

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Zanke, Ulrich

Über die Problematik, im Tidegebiet von Restströmen auf Wasser- und Sedimentverlagerungen zu schließen

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101577>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Zanke, Ulrich (2007): Über die Problematik, im Tidegebiet von Restströmen auf Wasser- und Sedimentverlagerungen zu schließen. In: Die Küste 72. Heide, Holstein: Boyens. S. 171-182.

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.



Über die Problematik, im Tidegebiet von Restströmen auf Wasser- und Sedimentverlagerungen zu schließen

Von ULRICH ZANKE

Z u s a m m e n f a s s u n g

Zu Aussagen über die Sedimentbewegung, insbesondere über Sedimenttransportrichtungen werden der Einfachheit halber immer wieder Berechnungen von Restströmen herangezogen, anstatt morphodynamische Modelle zu betreiben. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass EULER-Restströme im Tidegebiet für die Beurteilung der Drift von Wasser unbrauchbar sind, da unrealistische Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden können, und andererseits unzutreffende Ergebnisse nicht ohne Weiteres erkennbar sind. LAGRANGE-Reststromwege sind deutlich aufwendiger zu gewinnen, liefern aber physikalisch nachvollziehbare Rückschlüsse auf die Netowasserbewegungen. Die Richtung von Resttransportwegen der Sedimente kann von denen der Wasserbewegung je nach kritischer Geschwindigkeit der Sedimente zum Teil ganz erheblich abweichen. Die Abweichung ist dabei für verschiedene Kornfraktionen auch noch unterschiedlich. Die Analyse oder Prognose der Transportrichtungen natürlicher Sedimentgemische ist daher mit Reststromüberlegungen eher Glückssache.

S u m m a r y

The evaluation of sediment motion, particularly the direction of transport, is frequently based on residual flow vectors because of the simplicity of the method as compared to a morphodynamic simulation of the processes. In this contribution it is shown that for drifting water bodies the consideration of residual currents after EULER may lead to wrong conclusions which cannot be verified without further investigations. Residual currents derived by a Lagrangian approach are physically more meaningful but the effort is significantly higher. The residual transport of sediment may differ distinctly from that of the water body dependent on the critical velocity of the sediment. Moreover, grain size distribution has an additional effect on transport directions. Consequently, the analysis and/or prediction of a residual sediment transport based on the method of residual currents can hardly be called reliable. However, hydrodynamic-morphodynamic models are capable to give answers on sediment motion.

K e y w o r d s

Tide, Reststrom, Kornfraktionen, Sedimenttransport, Morphodynamik
tides, residual current, sediment motion, grain size distribution, morphodynamics

I n h a l t

1. Einleitung	172
2. Definition von Reststromwegen der Wasserbewegung	173
2.1 Vorbemerkung	173
2.2 EULER-Reststromwege	173

2.3 LAGRANGE-Reststromwege	175
2.4 Zwischenbewertung bezüglich des Versatzes von Wasservolumina	177
3. Anwendung von Resttransport-Betrachtungen auf Sedimentbewegungen	177
3.1 Einfluss der Transporteigenschaften von Sediment	177
3.2 Beispiel zum Einfluss der Korngröße auf die Transportwege	179
3.3 Sonderfall der EULER-Betrachtung bei Sediment-Resttransportwegen	181
4. Zusammenfassende Bewertung	181
5. Schriftenverzeichnis	182

1. Einleitung

Fließendes Wasser setzt die Sedimente an den Gewässersohlen bei ausreichender Strömungsgeschwindigkeit in Bewegung. Dieser Feststofftransport führt zu natürlichen Veränderungen im Einflussbereich der Gewässer. Tiefen und Untiefen entstehen und vergehen, Flusskrümmungen verlagern sich, Küstenräume verändern sich. In den von Menschen bewohnten Flussniederungen und Küstenräumen entstehen hierdurch Probleme, deren Beherrschung von den Ingenieuren erwartet wird.

Des Weiteren ändert jeder Eingriff, der die Strömung beeinflusst, auch das Sediment-Transportverhalten in der nahen und fernerer Umgebung. Es können unerwünschte Erosionen und Auflandungen hervorgerufen werden, die zu minimieren bzw. deren Gefahren für Bauwerke abzuwehren sind. Nicht selten müssen Bauwerke und Baumaßnahmen über Jahrzehnte hindurch unterhalten, instand gesetzt oder in manchen Fällen sogar umgebaut werden, um der sich stetig ändernden Morphologie angepasst und funktionsfähig zu bleiben. Die Verlandung antiker Häfen, die Erosion weiter Strecken des Rheins oder der drohende Verlust der Insel Sylt an der deutschen Nordseeküste stehen hierfür als Beispiele, ebenso wie die Probleme des Sedimentüberschusses im Gelben Fluss mit der Folge von verheerenden Überflutungskatastrophen.

Ein weiteres zu beherrschendes Problem ist die Vorhersage des Verbleibs von verklappten Sedimenten insbesondere dann, wenn diese mit Umweltgiften kontaminiert sind.

Um Aussagen zu Fragen wie den vorstehend genannten zu gewinnen, kommen grundsätzlich Feststofftransportmodelle in Betracht:

1. Physikalische Modelle mit fließendem Wasser und beweglichen Modellsedimenten und
2. hydrodynamisch-morphodynamisch-numerische Modelle.

Beide Modellvarianten sind vergleichsweise aufwendig. Daher wurde (und wird) ersatzweise immer wieder versucht, Aussagen über die Sedimentbewegung im Bereich von Gezeitenströmungen auf der Grundlage sogenannter Restströme, oder genauer gesagt Reststromwege, zu ermitteln (s. z.B. FÜHRBÖTER, 1979, S. 15; GÖHREN, 1979, S. 97 ff). In diesem Beitrag wird gezeigt, dass Reststrombetrachtungen bereits für die Beurteilung der Netto-Wasserdrift problematisch sind und für die Sedimentbewegungen zu beliebig falschen Ergebnissen führen können (vgl. auch ZANKE, 2002, S. 235/236).

2. Definition von Reststromwegen der Wasserbewegung

2.1 Vorbemerkung

Reststromwege kennzeichnen den Versatz (oder die Drift) von Wasservolumina im Tidegebiet. Als Reststromweg bezeichnet man die Strecke, um die sich ein Wasservolumen nach Ablauf einer vollen Tide vom Startpunkt entfernt hat. Die Reststromwege kennzeichnen mit anderen Worten also die Netto-Verlagerung von Wasser über eine Tide. Sie besitzen eine Größe und eine Richtung. Gelangt ein Wasservolumen mit Ablauf einer Tide genau wieder an seinen Ausgangspunkt zurück, ist der Reststromweg $\vec{r} = 0$. Durch die Tidedauer (ca. 44.700 s) dividiert lassen sich die Reststromwege auch als Reststromgeschwindigkeiten ausdrücken.

Zur Berechnung von Reststromwegen stehen zwei Betrachtungsweisen zur Verfügung:

1. Die Betrachtungsweise nach EULER und
2. die Betrachtungsweise nach LAGRANGE.

2.2 EULER – Reststromwege

EULER-Reststromwege werden für eine (oder mehrere) festgehaltene Stellen über den Zeitraum einer vollen Tide berechnet. Hierzu wird die Tide in eine Anzahl gleicher Zeitintervalle zerlegt. Für jedes Intervall wird die mittlere Geschwindigkeit v mit der Länge des Zeitintervalls Δt multipliziert, wodurch sich ein

$$\text{Stromweg } \vec{s} = \vec{v} \cdot \Delta t$$

ergibt. Die vektorielle Addition aller Stromwege über die gesamte Tide führt auf den EULERSchen Reststromweg \vec{r} . Abb. 1 zeigt den Berechnungsweg an einem einfachen Beispiel. Hier wurde die Tide vereinfacht in vier Zeitintervalle aufgeteilt, und die mittleren Strömungen \vec{v}_i wurden über die Intervalle $i = 1$ bis 4 berechnet. Auf der Abbildung links sind die vier zugehörigen Stromwege $\vec{s}_i = \vec{v}_i \cdot \Delta t$ zu sehen. Die vektorielle Addition der einzelnen Stromwege endet im Beispiel nicht im Ausgangspunkt. Es existiert also ein Reststromweg \vec{r} (rechtes Bild). Bemerkenswert an diesem Verfahren ist, dass nur die Strömungsverhältnisse des Ausgangspunktes betrachtet wurden und das Strömungsklima der Nachbargebiete ohne Einfluss auf das Ergebnis bleibt. Nur die Strömungen am Auswertepunkt selbst gehen in das Ergebnis ein. Bei zyklisch wiederholten Tiden gelangt man unabhängig davon, zu welchem Tidezeitpunkt man die Berechnung beginnt, immer zu dem gleichen Ergebnis (im Gegensatz zu den LAGRANGESchen Restströmen, s.u.). Abb. 2 zeigt beispielhaft berechnete EULERSche Reststromwege für einen Ausschnitt aus der Deutschen Bucht.

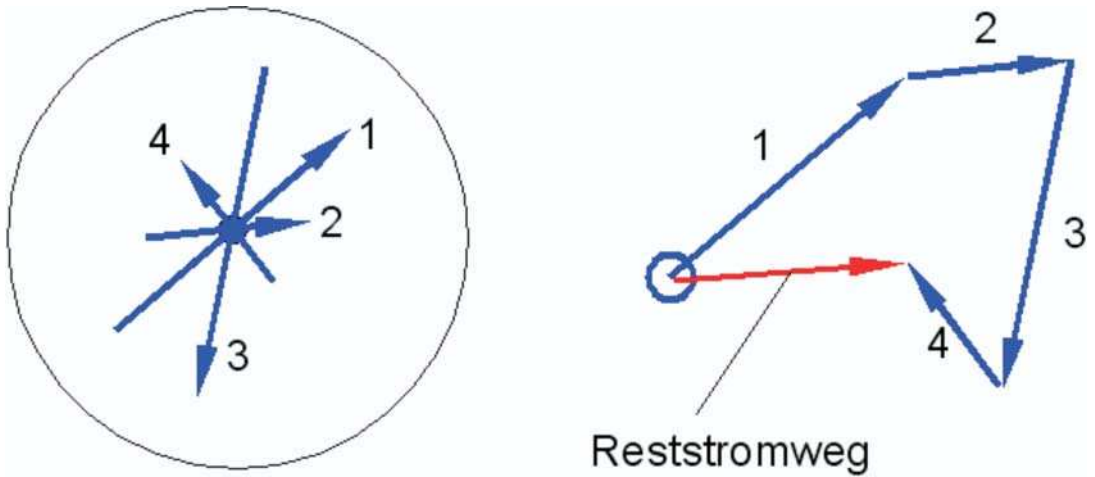


Abb. 1: Zur Definition EULERScher Restströme (links: Stromwege aus einer beispielhaft in vier Zeitintervalle unterteilten Tide, rechts: aus der Vektoraddition ergibt sich der Reststromweg)

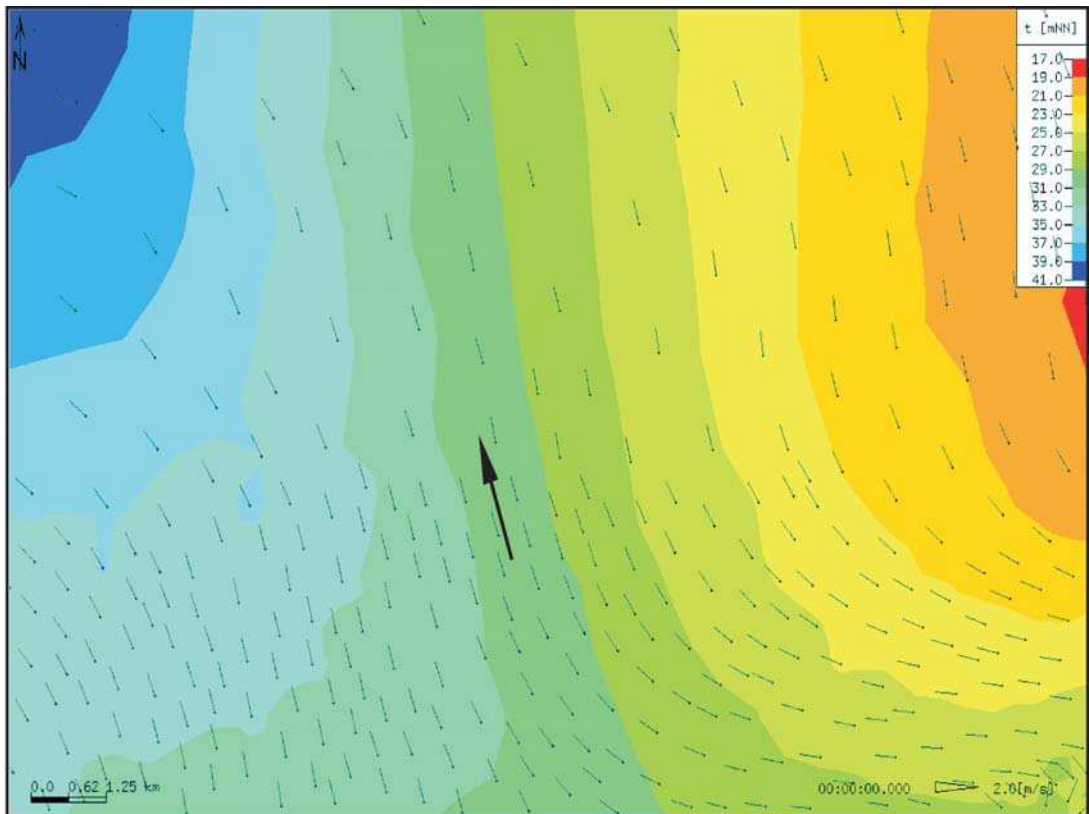


Abb. 2: Beispiel für berechnete EULER-Reststromwege in einem Ausschnitt der Deutschen Bucht (Hintergrund: Isoflächen der Sohlage)

2.3 L A G R A N G E – R e s t s t r o m w e g e

Die Stromwege werden bei diesem Verfahren nicht am selben Punkt ermittelt, sondern man verfolgt die Bahn eines Treibkörpers, der sich vom Startpunkt aus mit den Strömungen des Gebietes, das er gerade durchschwimmt, bewegt. Die Entfernung zwischen Start- und Endpunkt ist der Langrange'sche Reststromweg \vec{r} . Abb. 3 gibt für den gleichen Tidezyklus innerhalb des Beispielgebietes eine solche Schwimmerbahn wieder. Man erkennt, dass der LAGRANGE-Reststromweg in eine gänzlich andere Richtung zeigt als die EULER-Reststromwege auf Abb. 2. Wiederholt man die Berechnung für andere Startzeitpunkte, erhält man wahrscheinlich (jedoch nicht zwingend) unterschiedliche Endpunkte der jeweiligen Schwimmerbahnen. Das liegt daran, dass die Schwimmer Gebiete mit unterschiedlichem Strömungsklima durchschwimmen. Der mittlere Versatz (= mittlerer Reststromweg) ergibt sich als Mittelwert der verschiedenen Reststromwege über eine Tide. Abb. 4 und 5 zeigen hierzu beispielhaft verschiedene Schwimmerbahnen über eine Tide, die sich um jeweils eine Stunde im Startzeitpunkt unterscheiden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind diese auf zwei Abbildungen verteilt dargestellt. Der mittlere Reststromweg, der sich aus dieser Betrachtung ergibt, zeigt in südliche Richtung, während der EULER-Reststromweg an der gleichen Auswerteposition in nördliche Richtung weist. Ein zusätzliches Resultat der stündlich am selben Startpunkt ausgesetzten Schwimmerbahnen ist ein Aufschluss über das Gebiet, über das das Wasser vom betrachteten Startpunkt verteilt wird, erkennbar am Streugebiet der Bahn-Endpunkte.

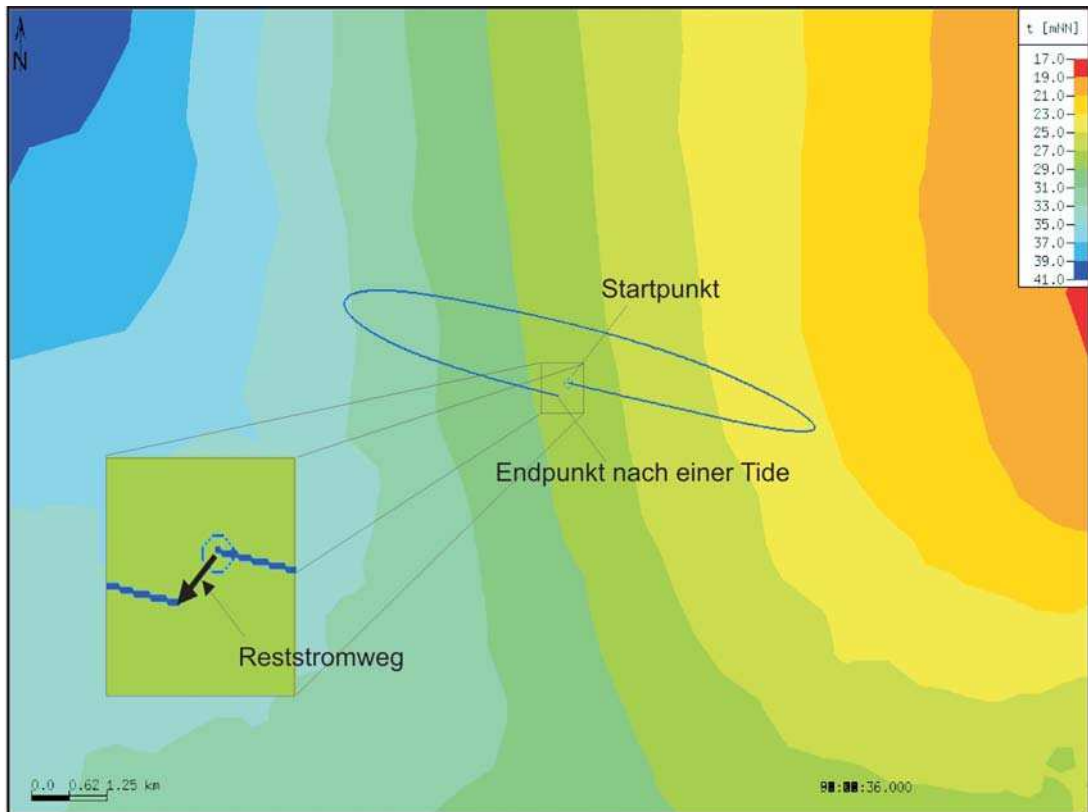


Abb. 3: Berechnete Schwimmerbahn als Beispiel für einen LAGRANGE-Reststromweg im gleichen Gebiet wie Abb. 2

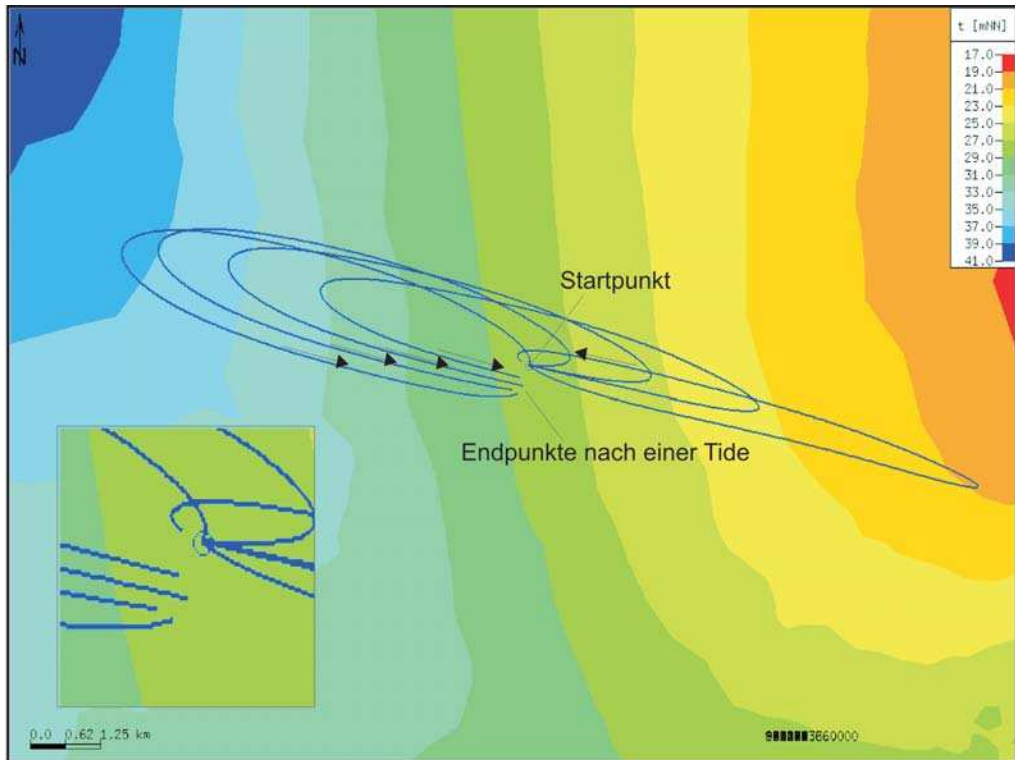


Abb. 4: Bei Flutstrom in stündlichem Abstand gestartete Schwimmerbahnen

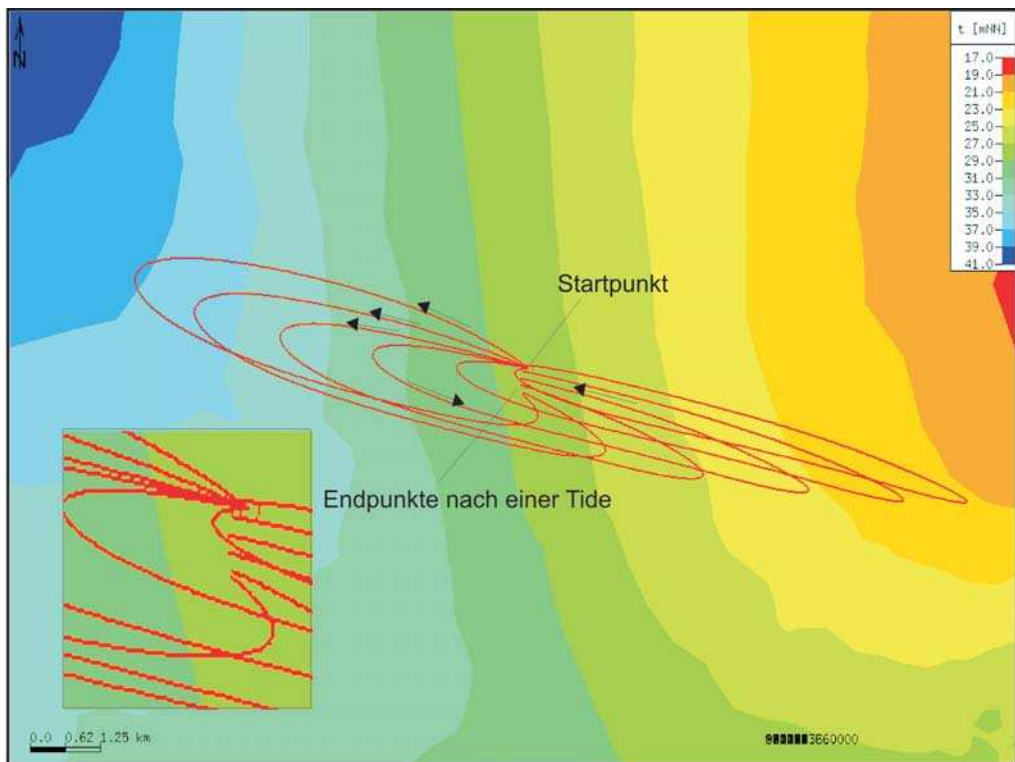


Abb. 5: Bei Ebbestrom in stündlichem Abstand gestartete Schwimmerbahnen

2.4 Zwischenbewertung bezüglich des Versatzes von Wasservolumina

Wie man erkennt, können sich je nach Art des gewählten Verfahrens bereits bei einer zyklisch wiederholten Tide gänzlich unterschiedliche Reststromwege ergeben. Das liegt, wie man den Abbildungen entnehmen kann, an der räumlichen Variabilität des Strömungsgebietes. Da die EULER-Betrachtung diese Variabilität aber nicht „kennt“, da sie ja ausschließlich die Strömungen am Auswertepunkt berücksichtigt, wird klar, dass

1. EULER-Restströme und LAGRANGE-Restströme nur in räumlich nicht variablen Strömungen zu gleichen Ergebnissen gelangen, und dass
2. in allen anderen Fällen die Ergebnisse einer EULER-Reststromberechnung mehr oder weniger falsch sind.

3. Anwendung von Resttransport-Betrachtungen auf Sedimentbewegungen

3.1 Einfluss der Transporteigenschaften von Sediment

Sedimente setzen sich zu Zeiten geringerer Strömungsstärken ab und werden mit steigenden Strömungsgeschwindigkeiten wieder aufgenommen. Reststromberechnungen wie vorstehend beschrieben gelten daher nur für Wasser und den Versatz von im Wasser schwerelos gelösten Stoffen.

Die Anwendung von Reststrombetrachtungen auf bewegte Sedimente führt auf zusätzliche Schwierigkeiten, denn die Sedimente werden teilweise in überwiegendem Kontakt mit der Sohle als Geschiebe mit reduzierter Geschwindigkeit verfrachtet, aber je nach Korngröße auch zu erheblichen Teilen aufgewirbelt und dann mit dem Wasserkörper bewegt. Zwischen beiden Transportphasen besteht ein ständiger Austausch, der mit den Strömungsgeschwindigkeiten während der Tide veränderlich ist. Auch der Anteil beider Transportarten am Gesamttransport ist mit der Strömungsstärke variabel.

Diese und weitere hier nicht erwähnte Phänomene lassen sich nur in rückgekoppelten hydrodynamisch-morphodynamisch-numerischen Modellen erfassen. Wegen des damit verbundenen Aufwandes scheint es für manche Fragestellungen wie z.B. nach der Transportrichtung naheliegend, vereinfachend Resttransportwege oder Resttransportkapazitäten zu berechnen. Dieser Weg scheitert aber daran, dass sich die Richtungen der Resttransporte für Geschiebe und suspendierte Sedimente sehr unterscheiden (können) und dass sich die Resttransportwege beider Transportarten intern nochmals je nach kritischer Geschwindigkeit unterscheiden. Somit erhält man eine große Spannbreite von Ergebnissen, für die Interpretationen nötig werden. Da Interpretationen aber zu neuen Unsicherheiten führen können, sind Resttransportergebnisse bereits für die Abschätzung der Transportrichtungen sehr problematisch, von Abschätzungen der Sedimentbilanz ganz zu schweigen. Dies wird nachfolgend gezeigt. Es ist außerdem praktisch unmöglich, die effektive kritische Geschwindigkeit für den Suspensionstransport anzugeben, weil in diese auch noch die Raten an sich absetzenden und vom Boden wieder aufgenommenen Sedimentmengen eingehen.

Das Transportverhalten von Sedimenten am Boden wird durch deren kritische Geschwindigkeit v_{krit} gekennzeichnet, unterhalb derer das Sediment gar nicht beweglich ist. Die Transportbahnen von Sedimenten sind daher stets kürzer als die der reinen Wasservolumina

und verlaufen typischerweise auch anders. Da Sedimente je nach Korngröße unterschiedliche kritische Geschwindigkeiten besitzen, sind auch die Transportwege verschiedener Sedimentklassen unterschiedlich.

In der Natur steigt (und fällt) die transportierte Sedimentmenge etwa mit der 3,5ten bis 4ten Potenz der Differenz von $(v-v_{krit.})$. Dies lässt sich bei Berechnungen der LAGRANGE- Resttransportwege nur schwer umsetzen, da die Transportkapazität entlang des Weges steigt und fällt, was einem zeitweise an Volumen zunehmendem oder abnehmendem verfolgten Wasservolumen entspräche. Numerisch ließe sich die Berechnung der Resttransportkapazitäten zwar lösen; aber bereits unter Rücksicht auf die oben geschilderten Schwierigkeiten mit Reststromwegen bei reinem Wasser wären das eher unbeholfene Umgehungen von morphodynamischen Modellen, welche heutzutage den Stand der Technik darstellen und vielfach zur Lösung von Ingenieurproblem in der Praxis eingesetzt werden.

Um die Auswirkungen der Berücksichtigung einer kritischen Geschwindigkeit generell zu veranschaulichen, sind beispielhafte Berechnungen geeignet, bei denen lediglich $(v-v_{krit.})$ ohne höhere Potenzen berücksichtigt wurde. Abb. 6 zeigt hierzu beispielhaft eine Transportbahn im gleichen Fenster wie die vorstehenden Schwimmerbahnen (Abb. 4 u. 5). Die Resttransportwege sind, wie schon erwähnt, typischerweise kürzer als die Reststromwege, weshalb in Abb. 7 weitere Resttransportwege in einer „Nahaufnahme“ verdeutlicht sind.

Der zeitliche Abstand der Bahnen beträgt hier 3 Stunden, weil bei einstündigem Zeitabstand, wie bei den obigen Bildern, die Erkennbarkeit der einzelnen Bahnen verlorengeht. Im

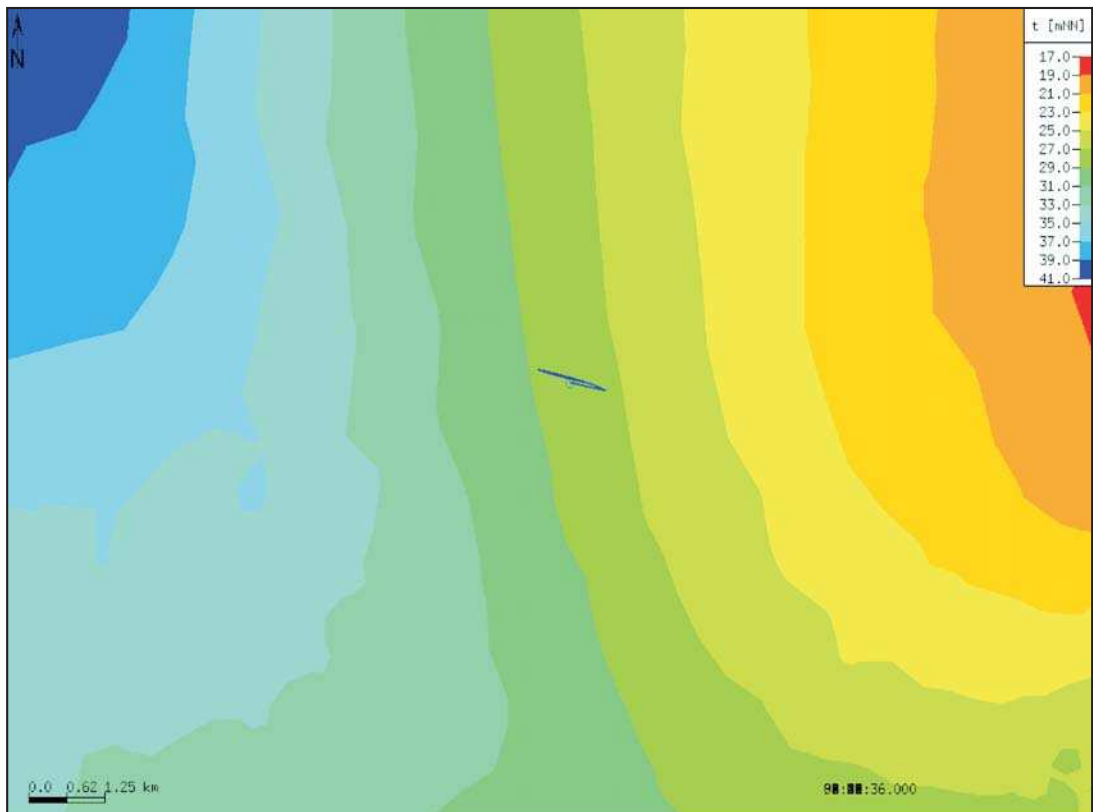


Abb. 6: Transportbahn des Teilchens aus Abb. 3 bei Berücksichtigung einer kritischen Geschwindigkeit ($v_{krit.} = 0,24 \text{ m/s}$)

Ergebnis zeigt sich durch die kritischen Geschwindigkeiten eine wiederum gänzlich andere Richtung der Resttransportwege: sie zeigen hier nach West. Die wirklichen Transportwege unter Berücksichtigung höherer Potenzen können nochmals andere Richtungen aufweisen.

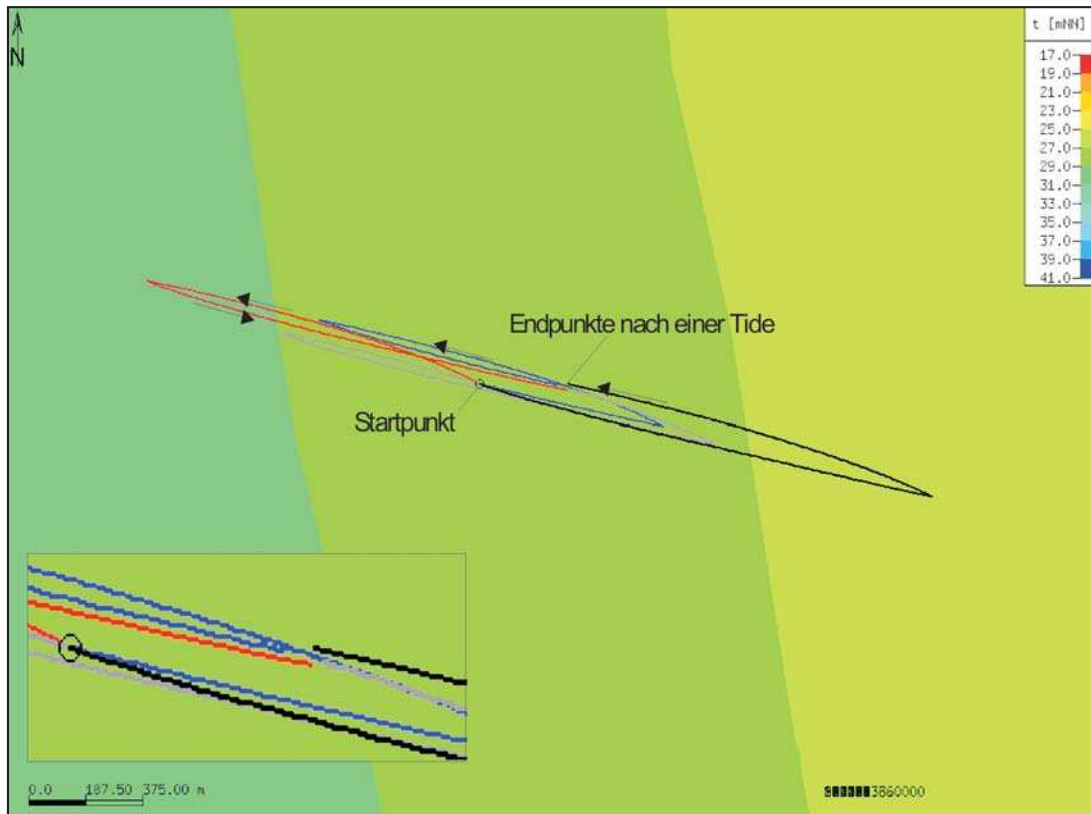


Abb. 7: Nahaufnahme aus Abb. 6 mit mehreren Transportbahnen bei $v_{\text{krit}} = 0,24 \text{ m/s}$ (zeitlicher Versatz am Start: 3 Stunden)

3.2 Beispiel zum Einfluss der Korngröße auf die Transportwege

Die kritische Geschwindigkeit wird einerseits beim bodennahen Transport (bed load, Geschiebe) wirksam und steuert andererseits den Zeitpunkt der Wiederaufnahme des Sediments in den fließenden Wasserkörper, mit dem es dann verfrachtet wird.

Die Abb. 8 und 9 geben als Ausschnittsvergrößerungen (vgl. hierzu die Maßstäbe auf den Abb.) grundsätzlichen Aufschluss über die Wirkung unterschiedlicher kritischer Geschwindigkeiten.

Es zeigt sich in diesem Beispiel, dass die in Abb. 8 berechneten Resttransportrichtungen je nach kritischer Geschwindigkeit sogar in entgegengesetzte Richtungen zeigen (einige enden südlich des Startpunktes, andere enden nördlich).

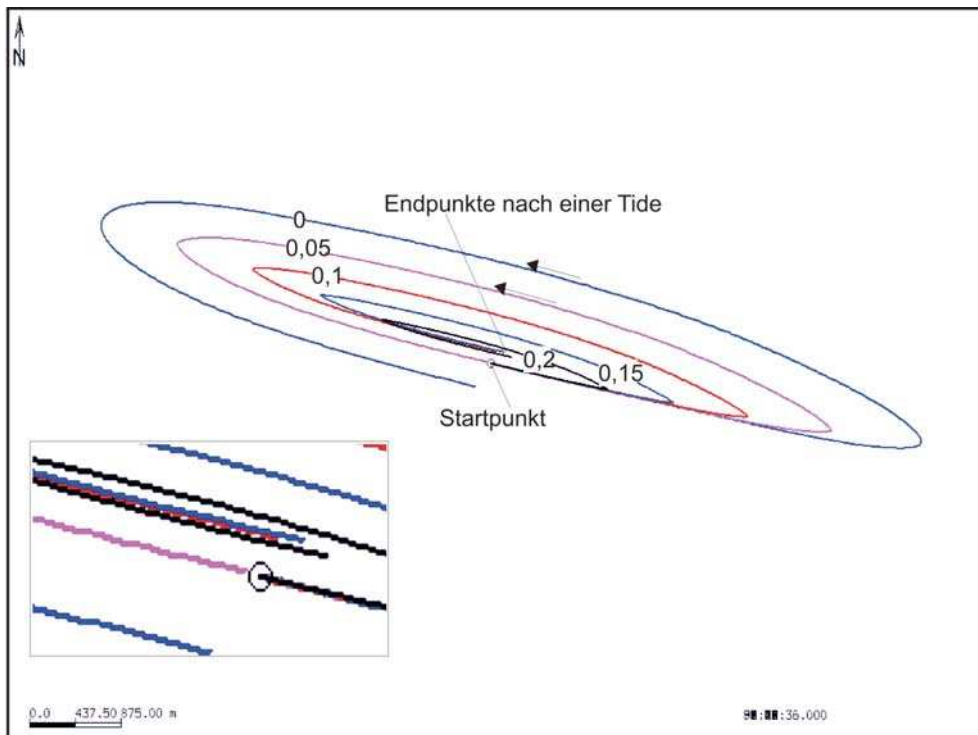


Abb. 8: Einfluss einer kritischen Geschwindigkeit auf die Resttransportwege (die Zahlen geben die angesetzten kritischen Geschwindigkeiten in m/s an.)

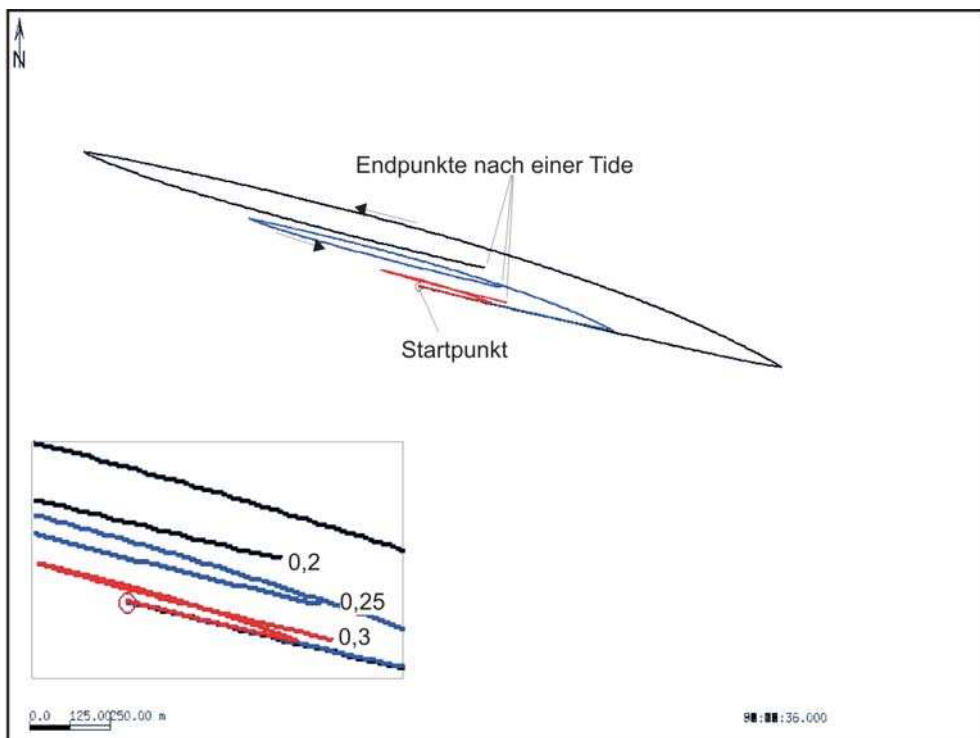


Abb. 9: Einfluss einer kritischen Geschwindigkeit auf die Resttransportwege (die Zahlen geben die angesetzten kritischen Geschwindigkeiten in m/s an.)

3.3 Sonderfall der EULER-Betrachtung bei Sediment-Resttransportrichtungen

Für die Wasserströmungen war gezeigt worden, dass EULER- und LAGRANGE-Reststromwege sich erheblich unterscheiden können. Als Grund hierfür konnte gezeigt werden, dass die „Erfahrungen“, die ein Schwimmkörper auf seinem Weg macht, vom momentanen lokalen Strömungsklima abhängt, das anders sein kann als dasjenige am Auswertepunkt bzw. am Startpunkt. Die EULER-Betrachtung berücksichtigt dies nicht.

Weil aber die Transportbahnen insbesondere der Geschiebebewegung mit steigendem v_{krit} sehr viel kürzer sind als die Bahnen des Wassers (Abb. 8), wird der Fehler der EULER-Betrachtung gegenüber der LAGRANGE-Betrachtung wieder kleiner: Die nahen Nachbargebiete haben ein ähnliches Strömungsklima wie der Auswertepunkt.

4. Zusammenfassende Bewertung

Die Reststromwege für Wasser und im Wasser gelöste Stoffe unterscheiden sich je nach Wahl der Berechnungsmethode (EULER-Betrachtung oder LAGRANGE-Betrachtung) gegebenenfalls erheblich. Tidegemittelte Langrange-Reststromwege liefern realitätsnähere Aussagen als die einfacher zu gewinnenden und daher meist benutzten EULER-Reststromwege.

Sedimente besitzen eine Sinkgeschwindigkeit und eine kritische Geschwindigkeit. Die Sediment-Transportwege lassen sich daher durch Wasser-Reststromwege nicht beschreiben.

Festzuhalten sind als Ergebnis dieser Studie mithin folgende Aussagen:

1. EULERSche Reststromwege sind in den Tidegebieten selbst für Aussagen zur Netto-Wasserbewegung unbrauchbar, da sie das Strömungsklima der benachbarten Bereiche nicht berücksichtigen und dieses Strömungsklima typischerweise örtlich variiert.
2. Über eine Tide (oder einen Spring-Nippzyklus) gemittelte LAGRANGE-Reststromwege sind für Aussagen zur Wasser-Netto-Verlagerung brauchbar.
3. Beide Verfahren können daher je nach Örtlichkeit unterschiedlich divergierende Ergebnisse liefern.
4. Resttransportrichtungen von Sedimenten können in wiederum andere Richtungen zeigen als diejenigen des Wassers und der im Wasser gelösten Stoffe und sind
5. weiterhin auch noch je nach kritischer Geschwindigkeit (also je nach Kornklasse) unterschiedlich.

Nicht unerwähnt bleiben darf, dass

6. die suspendiert bewegten Sedimente je nach Sinkgeschwindigkeit unterschiedlich auf die kritische Geschwindigkeit reagieren (feinere verhalten sich eher wie das Wasser, gröbere eher wie die Geschiebe) weshalb
7. die Netto-Transportrichtungen von suspendiertem Sediment und Geschiebetransport divergieren können.

Änderungen der Tideverhältnisse beim Übergang von Spring- zu Nipptiden (fallender Tidehub) und umgekehrt haben weitere Einflüsse auf die Ergebnisse von Restbetrachtungen.

Es ist daher irreführend und falsch, selbst hilfweise für Überschlagsberechnungen Reststromüberlegungen für Aussagen zu Sedimentbewegungen im Tidegebiet heranzuziehen. Hierfür sind allein morphodynamische Modelle geeignet, die die Verfrachtung unter-

schiedlicher Sedimente je nach ihren momentanen und lokalen Transporteigenschaften unter einem instationären und räumlich variablen Strömungsgeschehen realitätsnah wiedergeben.

4. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- FÜHRBÖTER, A.: Deutsche Forschungsgemeinschaft: Sandbewegung im Küstenraum. Rückschau, Ergebnisse und Ausblick. Harald-Boldt-Verlag, 1979.
- GÖHREN, H.: Gegenläufige Restströmungen im Küstenmeer zwischen Amrum und Knechtsand und ihr Einfluss auf die Sandbewegung. In: Deutsche Forschungsgemeinschaft: Sandbewegung im Küstenraum. Harald-Boldt-Verlag, 1979.
- ZANKE, U. C. E.: Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer. Parey-Verlag, Berlin, 2002.