

Zweckmäßige Profilierung unbefestigter Ufer

Oft stellen durch Wind oder Schiffsbewegungen erzeugte Wellenbewegungen für Gewässerufer die maßgebende Belastung dar. Unter ihrem Einfluss werden die ungeschützten Böschungen aus meist feinkörnigem, kohäsionslosem Lockergestein ausgewaschen und umgebildet.

Durch Druck-, Sog- und Scherspannungen wird das Bodenmaterial im Einflussbereich der Wellenwirkung gelöst und anschließend teilweise als Geschiebe oder Schweb mit stattfindenden, durch die Wellenbewegung ausgelösten oder überlagerten Strömungsprozessen transportiert. Bei diesen aufwirbelnden, pulsierenden Materialtransporten findet ein Wechselspiel zwischen Abrasion und Akkumulation statt.

Das erodierte Lockergestein wird dabei sowohl im Uferquer- wie auch im Uferlängstransport verfrachtet. Feinkörnige, temporär im Schwebzustand gehaltene Materialien (Scheinsuspension) werden selbst durch Strömungssysteme von geringer Intensität großflächig verteilt. Schließlich werden auch die im transportierten Bodenmaterial befindlichen Salze gelöst und ausgeschwemmt. Entsprechend ihrer Art und Quantität können sie die Wasserqualität nachhaltig beeinflussen.

Bei lang andauernder, gleichbleibender, ufernormaler Wellenbelastung mit konstantem Wasserspiegel bildet sich allmählich ein dynamisches Gleichgewicht mit einem charakteristischen Uferprofil heraus. Es ist in seiner Geometrie sowohl von der Wellenbelastung, von der Gestaltung des Ausgangsprofils wie auch von den Eigenschaften des Bodenmaterials abhängig.

Die Begriffsbildung dynamisches Gleichgewicht oder Gleichgewichtsprofil heißt nicht, dass in diesem Zustand kein Material transportiert wird. Gleichgewichtsprofil bedeutet, dass einerseits langfristig das Ufer-

profil konstant bleibt und dass andererseits sich die dynamischen Transportvorgänge von Abrasion und Akkumulation das Gleichgewicht halten.

Jede Veränderung der Belastungsgrößen sowie auch jede Variation des Wasserspiegels rufen neue Veränderung der Ufer hervor, die erst dann enden, wenn das neu ausgebildete Uferprofil auf die vorherrschende Belastung und den neuen Wasserspiegel abgestimmt ist.

Die Quantität der Umformungen der Ufer und auch die des Längstransportes werden schließlich erst dann minimal, wenn innerhalb des gesamten Höhenbereiches der Wasserspiegeländerungen eine Uferneigung auf- oder besser gesagt abgebaut ist, die der stärksten, im Belastungszeitraum auftretenden Wellenbelastung entspricht.

Eine solche Uferprofilierung ist deshalb auch die angestrebte Zielvorstellung einer natur- und landschaftsverträglichen Gestaltung wellenbelasteter Böschungen in der wasserbaulichen Projektierung. Für eine derartige Handhabe wird jedoch eine detaillierte, analytische Vorhersage aller kennzeichnenden Parameter der Uferkontur in Abhängigkeit von den wirkenden Einflussgrößen benötigt. Realisierbar ist dieses Vorhaben durch folgende Verfahrensweise.

Es wird das Gleichgewicht eines auf der Böschungsebene liegenden Materialteilchens mit dem Volumen V und dem Durchmesser:

$$D = a \cdot \sqrt[3]{V} = \sqrt[3]{6 \cdot V / k_1 \cdot \pi}$$

betrachtet (siehe Abb. 1). Auf das Teilchen wirken die Kräfte P (Strömungskraft des zurückfließenden Auflaufwasser), H_G (böschungparallele Gewichtskomponente) und V_G (böschungsnormale Gewichtskomponente) jeweils mit den Hebelarmen a_P , a_H und a_V ein. Als Momentengleichgewicht erhält man daraus:

$$\eta = \frac{H_G \cdot a_H + P \cdot a_P}{V_G \cdot a_V} \approx 1 = \frac{H_G \cdot a_H}{V_G \cdot a_V} + \frac{P \cdot a_P}{V_G \cdot a_V} \quad (1)$$

Für die Kraftkomponenten und deren Hebelarme wird in Ansatz gebracht:

$$H_G = k_1 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot \sin \alpha \quad ; \quad a_H \sim D$$

$$V_G = k_1 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot \cos \alpha \quad ; \quad a_V \sim D$$

$$P = k_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{v_B^2}{2 \cdot g} \quad ; \quad a_P \sim D$$

Es bezeichnen:

D [m] den Korndurchmesser

ρ_s [kg · m⁻³] die Dichte des Kornmaterials

ρ [kg · m⁻³] die Dichte des Wassers

g [m · s⁻²] die Erdbeschleunigung

α [°] den Böschungswinkel

H [m] die Wellenhöhe

λ [m] die Wellenlänge

Wird die Strömungsgeschwindigkeit des nach Erreichen der maximalen Auflaufhöhe H_A zurückfließenden Wassers v_E mit:

$$\frac{v_B}{2 \cdot g} \sim H_A \sim H \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{H}} \cdot \sin \alpha$$

angesetzt, so folgt:

$$1 = K_1 \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} + K \cdot \frac{\rho \cdot H \cdot \sqrt{H/\lambda} \cdot \sin \alpha}{(\rho_s - \rho) \cdot D \cdot \cos \alpha}$$

Diese Gleichung kann nach der Böschungseigung $m = 1/\tan \alpha$ aufgelöst werden. Dann ergibt sich:

$$\frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{1}{\tan \alpha} = m = K_1 + K \cdot \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{H}{D} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{H}}$$

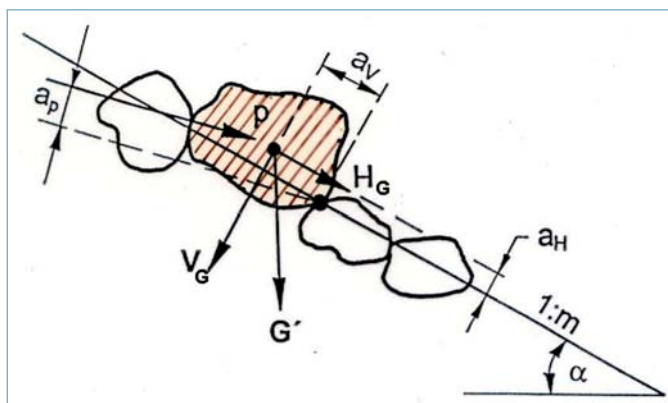


Abb. 1: Systemskizze

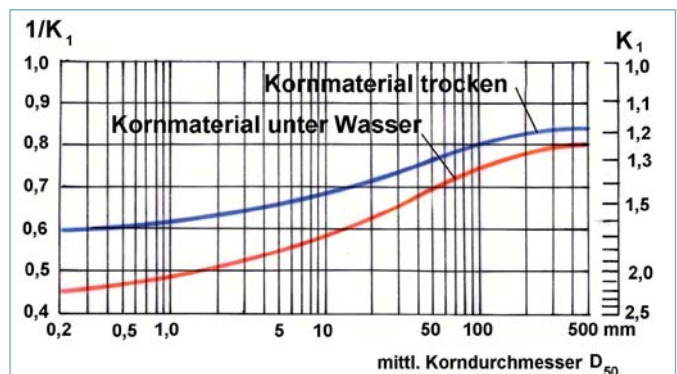


Abb. 2: Natürliche Schüttwinkel von kohäsionslosem Lockergestein

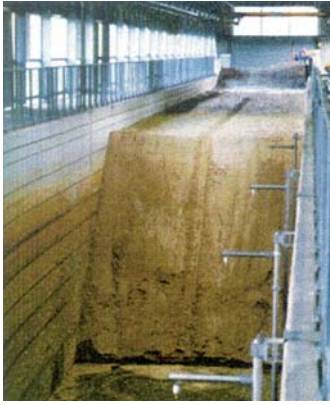


Abb. 3: Unbelastete Versuchsböschung im GWK in Hannover



Abb. 4: Wellenbelastung der Versuchsböschung im GWK

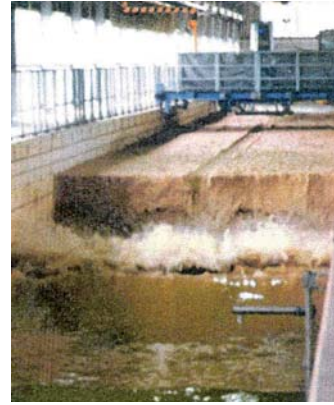


Abb. 5: Wellenbrandung auf die Versuchsböschung



Abb. 6: Durch Wellenbelastung verformte Versuchsböschung

Ist keine Wellenbelastung vorhanden, so muss K_i der natürlichen Unterwasserneigung m_ψ entsprechen.

Versuchsergebnisse für m_ψ (Schüttneigung unter Wasser) und m_ϕ (Schüttneigung im Trockenem) sind in Abb. 2 dargestellt.

Wird nun, nicht für den statischen, sondern für den dynamischen Gleichgewichtszustand in Analogie zur Geschiebe-

bewegung der Ansatz: (4)

$$m_A = m_\psi + \left(K \cdot \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{H_m}{D_{50}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_m}{H_m}} \right)^A$$

gewählt, so steht eine Abhängigkeit zur Verfügung, mit der in Abhängigkeit vom Dichteverhältnis, vom Verhältnis mittlere Wellenhöhe H_m zum mittleren Korndurch-

messer D_{50} , von der mittleren Wellensteilheit H_m/λ_m sowie in Abhängigkeit von den empirischen Konstanten K und A die Gleichgewichtsneigung bestimmt werden kann.

Modellversuche zur Bestimmung von K und A wurden zunächst vom Verfasser in der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, und später im Auftrage der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) im Hubert Engels Labor der Technischen Universität Dresden sowie im Großen Wellenkanal (GWK) am Forschungs Zentrum Küste (FZK), Hannover (siehe Abb. 3 bis 6) durchgeführt.

Ein typisches Ergebnis der Modellversuche im GWK ist in Abb. 7 dargestellt. Man erkennt deutlich, so wie es auch zunächst angenommen wurde, die Ausbildung einer charakteristischen, flachen Neigung im Höhenbereich um den Wasserspiegel herum. Wird nun die Neigung zwischen Klifffuß und Riffkrone als sogenannte Ausgleichsneigung (Gleichgewichtsneigung) m_A definiert (siehe Abb. 8), so folgt aus den Versuchen:

$$K = 0,0625 \quad \text{und}$$

$$A = 0,5 \quad \text{für} \quad \frac{H_m}{D_{50}} \geq 312 \quad \text{sowie}$$

$$A = 0,5 \cdot \left[1 + \cosh^{-1} \left(0,083 \cdot \left(\frac{H_m}{D_{50}} - 3,4 \right)^{2/3} \right) \right]$$

$$\text{für} \quad \frac{H_m}{D_{50}} \leq 312$$

Die Werte für den Koeffizienten A sind in Abb. 9 in Abhängigkeit von:

$$\frac{H_s}{D_{50}} = \frac{1,6 H_m}{D_{50}}$$

dargestellt (H_s signifikante Wellenhöhe im Tiefwasser).

Um die Geometrie einer wellenbelasteten Böschung genauer zu beschreiben, wurde der weiteren Auswertung der Versuche ein idealisiertes Böschungsprofil (siehe Abb. 8) zu Grunde gelegt.

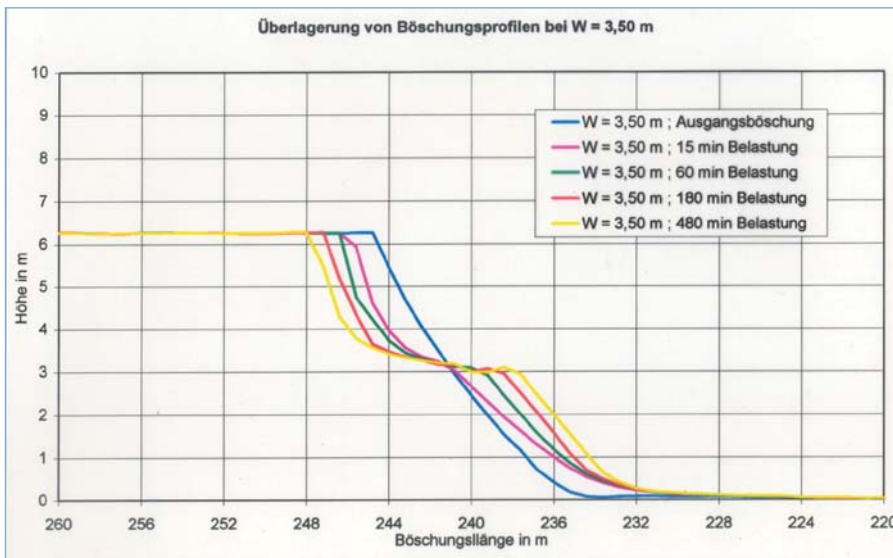


Abb. 7: Profile der Versuchsböschung bei einem Wasserstand von 3,50 m nach unterschiedlichen Belastungszeiten

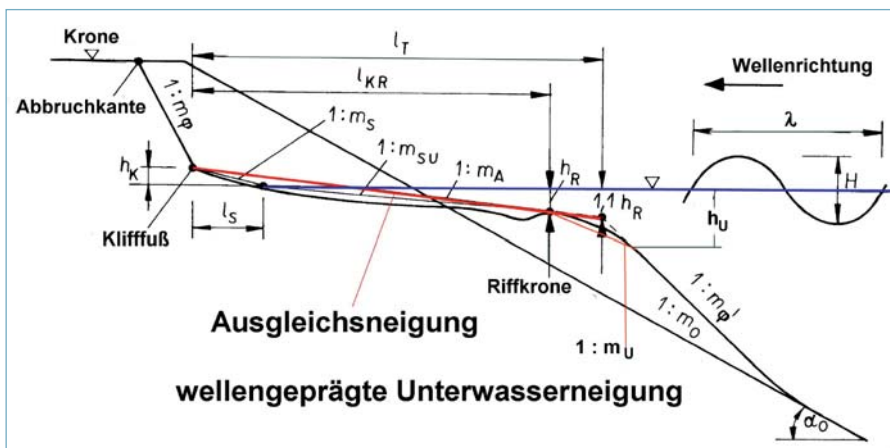


Abb. 8: Idealisiertes Böschungsprofil

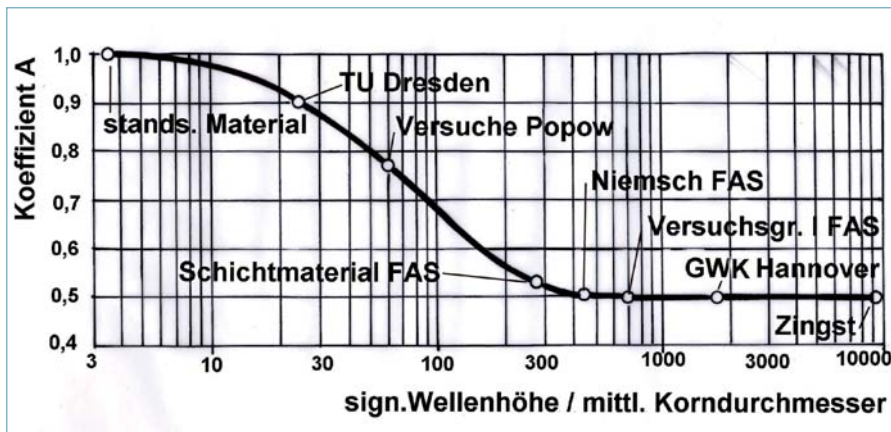


Abb. 9: Darstellung des Koeffizienten A in Abhängigkeit von H_s/D_{50}

Für die dabei benötigten charakteristischen Werte ergab sich aus den Untersuchungen:

Strandneigung m_s : (5)

$$m_s = m_{\psi'} + \left(0,0045 \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{H_m}{D_{50}} \sqrt{\frac{\lambda_m}{H_m}} \right)^{1/2}$$

Unterwasserneigung m_{SU} : (6)

$$m_{SU} = m_A + \frac{h_A}{h_R} \cdot (m_A - m_s)$$

wellenbeeinflusste Unterwasserneigung m_U : (7)

$$m_U = m_{\psi'} + \left(0,031 \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{H_m}{D_{50}} \sqrt{\frac{\lambda_m}{H_m}} \right)^{1/2}$$

Höhe des Klifffußes über dem Wasserspiegel h_K : (8)

$$h_K = \frac{1,81}{m_A} \cdot H_m \cdot \sqrt{\frac{\lambda_m}{H_m}} \cdot B$$

$$B = 1 - \frac{D_{50}}{0,5 \cdot H_m} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot (\cos \alpha_A - \sin \alpha_A) \quad (8a)$$

$$h_K \cong \frac{1,81}{m_A} \cdot H_m \cdot \sqrt{\frac{\lambda_m}{H_m}}$$

Tiefe der Riffkronen unter dem Wasserspiegel h_R : (9)

$$h_R = H_m \left(1 + 0,05 \sqrt{\frac{\lambda_m}{H_m}} \right)$$

Wassertiefe über dem Riffal h_T : (10)

$$h_T = 1,14 \cdot H_m \cdot \left(1 + 0,05 \sqrt{\frac{\lambda_m}{H_m}} \right)$$

Grenzwassertiefe der Wellenbeeinflussung h_U : (11)

$$h_U = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \text{arc sinh} \frac{1,26 \cdot H}{T \cdot \sqrt{g \cdot D_{50}}}$$

Terrassenlänge l_T : (12)

$$l_T = (h_A + 1,1 \cdot h_R) \cdot m_A$$

Mit diesen Daten lassen sich Uferumformungen vorhersagen, Schutzdünen bemessen und Gefahren frühzeitig erkennen. Gefahrenvermeidungen sind möglich durch Sperrungentsprechender Uferabschnitte, durch Böschungsbefestigungen oder durch zweckmäßige Uferprofilierung.

Eine besonders vorteilhafte und einfache Uferprofilgestaltung kann mit dem Standardgleichgewichtsprofil vorgenommen werden.

Dieses Uferprofil ist in Abb. 10 dargestellt.

Bei Massenausgleich zwischen Abtrag und Auftrag wird im Bereich um alle im Prognosezeitraum möglichen Wasserspiegellagen ein mit der Gleichgewichtsneigung

m_A geneigter Flachbereich geschaffen, der sich von der Höhenkote h_K über dem höchsten Betriebswasserspiegel bis zur Tiefe $1,1 \cdot h_R$ unter dem tiefsten Betriebswasserspiegel erstreckt. Die Werte h_K , m_A und h_R sind mit den Gleichungen (4), (8) und (9) unter Ansatz des stärksten meteorologischen Ereignisses im gewählten Prognosezeitraum zu bestimmen.

Oberhalb des Klifffußes ist die Böschung mit $1:m_1$ so geneigt, dass sie flacher als die Grenzneigung im Trockenen ist. ($m_1 \geq m_{\psi'} = K_1$ siehe Abb. 2, blaue Kurve).

Im Unterwasserbereich schließt an die Flachterrasse eine Böschungsneigung m_2 an, die flacher ist als die Grenzschrüttnigung $m_{\psi'} = K_1$ unter Wasser (siehe Abb. 2, rote Kurve).

Mit einer derartigen Uferprofilgestaltung sind zwar auch ohne Uferlängstransporte Veränderungen nicht völlig ausgeschlossen aber sie sind wie auch der Längstransport auf ein Minimum beschränkt. Gleichzeitig stellt ein solches Profil eine natur- und landschaftsverträgliche Gestaltung wellenbelasteter Uferregionen dar.

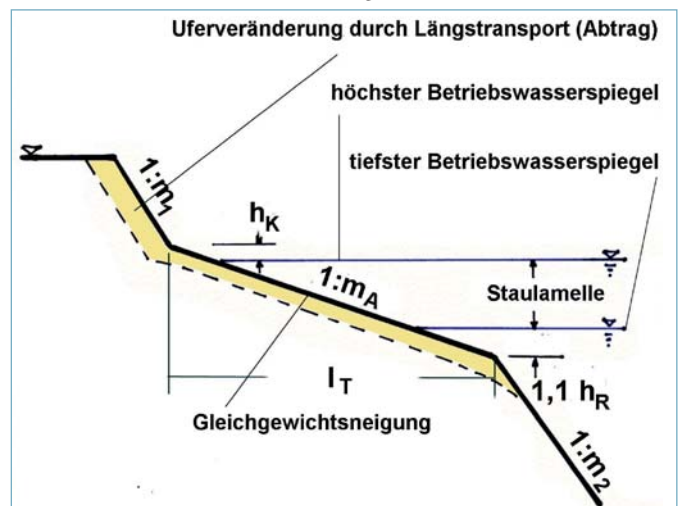


Abb. 10: Standardgleichgewichtsprofil

Sollten im Lamellenbetrieb Wasserstände über dem normalen Wasserspiegel selten auftreten, so kann eine Verkürzung der Flachterrasse durch eine Klifffußschüttung aus Steinmaterial erwogen werden.

Prof. Dr.- Ing. habil. Harold Wagner,
Fluß- und Seebau Consult Potsdam,
Am Havelblick 5 a, 14473 Potsdam