

## Abteilung II Seehäfen und Seeschiffsstraßen

(für die gewerbliche und die Sportschifffahrt und den Fischfang)

zu Thema 1:

### Thema des zweiten deutschen Berichts

Resuspendierung von feinkörnigem Baggergut beim Verklappen  
- ein bodenmechanisch-hydraulisches Modell -

#### Berichtersteller:

Leitender Baudirektor Dr.-Ing. Bernd Schuppener, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Berlin

Dipl.-Ing. Frank Schwieger, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Hamburg

#### Zusammenfassung

Beim Verklappen von feinkörnigem Baggergut entsteht durch Resuspendierung eine Trübungswolke, von der erhebliche ökologische Gefahren ausgehen. Es werden Schleppversuche beschrieben, bei denen Bodenproben durch eine wassergefüllte Rinne gezogen werden und dabei der Materialverlust gemessen wird. Die Versuche zeigen, daß die undrained Scherfestigkeit und die Strömungsgeschwindigkeit die wichtigsten Parameter für die Resuspendierung sind. Sie bestimmen drei Bereiche mit unterschiedlichem Erosionsverhalten. Es wird ein Berechnungsmodell vorgestellt, das auf der Grundlage der Versuchsergebnisse eine rechnerische Abschätzung der beim Verklappen resuspendierten Baggermenge gestattet.

#### Inhalt

##### 1 Einführung

##### 2 Versuche

##### 3 Modell zur Abschätzung der beim Verklappen resuspendierten Schlickmengen

##### 4 Schlußbetrachtung

#### Literatur

##### 1 Einführung

Beim Verklappen wird feinkörniges Baggergut durch die Strömungskräfte erodiert und es entsteht eine Trübungswolke aus suspendiertem Baggergut, von der erhebliche ökologische Gefahren ausgehen. Zum einen hat die Trübungswolke eine sehr große Kapazität zur Aufnahme von im Wasser gelösten Sauerstoff, zum anderen ist gerade feinkörniges Baggergut oft mit Schadstoffen belastet.

Zur Abschätzung des Gefahrenpotentials einer Trübungswolke ist ein bodenmechanisch-hydraulisches Modell erforderlich, das die Entstehung der

Trübungswolke nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ beschreibt. In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst gezeigt, mit welchen Versuchsverfahren die Resuspendierung untersucht wurde und welche Erkenntnisse dabei gewonnen wurden. Darauf aufbauend wird ein bodenmechanisch-hydraulisches Modell zur Abschätzung der resuspendierten Massen vorgestellt.

##### 2 Versuche

Der Prozeß der Resuspendierung wird vor allem durch zwei Parameter beeinflusst: die undrained Scherfestigkeit  $c_u$  und die Fallgeschwindigkeit  $v$  (Pointdexter-Rollings,

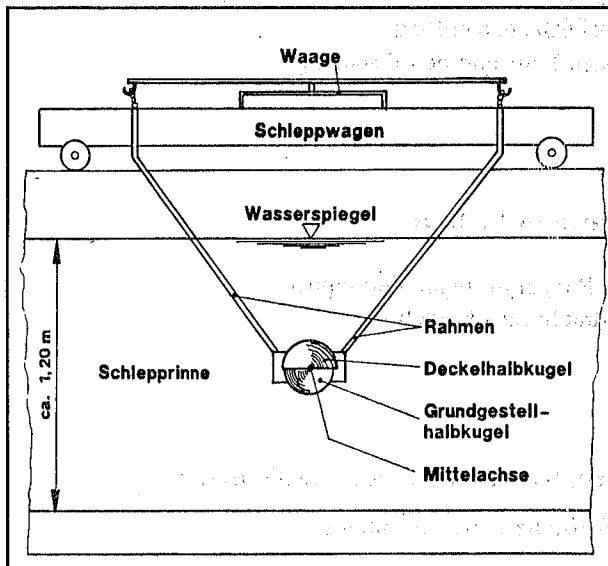


Bild 1: Schleppwagen mit Bodenprobe

1990 und Raudkivi, 1981). Zur zahlenmäßigen Bestimmung der Resuspendierungsrate und des Einflusses der beiden Parameter wurden Versuche in einer Schlepprinne durchgeführt. Über der Rinne läuft ein Schleppwagen, der mit einem Seilantrieb stufenlos bis zu einer Geschwindigkeit von 4 m/s beschleunigt werden kann (siehe Bild 1).

Für die Versuche wird unter dem Schleppwagen ein in die Rinne tauchender Rahmen angebracht. Am unteren Ende dieses Rahmens ist der Träger für die kugelförmige Schlickprobe befestigt. Er besteht aus zwei Halbkugeln, wobei die Schlickprobe auf die untere Halbkugel aufgebaut wird und mit der oberen Halbkugel abgedeckt werden kann.

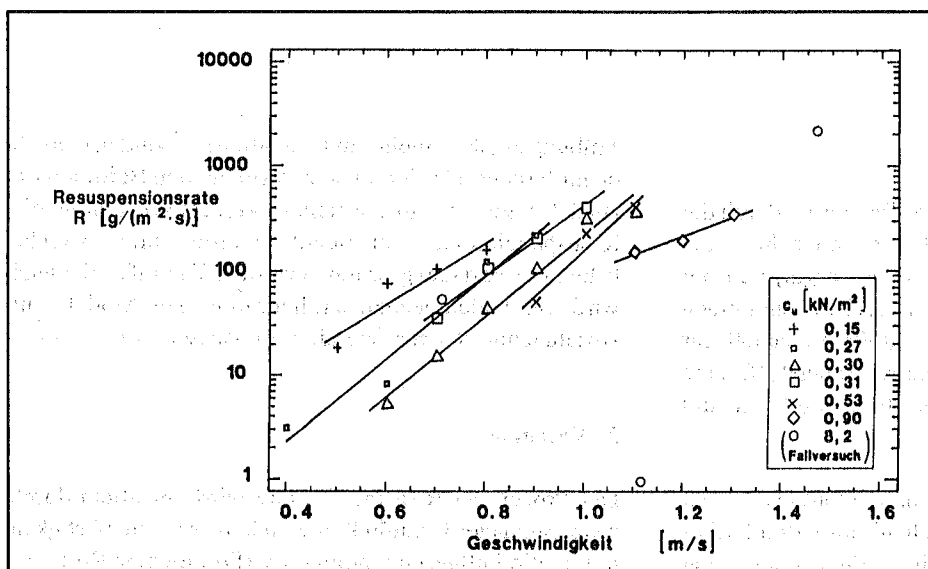


Bild 2: Resuspensionsrate R in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Zu Beginn des Versuchs wird der ins Wasser abgesenkte Rahmen mit der Bodenprobe gewogen und die Ausgangsmasse  $M_A$  festgehalten. Anschließend beginnt die Versuchsfahrt. Während der Beschleunigungsphase wird die Schlickprobe durch die Deckelhalbkugel vor vorzeitiger Erosion geschützt. Bei Einfahrt in die Meßstrecke wird der Deckel nach hinten gedreht, so daß die Schlickprobe der Strömung ausgesetzt ist. Beim Ausfahren wird der Deckel von vorn wieder über die Schlickprobe gedreht, um weitere Erosion während des Abbremsens zu verhindern. Damit wird also sichergestellt, daß die Oberfläche der Schlickkugel nur bei einer konstanten Geschwindigkeit im Bereich der Meßstrecke einer Erosion ausgesetzt ist. Zur Auswertung des Versuchs wird die Probe wieder gewogen. Dann kann aus der Massendifferenz zur Anfangsmasse, der Probenoberfläche und der Dauer der Erosion die Resuspensionsrate ermittelt werden.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aller Versuchsreihen, die mit Schlick unterschiedlicher Festigkeit und mit unterschiedlichen Schleppgeschwindigkeiten gefahren wurden, zeigt das Bild 2, in dem die Abhängigkeit der Resuspensionsrate R von der Geschwindigkeit v halblogarithmisch dargestellt wurde. Für Proben gleicher Festigkeit wurde zusätzlich eine Regressionsrechnung durchgeführt. Aus den Versuchsergebnissen können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- ▷ Die Schleppversuche zeigen, daß es eine untere Grenzgeschwindigkeit  $v_u$  gibt, unterhalb derer keine Erosion stattfindet. Die Ausgleichsgeraden beginnen daher bei den Versuchsgeschwindigkeiten, bei denen zum ersten Mal eine nennenswerte Resuspendierung gemessen wurde.
- ▷ Oberhalb der unteren Grenzgeschwindigkeit  $v_u$  wird eine kontinuierliche Erosion beobachtet, die exponentiell mit der Geschwindigkeit v ansteigt.
- ▷ Bei Überschreiten einer oberen Grenzgeschwindigkeit  $v_o$  beginnt eine diskontinuierliche, sehr starke "Erosion", bei der der Probenkörper in Teilkörper zerrissen wird. Aufgrund dieser Unstetigkeiten im Erosionsverhalten enden die Geraden des Bildes 2 bei der oberen Grenzgeschwindigkeit  $v_o$ .

### 3 Modell zur Abschätzung der beim Verklappen resuspendierenden Schlickmengen

Nach den Erkenntnissen aus den Schlepprinnenversuchen sind beim Verklappvorgang folgende Phasen zu unterscheiden:

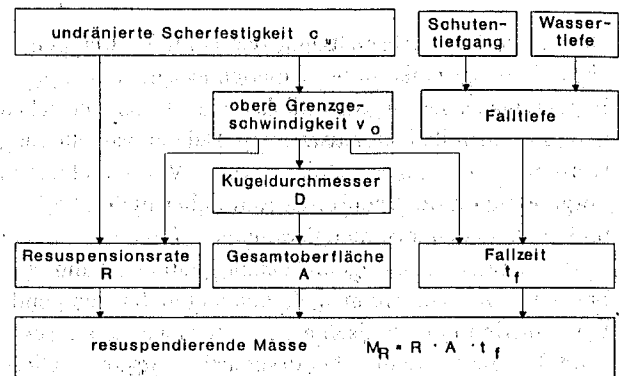
- ▶ In der ersten Phase nach dem Verlassen der Schute wird die Schlickmasse beschleunigt. Bis zum Erreichen der unteren Grenzggeschwindigkeit  $v_u$  findet keinerlei Erosion statt.
- ▶ Eine kontinuierliche Erosion und damit Resuspendierung beginnt erst nach dem Überschreiten der unteren Grenzggeschwindigkeit  $v_u$  in der 2. Phase. Hier wird die Schlickmasse weiter bis zur oberen Grenzggeschwindigkeit  $v_o$  beschleunigt.
- ▶ Mit dem Überschreiten der oberen Grenzggeschwindigkeit  $v_o$  zerfällt der Schlick in Teilkörper zu Beginn der 3. Phase.

Die obere Grenzggeschwindigkeit  $v_o$  hat damit eine Obergrenze für die Größe der Teilkörper zur Folge, in die eine Schlickmasse zerfallen wird. Größere Teilkörper werden sofort zerfallen, weil sie wegen der größeren Masse auf Geschwindigkeiten beschleunigt werden, die über der oberen Grenzggeschwindigkeit  $v_o$  liegen.

Die obere Grenzggeschwindigkeit  $v_o$  und die zugehörige maximale Größe der Teilkörper, in die die Schlickmasse zerfallen wird, sind die entscheidenden Bestandteile des bodenmechanisch-hydraulischen Modells zur Abschätzung der Masse des resuspendierten Baggerguts. Bei diesem Modell wird von folgenden auf der sicheren Seite liegenden Vereinfachungen und Idealisierungen ausgegangen:

- ▶ Der aus einer Schute verklappte oder aus einer Baggerschaufel an der Wasseroberfläche entleerte Schlick ist homogen hinsichtlich seiner undrännierten Scherfestigkeit  $c_u$ .
- ▶ Der Schlickkörper zerfällt gleich zu Beginn des Fallvorgangs in kugelförmige Teilkörper einer Größe, die der oberen Grenzggeschwindigkeit  $v_o$  entsprechen.
- ▶ Die Teilkörper haben daher schon zum Zeitpunkt  $t=0$  ihre Grenzggeschwindigkeit  $v_o$ , mit der sie bis zur Gewässersohle fallen.
- ▶ Bekannt sind darüber hinaus die Masse und die Wichte des Schlicks, die Tiefe des Gewässers  $d$  und der Tiefgang der Schute.

Unter diesen Voraussetzungen kann die resuspendierte Schlickmenge in folgenden Schritten ermittelt werden



**Bild 3:** Ablaufdiagramm des Modells zur Abschätzung der resuspendierten Menge von verklapptem Schlick

(siehe Bild 3):

Ausgangspunkt des Berechnungsmodells ist die undrännierte Scherfestigkeit  $c_u$ . Im ersten Schritt ermittelt man damit die zugehörige obere Grenzggeschwindigkeit  $v_o$ , mit der die Teilkörper, in die der Schlick zerfällt, zur Gewässersohle sinken. Mit der oberen Grenzggeschwindigkeit  $v_o$  und der undrännierten Scherfestigkeit  $c_u$  läßt sich aus den Versuchsergebnissen daraufhin die Resuspensionsrate  $R$  bestimmen.

Zur Ermittlung der Gesamtoberfläche  $A$  der Teilkörper der Schlickmasse muß zunächst der Durchmesser  $D$  des Teilkörpers bestimmt werden, der mit einer konstanten Geschwindigkeit von der Größe der oberen Grenzggeschwindigkeit  $v_o$  zur Gewässersohle sinkt. Er ergibt sich aus der Gleichgewichtsbedingung, daß das Auftriebsgewicht der Schlickkugel gleich dem Strömungswiderstand ist (Kozeny, 1953). Mit dem Durchmesser  $D$  kann nun das Gewicht und die Oberfläche der kugelförmigen Teilkörper bestimmt werden. Damit ergibt sich aus dem Gewicht der Schutenfüllung unter Auftrieb und dem Gewicht der Teilkörper die Anzahl der Teilkörper und ihre Gesamtoberfläche  $A$ , in die die Schutenfüllung zerfällt.

Im letzten Schritt muß nun nur noch die Fallzeit der Schlickklumpen ermittelt werden. Sie ergibt sich aus der Fallgeschwindigkeit - der oberen Grenzggeschwindigkeit  $v_o$  - und der Falltiefe  $t_f$ , die ihrerseits aus dem Schutentiefgang und der Tiefe des Gewässers ermittelt wird.

Damit stehen die Zahlenwerte für die drei Größen: die Resuspensionsrate  $R$ , die Gesamtoberfläche der Teilkörper  $A$  und die Fallzeit  $t_f$  zur Verfügung, die man zur Ermittlung der Masse  $M_R$  des resuspendierten Baggerguts und damit zur Abschätzung des Gefährdungspotentials benötigt.

#### 4 Schlußbetrachtung

Das Modell zur Abschätzung der beim Verklappen in einer Trübungswolke resuspendierten Menge feinkörnigen Baggerguts basiert im wesentlichen auf Elementversuchen und ihrer quantitativen Auswertung. Bei der Modellierung wurden zwar eine Reihe von Vereinfachungen vorgenommen, doch sind die wesentlichen hydraulischen und bodenmechanischen Parameter erfaßt. Ob sie mit hinreichender Genauigkeit erfaßt wurden, kann erst beurteilt werden, wenn sich auch eine befriedigende Übereinstimmung zwischen der Vorhersage aus dem Modell und dem Naturversuch ergibt. Diese Bewährungsprobe für das Modell steht noch aus.

#### Literatur

- Kozeny, J. [1953], Hydraulik. Springer Verlag, Wien
- Pointdexter-Rollings, M.E. [1990], Methodology for analysis of subaqueous sediment mounds, Technical Report D-90-2, WES Vicksburg, Mississippi
- Raudkivi, A.J. [1981], Grundlagen des Sedimenttransports. Sonderforschungsbereich 79 "Wasserforschung im Küstenbereich", Universität Hannover