



# Analyse der Wasserstände der Tideelbe (1998-2004)

## Datenbasis

Die nachfolgende Analyse beruht auf den Daten der WSD-Nord, die diese auf ihrem Regionalserver mit dem WISKI-System bereitstellt. Die Daten wurden im Zeitraum vom 1.-8. Dezember 2005 vom Server geholt.

*Tabelle 1 - Datenübersicht*

*Die erste Zeile gibt die generelle Datenverfügbarkeit eines Pegels in Prozent an; die zweite Zeile verrät, wie viel Prozent der verfügbaren Daten aus Zeile 1 ergänzt bzw. errechnet sind. Rot markierte Zahlen in Zeile 2 weisen darauf hin, dass eine große Anzahl von Daten (>10%) errechnet wurden. Die rot markierten Pegel entziehen sich einer relativen Bewertung bezogen auf das Jahr 1998 aufgrund nicht ausreichender Daten im Bezugsjahr 1998.*

|                      | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Helgoland</b>     | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>GVogelsand</b>    | 100  | < 1  | 100  | 100  | 100  | < 1  | < 1  |
| <b>Cuxhaven</b>      | 100  | < 1  | < 1  | < 1  | 100  | 100  | < 1  |
| <b>Otterndorf</b>    | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>Osteriff</b>      | 0    | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>Brunsbüttel</b>   | 100  | 9    | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>Brockdorf</b>     | < 1  | < 1  | < 1  | < 1  | 100  | 100  | < 1  |
| <b>Glückstadt</b>    | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>Krautsand</b>     | 1    | < 1  | < 1  | < 1  | 1    | 100  | 53   |
| <b>Kollmar</b>       | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>Grauerort</b>     | 1    | 4    | 30   | 1    | 24   | 25   | < 1  |
| <b>Stadersand</b>    | < 1  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>Lühort</b>        | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>Schulau</b>       | 1    | < 1  | < 1  | 3    | < 1  | 1    | 40   |
| <b>Blankenese</b>    | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>Cranz</b>         | 1    | < 1  | < 1  | < 1  | < 1  | 36   | < 1  |
| <b>StPauli</b>       | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>Bunthaus</b>      | 2    | < 1  | < 1  | < 1  | < 1  | 14   | 14   |
| <b>Over</b>          | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| <b>Zollenspieker</b> | 1    | < 1  | < 1  | < 1  | < 1  | 51   | 58   |
| <b>GeesthachtUP</b>  | 100  | 1    | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
|                      | 1    | 1    | < 1  | < 1  | < 1  | 6    | 34   |
|                      | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
|                      | 3    | 7    | < 1  | < 1  |      |      |      |
|                      | 100  | 100  | 16,5 | 100  | 100  | 100  | 100  |
|                      | 2    | 17   | < 1  | 1    | 2    | 35   | 18   |
|                      | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
|                      | 1    | < 1  | < 1  |      |      |      |      |
|                      | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
|                      | 11   | < 1  | < 1  | < 1  |      |      |      |
|                      | 91,5 | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
|                      | 2    | 1    | 1    | < 1  |      |      |      |
|                      | 91,5 | 85,6 | 94,6 | 100  | 100  | 100  | 100  |
|                      | < 1  | < 1  | < 1  | < 1  | 2    | 7    |      |
|                      | 83   | 100  | 98,7 | 91,2 | 100  | 100  | 100  |
|                      | < 1  | < 1  |      | < 1  |      |      | 10   |

Da diese Daten noch zahlreiche Datenlücken enthielten, wurden diese - soweit es möglich war - durch eine lineare Regression auf Minutenbasis zum Nachbarpegel geschlossen. Diese Schließung der Lücken ist unumgänglich, da die folgenden Analysen mit Fouriertransformationen arbeiten, die eine Äquidistanz der Messwerte zwingend vorschreibt. Um den Überblick zu behalten, welche Daten tatsächlich gemessen und welche berechnet (redundant) sind, zeigt Tabelle 1 auch den Prozentsatz der berechneten bzw. ergänzten Daten.

## Methodisches Vorgehen

Da das Tidesignal einen astronomischen Antrieb hat und dieser Antrieb harmonisch variiert (astronomische Zyklen), so ist auch das Tidesignal charakterisiert durch Harmonische (Sinus-Funktionen). Diese Harmonische werden durch eine Fouriertransformation und dem daraus gewonnen Spektrum deutlich als Amplitudenspitzen (Peaks) sichtbar (s. Abb. 1).

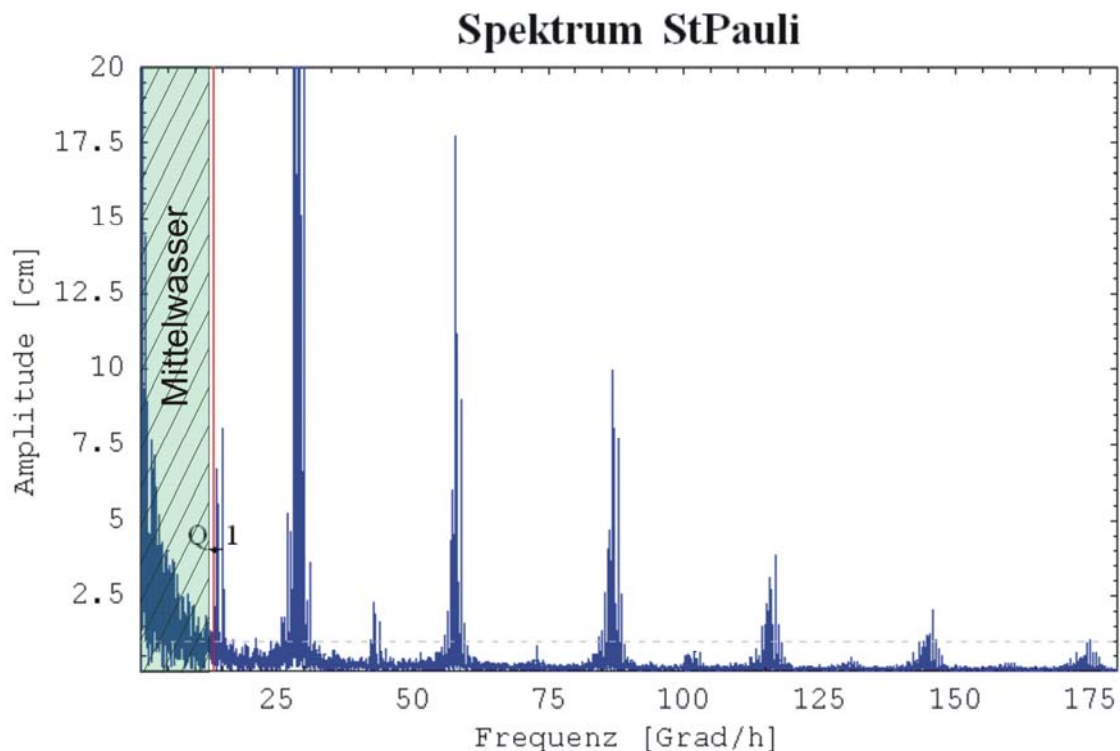


Abb. 1: Spektrale Darstellung der Zeitreihe StPauli; die Spitzen (Peaks)  $> 13$  Grad/h entsprechen je einer Partialtide

Eine genaue Betrachtung vieler Spektren in der Nordsee sowie in den Ästuaren zeigt, dass die erste an diesen Orten vorkommende Harmonische, die Partialtide  $Q_1$  (Periodendauer etwa 13,3987 Grad/h) ist. Langwelligere Partialtiden sind entweder nicht erkennbar (kein Peak im Spektrum) oder aber völlig vom überlagerten meteorologischen/stochastischen Signal verdeckt. Das Signal wird daher an der Frequenz 13 Grad/h aufgeteilt: Der spektrale Bereich von 0-13 Grad/h, der keine erkennbaren Partialtiden enthält und den Großteil des stochastischen Signals ausmacht wird im folgenden *stetiges Mittelwasser* genannt, um ihn vom Begriff des Mittelwassers nach DIN 4049 abzugrenzen. Ein Beispiel verdeutlicht den Aufbau des Tidesignals (s. Abb. 2).

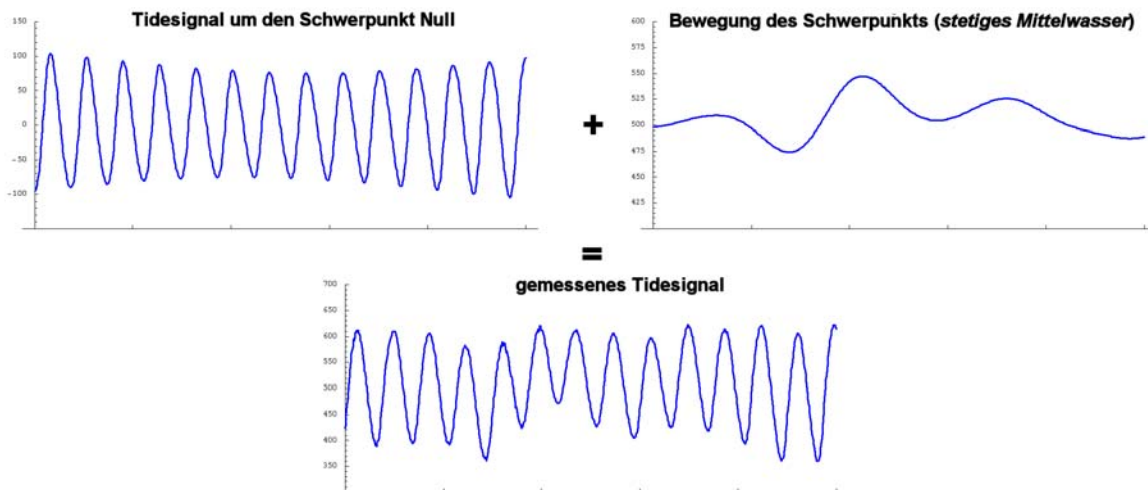


Abb. 2: Aufteilung des gemessenen Tidesignals in Tidesignal um den Schwerpunkt Null und stetiges Mittelwasser. Die Summe beider Einzelsignale ergibt exakt das gemessene Tidesignal.

Der andere Teil des Signals ( $>13$  Grad/h) - also das eigentliche Tidesignal - ist durchzogen von Partialtiden, enthält selber aber auch noch einen geringen stochastischen Anteil. Um diesen stochastischen Anteil zu minimieren, wird im Folgenden eine Reihe von Partialtidenanalysen durchgeführt.

Da der Aufwand für eine Partialtidenanalyse nicht unerheblich ist, werden nur solche Partialtiden analysiert, deren Amplitude größer als ein Zentimeter ist. In den Spektren der Pegel der Tideelbe lassen sich 97 Partialtiden mit einer Amplitude größer ein Zentimeter bestimmen. Der Rest des Signals, also das Residuum, besteht ferner aus Partialtiden kleiner ein Zentimeter und meteorologischem/stochastischem Rauschen.

Die folgende Analyse gliedert sich in zwei Teile: Partialtidenanalyse und Mittelwasseranalyse. Vorangestellt wird eine Betrachtung der beiden äußeren Ränder der Tideelbe: das Oberwasser in NeuDarchau und das einlaufende Tidesignal in Helgoland.

## Oberwasser NeuDarchau und Pegel Helgoland

Die Wasserstände in der Tideelbe sind eingerahmt zwischen dem Oberwasser (hier repräsentiert durch den Pegel NeuDarchau), dem Nordseerand (hier repräsentiert durch den Pegel Helgoland), der Meteorologie und der Topographie/Bathymetrie. Ändert sich etwas an diesen Rändern, so wird sich diese Änderung auch in den Tidepegeln der Elbe widerspiegeln. Daher ist eine Betrachtung der äußeren Ränder unumgänglich.

Abbildung 3 zeigt die jährliche (Kalenderjahr) Entwicklung am Pegel Helgoland. Es fällt auf, dass der mittlere jährliche Tidehub gerade in einer leichten Abwärtsbewegung begriffen ist. Diese momentane Abwärtsbewegung des Tidehubs kann durch die Nodaltide erklärt werden (s.u.).

Diesem langfristigen Trend überlagert sind Änderungen, hervorgerufen durch eine lange Liste von Phänomenen, wie beispielsweise unterschiedlicher Impulseintrag der Meteorologie, Veränderungen an der Topographie/Bathymetrie der Nordsee, Veränderungen im mittleren Meeresspiegel, gekoppelte Phänomene wie beispielsweise die Verlagerung des

amphidromischen Punktes usf. All diese gleichzeitigen Einwirkungen können nur als Summe beispielsweise am Pegel Helgoland beobachtet werden.

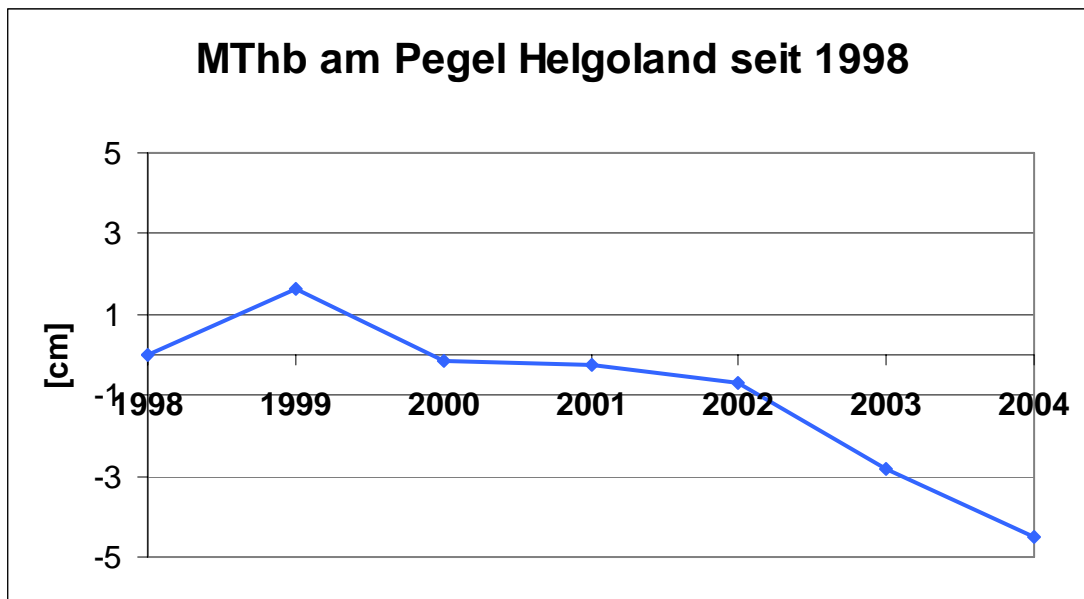


Abb. 3: Entwicklung des mittleren jährlichen Tidehubs in Helgoland seit 1998

Das Oberwasser am Pegel NeuDarchau (s. Abb. 4) zeigt ebenfalls eine leichte Abwärtsbewegung. Ob diese jedoch zyklischer Natur ist entzieht sich dem Wissen des Autors. Auffällig ist das Jahr 2002 mit nahezu doppeltem jährlichem Oberwasser gegenüber den Vorjahren. In den Jahren zwischen 1970 und 2000 traten lediglich in den Jahren 1981 und 1987 ähnliche hohe mittlere jährliche Oberwässer auf.

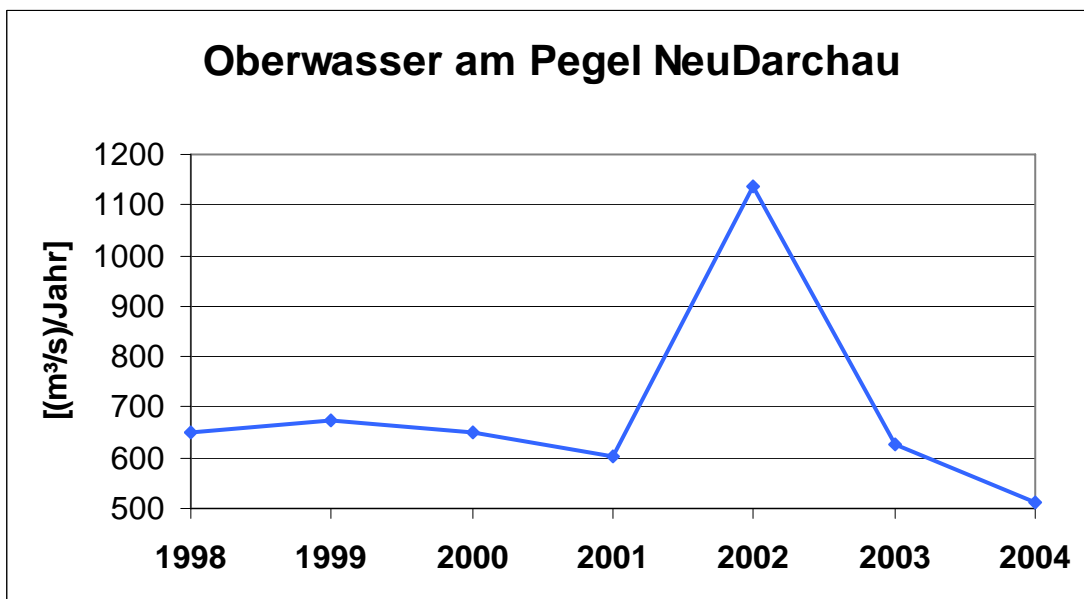


Abb. 4: Entwicklung des mittleren jährlichen (Kalenderjahr) Oberwassers am Pegel NeuDarchau

## Partialtidenanalyse und Tidehub

Die technische Vorgehensweise der Partialtidenanalyse wird kurz im folgenden Kasten (Bestimmung der Partialtiden) erläutert. Im Folgenden wird auf die Ergebnisse dieser Analyse eingegangen.

### Bestimmung der Partialtiden

Es gibt zwei Methoden Partialtiden zu analysieren. Die klassische Methode besteht aus einem Fit (einer Regression) eines Modells an die Messwerte. Ein bedeutender Nachteil dieser Methode liegt in der Kenntnis der anzupassenden Modellfunktion. Zum Aufstellen der Modellfunktion müssen die lokalen Partialtiden bekannt sein. Eine Überbestimmung der Modellfunktion mit Partialtiden kann dazu führen, dass durch den Fit Energie einer tatsächlichen Partialeide auf eine Nachbarpartialeide (die nur im Modell existiert) übergeht. Es kommt zu einem verfälschten Bild. Eine Unterbestimmung kann dazu führen, dass vorhandene Energie nicht erkannt wird oder aber, dass Energie von zwei tatsächlich vorhandenen Partialtiden auf eine nur im Modell vorhandene Partialeide übertragen wird. Hier ergibt sich ein ebenso verfälschtes Bild. Nur eine exakt bestimmte Modellfunktion kann zum richtigen Ergebnis führen. Diese ist aber im Allgemeinen unbekannt.

Die Vorteile seien nicht unerwähnt: Sehr schnelle Bestimmung der Partialtiden und die Möglichkeit mit Datenlücken umzugehen. Dabei treten jedoch weitere Einschränkungen auf, die hier nicht weiter erläutert werden sollen.

Die zweite Möglichkeit, die auch hier zum Einsatz kommt, ist die Bestimmung über Fouriertransformation (FFT). Aus der FFT kann ein Amplitudenspektrum gewonnen werden, indem jede Partialeide als ein einzelner Peak erkennbar ist. Damit ist es möglich, die lokal vorhandenen Partialtiden zu identifizieren. Zur genauen Bestimmung von Amplitude und Phase wird das Signal im Fourierraum mit einer Funktion gefaltet. Aufgrund der spektralen Konfiguration der Tidezeitreihen hat sich hier die Hanning-Funktion [1] bewährt. Da die Partialtiden im Fourierraum sehr eng beieinander liegen und sich diese gegenseitig beeinflussen, kommt eine sukzessive Bestimmung der Partialtiden mit anschließender Elimination zum Einsatz. Dieses Verfahren kostet viel Rechenzeit. Eine große Beschleunigung kann erreicht werden, wenn die sich beeinflussenden Partialtiden zu Clustern zusammengefasst werden und nur die Cluster sukzessiv analysiert werden. Ein weiterer Schritt zur genauen Analyse der Amplitude ist das adaptive *zero padding*[1]. Für jede einzelne Partialeide wird die optimale Wellenzahl in der Zeitreihe bestimmt. Die Zeitreihe wird dann im komplexen Fourierraum mit entsprechenden Nullen aufgefüllt, so dass die Frequenz der Partialeide nach einer bestimmbaren Genauigkeit erreicht wird. Je genauer die Frequenz im diskreten(!) Spektrum erreicht wird, desto genauer ist der Wert für Amplitude und Phase. Die Frequenzgenauigkeit liegt etwa bei  $10^{-7}$  Grad/h.

Sehr wichtig sind noch zwei Kriterien. Das Shannon (Nyquist)-Kriterium [2] besagt, dass die kleinste Wellenlänge mit mindestens zwei Samples abgetastet sein muss. Da die Zeitreihen in Minutenwerten vorliegen, ist die kleinste theoretisch analysierbare Periodendauer  $> 10800$  Grad/h. Die Zeitreihe ist also ca. 12fach *oversampled*, wenn man noch dreißigsteltägige Tiden analysieren will. Eine Abtastung mit einer Periodendauer von 24 Minuten würde vollständig ausreichen. Jede feinere Abtastung erzeugt Redundanz! Tatsächlich aber werden 10 minütige Werte benutzt, da das

Optimierungsproblem für das adaptive zero padding schneller gelöst werden kann. Das Shannon-Kriterium stellt kein Problem dar.

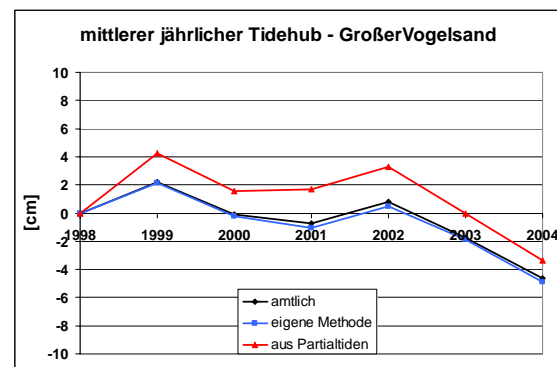
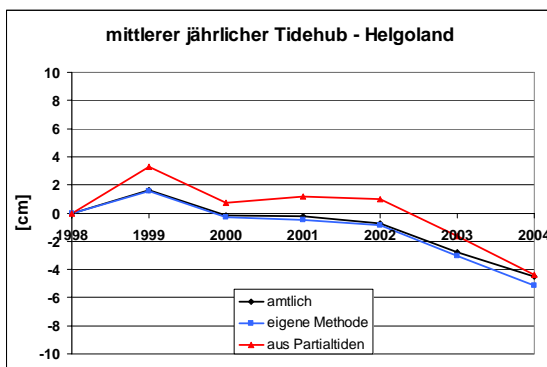
Das zweite Kriterium ist das Rayleigh-Kriterium. Anschaulich formuliert besagt es, dass zwei Frequenzen erst dann voneinander getrennt werden können, wenn sich deren Wellen einmal überholt haben. Viele Partialtiden benötigen einen Zeitraum von 366 Tagen zur Trennung. Aus diesem Grund gibt es auch nur Jahresmittelwerte für Partialtiden.

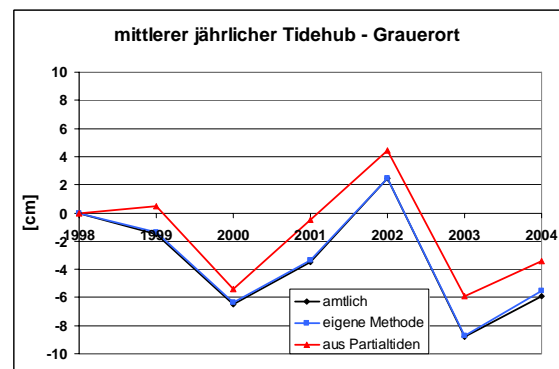
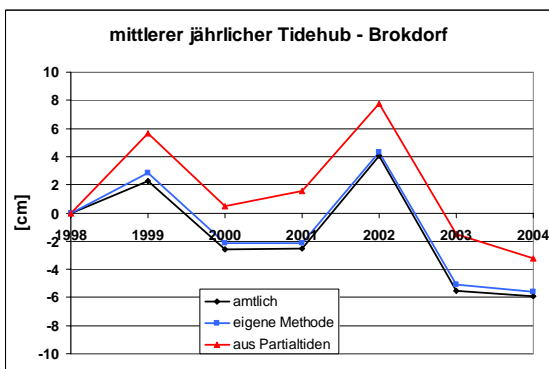
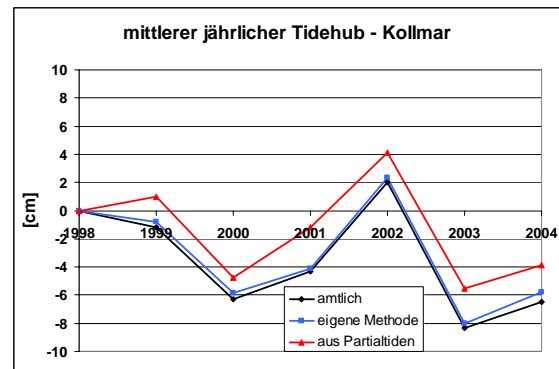
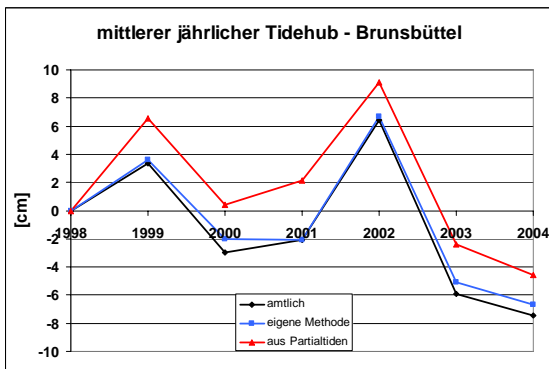
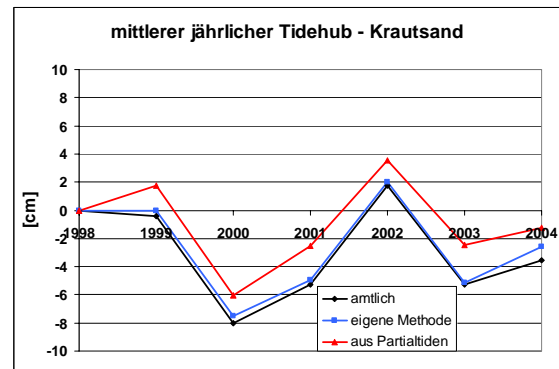
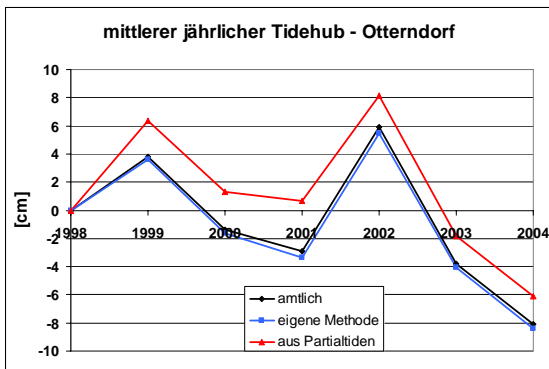
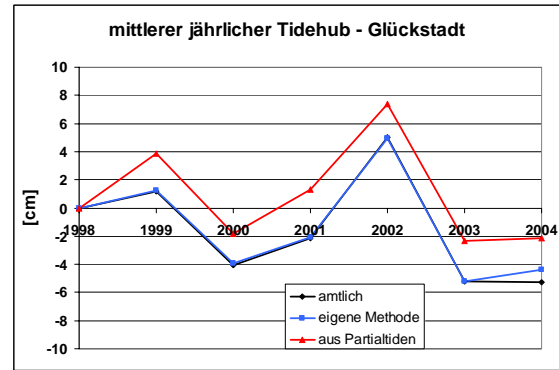
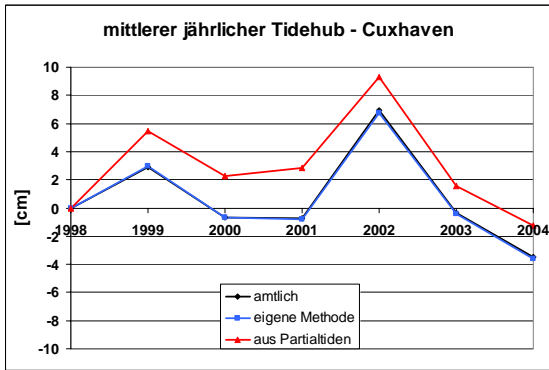
Tatsächlich wird das Rayleigh-Kriterium einmal überschritten. Der dadurch entstehende Fehler ist jedoch sehr gering, da die beiden Partialtiden sehr kleine Amplituden haben. Dieses extrem enge Arbeiten am Rande des Rayleigh-Kriteriums und die zwingend erforderliche Faltung mit der Hanning-Funktion führen zu einem Verschwimmen der einzelnen Peaks. Das Problem wird jedoch weitgehend durch den Einsatz der sukzessiven Signalentfernung entschärft.

Die Analyse der einzelnen Partialtiden ist zweifelsohne sehr interessant und kann weitere Erklärungsmöglichkeiten liefern. Hier jedoch ist vor allem der Wasserstand, also die Überlagerung der einzelnen Partialtiden von Interesse. Es werden somit die 97 Partialtiden für jedes Jahr und jeden Pegel wieder zusammengefügt: diese ergeben ein synthetisches Signal. Von diesem synthetischen Signal des Wasserstands werden die Scheitelwerte  $T_{nw}$  und  $T_{thw}$  bestimmt und von diesen wiederum die Jahresmittelwerte gebildet.

### Scheitelwertbestimmung

Die hier verwendete Scheitelwertbestimmung weicht leicht von der amtlichen Bestimmung ab. Hier wird das Signal zu Anfang tiefpaßgefiltert mit einer Durchlassfrequenz bis 450 Grad/h (Butterworth-Filter 20ster Ordnung angewandt im Fourierraum, siehe beispielsweise [3]). Anschließend wird das Minimum/Maximum bestimmt. Liegen mehrere Punkte mit gleichem Minima/Maxima vor, so wird der mittlere Punkt als Zeitpunkt verwendet. Ein Vergleich beider Methoden zeigt, dass sie im Mittel identisch sind (Erwartungswert der Differenz beider Verfahren ist Null). Die folgenden Grafiken zeigen zum Vergleich die amtlichen Mittelwerte. Es ergeben sich nur sehr geringe Abweichungen zwischen den beiden Methoden.





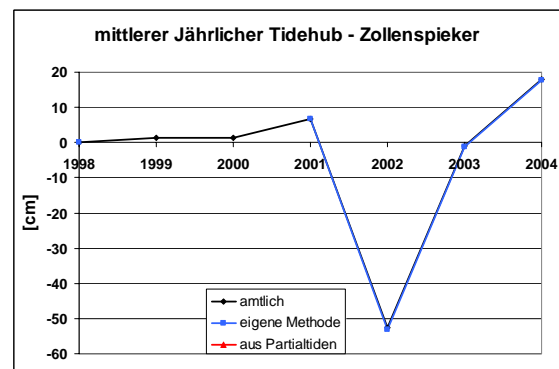
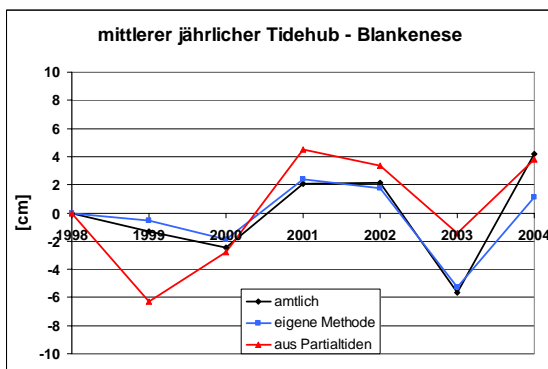
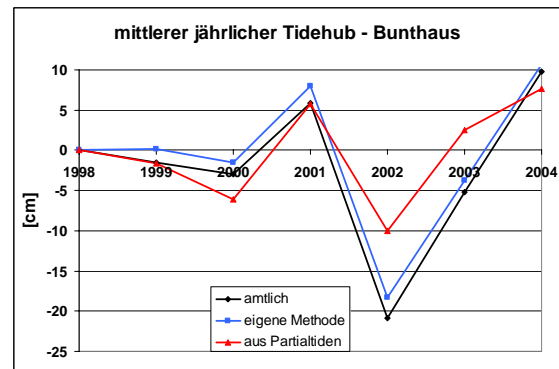
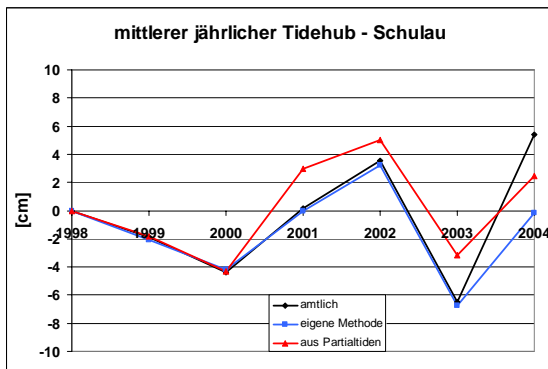
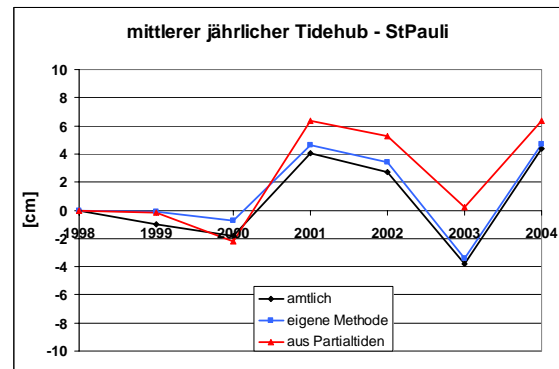
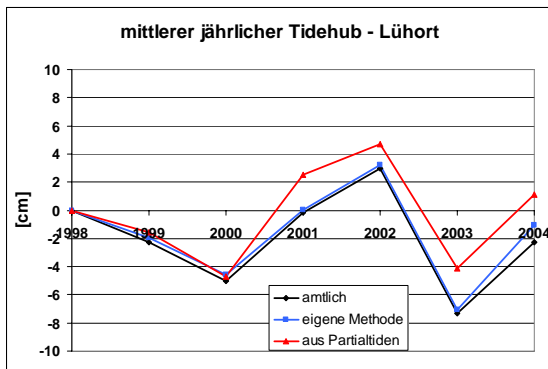
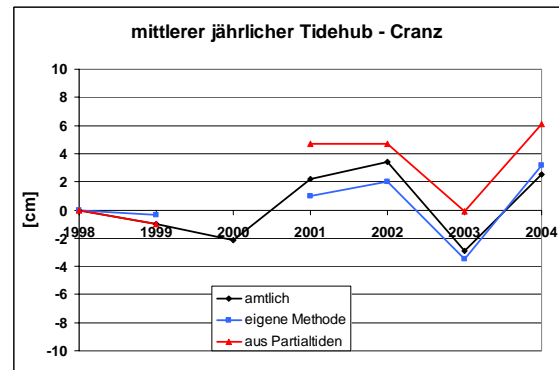
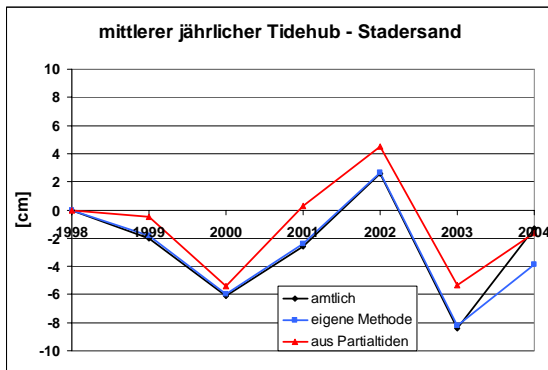


Abb. 5 – Abb. 22: Entwicklung des mittleren jährlichen Tidehubs der Pegel seit 1998 (amtlich ermittelte Werte (schwarz); eigene Scheitelwertbestimmung (blau); synthetisches Signal (rot))



## Tidehubentwicklung

Die im Folgenden verwendeten Abbildungen 23-26 beziehen sich auf den Tidehub ermittelt aus dem synthetischen Wasserstand durch die Partialtiden. Ein Großteil von meteorologisch/stochastischem Rauschen ist also nicht mehr in diesem Signal enthalten. Sie entsprechen den roten Kurven in den Abbildungen 5 – 22.

### 1998 - 2000

Zwischen den Jahren 1998 und 2000 Jahren fand als Eingriff die *Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe* statt. Bei dieser Maßnahme wurde die Fahrrinne verbreitert und/oder vertieft. Theoretisch zu erwarten ist eine Verringerung der effektiven Reibung der Elbe und damit eine Erhöhung der Amplitude (Energie) bzw. eine Erhöhung des Tidehubs (doppelte Amplitude). Im Detail analysiert wurde folgende Entwicklung (s. Abb. 23).

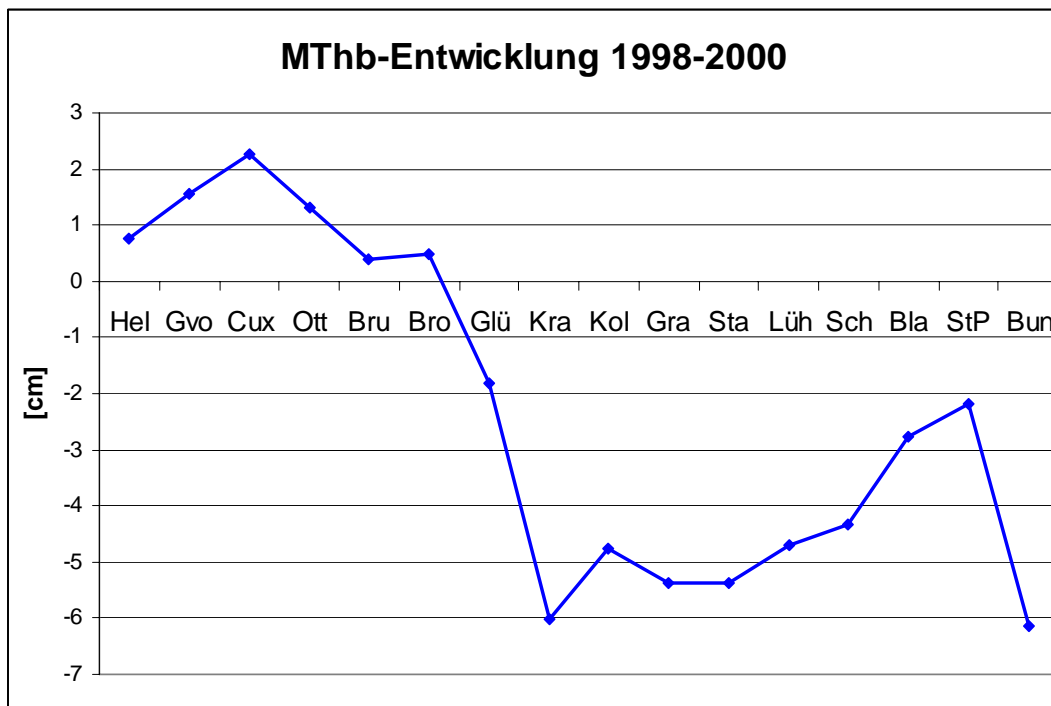


Abb. 23: Veränderung des mittleren jährlichen Tidehubs von 1998 bis 2000 von Helgoland bis Bunthaus

Zwischen Brokdorf und Cuxhaven fand eine geringe Erhöhung des Tidehubs statt. Jedoch ist auch das einlaufende Tidesignal (in Helgoland und am GroßenVogelsand) leicht erhöht gegenüber 1998, so dass man diese Erhöhung schwer auf den Ausbau zurückführen kann. Viel erstaunlicher ist hingegen die Entwicklung ab dem Pegel Glückstadt. Zwischen Glückstadt und Bunthaus verringert sich der mittlere Tidehub um etwa 4 cm. Die beiden äußeren Ränder Helgoland und NeuDarchau zeigen in etwa Konstanz (s. Abb. 3 und 4), so dass eine Vergleichbarkeit zwischen den Jahren 1998 und 2000 gewährt ist.

Ein Blick in die Partialtiden bei St.Pauli zeigt tatsächlich einen Anstieg der Amplitudensummendifferenz (s. Tabelle 2). Aus der Zunahme der Amplitudensumme lässt sich jedoch nicht schließen, dass auch das resultierende Signal in seiner Amplitude (bzw. seinem Tidehub) zunimmt. Zwei um 180 Grad versetzte Partialtiden ergeben ein anderes Schwebungsmuster und damit evtl. als Summe eine Verringerung der Amplitude/des



Tidehubs. Offenbar führen die Veränderungen von Amplituden und Phasen in ihrer Überlagerung zu einer Verringerung des Tidehubs um ca. 2 cm bei St.Pauli.

*Tabelle 2: Amplitudensummendifferenzen der Partialtiden 1998 und 2000 aufsummiert auf einzelne Gruppen (einmal tägliche Tiden, zweimal tägliche Tiden,...n-mal tägliche Tiden) am Pegel St.Pauli*

| Täglichkeit der Tiden | Amplitudensummendifferenz 1998 - 2000 [cm] |
|-----------------------|--|
| 1                     | 2,20                                       |
| 2                     | 8,90                                       |
| 3                     | 0,50                                       |
| 4                     | 4,50                                       |
| 5                     | 0,20                                       |
| 6                     | 2,10                                       |
| 8                     | 1,30                                       |
| 10                    | 0,50                                       |
| 12                    | -0,10                                      |

### 2000 - 2001

Die Weiterentwicklung des Tidehubs von 2000 zu 2001 zeigt Abbildung 24. Im Vergleich zum Vorjahr erhöht sich der Tidehub zunehmend etwa von Glückstadt bis nach Bunthaus (s. Abb. 24). In diesem Zeitraum lag die DA Erweiterung des Mühlenberger Lochs, die möglicherweise einen Anteil an dieser Entwicklung mitträgt.

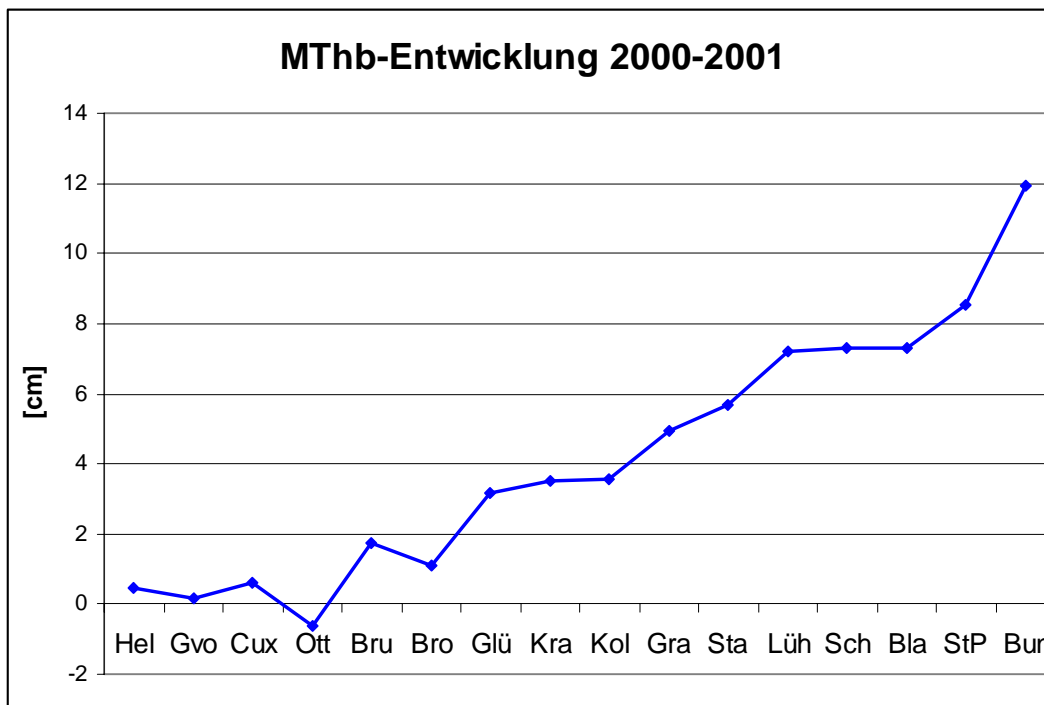


Abb. 24: Veränderung des mittleren jährlichen Tidehubs von 2000 bis 2001 von Helgoland bis Bunthaus

## 2001 - 2003

Das Jahr 2002 (s. Abb. 25) ist durch eine Besonderheit im jährlichen Oberwasser (s. Abb. 4) geprägt. Man erkennt eine deutliche Zunahme des Tidehubs von Cuxhaven bis StPauli und für die Pegel Bunthaus und Zollenspieker (s. Abb. 22) eine enorme Abnahme des Tidehubs. Diese Entwicklung kehrt sich im Jahr 2003 um, ebenso wie sich das mittlere jährliche Oberwasser im Jahr 2003 auf einen Wert ähnlich dem des Jahres 2001 einstellt. Hier kann von einem Oberwassereffekt ausgegangen werden.

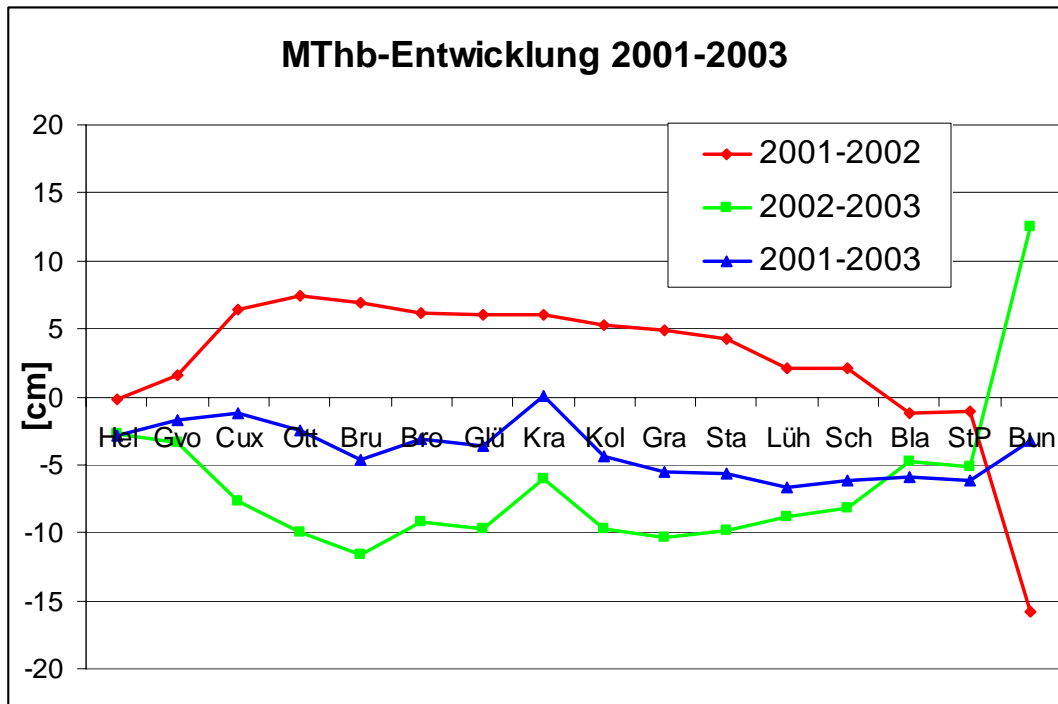


Abb. 25: Veränderung des mittleren jährlichen Tidehubs von 2001 bis 2003 von Helgoland bis Bunthaus

## 2003 - 2004

Das Jahr 2004 (s. Abb. 26) zeigt in etwa eine umgekehrte Entwicklung als der Zeitraum von 1998-2000. Hier findet eine Erhöhung des Tidehubs im Bereich Glückstadt bis Bunthaus statt. Ein Blick auf die beiden Randwerte Oberwasser NeuDarchau und Pegel Helgoland zeigen keine nennenswerten Änderungen und bieten damit keine Erklärungsmöglichkeiten.

Ein Blick in die Partialtiden zeigt, dass einige halbtägige Partialtiden stärker zugenommen haben (beispielsweise  $M_2 +3,5$  cm). Die Tatsache, dass sich die täglichen Partialtiden kaum geändert haben und auch die Tatsache, dass das Eingangssignal in Helgoland abgenommen hat, lassen auf veränderte Reflexionseigenschaften schließen.

## Gesamtentwicklung 1998 – 2004

Abbildung 27 zeigt die Gesamtentwicklung von 1998 bis 2004. Man erkennt eine Abnahme des Tidehubs am Pegel Helgoland um etwa 4 cm. Diese Abnahme lässt sich zu einem großen Teil durch die Nodaltide (s.u.) erklären. Etwa ab den Pegeln Brokdorf / Glückstadt beginnt der Tidehub bezüglich des Pegels Helgoland stromauf zu steigen. So erreicht in Bunthaus der mittlere jährliche Tidehub eine absolute Zunahme von etwa 8 cm. Geht man in erster

Näherung von einer linearen Beziehung des Tidehubs von Helgoland nach Bunthaus aus, so kommen die 4 cm Tidehubabsenkung in Helgoland noch dazu, so dass man von mindestens 12 cm Tidehubanstieg am Pegel Bunthaus ausgehen sollte.

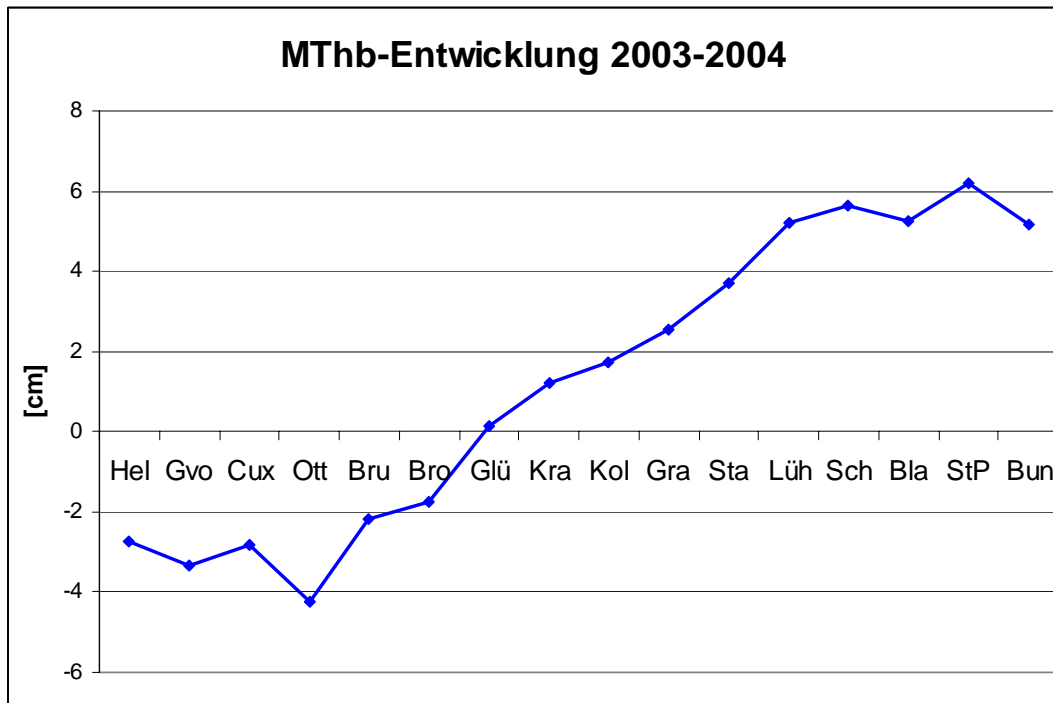


Abb. 26: Veränderung des mittleren jährlichen Tidehubs von 2003 bis 2004 von Helgoland bis Bunthaus

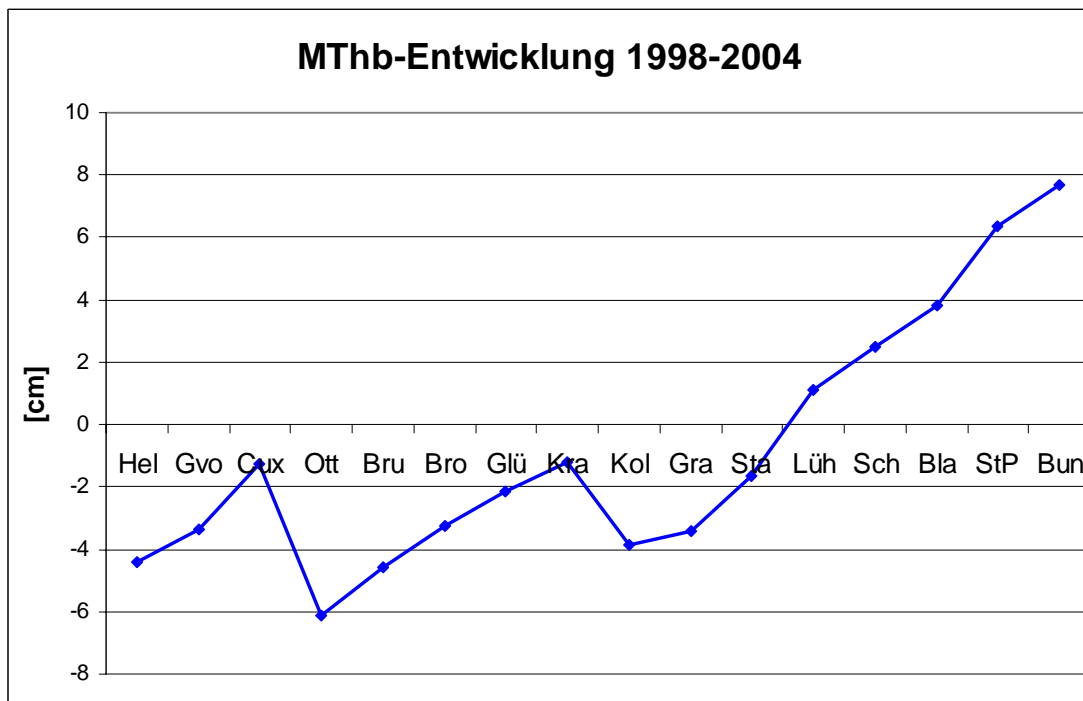


Abb. 27: Veränderung des mittleren jährlichen Tidehubs von 1998 bis 2004 von Helgoland bis Bunthaus

## Mittelwasseranalyse

Das Mittelwasser-Signal hängt stark von den Rändern Helgoland und NeuDarchau (Oberwasser) ab. Besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Mittelwasser des Pegels und dem Mittelwasser Helgolands und dem Oberwasser NeuDarchaus, dann können über diesen funktionalen Zusammenhang die äußeren Einflüsse weitgehend (je nach Güte der Funktion) eliminiert werden.

Abbildung 28 zeigt, dass die spektrale Korrelation gerade im Bereich des *stetigen Mittelwassers* (0-13 Grad/h) zwischen 0.8 und 1 liegt. D.h., dass im Bereich des *stetigen Mittelwassers* eine lineare Übertragung mit einer Transferfunktion funktionieren kann.

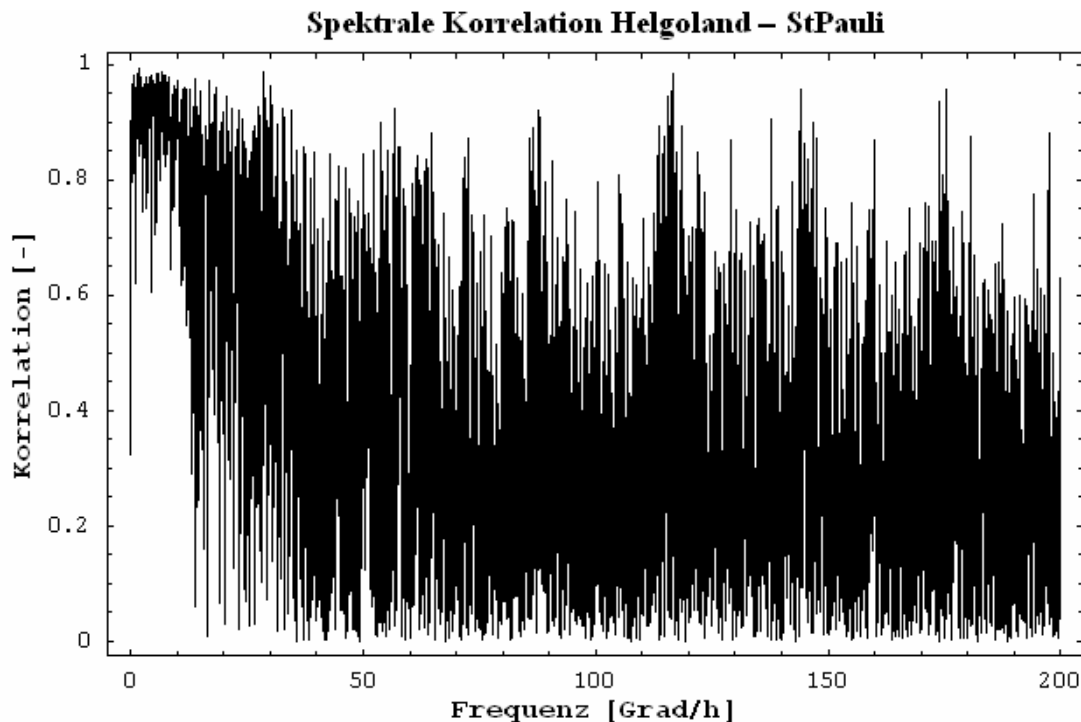


Abb. 28: Spektrale Korrelation zwischen den Pegeln Helgoland und St.Pauli

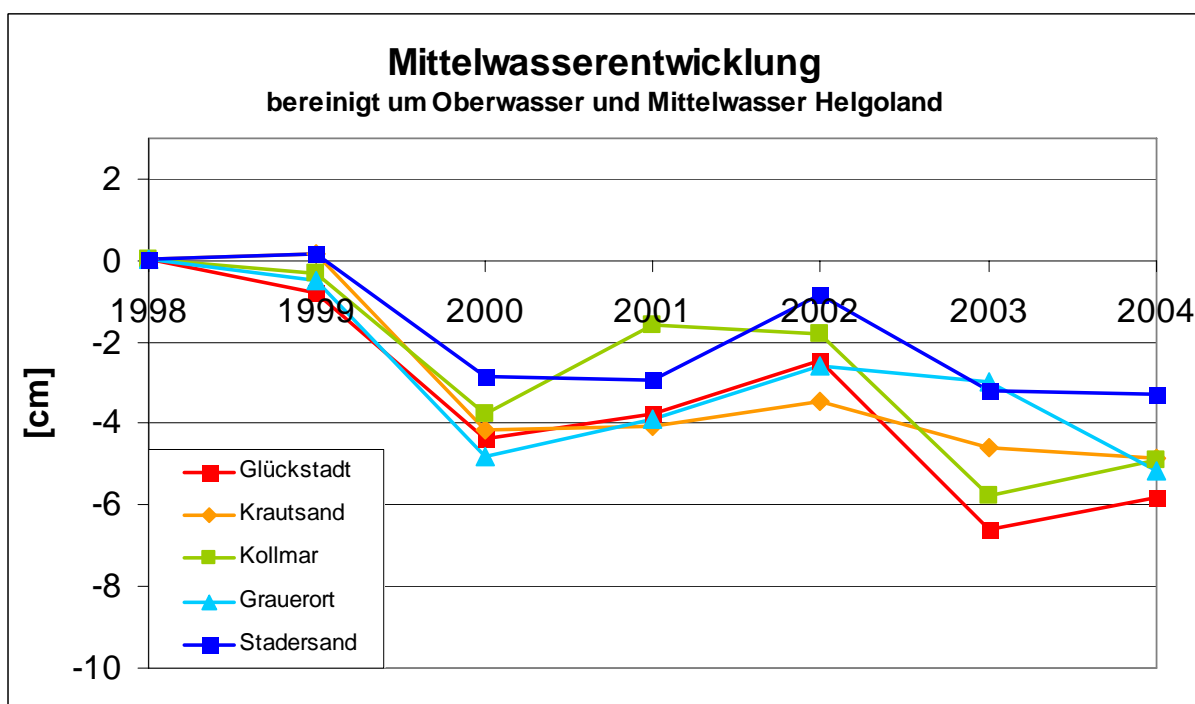
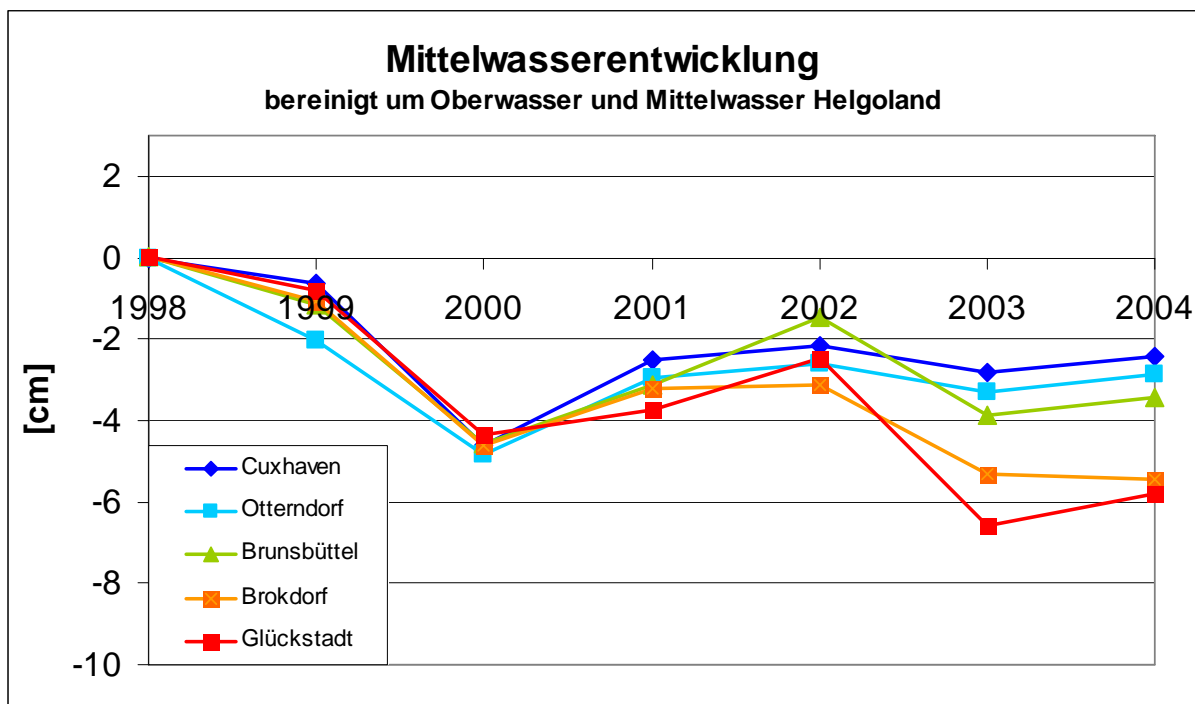
Gleichzeitig wird versucht einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem *stetigen Mittelwasser* des Pegels und dem Oberwasser herzustellen. Da der Oberwassereinfluss stromabwärts abnimmt, kann dieser abnehmende Einfluss durch eine Potenz dargestellt werden.

Über eine nichtlineare Regression werden die Parameter ( $k_0 \dots k_3$ ) auf Basis zehnmütiger Werte für das folgende Modell ermittelt (MW: stetiges Mittelwasser / Obw: Oberwasser).

$$MW_{\text{Pegel}} = k_0 + k_1 MW_{\text{Helgoland}} + k_2 \text{Oberwasser}_{\text{NeuDarchau}}^{k_3}$$

Dort, wo die numerischen Verfahren der Regression nicht mehr konvergieren, wird auf einen nichtlinearen Einfluss des Oberwassers verzichtet und der Parameter  $k_3$  auf Eins gesetzt (das gilt für alle Pegel ab einschließlich Krautsand stromabwärts).

Da im Folgenden die Veränderungen seit 1998 untersucht werden sollen, wird der Zeitraum für die Regression auf das Jahr 1998 beschränkt. Für jeden Pegel wird eine Transferfunktion bestimmt. Im Anschluss wird mithilfe dieser Transferfunktion ein *stetiges Mittelwasser* für jeden Pegel von 1998 bis 2004 berechnet. Vom *stetigen Mittelwasser* aus der Messung wird schließlich das berechnete *stetige Mittelwasser* abgezogen. Übrig bleibt ein Signal (Residuum), das nicht aus den Randwerten vorhersagbar ist. Dieses Signal zeigt also Veränderungen, die zum Großteil nicht mehr von den Rändern herrühren. Schlussendlich wird ein Jahresmittelwert über dieses Residuum errechnet. Dargestellt sind diese Jahresmittelwerte in den Abbildungen 29-32.



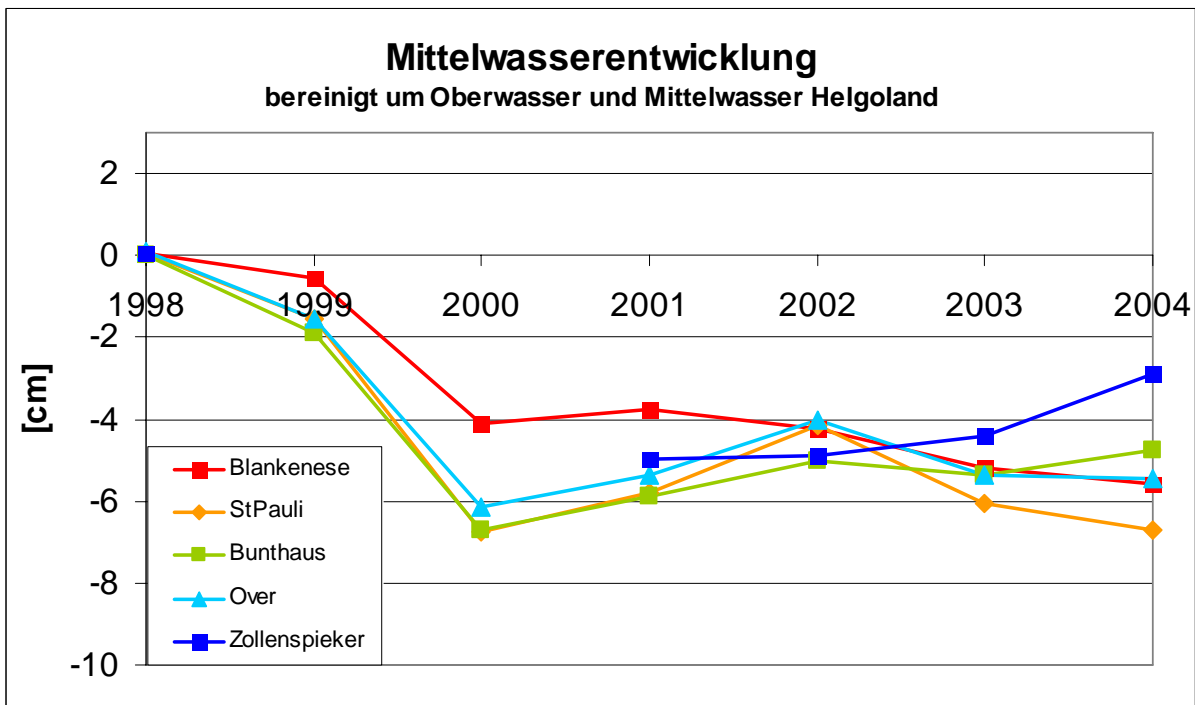
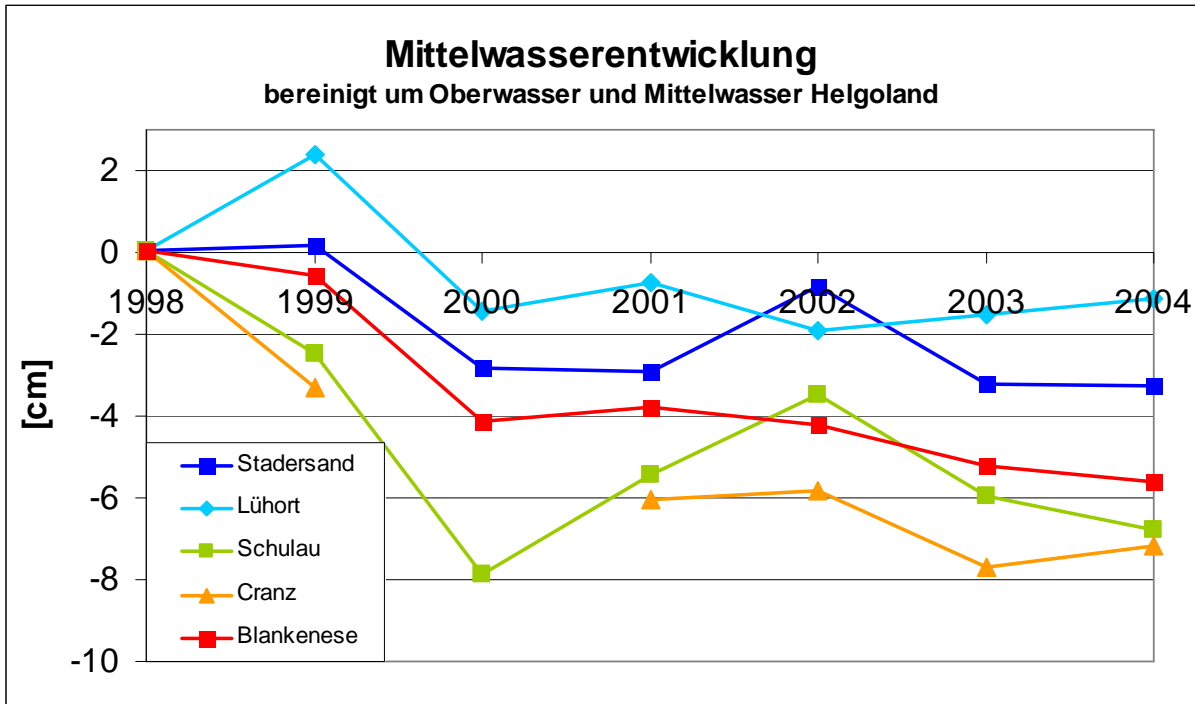


Abb. 29 – Abb. 32: Mittelwasserentwicklung seit 1998

## Interpretation der Mittelwasserentwicklung

Es fällt deutlich auf, dass bei allen Pegeln zwischen den Jahren 1999 und 2000 ein Knick nach unten zu erkennen ist, also das Mittelwasser abgesunken ist. Dieser Knick deutet sich bei einigen Pegeln bereits im Vorjahr an. In diesen Zeitraum fällt die Maßnahme *Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe*.

Physikalisch lässt sich folgendes herleiten: Durch die Erweiterung der Fahrrinne wurde deren Leistungsfähigkeit erhöht. D.h. ein Abfluss kann nun besser erfolgen. Als Folge davon sinkt das Mittelwasser ab. Eine ähnliche Aussage findet man auch in [4].

Betrachtet man das Mittelwasser für die weiteren Jahre, so findet man auch eine Mittelwasserabsenkung bei den Pegeln Kollmar und Glückstadt im Jahr 2003. Dem Autor sind keine Baumaßnahmen in dieser Zeit bekannt, die zu einem Absenken des Mittelwassers führen könnten. Damit besteht die Möglichkeit, dass es sich um eine natürliche Änderung handelt.

## Nodaltide

Bei dem Betrachten längerer Zeitreihen müssen auch langfristige Einflüsse mit einbezogen werden. Ein solcher langfristiger Effekt ist die Nodaltide. Sie moduliert den Tidehub mit einer Periodendauer von ca. 18,6 Jahren (s. Abb.33).

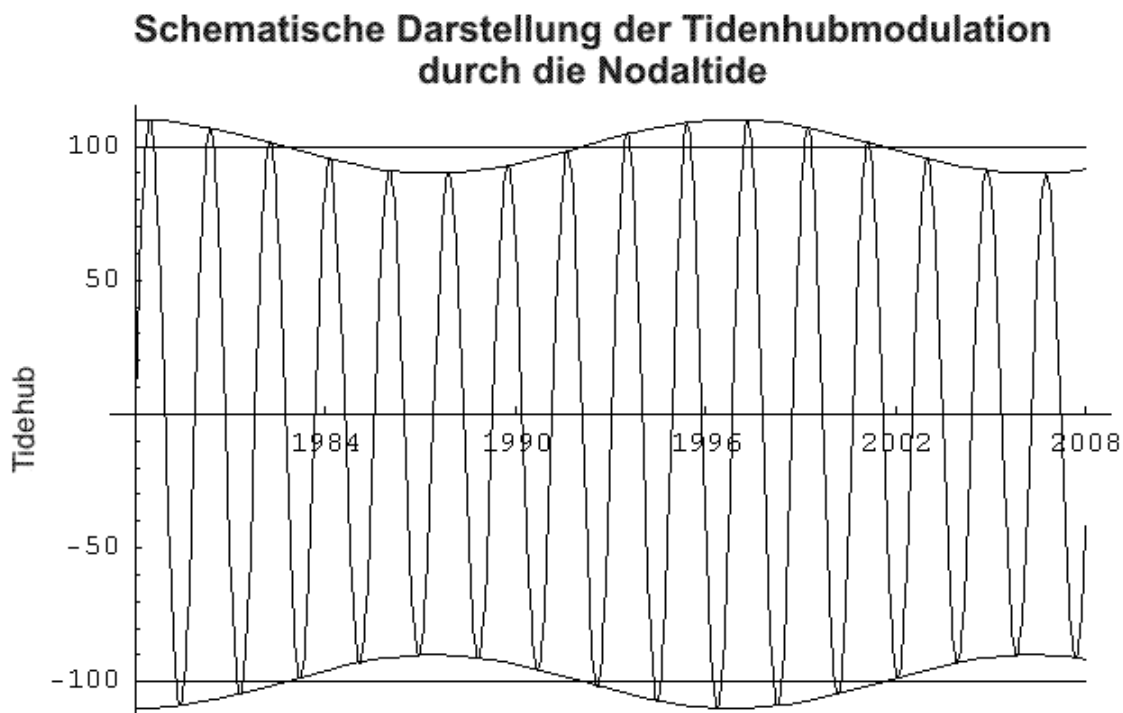


Abb. 33: schematische Darstellung der Modulation des Tidehubs durch die Nodaltide

Detaillierte Analysen für den Pegel Helgoland haben ergeben, dass das letzte Maximum der Nodaltide etwa in den Jahren 1995-1997 lag. Entsprechend ist das nächste Minimum in den Jahren 2004-2006 zu erwarten.

Die Modulation des Tidehubs entspricht etwa 2-4% des Tidehubs. In Helgoland entsprechen 3% etwa 6 cm Tidehub. Folglich nimmt der Tidehub in Helgoland nodalbedingt in den Jahren von etwa 1996 bis 2005 um ca. 6 cm ab und bis etwa zum Jahr 2015 wieder um 6 cm zu.





## Zusammenfassung

Betrachtet man die Wasserstandsänderungen seit dem Jahr 1998 im Hinblick auf die *Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe* fällt auf, dass das Mittelwasser in diesem Zeitraum absinkt. Diese Absenkung ist lokal leicht unterschiedlich und beträgt etwa zwischen 2 und 8 Zentimeter. Diese Reaktion ist physikalisch plausibel, da die Leistungsfähigkeit der Rinne vergrößert wurde und damit auch die Leistungsfähigkeit des Abflusses. Fest steht aber auch, dass es lokale Veränderungen im Mittelwasser in ähnlichen Größenordnungen gibt, ohne dass heute ein kausaler Zusammenhang hergestellt werden kann.

Schwieriger ist die Entwicklung des Tidehubs zu verstehen. Erfahrungen und Theorie besagen einen Anstieg des Tidehubs als Reaktion auf eine Erweiterung der Fahrrinne. Die tatsächliche Beobachtung zeigt eine weitgehende Absenkung des Tidehubs, die durch Veränderungen an den Rändern NeuDarchau und Helgoland nicht zu erklären ist. Die Partialtidenanalyse bestätigt die Theorie und zeigt eine Zunahme in den Amplitudensummen. Offensichtlich ist aber die *Überlagerung* der einzelnen Partialtiden jetzt Dergestalt, dass das Gesamtsignal - also der nach außen messbare Tidehub - verringert ist.

Hinsichtlich der letzten Aussage besteht noch zu wenig Erfahrung mit langfristigem Verhalten und Änderungen von Partialtiden, so dass sie vielmehr als Idee denn als Tatsache gelten soll.

In der Gesamtentwicklung von 1998 – 2004 ist die Theorie wieder bestätigt: es gibt einen Anstieg des Tidehubs ab etwa Brokdorf / Glückstadt. Dieser Anstieg geht bis zum Pegel Bunthaus und beträgt unter linearer Berücksichtigung des Absenkens des Tidehubs bei Helgoland bis zu 12 cm am Pegel Bunthaus.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt befinden wir uns in einem Nodalminimum. D.h., dass zukünftig der Tidehub in Helgoland wieder ansteigen wird und mit ihm auch die Tidehübe in der Elbe. Ausgehend von einer Modulation von 3% des Tidehubs wird es also beispielsweise am Pegel StPauli zu einer natürlich bedingten Zunahme von ca. 11 cm Tidehub in den nächsten 9 Jahren kommen.

## Literatur

[1] Butz, T. (2003): „Fouriertransformation für Fußgänger“, 3.Auflage, B.G.Teubner Verlag, Wiesbaden

[2] Shannon, C.E. (1948): „A Mathematical Theory of Communication“, Reprinted with corrections from *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.

[3] Oppenheim, A.V. et al. (2004): „Zeitdiskrete Signalverarbeitung“, 2.Auflage, Pearson Studium, München

[4] Pugh, D. (2004): „Changing sea levels: effects of tides, weather and climate“, University Press, Cambridge