

Sedimenttransport auf geneigter Sohle (Hangabtrieb)

Univ.Prof. Dr.- Ing. habil. Ulrich Zanke

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
der Technischen Universität Darmstadt
Email: zanke@aol.com

Kurzfassung

Wenn die Sohle normal zur Strömungsrichtung gesehen ein Gefälle aufweist, verläuft der Sedimenttransport nicht genau in Richtung der Strömung, sondern wird hangabwärts verschwenkt. Die Berücksichtigung dieses Effekts ist in Morphodynamisch-Numerischen Modellen (MNM) von Bedeutung. Der Effekt wird an einem Beispiel beschrieben und Lösungsansätze werden diskutiert.

1 Einführung

Morphologische Abläufe basieren in Küstengewässern und in Binnengewässern auf den gleichen physikalischen Zusammenhängen. Die maßgebenden Größen sind

- a) die Schubspannung welche die Körner bewegt und
- b) die Turbulenz, die sie anheben und vermischen kann.

Lediglich die hydraulischen Randbedingungen unterscheiden sich in unterschiedlichen Gewässern:

- In Tidegewässern werden die Strömungen durch den rhythmischen Wechsel von Ebbe und Flut getrieben. Abhängig vom Ort und von der

Windsituation können hier auch Wellen signifikante Schubspannungen an der Sohle hervorrufen. Weiterhin können windbedingte Rezirkulationsströmungen auftreten und auch Salinitätsunterschiede können Strömungen und mithin Schubspannungen bewirken.

- In Binnengewässern wird die Schubspannung vornehmlich von der abflußbedingten Strömung hervorgerufen.

Der nachfolgend beschriebene Effekt des Hangabtriebs tritt immer auf, wenn Sediment bewegt wird, sowohl in Küstenzonen als auch in Fließgewässern des Binnenlandes.

2 Effekt und Mechanismus des Hangabtriebs

Änderungen der Morphologie werden auf der Grundlage der Sohlagen-Entwicklungsgleichung (bottom evolution equation) berechnet (s. Abb. 1).

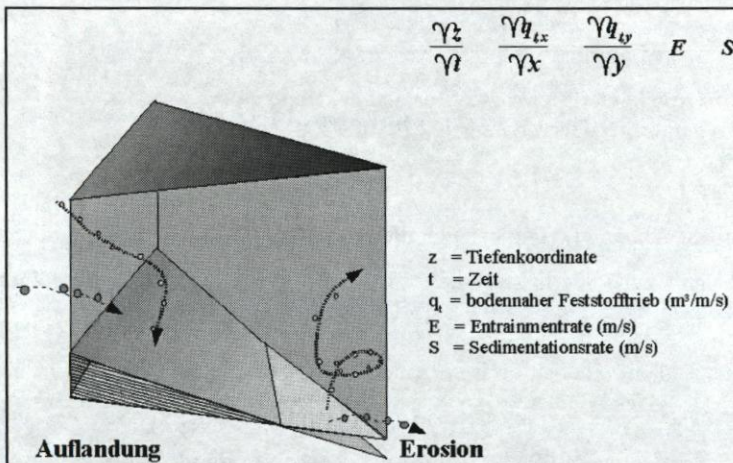


Abb. 1: Sohlagen-Entwicklungsgleichung

Um den Effekt des Hangabtriebs zu veranschaulichen, wurden Berechnungsbeispiele ausgeführt. Abb. 2 zeigt hierzu die Morphologie eines Ausschnitts aus der Elbe. Abb. 3 zeigt das gleiche Gebiet nach einiger Entwicklungszeit. Bei dieser Berechnung wurde nur die Rückkopplung Strömung – Sedimenttransport – Sedimentbilanz – Strömung berücksichtigt. Der Hangabtrieb blieb hier ausgeschaltet.

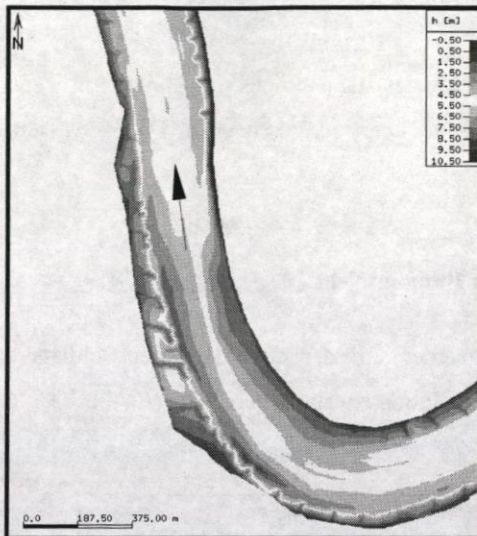


Abb. 2: Beispiel einer Flußkurve (Zustand bei Beginn der morphodynamischen Berechnungen, MEWIS 2002)

Wie man aus Abb. 3 erkennt, hat sich die Morphologie verändert. Der Kolk in der Außenkurve ist deutlich schmaler und tiefer geworden. Weiterhin fallen typische diagonale Sohlwellen auf. Derartige Wellen werden bisweilen beobachtet, dann jedoch mit deutlich geringerer Intensität. Hier im Berechnungsergebnis sind sie gänzlich unrealistisch, wie Gegenüberstellungen mit Peilerggebnissen zeigen. Der Grund für diese Effekte

liegt im vernachlässigten Hangabtrieb. Um dies zu verstehen, stelle man sich eine Strömung vor, die wie auf Abb. 4 entlang einer geneigten Ebene verläuft.

Wenn nur die von der Strömung erzeugte Schubspannung wirken würde, wären die Richtungen von Transport und Strömung identisch. Auf der quergeneigten Fläche wirkt aber noch eine Komponente des Gewichts der Körner, und zwar hangabwärts.

Daher tritt in der Natur ein zusätzlicher Transport hangabwärts auf und mithin stellt sich eine Verschwenkung der Transportrichtung ein, sobald die Sohle eine Querneigung aufweist.

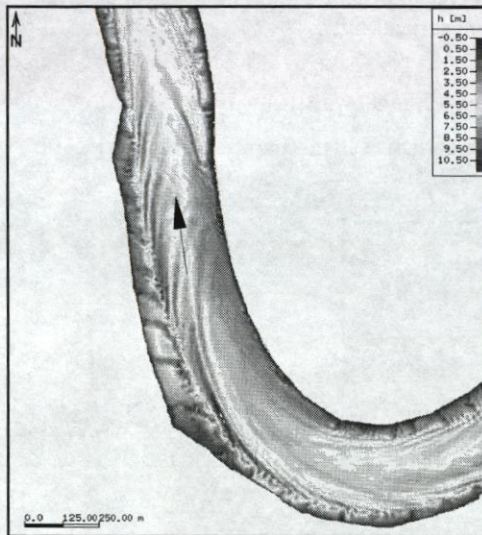


Abb. 3: Flußkurve wie in Abb. 2 nach einiger Zeit morphodynamischer Entwicklung, **ohne** Berücksichtigung des Hangabtriebes (MEWIS 2002)

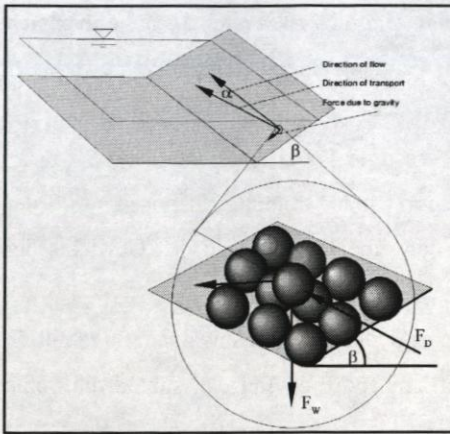


Abb. 4: Zur Verschwenkung der Transportrichtung auf quergeneigten Sohlen (F_w = Gewichtskraft, F_D = Strömungsdruckkraft).

Nachdem der Ansatz für den Hangabwärttrieb im Modell wieder eingeschaltet ist, ergeben sich wesentlich realistischere Resultate, wie Abb. 5 zeigt.

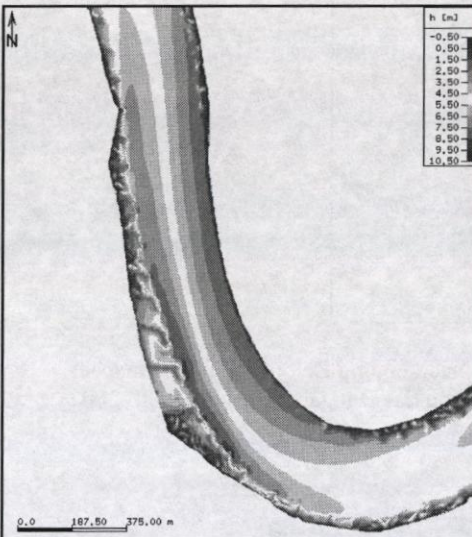


Fig. 5: Flußkurve wie in Abb. 2 nach einiger Zeit morphodynamischer Entwicklung, mit Berücksichtigung des Hangabtriebes (MEWIS 2002)

3 Berechnungsansätze

Ein früher Ansatz zur Berechnung des Hangabtriebs stammt von VAN BENDEGOM (1963). Aus diesem Ansatz folgt für die Verschwenkung \square der

$$\frac{q_n}{q_s} = \tan \alpha = +c \frac{\partial a}{\partial n}$$

Transportrichtung (Annahme Sohlneigung in Strömungsrichtung vernachlässigbar klein):

mit a = Tiefe unter Bezug, s = Strömungsrichtung, n = Richtung orthogonal zur Strömung und α = Winkel zwischen Strömungsrichtung und Transportrichtung.

Für die "Konstante c " fanden TALMON et al. (1995) in Anpassung an Meßergebnisse:

$$c = \frac{1}{1,7} \frac{\sqrt{\rho'gd}}{u^*} = \frac{1}{1,7} \frac{1}{\sqrt{\tau^*}}$$

mit ρ' = relative Dichte, g = Erdbeschleunigung, d = Korndurchmesser und u = Schubspannungsgeschwindigkeit.

Diese Lösung kann wie folgt interpretiert werden: Weil die Sinkgeschwindigkeit

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{c_D}} \sqrt{\rho'gd}$$

ist und u^* ersetzt werden kann durch

$$u^* = \sqrt{\frac{c_D}{2}} \cdot u_b$$

kann c auch ausgedrückt werden durch

$$c = c_1 \cdot \frac{W}{u_b}$$

Hierin sind u_b = Strömungsgeschwindigkeit am Boden und c_1 = Koeffizient.

Die Geschwindigkeit der Teilchen in Strömungsrichtung, u_p , kann mit der Strömungsgeschwindigkeit u_b an der Sohle (= in Kornhöhe) korreliert werden (s. ZANKE 2001)

$$u_p \approx u_b \cdot \left(1 - 0.7 \frac{u_c^*}{u^*}\right)$$

mit u_c^* = Schubspannungsgeschwindigkeit beim Beginn der Bewegung. Man erhält damit

$$c = c_1 \cdot \frac{W}{u_p} \cdot \left(1 - 0.7 \frac{u_c^*}{u^*}\right)$$

oder

$$\tan \alpha = c_1 \cdot \frac{W}{u_p} \cdot \left(1 - 0.7 \frac{u_c^*}{u^*}\right) \cdot \frac{\partial a}{\partial n}$$

Hierin ist allerdings die Änderung der Sedimenttransportmenge durch den Transport hangabwärts nicht berücksichtigt. Eine alternative Lösung zur

Berücksichtigung des Hangabtriebs MEWIS (2002) berücksichtigt dies. In dieser Lösung wird der Hanabtrieb innerhalb des Transportansatzes so berücksichtigt, daß Richtungsänderung und Änderung der resultierenden Transportmenge erfaßt werden. Der Ansatz basiert auf der Wiedergabe des Sedimenttransports q_s durch die Teilchengeschwindigkeit u_p und die bewegte Schichtdicke s (ZANKE 2001):

$$q_s = u_p \cdot s$$

mit

$$\frac{s}{d} \approx 2.8 \cdot (\tau^* - \tau_{cr}^*)$$

$$\bar{q} = s \cdot \left[\bar{u}_p + c_1 \cdot w \cdot \left(1 - 0.7 \frac{u_c^*}{u^*}\right) \cdot \text{grad}(a) \right]$$

Man kann nach (MEWIS 2002) dann berechnen.

Basierend auf den Zahlenangaben von TALMON ist hier $c_1 = 0,72$.

Neben den hier besprochenen Ansätzen finden sich in der Literatur weitere Ansätze mit z.T. ähnlichem, z.T. auch deutlich anderem Aussehen.

Es ist daher von Bedeutung, den Wert von c_1 unter verschiedenen sedimentologischen Bedingungen als konstant zu verifizieren oder seine ggf. vorhandenen Abhängigkeiten aufzudecken sowie die unterschiedlichen weiteren Ansätze abzuprüfen. Hierzu werden im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt derzeit Laborversuche durchgeführt. In einer 2 m breiten Rinne wurde hierzu auf einer Strecke von knapp 30 m eine cosinusförmige die Sohle abgezogen (Abb. 6). Diese Sohlenform kann als Störung erster Ordnung für die Sohle

aufgefaßt werden. Während der Überströmung dreht sich die Sohle im Querprofil langsam in die Horizontale wobei sie näherungsweise die Cosinusform behält. Lediglich die Amplitude geht gegen Null. Weiterer Vorteil dieser Querschnittsform ist die horizontale Sohllage an den seitlichen Begrenzungen, wodurch Randstörungen minimiert werden.

Der Prozess der Einebnung wird durch Handaufmessungen und durch optische Triangulation verfolgt. Erste Versuche deuten auf eine Bestätigung der von TALMON gefundenen Koeffizienten hin. Weitere Versuche mit variierten Randbedingungen müssen aber zeigen, ob das Ergebnis stabil ist, oder in noch festzustellender Weise von den Randbedingungen Geschwindigkeitsniveau, Korndichte, Korngröße usw. abhängt.

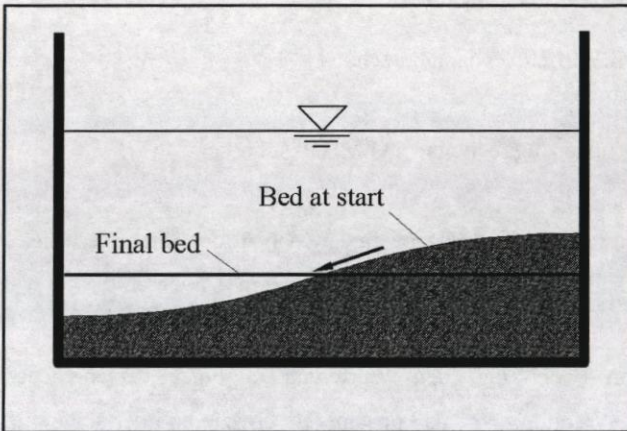


Abb. 6: Querprofil der Laborversuche zur Bestimmung der Koeffizienten des Hangabtriebs (nach TALMON et al. 1995)

3 Literatur

MEWIS, P. (2002): „Morphodynamisch-numerische Modellierung von Flußkurven (Morphodynamic modelling of curves in rivers)“. Diss. TU Darmstadt, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt, im Druck

TALMON M.C.L.M., van MIERLO, N. und STRUIKSMA, N.: “Laboratory measurements of the direction of sediment transport on transverse alluvial bed slopes.” *Journal of Hydraulic Research*, 33 (4), 1995

ZANKE, U.: “On the physics of flow driven sediments.” *Int. Journal of Sediment Research*. Vol. 16, No. 1, Beijing, 2001