

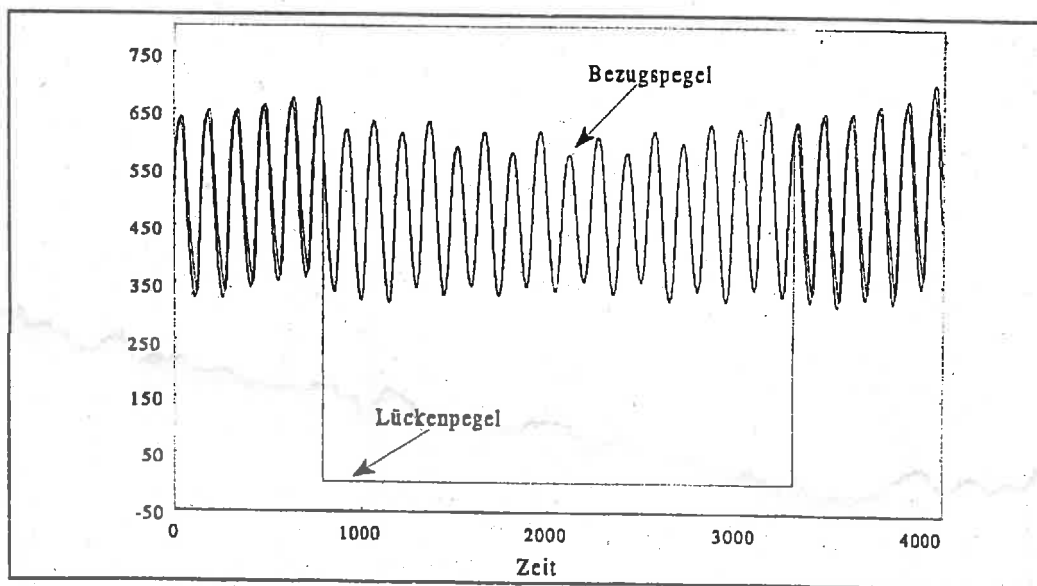
## Empfehlungen

zum Schließen von Lücken in  
Wasserstandsganglinien des  
Tideaußengebietes





# Empfehlungen zum Schließen von Lücken in Wasserstandsganglinien des Tideaußengebietes





---

**Empfehlungen**  
**zum Schließen von Lücken in Wasserstandsganglinien**  
**des Tideaußengebietes**

bearbeitet vom LAWA-Arbeitskreis „Küstenpegel“

Stand 1997

Herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)  
Vorsitz: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin /  
Ministerium für Umweltschutz, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg  
und dem Bundesminister für Verkehr

1. Auflage: Berlin, Februar 1998

Für den Druck wurde Recyclingpapier sowie umweltfreundliches, chlorfrei gebleichtes Papier  
verwendet.

Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des Herausgebers  
gestattet.

Die vorliegende Veröffentlichung ist zu einem Preis von 12,00 DM zu beziehen über den:

**Kulturbuchverlag Berlin GmbH**

**Sprosserweg 3, 12351 Berlin**

Tel: 030/661 8484; Fax.: 030/661 7828

ISBN - Nr.: 3-88961-219-9

---

Folgende Herren haben an der Erstellung der Schrift mitgewirkt:

Dipl.-Ing. Benn	Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
Dipl.-Ing. Blasi, MSc, DIC	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dipl.-Math. Liebig	Niedersächsisches Landesamt für Ökologie - Forschungsstelle Küste -
Dipl.-Ing. Mohrmann	Strom- und Hafengebäudeamt Hamburg
Dipl.-Ing. Neemann	Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	05
<b>1.</b> Veranlassung und Einführung in die Problematik.....	05
<b>2.</b> Einfache mathematische Verfahren .....	05
2.1 Manuelle Verbindung der Ganglinienabschnitte .....	06
2.2 Lineare Interpolation.....	06
2.3 Einpassen benachbarter Ganglinienabschnitte .....	06
2.4 Differenzenganglinien .....	06
<b>3.</b> KFKI - $\mu$ - Verteilung.....	07
<b>4.</b> Husumer Regressionsverfahren.....	10
<b>5.</b> Spektralverfahren .....	13
<b>6.</b> Wertung der Verfahren und Empfehlung .....	18
<b>7.</b> Literatur.....	19

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Datenlücke mit Bezugspegel.....	05
Abb. 2-1	Schließen von Lücken mittels Differenzenganglinien.....	06
Abb. 3-1	Dichte- und Verteilungsfunktion der log. Normalverteilung und der KFKI- $\mu$ -Verteilung (nach Mügge, 1992).....	08
Abb. 3 -2	Prinzip der Lückenschließung über Eintrittswahrscheinlichkeiten am Beispiel der Pegel Cuxhaven und Büsum (nach Mügge, 1992) .....	09
Abb. 3 -3	Verteilungsfunktion der Wasserstandsdaten des Pegels Emshörn (nach Jensen, 1994).....	10
Abb. 4 -1	Teilung der Flut- und Ebbeäste einer Tide in 100 gleiche Teile .....	11
Tab. 4 /1	Regressionsverfahren von 2 Pegeln mit deren Ausgangswerten .....	12
Tab. 4 /2	Mittlere Abweichung und Standardabweichung verschiedener Tiden an benachbarten Pegeln.....	13
Abb. 5 -1	Abstandsdefinition Lückenpegel und Bezugspegel .....	14
Abb. 5 -2	Spektralwerte eines Bezugspegels (Beispiel) .....	14
Tab. 5 /1	Testrechnungen mit künstlich erzeugten Lücken.....	17



### Zusammenfassung

Die hier vorliegende Empfehlung beschäftigt sich mit der Schließung von Lücken in Wasserstandsganglinien von Tideaußenpegeln an Standorten, an denen die Tide frei aus- und einschwingen kann. Sie wurde vom LAWA-AK „Küstenpegel“ erarbeitet. Es wurden verschiedene Methoden auf ihre Eignung geprüft und auf ihre Anwendbarkeit untersucht. Methoden, welche sich als geeignet herausstellten, wurden mit Beispielen dokumentiert. Nach der nahezu klassischen **Visuellen Kurvenergänzung** kristallisierten sich weitere Methoden heraus. Es handelt sich dabei um das **Husumer Regressionsverfahren** sowie ein im Rahmen dieser Empfehlung entwickeltes **Spektralverfahren**. Das Schließen von Lücken mit der **KFKI- $\mu$ -Verteilung** brachte keinen Erfolg. Die Ergebnisse von Berechnungen mit dem Husumer Regressionsverfahren und dem Spektralverfahren an künstlich erzeugten Lücken 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. Die Verfahren lassen sich leicht auf einem PC-Rechner realisieren. Die Bezugsquellen für das

Programm zur Anwendung des Spektralverfahrens sind auf S. 18 aufgeführt. Den Schluß bildet eine Wertung der Verfahren mit einer Empfehlung zur Anwendung.

#### 1. Veranlassung und Einführung in die Problematik

Die Technik der digitalen Registrierung von Tidedaten in engem Zeittakt gestattet den Nutzern, z.B. aus Schifffahrt, Vermessung und Hydrologie, ihre Arbeiten mit höherer Genauigkeit in kürzerer Zeit und damit rationeller auszuführen. Voraussetzung dafür ist eine lückenlose Bereitstellung der Daten. Trotz sorgfältiger Wartung der Pegel läßt es sich jedoch nie ganz vermeiden, daß Lücken in den Aufzeichnungen entstehen. Diese Lücken gilt es zu schließen (s. Pegelvorschrift Stammtext 4.4./ (2)). Bisher standen dafür nur manuelle Verfahren zur Verfügung, die aber erhebliche

Unsicherheiten und Ungenauigkeiten aufwiesen. Die Anforderungen der Nutzer sind jedoch in den vergangenen Jahren so gestiegen, daß Verfahren mit höherer Genauigkeit unumgänglich wurden.

Zur Ermittlung von fehlenden Scheitelwerten wurden bisher verschiedene Verfahren eingesetzt (Jensen et al., 1992; Mügge, 1992; LAWA Arbeitskreis "Küstenpegel" 1990). Der Ersatz einer gesamten Datenlücke (Abb. 1-1), die auch mehrere Tiden, Wochen oder Monate umfassen kann, bereitet jedoch größere Schwierigkeiten und läßt sich mit diesen Methoden nicht mehr sinnvoll durchführen.

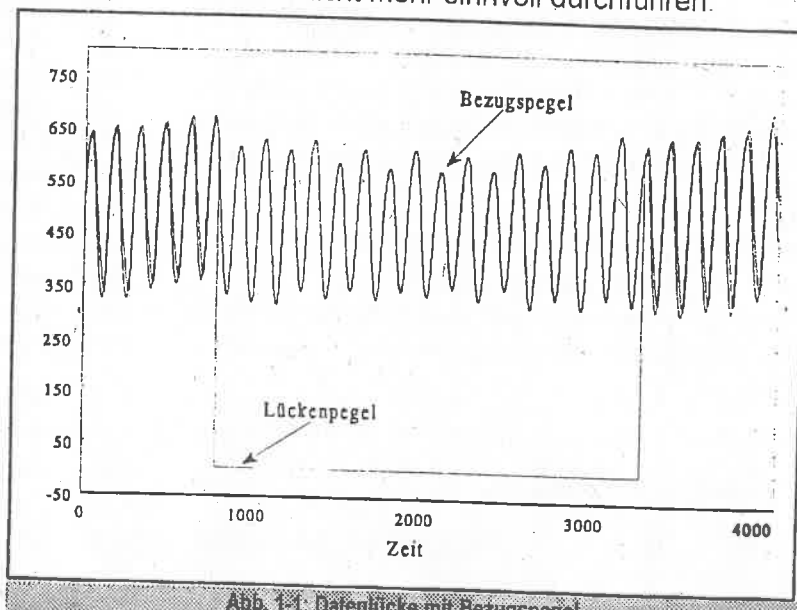


Abb. 1-1: Datenlücke mit Bezugspegel

Die eingangs genannten Anforderungen der Nutzer verlangen einen lückenlosen Datensatz von hoher Qualität, so daß Verfahren mit höherer Genauigkeit unumgänglich werden.

Die Verfahren wurden unter der Annahme entwickelt und gewertet, daß die Tide frei aus- und einschwingen kann. An anderen Stellen, z.B. an Sielaußentiefs, sind die Verfahren nur bedingt geeignet.

#### 2. Visuelle Kurvenergänzung

Die visuelle Kurvenergänzung bietet die Möglichkeit, kurze Lücken manuell zu ergänzen. Es empfiehlt sich, dieses Verfahren nur für Lücken mit einer maximalen Dauer von einer halben Tide anzuwenden. Hierzu können folgende Methoden eingesetzt werden:

## 6 Empfehlung zum Schließen von Lücken in Wasserstandsganglinien des Tideaußengebietes

### 2.1 Manuelle Verbindung der Ganglinienabschnitte

Die registrierten Ganglinienabschnitte werden manuell entweder auf Diagrammpapier oder an einem interaktiven graphischen Bildschirm durch eine zügige Linie verbunden. Bei der Verwendung von Diagrammpapier werden die gesuchten Wertepaare (Höhe/Zeit) visuell bestimmt und über die Tastatur in die Meßwertdatei eingetragen. Bei der Arbeit an einem graphischen Bildschirm übernimmt ein Programm die Wertebestimmung und deren Überführung in eine Datei.

### 2.2 Lineare Interpolation

Das Verfahren unterscheidet sich von 2.1 nur dadurch, daß nur einige wenige Wertepaare (Stützpunkte) eingegeben werden und die dazwischen liegenden Werte vom Programm interpoliert und in eine Datei übertragen werden.

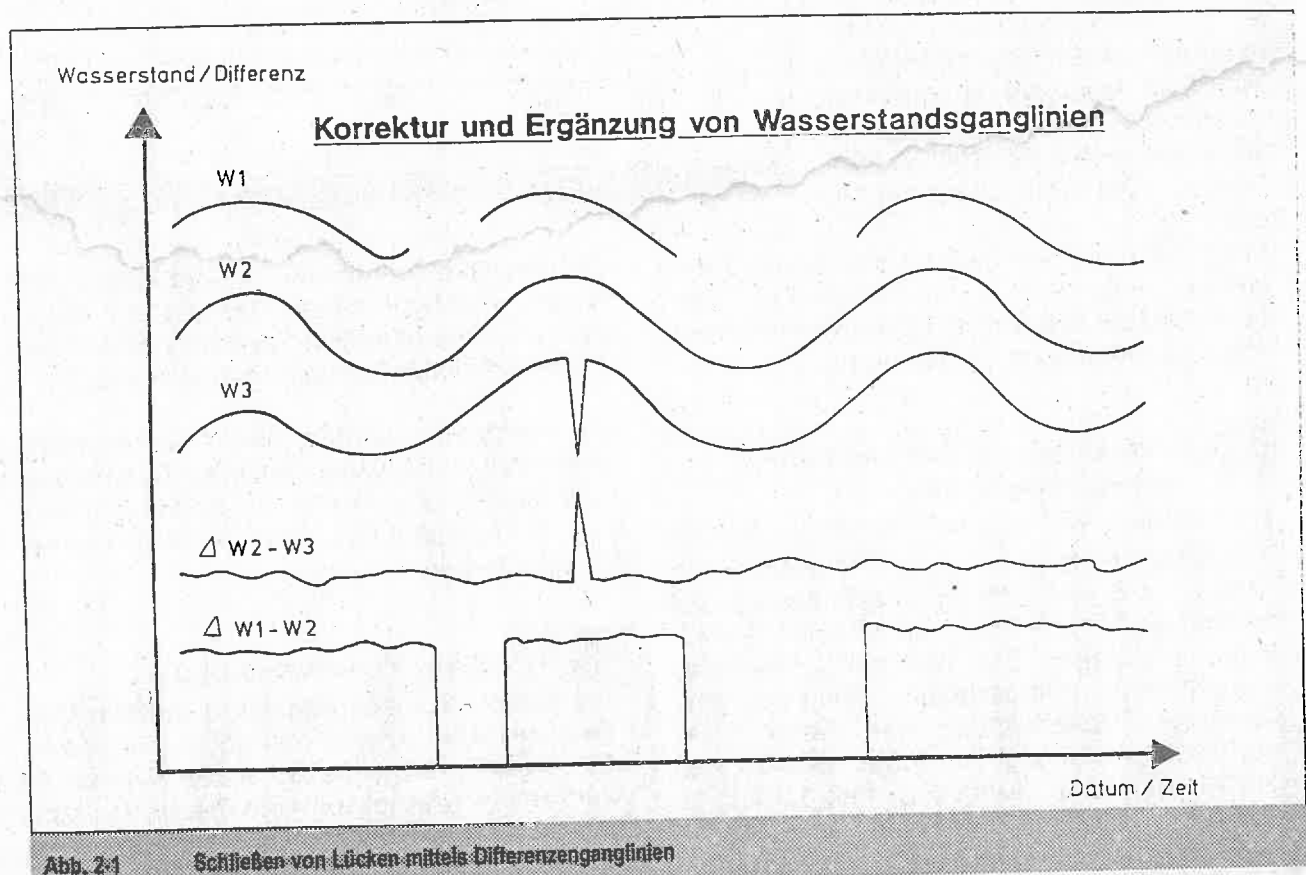
### 2.3 Einpassen benachbarter Ganglinienabschnitte

Am Bildschirm werden geeignete benachbarte Ganglinienabschnitte ausgewählt und so in die

Lücke eingepaßt, daß die Übergänge zu den registrierten Abschnitten monoton steigend oder fallend verlaufen. Gegebenenfalls sind im Übergangsbereich zusätzlich manuelle Anpassungen erforderlich.

### 2.4 Differenzganglinien

In den der Lücke benachbarten Ganglinienabschnitten werden Differenzen zwischen der Ganglinie des Lückenpegels und der eines geeigneten benachbarten Pegels (Bezugspegel) errechnet und als Ganglinie aufgetragen. Durch Einbeziehung weiterer Bezugspegel wird das Ergebnis u.U. verbessert. Diese Differenzganglinie wird unter Verwendung der 2. Differenzganglinie in die Lücke hinein extrapoliert (s. Abb. 2-1). Die Ergänzung ist u.U. nicht linear. Die Berücksichtigung der Tideschwingung sowie eines gegebenenfalls vorhandenen Binnen- oder Oberwassereinflusses verbessert das Ergebnis zusätzlich. In einem Tidestromsystem kann die Sicherheit der Lückenschließung durch die Heranziehung von ober- und unterstrom gelegener Pegel verbessert werden.



Alle Verfahren arbeiten rechnergestützt und interaktiv. In Abb. 2-1 ist das Prinzip der Bildschirmanzeige dargestellt. Für UNIX-Rechner ist ein Programm bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz erhältlich. Die PC-Version wird derzeit entwickelt. Es empfiehlt sich, das Ergebnis iterativ mit einem anderen o.a. Verfahren auf Plausibilität zu überprüfen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen, wenn damit die Genauigkeit gesteigert werden kann. Schließt die Lücke einen Scheitelwert ein, so empfiehlt es sich, den Scheitelwert getrennt zu berechnen und als Stützpunkt zu verwenden.

Darüberhinaus sind die Verfahren geeignet, registrierte Ganglinienabschnitte auf Plausibilität zu überprüfen und gegebenenfalls fehlerhafte Abschnitte zu verbessern.

### 3. Die KFKI- $\mu$ -Verteilung

Im Gegensatz zu den bekannten Verteilungsfunktionen wie Normal-, Pearson-Typ III-, log Pearson-Typ III-, Gumbel-, log Gumbel-, Exponential- und Jenkinson-Verteilung, um nur die bekanntesten zu nennen, nimmt die KFKI- $\mu$ -Verteilung eine gewisse Sonderstellung ein. Die genannten Verteilungsfunktionen beschreiben die statistische Einordnung von seltenen Ereignissen. Dies wiederum ermöglicht mit Hilfe von Anpassungsfunktionen die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Beobachtungswerte. Durch Extrapolation kann dann auf außergewöhnliche Ereignisse mit bestimmten Wiederkehrintervallen geschlossen werden. Die Besonderheit der KFKI- $\mu$ -Verteilung besteht darin, daß sie speziell für die Beschreibung von Tidescheitelwasserständen entwickelt wurde (Mügge, 1992). Sie erfüllt unter anderem die Forderung einer guten Repräsentanz aller gemessenen Scheitelwerte einschließlich der extremen Ereignisse sowie eine geringe mittlere Abweichung zwischen den gemessenen Werten und der Anpassungsfunktion. Ferner besteht die Möglichkeit der Optimierung unter Berücksichtigung der charakteristischen Eigenschaften der entsprechenden Zeitreihe.

Zur Anwendung der KFKI- $\mu$ -Verteilung auf eine bestimmte Zeitreihe wird zunächst die

empirische Wahrscheinlichkeit nach WEIBULL für jeden Meßwert ermittelt. Danach werden die einzelnen Meßwerte entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeit in ein rechtwinkliges Koordinationssystem eingetragen. Die Abszisse des Koordinatensystems ist logarithmisch und die Ordinate nach dem Integral der Gaußschen Normalverteilung unterteilt. Die Ordinate beinhaltet die Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Merkmalswerte, welche auf der Abszisse aufgetragen werden.

Die so aufgetragenen Werte, z.B. Tidehochwasserstände, folgen sehr gut einem Kurvenzug, der durch die Funktion

$$y = \operatorname{arsinh} x = \ln (x + \sqrt{x^2 + 1})$$

beschrieben werden kann.

Je nach Art der zu untersuchenden Zeitreihe und der jeweiligen Pegel ist das Koordinatensystem x-y um den Winkel  $\mu$  zu drehen. Das gedrehte Koordinationssystem trägt die Bezeichnung x'-y' und die oben genannte Funktion lautet:

$$y' = \operatorname{arsinh} x' = \ln (x' + \sqrt{x'^2 + 1})$$

Der Mittelpunkt um den die Drehung erfolgt, ergibt sich aus dem geometrischen Mittel der Meßwerte der zu betrachtenden Zeitreihe und der 50%-Linie der y-Achse.

Die Abb. 3-1 zeigt die KFKI- $\mu$ -Verteilung und deren Vergleich zur log. Normalverteilung.

Die Dichtefunktionen im oberen Teil der Abbildung machen den Unterschied zwischen der log. Normalverteilung und der KFKI- $\mu$ -Verteilung am deutlichsten. Die höhere Dichte über den Bereich um den Mittelwert kennzeichnet die KFKI- $\mu$ -Verteilung. Bei den Verteilungsfunktionen wird dieser Unterschied nicht so deutlich. Ist die Ordinate jedoch nach dem Integral der Gaußschen Verteilung unterteilt, so wird der Unterschied deutlicher. Die log. Normalverteilung stellt sich als Gerade dar, der Fechner-Geraden. Die KFKI- $\mu$ -Verteilung zeigt den Verlauf der arsinh-Funktion.

8 Empfehlung zum Schließen von Lücken in Wasserstandsganglinien des Tideaußengebietes

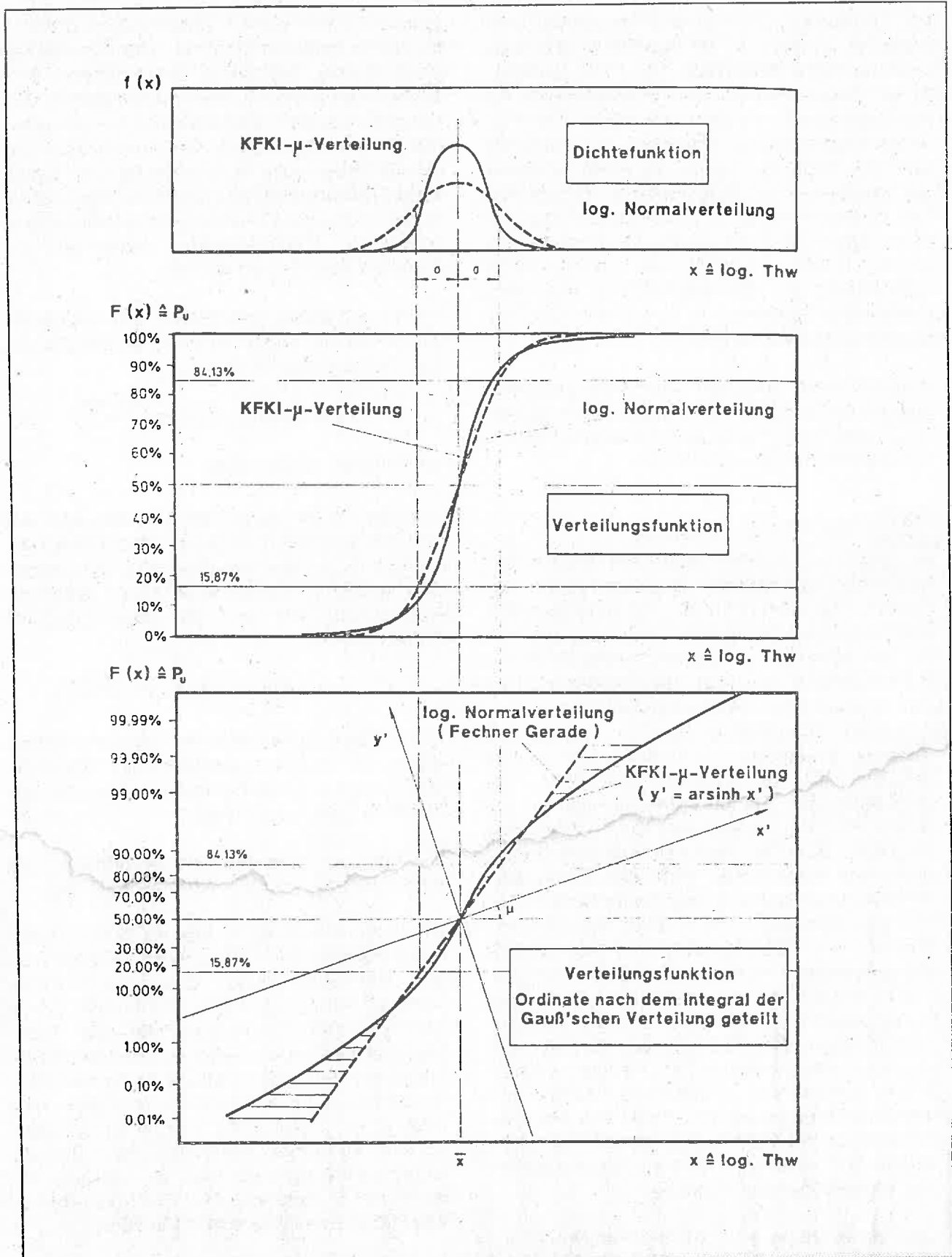


Abb. 3-1 Dichte- und Verteilungsfunktion der log. Normalverteilung und der KFKI- $\mu$ -Verteilung (nach Mugge, 1992)

Die Anwendung der KFKI- $\mu$ -Verteilung auf Tidescheitelwasserstände hat sich im Rahmen des KFKI-Projektes "Analyse der Wasserstandsentswicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht" bewährt (JENSEN, et al., 1992). Dort wurden unter anderem lückenhafte Zeitreihen mit Hilfe der Eintrittswahrscheinlichkeit der KFKI- $\mu$ -Verteilung ermittelt. Abb. 3-2 zeigt exemplarisch das Prinzip der Lückenschließung über die Eintrittswahrscheinlichkeiten am Beispiel der Pegel Cuxhaven und Büsum. Die Abweichungen lagen in der Größenordnung von nur wenigen Zentimetern.

Die Anwendung der KFKI- $\mu$ -Verteilung auf Tidewasserstände mit einer Auflösung von fünf Minuten soll im Folgenden untersucht werden. Dazu wurden Zeitreihen von folgenden Pegeln herangezogen: Emshörn, Bremerhaven, Cuxhaven und St. Pauli. Die betrachteten Zeitabschnitte waren rund 10 Tage, also ungefähr 1400 Meßwerte lang.

Zur Anpassung an die Meßwerte wurde zunächst die empirische Wahrscheinlichkeit nach WEIBULL ermittelt und die Optimierung mit der Drehung um den Winkel  $\mu$  durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, daß der Verlauf der Verteilungsfunktion für alle Zeitreihen die gleichen Charakteristiken aufweist. Die Optimierung der Verteilungsfunktion erwies sich als sehr problematisch. Die über die Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelten Werte zeigten sehr große und nicht akzeptable Abweichungen gegenüber den gemessenen Werten. Beim Betrachten der einzelnen Verteilungsfunktionen ist folgender Unterschied gegenüber Verteilungsfunktionen, die nur mit Tidescheitelwasserständen aufgestellt wurden, zu beobachten: Im unteren und oberen Bereich sind die Steigungen der Verteilungsfunktion der Wasserstände sehr groß, mit einem nahezu asymptotischen Verlauf. Ferner fällt auf, daß für einige Zeitreihen in diesem Bereich Unstetigkeiten auftreten. (siehe Abb. 3-3).

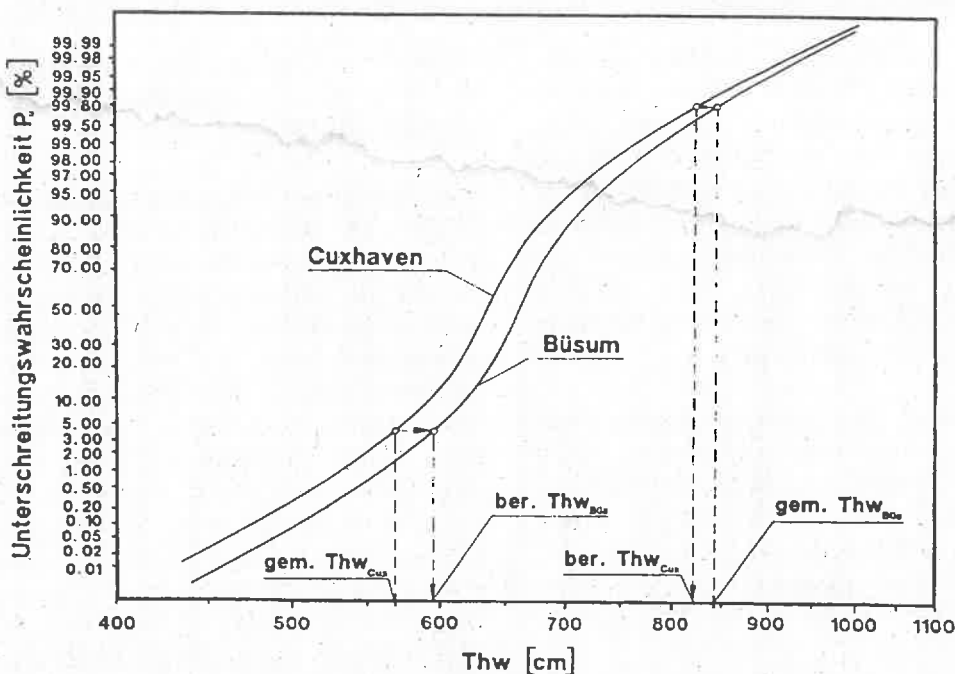


Abb. 3-2 Prinzip der Lückenschließung über Eintrittswahrscheinlichkeiten am Beispiel der Pegel Cuxhaven und Büsum nach Mugga, 1992

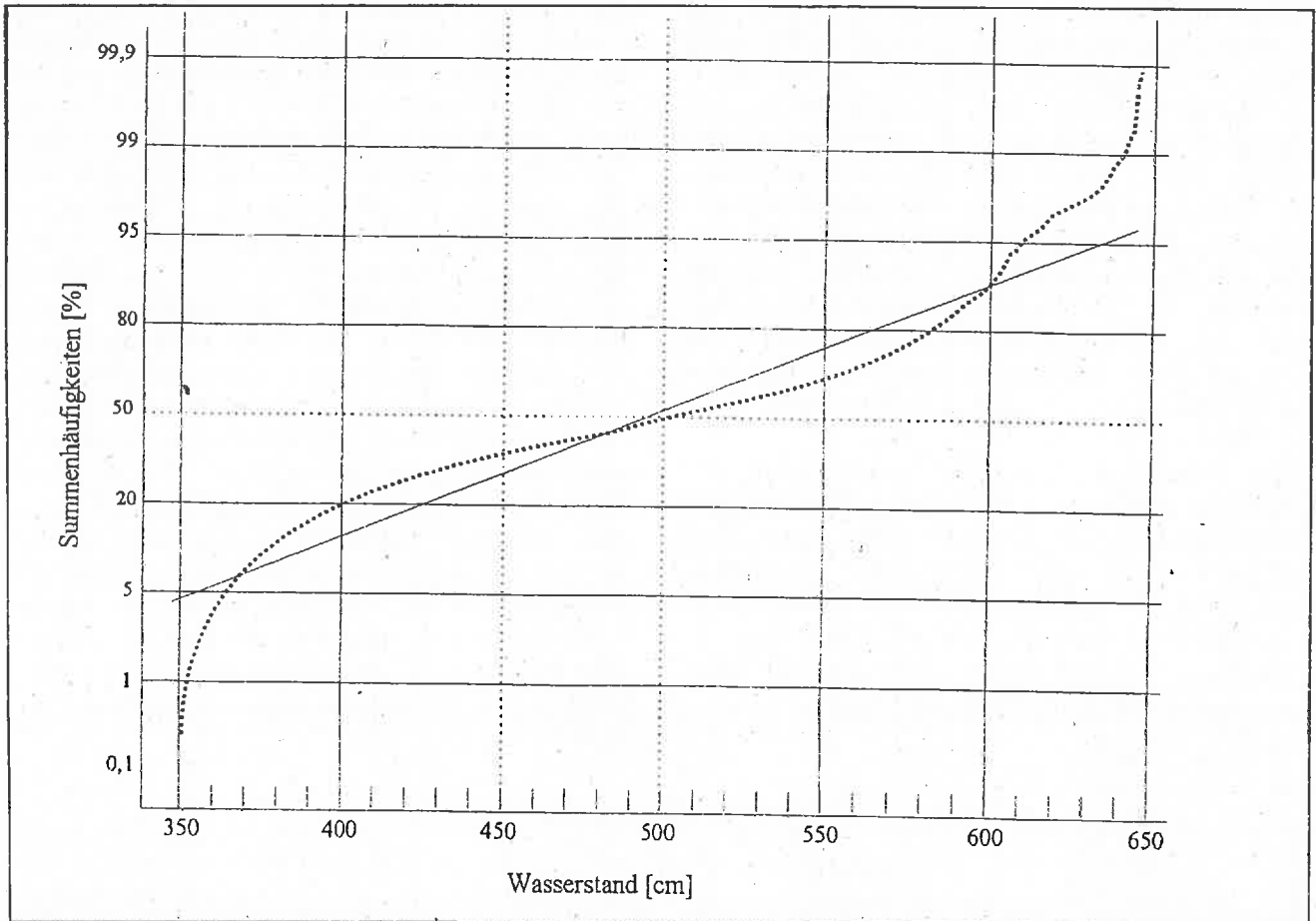


Abb. 3-3 Verteilungsfunktion der Wasserstand des Pegels Emsbörn (nach Jensen, 1994)

Woher diese Unstetigkeiten rühren, konnte nicht geklärt werden. Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Dichtefunktion ergaben, daß die Verteilung der Wasserstände im 5 Minuten-Intervall mehr in die Richtung einer zweipfeligen Verteilung geht und nicht so einfach mit einer bekannten Verteilungsfunktion zu erfassen ist. Erweiterungen der arsinh-Funktion mit zusätzlichen Termen gestalteten sich ebenso als nicht praktikabel.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Anwendung der KFKI- $\mu$ -Verteilung zum Schließen von Lücken in Wasserstandsganglinien mit zeitlich hoher Auflösung (z.B. 5 Minuten-Intervall) nicht praktikabel ist. Die gewonnenen Werte für künstlich erzeugte Lücken wiesen Fehler von mehreren Dezimetern auf.

#### 4. Husumer Regressionsverfahren

Grundlage des Husumer Regressionsverfahrens ist die Berechnung der Lücke aus den entsprechenden Werten eines benachbarten

Pegels mit Hilfe von Regressionsgleichungen, die aus gleichartigen Ganglinienabschnitten ermittelt wurden.

Das Verfahren teilt zunächst sowohl für den Pegel, an dem die Lücke aufgetreten ist (Lückenpegel) als auch an einem benachbarten Pegel (Bezugspegel) die Flut- und Ebbeäste einer Anzahl von Tiden, die der Lücke benachbart sind, in jeweils hundert gleiche Zeitabschnitte (= 99 Berechnungspunkte. Der 100. Punkt fällt mit dem nachfolgenden Thw bzw. Tnw zusammen). Der Abstand der Punkte beträgt somit bei einer normalen Steig- und Falldauer von rund 6 Stunden zwischen 3,5 und 4,5 Minuten (Abb. 4-1). Die zu Beginn eines Zeitabschnitts (z.B. 1) aufgetretenen Wasserstände aller, für die Anwendung des Verfahrens ausgewählten Tiden des Lückenpegels werden mit den Wasserständen des entsprechenden Zeitabschnitts (z.B. 1) des Bezugspegels korreliert und für jeden Abschnitt eine eigene lineare Regressionsgleichung aufgestellt.

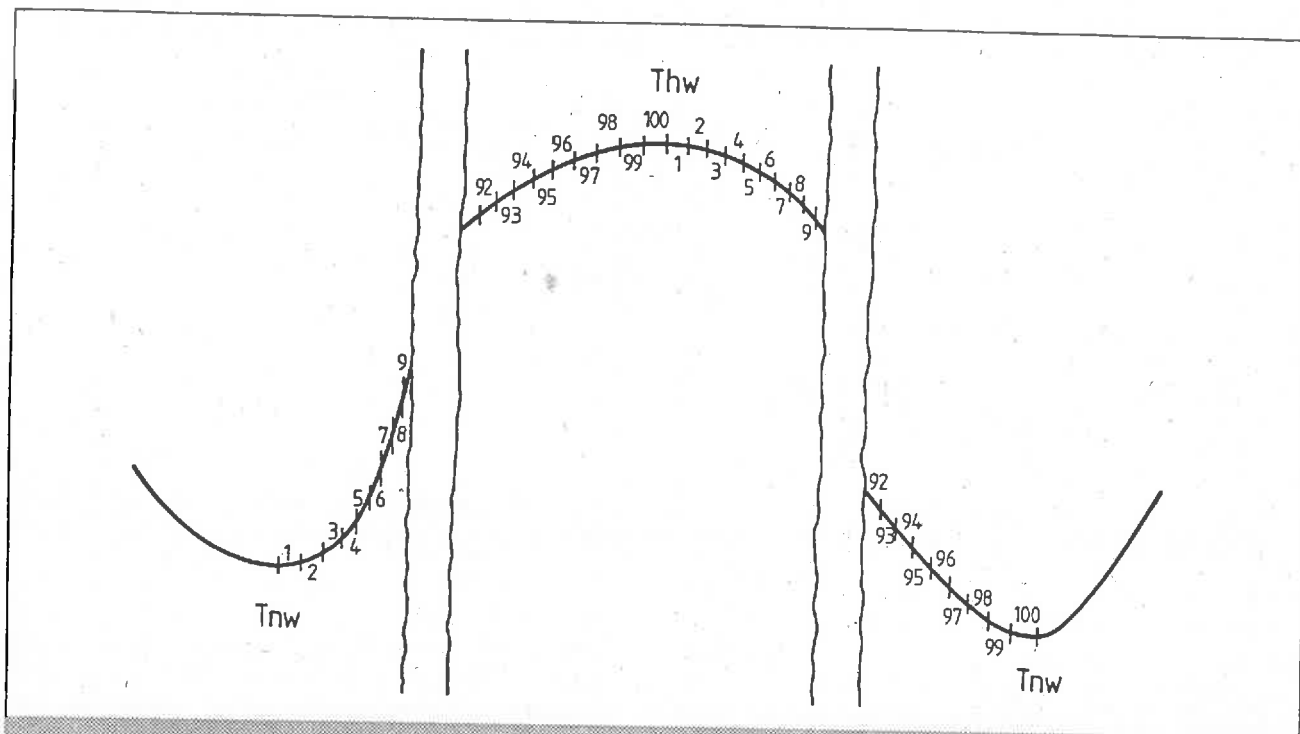


Abb. 4-1 Teilung der Flut- und Ebbeäste einer Tide in 100 gleiche Teile

Allgemein gilt

$y_n = a + b \cdot x_n$  zum Zeitpunkt  $t_{x_n}$  bzw.  $t_{y_n}$   
mit

$y_n$  Wasserstand am Lückenpegel in einem Zeitabschnitt einer Teiltide

$x_n$  Wasserstand am Bezugspegel in einem Zeitabschnitt einer Teiltide

$n$  Zeitabschnitt einer Teiltide

Die Bestimmung der Unbekannten  $a$  und  $b$  erfolgt mit den Normalgleichungen

$$\sum y_i = a + b \sum x_i$$

$$y_i \cdot x_i = a \cdot \sum x_i + b \cdot \sum x_i^2$$

mit

$i$  = Werte der Einzeltiden

In Tab. 4/1 sind beispielhaft die Flutwerte zweier Pegel über 30 Tiden und 99 Zeitabschnitte hinweg aufgetragen und die jeweiligen Regressionsgleichungen hinzugefügt.

Zum Schließen der Lücke werden zunächst die Flut- und Ebbeäste des Bezugspegels in jeweils hundert Zeitabschnitte geteilt. Abschnittsweise werden mit Hilfe der Regressionsgleichung die Wasserstandswerte des entsprechenden Abschnitts des Lückenpegels nach folgender Formel errechnet:

$$y_n = a + b \cdot x_n$$

Mittels linearer Interpolation werden die zwischen den berechneten Punkten liegenden Minutenwerte bestimmt. Da durch Variationen der Ebbe- und Flutdauern die einzelnen Zeitabschnitte des Bezugspegels in der Regel nicht gleich lang wie die des Lückenpegels sind, muß bei der zeitlichen Zuordnung der Minutenwerte eine Korrektur vorgenommen werden:

$$t_{y_n}' = t_{y_n} \cdot k$$

mit

$t_{y_n}'$  Länge des korrigierten Zeitabschnitts  $n$  des Lückenpegels

$t_{y_n}$  Länge des Zeitabschnitts  $n$  des Bezugspegels

$k$  Korrekturfaktor

$k$  muß für jede Halbtide gesondert bestimmt werden und errechnet sich aus dem Verhältnis der  $T_E$ - und  $T_F$ - Zeiten:

$$k = \frac{T_{Ex}}{T_{Ey}} \quad \text{bzw.} \quad k = \frac{T_{Fx}}{T_{Fy}}$$

mit

$T_{Ex}$  Ebbedauer am Bezugspegel bzw.

$T_{Fx}$  Flutdauer am Bezugspegel

$T_{Ey}$  Ebbedauer am Lückenpegel bzw.

$T_{Fy}$  Flutdauer am Lückenpegel

## 12 Empfehlung zum Schließen von Lücken in Wasserstandsganglinien des Tideaußengebietes

Zeitabschnitte n	1. Tide				2. Tide				30 Tide				Regressionsgleichung
	$t_x$ Uhr- Zeit	x Höhe cm	$t_y$ Uhr- Zeit	y Höhe cm	$t_x$ Uhr- Zeit	x Höhe cm	$t_y$ Uhr- Zeit	y Höhe cm	$t_x$ Uhr- Zeit	x Höhe cm	$t_y$ Uhr- Zeit	y Höhe cm	
1	453	490	323	395	526	482	354	390	1144	455	1016	328	$y_1=0,2+0,98 \cdot x_1$ $y_2=0,22+0,97 \cdot x_2$ $y_3=0,25+0,95 \cdot x_3$ $y_4=0,28+0,98 \cdot x_4$ $y_5=0,23+1,02 \cdot x_5$
2	457	493	327	396	529	484	358	390	1148	455	1020	329	
3	501	496	331	399	533	485	402	392	1152	455	1024	332	
4	504	500	334	404	537	488	406	393	1155	458	1027	334	
5	508	512	337	408	541	494	410	397	1159	462	1031	342	
95	919	787	822	756	941	756	855	719	1554	731	1508	691	$y_{95}=1,12+0,91 \cdot x_{95}$
96	923	787	826	758	945	756	858	718	1558	732	1512	692	$y_{96}=1,10+0,89 \cdot x_{96}$
97	926	787	829	759	948	757	902	722	1601	732	1516	693	$y_{97}=1,11+0,95 \cdot x_{97}$
98	930	788	833	759	952	757	906	722	1605	732	1520	693	$y_{98}=1,09+0,93 \cdot x_{98}$
99	934	788	837	760	956	757	910	722	1609	732	1524	693	$y_{99}=1,10+0,91 \cdot x_{99}$

Tab. 4/1 Regressionsverfahren von 2 Pegeln mit deren Ausgangswerten

Zur Bestimmung des Verhältnisses sind zunächst die Scheitel- Eintrittszeiten zu bestimmen. Es empfiehlt sich ein unabhängiges Verfahren einzusetzen, da dadurch die Plausibilität der errechneten Werte erhöht wird. Abhängig von dessen Güte lassen sich die gefundenen Werte als Stützstellen für die Rekonstruktion des gesamten ausgefallenen Ganglinienabschnittes verwenden. Gleiches gilt auch für die Bestimmung der Höhenwerte.

Die Anzahl der zur Berechnung der Regressionsgleichung herangezogenen Tiden sollte aus statistischen Gründen die Zahl 30 nicht unterschreiten. Versuche haben ergeben, daß eine deutliche Erhöhung dieser Zahl keine nennenswert besseren Ergebnisse liefert.

Die herangezogenen Tiden müssen nicht unbedingt zur Lücke benachbart liegen. Da es durch astronomische, klimatische und morphologische Einflüsse zu spürbaren Driften der Korrelationsbeziehungen kommen kann, empfiehlt sich jedoch eine enge zeitliche Verbindung zur Lücke. Außergewöhnliche oder nicht zu der Lücke passende Tideverläufe können das Ergebnis der Korrelation erheblich beeinträchtigen. Es empfiehlt sich daher, zunächst zu prüfen, ob bestimmte Ganglinienabschnitte aus der Aufstellung der Korrelation herauszunehmen sind bzw. Ganglinienabschnitte aus anderen Zeitabschnitten hinzugezogen werden müssen, um eine statistisch ausreichende Datenbasis zu erhalten. Dazu reicht es vielfach aus, die Stimmigkeit der Kor-

relationsrechnung durch deren Anwendung auf einige Tiden vor und nach der Lücke zu überprüfen und das errechnete mit dem registrierten Ergebnis zu vergleichen. Unter Umständen ist es zweckmäßig, mehrgliedrige Korrelationen zu verwenden.

Das Verfahren wurde auf je zwei benachbarte Pegel angewandt, indem über unterschiedlich lange Zeitabschnitte hinweg die Ganglinie eines Pegels als ausgefallen deklariert, die "Lücke" berechnet und die festgestellten Differenzen zur tatsächlich aufgezeichneten Ganglinie im Minutentakt errechnet wurde. In Tab. 4/2 sind die Mittleren Abweichungen und die Standardabweichung aufgetragen.

Es zeigt sich, daß die mittleren Abweichungen im allgemeinen gering sind. Die Standardabweichungen liegen meist im Bereich zwischen 2 und 5 cm, erreichen aber auch Werte von 10,6 cm (Hooge-Wittdün).

Erwartungsgemäß sind die Zusammenhänge umso straffer, je geringer die Entfernung der Pegel voneinander und je gleichartiger die hydrologischen Gegebenheiten sind.

Die Länge der Lücke wirkt sich geringer aus als vermutet: Die Werte der lfd. Nr. 7 (Pegel Cuxhaven-Brunsbüttel) liegen erheblich niedriger als die der Nr. 10 (Hooge-Wittdün). Letztere ist allerdings stark windbeeinflusst.



Lfd. Nr.	Lückenpegel	Bezugspegel	Anzahl Tiden	Mittlere Abweichung (cm)	Standardabweichung (cm)	Bemerkungen
1	Cuxhaven	Vogelsand	3	3,4	4,7	
2	Cuxhaven	"	4	3,6	3,5	
3	Cuxhaven	"	1/4	3,6	5,0	
4	Cuxhaven	"	17	7,3	8,7	
5	Cuxhaven	Brunsbüttel	3	4,5	5,3	
6	Cuxhaven	"	4	3,1	4,0	
7	Cuxhaven	"	1/4	2,5	3,0	
8	Cuxhaven	"	17	4,95	5,8	
9	Hooge-Anleger	Wittdün	6	3,0	3,7	
10	Hooge-Anleger	"	1/2	10,6	13,0	Sturm
11	Hooge-Anleger	"	2	8,1	3,5	
12	Knock	Emshörn	3	2,7	4,0	
13	Knock	"	3	2,1	2,6	

Tab. 4/2 Mittlere Abweichung und Standardabweichung verschiedener Tiden an benachbarten Pegeln

### 5. Spektralverfahren

Bei dem hier vorgestellten Verfahren zum Schließen von Datenlücken in Pegelaufzeichnungen (Liebig 1994) 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 von einem möglichst in der Nähe liegenden Pegel heranzuziehen. Da jedoch die Tidekurve eines Pegels auch durch seine unmittelbare Umgebung beeinflußt wird, 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 Abb. 5-1 ist die Abstandsdefinition anschaulich dargestellt. Der Bezugspegel ist im allgemeinen zeitverschoben, 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:

$$\text{Abstand} = d = \sum_{i=1}^n (y_1(i) - y_b(i))^2 \quad (1)$$

mit

den Werten  $y_1(i)$   $i = 1, n$  für einen Lückenpegel

den Werten  $y_b(i)$   $i = 1, n$  für einen Bezugspegel

$n$  = Anzahl der Abtastwerte in den Rändern der Lücke (siehe Abb. 5-1)

14 Empfehlung zum Schließen von Lücken in Wasserstandsganglinien des Tideaußengebietes

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

mit

$y_l(i)$  : Lückenpegelwert bei  $x_i$   
 $y_b(i)$  : Bezugspegelwert bei  $x_i$   
 $n$  : Anzahl der Werte

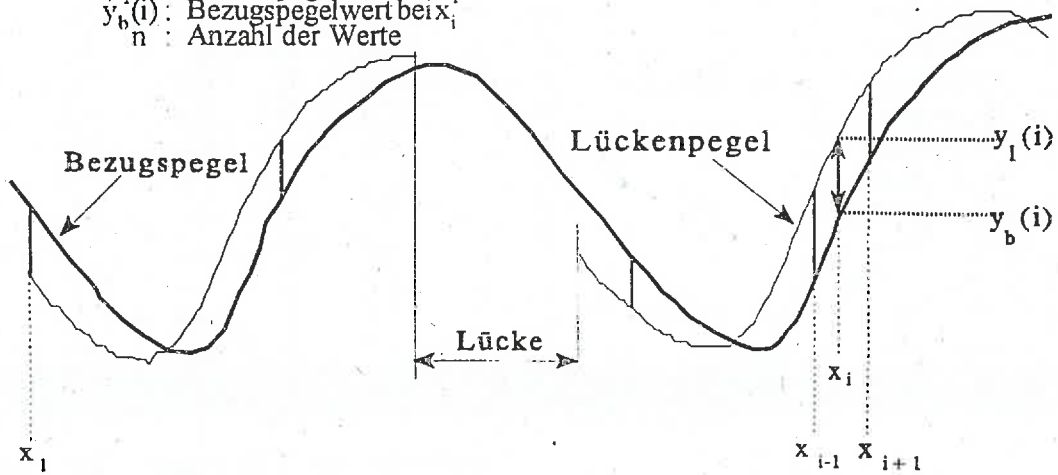


Abb. 5-1 Abstandsdefinition Lückenpegel und Bezugspegel

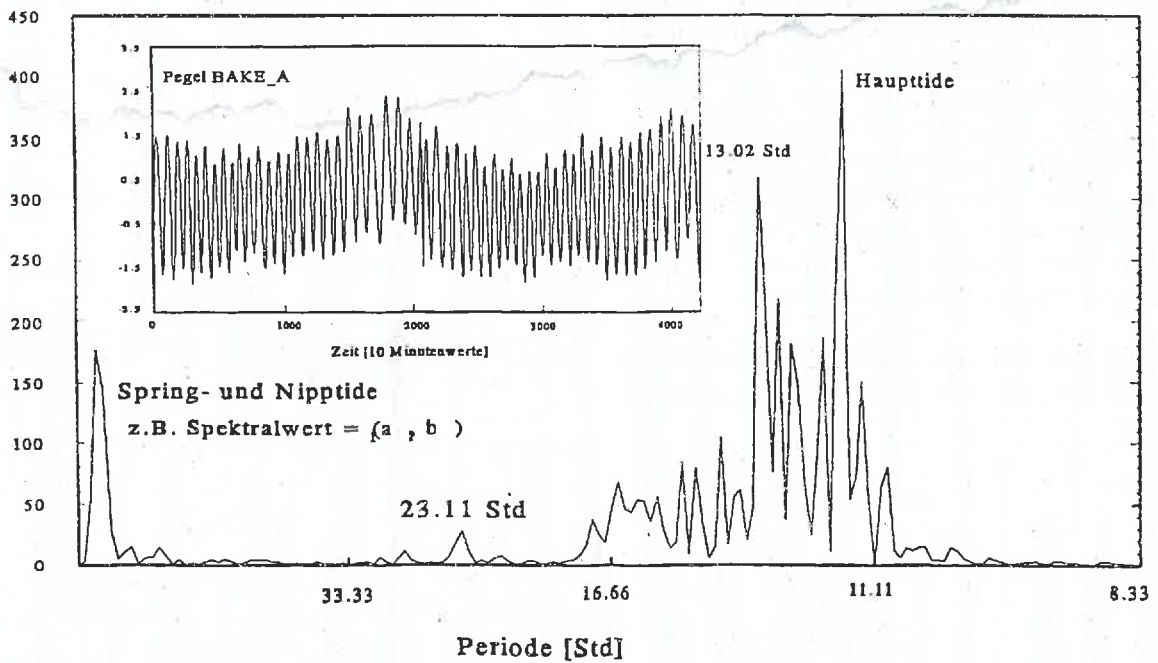


Abb. 5-2 Spektralwerte eines Bezugspegels (Beispiel)

Wie aus der Abb. 5-1 zu ersehen ist, könnte eine Abstandsverringerung 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 zu 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 Abb. 5-2 dargestellt.

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.

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 des Bezugspegels so, daß der Abstand  $d$  ein Minimum annimmt.

$$i = 1, \dots, n$$

$$y_b(i) = y_b(i) + C ; \quad (2)$$

$n =$  Anzahl der Abtastwerte

### 2. Schritt

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

$$i = 1, \dots, n$$

$$y_b(i+z) = y_b(i) ; \quad (3)$$

$n =$  Anzahl der Abtastwerte

### 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 einer Digitalisierung eines Pegelbogens vorliegt, ergibt sich diese trigonometrische Summe für den Bezugspegel, nachdem die Verschiebungen (2) und (3) durchgeführt worden sind, durch die diskrete Fouriertransformation zu:

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

mit

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

$k =$  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  $b_1, \dots, b_k$ .

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

## 16 Empfehlung zum Schließen von Lücken in Wasserstandsganglinien des Tideaußengebietes

wobei

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

die Amplituden und

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

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 minimieren läßt. Gesucht werden somit Spektralkoeffizienten, für die der Abstand  $d$  in Formel (5) ein Minimum ist. Es ist daher folgendes Minimierungsproblem zu lösen:

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

mit  $k$  = Anzahl der Spektralkomponenten

Wie läßt sich eine solche Minimierung in der Praxis durchführen? Für einen Pegelkurvenausschnitt können 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 ge-

braucht 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. 5-2), so läßt sich das Minimierungsproblem zusätzlich vereinfachen. Die wichtigsten Spektralkomponenten sind z.B. die Tidehauptkomponente mit einer Periodendauer von ca. 12:25 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

$$d_m = \text{Minimum } d(a_0, a_{k1}, \dots, a_{k5}, b_{k1}, \dots, b_{k5})$$

mit  $k_1 \dots k_5$  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 Minimierungsproblem (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 Standardssoftware sehr einfach mit einem Rechner lösen.

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 eventuell der seeseitige Bezugspegel besser geeignet ist, als der weiter stromaufwärts gelegene Pegel Brunsbüttel. Weitere Berechnungen wurden mit größeren (17 Tiden) und kleineren Lücken (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. 11 km voneinander entfernt im Wattenmeer).

Um beurteilen zu können, welche Pegel mehr oder weniger als Bezugspegel geeignet sind, wurde der Zusammenhang von Lücken- und möglichem Bezugspegel durch einfache Korrelationsrechnung geprüft. Die Tabelle 5/1 zeigt eine Gegenüberstellung der Mittelwerte der absoluten Abweichungen (Mittel), die die Güte der Anpassung darstellen; mit den Korrelationskoeffizienten (R) von Bezugs- und Lückenpegeln im Bereich der Lücke.

Nr.	Lückenpegel	Bezugspegel	# Tiden	Mittel (cm)	SD (cm)	R
1	cux01	vog01	3	3,3	2,57	0,927
2	cux02	vog02	3	5,9	3,92	0,925
3	cux03	vog03	1/4	4,8	2,6	0,945
4	cux04	vog04	17	5,6	3,99	0,925
5	cux01	bru01	3	5,1	3,77	0,861
6	cux02	bru02	3	5,4	3,9	0,837
7	cux03	bru03	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	1/2	12,7	6,21	0,778
11	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

Tabelle 5/1 Testrechnungen mit künstlich erzeugten Lücken

Der angegebene Korrelationskoeffizient 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 5/1 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 (# 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 z.B. der Einfluß der Spring- und Nipptide nach den entsprechenden Bemerkungen bei der Beschreibung des Verfahrens nicht erfassen. Für die Berechnung auch kleiner Lücken sollte deshalb die Breite der Ränder so gewählt werden, daß alle wesentlichen Spektralkomponenten erfaßt werden.

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

- Der Korrelationskoeffizient von Bezugs- und Lückenpegel sollte in einem Bereich vor oder nach der Lücke ausreichend groß genug sein (größer 0,9).
- Der Bezugspegel sollte möglichst nahe zum Lückenpegel bzw. im gleichen Wattrinnensystem liegen. 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 Bezugspegel im Wattenmeer 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 hier gezeigten Ergebnisse wurden mit einem PC-386 berechnet. Zum Testen des Algorithmus wurde das Programm *LSP* in 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.

Das Programm ist bei den Oberen Wasserbehörden der Länder Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein sowie bei den Wasser- und Schifffahrtsdirektionen Nord und Nordwest und der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz auf einer Diskette erhältlich.

### 6. Wertung der Verfahren und Empfehlung

Mit den hier vorgestellten Verfahren wurde das Problem der Lückenschließung in Tideganglinien mit zeitlich hoher Auflösung, z. B. Abtastwerte von 5 Minuten untersucht. Die einzelnen Verfahren oder Methoden wurden vorgestellt und auf ihre Eignung untersucht.

Die wohl einfachste Methode der Lückenschließung ist das Ergänzen der Ganglinie mit **Visueller Kurvenergänzung**. Diese Methode ist jedoch nur sinnvoll bei Lücken bis zu einer halben Tide. Sie erfordert ein hohes Maß an Erfahrung und ist nicht ganz frei von Subjektivität, ist aber bei kleinen Lücken deutlich schneller als andere Verfahren. Bei Beachtung der Einschränkungen liefert sie insbesondere bei isoliert stehenden Pegeln brauchbare Ergebnisse.

Die **KFKI- $\mu$ -Verteilung**, ein bewährtes Werkzeug zur Ermittlung von fehlenden Scheitelwasserständen bei Tidehochwasser, wurde ebenfalls für die Schließung von Lücken bei zeitlich hoch aufgelösten Ganglinien angewandt. Während die empirische Wahrscheinlichkeit der Tidehochwasserstände sehr gut durch den Kurvenzug des Arcussinus-hyperbolicus-Funktion repräsentiert wird, ist eine Anwendung dieser Funktion auf Wasserstandsganglinien mit einer Abtastrate von fünf Minuten nicht möglich. Die erzielten Werte lagen in einem nicht mehr akzeptablen Bereich. Die Ursache liegt in der Doppelgipfligkeit der Verteilung des zu untersuchenden Datenkollektives. Die KFKI- $\mu$ -Verteilung mit ihrer hohen Dichte im Bereich des Mittelwertes repräsentiert sehr gut Tidehochwasserscheitel, jedoch nicht die empirische Wahrscheinlichkeit der Einzelwerte der Ganglinie. Somit ist eine Anwendung nicht zu empfehlen.

Ein weiteres empfehlenswertes Verfahren ist das **Husumer Regressionsverfahren**. Es verwendet für die Lückenschließung Regressionsgleichungen, die aus gleichartigen Ganglinienabschnitten des Lückenpegels und eines geeigneten Bezugspegels aufgestellt werden. Die mit den Regressionsgleichungen

ermittelten Werte ergeben Stützpunkte in einem Abstand von 3 bis 5 Minuten, zwischen der linear interpoliert wird. Diese Methode ist als einfach, robust und bei Tiden im mittleren Bereich als hinreichend genau zu bezeichnen. Bei der Anwendung auf außergewöhnliche Ereignisse geht der Vorteil der Robustheit jedoch zulasten der Genauigkeit, d. h. die Regressionsgleichungen glätten den Informationsgehalt des gegebenen Datenmaterials und beeinflussen die Ergebnisse nachhaltig. Unter solchen Umständen ist die Anwendung mit Vorsicht zu handhaben.

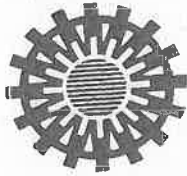
Eleganter ist die Anwendung des **Spektralverfahrens**, welches den Informationsgehalt der Ganglinien besser nutzt und auch bei außergewöhnlichen Ereignissen nicht nivelliert. In der Theorie ist es etwas höher angeordnet, als das Husumer Regressionsverfahren. Grenzen in der Anwendung sind derzeit allein in der Anzahl der verwendeten Abtastwerte und Spektralkomponenten gegeben. Bei deren Erhöhung ist das Verfahren noch erweiterungsfähig und könnte in Zukunft eventuell bessere Ergebnisse liefern.

Abschließend kann gesagt werden, daß je nach Gegebenheit und Anwender folgende Methoden zu empfehlen sind: die Spektral- methode, als die nach dem Stand der Technik am besten geeignete, danach das Husumer Regressionsverfahren als robuste Methode, jedoch mit der Einschränkung bei außergewöhnlichen Tideverläufen und zuletzt die einfache und ebenso robuste Methode der Visuellen Kurvenergänzung, welche ein hohes Maß an Erfahrung beim Anwender voraussetzt und nicht völlig frei von Subjektivität ist.

Für alle Verfahren gilt gleichermaßen, daß sie nicht systematisch auf mögliche Unterschiede zwischen dem HThw- und dem NTnw-Bereich oder auf die andersartigen Verhältnisse eines Tidestroms gegenüber einem Wattgebiet untersucht wurden. Hierzu sind weitere Empfehlungen auszusprechen, wenn Erfahrungen mit den vorstehend geschilderten Verfahren vorliegen.

## 7. Literatur

- Pegelvorschrift, Stammtext 4. Auflage (Gelbdruck) 1995
- 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.
- Jensen, S.: Prüfung eines Verfahrens zur Lückenschließung in Wasserstandsganglinien. Labor für Wasserbau und Hydraulik an der Universität-GH- Siegen, 1994
- Kunz, H., Köves, L.: Berechnung der Tidescheitelwerte aus digitalen Wasserstandsdaten mit Kleinrechnern. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Heft 6/6, 1986.
- LAWa ad-hoc AK "Küstenpegel": Empfehlungen zur Verbesserung fehlerhafter und für den Ersatz fehlender Wasserstandsaufzeichnungen an Tidepegeln, unveröffentl., 1990
- Liebig, W.: Numerische Lösung von mehrfach nichtlinearen Ausgleichsproblemen. Jahresbericht der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz, Band 33, 1982.
- Liebig, W.: Schließen von Lücken in Pegelaufzeichnungen. Die Küste, H. 56, 1994.
- Mügge, H. E.: Anpassungsfunktion für Thw-Scheitelwerte. Wasser und Boden, H. 8, 1992



# Länderarbeitsgemeinschaft Wasser

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie  
Berlin/ Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes  
Brandenburg

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser wurde 1956 als „Zusammenschluß der für die Wasserwirtschaft und das Wasserrecht zuständigen Ministerien der Länder“ gebildet. Ziel der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser ist es auftauchende Fragestellungen gemeinsam zu erörtern, Lösungen zu erarbeiten und Empfehlungen zur Umsetzung zu initiieren. Aber auch aktuelle Fragen im nationalen, supranationalen und internationalen Bereich werden aufgenommen, auf breiter Basis diskutiert und die Ergebnisse bei den entsprechenden Organisationen eingebracht. Zur Erfüllung dieser Ziele hat die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) fünf Arbeitsgruppen und themenspezifische Arbeitskreise eingerichtet, die die Themenfelder Wasserrecht, Gewässerkunde, Gewässer- und Meeresschutz, Ökologie, Hochwasserschutz, Küstenschutz, Grundwasser, Wasserversorgung, Kommunal- und Industrieabwasser und den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen bearbeiten. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit sind Grundlage für einen einheitlichen wasserwirtschaftlichen Vollzug in den Ländern. Trotzdem lassen die erarbeiteten Muster noch ausreichend Raum für die Berücksichtigung regionaler Besonderheiten. Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser informiert die Öffentlichkeit mit einer Vielzahl von Schriften fortlaufend und aktuell über die Ergebnisse aus den Arbeitsgruppen, über Erfolge und Ansprüche der Wasserwirtschaft und des Wasserrechts der Länder. Die Schriften können über die Geschäftsstelle bezogen werden.

## **Empfehlungen zum Schließen von Lücken in Wasserstandsganglinien des Tideaußengebietes**

### **1. Auflage im Februar 1998**

Die Technik der digitalen Registrierung von Tidedaten in engem Zeittakt gestattet es den Nutzern, z. B. aus Schifffahrt, Vermessung, und Hydrologie, ihre Arbeiten mit höherer Genauigkeit in kürzerer Zeit und damit rationeller auszuführen. Voraussetzung dafür ist eine lückenlose Bereitstellung der Daten. Trotz sorgfältiger Wartung der Pegel läßt sich jedoch nie ganz vermeiden, daß Lücken in den Aufzeichnungen entstehen. Diese Lücken gilt es zu schließen. Die vorliegende LAWA-Schrift beschäftigt sich mit der Schließung von Lücken in Ganglinien von Tidekurven. Sie wurde vom LAWA-AK „Küstenpegel“ erarbeitet. Es wurden verschiedene Methoden auf Eignung geprüft und auf ihre Anwendbarkeit untersucht. Die Methoden der nahezu klassischen visuellen Kurvenergänzung, das Husumer Regressionsverfahren sowie ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Verfahren, wurden mit Beispielen dokumentiert. Die Arbeit schließt mit einer Wertung der Verfahren und Empfehlungen zur Anwendung ab.





