

Flächenhafte Analysen numerischer Simulationen

aus EasyGSH-DB

J. Freund
R. Hagen
R. Ihde
A. Plüß
N. Dreier

easygsh@baw.de

EasyGSH



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur



Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), im Eigenverlag
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg
Telefon: +49 (0) 721 9726-0
Telefax: +49 (0) 721 9726-4540
E-Mail: info@baw.de, www.baw.de

Urheberrecht

Alle Inhalte aus EasyGSH-DB sind urheberrechtlich geschützt. Sofern nicht anders ausgewiesen, stehen die Inhalte dieser Seiten unter einer CC BY 4.0 Lizenz (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) zur Verfügung. Soweit nicht anders angegeben liegen alle Bildrechte bei der BAW.

Hamburg, 15. Februar 2021

Dieses Dokument kann mit der DOI https://doi.org/10.18451/k2_easygsh_fans_2 zitiert werden.

Hydrodynamikdaten der flächenhafte Analysen aus numerischer Simulation von EasyGSH-DB für die Jahre können unter www.easygsh-db.org für einen Zeitraum von 1996-2015 gefunden werden.

Eindeutige Identifier (UUID) zu den übergeordneten Metadaten und damit verbundenen Web-Services:

EasyGSH-DB: Tidekennwerte des Wasserstandes (TDKW):
fab0034-6341-4c6d-87f2-0006221c17f1

EasyGSH-DB: Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit (TDKV):
cc3327f8-7f40-4a26-9a61-f91408b66a8f

EasyGSH-DB: Tidekennwerte des Salzgehaltes (TDKS):
08c78ab2-4a83-49fa-8ced-31eca63cd53a

EasyGSH-DB: Tidekennwerte der Bodenschubspannung (TDKB):
e700c641-922f-4cd8-873a-460acd07e572

EasyGSH-DB: Langzeitkennwerte des Wasserstands (LZKW):
72476d5f-4497-4493-9382-583c5d7c7ff7

EasyGSH-DB: Langzeitkennwerte des Salzgehaltes (LZKS):
d883aaf6-966a-4292-8808-0afe063eb7dd

EasyGSH-DB: Langzeitkennwerte des Seegangs (LZSS):
ae16ec51-118d-45e5-a6ec-7537f6822c13

EasyGSH-DB: Harmonische Analyse des Wasserstandes (FRQW):
872d88f8-c825-431b-ae1a-b52d1ae836d9

Web-Services für Geoinformationssysteme (zum Einbinden in GIS-Systeme, das **Jahr** ändern).
Mögliche Jahre im Zeitraum zwischen 1996-2015.

WMS - http://mdi-dienste.baw.de/geoserver/EasyGSH_Kennwerte_Jahr/wms

WFS - http://mdi-dienste.baw.de/geoserver/EasyGSH_Kennwerte_Jahr/wfs

WCS - http://mdi-dienste.baw.de/geoserver/EasyGSH_Kennwerte_Jahr/wcs

Themengebiet - Hydrodynamik - <https://doi.org/10.48437/02.2020.K2.7000.0003>

Zitation für diese Datensätze:

Hagen, R., Plüß, A., Freund, J., Ihde, R., Kösters, F., Schrage, N., Dreier, N., Nehlsen, E., Fröhle, P. (2020): EasyGSH-DB: Themengebiet - Hydrodynamik. Bundesanstalt für Wasserbau. <https://doi.org/10.48437/02.2020.K2.7000.0003>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Motivation zur flächenhaften Analyse	1
3	Flächenhafte Analyse	1
4	Analysemethode	4
4.1	Harmonische Analyse	4
4.2	Langzeitkennwertanalyse	5
4.3	Tidekennwertanalyse	5
4.3.1	Ausbreitung der Tidewelle	5
4.3.2	Berechnung der Kenngrößen	6
4.3.3	Berechnung für einen Zeitraum	6
4.4	Seegangsanalysen	6
4.5	Einschränkungen	8
5	Anwendung in EasyGSH-DB	10
5.1	Eingangsdaten	10
5.2	Analyse	10
5.2.1	Harmonische Analyse	10
5.2.2	Langzeitkennweranalysen	10
5.2.3	Tidekennwertanalyse	11
5.2.4	Seegangsanalysen	13
6	Anhang	15
6.1	Harmonische PT	15
6.2	Quantil	15

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Langzeitkennwerte des Wasserstandes (BAW)	3
Abbildung 2:	Tidekennwerte des Wasserstandes (BAW)	3
Abbildung 3:	Tidekennwerte der Strömung (BAW)	4
Abbildung 4:	Schematische Darstellung der Fortschrittsrichtung der Tidewelle als M2-PT-Phasen in der Deutschen Bucht. BAW 2019.	7
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Weiterleitung des Tidesignals an den Referenzpunkten innerhalb eines Untersuchungsgebietes. BAW 2019.	7
Abbildung 6:	Histogramm des Tidehubs bei Helgoland für alle Tiden des Jahres 2012 mit dem Fit der Normalverteilung (rote Kurve) und den 99 % , 95 % , 50 % , 5 % und 1 % Quantil (gestrichelte Linien).	16

Abkürzungsverzeichnis

BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
EasyGSH-DB	Erstellung anwendungsorientierter synoptischer Referenzdaten zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der Deutschen Bucht
Hw	Hochwasserstand
Nw	Niedrigwasserstand
PT	Partialtiden
Thb	Tidehub
Thw	Tidehochwasser
Tmw	Tidemittelwasser
Tnw	Tideniedrigwasser
TDKW	Tidekennwerte des Wasserstandes
TDKV	Tidekennwerte der Strömung
LZKW	Langzeitkennwerte des Wasserstandes
FRQW	harmonische Analyse des Wasserstandes

1 Einleitung

Numerische Modelle stellen ein wichtiges Werkzeug zur Bewertung hydrodynamischer Prozesse dar. Bei hochaufgelösten Simulationsmodellen ist die Anzahl der berechneten und ausgegebenen Ergebnisdaten erheblich u. U. sogar groß bis riesig. Für die Übersicht und das Verständnis der umfangreichen Modellergebnisse sind standardisierte Kennwertdefinitionen wie z. B. nach DIN 4049-3 (?) hilfreich. Analysierte Kennwerte sowohl aus Modellen als auch aus Messungen, ermöglichen eine objektive Beurteilung und Vergleichbarkeit (Güte - Qualitätssicherung) der Simulationsergebnisse.

Das vom BMVI als *mFUND* geförderte Projekt „Erstellung anwendungsorientierter synoptischer Referenzdaten zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der Deutschen Bucht (EasyGSH-DB)¹“ hat das Ziel, für 20 Jahre durchgängige Simulationsdaten (1996-2015) (siehe Abschnitt 5.1) zu erzeugen, aufzubereiten und zu analysieren. Dafür werden die synoptischen, hydrodynamischen Simulationsergebnisse flächenhaft für jedes Kalenderjahr analysiert und entsprechende flächenhafte Kennwerte berechnet. Unterschieden wird dabei zwischen tideabhängigen (Tidekennwerte) und tideunabhängigen (Langzeit-) Kennwerten, sowie Kennwerte der harmonischen Analyse. Die Tidekennwerte sind nach DIN 4049-3 (?) ein-eindeutig definiert und beschreiben die Tidedynamik und ihre Veränderungen.

Nachfolgend wird die Methodik zur Berechnung flächenhafter Tidekennwerte und -parameter bzw. ihre Anwendbarkeit sowie Informationen zur Interpretation und Weiternutzung dokumentiert. Die Bestimmung der Tidekennwerte an einzelnen Orten dient der Validierung der Simulationsergebnisse anhand von lokalen Messwerten (z. B. Pegel) und ist im Validierungsdokument (?) sowie den Jahreskennblättern (?) zu EasyGSH-DB zu finden.

2 Motivation zur flächenhaften Analyse

Die Berechnung von flächenhaften Kennwerten bietet den Vorteil, dass die Daten auf ihren grundlegenden Informationsgehalt reduziert werden und durch eine Verringerung der Datenmenge ein leichteres Handling ermöglicht wird. Zudem werden die Ergebnisse objektiv dargestellt und sind mit Daten anderer Modelle, mit Messungen aber auch mit Berechnungen für andere Zeiträume (z. B. unterschiedliche Jahre oder Bathymetrie) vergleichbar. Insbesondere die Langzeitkennwerte stellen zusätzlich eine Qualitätsicherung der Modellergebnisse dar, da hier u. a. Ausreißer detektiert und somit „sichtbar“ werden und entsprechend korrigiert werden können.

3 Flächenhafte Analyse

Die hier vorgestellte flächenhafte Analyse von numerischen Simulationen berechnet Kennwerte nach festgelegten Definitionen. Unterschieden wird zwischen harmonischer, Langzeit- und Tidekennwertanalyse.

Die **harmonische Analyse** berechnet Kennwerte auf der Basis von Partialtiden für Wasserstand und Strömung. Die harmonische Analyse des Wasserstandes (FRQW) berechnet die Amplitude und die Phase z. B. der halbtägigen Hauptmond tide (M2) oder der halbtägigen

¹www.easygsh-db.org

Sonnentide (S2).

Die Analyse der **Langzeitkennwerte** berechnet die tideunabhängigen Extrem- und Mittelwerte über den gesamten gewählten Analysezeitraum. Ein Beispiel ist die Berechnung der Langzeitkennwerte des Wasserstandes (LZKW), die Kennwerte für den Hochwasserstand (Hw) und den Niedrigwasserstand (Nw) (siehe auch Abb. 1). Die Langzeitkennwerte können neben dem Wasserstand auch für die Strömung, die Temperatur, den Schwebstoffgehalt, die effektive Bodenschubspannung, den Wassertransport, den Salztransport, den Geschiebetransport berechnet werden. Desweiteren können Kennwerte für meteorologische Größen (z. B. Windgeschwindigkeiten) und für den Seegang berechnet werden.

Bei der Analyse der **Tidekennwerte** werden namensgebend tidebezogene Kennwerte berechnet. Das sind zum Beispiel bei der Berechnung der Tidekennwerte des Wasserstandes (TDKW) unter anderem das Tidehochwasser (Thw), das Tideniedrigwasser (Tnw) und das Tidemittelwasser (Tmw). Die weiteren Kennwerte des Wasserstandes sind in Abb. 2 und die Tidekennwerte der Strömung (TDKV) in Abb. 3 dargestellt. Zusätzlich zu den Tidekennwerten von Wasserstand und Strömung können Tidekennwerte für den Salzgehalt, die Temperatur, den Schwebstoffgehalt, sowie die zugehörigen Transporte berechnet werden. Darüberhinaus sind Analysen der effektive Bodenschubspannung und des Geschiebetransportes tideabhängig möglich.

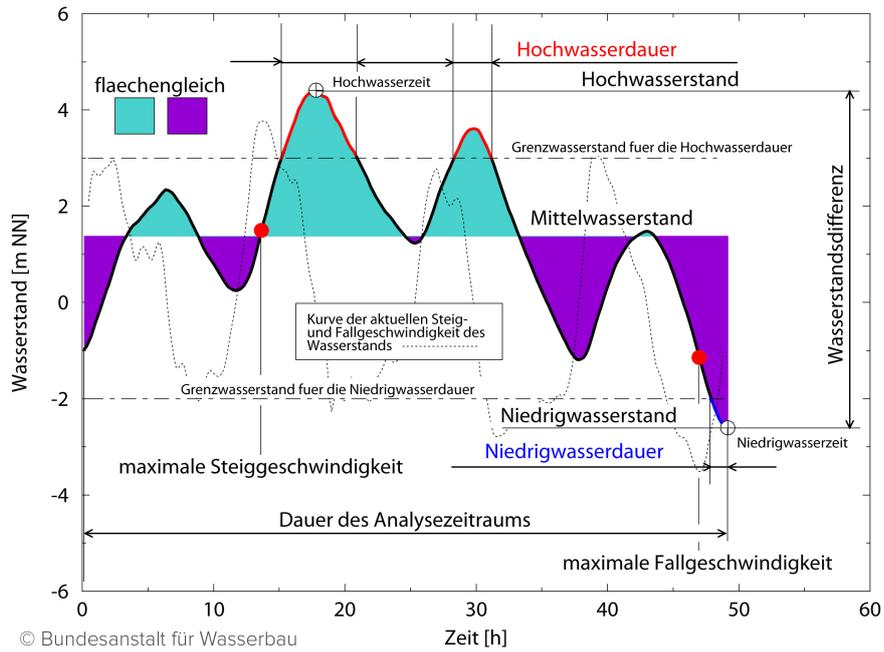


Abbildung 1: Langzeitkennwerte des Wasserstandes (BAW)

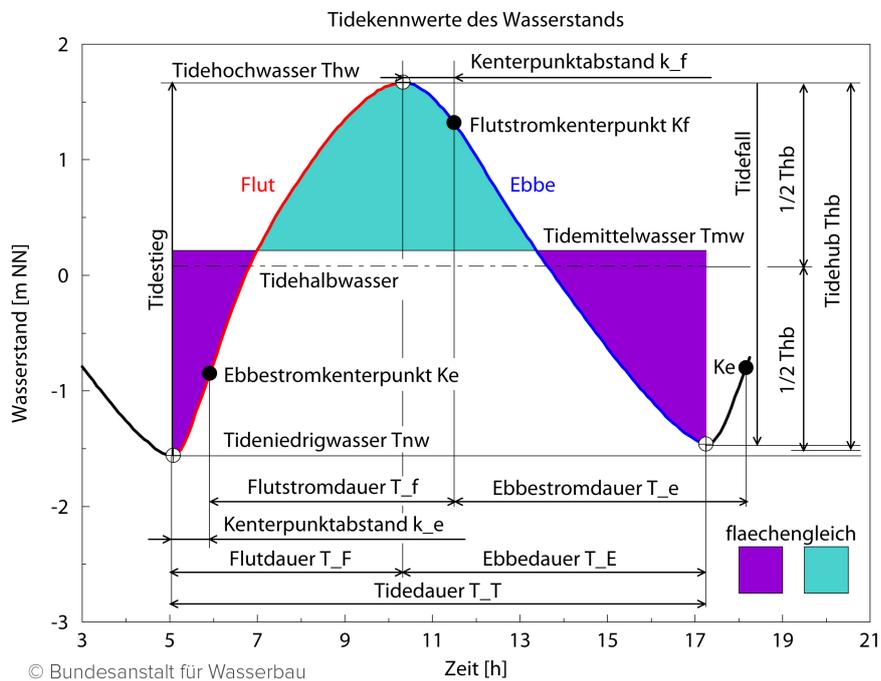


Abbildung 2: Tidekennwerte des Wasserstandes (BAW)

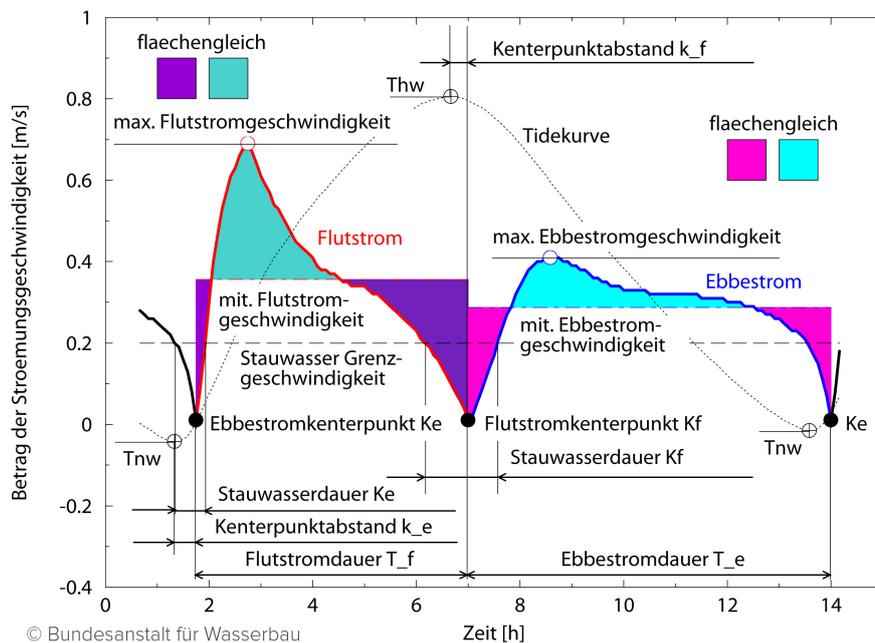


Abbildung 3: Tidekennwerte der Strömung (BAW)

4 Analysemethode

Zur Analyse von flächenhaften Daten wird in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) das interne Programm NCANALYSE² genutzt. NCANALYSE berechnet Kennwerte und verfügt dafür über die in Abschnitt 3 beschriebenen Modi zur Analyse der harmonischen Partialtiden (PT), der Langzeitkennwerte und der Tidekennwerte. Die Methoden der drei Analysen werden nachfolgend beschrieben. Eine genaue Auflistung der einzelnen Analysen und ihrer Ergebnisse findet sich bei Lang (2003) und unter: <http://wiki.baw.de/de/index.php/NCANALYSE>. Für den Bereich der Deutschen Bucht werden zudem flächenhafte Seegangsergebnisse (sog. „Seegangsanalysen“, z.B. in Form von jährlichen Mittelwerten und Perzentilen) bereitgestellt, die auf den Simulationsergebnissen des Seegangmodells SWAN (Booij u. a. (1999)) basieren. Zur Umwandlung und Analyse der flächenhaften Daten wurde eine Schnittstelle auf Basis der Programme MATLAB und CDO (Schulzweida (2019)) entwickelt und angewendet, welche nachfolgend im Kapitel 4.4 beschrieben wird.

4.1 Harmonische Analyse

Die harmonische Analyse ist eine spezielle Form der Fourierzerlegung einer Zeitreihe. Das Verfahren der harmonischen Analyse ist bereits gut dokumentiert (Foreman u. a. (2009); Godin (1972); Horn (1948); Pansch (1988); Pugh (1987)). Zur Berechnung der PT wird in der BAW eine Frequenzanalyse mit der Least Square Fit Methode (LSQF) im Programm NCANALYSE genutzt, wobei die harmonische Analyse sowohl für Wasserstand als auch für Strömung durchgeführt werden kann PT-Analyse-BAWiki. Jede detektierte PT, auch als harmonische Konstante bezeichnet, wird durch Amplitude und Phase definiert und fällt je nach Lage und Tidedynamik z. T. stark unterschiedlich aus.

²<http://wiki.baw.de/de/index.php/NCANALYSE>

In der speziellen Anwendung auf die Tidedynamik wird das Signal des Wasserstands in eine Reihe von Sinus-Gliedern mit unterschiedlichen, fest vorgegebenen Frequenzen zerlegt. Die Frequenzen entsprechen der zeitlichen Veränderlichkeit der Bahnlinien von Mond und Sonne. Die Stellung von Mond und Sonne zur Erde wird durch die Entfernung vom Erdmittelpunkt sowie durch die Breite und Länge, bezogen auf die Ekliptik,³ beschrieben. Alle drei Größen sind periodische Funktionen von fünf Winkeln (s , h , p , N und q) zur Zeit T . Die Bedeutung und Periode dieser Winkel sind in der Tabelle 1 angegeben.

Die halb- und eintägigen Tiden sind in der Nordsee/Deutschen Bucht dominant und prägen dort den Gezeitenzyklus. Am stärksten ist die Mondtide M2, gefolgt von der Sonnentide S2, die zusammen den Spring-Nippzyklus bestimmen. Die Seichtwassertiden im Küstenbereich (M4, M6) erreichen teilweise Amplituden von 15-20 cm.

Eine Übersicht der gängigen Partialtiden gibt die Tabelle 2. Zur Randwertsteuerung, zur Kalibrierung und zum Multi-Modell-Vergleich werden nur ausgewählte PT (Teilmengen) verwendet.

4.2 Langzeitkennwertanalyse

Mit der Langzeitkennwertanalyse werden nicht periodische (i. W. tideunabhängige) Simulationsdaten untersucht. Mit Hilfe der Langzeitkennwerte können Bereiche, in denen keine definierbaren Einzeltiden vorliegen (z. B. Ostseewasserstände) analysiert werden und Charakteristiken für den gesamten Zeitraum festgestellt werden.

Eine Langzeitkennwertanalyse diagnostiziert zum Beispiel Ausreißer (Über- bzw. Unterschwinger) aus der Simulation, da jeder Zeitpunkt in den Ergebnissen enthalten bleibt. Damit dient eine Langzeitkennwertanalyse auch zur Qualitätssicherung der Simulationsergebnisse. Wenn ein Element zu einem bestimmten Zeitpunkt zum Beispiel einen deutlich höheren Wasserstand als im gesamten anderen Untersuchungsgebiet und -zeitraum aufweist, ist dieser in der Langzeitanalyse des Wasserstands als Peak erkennbar.

4.3 Tidekennwertanalyse

Liegt ein zeitlich periodisches Signal vor, wie bei der Tide, kann eine Tidekennwertanalyse durchgeführt werden. Die Tidekennwerte werden als Mittel-, Extrem- und Quantilwerte ausgegeben. Dafür wird zunächst der Verlauf der Tidewelle betrachtet (Abschnitt 4.3.1), gefolgt von der Berechnung der Kenngrößen für jede einzelne, gelaufene Tide (Abschnitt 4.3.2), bevor abschließend die Berechnung für den gesamten zu analysierenden Zeitraum (Abschnitt 4.3.3) vorgenommen wird. Bei der Analyse der Simulationsergebnisse eines gesamten Kalenderjahres werden mithin rund 706 Tiden pro Gitterzelle ausgewertet.

4.3.1 Ausbreitung der Tidewelle

Zur Berechnung der Tidekennwerte, müssen zuerst die einzelnen Tiden in einem Untersuchungsgebiet bestimmt werden. Die Eintrittszeiten der Tidewelle unterscheiden sich innerhalb des Untersuchungsgebietes deutlich (z. B. zwischen Thw-Borkum und Thw-Wyk). Ein Tidezyklus in dem Bereich der Deutschen Bucht wird im Wesentlichen durch semidiurnale PT bestimmt und dauert entsprechend der Kreisfrequenz der dominierenden halbtägigen

³Ebene, in der die Erde die Sonne umkreist, also die jährliche Bahn der Erde

Mondtide M2 etwa 12 Stunden und 25 Minuten. Die Tidewelle durchläuft die südliche Nordsee linksdrehend als sog. „Kelvin-Welle“ Kelvin (1868). Durch Bestimmung der räumlichen Ausbreitung / Fortschrittsrichtung der Tidewelle, werden die Eintrittszeiten einer singulären, „gelaufenen“ Tide an unterschiedlichen Orten im Untersuchungsgebiet festgestellt. Ansatzweise kann die Propagation der Tide auch über die Phasen der M2-PT visualisiert werden (siehe Abb. 4).

Die Ausbreitung wird im Untersuchungsgebiet anhand von Positionen (nachfolgend Referenzpunkte) ermittelt. Mit Hilfe der Referenzpunkte wird der Tidewellenverlauf verfolgt. Die räumlichen Abstände zwischen den Referenzpunkten müssen anhand der Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewellen zulassen, dass z. B. eintretende Tidehochwasser an zwei aufeinanderfolgenden Referenzpunkten eindeutig zu einer Tide gehören. Zusätzlich wird ein Hauptreferenzpunkt definiert, zu dem alle Tiden relativ gesehen werden. Wird beispielsweise Helgoland als Hauptreferenzpunkt festgelegt, ist hier z. B. der Eintrittszeitpunkt der ersten Tide 0 min, alle andere Referenzpunkte beziehen sich dann darauf und haben entweder positive, also spätere Eintrittszeiten oder negative, frühere Eintrittszeiten. Alle Referenzpunkte sind zu jedem Zeitpunkt des Analysezeitraums mit Wasser bedeckt. Die Weiterleitung der Tidewelle über Referenzpunkte ist schematisch in Abb. 5 dargestellt. Abhängig vom gewählten Analysemodus wird der Beginn einer neuen Tide über den Kenterungszeitpunkt (strömungsbasierte Analysen) oder Tidehoch- und Tideniedrigwasserzeitpunkt (wasserstands-basierte Analysen) bestimmt. Zu dem Zeitpunkt, an dem sich die Strömungsrichtung zwischen Ebbe und Flut dreht (auch Kenterpunkt genannt), wird die Kenterpunktzeit bestimmt. Um eine Änderung der Strömungsrichtung festzustellen, muss somit vorher eine eindeutige Strömungsrichtung festgestellt worden sein.

4.3.2 Berechnung der Kenngrößen

Nach der eindeutigen Definition und Zuordnung aller Tiden im Modellgebiet werden charakteristische Größen bestimmt, deren Definition in Abschnitt 3 beschrieben ist. Bekannte Kennwerte des Wasserstandes werden durch das η definiert und sind z. B. der Tidehub (Thb), das Tidehoch- und Tideniedrigwasser sowie das Tidemittelwasser. Analog erfolgt die mögliche Berechnung von Kennwerten des Salztransports, Wärmetransports, Schwebstofftransports, Geschiebetransports und der effektiven Bodenschubspannung.

4.3.3 Berechnung für einen Zeitraum

Aus den Kennwerten der Einzeltiden werden im Anschluss daran die Größen für den gesamten Analysezeitraum berechnet. Es können Extrem- und Mittelwerte bzw. Quantile berechnet werden. Die Quantile zeigen die Varianz der Tidekennwerte innerhalb des Zeitraumes, verzerren sich aber nicht durch eventuelle vereinzelte Extremereignisse, wie z. B. Sturmfluten.

4.4 Seegangsanalysen

Zur teil-automatisierten Auswertung und Umwandlung der flächenhaften unstrukturierten SWAN-Ergebnisdateien im MATLAB-Format (*.mat) mit stündlicher Auflösung in das GeoTiff-Rasterdatenformat im Rahmen des Postprocessings (Nachbearbeitung), wurde eine Schnittstelle auf Basis der Programme MATLAB und CDO entwickelt und angewendet. Nachfolgende Verarbeitungsschritte wurden dabei implementiert:

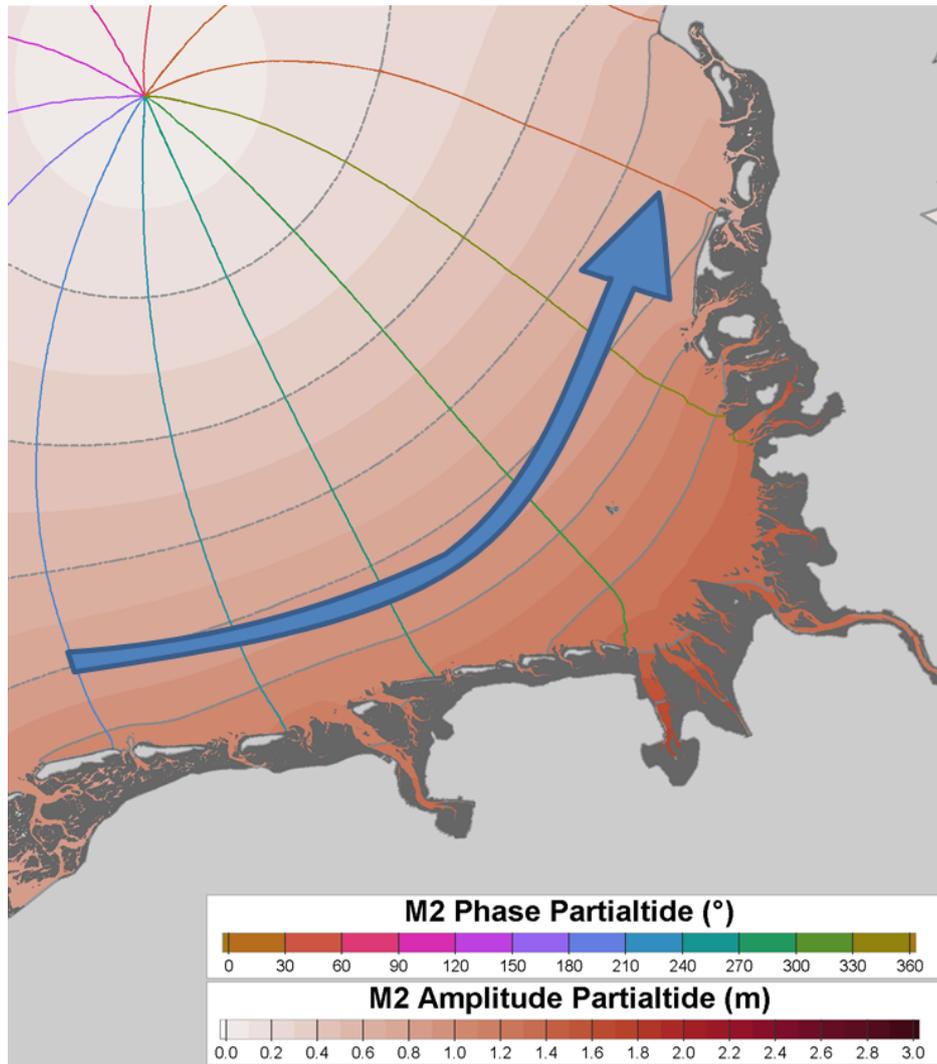


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Fortschrittsrichtung der Tidewelle als M2-PT-Phasen in der Deutschen Bucht. BAW 2019.

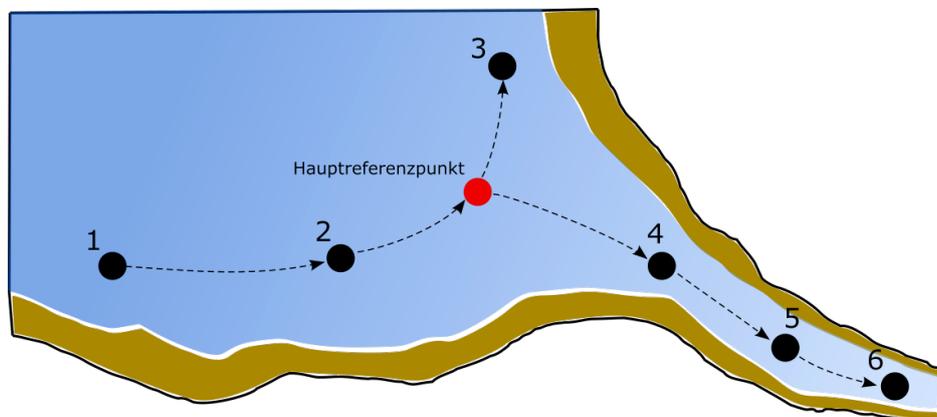


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Weiterleitung des Tidesignals an den Referenzpunkten innerhalb eines Untersuchungsgebietes. BAW 2019.

1. Räumliche Interpolation der monatlichen Simulationsergebnisse (signifikante Wellenhöhe, Peakperiode sowie mittlere Wellenanaufrichtung) von den Knoten des Berechnungsgitters auf die Umkreismittelpunkte (Circumcenter) der Dreieckselemente des unstrukturierten Berechnungsgitters mittels MATLAB und Ausgabe im Netcdf-Format (*.nc)
2. Erzeugung einer jährlichen beschreibenden Gitterdefinitionsdatei (jedes Jahr besitzt eine andere Knotennummerierung des unstrukturierten Berechnungsgitters) mittels MATLAB im Netcdf-Format, sodass die erzeugten Simulationsergebnisse im Netcdf-Format (1) mittels CDO weiterverarbeitet werden können (Hinweis: in CDO wird davon ausgegangen, dass die Variablen an den Zellmittelpunkten definiert sind und nicht wie in numerischen Simulationen üblich an den Knoten)
3. Erstellung einer beschreibenden Gitterdefinitionsdatei für das von der BAW in EasyGSH verwendete Rasterdaten-/Ausgabeformat (Rechteckgitter $dx=dy=100m$, Netcdf) im Bereich der DB
4. Erstellung einer Land-See-Maske zur Filterung von Interpolationsergebnissen im Anschluss an (5)
5. Zusammenfassung der monatlichen Dateien zu Jahresdateien (Mergen), Berechnung der o.g. statistischen Kennwerte, räumliche Interpolation (Remapping) der statistischen Kennwerte vom unstrukturierten Berechnungsgitter (1) bzw. (2) auf das finale Ausgabegitter (3), Filterung der interpolierten Daten mit einer Land-See-Maske (4) sowie Setzen der Fehlerwerte (-99) wo keine Daten vorhanden sind mittels CDO
6. Räumliche Filterung der Daten durch Zuordnung von Fehlerwerten an Datenpunkten im Übergangsbereich, wo von einer signifikanten Beeinflussung der statistischen Kennwerte (alle außer Mittelwert und 50%-Perzentil) durch lokale Wasserstände bzw. Strömungen auszugehen ist
7. Konvertierung der flächenhaften statistischen Kennwerte aus den jährlichen Netcdf-Dateien (5) vom Netcdf-Format in das GeoTIFF-Format sowie Koordinatentransformation vom geografischen System (WGS84) der Simulationsdaten in ein projiziertes lokales System (UTM32N)

4.5 Einschränkungen

Die Analyse der Daten wird auf dem gleichem Gitter wie die Simulation vorgenommen, das heißt für jedes Gitterelement werden die Kennwerte berechnet und über den gesamten Analysezeitraum gemittelt. Bei einem großen Simulations- bzw. Ergebniszeitschritt ist eine zeitgenaue Bestimmung der Tiden u. U. schlecht oder garnicht möglich. Davon sind dann einige Größen wie beispielsweise die Tidedauer betroffen. Um diese Ungenauigkeiten so gering wie möglich zu halten, wird in Programm NCANALYSE eine Verbesserung der Extremwertbestimmung durch eine Spline-Interpolation vorgenommen. Zu beachten sind außerdem trockenfallende Bereiche, wie z. B. Wattflächen und Außensände. Durch die Numerik der Simulationsprogramme ist der Wasserstand auf den Flächen nicht genau Null, sondern es ist ein geringer Restwasserstand vorhanden. Um die trockenfallenden Flächen zu bestimmen,

wird in der Analyse eine minimale Wasserbedeckung als Grenzwert vorgegeben. Bei geringeren Wasserständen nimmt das Analyseprogramm eine Fläche als trocken gefallen an. Der teilweise noch vorhandene Wasserstand in einigen Elementen kann sehr klein sein, dadurch kann aber z. B. eine sehr niedriges (positives) Tideniedrigwasser in der Berechnung entstehen.

Für eine komplette Tidekennwertanalyse, muss jeweils die gleiche Tide im gesamten Gebiet detektiert werden (siehe Abschnitt 4). Damit eine vollständige Tide in der Analyse ein Gebiet durchläuft, muss u. U. der Analysezeitraum entsprechend modifiziert werden.

5 Anwendung in EasyGSH-DB

5.1 Eingangsdaten

In EasyGSH-DB sind die Eingangsdaten für die Analysen tiefengemittelte Simulationsergebnisse auf Basis 10-minütiger Werte und einer unstrukturierten Gittertopologie. Die Vorgehensweise und Ergebnisse der Simulation sind in einem Validierungsdokument ausführlich beschrieben (BAW, 2019). Weiterhin sind dort alle modelltechnisch relevanten Informationen ausführlich dokumentiert. Für jedes berechnete Kalenderjahr werden die Eingangsdaten separat in 20 Jahreskennblättern beschrieben. Die synoptischen Ergebnisse der Simulation stehen der Allgemeinheit gerastert online und zum Download zur Verfügung. Eingangsdaten für die Seegangsanalysen (vgl. Kapitel 4.4) sind stündlichen Simulationsergebnisse von SWAN, welche auf einem unstrukturierten Berechnungsgitter vorliegen. Die Simulationsergebnisse werden im EasyGSH-Abschlussbericht sowie in einem separaten Validierungsdokument ((Dreier u. a., 2021)) zusammengefasst.

5.2 Analyse

Aus den zahlreichen Möglichkeiten der Analysen, die in Abschnitt 4 beschrieben sind, wurde in EasyGSH-DB in Abstimmung mit den Stakeholdern eine Auswahl an Analysen und Produkten getroffen. Berechnet werden Wasserstand, Strömung, Salzgehalt, Seegang und effektive Bodenschubspannung. Für diese Größen werden harmonische-, Langzeit- und Tidekennwert-Analysen durchgeführt. Es wird eine minimale Wasserbedeckung als Grenzwert (Grenzwasserstand) zur Bestimmung des Trockenfallens von 0,1 m vorgegeben. Der Analysezeitraum beträgt ein Kalenderjahr vom 1. Januar bis zum 31. Dezember. Mit Ausnahme der harmonischen Analyse werden alle Kennwerte als Quantile für ein gesamtes Jahr ausgegeben. Berechnet und dokumentiert werden 95 %, 50 % und 5 % Quantile der Tidekennwerte und 99 % und 1 % Quantile der Langzeitkennwerte.

Darstellungen zu den Analysen finden sich zusammen mit dem Download auf dem Datenportal. Insgesamt wurden in EasyGSH-DB für jedes der zwanzig Jahre **58 Analyseergebnisse** erstellt.

Die ausgewählten Größen sind im Folgenden kurz beschrieben.

5.2.1 Harmonische Analyse

M2 Amplitude

Für die deutsche Bucht ist die M2 Partialtide als halbtägige Tideform dominant und daher wird die Amplitude der M2 Partialtide berechnet und dokumentiert.

M2 Phase

Zusätzlich werden die Phasen der M2 erstellt und sind als M2 Phasen-Isolinien verfügbar.

5.2.2 Langzeitkennweranalysen

extreme Wasserstände (Quantile)

Extreme Wasserstände sind Hoch- und Niedrigwasserstand im gesamten Zeitraum, die nicht

auf einzelne vollständige Tiden begrenzt sind. Sie werden als 99 % und 1 % Quantil ausgegeben, sodass extreme Ausreißer nicht mit betrachtet werden.

extreme Salzgehalte (Quantile)

Extreme Salzgehalte sind die höchsten Salzgehalte im gesamten Analysezeitraum, die nicht auf einzelnen Tiden begrenzt sind. Sie werden 99 % und 1 % Quantil ausgegeben, sodass extreme Ausreißer nicht mit betrachtet werden.

signifikante Wellenhöhe (Quantile)

Als signifikante Wellenhöhe werden die 50 %, 95 % und 99 % Quantile der maximalen signifikanten Wellenhöhe ausgegeben.

mittlere Wellenperiode bei max. sign. Wellenhöhe

Die mittlere Wellenperiode ist die gemittelte Wellenperiode, die bei maximalen signifikanten Wellenhöhen im Analysezeitraum aufgetreten ist.

mittlere Wellenrichtung bei max. sig Wellenhöhe

Die mittlere Wellenrichtung ist die gemittelte Wellenrichtung, die bei maximalen signifikanten Wellenhöhen im Analysezeitraum aufgetreten ist.

5.2.3 Tidekennwertanalyse

Wasserstand

Tidehochwasser (Quantile)

Das Tidehochwasser Thw ist der höchste Wasserstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tideniedrigwasserständen. Das Thw wird für jede Tide berechnet und hier jeweils über ein Jahr gemittelt. Statt Extremwerten werden 5 %, 50 % und 95 % Quantile erstellt. Mit den Quantilen werden durchschnittliche Tidehochwasser mit dem 50 % Quantil und starke bzw. schwach ausgeprägte Tidehochwasser mit dem 95 % und 5 % Quantil dargestellt. Das Tidehochwasser wird nur ausgegeben, wenn alle Elemente im gesamten Analysezeitraum mit Wasser bedeckt sind. Zum Vergleich dient die Ausgabe der Anzahl der Tidehochwasser pro Jahr und Gitterzelle.

Tideniedrigwasser (Quantile)

Das Tideniedrigwasser Tnw ist der niedrigste Wasserstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tidehochwassern und wird für jede Tide berechnet. Synonym zu dem Tidehochwasser werden auch für das Tideniedrigwasser Quantile erstellt. Das 50 % Quantil zeigt das durchschnittliche Tideniedrigwasser im Analysezeitraum an, das 95 % stärker und das 5 % schwächer ausgeprägte Tideniedrigwasser.

Tidehub (Quantile)

Der Tidehub Thb ist die Differenz von einem Tidehochwasser zum Mittelwert der tangierenden Tideniedrigwasser. Von dem Tidehub werden die 5 %, 50 % und 95 % Quantile veröffentlicht.

Tidemittelwasser (Quantile)

Das Tidemittelwasser Tmw ist der integrale Mittelwert der Tidekurve; es trennt als waagerechte Linie die Flächen gleichen Inhalts ober- und unterhalb der Mittelwasserlinien (vergl. Abb. 2). Das Tmw ist nicht zu verwechseln mit dem Tidehalbwasser, das sich aus der Differenz zwischen dem Thw und dem Mittelwert der Tnw vor und nach dem Thw errechnet. Das Tidemittelwasser wird für jede Tide berechnet. Veröffentlicht wird das 50 % Quantil des Tidemittelwassers.

Anzahl der Tidehoch- und Tideniedrigwasser

Die Anzahl der Thw und Tnw ist die Summe der Tidehoch- und Tideniedrigwassereignisse im Analysezeitraum. Der Wert kann zwischen den Elementen variieren, da bei trockenengefallenen Gebieten (Grenzwasserstand) keine Berechnung durchgeführt wird.

Überflutungsdauer

Die Überflutungsdauer wird für jede Tide (von Niedrigwasser zu Niedrigwasser) berechnet. Das bedeutet, dass die höchstmögliche Überflutungsdauer eines nicht trockenengefallenen Elements die gesamte Tidedauer wiedergibt. Da diese Größe für jeden Tide nur einmal berechnet wird, gibt es genau eine minimale und maximale Überflutungsdauer (=Überflutungsdauer genau einer Tide).

Tidedauer

Die Tidedauer ist der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tideniedrigwassereignissen.

Strömung

Flutstromgeschwindigkeit (Quantile)

Die Flutstromgeschwindigkeit ist die tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit während der Flutstromdauer, veröffentlicht werden die 5 %, 50 % und 95 % Quantile.

Ebbestromgeschwindigkeit (Quantile)

Die Ebbestromgeschwindigkeit ist die tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit während der Ebbestromdauer, veröffentlicht werden die 5 %, 50 % und 95 % Quantile.

Verhältnis Flut-/Ebbestromgeschwindigkeit zu Tidestromgeschwindigkeit

Das Verhältnis der Flut- oder Ebbestromgeschwindigkeit zur Tidestromgeschwindigkeit gibt an, welche Bereiche Flutstrom bzw. Ebbestrom dominant sind.

Salzgehalt

Salzgehalt pro Tide (Quantile)

Die tiefenintegrierten Salzgehalte werden für jeden Tide gemittelt und als 5 %, 50 % und 95 % Quantile ausgegeben.

Bodenschubspannung

Eff. Bodenschubspannung (Flut/Ebbe) (Quantile)

Für die effektive Bodenschubspannung werden die 5 %, 50 % und 95 % Quantile separat für Flut- und Ebbeströmung berechnet.

5.2.4 Seegangsanalysen

Aus den flächenhaften Simulationsergebnissen im Produktgebiet wurden folgende jährliche Kennwerte bzw. Produkte mittels statistischer Methoden erzeugt:

- Signifikante Wellenhöhe (H_{m0}): 99%-/95%-/50%-Perzentil sowie Mittelwert
- Peakperiode (T_p): 95%-/50%-/5%-Perzentil sowie Mittelwert
- Mittlere Seegangenergie E (siehe Gleichung 1 bzw. 3)
- Energiegewichtete mittlere Wellenanlaufriechung $\Theta_{m,E}$ (siehe Gleichung 8 bzw. 9)

Die mittlere Seegangenergie berechnet sich nach linearer Wellentheorie mittels:

$$E = \frac{1}{8} \rho g \overline{H_{rms}^2} \quad (1)$$

in Kombination mit:

$$H_{rms} = \frac{H_{m0}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

und einer gewählten mittleren Dichte von Seewasser (Nordsee):

$$\rho = 1026 \frac{kg}{m^3}$$

und der Erdbeschleunigung:

$$g \sim 9,81 \frac{m}{s^2}$$

folgt:

$$E = \frac{1}{16} \rho g \overline{H_{m0}^2} = 629,06625 * \overline{H_{m0}^2} \text{ in } (W \frac{s}{m^2}) \quad (3)$$

Die energiegewichtete mittlere Wellenanlaufrichtung wurde komponentenweise in Richtung geografisch Ost:

$$u = \cos(\Theta_m \frac{\pi}{180^\circ}) \quad (4)$$

bzw. in Richtung geografisch Nord:

$$v = \sin(\Theta_m \frac{\pi}{180^\circ}) \quad (5)$$

berechnet:

$$u_E = \frac{\sum_{t=8760h}^{t=1h} (u * 629,06625 * H_{m0}^2)}{\sum_{t=8760h}^{t=1h} (629,06625 * H_{m0}^2)} \quad (6)$$

$$v_E = \frac{\sum_{t=8760h}^{t=1h} (v * 629,06625 * H_{m0}^2)}{\sum_{t=8760h}^{t=1h} (629,06625 * H_{m0}^2)} \quad (7)$$

Die Komponenten der energiegewichteten mittleren Wellenanlaufrichtung wurden anschließend in die nautische Konvention zurück gerechnet mit:

$$\Theta_{m,E} = \arctan 2(-u_E, -v_E) \frac{180^\circ}{\pi} \quad (8)$$

und:

$$\Theta_{m,E} < 0 \Theta_{m,E} = \Theta_{m,E} + 360^\circ \quad (9)$$

Die erzeugten jährlichen Produkte (Flächendarstellungen) im Produktgebiet der DB können im EasyGSH-Datenportal im Bereich „Hydrodynamik / Kennwerte des Seegangs (WAVS)“ eingesehen und heruntergeladen werden. Sämtliche Daten werden in einem georeferenziertem TIFF-Rasterdatenformat (GeoTiff) bereitgestellt und können in verschiedenen Anwendungen (z.B. ArcGIS) visualisiert und weiterverarbeitet werden.

6 Anhang

6.1 Harmonische PT

Alle harmonischen Komponenten beruhen auf der Kombination von fünf grundlegenden astronomischen Komponenten mit ihren jeweiligen Perioden.

Nr.	Name	Periode	Bedeutung
1	s	27,3216 Tage	mittlere Länge des Mondes (tropischer Monat)
2	h	365,242 Tage	mittlere Länge der Sonne (tropisches Jahr)
3	p	8,847 Jahre	mittlere Länge des Mondbahnperigäums (Erdsnähe)
4	N	18,613 Jahre	aufsteigender mittlerer Knoten der Mondbahn (Umlaufzeit)
5	q	20940 Jahre	mittlere Länge des Sonnenbahnperiheliums (Sonnennähe)

Tabelle 1: Übersicht der fünf astronomischen Bahnparameter (Winkel) zur Berücksichtigung der Stellung von Sonne und Mond bei der Partialtidenanalyse

6.2 Quantil

Das Quantil ist ein Lagemaß in der Statistik und unterteilt die Daten einer Datenreihe. Allgemein ist ein Quantil eine Grenze, die festlegt, wie viele Werte über oder unter einem gewissen Wert liegen. Quantile (oder genauer gesagt p -Quantile) sind Werte, die eine Menge von n Datenpunkten in zwei Teile spalten. Dabei ist mindestens ein Anteil p kleiner oder gleich dem p -Quantil, und mindestens ein Anteil $(1-p)$ ist größer oder gleich dem p -Quantil. Man bezeichnet Quantile entweder durch den Anteil p , oder durch eine Prozentzahl, was die gleiche Aussage beinhaltet; ein 0.2-Quantil ist dasselbe wie ein 20%-Quantil. Das 25%-Quantil beispielsweise ist der Wert, für den gilt, dass 25 % aller Werte kleiner sind als dieser Wert.

Einige Quantile sind in der Statistik so wichtig, dass sie einen eigenen Namen bekommen haben. So ist das 50%-Quantil der **Median**.

Berechnet und dokumentiert werden 95 %, 50 % und 5 % Quantile der Tidekennwerte. Das 95 % Quantil steht hier i. e. für ein mittleren Maximalwert und demzufolge entspricht das 5 % Quantil i. e. einem mittleren Minimalwert (vergleiche hierzu die Abbildung 6)

Das 50 % Quantil gibt i. e. einen Mittelwert an.

Für die Langzeitkennwerte werden das 99 % und das 1 % Quantil (als Perzentil) berechnet, um die Maximal- bzw. Minimalwerte um „Ausreisser“ zu bereinigen.

Abbildung 6: Histogramm des Tidehubs bei Helgoland für alle Tiden des Jahres 2012 mit dem Fit der Normalverteilung (rote Kurve) und den 99 % , 95 % , 50 % , 5 % und 1 % Quantil (gestrichelte Linien).

Literatur

- [BAW 2019] BAW: Validierungsdokument EasyGSH-DB: Teil: UnTRIM² - SediMorph - UnK. (2019)
- [Booij u. a. 1999] BOOIJ, N. ; RIS, R. C. ; HOLTHUIJSEN, L. H.: A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104 (1999), Nr. C4, S. 7649–7666. – ISSN 21699275
- [Dreier u. a. 2021] DREIER, Norman ; SCHRAGE, Nico ; NEHLSSEN, Edgar ; FRÖHLE, P.: Ein Seegangmodell der Nordsee mit Fokus auf den Tiefwasserbereich der Deutschen Bucht für die Jahre 1996-2015. In: *Modelle und Modellierung am Institut für Wasserbau der TU Hamburg* Bd. 21. Hamburg, 2021
- [Foreman u. a. 2009] FOREMAN, Michael G. ; CHERNIAWSKY, Josef Y. ; BALLANTYNE, V. A.: Versatile Harmonic Tidal Analysis Improvements And Applications. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* (2009), Nr. 26 (4)
- [Godin 1972] GODIN, G.: The Analysis of Tides. In: *Liverpool University Press* (1972), S. 264 PP
- [Horn 1948] HORN, W.: Über die Darstellung der Gezeiten als Funktion der Zeit. In: *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* 1 (1948), Nr. 1, S. 124–140. – ISSN 0012-0308
- [Kelvin 1868] KELVIN: Reports on the committee for the purpose of promoting the extension, improvement and harmonic analysis of tidal observation - Lord Kelvin alias William Thomson. In: *British Association for the Advancement of Science Report, London* (1868)
- [Lang 2003] LANG, Günther: Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet. In: *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* (2003), Nr. 86, S. 101–108
- [Pansch 1988] PANSCH, E. ; INSTITUT, Deutsches H. (Hrsg.): *Harmonische Analyse von Gezeiten- und Gezeitenstrombeobachtungen im Deutschen Hydrographischen Institut*. 1988
- [Pugh 1987] PUGH, David T.: *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. Chichester : John Wiley and Sons, 1987. – ISBN 047191505X
- [Schulzweida 2019] SCHULZWEIDA, Uwe: *CDO User Guide: Climate Data Operator: Version 1.9.6*. 2019. – URL <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/embedded/cdo.pdf>. – Zugriffsdatum: 17.05.2019

Nr.	Abk.	ω [°/h]	Periode	Argumente	Bezeichnung/Bemerkung
Langperiodische Tiden					
1	Sa	0,041067	355 d	h-q	Ellipt. Tide 1. Ordnung zu S0
2	Ssa	0,082137	177,5 d	2h	Deklinationstide zu S0
3	Mm	0,544374	27,55 d	s-p	Ellipt. Tide 1. Ordnung zu M0
4	MSf	1,015895	14,77 d	2s-2h	Variationstide zu M0, Spring/Nipp-Zyklus
5	Mf	1,098033	13,66 d	2s	Deklinationstide zu M0
6	MStm	1,569554	9,557 d	3s-2h+p	10-tägige Tide
7	MSqm	2,113928	7,096 d	4s-2h	7-tägige Variationstide
8	Mqm	2,186782	6,859 d	4s-2p	7-tägige Tide 1. Ordnung zu M0
Eintägige Tiden					
9	Q1	13,398661	26:52	-3s+h+p	Ellipt. Tide 1. Ordnung zu O1
10	O1	13,943036	25:49	-2s+h	Eintägige Haupt-Mondtide
11	NO1	14,496693	24:50	-s+h+p	Ellipt. Tide 1. Ordnung zu K1
12	P1	14,958931	24:04	-h	Eintägige Haupt-Sonnentide
13	K1	15,041069	23:56	+h	Eintägige Haupt-Deklinationstide
Halbtägige Tiden					
14	3M2S2	26,952313	13:21	-3s+3h	Verbundtide: 3M2-2S2
15	2N2	27,895354	12:54	-4s+2h+2p	Ellipt. Tide 2. Ordnung zu M2
16	μ 2	27,968208	12:52	-4s+4h	Gr. Variationstide zu M2
17	N2	28,439729	12:39	-3s+2h+p	Gr. ellipt. Tide 1. Ordnung zu M2
18	ν 2	28,512583	12:37	-3s+4h-p	Gr. Evektionstide zu M2
19	γ 2	28,911251	12:27	-2s+2p	
20	M2	28,984104	12:25	-2s+2h	Halbtägige Mondtide
21	δ 2	29,066242	12:23	-2s+4h	
22	λ 2	29,455626	12:13	-s+p	
23	L2	29,528479	12:11	-s+2h-p	
24	T2	29,958933	12:01	-h+q	
25	S2	30,000000	12:00	0	Halbtägige Sonnentide
26	R2	30,041067	11:59	+h-q	
27	K2	30,082137	11:58	+2h	Halbtägige Deklinationstide zu M2
28	η 2	30,626513	11:45	s+2h-p	
Mehrtägige Tiden					
29	3MS4	56,952312	06:19	3M2-S2	Vierteltägige Verbundtide
30	MN4	57,423832	06:16	M2+N2	Vierteltägige Verbundtide
31	M4	57,968208	06:13	2M2	Vierteltägige Haupt-Mondobertide
32	3MN4	58,512585	06:09	3M2-N2	Vierteltägige Verbundtide
33	MS4	58,984104	06:06	M2+S2	Vierteltägige Verbundtide
34	MK4	59,066242	06:05	M2+K2	Vierteltägige Verbundtide

Tabelle 2: Partialtiden zur Analyse bzw. zur Wasserstandssteuerung der Nordsee am Nordrand ($\omega = [^\circ/\text{h}]$, Periode [hh:mm])