## Sediment-Transport in einem Seeschiffahrtskanal

Von Ulrich Plate und Georg-Wilhelm Keil

Wenn ein Schiff durch einen Kanal fährt, verursacht es eine Rückströmung des Wassers, die bei entsprechender Größe die Sohle und die Unterwasserböschungen angreift. Besteht der anstehende Boden aus Sand, kann die ständige Erosion auf die Dauer zum Zusammenbruch der Uferböschungen führen. In diesem Aufsatz wird versucht, einige der Parameter aufzuzeigen, die diesen Erosionsvorgang beherrschen.



Abb. 1. Schiffsdurchgänge in Tausend

Bei dem Kanal handelt es sich um den Nord-Ostsee-Kanal (NOK), der der Schiffahrt den Weg um Skagen erspart. Seine Querschnittsabmessungen waren bis vor kurzem: Sohlenbreite 44 m, Wasserspiegelbreite 102 m, Wassertiefe 11 m und eine Neigung der Unterwasserböschungen von 1:3. Voll abgeladen können Schiffe bis ungefähr 13 000 BRT den Kanal befahren.

Die Böschungserosion wurde zu einem ernsten Problem, das den Bestand des Kanals bedrohte, als seit 1955 der Verkehr auf dem Kanal steil zunahm.

In gleichem Maße nahm der Umfang der jährlich erforderlichen Unterhaltungsbaggerungen von der Kanalsohle zu.

Das Material, das die Sohle immer wieder aufhöhte und weggebaggert werden mußte, konnte nur von den Unterwasserböschungen kommen, die dadurch ständig steiler wurden, bis ihre Standsicherheit überschritten war und sich große Böschungsrutschungen einstellten.

Mit der Zunahme des Verkehrs und insbesondere der Größe der Schiffe war das Gleichgewicht gestört worden, das sich im Laufe der Zeit zwischen dem Kanalprofil und der Erosionswirkung der Rückströmung auf Sohle und Böschungen eingestellt hatte. Um genaue Kenntnis



Abb. 3 Beispiel einer Böchungs-

rutschung

vom Ausmaß der Schäden zu erhalten, wurde das vorhandene Profil des Kanales mit Hilfe von Echolotpeilungen, Handpeilungen und Tauchern untersucht.

Abbildung 4 zeigt einige typische Profile. Durch diese Profilaufnahmen gewann man Einblick in die Morphologie der Kanalsohle. Abhängig von Linienführung, Wassertiefe und Sohlenbreite des Kanals stellen sich vier verschiedene Sohlenformen ein.

- 1. Auf der geraden Strecke mit Normalprofil bilden sich an beiden Böschungsfüßen in Kanallängsrichtung tiefe Rinnen aus. Eine dritte in Kanalmitte – ausgewaschen durch den Propellerstrahl tiefgehender Schiffe - ist zu beiden Seiten eingefaßt von bis zu 1,5 m hohen Rücken.
- 2. Bei 2 m größerer Wassertiefe, aber sonst gleichen Verhältnissen wie unter 1 treten die Rinnen am Fuß der Böschungen auch auf. Die Mittelrinne dagegen fehlt. Statt dessen bildet sich

hier auf ganzer Sohlenbreite ein Sandrücken mit hohem Feinkornanteil aus. In den Rinnen steht gröberes Material an.

- 3. In einer Kanalkurve mit Normalprofil findet sich am Fuß der Außenböschung eine übertiefe Rinne, weil hier die erodierende Wirkung des Schraubenstrahles der mit dem Heck an der Außenböschung entlangdriftenden Schiffe die rinnenbildende Erosion der Rückströmung verstärkt.
- 4. Bei genügend großer Kanalbreite treten weder Rinnen noch Rücken auf, sondern es stellt sich ein Muldenprofil ein.

Die Profile 1 bis 3 sind "Erosionsprofile"; Profil 4 kann als "Gleichgewichtsprofil" bezeichnet werden.

Um die Mechanik des Erosionsvorganges zu erkunden, wurde als erstes die Frage zu beantworten versucht, welchen Schleppspannungen bzw. Wasserfließgeschwindigkeiten der anstehende Boden – ein gleichförmiger Sand mit mittlerem Korndurchmesser von 0,53 mm – noch widerstehen kann. Die bekannten, theoretisch abgeleiteten Geschiebetransportformeln von WHITE, SHIELDS, KREY, MEYER-PETER/MÜLLER und das nach in der Natur gemessenen Werten aufgestellte Diagramm von LANE ergeben die folgenden Werte:

au crit		v crit	
White	45 g/m <sup>2</sup>		
Shields	39 g/m²	50 g/m <sup>2</sup> $\cong$ 0,22 m/s	
Krey	66 g/m <sup>2</sup>		
Meyer-Peter und Müller	$41 \text{ g/m}^2$		
Lane	90–150 g/m <sup>2</sup>		



Abb. 4 Zustand der Unterwasserböschungen mit eingezeichnetem Sollprofil 62

Im NOK jedoch treten mittlere Rückstromgeschwindigkeiten von über 2 m/s auf, die den oberen Werten zufolge zehnmal so groß sind wie die für den anstehenden Sand kritischen; die auftretenden Schleppspannungen werden damit hundertmal so groß wie die kritischen.

Die mittlere Rückstromgeschwindigkeit aber ist ein zu allgemeiner Parameter, um den Erosionsvorgang erschöpfend zu beschreiben. Mehr Einblick gewinnt man, wenn man die



vertikale Geschwindigkeitsverteilung der Rückströmung betrachtet, wie sie mit Hilfe von 10 Geschwindigkeitsmessern, die an einer Stange übereinander montiert waren, auf der Böschung gemessen wurde.

In Abbildung 5 ist das gemessene Geschwindigkeitsprofil aufgezeichnet. Es zeigt überhaupt keine Ähnlichkeit mit der strichiert dargestellten logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung einer gleichförmigen stationären Strömung, auf der alle oben erwähnten Geschiebetransportformeln aufgebaut sind. Die vertikale Geschwindigkeitsverteilung der Rückströmung ist eher die einer Strömung, die gerade im Entstehen begriffen ist. Der Unterschied dieses scharfen, nahezu rechteckigen Geschwindigkeitsprofils mit seinen hohen Werten am Boden im Vergleich zu der logarithmischen Verteilung der gleichförmig stationären Strömung ist offenbar, und demzufolge muß die auf die Unterwasserböschungen wirkende tatsächliche Schleppspannung größer sein, als der in die Geschiebetransportformeln eingehende Mittelwert der Rückstromgeschwindigkeit angibt. Wenn die Rückströmung ein länger andauernder Vorgang wäre, wenn sie mehr Zeit zum "Ausreifen" hätte, würde sie sich von der auf ganzer Wassertiefe beschleunigten instationären Bewegung in eine gleichförmige stationäre mit logarithmischer Geschwindigkeitsverteilung umwandeln, indem die hohen Geschwindigkeiten am Boden durch Reibung abgebaut würden.

Abbildung 5 zeigt auch das Maß an Beschleunigung, dem die Rückströmung unterliegt. Innerhalb von 30 Sekunden wird in diesem Fall eine Geschwindigkeit von 2,16 m/s erreicht und innerhalb weiterer 20 Sekunden diese wieder auf 0,28 m/sec verzögert.

Der Absunk des Wasserspiegels während dieser kurzen Zeit ist eine weitere Größe von Einfluß auf die Böschungserosion, da er momentan auf ganzer Böschungshöhe einen in den Kanal gerichteten Strömungsdruck auf das Böschungsmaterial hervorruft, der es der Schleppkraft erleichtert, die einzelnen Körner aus ihrer Lagerung zu lösen.

Nachdem eben die vertikale Geschwindigkeitsverteilung der Rückströmung diskutiert wurde, zeigt Abbildung 6 ihre horizontale Verteilung, gemessen 25 cm über Sohle bzw. Böschungen. Dieses Geschwindigkeitsmuster schleppt das Schiff bei seiner Fahrt durch den Kanal ständig mit sich. Für eine bestimmte Stelle auf der Böschung oder der Sohle, über die das Schiff gerade hinwegfährt, sind das die momentanen Werte der Rückstromgeschwindigkeiten.

Diese Darstellung zeigt eindrucksvoll den zeitlichen Ablauf der Rückströmung. Drei Zonen können unterschieden werden: die Beschleunigungszone, die Zone gleichförmiger Bewegung und die Verzögerungszone. Bei mittleren Schiffsgeschwindigkeiten dauern diese Fließzustände ungefähr gleich lange an. Erhöht sich die Schiffsgeschwindigkeit, so verlängert sich die Beschleunigungszone auf Kosten der Dauer der gleichförmigen Bewegung, während die Verzögerungszone gleich bleibt.

Ebenso zeigt Abbildung 6 deutlich, daß auch der Maximalwert der Rückstromgeschwindigkeit allein kein geeigneter Parameter ist, um die von der Rückströmung auf Sohle und Böschungen ausgehende erodierende Wirkung erschöpfend zu beschreiben, da er nur eine kurzzeitig auftretende Größe in einem instationären Vorgang ist. Die Beschleunigung scheint hier vielmehr derjenige Parameter zu sein, der die Erosion beherrscht und daher in eine allgemeine Theorie der Erosion infolge Rückströmung eingehen sollte.

Da diese Theorie aber noch nicht existierte, mußten wir zugeben, daß das Problem zu komplex war, um es rein theoretisch behandeln zu können.

Es wurden daher Modellversuche bei der SOGREAH in Grenoble, Frankreich, durchgeführt mit dem Ziel, herauszufinden, wie groß der Kanalquerschnitt sein muß, damit die Erosion auf ein erträgliches Maß reduziert wird.



Abb. 6. Momentane horizontale Geschwindigkeitsverteilung der Rückströmung auf Sohle und Böschungen

64

Der erosionsaktive Anteil am Gesamtverkehr des Kanals wurde auf 3 Schiffsgrößen schematisiert, T1 mit 26 000 t Wasserverdrängung, T2 mit 16 000 t und T3 mit 10 000 t, und im Geschiebemodell 1:25 über eine 75 m lange Versuchsstrecke mit Geschwindigkeiten geschleppt, die denen in der Natur von 10 bis 17 km/h entsprachen.

Bei einer im Modell vorgenommenen Verbreiterung der Sohle um 51 m auf 95 m, was für den größten Schiffstyp T1 ein Querschnittsverhältnis  $\left(\frac{\text{Kanalquerschnittsfläche}}{\text{Schiffsquerschnittsfläche}}\right)$  n = 7 ergibt, war keine Böschungserosion mehr feststellbar.

Bei einer Verbreiterung der Sohle um 28 m auf 72 m, was für den Schiffstyp T2 das Querschnittsverhältnis n = 7 ergab, wird den Versuchen zufolge die Erosionsrate auf 15 % der derzeitigen Werte reduziert. Abbildung 7 zeigt die sich aus den Versuchen ergebende Abhängigkeit zwischen Sohlenbreite des Kanals und der jährlichen Böschungserosionsrate pro laufenden Meter Kanal. Aus der Forderung, daß die jährliche Erosionsrate nicht größer sein soll als rd. 1 m³/lfdm Kanal, ergibt die Kurve eine Sohlenbreite von 90 m, die bei den z. Z. laufenden Sicherungsarbeiten am NOK hergestellt wird.



Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist auch das Ergebnis eines Nebenversuches, der zur Klärung der Frage durchgeführt wurde, ob eine Querschnittsvergrößerung des jetzigen Profiles um 10 % im Hinblick auf die Verminderung der Erosion besser als Vertiefung oder als Verbreiterung ausgeführt wird. Für größere Schiffsgeschwindigkeiten (13–15 km/h) ergab sich, daß eine Verbreiterung zweckmäßiger ist als eine Vertiefung.

Im Rahmen dieser Versuche wurde als weiterer Parameter der Einfluß der Neigung der Böschung auf die Böschungserosionen untersucht. Das auf den ersten Blick erstaunliche Ergebnis ist, daß bei gleicher Querschnittsfläche steilere Böschungen weniger erodiert werden als flachere, wobei der natürliche Böschungswinkel des Materials allerdings nicht erreicht werden darf.

Abschließend wird in Abbildung 8 eine Abhängigkeit gezeigt, die man von vornherein nicht vermutet, auf die man aber bei der systematischen Auswertung der Vielzahl der im Verlauf der Versuche angefallenen Meßdaten stieß. Denkt man sich jedes der drei Typ-Schiffe T1 (26 000 t), T2 (16 000 t) und T3 (10 000 t) mit derselben Geschwindigkeit in einem eigenen Kanal fahrend, wobei das Verhältnis "n" (Kanalquerschnittsfläche) in allen drei Fällen

gleich groß sein soll, so treten den Versuchsergebnissen zufolge bei dem kleinsten Schiffstyp T3 die größten Beschleunigungen und Erosionen auf. Da der Querschnitt durch die vorausgesetzte Konstanz von "n" hierbei nicht als Veränderliche eingeht, kann der erosionsvermindernde Einfluß nur von der Schiffslänge ausgehen.



Abb. 8. Rückstromgeschwindigkeit, Beschleunigung der Rückströmung und Erosionsrate für die 3 Schiffsgrößen in Abhängigkeit von "n"