse so moduliert, daß sie optimal an die Tidekurve des Lückenpegels angepaßt wird. Dabei wird die Anpassung so definiert, daß die Summe der Quadratabstände von Bezugs- und Lückenpegel minimal wird. Zum Schließen der Lücke werden Informationen aus dem Bezugs- und dem Lückenpegel verwendet.

Die Ergebnisse von Berechnungen an künstlich erzeugten Lücken bei mittleren und extremen Tideverhältnissen zeigten mittlere Abweichungen zu den Originaldaten unter 10 cm. Für nahe und ungestörte Bezugspegel ergeben sich mittlere Abweichungen von ca. 2 cm. Die Ergebnisse könnten eventuell durch die Benutzung mehrerer Bezugspegel verbessert werden. Das Verfahren läßt sich leicht auf einem PC-Rechner realisieren.

Summary

A computer program has been developed to close gaps in water level records. Until now, various methods were available to hindcast only missing high and low water peaks. In this paper, a technique is introduced which fills gaps in time series by using data from a reference gauge. This is a very important feature in coastal engineering research. Numerical and physical model control as well as statistical analysis of water levels and currents require continuous time series of data.

The presented technique is based on only one reference gauge. However, inclusion of more than one gauge should improve the results. Spectral analysis has been applied to optimally adapt the data of the reference gauge to those of the gap-gauge. This was accomplished by using a special numerical method for unconstrained minimization with a non-linear least-squares approximation. Information is used from both the reference and the gap-gauges.

Tests were carried out comparing simulated with recorded data. In most cases the mean deviation was less than 10 cm. For undisturbed reference gauges and those in the proximity of the gap-gauge the difference was approximately 2 cm.

Inhalt

1. Einleitung	120
2. Das Verfahren	121
2.1 Beschreibung des Verfahrens	121
2.2 Formulierung des Algorithmus	123
2.3 Realisierung des Verfahrens	124
3. Berechnungsbeispiele	125
4. Schriftenverzeichnis	134

1. Einleitung

Bedingt durch bauliche Maßnahmen, Umwelteinflüsse (Seegang, Salzluft und die dadurch bedingte Korrosion) sowie andere technische Defekte kann es besonders im Küstengebiet bei Wasserstandsmessungen zu Ausfällen kommen. Die Meßstationen sind im Küstengebiet auch weniger leicht zugänglich (also schwieriger zu warten) als dies bei Binnenpegeln der Fall ist. Diese Ausfälle führen zu Datenlücken in den Meßwertaufzeichnungen. Zur Ermittlung von fehlenden Scheitelwerten wurden bisher verschiedene Verfahren eingesetzt (JENSEN et al., 1992; MÜGGE, 1992). Ein Verfahren zur Berechnung von Scheitelwerten aus digitalen Wasserstandsdaten ist von KUNZ und KÖVES 1986 mitgeteilt worden. Der Ersatz einer gesamten Datenlücke (Abb. 1), die zum Teil auch über mehrere Tiden, Wochen oder

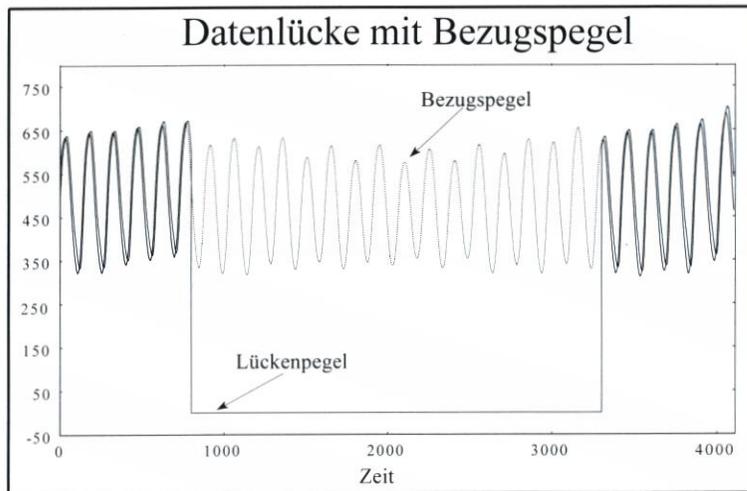


Abb. 1: Datenlücke mit Bezugspegel

Monate gehen kann, bereitet jedoch größere Schwierigkeiten. Der vollständige Ersatz einer solchen Datenlücke ist z. B. notwendig, wenn die gesamte Tidekurve für eine Auswertung vorliegen muß. Dies ist der Fall, wenn die Tidekurve als Gesamtheit analysiert werden soll, z. B. für eine Spektralanalyse, für Bestimmung des Tidemittelwertes, bei Peilungen sowie beim Einsatz mathematischer und hydraulischer Tidemodelle. Es ist klar, daß mit dem Ersatz der gesamten Lücke auch die fehlenden Scheitelwerte bestimmt sind und somit ein solches Verfahren auch zur Berechnung von fehlenden Scheitelwerten benutzt werden kann. Das im folgenden beschriebene Verfahren ist innerhalb des Unterarbeitskreises „Schließen von Pegellücken“ des LAWA-AK „Küstenpegel“ entwickelt worden. Es wurde auf künstlich erzeugte Datenlücken angewendet und schließt diese mit Hilfe der Spektralanalyse über die Daten eines Bezugspegels.

2. Das Verfahren

2.1 Beschreibung des Verfahrens

Bei dem hier vorgestellten Verfahren zum Schließen von Datenlücken in Pegelaufzeichnungen wird der periodische Verlauf der Tidekurve eines Bezugspegels durch eine diskrete Fouriertransformation in seine Spektralanteile zerlegt. Durch Veränderung der einzelnen Spektralwerte wird die Tidekurve des Bezugspegels so verändert, daß diese sich optimal an die Ränder des Lückenpegels anpaßt. Das Verfahren benutzt sowohl Informationen aus einem Nachbarpegel (Bezugspegel) als auch aus dem Lückenpegel selbst.

Um die fehlenden Werte einer Datenlücke zu ersetzen, liegt es nahe, Informationen aus einem möglichst in der Nähe liegenden Pegel zu holen. Da jedoch die Tidekurve eines Pegels auch durch seine unmittelbare Umgebung beeinflusst wird (Topografie), ist es wichtig, zusätzliche Informationen aus dem Lückenpegel selbst zu nutzen. Diese können z. B. aus dem Tideverlauf jeweils vor und nach der Lücke gewonnen werden. Um zu zeigen, wie das Verfahren funktioniert, soll zunächst eine Definition des Abstandes zwischen den Ganglinien von Lückenpegel und Bezugspegel gegeben werden. Die Idee ist, diesen Abstand so zu verringern, daß sich eine optimale Anpassung ergibt. In Abbildung 2 ist die Abstandsdefinition anschaulich dargestellt. Der Bezugspegel ist im allgemeinen zeitverschoben und hat eine andere Mittellage sowie eine andere Amplitude als der Lückenpegel. Der Abstand wird festgelegt durch die Summe der Quadratabstände der Abtastwerte von Bezugspegel und Lückenpegel in den Randbereichen (außerhalb der Lücke) des Lückenpegels. Das heißt, der Abstand ergibt sich aus der Formel:

$$\text{Abstand: } d = \sum_{i=1}^n (y_l(i) - y_b(i))^2 \quad (1)$$

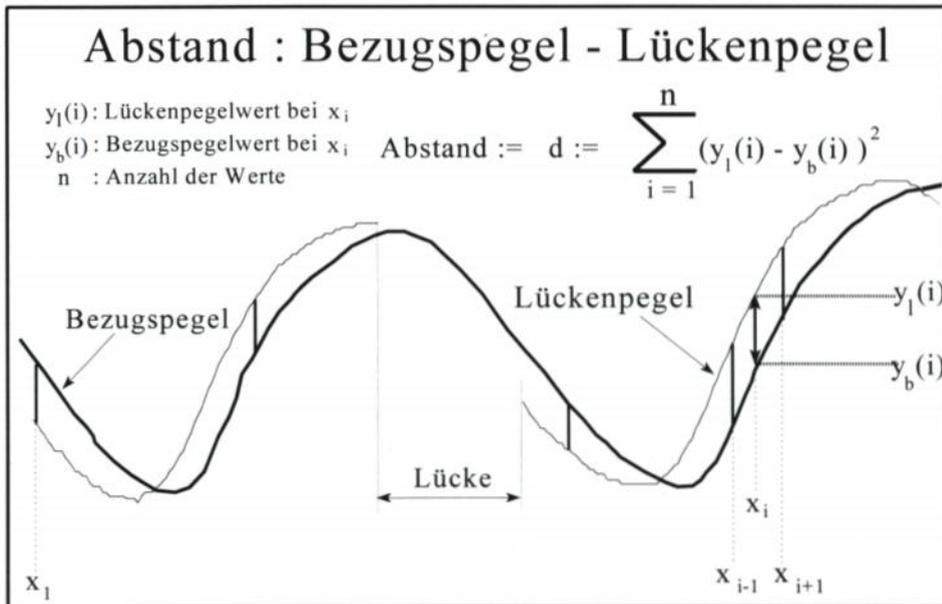


Abb. 2: Abstandsdefinition Lückenpegel und Bezugspegel

für einen Lückenpegel mit den Werten $y_l(i)$: $i = 1, n$;
 für einen Bezugspegel mit den Werten $y_b(i)$: $i = 1, n$;
 $n =$ Anzahl der Abtastwerte in den Rändern der Lücke (siehe Abb. 2).

Wie aus der Abbildung 2 zu ersehen ist, könnte eine Abstandsverringering nach Definition (1) durch Verschieben des Bezugspegels längs der Zeit- und der Amplitudenachse erreicht werden. Eine Vertikalverschiebung der Tidekurve erreicht man durch Addieren eines konstanten Wertes. Ebenso erhält man eine Horizontalverschiebung durch Versetzen der Zeitwerte. Diese Verschiebungen können solange durchgeführt werden, bis der in Formel (1) definierte Abstand minimal wird. Die Anpassung ist nach dieser Angleichung sicher noch unzureichend, da sich z. B. die Amplitude (Tidehub) von Bezugs- und Lückenpegel im Gang mehr oder weniger unterscheiden. Um eine weitere Verringerung des Abstandes zu erreichen, muß auch die Amplitude des Bezugspegels verändert werden. Eine Veränderung der Amplitude im Zeitbereich führt jedoch auf Schwierigkeiten. Außerdem ist, wie bekannt, die Tidekurve aus verschiedenen periodischen Komponenten zusammengesetzt. Es liegt somit nahe, eine Beeinflussung der Tidekurve des Bezugspegels nicht im Zeitbereich, sondern im Frequenzbereich vorzunehmen. Dazu wird die Tidekurve mit Hilfe der diskreten Fourier-Transformation in den Frequenzbereich übertragen. Für einen Beispiel-Pegel ist eine solche Transformation in Abbildung 3 dargestellt.

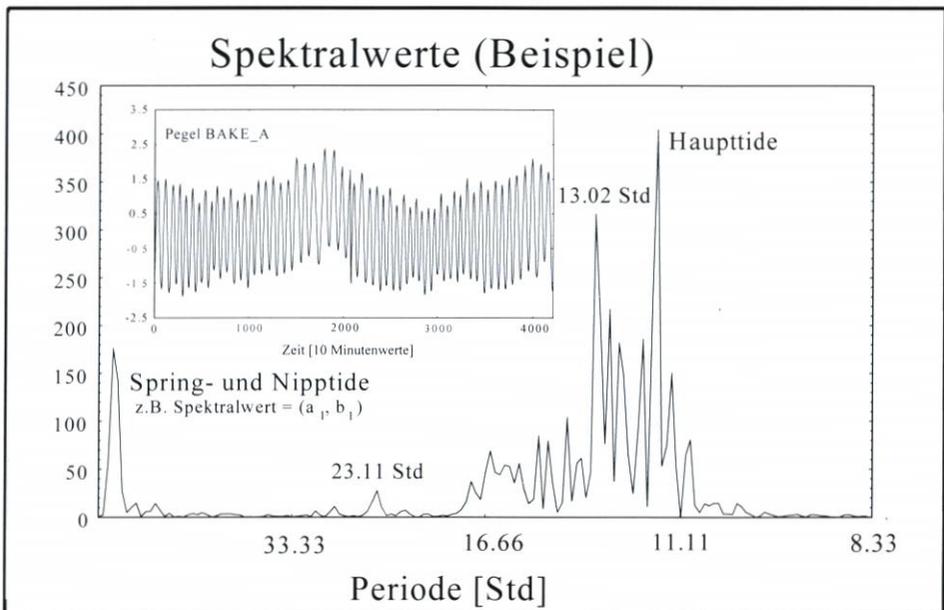


Abb. 3: Spektralwerte eines Bezugspegels (Beispiel)

Das Spektrum zeigt deutlich die wichtigsten Spektralkomponenten der Tidekurve. Diese Komponenten sind jetzt direkt zugänglich und können entsprechend verändert werden. Eine Veränderung der Spektralkomponenten des Bezugspegels gestattet eine Veränderung der Amplitude und Phasenlage der entsprechenden Spektralkomponenten und somit eine gute Anpassung in den Rändern des Lückenpegels.

2.2 Formulierung des Algorithmus

Das Verfahren besteht im wesentlichen aus 3 Schritten. Im ersten Schritt werden die Werte für den Bezugspegel um einen konstanten Betrag derart verändert, daß der Abstand d nach Formel (1) minimal wird. Im zweiten Schritt wird der Abstand durch Verschieben der Bezugspegelwerte längs der Zeitachse weiter minimiert. Durch diese beiden Verschiebungen erhält man eine Tidekurve, die als Ausgangswert für den dritten Schritt verwendet wird. In diesem letzten Schritt wird dann die Minimierung über die Spektralkomponenten vorgenommen.

1. Schritt

Verschiebe durch Addition eines konstanten Wertes C die Tidekurve so, daß der Abstand d ein Minimum annimmt.

$$y_b(i) = y_b(i) + C; \quad \begin{array}{l} i = 1, \dots, n \\ n = \text{Anzahl der Abtastwerte} \end{array} \quad (2)$$

2. Schritt

Verschiebe die Tidekurve in der Zeitachse um den Zeitfaktor z so, daß der Abstand d ein Minimum annimmt.

$$y_b(i+z) = y_b(i); \quad \begin{array}{l} i = 1, \dots, n \\ n = \text{Anzahl der Abtastwerte} \end{array} \quad (3)$$

3. Schritt

Bekanntlich läßt sich eine periodische Funktion mit der Periode T unter bestimmten Voraussetzungen (HESSELMANN, 1982) angenähert oder exakt durch eine trigonometrische Summe darstellen. Für den Fall mit Abtastwerten, wie sie nach einer Pegelmessung oder Pegelbogendigitalisierung vorliegen, ergibt sich diese trigonometrische Summe für den Bezugspegel, nachdem die Verschiebungen (2) und (3) durchgeführt worden sind, durch die diskrete Fouriertransformation zu:

$$y_b(i) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^k a_j \cos(j \cdot \omega \cdot i) + \sum_{j=1}^k b_j \sin(j \cdot \omega \cdot i) \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi/T$$

k = Anzahl der Spektralkomponenten

a_0, a_1, \dots, a_k und b_1, \dots, b_k als Fourierkoeffizienten, die sich aus der diskreten Fouriertransformation der Bezugspegelwerte ergeben.

Ersetzt man in der Formel (1) für den Abstand d die $y_b(i)$ durch diese trigonometrische Summe (4), so ergibt sich eine Abhängigkeit des Abstandes d von den Spektralkoeffizienten a_0, a_1, \dots, a_k und b_1, \dots, b_k des Bezugspegels,

$$d = \sum_{i=1}^n (y_1(i) - \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^k a_j \cos(j \cdot \omega \cdot i) + \sum_{j=1}^k b_j \sin(j \cdot \omega \cdot i) \right])^2 \quad (5)$$

wobei

$$A_0 = \frac{a_0}{2} ; \quad A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} ; \quad i = 1, \dots, k$$

die Amplituden und

$$\tan(\psi_i) = \frac{a_i}{b_i} ; \quad i = 1, \dots, k$$

die Phasenlagen der jeweiligen Spektralkomponenten sind.

Das bedeutet weiterhin, daß sich der Abstand d durch Variation von a_0, a_1, \dots, a_k und b_1, \dots, b_k und somit durch Variation der Amplitude und Phasenlage der einzelnen Spektralkomponenten des Bezugspegels minimieren läßt. Gesucht werden somit Spektralkoeffizienten, für die der Abstand d in Formel (5) ein Minimum ist. Es ist daher folgendes Minimierungsproblem zu lösen:

$$d_m = \text{Minimum } d(a_0, a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_k) \\ \text{mit } k = \text{Anzahl der Spektralkomponenten} \quad (6)$$

2.3 Realisierung des Verfahrens

Wie läßt sich eine solche Minimierung in der Praxis nun durchführen? Für einen Pegelkurvenausschnitt können in der Praxis ohne weiteres mehrere tausend Abtastwerte auftreten. Das würde nach der Minimierungsformel (6) ein Minimierungsproblem mit Tausenden zu minimierenden Variablen bedeuten. Dies ist sicher auch für moderne schnelle Rechner ein Problem.

Oft liegen die Abtastintervalle der Pegelkurven bei einer, fünf oder zehn Minuten. Diese hohen Abtastraten werden bei dem hier verwendeten Verfahren nicht benötigt. Bedenkt man, daß zur fehlerfreien Rekonstruktion einer Pegelkurve (HESSELMANN, 1982) die Abtastfrequenz f_a doppelt so groß wie die höchste in der Pegelkurve enthaltene Frequenz sein muß (d. h., die Abtastzeit halb so groß wie die kleinste in der Pegelkurve enthaltene Periode), so ergibt sich z. B. für eine Periodendauer von 1,0 Stunden eine Abtastzeit von $dt = 0,5$ Stunden.

Mit dieser Abtastzeit lassen sich Pegelkurven rekonstruieren, die Perioden länger als 1,0 Std. und somit wesentliche Tidekomponenten enthalten. Es ist daher bei vielen digitalen Pegelaufzeichnungen oder bei der Digitalisierung von Pegelbögen vollkommen ausreichend, sehr viel größere Abtastintervalle zu wählen als Abtastintervalle im Minutenbereich. Dies führt dann zu einer Reduzierung der Daten. Es ist zu überprüfen, ob die kurzperiodischen Komponenten für das jeweils anliegende Problem tatsächlich gebraucht werden. Dies muß von Fall zu Fall entschieden werden. Für die oft vorkommende Bestimmung der Tidescheitelwerte können solche kurzperiodischen Komponenten der Tidekurve von Bedeutung sein (KUNZ, KÖVES, 1986). Beschränkt man sich somit für das hier gezeigte Verfahren auf weniger Abtastwerte, vereinfacht sich das Minimierungsproblem (6), ohne das Ergebnis wesentlich zu beeinflussen, wie eigene Versuche gezeigt haben. Beschränkt man sich weiter auf die wichtigsten Spektralkomponenten (siehe Abb. 3), so läßt sich das Minimierungsproblem zusätzlich vereinfachen. Die wichtigsten Spektralkomponenten sind z. B. die Tidehauptkomponente mit einer Periodendauer von ca. 12,5 Stunden, die Spring- und Nipptide mit ca. 350-Stunden-Periode und einige andere, dem Pegel eigene Spektralkomponenten. Beschränkt man sich somit auf z. B. 5 Spektralkomponenten, so reduziert sich das Minimierungsproblem (6) zu

$$d_{\min} = \text{Minimum } d(a_0, a_{k_1}, \dots, a_{k_5}, b_{k_1}, \dots, b_{k_5}) \\ \text{mit } k_1, \dots, k_5 \text{ aus } 1, \dots, k$$

Die Gleichung (6) läßt sich dann mit einem PC und einem geeigneten Minimierungsverfahren schnell und sicher lösen. Der zum Testen benutzte Minimierungsalgorithmus „Conjugierte Gradientenmethode“ (LIEBIG, 1982) benötigt einen Startwert. Als Startwert wurden die Spektralwerte des Bezugspegels nach den Verschiebungen (2) und (3) verwendet. Zu beachten ist auch, daß nur ein lokales Minimum bestimmt werden kann. Die Bestimmung des globalen Minimums bereitet bei Funktionen mit mehreren Minima Schwierigkeiten. Es bliebe noch zu untersuchen, ob und unter welchen Voraussetzungen das hier konstruierte Minimierungspro-

blem (6) ein eindeutiges globales Minimum hat. Auch die Wahl des Abbruchkriteriums der iterativ arbeitenden Algorithmen muß sorgfältig überlegt werden. Näheres zu Problemen bei Minimierungsverfahren ist bei Dennis, 1983, nachzulesen. Die Implementierung eines Minimierungsverfahrens auf einem Rechner bereitet jedoch heute keine Probleme mehr. Moderne Programmiersprachen wie FORTRAN oder TURBO PASCAL erlauben eine einfache Programmierung des Verfahrens. Auch die weiteren hier benötigten mathematischen Methoden – wie Fouriertransformation oder Verschiebungen – lassen sich unter Benutzung von Standardsoftware sehr einfach mit einem Rechner lösen.

3. Berechnungsbeispiele

Die Leistungsfähigkeit des oben beschriebenen Spektralverfahrens wurde an verschiedenen Pegeln mit künstlich erzeugten Lücken getestet. Als Lückenpegel wurden die Pegel Cuxhaven, Hooge und Knock mit unterschiedlich großen Lücken benutzt. Als Bezugspegel dienten die Pegel Vogelsand, Brunsbüttel, Emshörn und Wittdün. Für den Pegel Cuxhaven wurde zunächst eine künstliche Lücke von ca. 3 Tiden erzeugt. Dies wurde durch Nullsetzen der Abtastwerte erreicht. Als Bezugspegel diente einmal der seeseitige Pegel Vogelsand und andererseits der weiter stromaufwärts gelegene Pegel Brunsbüttel. Beide Bezugspegel liegen etwa gleich weit vom Pegel Cuxhaven entfernt (ca. 25 km). Diese beiden Bezugspegel wurden ausgewählt, um festzustellen, ob für den Pegel Cuxhaven evtl. der seeseitige Bezugspegel besser geeignet ist als der weiter stromaufwärts gelegene Pegel Brunsbüttel. Weitere Berechnungen wurden mit größeren (17 Tiden) und kleineren Lücken ($\frac{1}{4}$ Tide) für Cuxhaven als Lückenpegel und Vogelsand als Bezugspegel durchgeführt, um eine Abhängigkeit der Anpassungsgüte von der Lückengröße festzustellen. Versuche wurden auch gemacht mit den Emspegeln Knock als Lückenpegel und Emshörn als Bezugspegel (ca. 20 km voneinander entfernt im Emsästuar) sowie dem nordfriesischen Pegel Hooge als Lückenpegel und Wittdün als Bezugspegel (ca. 5 km voneinander entfernt im Wattenmeer). Für den Pegel Hooge wurden zwei Ausfälle für Extremtiden simuliert, da gerade bei extremen Verhältnissen Ausfälle zu erwarten sind (Nr. 9 und 10 in Tabelle 1).

Um beurteilen zu können, welche Pegel mehr oder weniger als Bezugspegel geeignet

Tabelle 1: Testrechnungen mit künstlich erzeugten Lücken

Nr	Abb. Nr.	Lückenpegel	Bezugspegel	# Tiden	Mittel [cm]	SD [cm]	R
1	5	cux01	vog01	3	3.3	2.57	0.927
2	-	cux02	vog02	3	5.9	3.92	0.925
3	7	cux03	vog03	$\frac{1}{4}$	4.8	2.6	0.945
4	6	cux04	vog04	17	5.6	3.99	0.925
5	4	cux01	bru01	3	5.1	3.77	0.861
6	-	cux02	bru02	3	5.4	3.9	0.837
7	-	cux03	bru03	$\frac{1}{4}$	7.4	4.27	0.845
8	-	cux04	bru04	16	6.8	4.53	0.837
9	-	hoa01	wit01	6	4.5	2.98	0.998
10	-	hoa02	wit02	$\frac{1}{2}$	12.7	6.21	0.778
11	8	hoa03	wit03	2	2.5	1.98	0.999
12	-	kno01	emo01	2	7.3	4.67	0.809
13	-	kno02	emo02	1	11.2	7.53	0.799

sind, wurde der Zusammenhang von Lücken- und möglichem Bezugspegel durch einfache Regressionsrechnung geprüft. Die Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung der Mittelwerte der absoluten Abweichungen (Mittel), die die Güte der Anpassung darstellen, mit den Regressionskoeffizienten (R) von Bezugs- und Lückenpegeln im Bereich der Lücke.

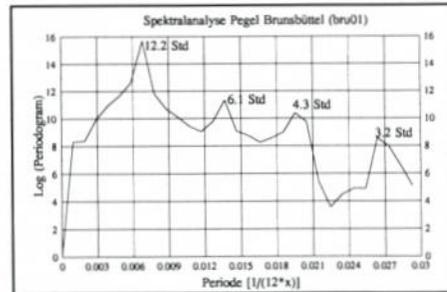
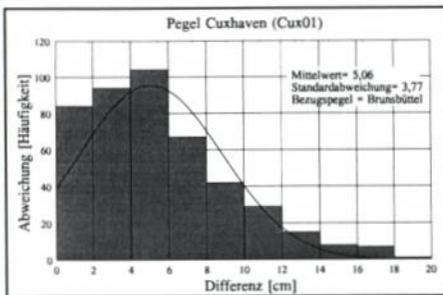
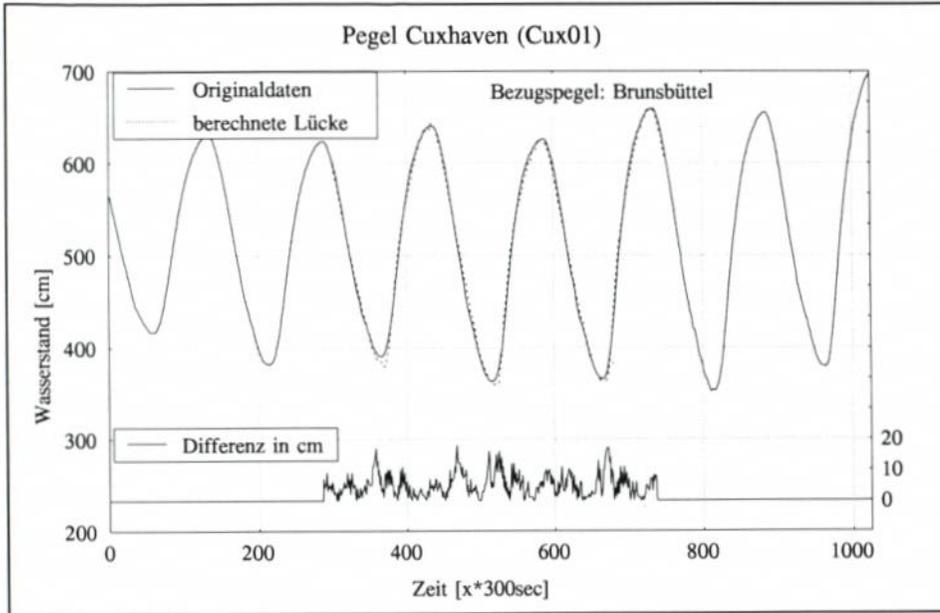
Der angegebene Regressionskoeffizient soll eine Entscheidungshilfe für die Auswahl eines geeigneten Bezugspegels sein. Wie zu vermuten war, ergibt ein guter Zusammenhang von Bezugs- und Lückenpegel einen kleinen Mittelwert und somit eine gute Anpassung der errechneten Lücke an die Originalwerte. Die Tabelle 1 zeigt weiterhin die Ergebnisse einiger Testrechnungen mit Pegeln im Emsästuar, im Elbeästuar und im nordfriesischen Wattenmeer. Neben dem Bezugs- und Lückenpegel ist die Größe der Lücke (\neq Tiden), der Mittelwert der absoluten Abweichungen (Mittel) sowie dessen Standardabweichung (SD) angegeben. Es fällt auf (was nicht unbedingt zu vermuten war), daß selbst größere Lücken kein schlechteres Ergebnis haben als kleinere. Dies läßt sich so erklären, daß bei großen Lücken auch mehr Spektralkomponenten erfaßt werden als bei kleineren Lücken. Erstreckt sich eine Lücke z. B. nur über eine Tide, so läßt sich der Einfluß der Spring- und Nipptide nach den entsprechenden Bemerkungen bei der Beschreibung des Verfahrens nicht erfassen. Für die Berechnung kleiner Lücken sollte deshalb die Breite der Ränder so gewählt werden, daß alle wesentlichen Spektralkomponenten erfaßt werden.

Für einige ausgewählte Berechnungen sind unter der Spalte „Abb. Nr.“ in der Tabelle 1 Hinweise zu den Abbildungen 4 bis 9 gegeben. Sie stellen die jeweiligen Ergebnisse ausführlicher dar. In diesen Abbildungen ist jeweils ein Vergleich der berechneten Lücke mit den Originaldaten, den Abweichungen sowie deren Häufigkeitsverteilung angegeben. Weiter ist ein Spektralplot und eine Tabelle mit den wesentlichen Spektralkomponenten angegeben.

Die Abbildung 4 (Bezugspegel Brunsbüttel) und 5 (Bezugspegel Vogelsand) zeigen die gleichen Lückensituationen mit Cuxhaven als Lückenpegel, jedoch mit verschiedenen Bezugspegeln. Die Lücke beträgt ca. 3 Tiden. Die Abtastzeit ist 5 Minuten, so daß bei den dort benutzten 1024 Werten mit ca. 6 Tiden die Spektralanalyse berechnet werden kann. Eine Minimierung der Komponente für die Spring- und Nipptide ist aber mit den zur Verfügung stehenden 6 Tiden in diesem Beispiel nicht möglich. Eine Verbesserung der Ergebnisse könnte durch die Benutzung einer längeren Zeitreihe erreicht werden.

Wie in dem Spektralplot und der Tabelle der Spektralwerte in Abbildung 4 zu ersehen ist, werden neben dem Gleichanteil weitere 4 Spektralkomponenten minimiert. Die Tabelle zeigt die Werte für die Spektralkomponenten des Bezugspegels, die der berechneten Lücke (berechneter Pegel), die Originalwerte des Pegels Cuxhaven ohne Lücke sowie die Amplituden, die sich aus den Spektralkomponenten ergeben. Das Ziel ist es, die Werte der Spektralkomponenten des Bezugspegels möglichst nahe an die Werte der Spektralkomponenten des Originalpegels heranzubringen. Ist z. B. die Komponente für $k = 0$ (Gleichanteil) für den Bezugspegel gleich 1032, so ergibt sich nach der Minimierung ein Wert von 1026 für den berechneten Pegel, der mit dem Wert für den Originalpegel übereinstimmt. Ähnliches gilt entsprechend für die anderen Komponenten. Vergleicht man die Abbildung 4 mit Abbildung 5, so liefert die Berechnung mit dem seeseitigen Pegel Vogelsand etwas bessere Ergebnisse. Der Mittelwert bei der Rechnung mit dem Bezugspegel Vogelsand ist 3,2 cm. Für die Berechnung mit dem Bezugspegel Brunsbüttel ist er 5,0 cm. Da beide Bezugspegel etwa gleich vom Lückenpegel Cuxhaven entfernt sind, ist das schlechtere Ergebnis auf den stärkeren Einfluß des Oberwassers am Pegel Brunsbüttel zurückzuführen.

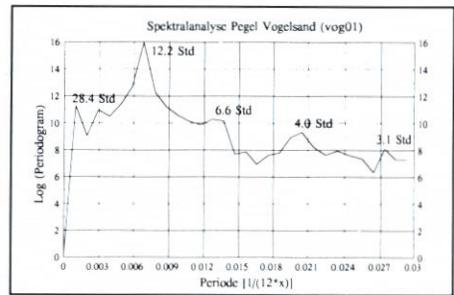
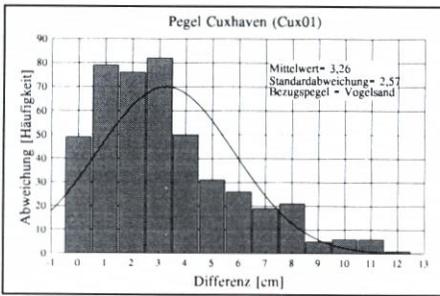
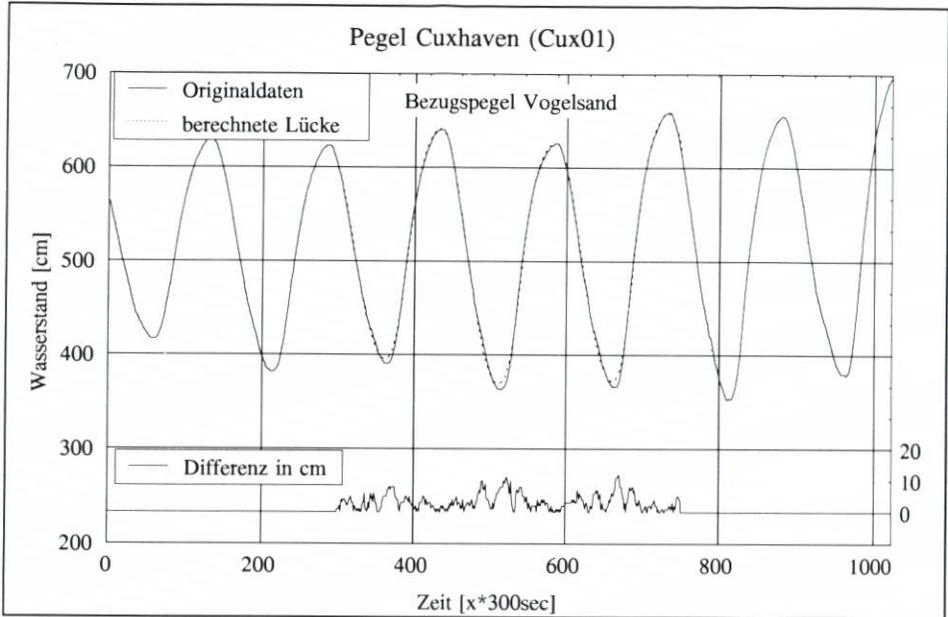
Die Abbildung 6 zeigt eine Berechnung mit einem längeren Ausfall über etwa 17 Tiden. Obwohl die Lücke wesentlich größer ist als diejenige in Abbildung 4 und 5, unterscheiden sich die Mittelwerte der Abweichungen nur unwesentlich. Bei dieser längeren Lücke wird



Spektralwerte a_k, b_k		Pegel: Cuxhaven			Bezugspegel: Brunsbüttel			Original Pegel		
k	Periode [Std]	Bezugspegel		Ampl. [cm]	Berechneter Pegel		Ampl. [cm]	Original Pegel		Ampl. [cm]
		a_k	b_k		a_k	b_k		a_k	b_k	
0	Gleichanteil	1032	0	516	1026	0	513	1026	0	513
7	12.2	110.3	24.6	113	99.3	-63.87	118	100.1	-64.67	119
14	6.1	1.15	-13.1	13	9.32	-9.43	13	8.16	-9.07	12
20	4.3	1.79	-7.91	8	-8.74	-0.585	8.7	-8.1	-2.6	8.5
27	3.2	-2.9	-1.28	3	3.39	-0.70	3.5	2.1	-0.93	2.3

Ampl. = Amplitude der entsprechenden Spektralkomponente

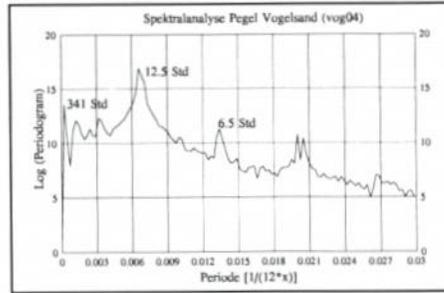
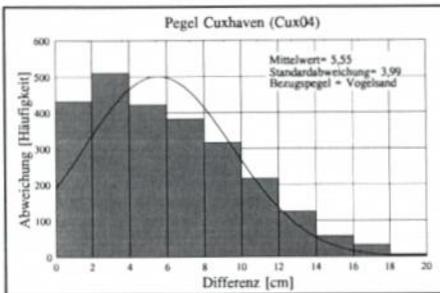
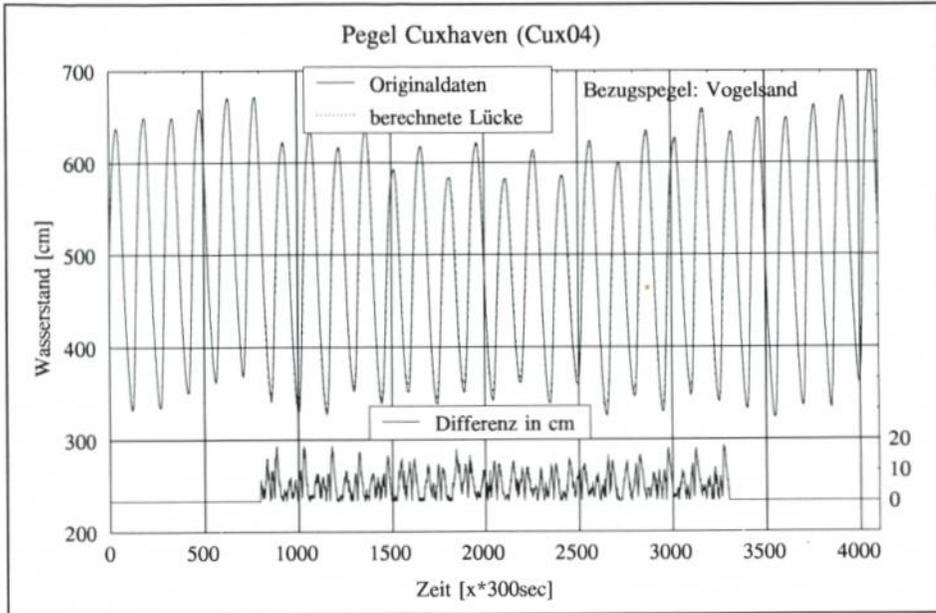
Abb. 4: Pegel Cuxhaven; Bezugspegel Brunsbüttel



Spektralwerte a_k, b_k		Pegel: Cuxhaven			Bezugspegel: Vogelsand					
k	Periode [Std]	Bezugspegel			Berechneter Pegel			Original Pegel		
		a_k	b_k	Ampl. [cm]	a_k	b_k	Ampl. [cm]	a_k	b_k	Ampl. [cm]
0	Gleichanteil	1016	0	508	1027	0	513	1027	0	513
3	28.4	6.48	4.94	8.14	3.13	5.58	6.4	2.86	5.67	6.3
7	12.2	101.3	-81.6	130.1	119.8	-37.01	125.4	119.7	-36.9	125.3
17	6.6	2.8	-7.8	8.28	5.48	-4.94	7.1	6.25	-4.49	7.7
21	4.0	4.6	0.24	4.6	0.57	3.37	3.41	2.13	4.12	4.6
28	3.1	0.14	-2.89	2.9	1.48	-1.82	2.4	1.45	-2.46	2.8

Ampl. = Amplitude der entsprechenden Spektralkomponente

Abb. 5: Pegel Cuxhaven; Bezugspegel Vogelsand



Spektralwerte a_k, b_k		Pegel: Cuxhaven			Bezugspegel: Vogelsand			Bezugspegel: Vogelsand		
k	Periode [Std]	Bezugspegel			Berechneter Pegel			Original Pegel		
		a_k	b_k	Ampl. [cm]	a_k	b_k	Ampl. [cm]	a_k	b_k	Ampl. [cm]
0	Gleichanteil	976	0	488	996	0	498	996	0	498
1	341	19.1	2.01	19.2	20.5	2.19	20.6	21.2	2.09	21.3
5	68	4.42	-8.42	9.5	5.4	-8.5	10.1	5.6	-8.7	10.4
13	26	10.04	2.49	10.3	9.3	3.9	10.1	8.9	4.4	9.9
27	12.5	81.4	-65.2	104	96.5	-26.7	100	96.1	-30.1	100
55	6.5	6.27	0.12	6.3	4.5	5.9	7.4	6.3	6.7	9.2

Ampl. = Amplitude der entsprechenden Spektralkomponente

Abb. 6: Pegel Cuxhaven; Bezugspegel Vogelsand

auch die Spektralkomponente der Spring- und Nipptide (Periode 341 Std.) minimiert. Insgesamt werden hier 6 Komponenten minimiert. Der Mittelwert der Abweichungen ist 5,5 cm. Die Häufigkeitsverteilung zeigt, daß die Abweichungen zumeist unterhalb 8 cm liegen. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, daß die größten Abweichungen im abfallenden oder ansteigenden Ast der Tidekurve liegen. Die Scheitelwerte werden jedoch mit sehr viel kleineren Abweichungen berechnet. Dieses Ergebnis zeigt sich auch bei den anderen Testrechnungen mit diesem Verfahren. Es ist somit auch für die Berechnung von Scheitelwerten geeignet.

Ein Beispiel für einen sehr kurzzeitigen Ausfall über etwa $\frac{1}{4}$ Tide zeigt die Abbildung 7. Hier können aufgrund der kurzen Zeitreihe nur 2 Spektralkomponenten minimiert werden. Der Gleichanteil wird von 478 cm auf 476 cm verschoben. Die Komponente mit einer Periode von 12,5 Std., die der Haupttide entspricht, wird auch entsprechend angepaßt. Trotz des guten Ergebnisses mit einem Mittelwert von 4,8 cm könnte mit einer längeren Zeitreihe, die noch weitere Spektralkomponenten berücksichtigt, ein besseres Ergebnis erzielt werden.

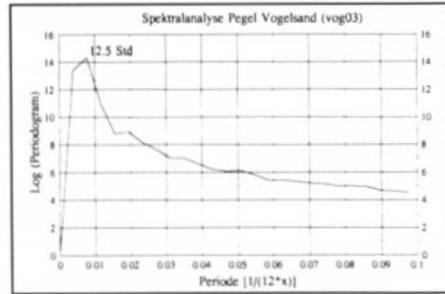
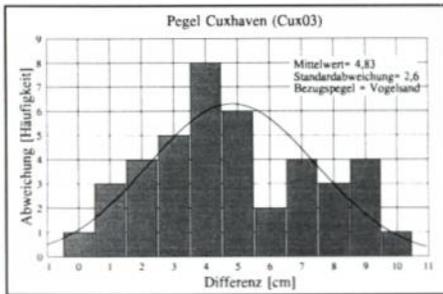
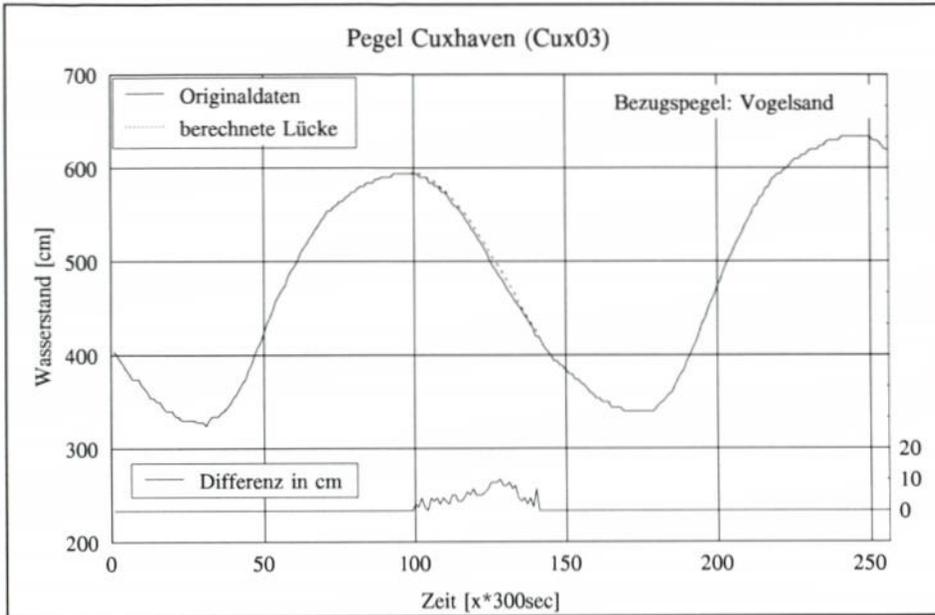
Das letzte Beispiel (Abb. 8) zeigt das beste Ergebnis mit einem Mittelwert von 2,5 cm, wobei der größte Teil der Abweichungen unter 4 cm liegt. Der Bezugspegel Wittdün liegt zum Lückenpegel Hooge nur etwa 5 km entfernt im Wattenmeer. Der Regressionskoeffizient ist sehr hoch und die Windverhältnisse dürften bei beiden Pegeln etwa gleich sein. Die Länge der Zeitreihe gestattet die Minimierung der wesentlichen Spektralkomponenten wie Gleichanteil, Spring- und Nipptide, Haupttide und der Komponenten mit einer Periode von etwa 27 Std. und 6,5 Std. Für extreme Tideverhältnisse werden zwei Beispiele berechnet (Nr. 9 und 10 in Tabelle 1 und Abb. 9). Dort ist zu sehen, daß im Bereich erhöhter Wasserstände die Abweichungen um 4,5 cm im Mittel liegen.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß für die Auswahl des Bezugspegels folgendes beachtet werden sollte:

- Der Regressionskoeffizient von Bezugs- und Lückenpegel sollte in einem Bereich vor und nach der Lücke ausreichend groß genug sein (größer 0,9).
- Der Bezugspegel sollte nahe zum Lückenpegel liegen, damit der Einfluß der Morphologie auf den Tideverlauf möglichst gleich ist. Im allgemeinen findet man im Umkreis von 50 km einen Bezugspegel, der geeignet ist.
- Bei Pegeln in den Ästuaren sollte darauf geachtet werden, daß der Einfluß des Oberwassers auf Lücken- und Bezugspegel nicht zu stark differiert. Das heißt, für einen Lückenpegel weit außerhalb eines Ästuars sollte auch ein weiter außerhalb liegender Bezugspegel gewählt werden. Entsprechendes gilt für Pegel weiter stromaufwärts.
- Es sollte eine genügend lange Zeitreihe für den Bezugspegel vorhanden sein, um möglichst viele wesentliche Spektralkomponenten zu erfassen.

Insgesamt ist das Verfahren für Pegel im Wattenmeer, aber auch in den Ästuaren geeignet. Es lassen sich sowohl kleine Lücken mit einer Zeitdauer unter einer Tide als auch Lücken bis zu einigen hundert Tiden gleichermaßen gut schließen. Es wurden Versuche mit Lücken von etwa 100 Tiden gemacht, die etwa die gleichen Ergebnisse brachten wie die hier gezeigten. Berechnungen mit zwei oder mehr Bezugspegeln könnten eventuell bessere Ergebnisse liefern. Zu untersuchen bliebe noch das Verhalten des Verfahrens bei Pegeln im Oberwasserbereich der Tideflüsse. Die Ergebnisse bei Extremtiden zeigen keine Unterschiede zu den Normaltiden. Das Verfahren ist daher auch für Verhältnisse geeignet, in denen Ausfälle am ehesten zu erwarten sind.

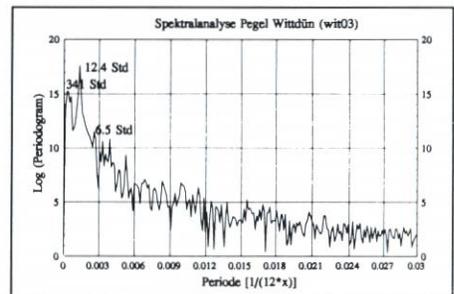
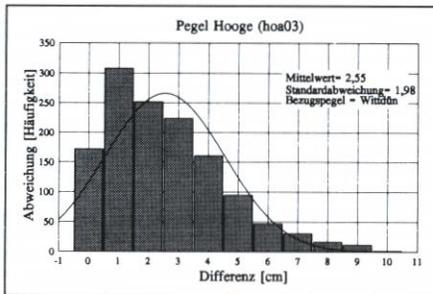
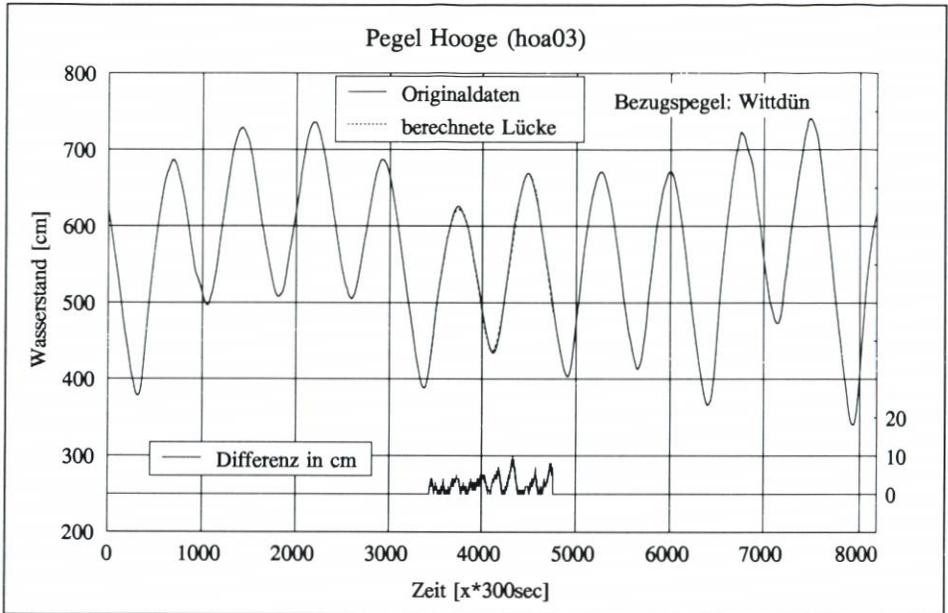
Die Realisierung des Verfahrens auf einem Rechner bereitet keinerlei Schwierigkeiten, da nur mathematische Standardalgorithmen verwendet werden. Die hier gezeigten Ergebnisse wurden mit einem PC-386 berechnet. Zum Testen des Algorithmus wurde ein Programm in



Spektralwerte a_k, b_k		Pegel: Cuxhaven			Bezugspegel: Vogelsand					
k	Periode [Std]	Bezugspegel			Berechneter Pegel			Original Pegel		
		a_k	b_k	Ampl. [cm]	a_k	b_k	Ampl. [cm]	a_k	b_k	Ampl. [cm]
0	Gleichanteil	956	0	478	953	0	476	952	0	476
2	12.5	-33.4	-136.1	140	12.7	-138.2	138	11.3	-137.8	138

Ampl. = Amplitude der entsprechenden Spektralkomponente

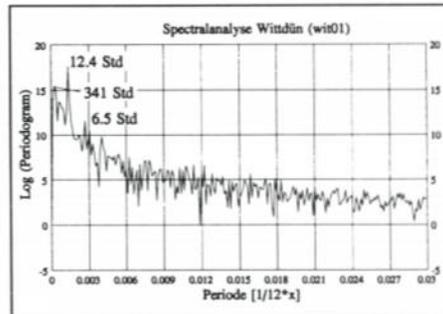
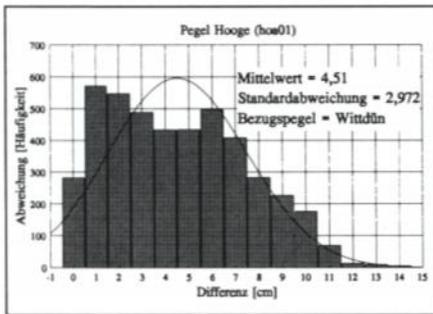
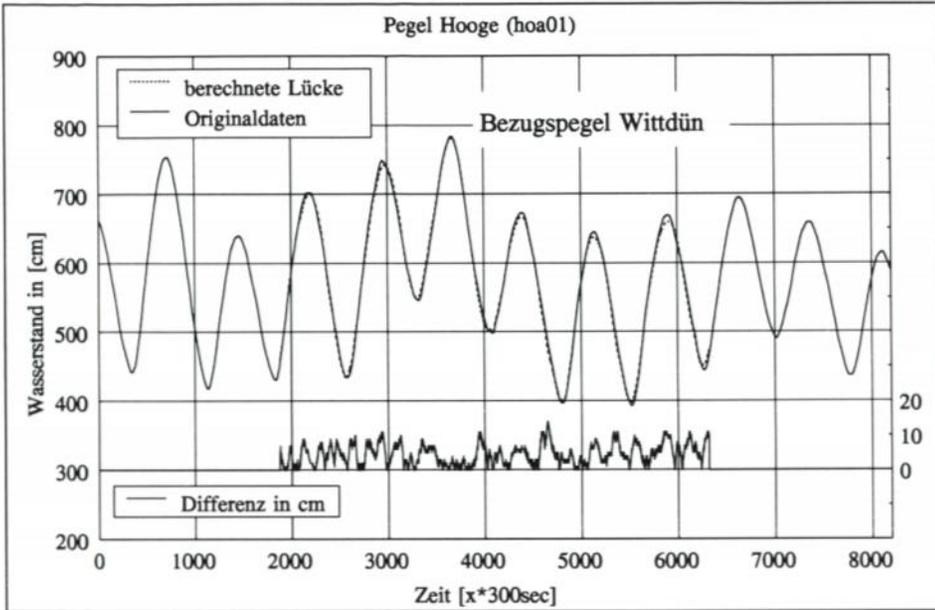
Abb. 7: Pegel Cuxhaven; Bezugspegel Vogelsand



Spektralwerte a_k, b_k		Pegel: Hooge			Bezugspegel: Wittdün			Bezugspegel: Wittdün		
k	Periode [Std]	Bezugspegel			Berechneter Pegel			Original Pegel		
		a_k	b_k	Ampl. [cm]	a_k	b_k	Ampl. [cm]	a_k	b_k	Ampl. [cm]
0	Gleichanteil	1120	0	560	1129	0	564	1130	0	564
2	341	-31	-0.54	31	-33.55	-0.77	33	-33.3	-0.73	33
5	27.3	-25.1	1.99	25	-27.2	2.11	27	-27.3	2.13	27
11	12.4	103.2	3.92	103	112.2	8.02	112	112.2	8.1	112
21	6.5	4.92	0.092	4.9	5.76	1.86	6.1	5.9	2.26	6.3

Ampl. = Amplitude der entsprechenden Spektralkomponente

Abb. 8: Pegel Hooge; Bezugspegel Wittdün



Spektralwerte a_k, b_k		Pegel: Hooge			Bezugspegel: Wittdün					
k	Periode [Std]	Bezugspegel			Berechneter Pegel			Original Pegel		
		a_k	b_k	Ampl. [cm]	a_k	b_k	Ampl. [cm]	a_k	b_k	Ampl. [cm]
0	Gleichanteil	1146	0	573	1150	0	575	1150	0	575
2	341	10	-29	30.6	11	-31	32.9	11.1	-30.7	32.7
5	27.3	-3.7	16.2	16.6	-4.1	16.9	17.4	-4.9	16.4	17.2
11	12.4	94	-47	105.1	103	-47	113	104.7	-47.3	114
22	6.5	-3.0	4.5	5.4	-4.7	3.5	5.8	-6.5	2.2	6.8

Ampl. = Amplitude der entsprechenden Spektralkomponente

Abb. 9: Pegel Hooge; Bezugspegel Wittdün

der Programmiersprache TURBO-PASCAL entwickelt. Es ist fensterorientiert und sehr einfach mit einer Maus zu bedienen. Für die Bedienung sind auch keine Fachkenntnisse über die oben beschriebenen mathematischen Methoden nötig. Für sehr große Lücken sollte ein schneller Rechner mit Co-Prozessor bzw. ein PC-486 mit hoher Taktrate verwendet werden. Für die hier gezeigten Ergebnisse lagen die Rechenzeiten unter 5 Minuten.

Diese Arbeit entstand im Rahmen des LAWA-AK „Küstenpegel“ mit Begleitung durch die Untergruppe „Schließen von Pegellücken“, die aus den Herren Dipl.-Ing. Benn, Kiel, Dipl.-Ing. Blasi, Koblenz, Dipl.-Ing. Neemann, Kiel, Dipl.-Ing. Mohrmann, Hamburg, und Dipl.-Ing. Kaiser, Norderney, besteht. Der Autor dankt ihnen für die fachliche Unterstützung. Die Erstellung des Rechnerprogramms durch Werkvertrag wurde durch Mittel der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, ermöglicht. Die Programmierarbeiten leistete Herr Enno Runne aus Norden.

4. Schriftenverzeichnis

- DENNIS, JOHN E.: Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1983.
- HESSELMANN, N.: Digitale Signalverarbeitung. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1982.
- JENSEN, J., MÜGGE, H. E., SCHÖNFELD, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. Die Küste, H. 53, 1992.
- KUNZ, H., KÖVES, L.: Berechnung der Tidescheitelwerte aus digitalen Wasserstandsdaten mit Kleinrechnern. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Heft 6/6, 1986.
- LIEBIG, W.: Numerische Lösung von mehrfach nichtlinearen Ausgleichsproblemen. Jahresbericht der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Band 33, 1982.
- MÜGGE, H. E.: Anpassungsfunktion für Thw-Scheitelwerte. Wasser und Boden, 8, 1992.