

Die kritische mittlere
Sohlenschubspannung bei Geschiebe-
mischungen unter Berücksichtigung der
Deckschichtbildung und der
turbulenzbedingten
Sohlenschubspannungsschwankungen

ABHANDLUNG

zur Erlangung der Würde eines
Doktors der technischen Wissenschaften
der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

ARTHUR GÜNTER

dipl. Bauingenieur ETH

geboren am 4. Juni 1938

von Neuhausen am Rheinfall (Kt. Schaffhausen)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. T. Dracos, Referent
Prof. Dr. D. Vischer, Korreferent

1971, City-Druck AG
Zürich

RESUME

Le lit alluvionnaire d'un canal (en cas d'interruption de l'apport solide à l'amont) est en état d'érosion tant que la sollicitation du lit reste supérieure à une certaine valeur critique appelée "force d'entraînement moyenne critique $\bar{\tau}_c$ ". L'étude de cette valeur critique fait l'objet du présent travail.

Sur la base des recherches entreprises par d'autres auteurs, on a démontré que les fluctuations, dues à la turbulence, de la force d'entraînement dépendent du nombre de Reynolds Re et influencent la valeur $\bar{\tau}_c$. Une fonction

$$\frac{\bar{\tau}_c}{(\rho_s - \rho_w)gD} = f_3(Re^*, Re) \quad (7)$$

permettant de déterminer la valeur $\bar{\tau}_c$ pour des lits formés de matériaux à granulométrie uniforme a été établie.

Les résultats d'une série d'expériences réalisées avec des matériaux naturels (à granulométrie étendue) confirment la relation existant entre Re et les fluctuations de la force d'entraînement, c'est-à-dire entre Re et $\bar{\tau}_c$. Une fonction empirique résultant de ces expériences est donnée dans le travail (équation 15). Elle permet la détermination de $\bar{\tau}_c$ pour des lits composés de matériaux naturels (pour $Re < \sim 150'000$).

Sous l'influence de la force d'entraînement moyenne critique $\bar{\tau}_c$, une couche superficielle stable se forme dans un lit naturel. Celle-ci est principalement constituée par les composantes grossières de la granulométrie initiale du lit. De telles couches superficielles ont été observées et analysées par un procédé spécial dans les essais réalisés en laboratoire. Sur la base de ces analyses, il a été possible d'établir une formule (équation 13) permettant de calculer la composition du pavage d'un lit naturel à granulométrie initiale quelconque.

SUMMARY

The alluvial bed of a channel is gradually eroded, if the hydromechanical stress exceeds a critical value called "critical mean shear stress $\bar{\tau}_c$ ". This critical value is scope of the present theoretical and experimental study.

An extension of existing theories has shown, that the fluctuations of the bed shear stress caused by turbulence influence the value $\bar{\tau}_c$ and depend on the Reynolds number Re of the discharge. A function

$$\frac{\bar{\tau}_c}{(\rho_s - \rho_w)gD} = f_3(Re^*, Re) \quad (7)$$

is derived, which permits to determine $\bar{\tau}_c$ in beds composed of uniform material.

The results of laboratory tests carried out with natural (non-uniform) material verify the relationship between Re and the fluctuations of the shear stress: An empirical function (equation 15) - based on the results of the tests - permits to determine $\bar{\tau}_c$ also for natural beds (for $Re < \sim 150'000$).

Under the influence of the bed shear stress $\bar{\tau}_c$ a stable top layer in the channel bed is formed, which consists mainly of the larger grains of the bed material (natural armoring). The formation of the top layer was observed in the laboratory tests and analysed by means of a specially developed method. As result a formula has been established to determine the composition of the top layer in channel beds for any given material (equation 13).

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit behandelt das Problem der kritischen mittleren Sohlenschubspannung $\bar{\tau}_c$ bei Gerinnesohlen aus losen Gesteinskörnern unter Berücksichtigung der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen und der natürlichen Deckschichtbildung. Die Betrachtungen erstrecken sich sowohl auf Sohlen aus Einheitskorn als auch auf Mischsohlen (natürliche Sohlen). Der Begriff "kritische mittlere Sohlenschubspannung" ist in folgender Weise definiert worden:

- bei Sohlen aus Einheitskorn :

Mit dem Anwachsen der Abflussmenge Q über einer ebenen, geneigten Sohle, die am untern Ende durch einen Fixpunkt auf konstanter Höhe gehalten wird, wächst auch die Wassertiefe h und damit die mittlere Sohlenschubspannung $\bar{\tau}$ an. Bei kleinen Q resp. $\bar{\tau}$ bleiben vorerst sämtliche Körner an der Sohlenoberfläche in Ruhe, bis schliesslich ein gewisser Grenzwert der mittleren Sohlenschubspannung erreicht wird, wo vereinzelte, exponierte Körner in Bewegung geraten und von der Strömung weggeschleppt werden. Dieser Grenzwert ist als "kritische mittlere Sohlenschubspannung $\bar{\tau}_c(E)$ " einer Sohle aus Einheitskorn bezeichnet worden. Wird $\bar{\tau}_c(E)$ überschritten und bleibt hierauf Q konstant, so setzt ein kontinuierlicher Abtrag von Körnern ein. Unter der Voraussetzung, dass kein Geschiebe zugeführt wird, äussert sich dieser Abtrag in einer langsamen "Drehung" der Sohle um den Fixpunkt, d.h. in einer fortschreitenden Gefällsverminderung. Die damit verbundene Abnahme von $\bar{\tau}$ bewirkt eine allmähliche Verlangsamung der "Drehung", bis der Sohlenabtrag schliesslich ganz aufhört, wenn $\bar{\tau}$ wieder auf den kritischen Wert $\bar{\tau}_c(E)$ abgesunken ist.

- bei Mischsohlen :

Besteht die betrachtete Flusssohle (eben, geneigt, unten durch Fixpunkt gehalten, keine Geschiebezufuhr) aus einem Gemisch von Gesteinkörnern unterschiedlicher Grösse (natürliche Sohle), so geraten unter der Voraussetzung, dass noch keine Deckschicht vorhanden ist, bereits bei sehr kleinen $\bar{\tau}$ einzelne, vorwiegend feine Körner in Bewegung. Wirkt während längerer Zeit eine relativ kleine, konstante Schubspannung auf die Sohle, so erhöht sich infolge Abtrags der Feinkomponenten der prozentuale Anteil der nicht fortbewegten Grobkomponenten an der Sohlenoberfläche, wodurch sich die Sohle allmählich selbst stabilisiert: Es entsteht eine natürliche, stabile Deckschicht. Dieser Vorgang, der mit einem geringen, parallelen "Absinken" der Sohlenoberfläche einhergeht, erfolgt allerdings nur bei relativ kleinen $\bar{\tau}$. Bei grossen $\bar{\tau}$ dagegen setzt auch bei Mischsohlen ein kontinuierlicher Abtrag der Sohle ein, der eine "Drehung" der Sohle um den unterliegenden Fixpunkt bewirkt. Die grösstmögliche Sohlenschubspannung, bei der eine Selbststabilisierung mit nur geringfügigem parallelem "Absinken" der Sohle (ohne Gefällsänderung) gerade noch eintritt, ist "kritische mittlere Sohlenschubspannung $\bar{\tau}_c(M)$ " der betreffenden Mischsohle genannt worden. Der Zustand einer Mischsohle, bei der sich unter der Wirkung von $\bar{\tau}_c(M)$ eine stabile Deckschicht ausgebildet hat, ist als "Grenz-zustand" bezeichnet worden. Bleibt eine gewisse Abflussmenge, die eine Sohlenschubspannung $\bar{\tau} > \bar{\tau}_c(M)$ bewirkt, über längere Zeit konstant, so stellt sich nach und nach der Grenz-zustand selbsttätig ein, indem die Sohlenschubspannung $\bar{\tau}$ infolge "Drehung" der Sohle um den Fixpunkt (\rightarrow Abnahme von J und $\bar{\tau}$) allmählich dem Grenzwert $\bar{\tau}_c(M)$ zustrebt und sich an der Sohlenoberfläche gleichzeitig die zu $\bar{\tau}_c(M)$ gehörige Deckschicht ausbildet.

Der erste Teil der vorliegenden Arbeit behandelt die kritische mittlere Sohlenschubspannung $\bar{\tau}_c(E)$ bei Sohlen aus Einheitskorn. Es wird darin die Frage nach der Wirkung der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen erörtert und geklärt. Es wird festgestellt, dass die massgebenden Schwankungen eine Funktion der Reynoldszahl Re des Abflusses sind und es wird daraus abgeleitet, dass auch die kritische mittlere Sohlenschubspannung $\bar{\tau}_c(E)$ von Re abhängig ist. Ausgehend von der allgemein anerkannten Beziehung von SHIELDS

$$\frac{\bar{\tau}}{(\rho_s - \rho_w)gD} = f_1(Re^*) \quad (2)$$

und von der aufgezeigten Abhängigkeit zwischen Re und den Sohlenschubspannungsschwankungen wird eine Beziehung zur Bestimmung der kritischen mittleren Sohlenschubspannung $\bar{\tau}_c(E)$ bei Sohlen aus Einheitskorn hergeleitet:

$$\frac{\bar{\tau}_c(E)}{(\rho_s - \rho_w)gD} = f_3(Re^*, Re) \quad (7)$$

Aus dieser Beziehung kann die Grösse $\bar{\tau}_c(E)$ für Reynoldszahlen des Abflusses $Re < \sim 150'000$ mit grosser Genauigkeit ermittelt werden.

Der zweite Teil ist dem Problem der kritischen mittleren Sohlenschubspannung bei Mischsohlen gewidmet. Die Untersuchungen stützen sich auf eine Reihe von Versuchen, die in einer 40 m langen Versuchsrinne durchgeführt worden sind. In diesen Versuchen ist der Grenzzustand bei verschiedenen Mischsohlen und bei unterschiedlichen hydromechanischen Verhältnissen ermittelt worden. Auf Grund der Ergebnisse dieser Versuche wird die folgende Beziehung hergeleitet, die es erlaubt, die Zusammensetzung der Deckschicht im Grenzzustand für beliebige Mischsohlen zu berechnen:

$$\Delta p_{(D_x)_i} = \frac{\Delta p_{(DF)_i} \left(\frac{\Delta p_{(A_x)_i}}{\Delta p_{(AF)_i}} \right) \left(\frac{1-p_{(AF)_i}}{1-p_{(A_x)_i}} \right)}{\sum_{i=1}^n \left[\Delta p_{(DF)_i} \left(\frac{\Delta p_{(A_x)_i}}{\Delta p_{(AF)_i}} \right) \left(\frac{1-p_{(AF)_i}}{1-p_{(A_x)_i}} \right) \right]} \quad (13)$$

Im weitem wird die Abhängigkeit zwischen Re und den turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen, wie sie im ersten Teil festgestellt worden ist, mit Hilfe der durchgeführten Versuche bestätigt. Sodann wird festgestellt, dass die kritische mittlere Sohlenschubspannung $\bar{\tau}_{c(M)}$ einer Mischsohle auf Grund der Beziehung

$$\bar{\tau}_{c(M)} = \lambda \bar{\tau}_{c(E)}$$

berechnet werden kann. Die Grösse $\bar{\tau}_{c(E)}$ ist dabei gleich der kritischen mittleren Sohlenschubspannung einer Vergleichssohle aus Einheitskorn mit Körnern, die dem Maximalkorn der betreffenden Mischsohle entsprechen, während der Faktor λ von der Beschaffenheit der Deckschicht und der Ausgangsmischung abhängig ist und in Funktion der beiden dimensionslosen Korndurchmesser $dm_D = D_{mD}/D_{max}$ (Deckschicht) und $dm_A = D_{mA}/D_{max}$ (Ausgangsmischung) dargestellt werden kann:

$$\lambda = dm_D^{0.64} dm_A^{0.33} \quad (15)$$

Dadurch, dass sich $\bar{\tau}_{c(E)}$, die Deckschichtzusammensetzung im Grenzzustand und λ mit Hilfe der Gleichungen (7), (13) und (15) berechnen lassen, ist die Möglichkeit gegeben, die kritische mittlere Sohlenschubspannung $\bar{\tau}_{c(M)}$ für beliebige natürliche Mischsohlen (bis $Re \cong 150'000$) zu ermitteln.