

# 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  $\Delta t$  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.

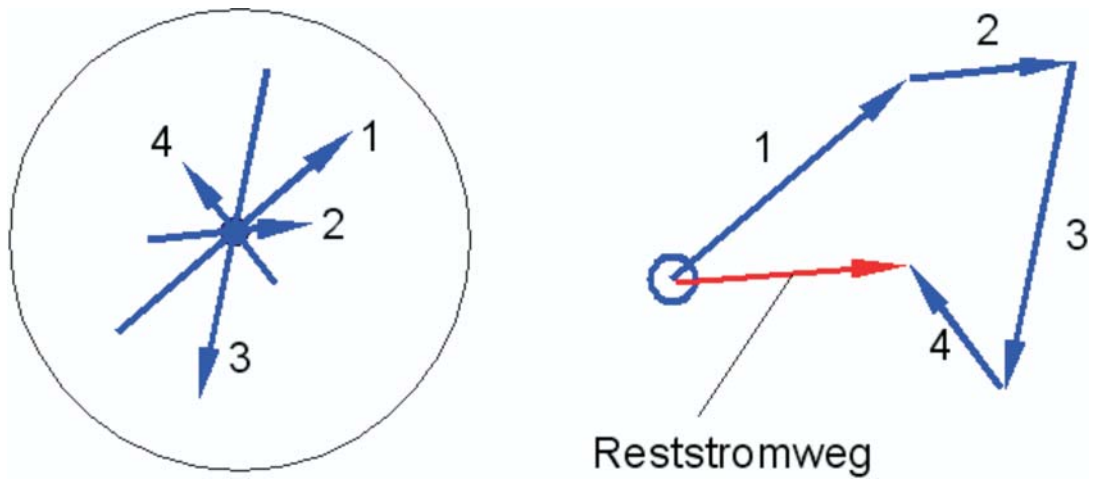


Abb. 1: Zur Definition EULERScher Restströme (links: Stromwege aus einer beispielhaft in vier Zeitintervalle unterteilten Tide, rechts: aus der Vektoraddition ergibt sich der Reststromweg)

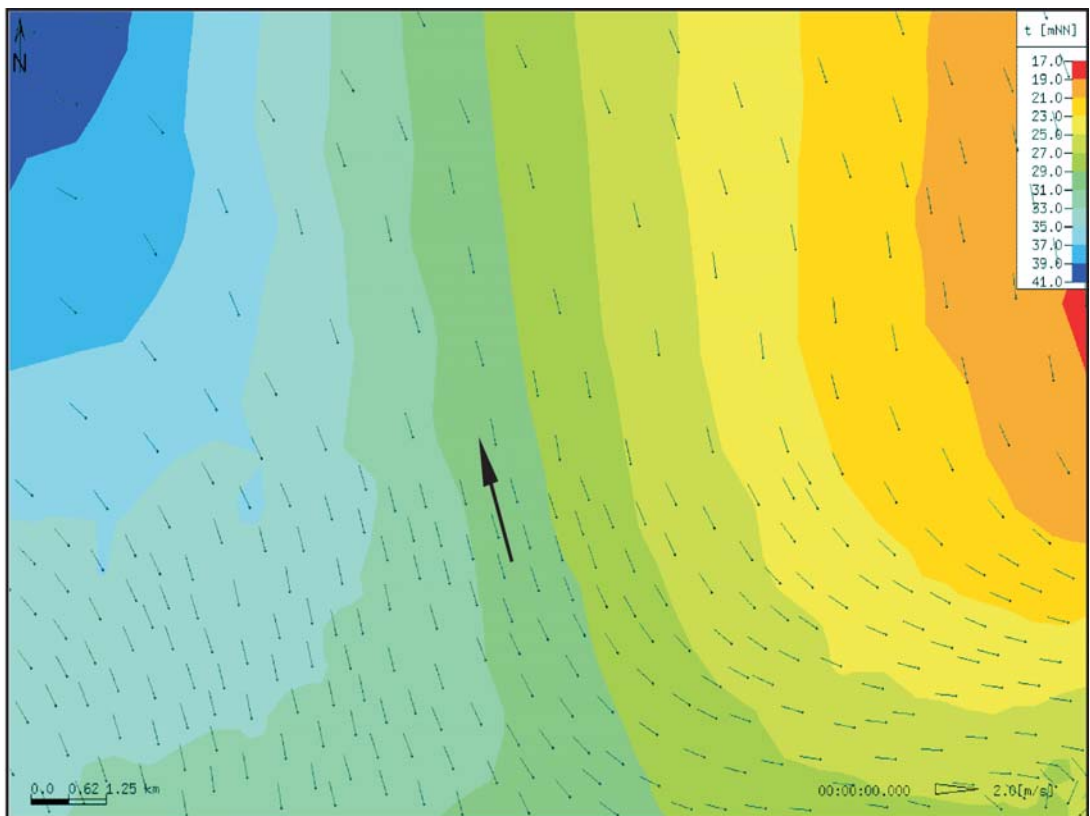


Abb. 2: Beispiel für berechnete EULER-Reststromwege in einem Ausschnitt der Deutschen Bucht (Hintergrund: Isoflächen der Sohlage)

### 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 Lagrange'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.

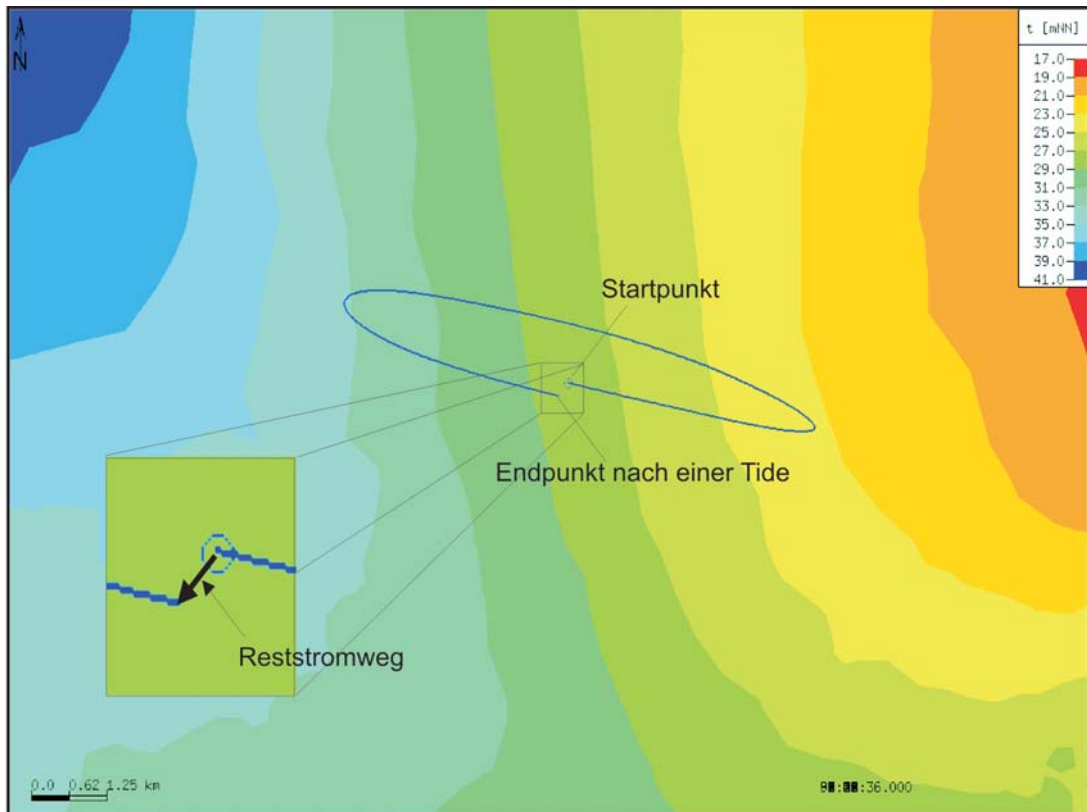


Abb. 3: Berechnete Schwimmerbahn als Beispiel für einen LAGRANGE-Reststromweg im gleichen Gebiet wie Abb. 2

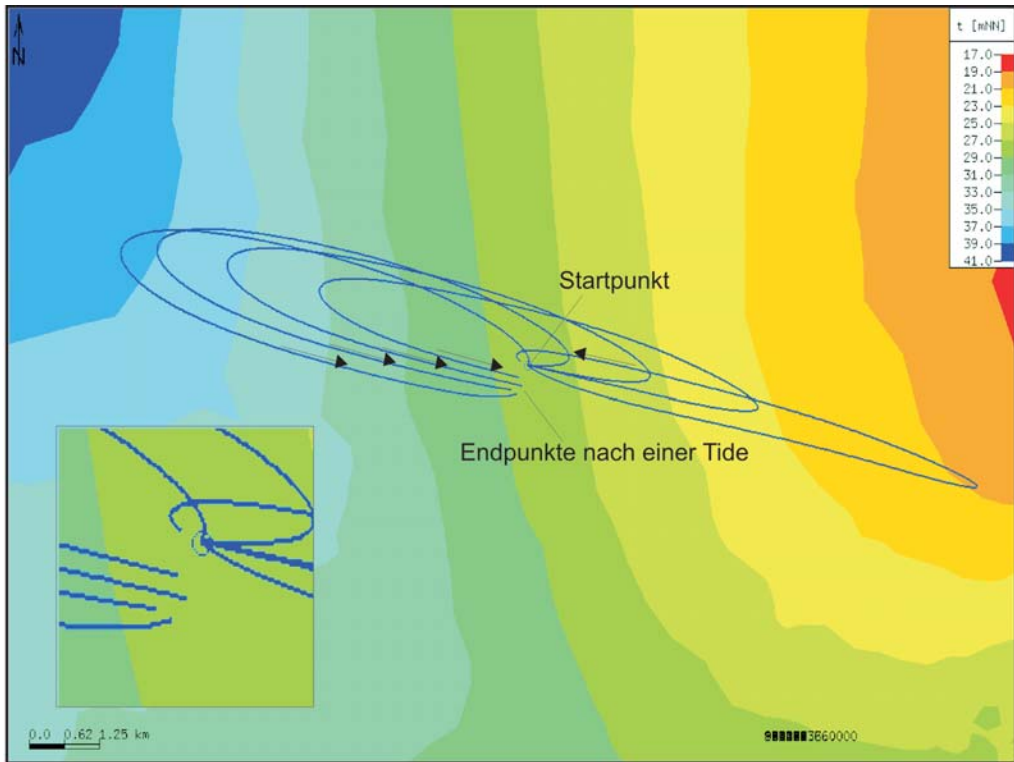


Abb. 4: Bei Flutstrom in stündlichem Abstand gestartete Schwimmerbahnen

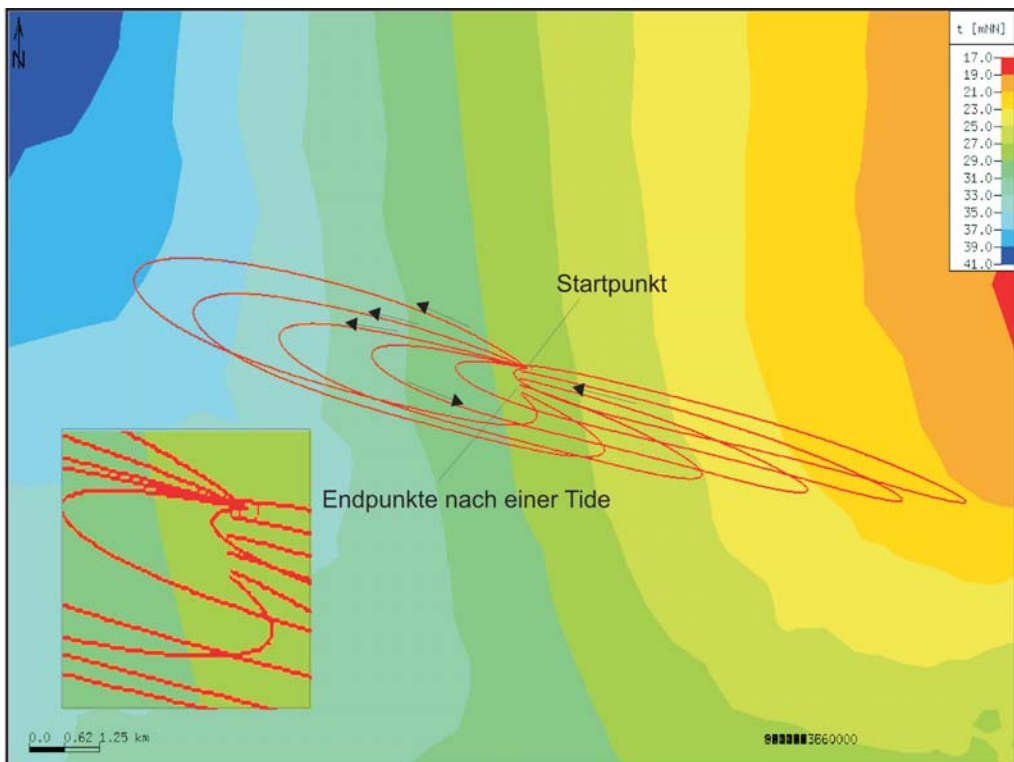


Abb. 5: Bei Ebbestrom in stündlichem Abstand gestartete Schwimmerbahnen

## 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  $v_{\text{krit}}$  gekennzeichnet, unterhalb derer das Sediment gar nicht beweglich ist. Die Transportbahnen von Sedimenten sind daher stets kürzer als die der reinen Wasservolumina











