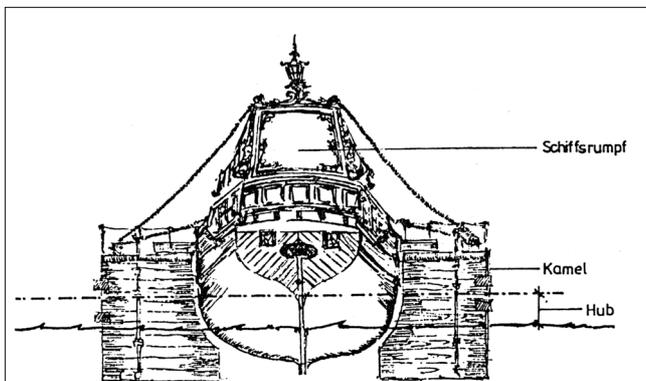


Charakterisierung der Einflussgrößen Schiffsumströmung und Propellerstrahl auf die Wasserstraßen

DIPL.-ING. HORST OEBIUS, TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

1 Einleitung

Schiff und Wasserstraße haben sich gegenseitig seit Anbeginn des Schiffsverkehrs beeinflusst. Nicht von ungefähr haben sich die meisten Handelsmetropolen an Flüssen oder an der offenen See gebildet. Über Jahrhunderte haben die Wasserstraßen den Tiefgang von Handelsschiffen bestimmt (so waren über hundert Jahre die Schiffe der flämischen Hanse im Tiefgang auf 4,62 m beschränkt, weil die Schelde keine größeren Abladetiefen zuließ. In Ausnahmefällen musste geleichtert oder zu anderen Hilfsmitteln wie z. B. Kamelen gegriffen werden; Bild 1).



Da die Tauchtiefe der Elbe bei nur etwa zwei Meter gelegen haben dürfte, mußten Schiffsrümpfe mit größerem Tiefgang aus Havelberg auf „Kamelen“ abtransportiert werden, pontonartige Schwimmkörper. Repro: BM

Bild 1: "Kamele" zum Transport von Schiffen über Untiefen

Die Motorisierung der Schifffahrt und damit das massive Anwachsen der Schiffsgefäße erforderte massive wasserbauliche Maßnahmen. Die Zeit des geruhsamen Verkehrs, wie er noch im vorigen Jahrhundert auch das Bild der Berliner Häfen bestimmte (Bild 2), war rasch vorbei. Damit begann auch die noch andauernde Diskussion über zulässige Schiffsgrößen und/oder entsprechende Baumaßnahmen an Fahrwassern, die häufig zu emotional geführt wird. Dieser Beitrag soll einige physikalische Grundlagen ins Gedächtnis zurückrufen und die Diskussion auf eine wissenschaftliche Basis führen.

Die ersten Untersuchungen in Berlin über den Einfluss von verschiedenen Kanalformen auf den Widerstand des Schiffes und über die Einwirkung von Schiffspropellern auf die Kanalsohle wurden 1906 von dem damaligen Direktor der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau (VWS), Herrn Thiele, sowie 1908 – 1910 von seinem Nachfolger, Herrn Krey, durchgeführt. Dem starken Engagement von Herrn Thiele ist es zu



Bild 2: Binnenschiffahrt in Berlin um die Jahrhundertwende

verdanken, dass sich die VWS sehr schnell zu einer der führenden Forschungsinstitutionen auf diesem Gebiet entwickelte, eine Tradition, die nach dem Kriege von der VWS Berlin, der BAW Karlsruhe und der FAS Berlin fortgeführt wurden. Die jeweiligen Arbeiten werden hier als bekannt vorausgesetzt /z. B.: KREY, H.D. (1911), KREITNER, J. (1934), SCHUSTER, S. (1954), RÖMISCH, K. (1969), FELKEL, K.; STEINWELLER, H. (1973), FÜHRER, W.; RÖMISCH K. (1977), OEBIUS, H. (1984). Ihre Ergebnisse werden im Folgenden aber noch einmal kurz zusammengefasst.

2 Vom Schiff erzeugte Strömungen

Zwischen einem unter Vortrieb fahrenden Schiff und dem Fahrwasser bestehen hydrodynamische Wechselbeziehungen, die den Schiffsverkehr behindern sowie Schäden an Gewässersohlen, Böschungen und am Schiff hervorrufen können. Träger dieser Wechselwirkungen sind im Wesentlichen (Bild 3)

- die Ausbildung einer Verdrängungsströmung, d. h. die Umlenkung des Wasserkörpers um den Verdrängungskörper Schiff bei dessen Fortschritt durch das Fahrwasser,
- die Erzeugung des erforderlichen Vortriebs des Schiffes durch eine Schubströmung sowie
- Gewässersohlen, Uferzonen, seitliche Befestigungen wie z. B. Deckwerke an Kanalwänden und Bauwerke.

Die erstgenannte Komponente charakterisiert sowohl das hydrodynamische System, das erforderlich ist, um die Fahrt eines Schiffes durch das Wasser zu ermögli-

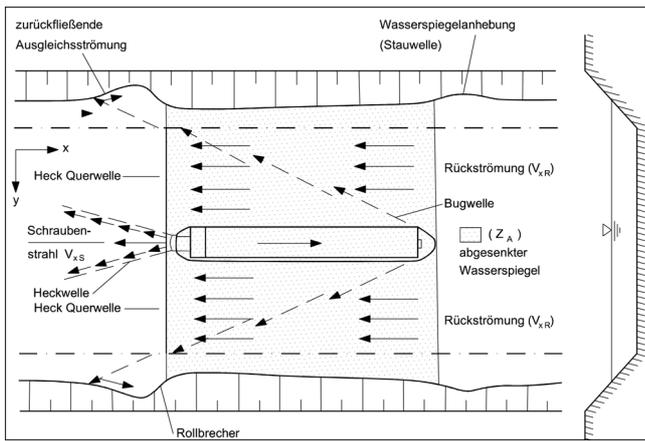


Bild 3: Primäres und sekundäres Wellenbild bei Fahrt eines Schiffes

chen, als auch die Größe des Widerstandes, den der Wasserkörper auf ein fahrendes Schiff ausübt. Die zweite Komponente dient zur Überwindung des Widerstandes sowie zur Erzeugung eines Energieüberschusses, der in Fortschrittsgeschwindigkeit des Schiffes umgesetzt wird. Die dritte Komponente schließlich charakterisiert zusätzliche Reibungs- und Widerstandskomponenten, die aus seitlicher und/oder tiefenmäßiger Einschränkung des Fahrwassers herrühren. In letzterem Fall werden die beiden erstgenannten Komponenten an der Berandung gespiegelt und können zu hydrodynamischen Zuständen führen, bei denen z. T. erheblich größere Umströmungsgeschwindigkeiten als bei unbeschränkter Fahrt des Schiffes herrschen und die direkt oder indirekt an den Spiegelflächen Gewässersohle und Uferbereiche Schäden hervorrufen können. Ebenso können so starke hydrodynamische Effekte auftreten, dass sie die Fahrsicherheit des Schiffes beeinträchtigen.

Von einem fahrenden Schiff erzeugte Strömungen können drei Kategorien zugeordnet werden, und zwar dem primären Wellensystem, dem sekundären Wellensystem sowie dem Propulsionsorgan.

2.1 Das primäre Wellensystem des Schiffes

2.1.1 Ungestörtes Fahrwasser

Das sog. primäre Wellenbild entsteht bei Bewegung einer punkt- oder linienförmigen Störung über einen Wasserkörper als zur Bewegungsrichtung transversales Wellensystem unabhängig von der Berandung, aber auch bei jeder räumlichen Struktur in einem strömenden Medium (z. B. Schiffe, Wehre, Ölsperren, Brückenpfeiler, Dalben etc.). Im Folgenden soll nur der Verdrängungskörper Schiff betrachtet werden.

Dieser baut bei Anströmung oder Bewegung durch den Wasserkörper einen "Wasserberg", die Frontwelle, vor sich auf, bis das dabei erzeugte Gefälle ausreicht, das Wasser unter dem Widerstand "Schiffskörper" hindurch

sowie seitlich um ihn herum und an dem Schiff entlang von vorn nach hinten strömen zu lassen. Dieser aufgestaute „Wasserberg“ ist um so höher, je größer der zu überwindende Widerstand ist. Hierbei spielt in der Regel bei unterkritischen Verdrängungsströmungszuständen, d. h. bei strömendem Abfluss unter und neben dem Schiffskörper, der Reibungswiderstand entlang der Schiffsaußenhaut eine gewichtigere Rolle als der wellenbildende Widerstand, d. h. die Gesamtheit aller nicht Reibungseinflüssen zuzuordnenden Widerstände an einem Schiff (Bild 4). Bei überkritischen Strömungszuständen, d. h. schießendem Abfluss neben und unter dem Schiffskörper, kann der wellenbildende Widerstand den Reibungswiderstand übertreffen.

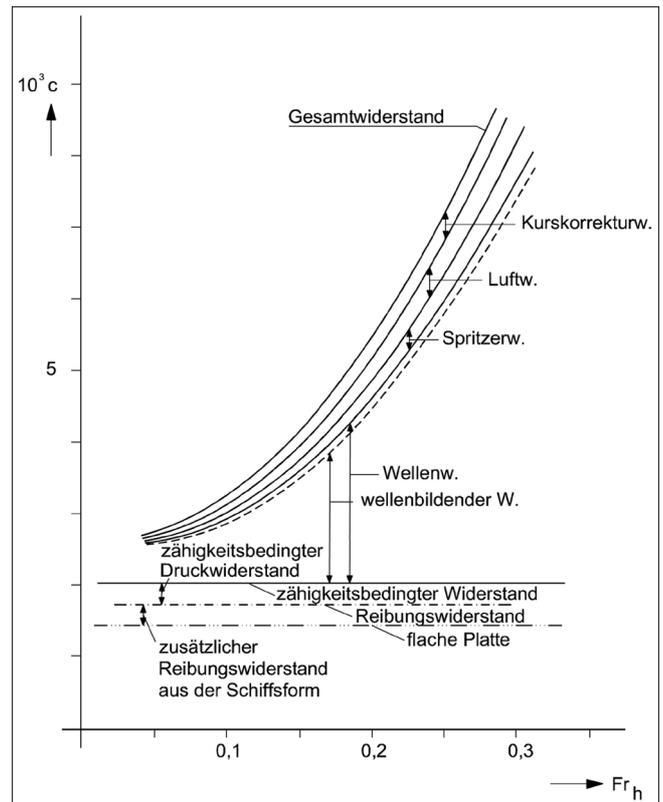


Bild 4: Widerstandskomponenten bei Fahrt eines Schiffes durch Wasser

Bei der Umströmung verdrängt der Schiffskörper das abfließende Wasser nach unten und zu den Seiten. Da hinter dem Schiff kein Vakuum entstehen kann, müssen alle Stromfäden gleichzeitig hinter dem Verdrängungskörper Schiff wieder zusammenlaufen, was mit einer schiffsformabhängigen Geschwindigkeitserhöhung um den Schiffskörper verbunden ist. Diese äußert sich in einem Absinken des Wasserspiegels. Dieser "Sunk" ist der Geschwindigkeitsverteilung umgekehrt proportional, d. h. die größte Wasserspiegeldifferenz (niedrigste Lage der Isohypsen) tritt an der Stelle größter Geschwindigkeitsdifferenz (jeweils zum ungestörten Zustand) auf.

Hinter dem Schiff muss der vom Schiff ungestörte Strömungszustand und die ungestörte Wasserspiegellage wieder erreicht werden. Das erfolgt zum einen durch

ein zur Fahrtrichtung transversales Wellensystem am Heck des Schiffes, den Wechselsprung, dessen Ausbildung abhängig vom Strömungszustand unter dem Schiff ist, zum anderen durch eine Rückströmung als Folge der Energierückgewinnung.

Diese Verhältnisse lassen sich über den statischen Druck auch messtechnisch nachweisen (Bild 5).

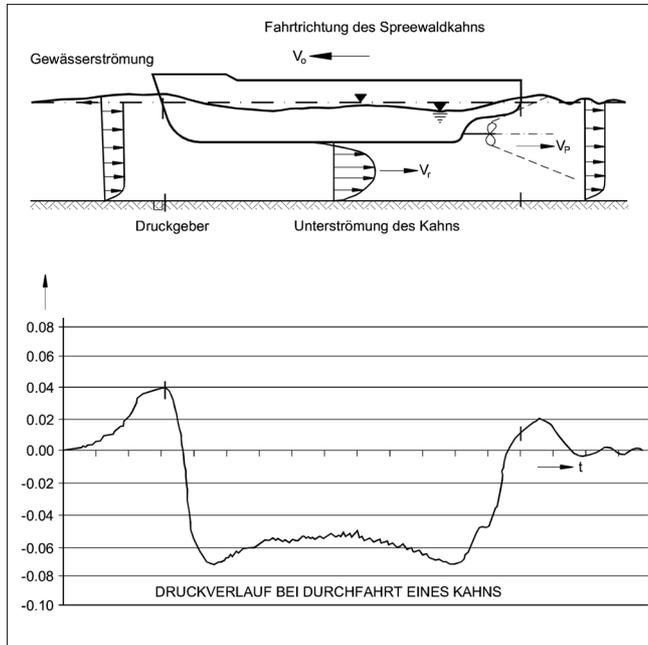


Bild 5: Druckverlauf am Boden bei Durchfahrt eines Schiffes

In ungestörtem Fahrwasser klingen Aufstau, Schiffsumströmung und Energierückgewinnung von einem Maximum direkt am und um den Schiffskörper zu den Seiten und zur Wassertiefe hin ab. Hierbei stellt der Sunk neben dem Schiffskörper ein "Loch" dar, in das das umgebende Wasser von den Seiten her hineinströmt.

Zusätzlich stellt dieses "Loch" eine Senke dar, in der sich das Schiff bewegt. Es fällt sozusagen in sein eigenes primäres Wellental. Dieser Vorgang wird mit "Squat" bezeichnet.

2.1.2 Flachwassereffekt

Fährt ein Schiff auf tiefenmäßig beschränktem Wasser (sog. Flachwassereffekt), wie es bei fast allen Zufahrten zu Häfen an der Küste und bei vielen breiteren Flüssen und Kanälen der Fall ist, üben diese Berandungen einen zusätzlichen Widerstand auf die Unterströmung aus, da sie die Stromfäden zusammenpressen, d. h. spiegeln. Die Öffnung, durch die das Wasser von vorn nach hinten strömen muss, wird kleiner, der erforderliche "Wasserberg" für die Widerstandsüberwindung höher und die Umströmungsgeschwindigkeit größer. Je geringer der Abstand zwischen Schiffsboden und Gewässersohle ist, desto größer ist auch der zu überwindende Widerstand (Bild 6). Dieser Flachwassereffekt

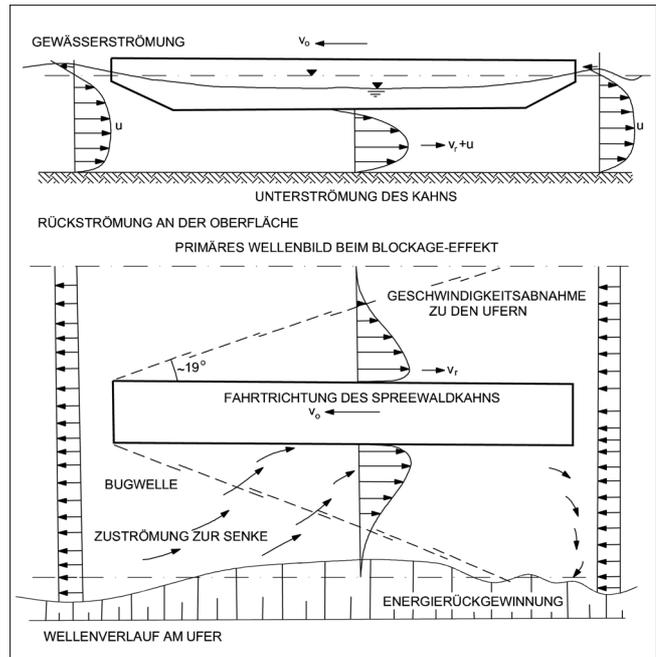


Bild 6: Umströmung eines Schiffes bei Fahrt unter Blockageverhältnissen

wird durch die Froudesche Tiefenzahl

$$Fr = v_s / (g \Delta h)^{1/2} \quad (1)$$

mit

v_s = Fortschrittsgeschwindigkeit des Schiffes

g = Gravitationskonstante

Δh = Wassertiefe h_f minus Tauchtiefe des Schiffes h_{TF}

charakterisiert. Sie repräsentiert das Verhältnis der Schiffsfortschritts­geschwindigkeit zur Schwallwellen­geschwindigkeit, d. h. zu der Geschwindigkeit, mit der sich Störungen in einer Strömung stromauf bewegen, oder mit der sich ein Widerstand im Abfluss stromauf bemerkbar macht. Bleibt die Schiffsgeschwindigkeit unterhalb der Schwallwellengeschwindigkeit, d. h. bleibt die Froudesche Tiefenzahl unter dem kritischen Wert $Fr = 1$, herrscht unter dem Schiffsboden strömender Abfluss, und der Widerstand wächst rasch proportional zur Schiffsgeschwindigkeit an (Bild 7). Bei der Froudeschen Tiefenzahl $Fr = 1$ entsteht ein Widerstandsmaximum. Übersteigt die Schiffsgeschwindigkeit die Schwallwellengeschwindigkeit, d. h. wird $Fr > 1$, geht die Unterströmung des Schiffes in den schießenden Zustand über /SCHUSTER 1952/.

Das bedeutet, dass die Froudesche Tiefenzahl gleichzeitig ein Maß für die Abströmgeschwindigkeit unter dem Schiffsboden darstellt. Bei gleichem Hauptspantquerschnitt, gleicher Fortschrittsgeschwindigkeit und gleicher Tauchtiefe ist diese Geschwindigkeit umso größer, je kleiner der Restquerschnitt zwischen Schiffsboden und Gewässersohle ist. Umgekehrt bedeutet dies auch, dass die bei einem vorgegebenen Hauptspantquerschnitt und einer vorgegebenen Fortschrittsgeschwindigkeit dem Träger "Verdrängungsströmung" zuzurechnenden

Wechselbeziehungen in einem Fahrwasser umso größer sind, je kleiner der verbleibende Abflussquerschnitt ist.

Ersetzt man die Fortschrittsgeschwindigkeit des Schiffes durch die kritische Verdrängungsgeschwindigkeit v_{kr} unter dem Schiff, die den Übergang vom Strömen zum Schießen charakterisiert, erhält man die kritische Froudezahl nach FUEHRER & RÖMISCH /1977/.

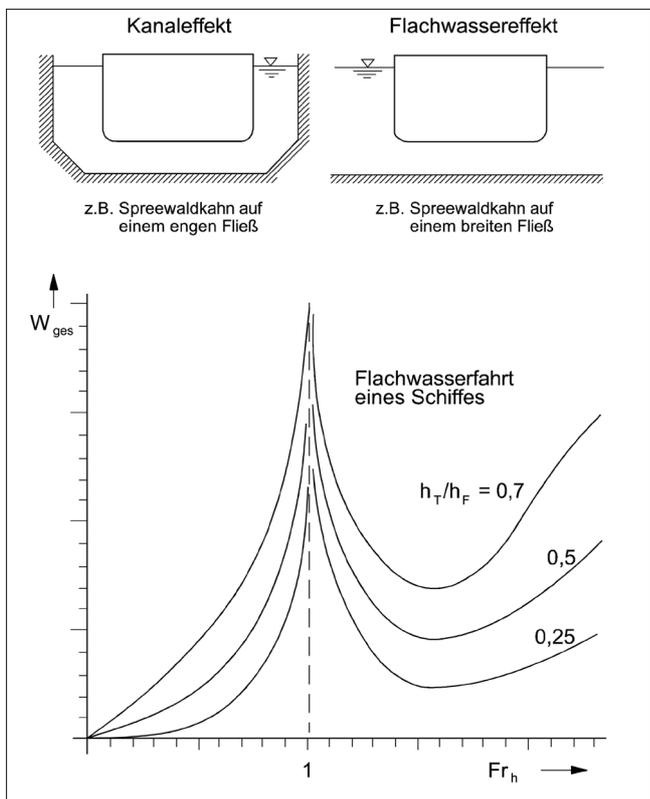


Bild 7: Schiffswiderstand bei verschiedenen Fahrt- und Gewässerbedingungen

Die Ausbildung der Strömungsverteilung unter dem Schiffskörper ist gleichzeitig das Hauptkriterium für das Entstehen von Erosionen an Gewässersohlen. FUEHRER & RÖMISCH /1985/ haben nachgewiesen, dass die Verteilung zwischen Schiffsboden und Gewässersohle der einer Rohrströmung gleicht, dass also für die Ermittlung der kritischen Sohlschubspannungsgeschwindigkeiten in erster Näherung die Gesetze der turbulenten Rohrströmung gelten /SCHLICHTING 1965/. Das danach eintretende logarithmische symmetrische Geschwindigkeitsprofil wird allerdings durch die unterschiedlichen Rauigkeiten des Schiffsbodens und der Gewässersohle verzerrt.

Die erhöhten Abströmgeschwindigkeiten begünstigen auch den Squat. Unter Extrembedingungen kann dieser so stark sein, dass das Schiff Grundberührung erfährt, was zu Beschädigungen der Schiffshaut oder des Propulsionsorgans führen kann. Gleichzeitig wird bei

Grundberührung auch die Gewässersohle beschädigt. Drittens kann eine überkritische Geschwindigkeit unter dem Bootskörper zu einem Schlauchdrossel-effekt führen, d. h. dass der Bootskörper durch die Strömung in Position gehalten wird und seine Manövrierfähigkeit verliert. Dieser Fall ist besonders kritisch, da er nicht vorhersehbar ist. Zusätzlich kann ein solches Vertrimmen auch den Kurs des Schiffes beeinflussen (Ausbrechen aus einem Kurs).

2.1.3 Blockageeffekt

Wird das Fahrwasser zusätzlich auch noch seitlich beschränkt, wie es bei allen Brandenburger Kanälen und den meisten deutschen Kanälen der Fall ist (sog. Blockage- oder Kanaleffekt), wird auch die seitlich verfügbare Öffnung für die Umströmungsgeschwindigkeit eingengt und damit ein weiterer Widerstand aufgebaut. Dieser Blockageeffekt n wird gekennzeichnet durch das Verhältnis des verfügbaren ungestörten Wasserquerschnitts F_w zum Hauptspantquerschnitt F_s des Schiffes. Das bedeutet, dass bei einer vorgegebenen Fortschrittsgeschwindigkeit die Leistung eines Motors umso mehr gesteigert werden muss, je größer der Blockageeffekt, d. h. je größer das Verhältnis des getauchten Hauptspantquerschnitts zum benetzten Abflussquerschnitt, ist.

Zusätzlich wird die Verdrängungsströmung nun auch an den seitlichen Berandungen gespiegelt. Bei senkrechten Ufern erfolgt eine stärkere Rückkopplung mit dem Schiffskörper, d. h., dass die Spiegelung vollständiger ist. Bei geneigten seitlichen Berandungen, wie sie ein Ufer eines Flusses oder eines trapezförmigen Kanalquerschnitts darstellt, bildet sich am Ufer ein hydrodynamisches System aus mit einer an der Schulter des Schiffes auf die Berandung zu- und dann von ihr weggerichteten Strömung, die ein zusätzliches Sinken des Wasserspiegels am Ufer hervorruft. Die Änderung des Wasserspiegels ist dabei um so größer, je näher die Spiegelabsenkung des Schiffskörpers am Ufer liegt, d. h. je enger der Fluss ist, und je größer der Sunk ist. Die vom Ufer weggerichtete Strömung wird anschließend durch den Aufstau am Heck (die Energierückgewinnung) kompensiert und in der Strömungsrichtung umgedreht. Dabei läuft sie wieder auf das Ufer zu und produziert ein Wirbelsystem, das hinter dem Schiff mit dessen Geschwindigkeit herläuft. Gleichzeitig äußert sich die Energierückgewinnung in einer Welle (Heckwelle), die am Ufer zum Brechen führen kann, wenn das Energiepotenzial zwischen dem Sunk und dem Anstieg zu groß wird (Bild 8) oder die Heckwelle mit der Bugwelle interferiert.

Zur Ermittlung der kritischen Umströmungsgeschwindigkeit unter dem Schiffskiel in Abhängigkeit vom Blockageeffekt n haben KREY /1911/, KREITNER /1934/, BOUWMEESTER /1977/, FUEHRER /1977/ und RÖMISCH /1990/ grundlegende Untersuchungen durchgeführt. Auf sie wird im Kapitel 4.2 näher eingegangen.

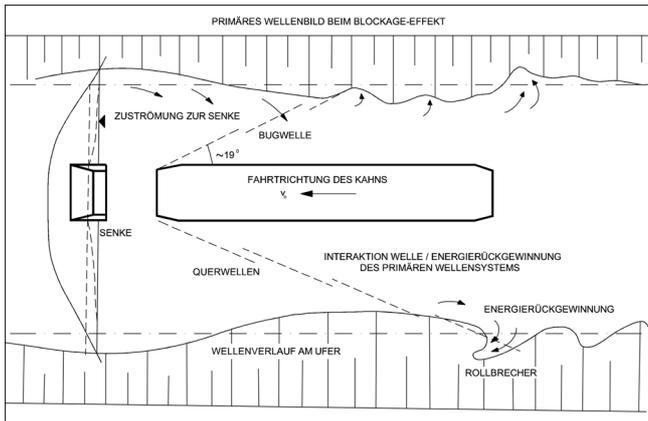


Bild 8: Entstehen eines Rollbrechers am Ufer

2.2 Das sekundäre Wellensystem

Das sekundäre Wellensystem, die Bug- und Schullerwelle eines Schiffes, ist eine Folge des Formwiderstandes (wellenbildender Widerstand Bild 5) und drückt dessen Energiepotenzial aus. Sie bildet sich an der Wasseroberfläche als zur Fortschrittsrichtung divergentes Wellensystem aus, das sich mit Fortschrittschwindigkeit des Schiffes fortpflanzt. Seine Höhe ist der Stauenergie (dem Druckpotenzial) proportional, d. h. umso größer, je größer der wellenbildende Widerstand ist. Es besteht aus mehreren Einzelwellen, deren Periode von der Froudeschen Tiefenzahl abhängt. Dieses Wellensystem interferiert mit dem transversalen des primären Wellensystems. Der Winkel α der Schiffsachse mit dem geometrischen Ort der Schnittpunkte beider Wellensysteme ist ebenfalls von der Froudezahl abhängig. Im unterkritischen Strömungsbereich ($0 < Fr < 0,6$) liegt der Ausbreitungswinkel nahezu konstant bei ca. $19^\circ 18'$. Im Bereich $0,6 < Fr < 1$ wächst der Winkel α rasch an und erreicht bei $Fr = 1$ den Wert 90° . Dann überlagern sich transversale und divergente Wellen zu einer einzigen Bugwelle. Gelingt es dem Schiff, auf diese Welle aufzulaufen, fährt es praktisch widerstandslos auf seiner eigenen Bugwelle weiter. Bei weiter gesteigerter Froudezahl bleiben die transversalen Wellen hinter dem Schiff zurück (ein Überschreiten der Schwallwellengeschwindigkeit ist nicht möglich) und die divergenten Wellen nehmen asymptotisch wieder den Wert ca. $19^\circ 18'$ ein.

Beide Wellensysteme laufen auf die Ufer zu und werden dort refraktiert. Die dabei entstehenden Druckwechsel und Wasserstandsänderungen allein können zu Erosionen der Ufer führen. Diese Wellen besitzen dann das größte Erosionspotential, wenn der Interferenzpunkt des transversalen und des divergenten Wellensystems mit der Uferlinie zusammenfällt. Dann kann es zum Brechen des Wellensystems kommen (Rollbrecher) und damit zu erhöhter Energieabgabe an das Ufer. Dies kann die Erosion fördern. Dieser Fall eines Rollbrechers ist ebenfalls in Bild 6 dargestellt.

2.3 Der Einfluss des Propulsionsorgans

Generell ist es Aufgabe des Propulsionsorgans, die gewünschte Geschwindigkeit des Schiffes oder Schiffsverbandes sicherzustellen. Hierbei sind grundsätzlich zwei Typen zu unterscheiden, und zwar

- Brettartige Strukturen, die in das Wasser getaucht und mit größerer Geschwindigkeit entgegen der Fahrtrichtung durch das Wasser bewegt werden (Riemen, Paddel, Schaufelräder). Der Vortrieb wird dabei als Reaktion der Umströmung dieser Struktur erzeugt.
- Strahlpropulsoren der verschiedensten Art, in klassischer Bauweise als Propeller, neuerdings aber auch zunehmend Wasserstrahlantriebe. Sie erzeugen den Schub (den Vortrieb) als Reaktion eines Strahls, der entgegen der Fahrtrichtung produziert wird und dem Fahrzeug die gewünschte Geschwindigkeit verleiht.

Beide Antriebstypen sind durch starke Wirbel gekennzeichnet, die bei Berührung mit der Gewässersohle stark erodierend wirken.

Propeller- und Wasserstrahlen ähneln sich physikalisch, haben aber unterschiedliche hydrodynamische Strukturen (Bild 9). Danach besitzen beide Systeme

- eine Kernzone, innerhalb derer die maximale Austrittsgeschwindigkeit abgebaut wird, und
- eine Diffusionszone, innerhalb derer die kinetische Strahlenergie, bezogen auf die des umgebenden Wasserkörpers, in potenzielle umgewandelt wird.

In tiefgetauchten, rotationssymmetrischen Freistrahlen ist die Geschwindigkeitsverteilung als Funktion des Abstandes x von der Strahlquelle und des Abstandes r von der Strahlachse

in der Kernzone:

$$u_{s,x,r} = u_0 \exp \left(-1/2 \left(\left(r + (D_0/2) \right) \left((x/x_0) - 1 \right) / (D_0 x/2 x_0) \right)^2 \right) \quad (2)$$

und in der Diffusionszone:

$$u_{s,x,r} = u_0 \exp \left(-1/2 \left(\left(r - (0,3 D_0 (x/D_0)^{-0,3}) \right) / \left((D_0/2) - (0,3 D_0 (x/D_0)^{-0,3}) \right) \right)^2 \right) \quad (3)$$

Hierin sind u_0 = Abstrahlgeschwindigkeit an der Düse D_0 = Düsendurchmesser und x_0 = Länge der Kernzone = $6,2 D_0$. Das Geschwindigkeitsmaximum liegt analog zu einer Rohrströmung in der Zentralachse und bleibt nach Verlassen der Düsenöffnung bis zu einer Entfernung

$$x_0 = 6,2 D_0$$

bestehen, ist also völlig unabhängig von der Austrittsgeschwindigkeit. Der Ausbreitungswinkel des Wasserstrahls ist ebenfalls von der Geschwindigkeit unabhängig und liegt bei 9 Grad.

Beim Propellerstrahl sind die entsprechenden Geschwindigkeitsverteilungen in der Kernzone:

$$u_{px,r} = (u_0 D_0) / (2(D_0/2) + 0,0807(x-x_0)) \cdot \exp(-1/2 (r + (D_0/2)((x/x_0)-1)) / ((D_0/2) + 0,0807(x-x_0)))^2 \quad (4)$$

und in der Diffusionszone:

$$u_{px,r} = 1,5 u_0 (x/D_0) - 0,6 \cdot \exp(-1/2 (r - (0,3 D_0 (x/x_0)^{-0,3})) / ((D_0/2) + 0,0807(x-x_0) - (0,3 D_0 (x/D_0)^{-0,3})))^2 \quad (5)$$

Hierin sind u_0 = Abstrahlgeschwindigkeit am Flügelaufpunkt des Propellers = zu berechnen nach Lerbs, $D_0 = 2(0,67 R_F + R_N)$ mit R_F = Flügelradius und R_N = Nabenradius und x_0 = Kernzonenzlänge des Propellerstrahls = $2 D_0$.

Propellerstrahlen breiten sich also unmittelbar nach Verlassen der senkrechten Propulsionsebene aus. Eine von den Schiffbauern propagierte Strahlkontraktion existiert nicht! Die Ausbreitung erfolgt sogar nach Verlassen der Flügelaufpunkte auf Grund der starken Energie-dissipation in radialer Richtung durch die Spitzenwirbel viel rascher als beim reinen tiefgetauchten rotations-symmetrischen Wasserstrahl. Der entsprechende Ausbreitungswinkel liegt bei $18,8^\circ$, also deutlich höher als beim Freistrahler / OEBIUS 1984, OEBIUS & SCHUSTER 1984/.

Parallel zu einem Gewässerboden wirkende Strahlen führen dann zu Erosionen, wenn sich die senkrechte Strahlebene mit der horizontalen Ebene des Bodens verschneidet (Bilder 10 und 11). Dies ist beim Propellerstrahl eher zu erwarten als beim Freistrahler. Wirken hingegen die Strahlen in einem Winkel zum Boden, kann der Freistrahler auf Grund seiner kompakteren Entwicklungslänge größere Erosionen hervorrufen.

Grundsätzlich ist das Ausmaß der Erosionen eng mit der Einwirkzeit des erodierenden Strahls verbunden (Bild 11). Je schneller das Schiff fährt, um so schneller gleitet auch der Propellerstrahl über die Sohle und um so kürzer ist die Einwirkzeit pro Fläche. Die größten Erosionen entstehen dann, wenn der Propeller bei gleichzeitigem Stillstand des Fahrzeugs mit höchster Belastung läuft, d. h. beim Standversuch oder beim Anfahren.

3 Erzeugte Erosionen

3.1 Allgemeines

Schiffahrtsbedingte Erosionen können nur bei tiefenmäßig und/oder seitlich beschränktem Fahrwasser auftreten und entstehen sowohl durch die Verdrängungs- und Propellerströmungen des Schiffes, als auch durch die erzeugten Druckwechsel im primären und sekundären Wellensystem. Diese sind eine Funktion der geo-

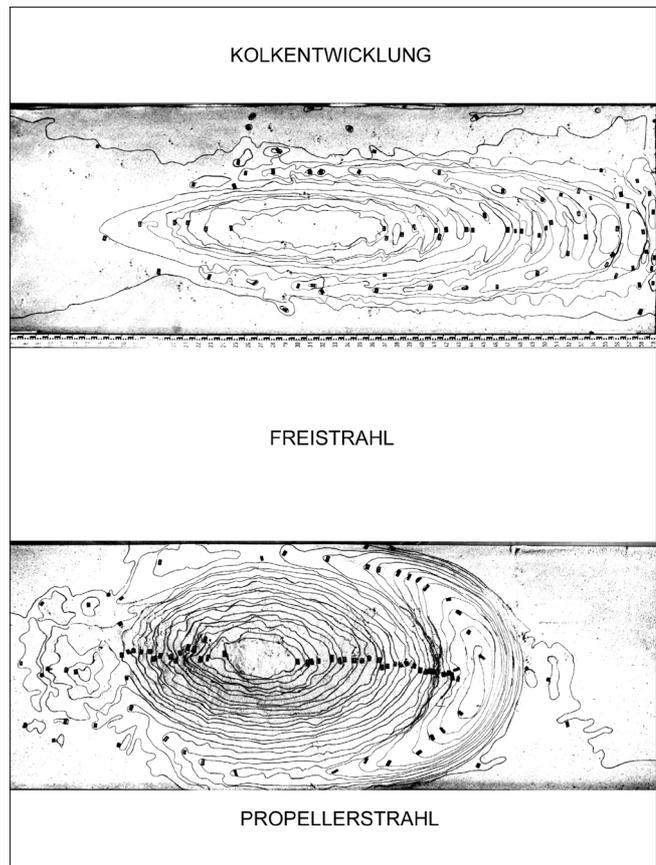


Bild 10: Vergleich von Frei- und Propellerstrahlerosionen

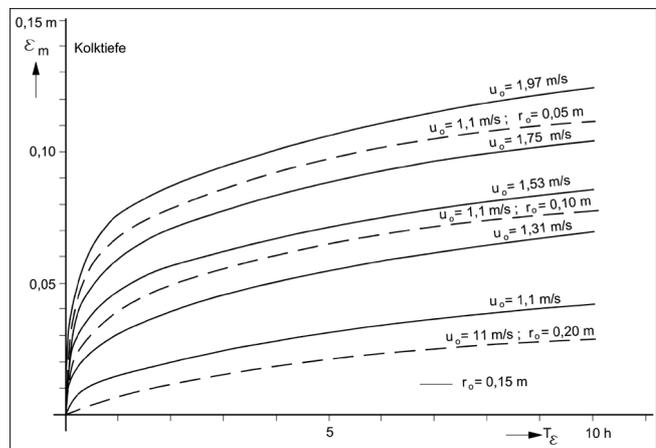


Bild 11: Kolk-tiefe als Funktion des Bodenabstands und der Einwirkzeit des Propellers

metrischen (tiefenmäßigen Beschränkung, Blockage-verhältnis n), der hydrodynamischen (Froudesche Tiefenzahl, Fortschrittsgeschwindigkeit des Schiffes) sowie der sedimentologischen Randbedingungen des Fahrwassers. Grundsätzlich sind die Berandungen bestrebt, ein Gleichgewicht zwischen dem Strömungs-/Druckerzeuger, seiner Lage zu den Berandungen und der Stabilität der Berandungselemente herzustellen. Gelingt dies nicht, reagieren die Sohle und die Ufer so lange mit Sedimentumlagerungen, bis diese Balance erreicht wird. Vorbedingung für Erosionen ist also, dass an dessen Sohle und/oder Böschungen hydrodynamische

sche Zustände entstehen, die für die Stabilität der Grenzfläche Hydro-/Lithosphäre überkritisch sind. Sind (z. B. wegen Panzerung der Ufer und Sohle) keine Sedimentumlagerungen möglich, werden die Berandungen bestrebt sein, dem Schiff einen zum Kräftesystem neutralen Kurs aufzuzwingen.

Die Ermittlung von Erosionen an den Grenzflächen Gewässersohle oder Ufer kann grundsätzlich auf drei Arten erfolgen, und zwar

- durch Berechnung der Auskolkungen auf Grund einer mathematischen Beschreibung der Einflüsse aus der Verdrängungsströmung, dem Propulsionsorgan (aktives Vorgehen) und der Druckdifferenzen,
- durch Ermittlung der nach einem Einfluss aufgetretenen Veränderungen an der Grenzfläche Gewässersohle und/oder Ufer und Rückschluss auf die einwirkenden Kräfte (reaktives Vorgehen), sowie
- durch Messung dieser Einflussgrößen aus der Verdrängungsströmung, dem Propulsionsorgan und der Druckdifferenzen mittels spezieller Geräte (passives Vorgehen).

Die aktive Berechnung von Erosionen hängt von so vielen Randbedingungen der Sohle, der hydromechanischen Zustände und des Schiffskörpers ab, dass eine Vorausberechnung und Prognose solcher Erosionen universell kaum möglich ist. Das gilt auch für numerische n-D-Modelle.

Die reaktive Beurteilung und Prognose von Erosionen ist die z. Z. gängigste Methode und hat in Einzelfällen zu akzeptablen Prognosemodellen geführt /RÖMISCH 1990, FUEHRER & RÖMISCH 1977, BOUWMEESTER et al. 1977, v. d. KAA et al. 1985/. Eine Übertragung von Einzelmessergebnissen auf andere Verhältnisse ist aber nur in Ausnahmefällen zulässig.

Die dritte Methode hat bei der Messung der Druckdifferenzen zu guten Erfolgen geführt, hinsichtlich der Strömungen gab es bisher große Defizite. Hier steht jetzt ein Gerät zur Verfügung, auf das im Rahmen dieses Beitrags näher eingegangen wird.

3.2 Aktive Berechnung von Erosionen

3.2.1 Verdrängungsströmung

3.2.1.1 Tiefenmäßig beschränktes Fahrwasser

Bei nur tiefenmäßig beschränkten Fahrwassern haben nur erzeugte Strömungen aus dem primären Wellenbild und der Propulsion eine Bedeutung. Druckdifferenzen werden in Strömung umgewandelt. Bei einspurigem Verkehr in der Hauptfahrrinne des Fahrwassers bildet sich dort eine Vertiefung aus mit Verlagerung des Sediments zu beiden Seiten. Bei zweisepurigem Betrieb

eines Fahrwassers entsteht auf jeder Seite eine solche Fahrrinne mit einer Auflandung in der Mitte, das bekannte W-Profil. Die Berechnung der Erosionen kann nach den gängigen Verfahren des Sedimenttransports erfolgen /SHIELDS 1936, MEYER-PETER & MÜLLER 1949, BAGNOLD 1966, EINSTEIN 1950, 1957/, vorausgesetzt, die Geschwindigkeitsverteilung der Verdrängungsströmung über die Tiefe ist bekannt. Diese hängt von der Geometrie des Schiffsunterbodens und der Bodenfreiheit des Kiels ("under keel clearance") ab.

Bei unendlich breitem, flachem Unterboden des Schiffes ist in erster Näherung die mittlere Verdrängungsströmungsgeschwindigkeit der Schiffsgeschwindigkeit proportional nur mit entgegengesetzter Strömungsrichtung. Außerdem kann von einer gleichmäßigen Verteilung der Strömung zwischen Gewässersohle und Schiffsboden ausgegangen werden, d. h. sie ähnelt vollständig einer turbulenten Rohrströmung mit Grenzschichtbedingungen an der Sohle und am Schiffskörper und vom Bug zum Heck zunehmender Grenzschichtdicke. Letztere bewirkt eine Zunahme der Geschwindigkeit zum Heck hin und ein Vertrimmen des Schiffskörpers in Längsachse. Die Amplitude der Frontwelle und der Sunk entlang des Schiffskörpers lassen sich in erster Näherung durch den Bernoulli-Ansatz

$$v_m = c_1 (g \cdot \Delta h)^{1/2} \quad (6)$$

berechnen mit Δh = Wasserspiegeldifferenz zwischen Aufstau und Sunk und c_1 einer Konstanten, die den Einfluss des Squats charakterisiert (dieser engt den Abflussquerschnitt stärker ein, als er sich aus der Wasserspiegeldifferenz ergibt). Logarithmischen Grenzschichtverlauf angenommen, läßt sich nun nach HJULSTRÖM /1935/ (Bild 12) die dazugehörige, für den Sedimenttransport kritische Korngröße angeben. Unter diesen Bedingungen ist die Geschwindigkeitsverteilung von der Bodenfreiheit des Schiffes unabhängig und die kritische Sohlschubspannungsgeschwindigkeit, d. h. diejenige Geschwindigkeit, bei der das Sediment aus dem Verband gelöst und abtransportiert wird, eine Funktion der Druckdifferenz und der "Rohrreibung". Für die Ermittlung der Rauigkeitsanteile kann das MOODY-Diagramm /SCHLICHTING 1965/ herangezogen werden.

Andererseits läßt sich bei Kenntnis der autochthonen Korngröße diejenige kritische Schiffsgeschwindigkeit definieren, bei der ein Sedimenttransport zu erwarten ist.

Auch unter realen Bedingungen mit relativ schmalen Schiffsunterböden im Vergleich zur Fahrwasserbreite und unterschiedlichen Rauigkeiten an der Schiffsaußenhaut und an der Gewässersohle treten Strömungsverteilungen auf, die denen von Rohrströmungen gleichen /FUEHRER & RÖMISCH 1977, BOUWMEESTER et al. 1977/. Dennoch können die Stromfäden auch seitlich ausweichen, sodass für die Verdrängungsströmung ein viel größerer Querschnitt zu Verfügung steht.

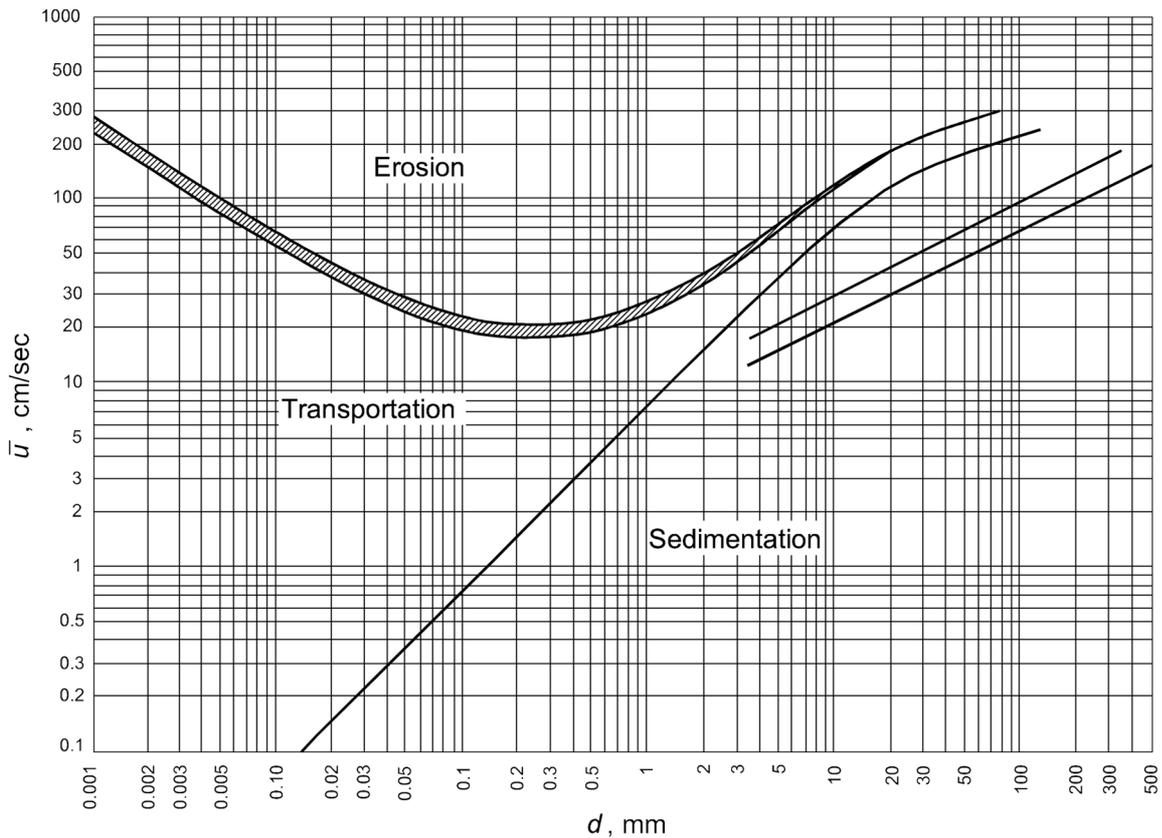
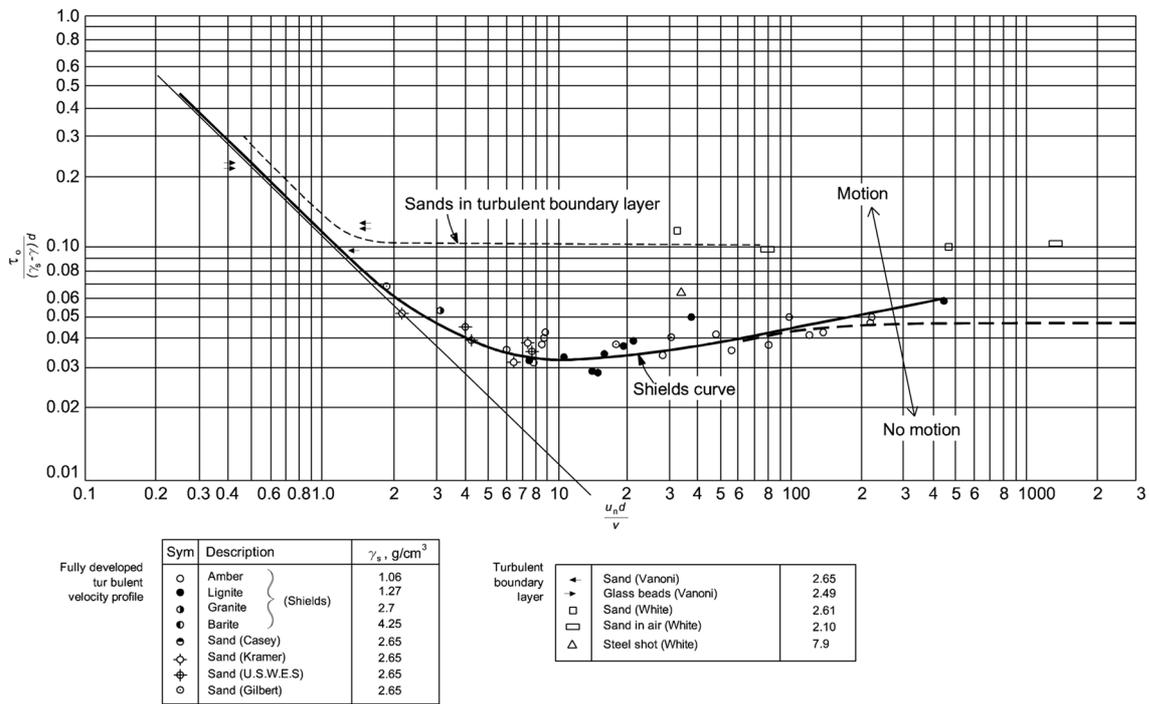


Bild 12: Sedimenttransportdiagramme nach Shields und Hjulström

Die sich dann einstellende Geschwindigkeitsverteilung und vor allem die für Erosionen maßgebliche kritische Sohlschubspannungsgeschwindigkeit lassen sich nicht mehr problemlos vorausberechnen. In letzter Zeit haben CFD-Programme (Computerized Fluid Design) weitere Möglichkeiten eröffnet, sie müssen jedoch kalibriert werden.

Ist die Strömungsverteilung bekannt, kann die entsprechende Sohlschubspannungsgeschwindigkeit errechnet werden, die wiederum über semiempirische Sedimenttransportansätze /ZANKE 1982/ Lösungen zur Abschätzung von Erosionen an der Gewässersohle ermöglicht. Zu berücksichtigen hierbei bleibt der Geltungsbereich der einzelnen Ansätze, besonders hinsichtlich der Korngrößenverteilungen.

3.2.1.2 Tiefenmäßig und seitlich beschränktes Fahrwasser

Bei auch seitlich beschränktem Fahrwasser wird primär das seitliche Ausweichen der Stromfäden unter dem Schiffskörper behindert. Dabei stellt auch die seitliche Begrenzung eine Spiegelebene dar, an der die Verdrängungsströmung reflektiert wird, und zwar umso vollständiger, je steiler die Uferwände sind. Die Form der Begrenzung bestimmt das sich schließlich einstellende Profil. Gleichzeitig beeinflusst die Rauigkeit der Ufer die Entwicklung der Grenzschicht und damit auch der Strömungsverteilung im Fahrwasserquerschnitt. Wie diese unter dem Schiffsboden und seitlich des Schiffskörpers schließlich aussieht, ist eine Funktion des Blockageverhältnisses n , der Form des Schiffsunterbodens, der Fahrtgeschwindigkeit des Schiffes, dessen Mittigkeit, der Bodenfreiheit, der Grenzschichtdickenverteilung und der Morphologie der Gewässersohle. Eine exakte, allgemeingültige Vorausberechnung oder numerische Simulation der Umströmung des Schiffskörpers und der Strömungsverteilung unter diesen vielschichtig interagierenden Bedingungen ist sehr schwierig und experimentell nicht abgesichert.

Außerdem können nun auch Fluktuationen des freien Wasserspiegels infolge primären und sekundären Wellensystems die Uferzonen erodieren oder dort zu Änderungen der Stabilitätsbedingungen führen.

Senkrechte Uferbefestigungen spiegeln die Verdrängungsströmung wie Gewässersohlen, d. h. die sich seitlich einstellende Geschwindigkeitsverteilung ähnelt in erster Näherung auch hier der einer turbulenten Rohrströmung, wobei hierzu die Geometrie des Hauptspant- und des Gewässerquerschnitts kongruent und mittig zueinander angeordnet sein müssen. Unter spiegel-symmetrischen Bedingungen des Schiffskörpers und des Fahrwasserquerschnitts stellt sich eine vertikal-symmetrische Geschwindigkeitsverteilung ein, die das Schiff auf mittigem Kurs hält (Rohrpost). Die freie Oberfläche läßt aber auch hier ein Ausweichen der Stromfäden zu den Seiten hin zu (Reibungseinfluss). In allen

anderen Fällen beeinflussen die unterschiedlichen Geometrien, die freien Oberflächen und die Außermittigkeit auch vertikale Veränderungen des Umströmungsprofils, die zu einseitigen Kursänderungen des Schiffes oder einseitigen Sedimentumlagerungen führen können.

Die Reaktionen des freien Wasserspiegels (Schwall und Sunk) auf das primäre Wellensystem und die Geschwindigkeitsverteilung äußern sich in Niveauänderungen direkt an und entlang den senkrechten Uferwänden. Diese müssen einerseits die Sogbelastung der örtlich erhöhten Geschwindigkeit aus der Druckdifferenz des primären und sekundären Wellensystems, andererseits den Wellenschlag kompensieren.

An geneigten Böschungen kann die Verdrängungsströmung nicht direkt gespiegelt werden, da für die Reflexionsrichtung in erster Näherung die Regel vom Einfallswinkel = Ausfallswinkel gilt. Die Quell-/Senkenströmung des primären Wellensystems bewirkt daher auf die Ufer zu und von ihr weg gerichtete Strömungskomponenten (den sog. "wash"), die in Form einer Welle mit Schiffsgeschwindigkeit am Ufer entlang laufen. Außerdem induziert die Energierückgewinnung der Heckwelle eine Strömung in Fortschrittsrichtung des Schiffes. Interferiert diese mit den transversalen und divergenten Wellen des primären Wellensystems, kann ein Wirbel am Ufer entstehen, der sich ebenfalls mit Fortschrittsgeschwindigkeit des Schiffes bewegt. Beide Strömungserscheinungen besitzen hohe Schubspannungsgeschwindigkeiten und daher hohes Erosionspotenzial /HUBER & WEISS 1986, OEBIUS 1997/.

Gleichzeitig beeinflusst dieses seitliche Strömungsprofil auch die Unterströmung des Schiffes in einer Weise, dass sie als Funktion der Form des Schiffsunterbodens, der Fortschrittsgeschwindigkeit, der Quell-/Senkenentwicklung und der Außermittigkeit des Kurses nicht mehr vorhersagbar ist. Zwar sind aus Feld- und Laboruntersuchungen prinzipiell die Tendenzen der Strömungsentwicklung bekannt /SCHÄLE 1977, FELKEL & STEINWELLER 1973/, doch lassen sich daraus quantitativ keine Verteilungen ableiten.

Hub und Sunk des primären Wellensystems erzeugen am Ufer Druckdifferenzen, die mit dem Porenwasser des gesättigten Bodens interagieren. Dadurch können Strömungen im Boden induziert werden, deren Intensität von der Frequenz und Amplitude der Welle, der Permeabilität der Böschung, der Dichte des Bodens und dessen Filterwirkung abhängen. Die Interaktionen Kanalwasser - Grundwasser sind mittlerweile hinlänglich gut erfassbar /v.d.KAA et al. 1985/.

Treffen die laterale Welle und der Auflauf der Rückströmung aus der Energierückgewinnung mit dem sekundären divergenten Wellenbild des Schiffes direkt in der Uferlinie zusammen, kann die Überlagerung beider Systeme zum Aufsteilen und Brechen der Welle führen, den sog. Rollbrecher. Dessen Energie wird auf klei-

3.2.3 Wellensystem

Vorbedingung für das Auftreten von schiffahrtserzeugten, differenzdruckbedingten Erosionen ist das Vorhandensein solcher Druckpotenziale an den Berandungen. Diese entstehen als Folge des primären und sekundären Wellensystems und äußern sich einerseits in wassergesättigten Böschungen durch die Induktion von Porenwasserströmungen, die die Standsicherheit der Böschungen negativ beeinflussen können, andererseits in einem Druckschlag beim Brechen der Wellen am Ufer. Dabei wird kinetische Energie auf kleinem Raum umgesetzt. Für die aktive Ermittlung von durch Wellen am Ufer erzeugten Erosionen gilt das unter 3.2.1.2 Gesagte.

3.3 Reaktive Beurteilung und Vorhersage von Erosionen

3.3.1 Verdrängungsströmung

Auch die reaktive Prognose von schiffahrtserzeugten Erosionen bedingt die Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung der Verdrängungsströmung sowie der sedimentologischen Parameter der Fahrwassersohle und -böschungen. Da erstere Information nicht direkt gewonnen werden kann, muss sie anhand der erzeugten Erosionen ermittelt werden. Letztere Informationen sind in der Regel durch Probenahme zu akquirieren oder sind durch die Baumaßnahme bekannt.

Basis für eine reaktive Beurteilung ist außerdem die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen der erzeugenden Kraft und der bewirkten Erosion. Für Lockermaterialien kleiner Korngröße bis 6 cm und bei feinsandigen bindigen Böden sind die erforderlichen kritischen Schubspannungen für das Erzeugen von Erosionen bekannt /SHIELDS 1936, BAGNOLD 1966; EINSTEIN 1950, 1957/. Für Wasserbausteine z. B. existieren solche Zusammenhänge noch nicht.

Untersuchungen der FAS, Berlin, zufolge kann eine Beziehung zwischen dem Blockageeffekt und der Verdrängungsströmung hergestellt werden. FUEHRER & RÖMISCH /1977/ schlugen zwei Verfahren vor, die Strömungsverhältnisse unter einem Schiff zu beschreiben.

Zum einen gingen sie davon aus, dass sich eine relativ deutliche Trennung zwischen der tiefenmäßigen und der seitlichen Beschränkung einstellt und dass sich beide Einflüsse nur unwesentlich mischen. Für den Verdrängungsanteil unter dem Schiffskörper schlugen sie daher vor, eine Beziehung zwischen dem der Schiffsgeschwindigkeit v_s und der Verdrängungsströmungsgeschwindigkeit v_r der Form

$$\alpha_0 v_0 h = v_r (h - (h_T - \Delta h_T)) < 1 \quad (7)$$

mit α_0 = Korrekturfaktor, v_0 = Schiffsgeschwindigkeit, v_r = Verdrängungsgeschwindigkeit, h = Wassertiefe, h_T = Tauchtiefe des Schiffskörpers und Δh_T = Squat des Schiffes zu verwenden.

Für den Korrekturfaktor α_0 ermittelten sie empirisch den Zusammenhang

$$\alpha_0 = (h/n(h - T))((1.11/n) - 5,25(1/n)^{3,2}) \quad (8)$$

Dieser Ansatz hat den Nachteil, dass er aus Untersuchungen in künstlichen Kanälen und mit verkleinerten Schiffmodellen gewonnen wurde. Unter realen Bedingungen ist nicht mit einer eindeutigen Zuordnung der Strömung unter dem Schiffskörper und um ihn herum zu rechnen, ein Einfluss, den die FAS auch bemerkte.

Zum anderen benutzten sie wie KREITNER /1934/ die kritische Geschwindigkeit bei v_{krit} der Froudeschen Tiefenzahl = 1 als Maßstab für die Ermittlung der Umströmung. Hier schlug RÖMISCH /1990/ vor, den Zusammenhang zwischen dem Blockageverhältnis n und der kritischen Unterströmungsgeschwindigkeit v_{krit} in Abhängigkeit von der Kanalform in der in Bild 15 Weise aufzutragen, wobei er von folgender Beziehung ausging:

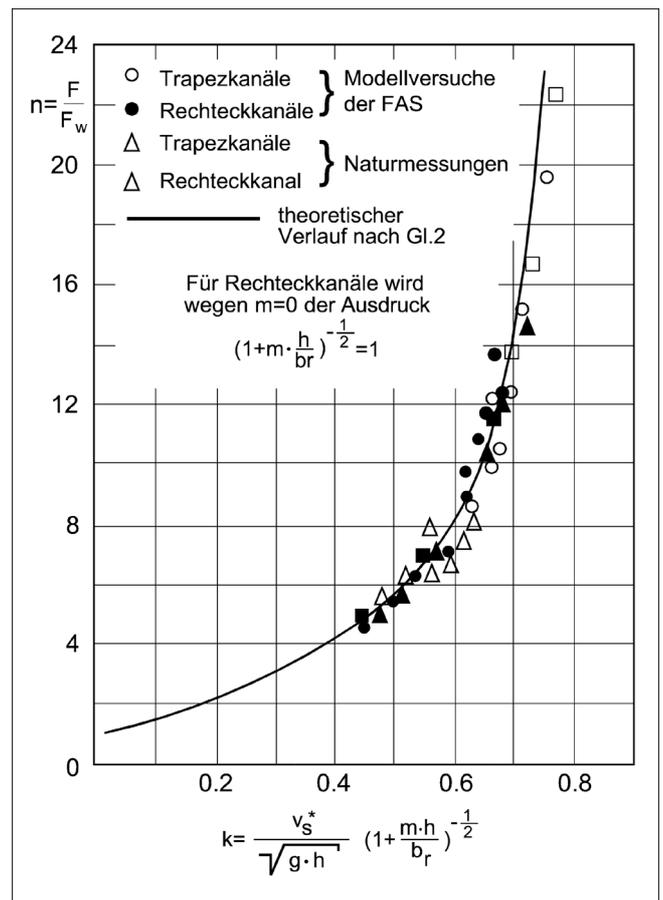


Bild 15: Zusammenhang zwischen Blockageverhältnis und Verdrängungsströmung

$$(k^2)^3 + (k^2)^3 6(1-(1/n)) + (k^2) 12(1-(1/n))^2 - 27 + 8(1-(1/n))^3 = 0 \quad (9)$$

mit $k = v_{krit} / (g \cdot h)^{1/2}$ und $n =$ Blockageverhältnis = benetzter Kanalquerschnitt zum benetzten Hauptspantquerschnitt des Schiffes. Dieser, für Rechteckquerschnitte gültige Ansatz kann durch Einsetzen der mittleren Wassertiefe $h_m = h(1 + m(h/B))^{-1}$ statt der realen Wassertiefe h in der Froudezahl auch für andere Querschnitte nutzbar gemacht werden.

Dieser Ansatz hat den Nachteil, dass er die kritische Unterströmungsgeschwindigkeit (Übergang Strömen - Schießen) benutzt, die möglicherweise stark von der kritischen Erosionsgeschwindigkeit abweicht. Darüber hinaus geht auch sie von ebenen Strömungszuständen unter dem Schiffsboden aus, einem Ansatz, der gerade bei Außermittigkeit des Kurses oder Sohlunebenheiten nicht mehr haltbar ist.

Dennoch kann in erster Näherung der folgende, von RÖMISCH /1990/ vorgestellte einfache Ansatz gelten.

$$V_r = ((F_w + \Delta h \cdot b_m) / (F_s - (F_w + \Delta h \cdot b_m))) v_0 \quad (10)$$

mit $\Delta h =$ seitlicher Spiegelabsenkung des Schiffes. Für vorhandene Flächenverhältnisse läßt sich nun graphisch-analytisch durch Einsetzen verschiedener Δh eine Kurve $v_r = f(v_0)$ darstellen, aus der sich die gesuchte mittlere Unterströmungsgeschwindigkeit v_r bei gegebener Fortschrittsgeschwindigkeit v_0 ablesen läßt.

Daraus läßt sich nun wiederum nach Hjulström der zugehörige kritische Korndurchmesser des Sohl-sediments ableiten.

3.3.2 Propulsionsorgan

Um die unter 3.2 genannten Schwierigkeiten zu umgehen, haben FUEHRER & RÖMISCH /1977, 1990/ ein Verfahren vorgeschlagen, das auf die aktive Berechnung verzichtet und statt dessen mit empirischen Werten arbeitet. Sie empfehlen, die induzierte Propellerstrahlströmung nach dem Ansatz

$$v_p = 1,6 f D_p (K_T)^{1/2} (2 v_A / v_0 + 1)^{-0,5} \quad (11)$$

zu berechnen mit $f =$ Propellerdrehzahl, $D_p =$ Propellerdurchmesser, $K_T =$ Schubbeiwert des Propellers $\approx 0,4$, $v_A =$ Anströmgeschwindigkeit des Propellers $= v_0 (1-w)$, $w =$ Nachstromziffer $\approx 0,8$ und $v_0 =$ Fortschrittsgeschwindigkeit.

Dieser Ansatz ist zwar vom schiffstechnischen Standpunkt her zu stark vereinfacht, bietet aber brauchbare Werte für eine erste Abschätzung. Die Richtwerte eingesetzt läßt er sich weiter vereinfacht schreiben:

$$v_p = 0,95 f D_p ((0,4 v_0 / v_p) + 1)^{-0,5} \quad (12)$$

Die Strahlausbreitung kann durch die Beziehung

$$v_{px,y} = v_p (\beta (h_z/D) - 1 (1 - (v_0/n D))) \quad (13)$$

ermittelt werden mit $v_{px,y} =$ lokale Geschwindigkeit, $\beta =$ Faktor, der die Heckform charakterisiert ($= 0,42$ bei Heck ohne Zentralruder; $= 0,71$ bei Heck mit Zentralruder und $= 0,25$ bei Tunnelheck) und $h_z =$ Sohlabstand der Propellernabe.

Aus der ermittelten Sohlgeschwindigkeit kann dann wieder nach Hjulström die dazugehörige kritische Korngröße des Sohlmaterials errechnet werden.

3.3.3 Wellensystem

Für den Einfluss des Wellensystems gilt das unter 3.2.3 Gesagte.

3.4 Passive Ermittlung des Einflusses von Verdrängungs- und Propellerstrahlströmung

Der Einfluss der durch den Schiffsverkehr erzeugten Strömungen läßt sich auch auf passivem Wege messtechnisch direkt an der Gewässersohle und/oder an den Ufern erfassen. Hierzu kann u. a. ein Schubspannungsmesser benutzt werden, wie er z. B. in der VWS entwickelt wurde (Bild 16). Dieses Gerät wird direkt auf der

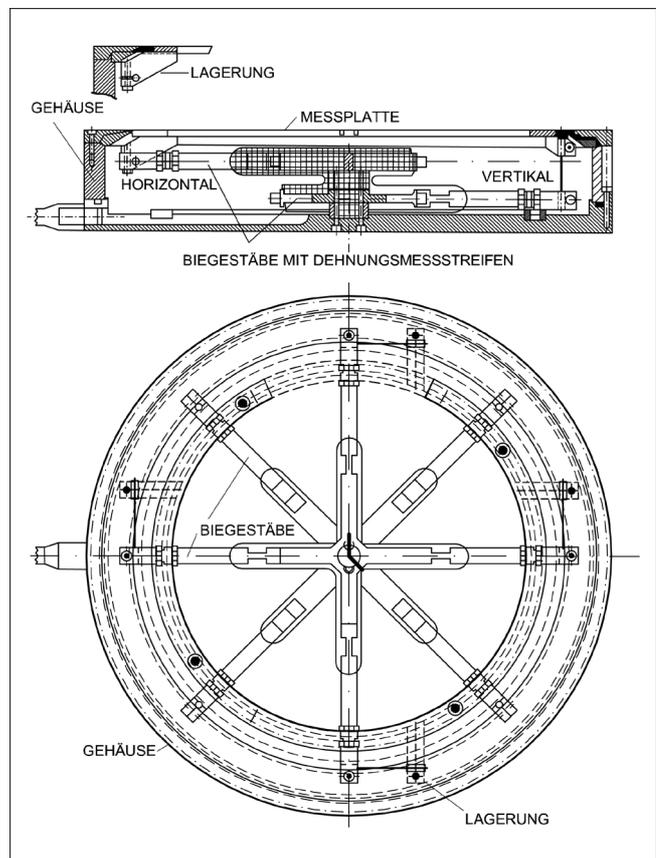


Bild 16: Schematische Darstellung des Schubspannungsmessers

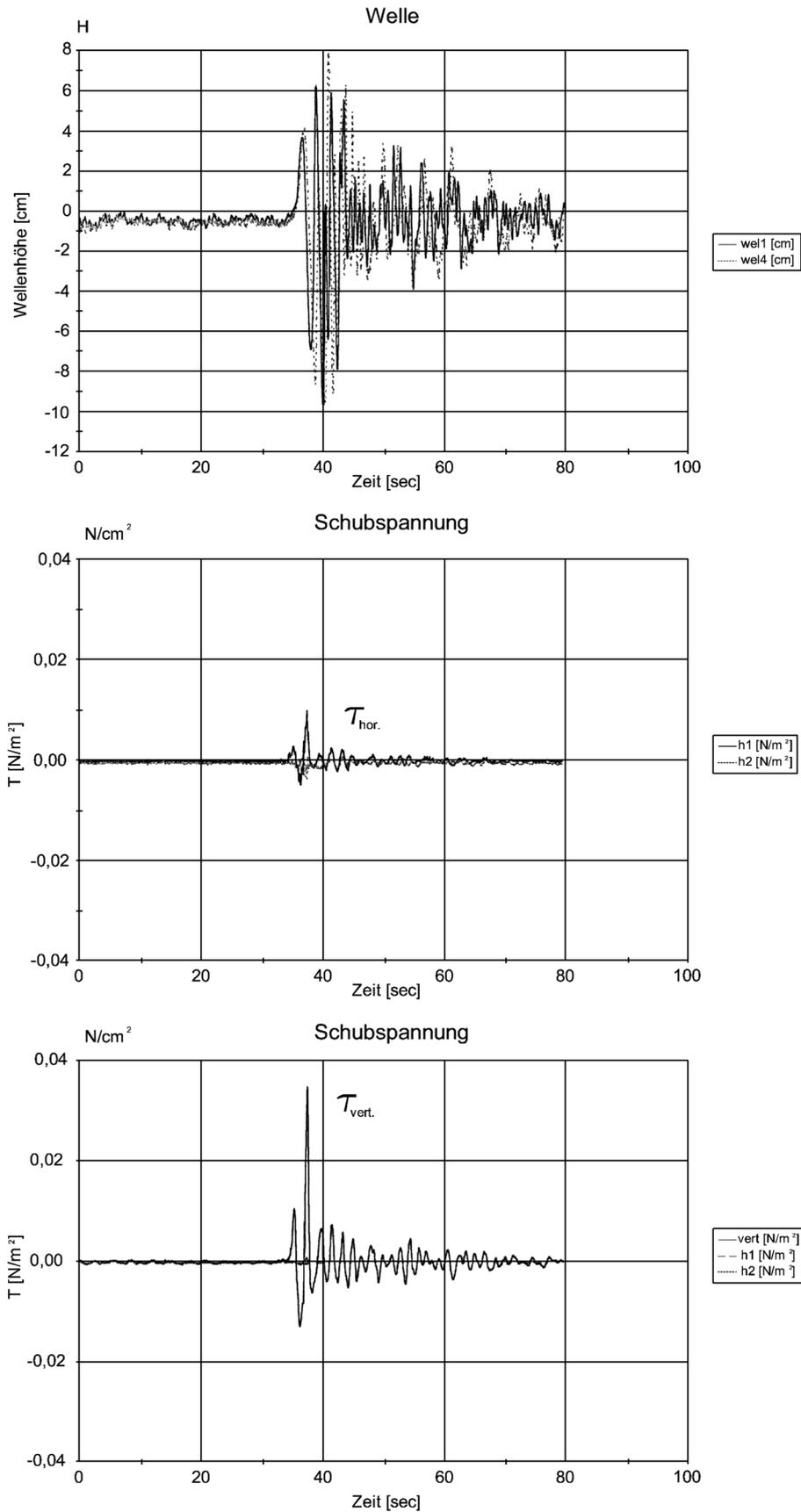


Bild 17: Gemessene schiffserzeugte Strömungen im Spreewald

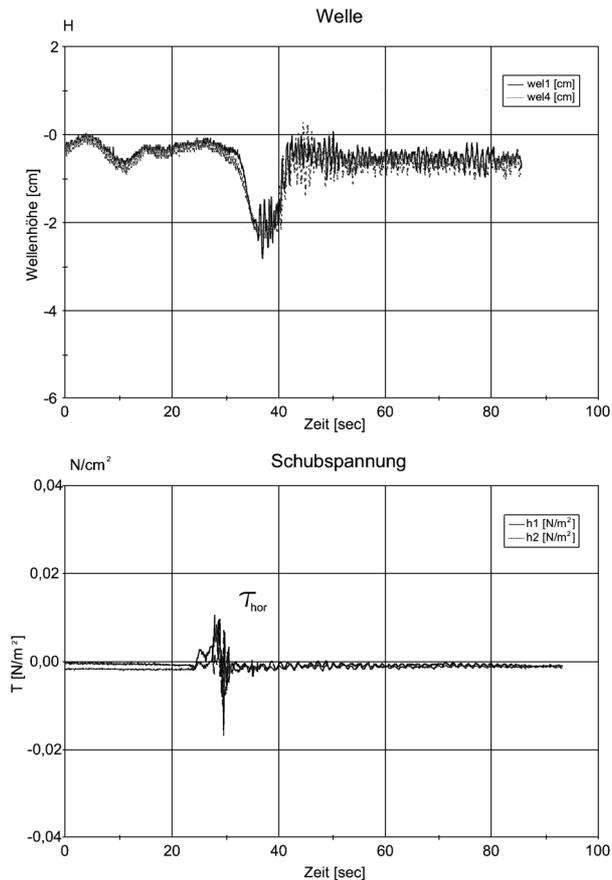


Bild 18: Gemessene schiffserzeugte Strömungen in der Spree

Gewässersohle abgesetzt und misst die an der Grenzschicht Wasser/Sediment wirkenden Strömungskräfte. Über ein Kalibrierungsprogramm können diese Kräfte Schubspannungen gleichgesetzt werden, die wiederum in einem Verhältnis zu den zu erwartenden Erosionen stehen.

Dieses Gerät hat sich mittlerweile am Rhein, an der Spree und im Spreewald hervorragend bewährt und Messergebnisse gebracht, die weit über den Erwartungen lagen. Zwei Beispiele aus der Spree und aus dem Spreewald (Bilder 17 und 18) zeigen deutlich den Einfluss der Verdrängungs- und den der Propellerströmung in ihren Anteilen bei Revierfahrt eines Schubverbandes und eines Motorkahns.

In der Spree führten die Untersuchungen zu einer speziellen Panzerung der Tunneldecke eines Fußgängertunnels unter der Spree hindurch mit Wasserbausteinen. Die nur 60 cm unter Sohlniveau liegende Tunneldecke wäre sonst von den Schiffspropellern freigespült worden. Neuere Erkenntnisse am Mittellandkanal stellen die Wirksamkeit dieser Maßnahme in Frage.

Die Untersuchungen im Spreewald dienen der Frage, ob auf einigen Vliesen Motorbootverkehr zugelassen

werden dürfe. Sie führten zu der Empfehlung, auf den schmalen und flachen Vliesen kraftstoffgetriebene Motoren zu verbieten. Elektromotoren bis zu 1 kW Leistung wären jedoch akzeptabel. Dagegen zeigten sich überraschend starke Erosionen durch Paddelboote.

Literatur

- BAGNOLD, R. A. (1966): „An Approach to the Sediment Transport Problem at High Subcritical Speeds“, Journ. Royal Aeron. Soc., vol. 18, pp. 534.
- BONNEFILLE, R. (1963): „Essais de synthèse des lois de debut d'entraînement des sediment sous l'action d'un courant en regime continué“, Electr. de France, Chatou, Bull. du centre de recherche et d'essais, no. 5, pp. 67.
- BOUWMEESTER, J.; E.J.van de KAA; H.A. NUHOFF; R.G.J. van ORDEN (1977): „The behaviour of waterway vessels and ocean going ships during transit, overtaking and passing in canals and channels of limited width and depth, taking into account the increase in their size and speed. The extent of the damaging effect on banks and bottoms. The means of prevention and correction.“, 24. Int. Schiffahrtskongreß, Leningrad, Sect. 1, Subj. 3, 139 ff
- BROWN, C.T. (1984): „Flexible Revetments - Theory and Praxis“, Proc. Conf. on Flexible Armoured Revetments Incorporating Geotextiles“, London, 29.-30.3.
- DETTE, H.-H. (1974): „Über Brandungsströmungen im Bereich hoher Reynoldszahlen“, Mitt. Leichtweiß-Inst., TU Braunschweig, Heft 41
- EINSTEIN, H. A. (1942): „Formula for the transportation of bed-load“, Trans. ASCE, vol. 100, pp. 561.
- EINSTEIN, H. A.; S. A. I. SAMUI (1949): „Hydrodynamic Forces on Rough Walls“, Rev. Modern Phys., Vol. 21, pp. 520.
- EINSTEIN, H. A.; B. BANKS (1950): „Fluid Resistance of Composite Roughness“, Trans. Amer. Geoph. Union, vol. 31, no. 4, pp. 603.
- EINSTEIN, H. A. (1950): „The bed-load function for sediment transportation in open channel flow“, US Dept. of Agriculture, Soil Conserv., Techn. Bull., no. 1026, Wash.DC.
- EINSTEIN, H. A. (1955): „Effects of heavy sediment concentration near the bed on the velocity and sediment distribution“, Univ. Southern Calif., Ser. 33, Issue 2, pp. 29
- EINSTEIN, H. A. (1957): „Geschiebetrieb als Wahrscheinlichkeitsproblem“, Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich, no. 28
- FELKEL, K.; STEINWELLER, H.: (1973): „Strömung, Druck und Geschiebebewegung unter Binnenschiffen bei Niedrigwasser“, Zeitschrift für Binnenschiffahrt, Nr. 1, S. 24 - 29
- FELKEL, K.; H. STEINWELLER (1973): „Druck und Strömung unter im Kanal fahrenden Schiffen“, Schiff und Hafen, 25, Nr. 8, S. 691 - 696

- FÜHRER, W.; K. RÖMISCH (1977): „Effects of modern ship traffic on inland and ocean waterways and their structures“, 24. Internationaler Schifffahrtkongress, Leningrad, S. 1 - 3
- HANSEN, U.A. (1985): „Wasserbausteine im Deckwerksbau“, Verlag Boysen & Co, Heide
- HJULSTRÖM, F. (1935): „The Morphological Activity of Rivers as Illustrated by River Fyris“, Bull. Geol. Inst. Uppsala, vol. 25, chapt. III.
- HUBER, A.; H. W. WEISS (1986): „Wellenerosion am Rhein“, Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air, 78, Heft 9, 205 ff
- HUDSON, R.Y. (1959): „Laboratory Investigations of Rubble-Mound Breakwaters“, ASCE. Journ. of Waterways and Harbours, 96, WW-2
- v.d. KAA, E.J.; M.T. de GROOT; E. v. HIJUM; K.W. PILARCZYK; J. STRUIP; H.J. VERHEJ (1985): „Erosion Control of Navigation Embankments“, 26. Internationaler Schifffahrtkongress, Leningrad, S. 1 - 3
- KNIEß, H.-G. (1977): „Bemessung von Schüttstein-Deckwerken im Verkehrswasserbau, Teil 1: lose Steinschüttungen“, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 42
- KREITNER, J. (1934): „Über den Schiffswiderstand auf beschränktem Wasser“, Werft, Reederei und Hafen, 15, 7
- KREY, H.D. (1911): „Modellversuche über den Schifffahrtsbetrieb auf Kanälen“, VDI-Mitt. über Forschungsarbeiten, Heft 107
- Kuratorium für das Küsteningenieurwesen KFKI (1981): „Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken – EAK 1981“, „Die Küste“, Archiv für Forschung und Technik an Nord- und Ostsee, Verlag Boysen & Co, Heide
- MEYER-PETER, E.; R. MÜLLER (1949): „Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes“, Schweizerische Bauzeitung, vol. 67, no. 3.
- MOODY, L. F. (1944): „Friction Factors for Pipe Flow“, Trans. ASME, no. 11.
- OEBIUS, H. U. (1976): „Analytische und experimentelle Untersuchungen der Auswirkung von Flachwasserwellen auf die Reststromkomponente am Meeresboden“, Mitt. Vers.-Anst. f. Wasserbau u. Schiffbau, Berlin, Ber.-Nr. 764/76.
- OEBIUS, H. U. (1982): „Entwicklung eines Gerätes zur Ermittlung wellen- und strömungsinduzierter Schubspannungen an einer Gewässersohle“, Mitt. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Ber.- Nr.956/82.
- OEBIUS, H. (1984): „Loads on beds and banks caused by ship propulsion systems“, Conf. on Flexible Armoured Revetments, London, 29. - 30.3.
- OEBIUS, H.; S. SCHUSTER (1984): „Sohlerosion durch Schiffspropeller“, Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Ber.-Nr. 987/84
- OEBIUS, H. U. (1992): „Circulation and Sediment Transport on Sand-Banks in European Shelf Seas – Part: Development of a Shear Stress Meter“, Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Ber.-Nr. 1208/92
- RÖMISCH, K. (1969): „Erreichbare Fahrgeschwindigkeit und Tauchung eines Schiffes auf flachem Wasser – ein Beitrag zur optimalen Bemessung von Binnen- und Seewasserstraßen“, Mitteilungen der FAS, H. 24
- RÖMISCH, K. (1990): „Hydrodynamische Effekte fahrender Schiffe in Binnenkanälen“, Mitt. des Franzius-Inst., Hannover, H. 70, 295 ff
- SCHÄLE, E. (1977): „Beanspruchung und Veränderung der Fahrwasserbegrenzung durch die Schifffahrt“, Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen 7, 16 ff
- SCHLICHTING, H. (1965): „Grenzschichttheorie“, Verlag G. Braun, Karlsruhe
- SCHUSTER, S. (1954): „Untersuchung über Strömungs- und Widerstandsverhältnisse bei der Fahrt von Schiffen auf beschränktem Wasser“, Jahrbuch der STG, 52. Bd.
- SHIELDS, A. (1936): „Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung“, Mitt. d. Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, No. 26, Berlin.
- ZANKE, U. (1982): „Grundlagen der Sedimentbewegung“, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York