

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Lang, Günther

Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102640>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Lang, Günther (2003): Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 86. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 101-108.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet

DR.-ING. GÜNTHER LANG, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME II

Einführung und Motivation

Moderne mathematische Verfahren wie *TELEMAC* oder *UnTRIM* ermöglichen die numerische Simulation vieler für das Tidegebiet bedeutsamer physikalischer Prozesse. Hierzu zählen u. a. die Ausbreitung der Tidewelle, der Wechsel von Ebbe- und Flutstrom, der Transport von Salz, Wärme oder Schwebstoffen im Wasserkörper, der sohnnahe Sedimenttransport sowie der Austausch von Sedimenten zwischen Wasserkörper und Boden (Deposition und Erosion) zusammen mit der daraus resultierenden Veränderung der Morphologie.

In der Regel werden die Berechnungsergebnisse der mathematischen Verfahren, beispielsweise Wasserspiegelauslenkung, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt, in äquidistanten Zeitabständen (z. B. alle 10 Minuten) in Dateien geschrieben. Diese sogenannten synoptischen Datensätze können im Anschluss an die hydrodynamisch-numerische (HN-) Simulation mit verschiedenen Methoden visualisiert, zu Animationen zusammengefasst oder, wie in diesem Beitrag näher beschrieben, weitergehend analysiert werden. Heute werden zumeist hoch auflösende zwei- oder dreidimensionale Gitternetze in einer HN-Simulation verwendet. Außerdem werden typischerweise Zeiträume mit einer Länge von einem oder mehreren Spring-Nipp-Zyklen simuliert. Beides zusammen führt im Ergebnis dazu, dass während einer Simulation sehr große Datenmengen anfallen, die rasch einen Umfang von mehreren Gigabyte erreichen können.

Wichtige Fragen zu den Konsequenzen anthropogener Eingriffe in das Tidegebiet oder zu den Auswirkungen natürlicher Veränderungen (z. B. säkularer Meeresspiegelanstieg) auf das Systemverhalten, können in dem von hoher zeitlicher und räumlicher Variabilität geprägten Tidengewässern nicht oder nur unzureichend durch ausschließliche Verwendung synoptischer Datensätze beantwortet werden. Ein Beispiel: In dem in Bild 1 dargestellten Fall ändert sich nur die Phase des Signals, während die Amplitude unverändert bleibt. Ein Vergleich der synoptischen Daten zeigt in diesem Fall zu allen Zeiten große Abweichungen zwischen den Systemzuständen. Daraus kann aber nicht ohne weiteres auf den Charakter der Veränderung des Systemverhaltens zurückgeschlossen werden, z. B. ob die mittlere Wirkung der Strömung auf den Boden in den Szenarien A und B unverändert bleibt oder nicht. Durch Wechsel der Betrachtung und Übergang zu den Kenngrößen Phase und Amplitude kann sofort gezeigt werden, dass die Amplitude unverändert bleibt, während sich die Eintrittszeiten sowohl der Maxima als auch der

Minima um eine konstante Zeitspanne verschieben. Dieses einfache Beispiel zeigt, dass Änderungen im Systemverhalten durch Rückgriff auf geeignet gewählte Kenngrößen kompakt und präzise beschrieben werden können.

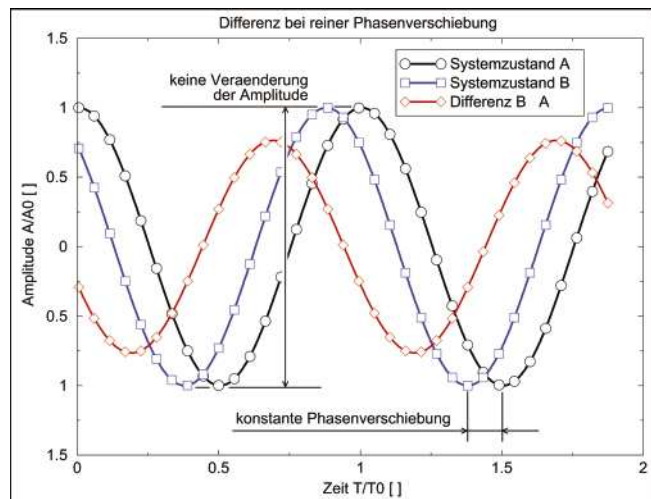


Bild 1: Differenz zwischen zwei Systemzuständen A und B bei einer Verschiebung der Phase, ohne Änderung der Amplitude

Die insbesondere von HN-Verfahren erzeugten synoptischen Datensätze werden daher zumeist im Anschluss an die Simulation weitergehend analysiert. Die wesentlichen Ziele der Analyse sind:

- Verkleinern der zur Beschreibung des Systemverhaltens erforderlichen Datenmenge im Vergleich zum Umfang der synoptischen Datensätze;
- Quantitative Beschreibung des Systemverhaltens durch geeignete Kenngrößen, z. B. Tidehochwasser, Tideniedrigwasser und Tidehub;
- Objektive Darstellung spezieller Merkmale des Systemverhaltens, z. B. Asymmetrie zwischen Ebbe- und Flutstrom;
- Herausarbeiten der Wirkungen verschiedener physikalischer Prozesse auf das Systemverhalten, z. B. barokline ästuarine Zirkulation;
- Quantifizieren unterschiedlichen Systemverhaltens anhand der Differenzen von Kenngrößen, z. B. Veränderung des Tidehubs als Reaktion auf eine anthropogen veränderte Bathymetrie.

Die nachfolgenden Abschnitte enthalten Aussagen zu den erforderlichen Eingangsdaten sowie zu den Anforderungen an die Analysemethoden. Des Weiteren werden die verfügbaren Kenngrößen und (teilweise auch) deren Definitionen vorgestellt. Den Schluss bilden Anwendungsbeispiele.

Eingangsdaten

Ausgangspunkt der Berechnung von Kenngrößen sind die schon zuvor erwähnten synoptischen Datensätze. Diese werden heute typischerweise von mathematischen HN-Verfahren erzeugt, die eine Simulation der in der Natur ablaufenden physikalischen Prozesse ermöglichen. Da HN-Verfahren auf grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten (z. B. Massenerhaltung) beruhen, sind die durch Simulation erzeugten synoptischen Daten konsistent zu diesen elementaren Prinzipien. Letzteres kann auf der Basis synoptischer Beobachtungen für ein großes, zusammenhängendes Gebiet, in einer für die Analyse erforderlichen Genauigkeit praktisch nicht, oder zumindest nicht mit vertretbarem Aufwand erreicht werden.

Durch Simulation erzeugte synoptische Daten liegen räumlich und zeitlich nicht kontinuierlich, sondern nur für endlich viele diskrete Raum- und Zeitpunkte vor (siehe Bild 2).

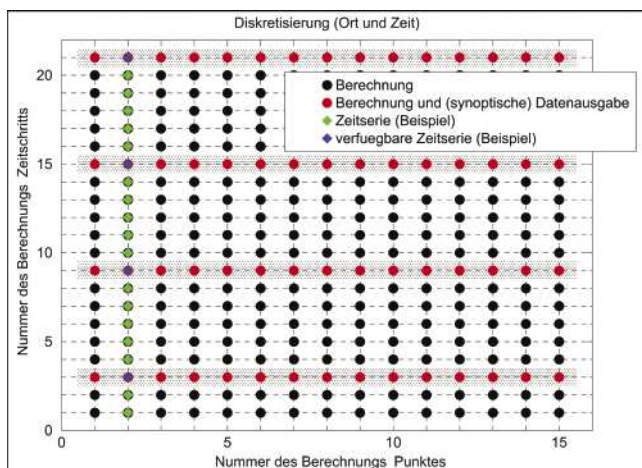


Bild 2: Schematische Darstellung einer Folge synoptischer Datensätze eines HN-Verfahrens. Diskretisierung von Raum und Zeit

Die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden synoptischen Datensätzen, so wie sie von dem mathematischen Verfahren intern berechnet werden, bezeichnet man als *numerischen Zeitschritt*. *Ausgabezeitschritt* zwischen zwei der nachfolgenden Analyse zur Verfügung stehenden synoptischen Datensätzen ist in der Regel ein ganzzahliges Vielfaches des numerischen Zeitschritts.

Da im Rahmen einer Analyse u. a. die Tidehoch- und Tideniedrigwasserzeiten ermittelt werden müssen, sollte der zuvor genannte Ausgabezeitschritt nicht mehr als 20 Minuten betragen, damit diese Zeiten mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden können.

Werden für alle Berechnungspunkte die angegebenen synoptischen Daten in Zeitrichtung aufgesammelt, so

erhält man *Zeitreihen* der physikalischen Größen an allen Berechnungspunkten. Sie stehen dann ebenfalls im gesamten Simulationsgebiet zur Verfügung. Diese Zeitreihen sind die eigentlichen Eingangsdaten zur Berechnung der das Systemverhalten beschreibenden Kenngrößen.

Berechnung der Kenngrößen

Die harmonische Gezeitenanalyse für Wasserstand und Strömung stellt für den Tidebereich eine klassische Methode zur Beschreibung des Systemverhaltens dar. Auf dieses, auch in der BAW, Dienststelle Hamburg (DH), erfolgreich praktizierte Verfahren soll nachfolgend allerdings nicht näher eingegangen werden. Im Mittelpunkt der weiteren Betrachtungen stehen die sogenannten *Tidekennwerte* bzw. *tideunabhängigen Kennwerte*. Deren automatisierte Berechnung stellt einen regelmäßig wiederkehrenden Arbeitsschwerpunkt in vielen Projekten dar.

Spezielle Anforderungen

Die programmgestützte Berechnung verschiedener Kenngrößen im Tidegebiet muss mehreren Anforderungen Rechnung tragen, die sich aus dem (Tide-) Verhalten dieser Systeme ergeben. Für *jeden Ort* (Berechnungspunkt) erfüllen die in der BAW DH eingesetzten Methoden die nachstehenden Anforderungen, welche zur erfolgreichen Berechnung *tidebezogener Kenngrößen* (Tidekenngrößen) erforderlich sind:

1. Erfassen der genauen Tidehoch- und Tideniedrigwasserzeiten;
2. Erfassen der genauen Zeitpunkte der Flutstrom- sowie die Ebbestromkenterung;
3. Korrekte Zuordnung der Tidephasen zu einzelnen Tiden unter Berücksichtigung des Trockenfallens einzelner Positionen im Bereich der Wasserwechselzone (siehe Bild 3);
4. Erhöhen der Genauigkeit bei der Berechnung der oben genannten Zeitpunkte durch Interpolation des Signalverlaufs zwischen den im Ausgabezeitschritt vorliegenden Stützstellen, um den Einfluss von Abtastfehlern zu minimieren (siehe Bild 4);
5. Extrapolation des Zeitpunkts der Überflutung bzw. des Trockenfallens zum Erzielen einer erhöhten Genauigkeit beim Berechnen der Überflutungs- und Trockenfalldauer (siehe Bild 5).

Unter diesen Voraussetzungen lassen sich Kenngrößen für Ebbe-, Flut-, Ebbestrom- und Flutstromdauer sowie für die gesamte Tide mit großer Genauigkeit berechnen. Ferner können daraus Verhältniswerte, z. B. das Verhältnis zwischen Flut- und Ebbedauer abgeleitet werden. Die Interpolation reduziert den Einfluss des Ausgabezeitschritts auf die berechneten Kennwerte.

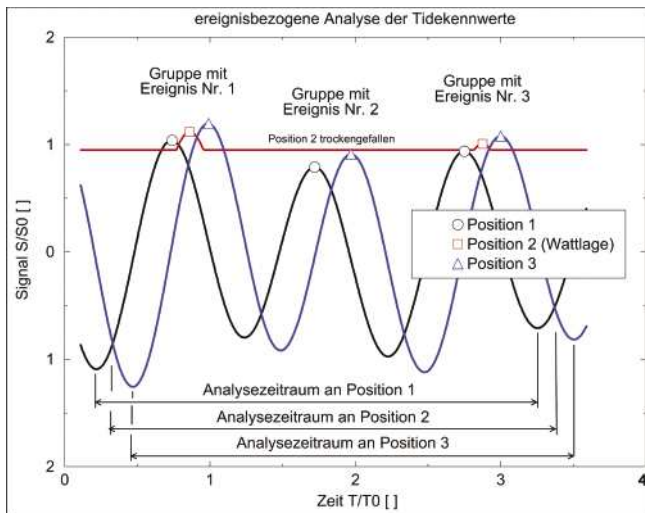


Bild 3: Korrektes Zuordnen verschiedener Tidehoch- und Tideniedrigwasserereignisse zu Gruppen unter Berücksichtigung des Trockenfallens und der Überflutung. Das Wegfallen einzelner Ereignisse an Wattpositionen muss korrekt berücksichtigt werden. Im dargestellten Fall tritt Ereignis Nr. 2 an Position 2 nicht auf. Das zweite an Position 2 vorhandene Extremum muss daher korrekt als drittes Ereignis erkannt und der entsprechenden Gruppe zugeordnet werden.

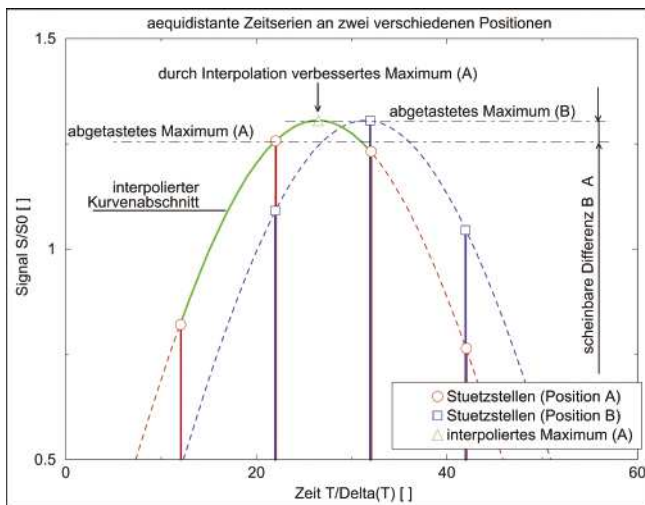


Bild 4: Interpolation in Zeitrichtung zwischen den Stützstellen einer äquidistanten Zeitreihe zur Genauigkeitsverbesserung der berechneten Extremwerte (z. B. Zeit und Wert des Tidehochwassers). Im Fall B stimmt die Lage des Maximums exakt mit einer Stützstelle überein, während im Fall A das Maximum nicht direkt abgetastet wird. Es ergeben sich scheinbare Änderungen des Maximalwertes (Abtastfehler) die sich durch Interpolation reduzieren lassen.

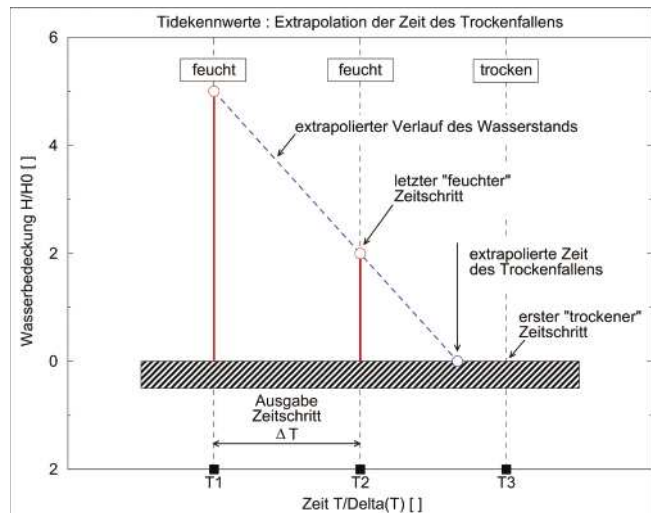


Bild 5: Extrapolation der Zeit des Trockenfallens aus zurückliegenden Wasserstandswerten zur Genauigkeitssteigerung bei der Berechnung der Überflutungsdauer

Berechnungsergebnisse

Aus den Zeitreihen mehrerer physikalischer Größen können durch Anwenden der in verschiedenen Computerprogrammen festgelegten Berechnungsvorschriften die Kenngrößen ermittelt werden. Hierbei handelt es sich typischerweise um

- Extremwerte (Maximum, Minimum), die
- Differenz zwischen Extremwerten (Amplitude, Variation), den
- Mittelwert oder das
- Integral

der Zeitreihe einer physikalischen Größe. Nach dem Abschluss der Berechnung liegen die Kennwerte für das gesamte Modell- bzw. Untersuchungsgebiet vor. Dies ermöglicht sowohl die Beurteilung der räumlichen Variation einer (Kenn-) Größe als auch deren zeitliche Änderung, z. B. für zwei aufeinander folgende Tiden.

Die Zahl der berechneten Analysegrößen richtet sich in der Regel nach dem Charakter der zu analysierenden Daten. Handelt es sich um (annähernd) periodische Vorgänge, die aus einer Abfolge immer wiederkehrender Ereignisse bestehen (z. B. Tiden), so werden die Kennwerte üblicherweise zunächst für alle Einzelereignisse, also für jede Tide und/oder Tidephase, ermittelt (siehe Bild 6). Im Anschluss an deren Berechnung werden schließlich noch Maximum, Minimum und Mittelwert der Kenngröße für den Analysezeitraum abgeleitet.

Wird das Systemverhalten im Analysezeitraum demgegenüber durch ein eher nicht periodisches Ereignis dominiert, wie dies z. B. bei Sturmfluten der Fall ist,

so können auch hierfür verschiedene *tideunabhängige Kenngrößen* berechnet werden (siehe Bild 7).

Vergleichbare Kenngrößen können auch für andere physikalische Größen (z. B. Salzgehalt, Schwebstoffgehalt oder Temperatur) berechnet werden. Sie lassen sich u. a. zur Abschätzung der Belastung von Fauna und Flora durch verschiedene abiotische Faktoren heranziehen.

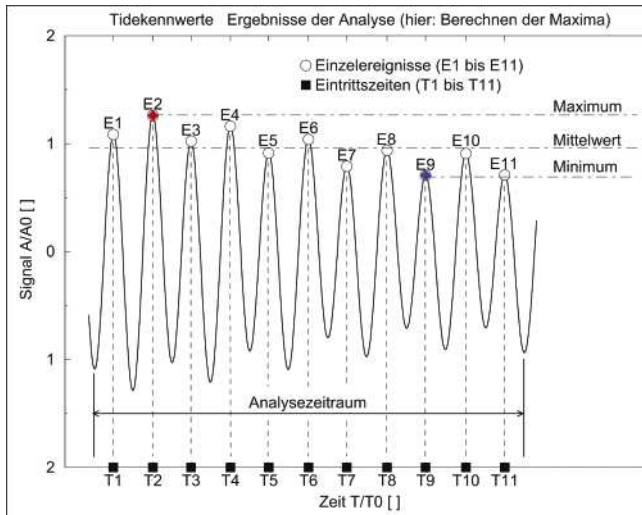


Bild 6: Schematische Darstellung der typischerweise für eine (annähernd) periodische Zeitserie ermittelten Kennwerte, z. B. Eintrittszeiten und Werte des Tidehochwassers. Die Kennwerte ermöglichen die Charakterisierung des Systemverhaltens für alle Ereignisse (hier Tiden) und, im statistischen Sinne, für den gesamten Simulationszeitraum.

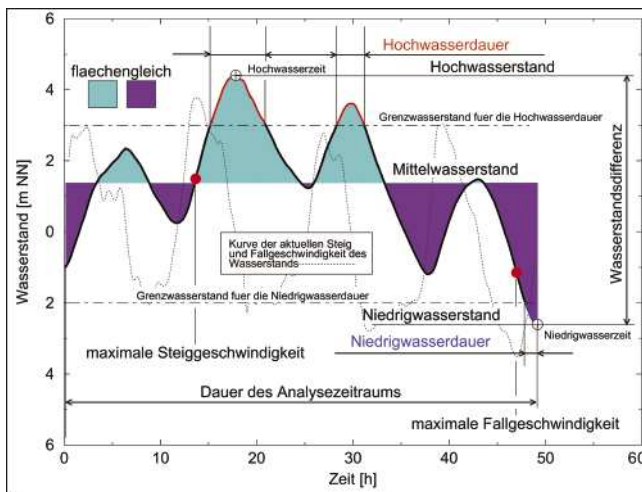


Bild 7: Kenngrößen zur Charakterisierung des Systemverhaltens für aperiodische Ereignisse. Dargestellt sind verschiedene Kenngrößen für den Wasserstand, die z. B. eine Sturmflut anhand weniger Kenndaten beschreiben können.

Differenzen zwischen Szenarien

Neben der Analyse des Systemverhaltens kommt der Beschreibung der Unterschiede im Verhalten eines Systems für verschiedene Szenarien eine große praktische Bedeutung zu. Fragen nach der Größe und den Konsequenzen anthropogener Eingriffe oder natürlicher Veränderungen stehen hier im Mittelpunkt.

Liegen Kennwerte für verschiedene Szenarien vor, so können die Differenzen zwischen ihnen berechnet werden. Zu den für alle Einzelereignisse, Maximum, Minimum und Mittelwert berechneten Differenzen gesellen sich noch die maximale sowie die minimale Differenz eines Einzelereignisses (siehe Bild 8) sowie die Signifikanz für die Abweichung der Mittelwerte. Diese Größen stehen ebenfalls an allen Berechnungspunkten im jeweiligen Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Eine Bewertung der räumlichen Variation des Systemverhaltens ist damit in einfacher Weise möglich.

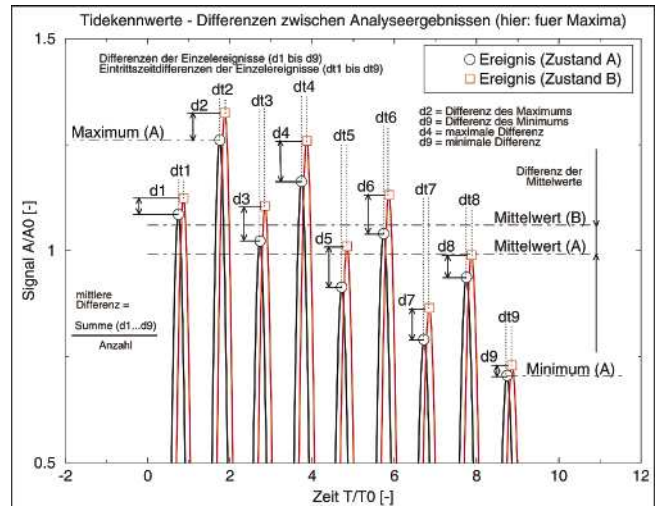


Bild 8: Schematische Darstellung der für eine Kenngröße berechneten Differenzen. Hier gezeigt am Beispiel der Maximumberechnung für eine Abfolge gleichartiger Ereignisse (z. B. Eintrittszeiten und Wert des Tidehochwassers).

Alle Kenngrößen auf einen Blick

Es folgt eine kurze Aufzählung aller Kenngrößen, die in der BAW DH standardmäßig berechnet werden können. Auf die Darstellung der Ergebnisse der ebenfalls praktizierten harmonischen Gezeitenanalyse wird an dieser Stelle, wie schon eingangs erwähnt, verzichtet.

Alle Kenngrößen können für Berechnungsergebnisse zwei- und drei-dimensionaler HN-Verfahren auf unstrukturierten Gitternetzen, entlang von Längs- und/oder Querprofilen bzw. an einzelnen Positionen, abgeleitet werden. Für querschnittsbezogene Daten lassen sich auch querschnittsgemittelte oder -integrierte Kennwerte berechnen. In Ergänzung zu den von HN-Verfahren erzeugten Datensätzen besteht für Querpro-

file oder Einzelpositionen die Möglichkeit, auch Daten aus ADCP-Messungen zu übernehmen.

Eine Berechnung der Differenzen zwischen verschiedenen Szenarien ist für alle nachfolgend aufgezählten Kenngrößen ebenfalls möglich.

Tidekenngrößen

Insofern die nachfolgenden Tidekenngrößen namensgleich mit den in DIN 4049-3 (Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie) angeführten Bezeichnungen sind, stimmen diese auch hinsichtlich ihrer Definition überein. Für alle anderen Größen wird ausschließlich auf die nachfolgenden Bildern verwiesen, da eine Definition in verbaler oder mathematischer Form nicht Bestandteil dieses Beitrags ist. Zu allen aufgezählten Kenngrößen können die in dem Abschnitt „Berechnungsergebnisse“ genannten Daten ermittelt werden.

Für den Wasserstand (siehe auch Bild 9):

- Tidehoch- (Thw) und Tideniedrigwasser (Tnw);
- Tidehub (Thb);
- Tidemittelwasser (Tmw);
- Tidehoch- und Tideniedrigwasserzeit;
- Dauer von Ebbe, Flut und gesamter Tide;
- Überflutungsdauer;
- Verhältnis zwischen Flutdauer und Ebbedauer;
- Die zuletzt genannte Größe ermöglicht eine Bewertung der Asymmetrie der Tidekurve;

Für die Strömungsgeschwindigkeit (siehe Bilder 9 und Bild 10):

- Maximale Flutstrom- / Ebbestromgeschwindigkeit;
- Mittlere Flutstrom- / Ebbestromgeschwindigkeit;
- Flutstrom- / Ebbestromvolumen;
- Flutstrom- / Ebbestromdauer;
- Flutstrom- / Ebbestromkenterung;
- Stauwasserdauer bei Flutstrom- / Ebbestromkenterung;
- Kenterpunktabstand der Flutstrom- / Ebbestromkenterung;
- Eulerscher Flutstrom- / Ebbestromweg;
- Eintrittszeit des Flutstrom- / Ebbestrommaximums;
- Eulerscher Reststrom;
- Eulerscher Reststromweg;
- Restdurchfluss;
- Tidestromvolumen;
- Verhältnis zwischen Flutstromdauer und Ebbedauer;
- Verhältnis zwischen maximaler / mittlerer Flutstromgeschwindigkeit und maximaler / mittlerer Ebbestromgeschwindigkeit;
- Verhältnis zwischen eulerschem Flutstromweg und eulerschem Ebbestromweg;

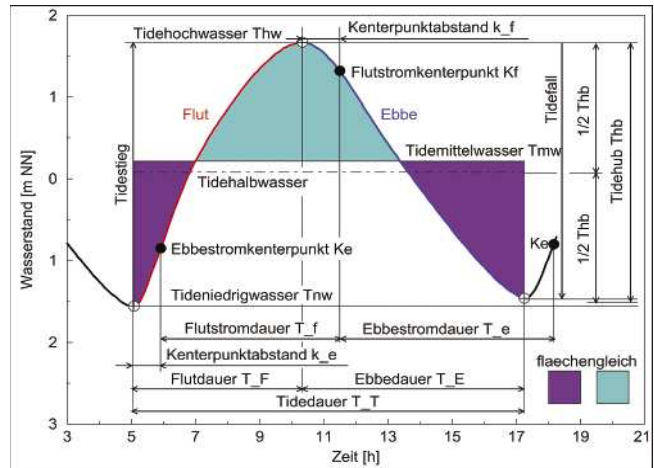


Bild 9: Verschiedene Tidekennwerte des Wasserstands (und einige der Strömungsgeschwindigkeit).

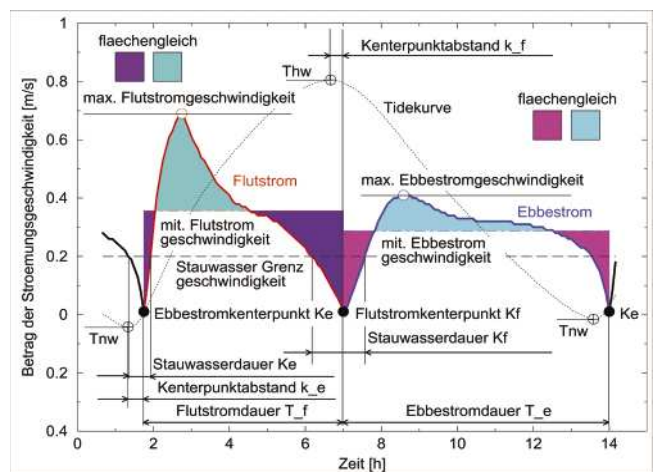


Bild 10: Einige Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit.

- Verhältnis zwischen Flutstromvolumen und Ebbestromvolumen.

Insbesondere die zuletzt genannten Verhältniswerte können zur Quantifizierung von Ungleichheiten zwischen Flutstrom und Ebbestrom genutzt werden.

Für verschiedene im Wasser transportierte Stoffe (Salz, Schwebstoff, Temperatur/Wärme) können die folgenden Kenngrößen abgeleitet werden (als Beispiel für den Salzgehalt siehe Bild 11 und Bild 12):

- Advektiver Transport durch den Flutstrom / Ebbestrom;
- Maximal-, Minimal- und Mittelwert (Tide);
- Variation (Tide);
- Residueller advektiver Transport;
- Verhältnis zwischen advektivem Transport durch den Flutstrom und advektivem Transport durch den Ebbestrom.

Für an der Sohle transportierte Sedimente können folgende Kenngrößen abgeleitet werden (Definitionen in Analogie zu Bild 12):

- Geschiebetransport durch den Flutstrom / Ebbestrom;
- Residueller Geschiebetransport;
- Verhältnis zwischen Geschiebetransport durch den Flutstrom und Geschiebetransport durch den Ebbestrom.

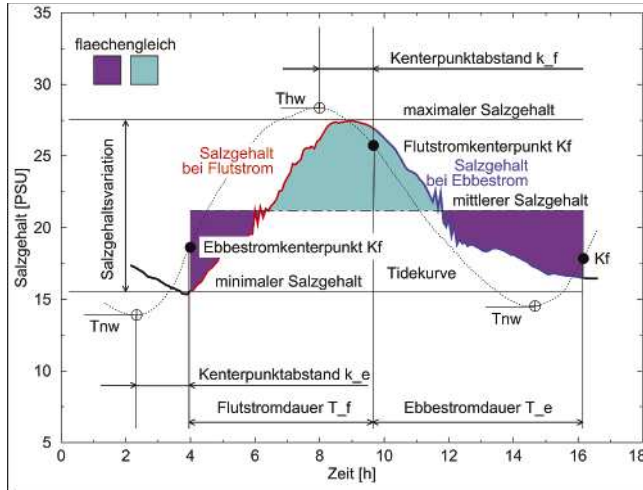


Bild 11: Einige Tidekennwerte des Salzgehalts. Analog für andere im Wasserkörper vorhandene Stoffe (z. B. Schwebstoffgehalt).

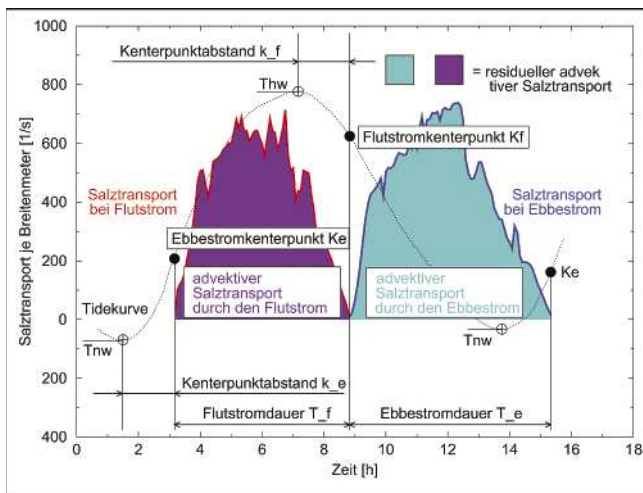


Bild 12: Einige Tidekennwerte für den Salztransport. Analog für andere im Wasserkörper oder an der Gewässer-sole transportierte Stoffe (z. B. Schwebstoff und Geschiebe).

Tideunabhängige Kennwerte

Neben dem vorgenannten umfangreichen Repertoire an Tidekennwerten können des weiteren verschiedene tideunabhängige Kennwerte für Wasserstand, Salzgehalt, Schwebstoffgehalt und Temperatur berechnet werden.

Für den Wasserstand stehen folgende Größen für den jeweils gewählten Analysezeitraum zur Verfügung (siehe Bild 7):

- Hoch-, Niedrig- und Mittelwasserstand;
- Wasserstands-differenz;
- Hoch- und Niedrigwasserzeit;
- Gesamtüberflutungs- und Gesamttrockenfalldauer;
- Maximale Steig- und maximale Fallgeschwindigkeit;
- Standardabweichung;
- Varianz;
- Dauer hoher Wasserstände (Hochwasserdauer);
- Dauer niedriger Wasserstände (Niedrigwasserdauer).

In Analogie zu den eben genannten tideunabhängigen Kenngrößen für den Wasserstand können vergleichbare Daten auch noch für den Salzgehalt, die Temperatur, den Schwebstoffgehalt sowie für die effektive Bodenschubspannung abgeleitet werden.

Zunehmend spielt die Bewertung der morphologischen Entwicklung des Bodens eine wichtige Rolle. Wesentliche Aspekte der Bodenevolution können für einen beliebigen Analysezeitraum mit Hilfe folgender Kenngrößen charakterisiert werden (siehe Bild 13):

- Maximale, minimale und mittlere Sohlentiefe;
- Maximale Änderung der Sohlentiefe;
- Veränderung der Sohlentiefe;
- Maximale Zunahme/Abnahme der Sohlentiefe;
- Summe der Erosion/Deposition;
- Kennzahl Deposition:Erosion.

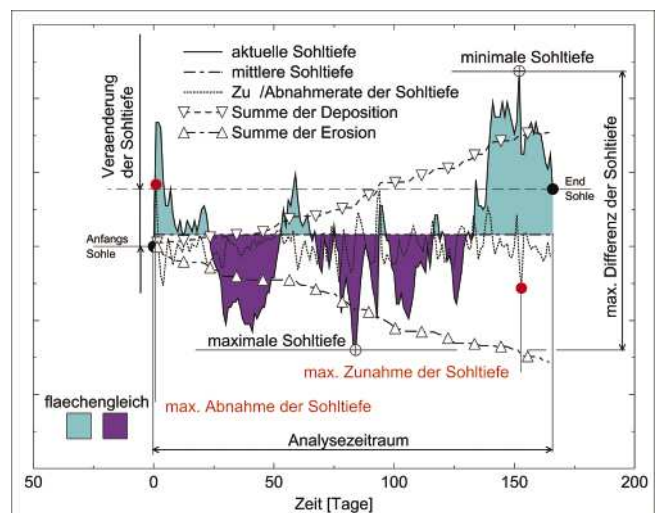


Bild 13: Einige tideunabhängige Kennwerte zur Bewertung der Bodenevolution.

Der Wind kann insbesondere bei Sturmfluten einen signifikanten Einfluss auf Wasserstand und Strömung haben. Zur näheren Charakterisierung von Starkwindereignissen im Bereich der Küsten- und Tidegewässer können folgende Kenngrößen, teilweise differenziert nach Geschwindigkeitsklassen und Richtungssektoren, aus flächenhaft vorliegenden synoptischen meteorologischen Datensätzen abgeleitet werden:

- Maximale Windgeschwindigkeit;
- Eintrittszeit für das Maximum der Windgeschwindigkeit;
- Dauer hoher / niedriger Windgeschwindigkeit;
- Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit.

Beispiele

Baroklin beeinflusste Strömung

Die Strömung im Tidegebiet wird maßgeblich durch das Steigen und Fallen des Wasserstands und dem davon verursachten barotropen Druckgradienten angetrieben. In Gebieten, in denen zusätzlich nennenswerte horizontale Dichteunterschiede existieren, kommen noch die baroklinen Druckgradienten hinzu, deren Wirkung quadratisch mit der Wassertiefe anwächst und daher insbesondere in den tiefen Rinnen der Ästuarer wirksam wird. Dreidimensionale mathematische Ver-

fahren berücksichtigen beide Druckkomponenten und sind daher in der Lage, die in diesen Regionen vorhandenen Dichte-induzierten Strömungen (barokline Zirkulation) in naturähnlicher Weise zu simulieren. Da der Salzgehalt im Ästuar vom Land zum Meer hin ansteigt, weist der Dichtegradient und damit auch der Dichte-induzierte Strömungsanteil in die entgegengesetzte Richtung, also stromauf. In Bild 14 ist der aus Ergebnissen eines 3D-HN-Modells abgeleitete Reststrom für ein Querprofil bei Elbe-km 720 dargestellt. Die vorgenannte Wirkung des baroklinen Druckgradienten ist darin für das Hauptfahrwasser deutlich zu erkennen. Sichtbar wird ein sohnaher Stromauf-Transport von Wasser und den darin enthaltenen Stoffen. Die lokale Dominanz des Flutstromes im sohnahen Bereich des Hauptfahrwassers der Elbe tritt auch in einer Darstellung des Verhältniswertes zwischen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit und der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit deutlich hervor (siehe Bild 15).

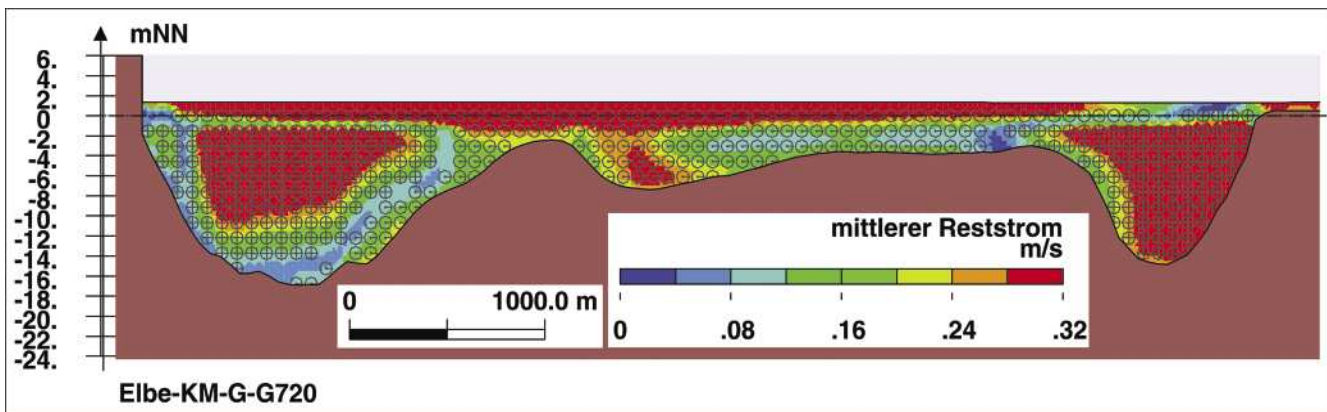


Bild 14: Mittlere Reststromgeschwindigkeit für einen Querschnitt bei Elbe-km 720 (50fach überhöht). Links die tiefe Rinne mit dem Hauptfahrwasser. Rechts die kleinere und weniger tiefe Medemrinne. Dazwischen der flache Medemgrund. Blickrichtung stromabwärts, mit dem niedersächsischen Ufer auf der linken und dem schleswig-holsteinischen Ufer auf der rechten Seite. Der Reststrom ist im Kernbereich des Fahrwassers sowie in der Medemrinne seewärts (vom Betrachter fort) orientiert. Dem gegenüber weist der Reststrom auf dem flachen Medemgrund stromauf (auf den Betrachter zu). Dieselbe Orientierung kann man sohnah auch in der rechten Hälfte des Fahrwassers erkennen.

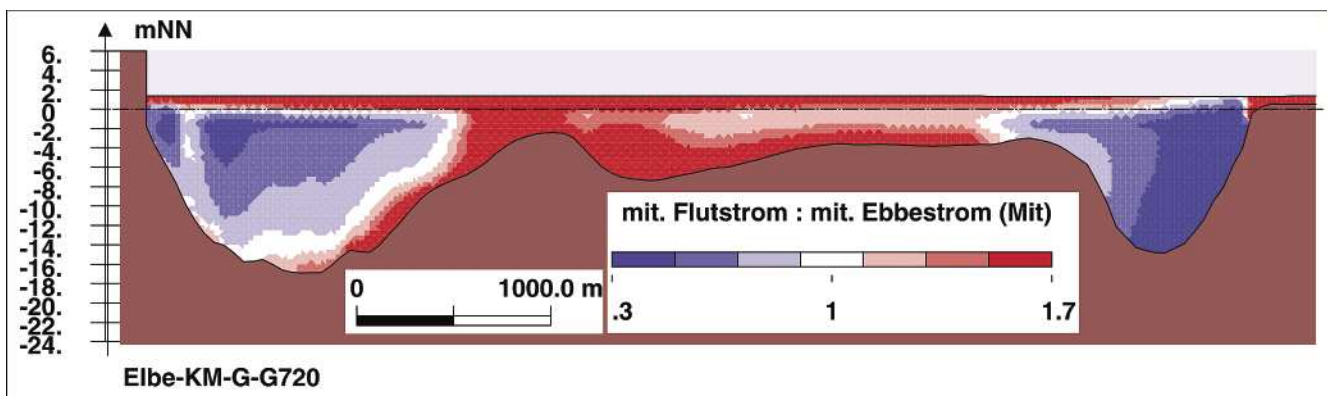


Bild 15: Verhältnis zwischen mittlerer Flutstrom- und mittlerer Ebbestromgeschwindigkeit für einen Querschnitt bei Elbe-km 720 (Querschnitt ist identisch mit dem in Bild 14; für geographische Bezeichnungen siehe dort; 50fach überhöht). In den rot dargestellten Bereichen ist die mittlere Flutstromgeschwindigkeit größer als die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit, in den blauen Bereichen ist es hingegen umgekehrt. In Übereinstimmung mit Bild 14 ist zu erkennen, dass der Abfluss des Wassers überwiegend im Kernbereich des Hauptfahrwassers bzw. über die Medemrinne erfolgt (Ebbdominanz). Flutdominanz ist über dem flachen Medemgrund sowie im sohnahen Bereich des Hauptfahrwassers vorhanden.

Änderung von Kenngrößen

Die Differenzen zwischen verschiedenen Kenngrößen werden, wie schon zuvor erwähnt, zur Beschreibung von Änderungen des Systemverhaltens als Folge z. B. anthropogener Eingriffe oder natürlich ablaufender Veränderungen eingesetzt. In Bild 16 sind beispielhaft die für eine Fahrwasservertiefung im Elbeästuar berechneten Differenzen verschiedener Tidekenngrößen des Wasserstands dargestellt. Da keine Tide mit einer vorangehenden oder nachfolgenden vollkommen übereinstimmt, resultiert für jede Kenngröße ein Band der Veränderung. Die Breite des Bandes beschreibt die Spannbreite möglicher Änderungen des Systemverhaltens in anschaulicher Weise. Daraus kann u. a. die Empfindlichkeit der jeweiligen (Kenn-) Größe gegenüber der veränderten Anregung durch unterschiedliche Tiden abgelesen werden. Nach Analyse sehr vieler Tiden folgt daraus eine realistische Abschätzung der wahrscheinlichen maximalen, minimalen und mittleren Änderungen der jeweiligen Kenngrößen.

Schlussbemerkungen

Die in diesem Beitrag aufgezählten Kenngrößen werden seit vielen Jahren erfolgreich zur Darstellung der Wirkungen anthropogener Eingriffe in die Seeschiffahrtsstraßen an Nord- und Ostsee auf das Systemverhalten des jeweiligen (Tide-) Gewässers eingesetzt. Die in diesem Zusammenhang überwiegend aus dem Einsatz mehrdimensionaler HN-Modelle abgeleiteten Ergebnisse waren und bleiben daher eine unverzichtbare Basis unserer Arbeit. Neben Antworten auf konkrete projektbezogene Fragestellungen leisten die Kenngrößen darüber hinaus einen wertvollen Beitrag zum allgemeinen besseren Verständnis des Systemverhaltens der Tidegewässer.

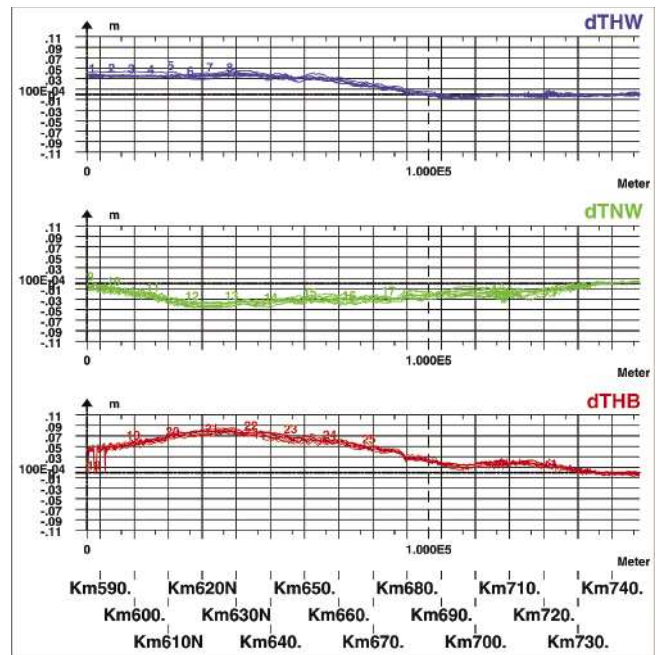


Bild 16: Differenzen verschiedener Tidekenngrößen für ein Längsprofil durch das Elbe-Ästuar. Dargestellt sind die durch eine anthropogene Fahrwasservertiefung hervorgerufenen Veränderungen des Tidehochwassers (dThw), des Tideniedrigwassers (dTnw) sowie des Tidehubs (dThb) für insgesamt acht Tidehochwasserereignisse sowie neun Tideniedrigwasserereignisse. Das für jede Kenngröße sichtbare Band der Veränderung zeigt in diesem Beispiel die Empfindlichkeit der jeweiligen Größe gegenüber der veränderten Anregung durch unterschiedliche Tiden an.