

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Weilbeer, Holger; Fricke, Benjamin

Verbesserung der Validität und der Prognosefähigkeit des morphodynamischen Verfahrens SediMorph. FuE-Abschlussbericht B3955.03.04.70178

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107457>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2020): Verbesserung der Validität und der Prognosefähigkeit des morphodynamischen Verfahrens SediMorph. FuE-Abschlussbericht B3955.03.04.70178. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

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.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

FuE-Abschlussbericht
Verbesserung der Validität und
der Prognosefähigkeit des
morphodynamischen Verfahrens
SediMorph

B3955.03.04.70178

Dezember 2020

**FuE-Abschlussbericht
Verbesserung der Validität und der
Prognosefähigkeit des morphodynamischen
Verfahrens SediMorph**

Beginn des Vorhabens: Oktober 2009

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.04.70178

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
 Referat: K3 - Ästuarsysteme II
 Projektleiter: Weilbeer, Dr.-Ing. Holger
 Bearbeiter: Fricke, Dipl.-Geoök. Benjamin

Hamburg, Dezember 2020

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

In einem komplexen mathematischen System zur Simulation realer Strömungs- und Transportprozesse müssen an verschiedenen Stellen Eingriffe vorgenommen werden, um die Modellierung des Sedimenttransportes zu verbessern, nicht nur im morphologischen Modul. Neu- und Weiterentwicklungen umfassen für diesen Berichtszeitraum im einfachsten Fall die Implementierung neuer Formulierungen zur Beschreibung bzw. Modifizierung des Geschiebetransportes z. B. aufgrund von Sohlgradienten und über Hiding- & Exposure-Funktionen. Die Einführung einer neuen Transportart, des intermittierenden Transportes, bei dem eine Sedimentfraktion als Geschiebe, aber bei ausreichenden hydrodynamischen Bedingungen auch in Suspension transportiert werden kann, erfordert weitergehende Eingriffe an mehreren Modulen. Die für den resultierenden Transport so wichtige Vertikalverteilung der Schwebstoffe ergibt sich wiederum im Wesentlichen aus der Wechselwirkung zwischen der Sinkgeschwindigkeit und der vertikalen Turbulenz und der entsprechend angepassten Modellierung. Ob der Übergang zum Flüssigschlick und zum konsolidierten Boden „fließend“ ist, also kontinuierlich modelliert werden kann, wird in separaten F&E-Projekten untersucht, deren Erkenntnisse unmittelbar der hier beschriebenen Aufgabe zu Gute kommen.

Für langfristige Modellstudien ist die 3D-Funktionalität des Bodens bedeutend. Hierzu wurde u. a. ein Bodenmodell entwickelt, das eine variable vertikale Diskretisierung – und damit auch die Abbildung einer Stratigraphie – ermöglicht. Hierzu wurden Bodenklassen und Bodenarten eingeführt. Die im Modell verwendeten diskreten Sedimentfraktionen werden zum Zweck der Klassifizierung anhand ihres Korndurchmessers einzelnen Bodenklassen zugeordnet. Diese können z. B. Sand, Schluff und Ton sein. Über die prozentuale Verteilung dieser Bodenklassen lässt sich dann eine eindeutige Bodenart bestimmen. Die Diskretisierung erfolgt dabei nicht über räumliche Parameter wie z. B. feste Mächtigkeiten oder Tiefenvorgaben, sondern die Bildung von Schichten ist dann abhängig von Änderungen der Sedimentverteilung.

Mit der Integration erster Ansätze zur Berücksichtigung von Subgrid-Informationen bei der Simulation der Morphodynamik wurde dieses etwas andere F&E Projekt abgeschlossen und in eine Grundsatzaufgabe überführt, die dauerhaft fortgeführt werden muss.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Problemdarstellung und Ziel	1
1.1	Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens	1
1.2	Bedeutung für die WSV	2
1.3	Untersuchungsziel	2
2	Untersuchungsmethoden	3
3	Geleistete Arbeiten	4
3.1	Überblick	4
3.2	Gravitationeller Einfluss auf den Geschiebetransport:	4
3.3	Hiding & Exposure Funktionen:	6
3.4	Intermittierender Transport:	6
3.5	Weitere Optionen zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit:	6
3.6	Baggern/Verklappen mit DredgeSim:	7
3.7	Überarbeitung der Sedimentbilanzierung und der 3D-Funktionalität:	8
3.8	Vereinfachte Initialisierung eines 3D-Bodens:	8
3.9	Bodenmodell mit einer variablen vertikalen Diskretisierung:	9
3.10	Neues Upwind-Verfahren für den Geschiebetransport:	12
3.11	Subgrid-Morphodynamik:	12
3.12	Erweiterungen der Ausgabemöglichkeiten:	13
3.13	Laufzeitoptimierung und verbesserte Parallelisierung:	13
4	Anwendungsbeispiel	14
4.1	Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer	14
5	Literaturverzeichnis	17

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Mit der Anordnung von Tetrapoden, unterstützt durch regelmäßige Aufspülungen großer Sandmengen, wird versucht, die Südspitze der Insel Sylt vor Erosion durch Strömung und Seegang zu schützen.	1
Bild 2: Wirkung der neuen Formulierung auf den Geschiebetransport. Links: Ohne Formulierung zeigen die Vektoren des Geschiebetransports lediglich in Strömungsrichtung. Rechts: Mit der neuen Formulierung findet eine Ablenkung des Geschiebetransports entlang der Hangneigung in die tieferen Bereiche statt.	5
Bild 3: Konzeptionelle Darstellung der neuen Umsetzung eines Baggervorgangs in DredgeSim.	7
Bild 4: Aufbau des Bodens in SediMorph. Die vertikale Diskretisierung erfolgt mit Hilfe von Z-Schichten (Malcherek et al. 2005).	8
Bild 5: Schematische Darstellung eines dreidimensionalen Bodens mit variabler Schichthöhe.	9
Bild 6: Definition der Bodenarten nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (aus AG-Boden 2005).	10
Bild 7: Entstehung einer neuen Schicht bei unterschiedlicher Bodenart zwischen oberster Schicht und zu deponierendem Sediment.	11
Bild 8: Absetzsäule mit zeitlich variablem Sedimentstrom zur Verdeutlichung der Entstehung von Schichten in Abhängigkeit von der Bodenart. Links: Maximale Anzahl von Schichten ist zehn. Rechts: Maximale Anzahl von Schichten ist zwanzig.	12
Bild 9: Vergleich der simulierten Tiefenänderung für das Jahr 2010 (oben) mit den gemessenen mittleren jährlichen Änderungen des Zeitraums 2007-2013 (unten) (aus BAW 2020).	15
Bild 10: Änderung des Sedimentvolumens in m ³ für das Jahr 2010 für verschiedene Bilanzierungspolygone entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste (aus BAW 2020).	16

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Gültigkeitsbereiche für den Korndurchmesser der Bodenklassen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung.	10

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Fragen nach Veränderungen der Hydrodynamik, des Sedimenttransportregimes und damit auch nach der vergangenen und einer zukünftigen morphodynamischen Entwicklung des Gewässers gehören auch im Küstenraum zu den primären Fragen, die im Zusammenhang mit veränderten Bedingungen, wie z. B. infolge von Baumaßnahmen oder infolge des Klimawandels, gestellt werden. Das Bild unten steht symbolisch für die hydro- und bodenmechanische Komplexität dieser Aufgabe im Küstenraum: Mit der Anordnung von Tetrapoden, unterstützt durch regelmäßige Aufspülungen großer Sandmengen, wird versucht, die Südspitze der Insel Sylt vor Erosion durch Strömung und Seegang zu schützen. Eine detaillierte und umfassende Kenntnis der Hydrodynamik und der Transportprozesse des Gewässers ist die wichtigste Grundlage für das Verständnis des Systems und somit eine unverzichtbare Voraussetzung für prognostische Aussagen.



Bild 1: Mit der Anordnung von Tetrapoden, unterstützt durch regelmäßige Aufspülungen großer Sandmengen, wird versucht, die Südspitze der Insel Sylt vor Erosion durch Strömung und Seegang zu schützen.

Der Sedimenttransport unterliegt in einem natürlichen System aufgrund der Heterogenität der Sedimente und deren Transporteigenschaften einer starken räumlichen und zeitlichen Variabilität. Eine exakte Berechnung des natürlichen Sedimenttransportes und damit auch der Prognose einer morphodynamischen Entwicklung ist unmöglich. Modellansätze sind stets parameterbehaftet und analytische Lösungen gibt es nur für wenige idealisierte Systeme. Diese Aussagen gelten sowohl für dreidimensionale, kurzfristige und prozessorientierte Modelle als auch in zunehmendem Maße für vereinfachte Modelle, bei denen zugunsten des Prognosezeitraumes die räumliche und zeitliche Auflösung, die Intensität der Kopplung und die Komplexität der Modellierung reduziert werden. Dennoch ist der Einsatz solcher Modelltypen für morphodynamische Fragestellungen erforderlich. Die steten Weiterentwicklungen der Modelltechnik und der Computerressourcen haben es ermöglicht, einen großen Teil des Weges von qualitativen hin zu quantitativen

Aussagen zurückzulegen. Bei guter Datengrundlage und fachkundiger Modellierung können durchaus plausible Ergebnisse erzielt werden, die ein wichtiges Hilfsmittel bei der Beantwortung der oben genannten Fragestellung darstellen. Die Vertrauenswürdigkeit der Modellergebnisse muss aber kontinuierlich verbessert werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die zukünftige morphodynamische Entwicklung von Bundeswasserstrassen an sich und als Folge von Bau- oder Unterhaltungsstrategien oder als Folge des Klimawandels ist eine zentrale Frage des Verkehrswasserbaus. Die morphologische Entwicklung der Gewässersohle kann die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gefährden, verursacht Baggerkosten und steht auch im Zentrum umweltrelevanter Fragestellungen, da z. B. Schadstoffe an Feinsedimente gebunden sind. Die inhärente Unsicherheit einer morphodynamischer Modellierung ist zudem häufig ein Angriffspunkt von Klägern bei Planfeststellungsverfahren wie z. B. der Fahrrinnenanpassung der Tideelbe.

1.3 Untersuchungsziel

Mit Hilfe des FuE-Vorhabens soll die Zuverlässigkeit der morphodynamischen Modellprognosen gesteigert werden. Hierzu sind Weiterentwicklungen in verschiedenen Teilprozessen notwendig. Das umfasst eine bessere Beschreibung des Bodenaufbaus, die Implementierung neuer Formulierungen zur Erodierbarkeit und des Transports von Sedimenten aber auch neue Methoden zur Datenausgabe für das Postprocessing und eine generelle Verbesserung der Performance des Verfahrens. Letzteres ist wichtig, da die zu bearbeitenden Fragestellungen in der Projektarbeit immer komplexer werden und es erforderlich ist, längere Zeiträume von teilweise mehreren Jahren zu rechnen.

2 Untersuchungsmethoden

Der vorrangige Entwicklungsbedarf wird ausgehend von in der Projektarbeit gesammelten Erfahrungen bestimmt. So ist gewährleistet, dass zuerst die Aspekte und Themen bearbeitet und weiterentwickelt werden, die zu einer verbesserten Beantwortung der Fragen, die in aktuellen Projekten von Bedeutung sind, beitragen.

In einem ersten Schritt wird geschaut, ob es in der gängigen Fachliteratur Lösungsansätze für die jeweilige Fragestellung gibt oder ob verwendbare Formulierungen bereits in anderen numerischen Verfahren des Sedimenttransports implementiert sind. Wenn keine zufriedenstellende Lösung existiert, müssen Möglichkeiten zur Eigenentwicklung, bzw. zur Kooperation mit Universitäten geprüft werden, um neue Ansätze zu entwickeln und gegebenenfalls die dafür notwendige Datengrundlage durch Versuchsreihen zu erheben.

Im nächsten Schritt findet eine Implementierung in den bestehenden Programmcode des morphodynamischen Verfahrens SediMorph statt. Erste Tests werden in der Regel an einfachen konzeptionellen Modellen durchgeführt. Erst danach findet ein Einsatz in den komplexen Ästuarmodellen statt, um zu schauen, ob die durchgeführten Erweiterungen stabil und zuverlässig funktionieren und zu einer Verbesserung der Prognosefähigkeit des Verfahrens SediMorph beitragen.

Dies ist ein iterativer Prozess. Sowohl bei einzelnen Entwicklungen, wenn Erfahrungen mit einem neuen Ansatz in der Projektarbeit zu neuen Erkenntnissen führen, als auch für das Projekt als Ganzes. Wenn eine Erweiterung erfolgreich implementiert wurde, wird geschaut, an welchen Stellen der Entwicklungsbedarf die größten Auswirkungen auf anstehende Arbeiten in den Projekten hat.

3 Geleistete Arbeiten

3.1 Überblick

In einem komplexen Modellierungssystem muss an verschiedenen Stellen eingegriffen werden, um die Modellierung des Sedimenttransportes zu verbessern, nicht nur im morphologischen Modul SediMorph. Neu- und Weiterentwicklungen umfassen für diesen Berichtszeitraum im einfachsten Fall die Implementierung neuer Formulierungen zur Beschreibung bzw. Modifizierung des Geschiebetransportes z. B. aufgrund von Sohlgradienten und über Hiding- & Exposure-Funktionen. Die Einführung einer neuen Transportart, des intermittierenden Transportes, bei dem eine Sedimentfraktion als Geschiebe, aber bei ausreichenden hydrodynamischen Bedingungen auch in Suspension transportiert werden kann, erfordert weitergehende Eingriffe an mehreren Modulen. Die für den resultierenden Transport so wichtige Vertikalverteilung der Schwebstoffe ergibt sich wiederum im Wesentlichen aus der Wechselwirkung zwischen der Sinkgeschwindigkeit und der vertikalen Turbulenz und der entsprechend angepassten Modellierung. Ob der Übergang zum Flüssigschlick und zum konsolidierten Boden „fließend“ ist, also kontinuierlich modelliert werden kann, wird in separaten F&E-Projekten untersucht, deren Erkenntnisse unmittelbar der hier beschriebenen Aufgabe zu Gute kommen.

Für langfristige Modellstudien ist die 3D-Funktionalität des Bodens bedeutend. Hierzu wurde u. a. ein Bodenmodell entwickelt, das eine variable vertikale Diskretisierung – und damit auch die Abbildung einer Stratigraphie – ermöglicht. Hierzu wurden Bodenklassen und Bodenarten eingeführt. Die im Modell verwendeten diskreten Sedimentfraktionen werden zum Zweck der Klassifizierung anhand ihres Korndurchmessers einzelnen Bodenklassen zugeordnet. Diese können z.B. Sand, Schluff und Ton sein. Über die prozentuale Verteilung dieser Bodenklassen lässt sich dann eine eindeutige Bodenart bestimmen. Die Diskretisierung erfolgt dabei nicht über räumliche Parameter wie z. B. feste Mächtigkeiten oder Tiefenvorgaben, sondern die Bildung von Schichten ist dann abhängig von Änderungen der Sedimentverteilung.

Mit der Integration erster Ansätze zur Berücksichtigung von Subgrid-Informationen bei der Simulation der Morphodynamik wurde dieses etwas andere F&E Projekt abgeschlossen und in eine Grundsatzaufgabe überführt, die dauerhaft fortgeführt werden muss.

3.2 Gravitationeller Einfluss auf den Geschiebetransport:

Vor allem in den eher sandigen Mündungsbereichen der Ästuar- und den Rinnen der Wattflächen spielt der Geschiebetransport bei der Rinnenmigration und der generellen morphodynamischen Entwicklung eine entscheidende Rolle. Zu einer korrekten Beschreibung ist es erforderlich, den Einfluss der Gravitation auf den Geschiebetransportvektor zusätzlich zum Energieeintrag durch Strömung und Wellen zu berücksichtigen. Hier wirken zwei Effekte. Zum einen kann entweder eine Beschleunigung oder eine Verlangsamung des Transports in Abhängigkeit von der Hangneigung stattfinden (longitudinaler Effekt). Zum anderen findet auch eine Ablenkung und somit Richtungsänderung des Transportes statt (transversaler Effekt).

Diese beiden Effekte werden mit einer Formulierung, die aus dem Verfahren Deflt-3D (Deltares 2020) übernommen wird und auf Formulierungen von Leo van Rijn basieren (van Rijn 1993), implementiert.

Der longitudinale Effekt ergibt sich wie folgt:

$$\alpha_s = 1 + \alpha_{bs} * \left(\frac{\tan(\varphi)}{\cos(\text{atan}\left(\frac{dz}{ds}\right)) * (\tan(\varphi) - \frac{dz}{ds})} - 1 \right)$$

Mit α_{bs} = benutzerdefinierter Parameter, φ = innerer Reibungswinkel des Sediments (angenommen als 30°) und $\frac{dz}{ds}$ = Sohlneigung in Richtung des Geschiebetransports.

Die Wirkung auf den Geschiebetransportvektor berechnet sich mit:

$$\vec{q}_s = \alpha_s * \vec{q}_s$$

Mit \vec{q}_s = Rate des Geschiebetransport.

Für den transversalen Effekt gilt:

$$f_{norm} = \alpha_{bn} * \left(\frac{\tau_{cr}}{|\vec{\tau}_b|} * \frac{dz}{dn} \right)$$

Mit α_{bn} = benutzerdefinierter Parameter, τ_c = kritische Bodenschubspannung, τ_b = Bodenschubspannung und $\frac{dz}{dn}$ = Sohlneigung senkrecht zur Richtung des Geschiebetransports

Die Wirkung des transversalen Effekts auf den Geschiebetransportvektor berechnet sich mit:

$$\vec{q}_{s,x} = \vec{q}_{s,x} - \vec{q}_{s,y} * f_{norm}$$

$$\vec{q}_{s,y} = \vec{q}_{s,y} - \vec{q}_{s,x} * f_{norm}$$

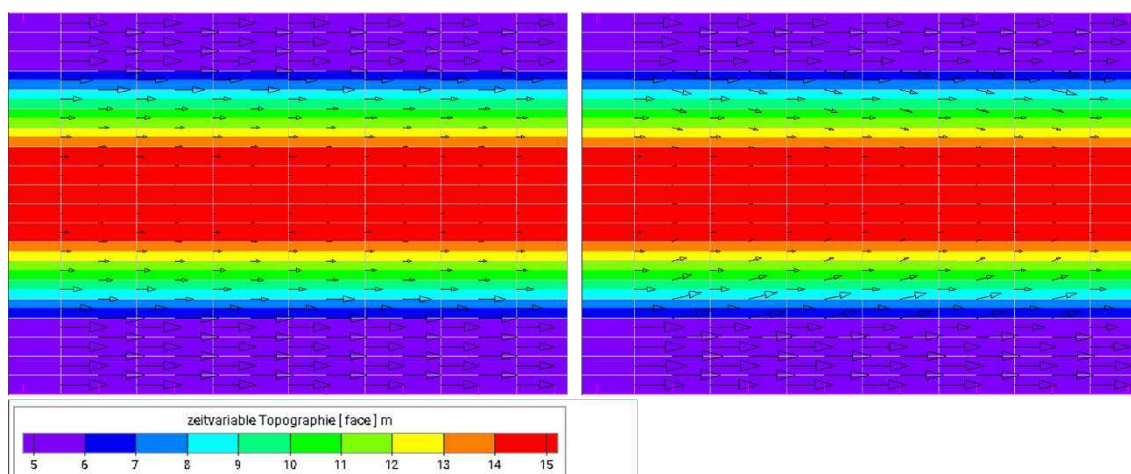


Bild 2: Wirkung der neuen Formulierung auf den Geschiebetransport. Links: Ohne Formulierung zeigen die Vektoren des Geschiebetransports lediglich in Strömungsrichtung. Rechts: Mit der neuen Formulierung findet eine Ablenkung des Geschiebetransports entlang der Hangneigung in die tieferen Bereiche statt.

3.3 Hiding & Exposure Funktionen:

Der Zeitpunkt der Mobilisierung des Sediments spielt für den Transport eine wichtige Rolle. Der Bewegungsbeginn wird über die kritische Schubspannung gesteuert. Ist die tatsächlich wirkende Bodenschubspannung größer als dieser Wert, kann Transport stattfinden. Ein gängiger Weg ist die fraktionsweise Bestimmung dieses Grenzwertes mit Hilfe der Shields-Kurve. Die entscheidende Eingangsgröße zur Bestimmung der kritischen Schubspannung ist hierbei der Korndurchmesser der jeweiligen Fraktion.

Sedimentmischungen können sich jedoch anders als homogenes Sediment verhalten, da feinere Sedimente eher die Hohlräume auffüllen können, während gröbere Fraktionen exponierter gegenüber den angreifenden Kräften sind. Somit können z. B. feinere Sedimente schweren erodieren, als anhand ihres Korndurchmessers eigentlich zu erwarten wäre.

Hiding & Exposure Ansätze berücksichtigen diese Effekte und passen entweder die kritische Schubspannung oder direkt die Transportraten fraktionsabhängig an. Es werden die Ansätze von Egiazaroff (1965), Ashida-Michiue (1972) und Karim-Holly-Yang (1987) implementiert.

3.4 Intermittierender Transport:

Für die Modellierung wird der Transport von Sedimenten in zwei Prozesse aufgeteilt. Der Transport in Suspension in der Wassersäule und der bodennahe Transport als Geschiebe. Der Suspensionstransport wird in der Regel für die Schluff- und Tonfraktionen angenommen, wohingegen die Sande als Geschiebe transportiert werden. Bei ausreichend hohen Bodenschubspannungen können aber auch diese Fraktionen in Suspension gelangen.

Um dies zu berücksichtigen, wurde der Intermittierende Transport als dritte Option eingeführt. Fraktionen mit diesem Modus werden primär als Geschiebe transportiert. Über das Verhältnis der Sinkgeschwindigkeit zu einem vom Benutzer anzugebenen Parameter – der kritische Rouse-Nummer - wird ein kritischer Grenzwert der Bodenschubspannung bestimmt, ab dem diese Fraktion zusätzlich auch in Suspension transportiert werden kann.

$$\tau_c = 1000 * \frac{sv}{(0,41 * rn)^2}$$

Mit τ_c = *kritische Bodenschubspannung*, sv = *Sinkgeschwindigkeit* und rn = *benutzerdefinierte Rouse-Nummer*.

Wird nirgendwo im Untersuchungsgebiet diese Bedingung erfüllt kann auf die Lösung der Transportgleichung verzichtet werden.

3.5 Weitere Optionen zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit:

Die Geschwindigkeit, mit der suspendierte Sedimente absinken, ist eine der zentralen Größen des Schwebstofftransports. Durch Erweiterungen am bestehenden Paket zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit ist es jetzt möglich, die vorhandenen Formulierungen besser miteinander zu kombinieren, um Effekte wie z. B. Flokkulation besser berücksichtigen zu können.

Darüber hinaus wurde auch ein neuer Ansatz von van Rijn (1993) implementiert. Dabei handelt es sich um ein fraktionsunabhängiges Sinkgeschwindigkeitsmodell, das die Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Schwebstoffgehalt berechnet.

Das Modell unterscheidet zwischen Flokkulation für niedrige Schwebstoffgehalte kleiner als der benutzerdefinierte Grenzwert c_{gr} :

$$sv = k * c^m$$

Mit k = flokkulations Konstante, c = Schwebstoffgehalt und m = flokkulations Exponent.

und Hindered Settling für Schwebstoffgehalte oberhalb des Grenzwerts:

$$sv = sv_0 * (1 - \alpha * c^\beta)$$

Mit α = hindered settling Konstante, β = hindered settling Exponent und

$$sv_0 = \frac{k * c_{gr}^m}{(1 - \alpha * c_{gr}^\beta)}$$

Beim Übergang von Flokkulation zu Hindered Settling ist die Sinkgeschwindigkeit maximal.

3.6 Baggern/Verklappen mit DredgeSim:

Bei einer morphodynamischen Modellierung muss das Sedimentmanagement der Ästuare berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurde das Modul DredgeSim entwickelt, mit dem Bagger- und Verklappvorgänge im Modell abgebildet werden können. Das Modul wurde dahingehend erweitert, dass komplexere Vorgänge vom Benutzer angegeben werden können, wie sie auch in der Realität stattfinden. Das beinhaltet die Einbindung von Daten zum System MoNa, mit dem von der WSV beauftragte Bagger- und Verklappvorgänge überwacht und abgerechnet werden. Es ist nun möglich, die Daten von realen Vorgängen in ein für DredgeSim lesbares Format zu exportieren und im Modell zu simulieren.

Der Ablauf von DredgeSim wird mit Blick auf die Performance optimiert und sowohl Bagger- als auch Verklappvorgänge werden realitätsnah gestaltet. Bislang wurden alle Elemente des Berechnungsgitters, die in einem Baggerpolygon liegen, gleichmäßig vertieft. Durch die Änderungen werden zuerst die höherliegenden Elemente vertieft, sodass am Ende eine ebene Sohle entstehen kann (Bild 3). Analog werden bei dem Verklappvorgang zunächst die tieferliegenden Bereiche des Verklappbereiches gefüllt.

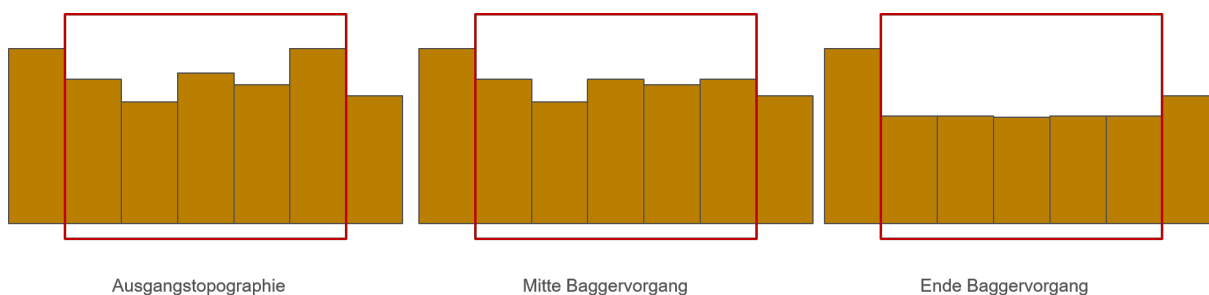


Bild 3: Konzeptionelle Darstellung der neuen Umsetzung eines Baggervorgangs in DredgeSim.

3.7 Überarbeitung der Sedimentbilanzierung und der 3D-Funktionalität:

Zur Vereinfachung des Programmablaufs und für die bessere Einbindung von weiteren Entwicklungen wird die Bilanzierung innerhalb von SediMorph von Volumen auf Massen umgestellt. Im Zuge dessen wird die Austauschschicht, die bislang als virtuelle Schicht Teil der Zellstruktur war, als separate Schicht angelegt. Dies ermöglicht eine klarere Trennung des Anteils des Sedimentinventars, der in einem Zeitschritt für den Transport zur Verfügung steht, von dem restlichen Material. Als Folge reduziert sich die Anzahl an Sonderfällen, die im Programmcode berücksichtigt werden müssen.

Weiterhin wird die in SediMorph bereits existierende Grundstruktur für einen dreidimensionalen Aufbau des Bodens (Malcherek et al. 2005) ertüchtigt. Hier sind einige Anpassungen bei den Algorithmen zur Bilanzierung des Sedimentinventars notwendig, um den korrekten Zugriff auf die passenden Schichten und somit eine massenerhaltende Berechnung zu gewährleisten.

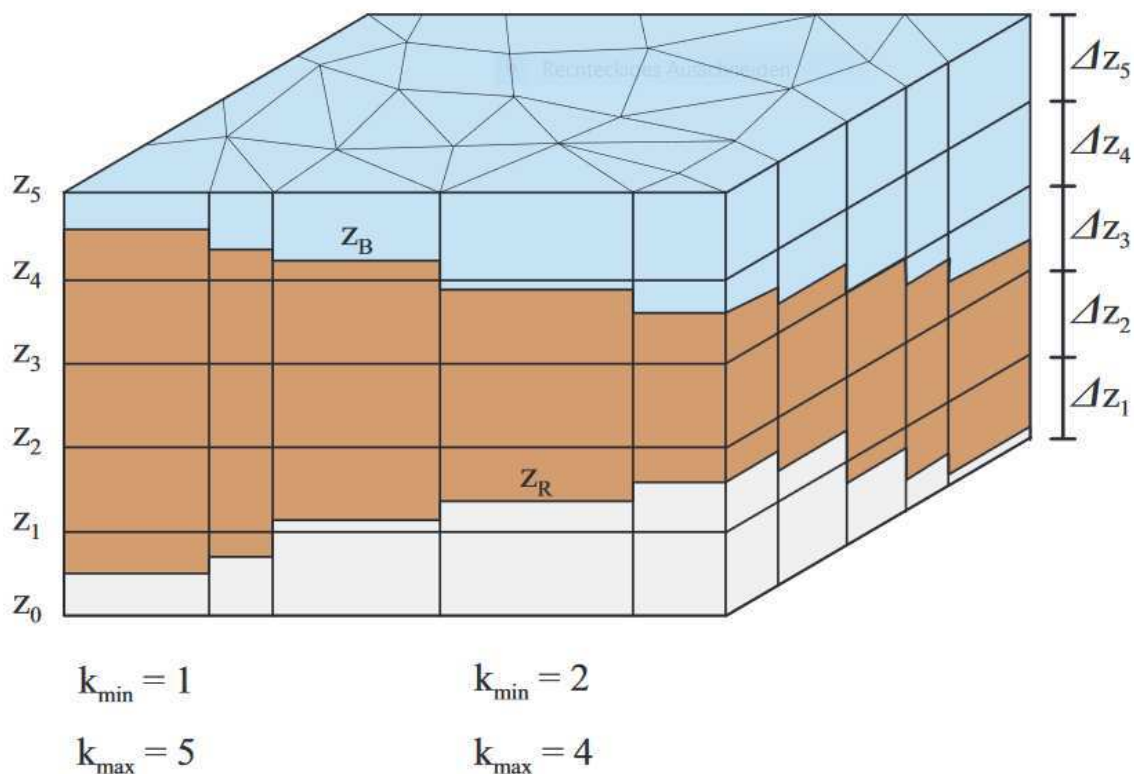


Bild 4: Aufbau des Bodens in SediMorph. Die vertikale Diskretisierung erfolgt mit Hilfe von Z-Schichten (Malcherek et al. 2005).

3.8 Vereinfachte Initialisierung eines 3D-Bodens:

Die Nutzung eines dreidimensionalen Bodenaufbaus ermöglicht Verbesserungen bei der Initialisierung des Modellgebietes. Oftmals liegen für die Initialisierung des Sedimentinventars nur Greifproben des Oberflächensubstrats vor. Dieses unterscheidet sich jedoch oftmals in seiner Zusammensetzung von dem darunterliegenden Material. Das kann vor allem bei der Simulation von längeren Zeiträumen dazu führen, dass in Bereichen mit starker Aktivität die Erosion zu stark oder

aber auch zu schwach ausfällt. Die Güte der Eingangsdaten ist entscheidend für die Güte der Modellergebnisse.

Um dem entgegen zu wirken und dem Anwender mehr Flexibilität beim Modellsetup zu ermöglichen, wurde die Option geschaffen, eine globale Sedimentverteilung zu definieren, mit der der Boden initial gefüllt wird. Die Daten aus den Greiferproben werden dann nur mit einer vom Benutzer angegebenen Mächtigkeit für den oberen Teil des Bodens verwendet. Somit lässt sich der Boden in zwei Bereiche aufteilen auf einfache Weise in zwei Bereiche aufteilen. Einen unteren Teil, der eher den großräumigen geologischen Bedingungen entspricht, und einem oberen Teil, der räumlich variabel aus den Greiferproben und ähnlichen Messungen bestimmt wird.

3.9 Bodenmodell mit einer variablen vertikalen Diskretisierung:

Ein neuer Ansatz zur variablen vertikalen Diskretisierung des Bodens ermöglicht eine detaillierte stratigrafische Abbildung von Sedimenttransportprozessen (Fricke und Malchereck 2014). Die Diskretisierung erfolgt dabei nicht über räumliche Parameter wie z. B. feste Mächtigkeiten oder Tiefenvorgaben, sondern die Bildung von Schichten ist abhängig von Änderungen der Sedimentverteilung. So ist es möglich, eine räumlich und zeitlich variable vertikale Diskretisierung des Bodens zu ermöglichen, mit der komplexe Strukturen detailgenau abbilden werden können (Bild 5).

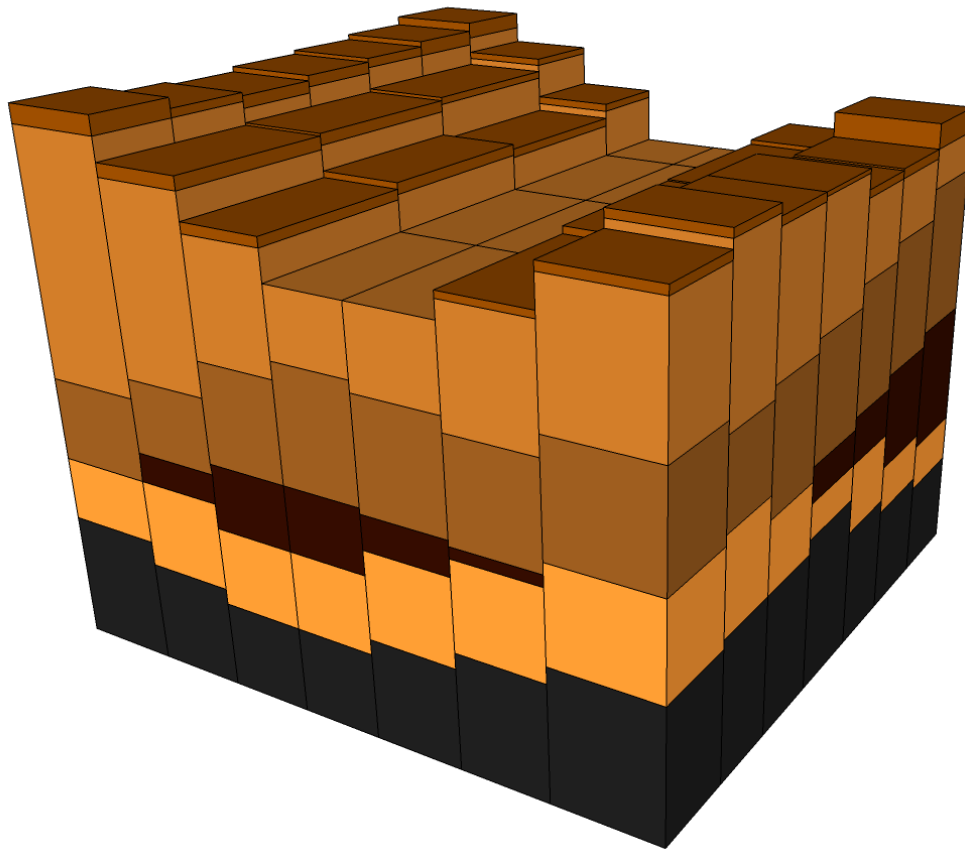


Bild 5: Schematische Darstellung eines dreidimensionalen Bodens mit variabler Schichthöhe.

Zur Beschreibung des Sediments werden hierzu Bodenklassen und Bodenarten eingeführt. Die im Modell verwendeten diskreten Sedimentfraktionen werden zum Zweck der Klassifizierung anhand ihres Korndurchmessers einzelnen Bodenklassen zugeordnet. Diese können z. B. Sand, Schluff und Ton sein (Tabelle 1). Über die prozentuale Verteilung dieser Bodenklassen lässt sich dann eine eindeutige Bodenart des Feinbodens bestimmen (Bild 6).

Die Bodenarten zeichnen sich durch eine dominante Bodenklasse aus, die durch eine untergeordnete Bodenart ergänzt wird. Beispiele hierfür sind z. B. *schwach schluffiger Sand* oder *mittel toniger Schluff*. Mit Hilfe dieses Systems lässt sich für jede Sedimentverteilung eine Bodenart bestimmen, die dann zur variablen Diskretisierung des Bodens in der Vertikalen genutzt werden kann.

Tabelle 1: Gültigkeitsbereiche für den Korndurchmesser der Bodenklassen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung.

Bodenklasse	Unterer Korndurchmesser in mm	Oberer Korndurchmesser in mm
Ton	0	0,002
Schluff	0,002	0,063
Sand	0,063	2

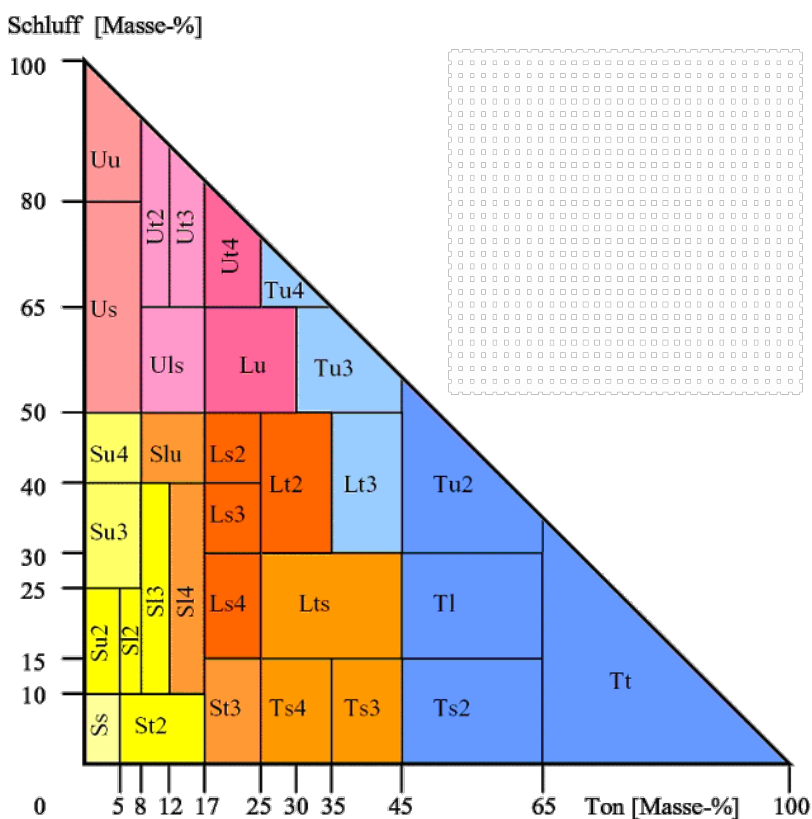


Bild 6: Definition der Bodenarten nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (aus AG-Boden 2005).

Die Entstehung von neuen Schichten spielt hauptsächlich im Depositionsfall eine Rolle. Unterscheidet sich das zu deponierende Sediment so sehr von dem Sediment der obersten Schicht, dass es eine andere Bodenart aufweist, wird eine neue Schicht eingerichtet und das Material dort gespeichert. Bild 7 zeigt diesen Vorgang beispielhaft.

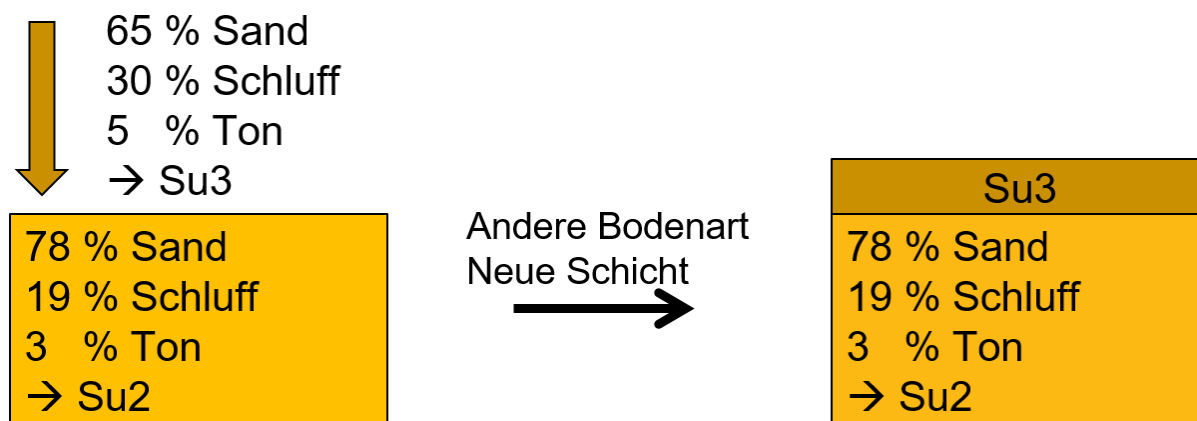


Bild 7: Entstehung einer neuen Schicht bei unterschiedlicher Bodenart zwischen oberster Schicht und zu deponierendem Sediment.

Darüber hinaus werden noch zwei Parameter verwendet, um dem Anwender zusätzliche Kontrolle über die Entstehung von Schichten zu geben.

Dies ist zum einen eine minimale Mächtigkeit, die überschritten werden muss, bevor eine neue Schicht aufgemacht werden kann. Dies verhindert das Entstehen von sehr dünnen Schichten. Zum anderen gibt es auch noch eine maximale Mächtigkeit, ab der automatisch eine neue Schicht aufgemacht wird. Dies ist vor allem in Bereichen und Modellen sinnvoll, in denen die dominierenden Sedimentfraktionen alle einer Bodenklasse zugeordnet werden (z. B. nur Sande). Hier würde dann immer die gleiche Bodenart bestimmt werden, auch wenn es in den Anteilen der einzelnen Fraktionen deutliche und relevante Unterschiede geben kann.

Bild 8 zeigt die Ergebnisse eines einfachen Testfalls zur Betrachtung der Entstehung und des Zusammenfassens von Schichten und den Einfluss der maximalen Anzahl von Schichten auf den Detailgrad des Bodenaufbaus. Verschiedene Fraktionen der Bodenklassen Schluff und Sand werden in veränderlicher Zusammensetzung über einen Quellterm eingeleitet und deponieren dann ohne weiteres hydrologisches Forcing.

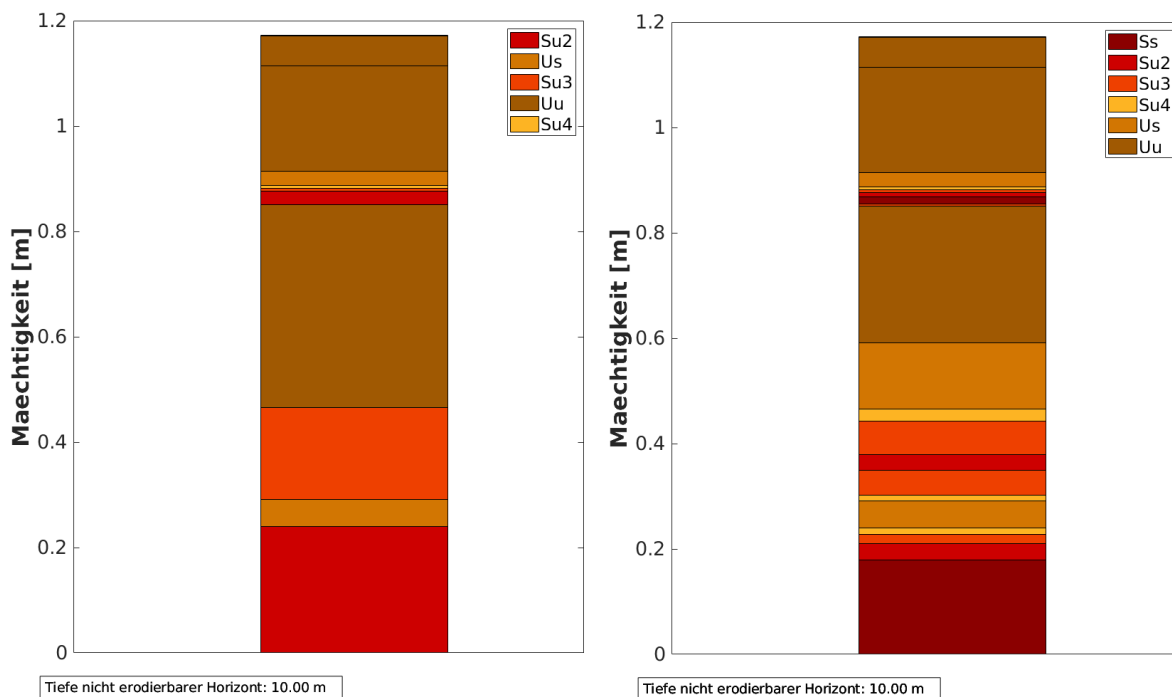


Bild 8: Absetzsäule mit zeitlich variablem Sedimentstrom zur Verdeutlichung der Entstehung von Schichten in Abhängigkeit von der Bodenart. Links: Maximale Anzahl von Schichten ist zehn. Rechts: Maximale Anzahl von Schichten ist zwanzig.

3.10 Neues Upwind-Verfahren für den Geschiebetransport:

Ein Upwind-Verfahren für den Geschiebetransport ist notwendig, da dieser auf den Kanten berechnet wird, wohingegen viele der zur Berechnung erforderlichen Größen in den Elementen vorliegen. Dementsprechend muss bestimmt werden, aus welcher Richtung die notwendigen Informationen zur Berechnung der Geschiebetransportrate verwendet werden.

Das bisherige Verfahren verwendet nur die Strömungsrichtung zur Bestimmung der Upwind-Richtung. Das neue Verfahren berücksichtigt in einem ersten Ansatz zusätzlich den Sohlgradienten bzw. die Richtung, in die sich Transportkörper wie Riffel oder Dünen bewegen. Mit diesem neuen Upwind-Verfahren wurden die ersten Arbeiten zur Subgrid-Morphodynamik vorbereitet.

3.11 Subgrid-Morphodynamik:

Mit Einführung der Subgrid-Technologie in das hydrodynamische Verfahren UnTrim (Casulli 2008) besteht auch die Notwendigkeit, SediMorph so zu erweitern, dass es die neue Datenstruktur von Subgrid-Gittern versteht. Weiterhin sind auch neue Methoden erforderlich, wie eine Morphodynamik auf Subgrid-Ebene auf der Grundlage von Verteilungsfunktionen, d.h. ohne genaue geographische Kenntnis der Subgrid-Topographie, abgebildet werden kann. Hierzu gibt es erste Ansätze, die von der Universität der Bundeswehr München erarbeitet wurden. Diese betreffen die Rekonstruktion der bodennahen Geschwindigkeiten auf Subgridebene, daraus abgeleitet die Berechnung der Bodenschubspannung und schließlich modifizierte Ansätze zur Berechnung der Depositions- und Erosionsflusses. Bei der Berechnung der Transportraten des Geschiebes stößt

diese probabilistische Vorgehensweise an ihre Grenzen, da dafür die Sohlgradienten der Subgrid-topographie letztlich einen großen Einfluss haben. Diese Methoden werden derzeit noch überprüft.

3.12 Erweiterungen der Ausgabemöglichkeiten:

Zusätzlich zur bestehenden Ausgabe im BAW-eigenen BDF-Dateiformat wird SediMorph um die Ausgabe im Netcdf Format erweitert¹. Da es sich hierbei um ein international anerkanntes Dateiformat handelt, erleichtert dies den Austausch und die Weitergabe von Daten an Projektpartner. Als Basis wird die CF-Metadaten-Konvention eingehalten. Zusätzlich dazu enthalten die erzeugten Dateien auch BAW-spezifische Metadaten, bzw. es werden die *Unstructured Grid Metadata Conventions for Scientific Datasets* (UGRID Conventions) verwendet.

Das NetCDF-Format erlaubt es auch, die Ergebnisse mit der Geometrie abzuspeichern, an der sie auch im Modell vorliegen. Das BDF-Format erforderte hier oftmals eine Interpolation.

Hinzu kommt, dass parallel dazu auch diverse Neuentwicklungen im Bereich des Postprocessing in der Abteilung Küste der BAW stattgefunden haben, die NetCDF als Dateiformat fordern. Damit diese neuen Möglichkeiten voll ausgeschöpft werden können, wird die Berechnung der integralen Transporte hinzugefügt und kann optional mit in die NetCDF-Datei geschrieben werden. Dies ist wichtig, wenn man die Ergebnisse im Postprocessing räumlich oder zeitlich aggregieren möchte. Diese neuen Analysemöglichkeiten haben sich in der Projektarbeit gerade für den Sedimenttransport als sehr nützlich erwiesen.

3.13 Laufzeitoptimierung und verbesserte Parallelisierung:

Zur Verbesserung der Performance des Verfahrens werden verschiedene Optimierungen am Programmcode vorgenommen. Hierzu zählen Umstellungen auf neuere Fortranstandards, eine bessere Anpassung an die aktuelle Hardwarestruktur des Hochleistungsrechners der BAW und ein Ausbau der bereits bestehenden Parallelisierung mit OpenMp. Dadurch kann je nach Modellsetup eine Beschleunigung von bis zu 15 % erzielt werden. Derzeit läuft die Umstellung auf MPI.

¹ This project took advantage of netCDF software developed by UCAR/Unidata (www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/).

4 Anwendungsbeispiel

4.1 Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer

Im Rahmen des FuE-Projekts BASEWAD (BAW 2020) werden morphodynamische Studien für das Gebiet des Schleswig-Holsteinisches Wattenmeeres mit einem Fokus auf den Bereich des Hörnummer Tidebeckens und den Barriereinseln Sylt und Amrum durchgeführt. Schwerpunkt ist es, den Einfluss des Seegangs auf den Sedimenttransport plausibel im Modell abzubilden und die grundlegenden Transportpfade und Entwicklungen in diesem Gebiet modelltechnisch darstellen zu können und die Ausbreitungsmuster von im Küstenvorfeld aufgespültem Sand zu beschreiben. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen werden viele der in Kap. 3 beschriebenen Erweiterungen angewendet. Es wird ein dreidimensionaler Bodenaufbau verwendet, der mit der neuen Methode initialisiert wird und bei dem sich somit der obere Teil des Bodens vom darunterliegenden Material unterscheidet. Da die Entwicklungen des neuen variablen Bodenmodells zu dem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen waren, wird das klassische Bodenmodell mit Z-Schichten und einer vertikalen Auflösung von 25 cm verwendet.

Das Untersuchungsgebiet zeichnet sich durch ein sehr sandiges Sedimentinventar aus, das überwiegend als Geschiebe transportiert wird. Aufgrund der Seegangswirkung treten regelmäßig sehr hohe Bodenschubspannungen auf, die in der Natur zu einer Erosion und einhergehenden Suspension dieses groben Sediments führen können. Die Abbildung im Modell kann mit dem neuen intermittierenden Transport umgesetzt werden. Gerade die Phasen mit starkem Seegang können so zu ausgeprägten morphologischen Änderungen führen, wie man sie auch vor Ort beobachtet. Der Einfluss der Sohlneigung auf den Geschiebetransport spielt vor allem bei der Hangbildung und Verlagerung von Rinnen eine wichtige Rolle. Dies sind Prozesse, die vor allem im Ebbdelta maßgeblich zur Morphodynamik beitragen. Auch Hiding & Exposure Formulierungen werden verwendet, um die Wechselwirkung verschiedener Korngrößen auf die Erodierbarkeit des Sediments zu erfassen.

Bild 9 zeigt den Vergleich der simulierten Tiefenänderung für das Jahr 2010 mit den gemessenen mittleren jährlichen Änderungen des Zeitraums 2007-2013. Grundlegende Prozesse werden bereits gut abgebildet. Hierzu zählt z. B. die Bildung eines Schütthangs am westlichen Ufer des Seegatts. Auf den angrenzenden Sänden findet im Modell im westlichen Teil größtenteils Deposition statt. Das Material dazu wird zum einen mit dem Ebbstrom nahe der südlichen Spitze von Sylt von Ost nach West bewegt und zum anderen wirkt hier auch von der anderen Seite der hauptsächlich von Westen kommende Seegang. Zusätzliches Material wird von Norden mit dem Küstenlängstransport in Richtung des Seegatts transportiert. In den Messungen ist hier ein deutlich feineres Muster zu erkennen, bei dem sich die Wanderung von Dünenkörpern abzeichnet. Diese Vorgänge sind im Modell auflösungsbedingt nicht abgebildet. Hin zum Hang des Vortrapp-Tiefs findet dann auf den Sänden Erosion statt und das dort bewegte Sediment trägt maßgeblich zur Bildung eines Schütthangs am westlichen Ufer bei. Im Bereich des entlang der Westküste des südlichen Spitze von Sylt ist im Modell die auch in den Messungen sichtbare Ablagerung von Sedimenten zu sehen, die durch ein sich dort befindendes Tetrapoden-Längswerks ausgelöst wird. Südlich und südwestlich entlang des Küstenverlaufs findet Erosion statt. Diese ist an der Spitze besonders ausgeprägt,

was in der Tendenz ebenfalls in Übereinstimmung mit den Messungen ist. Die langfristige Tendenz zeigt eine Wanderung der nach Osten. Im Modell findet hier am östlichen Bereich der Odde auf dem Strand oberhalb von 0 m NHN Deposition statt. Unterhalb kommt es zum Abtrag von Sedimenten. Größere Ablagerungen am Ufer finden dann erst wieder etwas weiter nördlich statt.

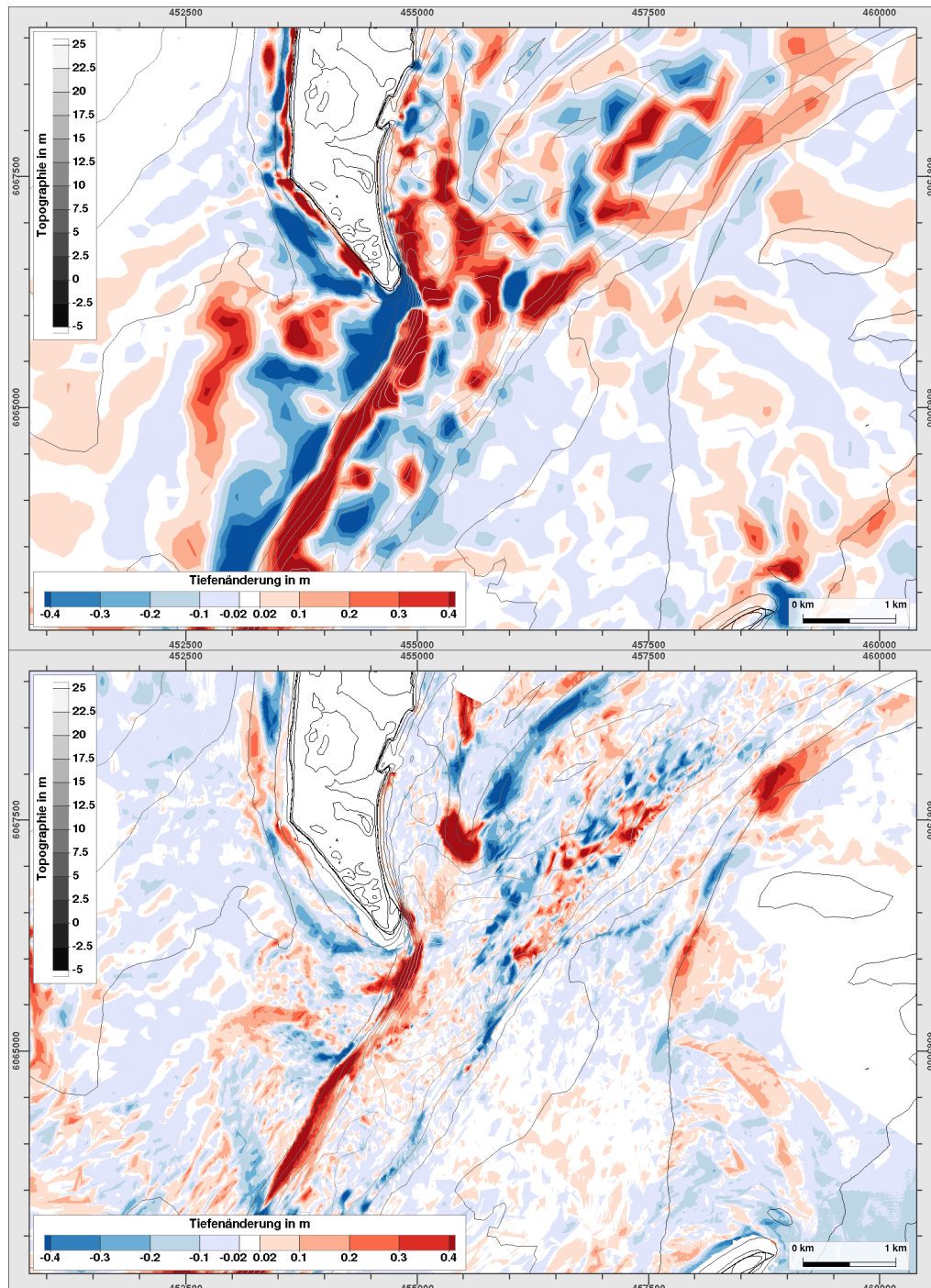


Bild 9: Vergleich der simulierten Tiefenänderung für das Jahr 2010 (oben) mit den gemessenen mittleren jährlichen Änderungen des Zeitraums 2007-2013 (unten) (aus BAW 2020).

Auch die neuen Möglichkeiten des Postprocessing werden genutzt. Die Aggregation der Modellergebnisse ist ein wertvolles neues Werkzeug, um komplexe Prozesse und daraus resultierende Änderungen zu vereinfachen und diese besser kommunizieren zu können. Bild 10 zeigt die simulierte Änderung des Sedimentvolumens für das Jahr 2010 für Bilanzierungspolygone entlang der Schleswig-Holsteinischen Küste. Gut sind großräumige Tendenzen zu erkennen. So tritt Erosion vor allem entlang der Küsten der Barriereinseln und im Küstenvorfeld auf. Das dort bewegte Sediment lagert sich zum einen in den Tidebecken entlang der Binnenküste ab. Zum anderen wird es aber auch weiter in die Deutsche Bucht transportiert und sedimentiert ab Tiefen größer 10 m.

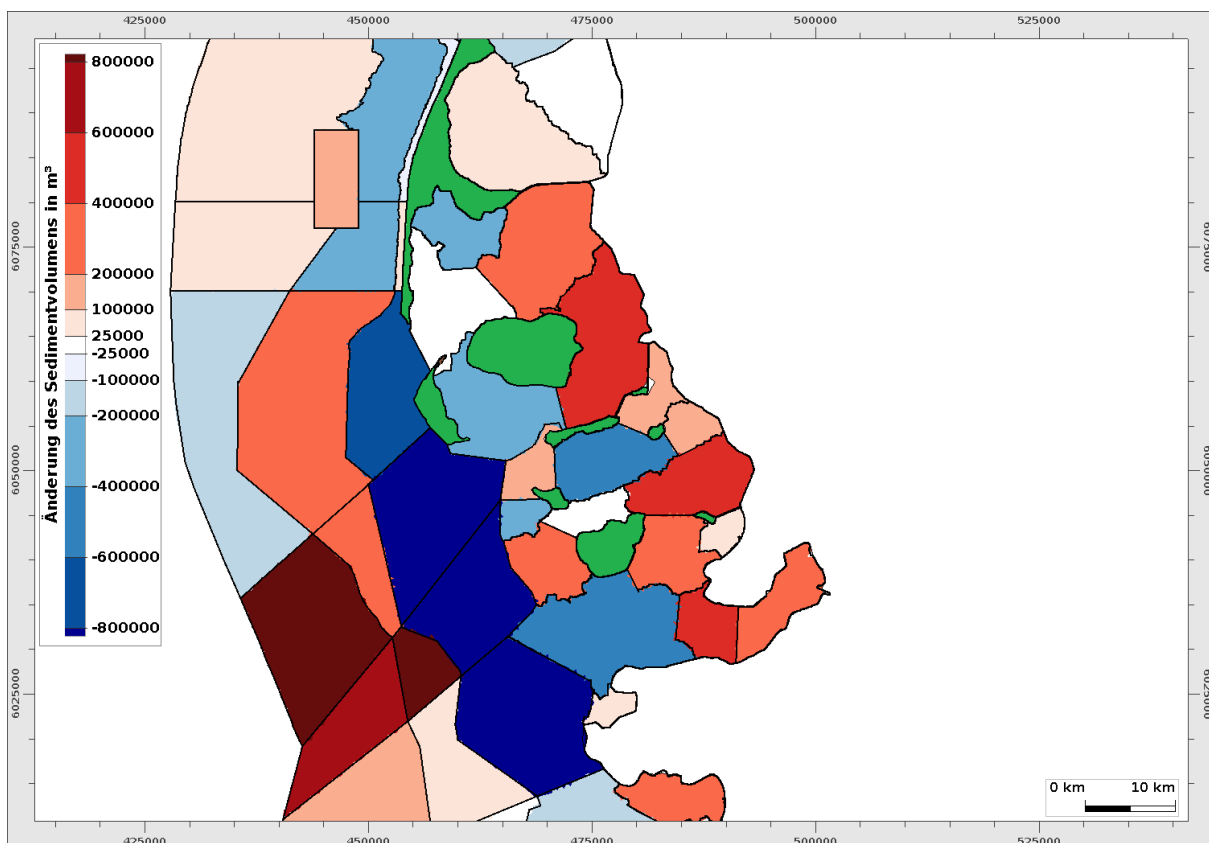


Bild 10: Änderung des Sedimentvolumens in m^3 für das Jahr 2010 für verschiedene Bilanzierungspolygone entlang der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste (aus BAW 2020).

5 Literaturverzeichnis

AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Ashida, K. and Michiue, M. (1971): An investigation of river bed degradation downstream of a dam, Proc. 14th Congress of the IAHR.

Bundesanstalt für Wasserbau (2020): BASEWAD (BALancing SEDiment deficits in the WADden Sea) – Systemstudien zur morphologischen Entwicklung im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer.

Casulli, V. (2008): A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Volume 60, Issue 4, pages 391 - 408

Deltares (2020): Delft3D-FLOWSimulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments - User Manual - Hydro-Morphodynamics.

Egiazaroff, I.V. (1965): Calculation of nonuniform sediment concentration, J. of Hyd. Div., Proc. ASCE, No.HY4.

Fricke, Benjamin; Malcherek, Andreas (2014): A Stratigraphic Soil Model for Coastal Morphodynamics. ICHE 2014 - 11th International Conference on Hydroscience & Engineering. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/99475>

Karim, M.F.; Holly F.M.; Yang J.C. (1987): "IALLUVIAL - Numerical Simulation of Mobile-Bed Rivers". IIHR Report No. 309, Iowa Inst. of Hydr. Res., Iowa City.

Malcherek,A.; Piechotta, F.; Knoch, D. (2005): Mathematical Module SediMorph - Standard Validation Document Version 1.1, Technical Report, Bundesanstalt für Wasserbau.

van Rijn, L. C. (1993): Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, The Netherlands.



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

www.baw.de