

Hydromechanische Grundlagen der Schwallspülung

D. Aigner

Die bisherigen Untersuchungen am Modell der Drehbogenanlage und am Pilotprojekt in Dresden-Leuben zeigten, daß es möglich ist, durch die schnelle Freigabe von angestautem Abwasser eine Spülwirkung im Kanal zu erzeugen. Die über Stunden gesammelte Energie des Wassers wurde innerhalb weniger Minuten freigesetzt. Der erzeugte Schwall erreichte Geschwindigkeiten von über 2 m/s und konnte innerhalb der Meßstrecke von etwa einem Kilometer nach dem Drehbogen eindeutig nachgewiesen werden. Messungen der Ablagerungsentwicklung im Staubereich vor dem Drehbogen und im anschließenden Kanalbereich zeigten eine vollständige Beseitigung feiner Materialien und eine Bewegung der noch vorhandenen groben Ablagerungen. Der ursprünglich bis zu 50% zugesetzte Kanal wurde fast vollständig freigespült. Durch die Kombination von theoretischen Untersuchungen und praktischen Messungen an Modell und Pilotanlage besteht die Möglichkeit, grundlegende Betrachtungen zum Wechselspiel zwischen Ablagerungen, Verfestigungen und Bewegung von Sedimenten in Abhängigkeit von der Abwasserbewegung durchzuführen, um Aussagen über notwendige Größen des Staupotentials, über den Remobilisierungseffekt der Ablagerungen oder den notwendigen Abstand von Spülzyklen zur effektiven Spülung treffen zu können.

Ablagerungen im Kanal

In Abwasserleitungen, insbesondere den großen Sammlern der Mischkanalisation mit geringem Sohlgefälle, bilden sich Ablagerungen, die den Fließquerschnitt und damit die Leistungsfähigkeit des Kanals einschränken. Umweltschädigendes Anspringen von Regenwasserüberläufen ereignet sich dadurch häufiger. Die Ablagerungen verfestigen sich mit zunehmendem Alter stark. Die Beseitigung dieser Ablagerungen erfolgt heutzutage gewöhnlich in großen Zeitabständen (Jahren, Jahrzehnten) mit einem erheblichen Aufwand an Kosten, Energie und manueller Arbeit unter extrem inhumanen Bedingungen.

Bei der Unterschreitung eines kritischen Zustandes, z.B. der kritischen Transportgeschwindigkeit, kommt es im Kanal zu Ablagerungen.

Da die Abwasserinhaltsstoffe in ihrer Größe, Dichte und Struktur sehr unterschiedlich sein können und teilweise ein großes Spektrum umfassen, wird es auch bei relativ großen Geschwindigkeiten bereits zum Absinken von schwereren Teilchen kommen. Diese "beweglichen" Ablagerungen werden zum Teil sogar zugelassen, da sie weiteren Ablagerungen und Verfestigungen entgegenwirken und sich selbst durch ihre Bewegung nicht verfestigen. (Fröhlich 1985, Sander 1989). Die Kraftwirkung auf die Sohle und damit auf abgesetzte Teilchen ergibt sich aus

der Strömungsgeschwindigkeit. Sie läßt sich ableiten aus dem Kräftegleichgewicht zwischen den Bewegungskräften des Wassers, dem Gefälle und der Masse sowie den dieser Bewegung entgegengesetzten Kräften, bestimmt durch die Rauheit und Geometrie des Kanals.

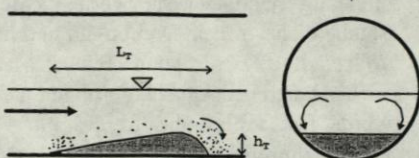
Diesem statischen Gleichgewicht überlagert sich eine dynamische Teilchenbeanspruchung. Infolge der Turbulenz (Strömungsschwingung) kann es zwischen der Strömung und den Teilchen zur Wechselwirkung bis hin zur Resonanz kommen, d.h. die Teilchen werden angeregt. Dadurch verringert sich kurzzeitig das Gewicht und damit die Haftung der Teilchen und es kommt zur leichteren Teilchenbewegung und zum Transport.

Reichen die turbulenten Bewegungen der Strömung nicht mehr aus, alle Teilchen in Schwebelage zu halten, beginnt der Ablagerungsprozeß und es bilden sich erst einzelne und später regelmäßige herzförmige Ballen. Die Teilchen werden durch den Strömungsangriff oberwasserseitig abgetragen und an der Unterwasserseite der Ballen wieder abgelagert, so daß eine Bewegung dieser Ballen stattfindet.

Haben sich erst einmal Ablagerungen gebildet, verringern sich automatisch die Strömungskräfte, wenn man davon ausgeht, daß das Energiegefälle I_E erhalten bleibt und der hydraulische Radius r_{hy} abnimmt. Die Größe der Schubspannung ergibt sich nach dem o.g. Gleichgewicht (siehe Bild 3 und Gleichung 1).

Bild 1:
Ablagerungsentwicklung
im Abwasserkanal

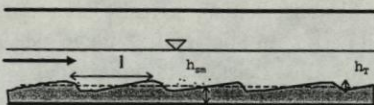
a Einzelablagerung
herzförmiger Ballen



b Bildung eines Pulksystems



c Entstehung geschlossener
Ablagerungen



$$\rho \cdot g \cdot A \cdot dL \cdot \sin \alpha = \tau_o \cdot l_u \cdot dL$$

$$\sin \alpha \approx I_E$$

$$\tau_o = \rho \cdot g \cdot \frac{A}{l_u} \cdot I_E = \rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_E$$

(1)

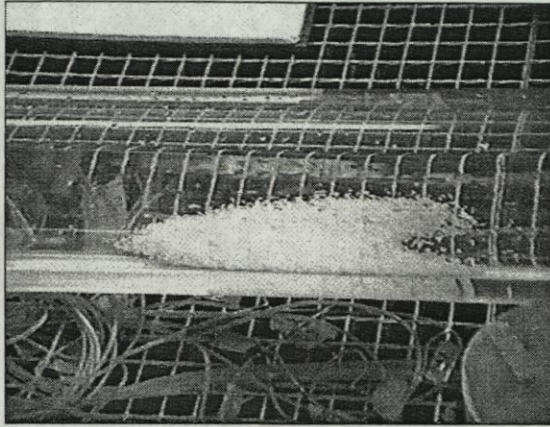


Bild 2: Einzelballenablagerung im Modell DN 200

Durch die Ablagerungen vergrößert sich meist noch die Rauheit des Kanals, d.h. der Manningbeiwert k_{st} wird geringer. Das bedeutet, daß bei gleichem zur Verfügung stehenden Energiegefälle I_E eine geringere Geschwindigkeit des Wassers vorhanden ist.

$$v = k_{st} \cdot \sqrt{I_E} \cdot r_{hy}^{2/3} \quad (2)$$

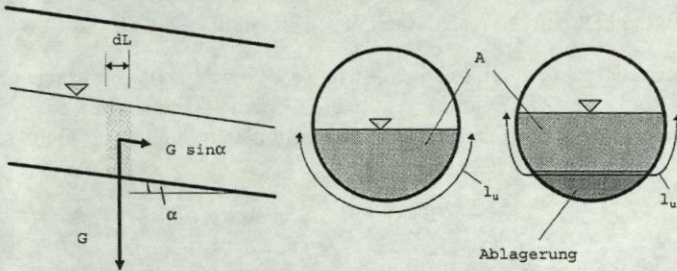


Bild 3: Schubspannungsermittlung

Das Bild 4 zeigt die Entwicklung der Schubspannung ohne und mit Ablagerungen in einem kreisförmigen Kanal bei gleichem Durchfluß durch die Veränderung des hydraulischen Radius.

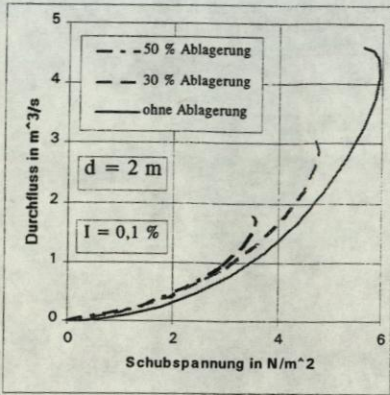


Bild 4: Schubspannungsentwicklung ohne und mit Ablagerungen

Transport von Ablagerungen

Ein Maß für die Teilchenbeanspruchung ist die Schubspannung, da sie als einzige faßbare Größe meß- bzw. berechenbar ist. Die Beanspruchung der Teilchen ist jedoch vielschichtiger. Transportiert werden sie vor allem erst nachdem sie durch die turbulente Strömung (Schwingungen) aus ihrem Verbund gelöst und ihre Haftung an den Untergrund überwunden wurde. Schwingende bzw. „tanzende“ Teilchen lassen sich leichter im Abwasser bewegen. Eine Aufgabe ist es also, Teilchen durch starke statische und dynamische Beanspruchung aus dem abgelagerten Verbund zu lösen und andererseits durch die turbulente Strömung ihre Beweglichkeit aufrecht zu erhalten bzw. zu vereinfachen.

Eine kurze Betrachtung soll zeigen, wie das Gleichgewicht zwischen einem Teilchen und der Strömung ermittelt werden kann und in welchem Zusammenhang diese Betrachtung zum konventionellen Shield-Parameter steht.

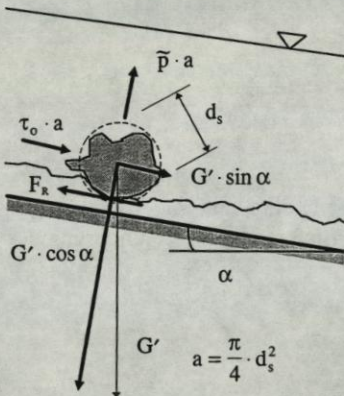


Bild 5: Teilchenbeanspruchung im Kanal

Ausgangspunkt ist die Aufstellung des Kräftegleichgewichtes zwischen den die Bewegung eines Teilchens verhindernden und den aktivierenden Kräften im Kanal. Bild 5 zeigt die idealisierte Darstellung dieses Kräftegleichgewichtes. Aus der Summe der Kräfte in Sohlrichtung entsteht die Beziehung zwischen mittlerer Geschwindigkeit und Partikeleigenschaften.

$$\tau \cdot a + G' \cdot \sin \alpha = (G' \cdot \cos \alpha - \tilde{p} \cdot a) \cdot \mu \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho_w \cdot v^2 \quad \text{mittlere Schubspannung}$$

$$\tilde{p} \approx c \cdot \frac{\rho_w}{2} \cdot v^2 \quad \text{Druckpulsation}$$

$$G' = V \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot g \quad \text{reduziertes Gewicht des Sedimentes}$$

$$\frac{V}{a} = \frac{2}{3} \cdot d_s \quad \text{Volumen-Flächenbeziehung einer Kugel}$$

$$\mu \quad \text{Reibungs- bzw. Haftungsbeiwert des Teilchens}$$

Für den Grenzbereich zwischen Ablagerung und Transport des Teilchens ergibt sich für sehr flache Gerinne ($\sin \alpha \approx 0$ und $\cos \alpha \approx 1$) :

$$d_s \leq \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \cdot \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \mu} + c \right) \quad (4)$$

Der Shield-Parameter kann aus Gleichung (4) abgeleitet werden zu:

$$Si = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot d_s} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{4 \cdot c}{\lambda}} \quad (5)$$

Der Shield-Parameter ist also eine Funktion der Haftungsbedingung der Teilchen, den Druckschwankungen (Turbulenz) und der Rauheit des Gerinnes. Je geringer die Haftungsbedingungen (kleiner μ -Wert), desto geringer wird der Einfluß von Turbulenz und Reibung, wird aber die Haftungsbedingung μ größer, dann entscheidet die Intensität der Turbulenz, ob ein Teilchen sich löst und transportiert wird oder nicht. Liegen die Frequenzen der turbulenten Schwankungen in der Größenordnung der Eigenfrequenz der Teilchen, oder nähert sich die Schwankungsgröße der Größenordnung der mittleren Geschwindigkeit, dann ist diese Beanspruchung maßgebend für den Transport und die Reibungs- und Haftungsbedingungen des Teilchens sind vernachlässigbar. Bild 6 zeigt die Abhängigkeit zwischen Teilchengröße und Geschwindigkeit für den Transportbeginn bei verschiedenen Annahmen der Turbulenz.

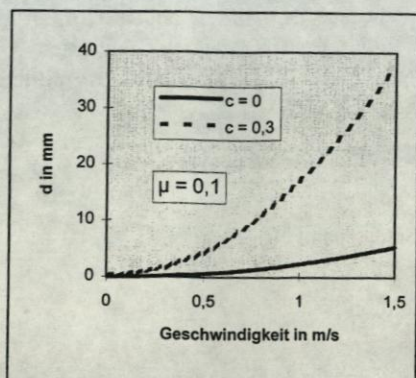


Bild 6: Beginn der Sedimentbewegung in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit

Beim Schwall ist die Turbulenz im Schwallkopf viel intensiver als bei normaler Strömung. Sie erreicht wahrscheinlich annähernd die Größenordnung der Geschwindigkeit selbst, so daß auch fest eingebundene Sedimente oder Verkrustungen nach längerer bzw. intervallartiger Beanspruchung gelöst und transportiert werden. Nach einer intensiven mehrwöchigen Spülphase am Drehbogen-Pilotprojekt konnten nur noch grobe Ablagerungen festgestellt werden. Sedimentdurchmesser bis zu 100 mm (Pflastersteine) wurden im Kanal transportiert.

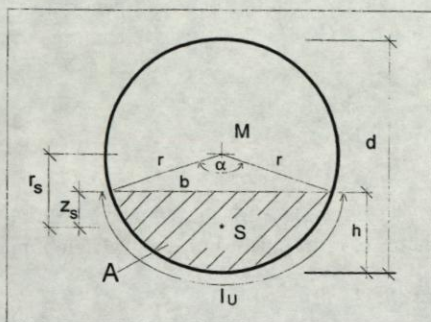
Vereinfachte Berechnungen im Kreisprofil

Die hydraulischen Berechnungen von teilgefüllten Rohrleitungen, z.B. von Abwasserleitungen, basieren insbesondere auf die geometrischen Berechnungen des Kreissegmentes, des Kreisbogens und der Kreissehne. Diese Größen ergeben die Durchflußfläche A , den benetzten Umfang l_u und die Wasserspiegelbreite b als Grundlage zur Berechnung des Durchflusses, des hydraulischen Radius oder der Druckvektoren. Diese geometrischen und hydraulischen Größen werden im allgemeinen aus dem Zentriwinkel α und dem Radius r bzw. dem Durchmesser d berechnet (Bild 7). M ist der Mittelpunkt des Kreises und S der Schwerpunkt der Fläche A .

$$A = \frac{r^2}{2} \cdot (\alpha - \sin \alpha) \quad (6)$$

$$l_u = \alpha \cdot r \quad (7)$$

$$r_{hy} = \frac{A}{l_u} = \frac{d}{4} \cdot \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha}\right) \quad (8)$$


 Bild 7:
Geometrische Größen des Kreisprofils

$$b = d \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (9)$$

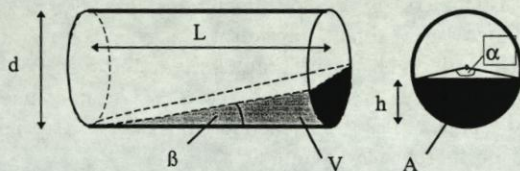
$$h = r \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) \quad (10)$$

$$r_s = \frac{b^3}{12 \cdot A} \quad (11)$$

$$z_s = r_s - (r - h) \quad (12)$$

Für die weitere hydraulische Berechnung z.B. der Druckkräfte oder der Ablagerungskörper ist die geometrische Berechnung des Volumens V eines unter einem Winkel β herausgeschnittenen Teiles eines Zylinders bzw. zur Ermittlung der Angriffsfläche der Schubspannung dessen Mantelfläche erforderlich (Bild 8).

Das Volumen V ergibt sich aus der Integration der Fläche A über die Länge L des Zylinderabschnittes zu:


 Bild 8: Volumen des
Zylinderabschnittes

$$V = \frac{r^2}{2} \cdot \int_0^L (\alpha - \sin \alpha) dL \quad \text{mit } \alpha = \arccos \left(1 - 2 \cdot \frac{h}{d}\right) \quad (13)$$

$$V = \frac{r^3}{4 \cdot \tan \beta} \cdot \left(3 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} - 2 \cdot \alpha \cdot \cos \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{3} \cdot \sin \frac{3 \cdot \alpha}{2}\right)$$

Zur Abschätzung von Einflußgrößen oder zur Überschlagsrechnung genügen oft Näherungsformeln, wie sie z.B. von Hager (1990) für die Berechnung der Querschnittsfläche angegeben wurde:

$$A = \frac{4}{3} \cdot d^2 \cdot \left[\left(\frac{h}{d} \right)^{1,5} - \frac{1}{4} \left(\frac{h}{d} \right)^{2,5} - \frac{4}{25} \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^{3,5} \right] \quad (14)$$

Diese Gleichung weist einen Fehler von weniger als 1,3% auf und wird durch Integration zur Volumenfunktion (Gleichung 15) mit einem Fehler zur Gleichung 13 von weniger als 0,6%.

$$V = \frac{r^3}{\tan \beta} \cdot \left[\frac{64}{15} \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^{2,5} - \frac{16}{21} \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^{3,5} - \frac{256}{675} \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^{4,5} \right] \quad (15)$$

Näherungsformeln, die noch einfacher handhabbar sind, aber Abweichungen von bis zu 6% und für sehr kleine Werte noch größere aufweisen, sind die Flächennäherung Gleichung 16 und die Volumenfunktion Gleichung 17:

$$A = \frac{7}{6} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (16)$$

$$V = \frac{\pi \cdot r^3}{\tan \beta} \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{7}{3}} \quad (17)$$

Mit diesen zwei Gleichungen können Abhängigkeiten im Kreisprofil schnell und einfach qualitativ untersucht werden, wenn man die quantitativen Fehlerabweichungen beachtet.

Zur Bilanzierung des Sedimenttransportes kann z.B. mit Gleichung 17 das Volumen eines Ablagerungskörpers abgeschätzt werden. Nach Yalin (1964) wird die Höhe der sich bei bestimmten hydraulischen Bedingungen einzeln bildenden Transportkörper aus dem 6.Teil der Wassertiefe und die Länge etwa aus dem 1000-fachen des Teilchendurchmessers berechnet. Die Neigung der Transportkörper wird damit zu:

$$\tan \beta = \frac{h_T}{L_T} = \frac{h}{6000 \cdot d_s} \quad (18)$$

Aus diesen zwei Gleichungen kann man das Volumen eines einzelnen Transportkörpers (Gleichung 19) berechnen.

$$V \cong 36,23 \cdot d^{\frac{2}{3}} \cdot h^{\frac{4}{3}} \cdot d_s \quad (19)$$

Die Froudezahl zur Bestimmung des Fließzustandes im Kreisquerschnitt wird berechnet aus :

$$Fr = \frac{v}{v_{gr}} \quad v_{gr} = \sqrt{\frac{g \cdot A}{\frac{\delta A}{\delta h}}} \quad (20)$$

Die Grenzgeschwindigkeit v_{gr} oder kritische Geschwindigkeit wird auch als Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Flachwasserwelle bezeichnet. Vereinfacht ergibt sich die Froudezahl für das Kreisprofil zu (Hager 1990):

$$Fr \cong \frac{Q}{\sqrt{g \cdot D \cdot h^2}} \quad (21)$$

und somit eine vereinfachte kritische Wassertiefe für $Fr=1$ mit einem maximalen Fehler von 6% (Hager 1990, Aigner 1994) zu:

$$h_{gr} \cong \sqrt[4]{\frac{Q^2}{g \cdot D}} \quad (22)$$

Die Grenzgeschwindigkeit kann damit aus Gleichung 20 und Gleichung 16 für das Kreisprofil ermittelt werden zu:

$$v_{gr} = \sqrt{0,75 \cdot g \cdot h} \quad (23)$$

Diese Gleichung weicht allerdings für den Bereich $\frac{h}{d} > 0,5$ progressiv von dem iterativ ermittelten Wert ab.

Berechnung der Lage des Wechselsprunges im Kreisprofil

Die durch den Anstau von Wasser im Kanal gespeicherte Energie wird beim Überströmen oder Absenken des Drehbogens in Geschwindigkeit umgesetzt, es kommt zum schießenden Abfluß mit großer Geschwindigkeit und relativ geringer Wassertiefe. Die Größe der Geschwindigkeit ist vor allem von der Höhe des Überfalles abhängig. Der sich einstellende schießende Abfluß setzt sich unterhalb des Drehbogens solange fort, bis infolge der Strömungsverluste die Impulskraft der schießenden Strömung gleich der Impulskraft des strömenden Normalabflusses ist. An dieser Stelle stellt sich der Umschlag vom schießenden zum strömenden Abfluß als sogenannter Wechselsprung ein. Es stand die Frage, wie weit dieser schießende Abfluß erhalten bleibt und von welchen Größen diese Entfernung abhängig ist.

Die Lage des Wechselsprunges kann mit Hilfe der Staulinienberechnung zwischen dem Strömungsprofil (0) und dem Profil am Wechselsprung (1) ermittelt werden (Bild 9). Die Geschwindigkeit v_0 und damit die Wassertiefe h_0 ergeben sich aus

der Energiegleichung der Anfangsbedingung und die Wassertiefe am Wechselsprung h_1 (konjugierte Wassertiefe) sowie die Geschwindigkeit v_1 errechnet man aus dem Stützkraftsatz zwischen den Schnitten (1) und (2), wobei sich die Werte im Schnitt (2) aus den normalen Abflußbedingungen des Abwasserprofiles ergeben (Aigner/Cherubim 1993).

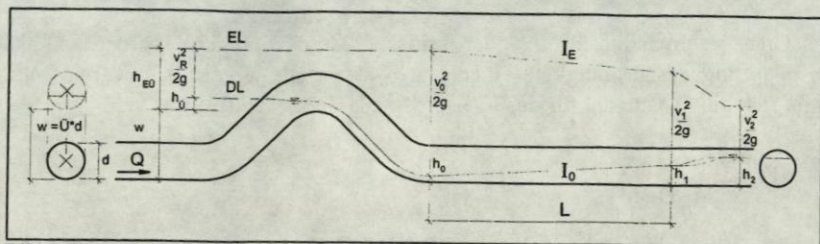


Bild 9: Energie und Drucklinienverlauf am Drehbogen

Zur Ermittlung der Unterwassertiefe h_2 werden vor allem die Größe, die Rauheit und das Gefälle der Abwasserleitung benötigt.

$$h_2 = f(Q, I, k, d)$$

Für die Ermittlung des Durchflusses kann die universelle Fließformel oder die Manningformel herangezogen werden.

Am Wechselsprung stellt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen der Stützkraft des strömenden Normalabflusses und der Stützkraft im schießenden Bereich ein. Grundvoraussetzung für das Vorhandensein eines Wechselsprunges im Unterwasser ist strömender Abfluß im Kanal und schießender Abfluß an einer Beschleunigungsstrecke.

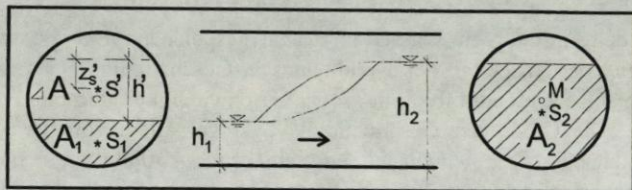


Bild 10: Wechselsprungberechnung im Kreisprofil

Der umgestellte Stützkraftansatz lautet:

$$\frac{v_2^2}{g} \cdot \frac{A_2^2}{A_1} + z_{s1} \cdot A_1 = \frac{v_2^2}{g} \cdot A_2 + z_{s2} \cdot A_2 \quad (24)$$

Diese Gleichung ist nur mit Vereinfachungen nach A_1 bzw. h_1 auflösbar.

Durch die Erweiterung der Gleichung mit $\frac{d}{A_2}$ und weiteren Umstellungen erhält man:

$$Fr_2^2 = \frac{v_2^2}{g \cdot \frac{A_2}{d}} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{h' \cdot d}{\Delta A} - \frac{z'_s \cdot d}{A_2} \right) \quad (25)$$

Durch Vereinfachung mit

$$z_1 \cdot A_1 = (z_2 - h') \cdot A_2 + z'_s \cdot \Delta A$$

$$h' \cdot d \approx \Delta A \quad \text{und} \quad z'_s \cdot d \approx \frac{\Delta A}{2}$$

ergibt sich für $\frac{\Delta A}{A_2}$ eine quadratische Gleichung und daraus die einzig reale Lösung zu:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_2^2} - 1 \right) \quad (26)$$

Führt man die Erweiterung und Vereinfachung nicht mit d sondern mit b_2 für Fr_2 durch, erhält man die gleiche Lösung (siehe ZÄSCHKE 1970). Die Ergebnisse dieser vereinfachten Lösungen weichen von den realen Werten leicht ab (siehe Bild 11).

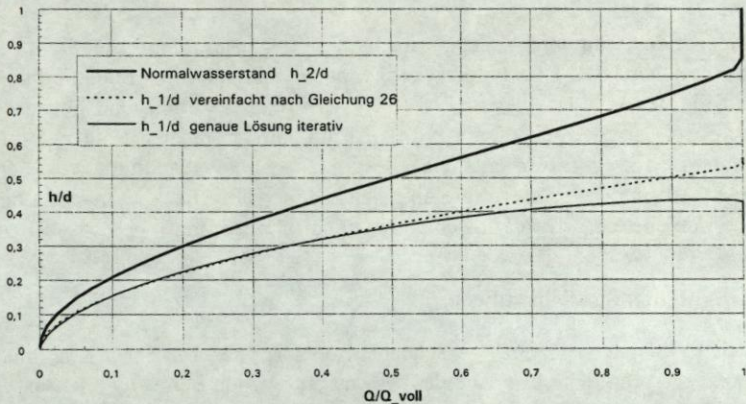


Bild 11 Vergleich der berechneten konjugierten Wassertiefen

Die genaue Lösung wird iterativ aus dem auf die Winkel α_1 und α_2 bezogenen Stützkraftgleichgewicht berechnet. Diese Auswertung kann auf einem Rechner durch Berechnung des Winkels α_1 unter Annahme des Winkels α_2 erfolgen.

Die Entfernung des Wechselsprunges vom Schnitt 0 wird mit Hilfe der Staulinienberechnung zwischen den Schnitten (0) und (1) in mehreren Schritten ermittelt. Für die Berechnung bietet sich das Δx -Verfahren an.

Im Bild 12 sind Meßergebnisse aus den Modellversuchen dargestellt. Der Vergleich mit dem Rechenergebn zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Versuch. Am Pilotprojekt wurde dieser Bereich mit maximal 50 m berechnet, aufgrund der örtlichen Bedingungen hatte er praktisch keine Bedeutung.

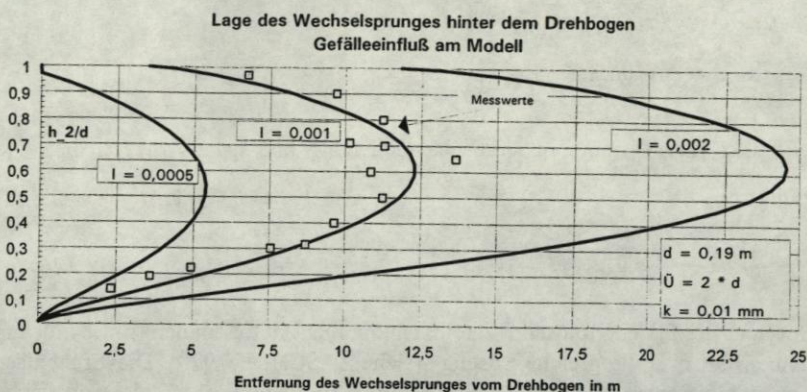


Bild 12: Schießender Strömungsbereich nach dem Drehbogen

Der schießende Strömungsvorgang wird bei Spülungen in relativ kurzen und z.T. steilen Bereichen, z.B. Rückhaltebecken, genutzt. Spülkammern oder Spülkippen halten Teile des Wassers bis zur Entleerung der Becken zurück und geben diese plötzlich frei, so daß ein schießender Abfluß auf trockener Sohle mit sehr turbulentem Strömungskopf entsteht. Diese Art der Schwallspülung wird bereits bei vielen Anwendern sehr erfolgreich genutzt. Für relativ flache Abwasserkanäle ist dieser schießende Schwall örtlich und zeitlich sehr begrenzt.

Geschwindigkeit der Schwallwelle

Durch den Aufstau in Kammern, Schächten oder Kippen bzw. den Rückhalt im Kanal und die plötzliche Freigabe des Abwassers werden Schwallwellen erzeugt. Für den Kanalbereich wurde bisher festgestellt, daß die Kapazität und Dauer der Spülung im Abwasserkanal nie für einen großen Reinigungserfolg ausreichte (Brombach 1993). Auch in den Untersuchungen am Drehbogen zeigte sich, daß eine Schwallwelle mit Spitzengeschwindigkeiten von über 2 m/s nach wenigen Minuten (je nach Stauvolumen) einen Punkt durchlaufen hatte. Ein Spülerfolg war nach einer Welle nicht nachweisbar. Nach einer intensiven Spülphase und im

Intervallbetrieb konnte man jedoch deutliche Veränderungen der Ablagerungen auch durch Meßwerte nachweisen. Bild 15 zeigt die Wasserstandsentwicklung gemessen an vier Schächten nach dem Drehbogen für eine Intervallspülung. Die Schwallwellengeschwindigkeit ist aus der Laufzeit zwischen den Schächten berechenbar. Die Entwicklung der Wasserspiegellagen zeigt deutlich deren Abnahme auf dem Weg durch den Kanal. Ähnlich verringert sich die Geschwindigkeit der Schwallwelle.

Die Berechnung einer Schwallbewegung in einem relativ flachen Abwasserkanal kann in Anlehnung an die Methode des „bewegten“ Kanals durchgeführt werden. Durch die Galileische Transformation des Schwallkopfes in ein Bezugssystem, das sich mit der Geschwindigkeit v_s des Schwallkopfes bewegt, wird die einfache Beschreibung der Strömungsvorgänge ermöglicht. Das Kräftegleichgewicht zwischen dem „bewegten“ Kanal und dem „stehenden“ Schwallkopf in Strömungsrichtung auf trockener Sohle lautet:

$$\rho \cdot g \cdot V_o + \rho \cdot g \cdot V_s \cdot I = \int_{L_k} \tau(x) \cdot l_u(x) dx \quad (27)$$

Aus der Gleichung für die Schubspannung (Gleichung 1) und der nach dem Energiegefälle umgestellten Gleichung 2 ergibt sich die resultierende Schubkraft zu:

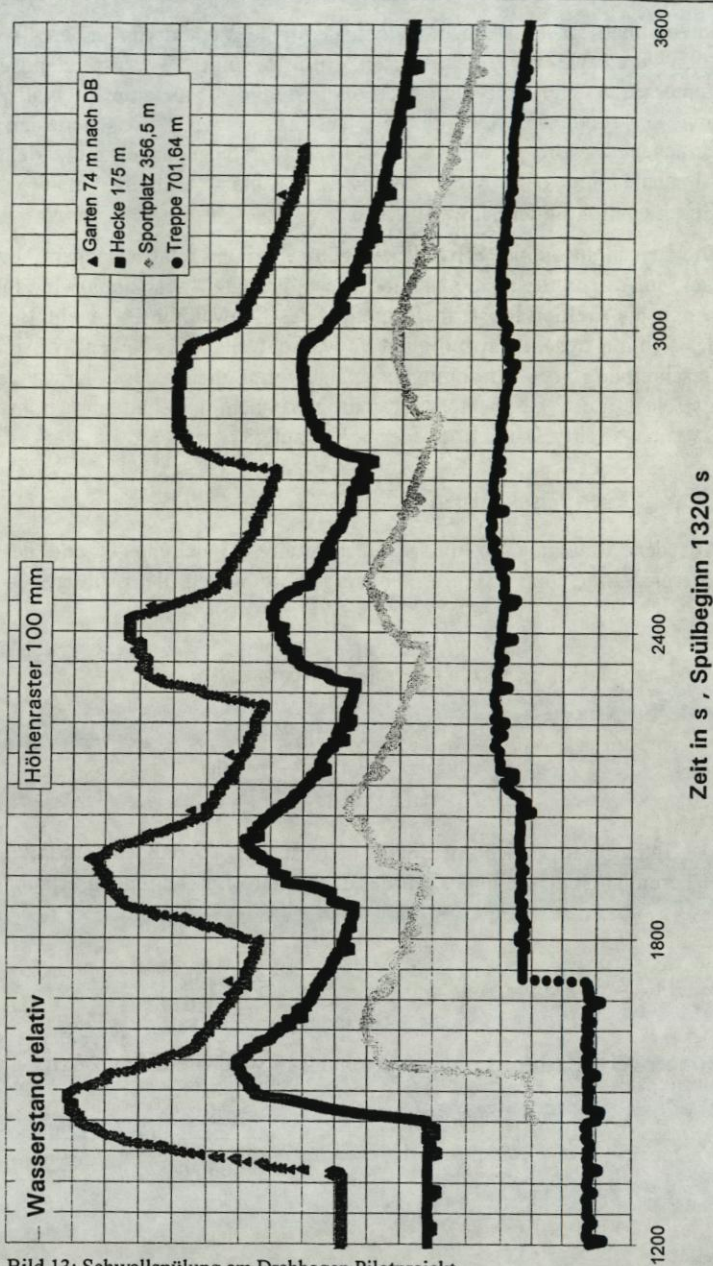
$$\begin{aligned} \int_{L_k} \tau(x) \cdot l_u(x) \cdot dx &= \rho \cdot g \cdot \frac{v_s^2}{k_{st}^2} \cdot \int_{L_k} \frac{l_u(x)}{r_{hy}^{1/3}} dx = \\ &= \frac{\rho \cdot g \cdot v_s^2 \cdot r^{\frac{5}{3}}}{k_{st}^2 \cdot 2^{\frac{2}{3}} \cdot \tan \beta} \cdot \int_0^\alpha \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt[3]{1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha}}} \cdot d\alpha \end{aligned} \quad (28)$$

Das Integral in Gleichung 28 ist nicht lösbar, so daß eine möglichst einfache Näherungslösung gefunden wurde, die weitere Berechnungen erlaubt (Gleichung 29).

$$\int_{L_k} \tau(x) \cdot l_u(x) dx = \rho \cdot g \cdot \frac{v_s^2 \cdot r^{\frac{5}{3}}}{k_{st}^2 \cdot 2^{\frac{2}{3}} \cdot \tan \beta} \cdot 1,5 \cdot \pi \cdot \left(\frac{h_o}{d}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (29)$$

Mit der vereinfachten Volumengleichung 17 wird Gleichung 27 zu:

$$\frac{r^3 \cdot \pi}{\tan 45^\circ} \cdot \left(\frac{h_o}{d}\right)^{\frac{7}{3}} + \frac{r^3 \cdot \pi}{\tan \beta} \cdot \left(\frac{h_o}{d}\right)^{\frac{7}{3}} \cdot I = \frac{v_s^2 \cdot r^{\frac{5}{3}}}{k_{st}^2 \cdot 2^{\frac{2}{3}} \cdot \tan \beta} \cdot 1,5 \cdot \pi \cdot \left(\frac{h_o}{d}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (30)$$



gespeichert in MS_TRANS.XLC am 10.08.1995

Bild 13: Schwallspülung am Drehbogen Pilotprojekt

Die Geschwindigkeit des Schwallkopfes auf trockener Sohle ergibt sich aus Gleichung 30 zu:

$$v_s = k_{st} \cdot r^{\frac{2}{3}} \cdot 1,03 \cdot \sqrt{(\tan \beta + I)} \cdot \left(\frac{h_o}{d}\right)^{\frac{5}{6}} \quad (31)$$

Die Schwallkopfbewegung mit Rückstau ist ähnlich wie die auf trockener Sohle mit dem Kräfteansatz nach Bild 14 berechenbar. Die Gleichung wird jedoch viel komplizierter als Gleichung 31, so daß hier auf sie verzichtet wurde.

Es ergibt sich wie in Gleichung 31 eine Abhängigkeit vom Wasserstand, der Rauheit des Gerinnes und der Neigung β des Schwallkopfes. Wie aus Modell- und Praxisuntersuchungen festgestellt wurde, besteht offensichtlich zwischen der Gerinnerrauheit und der Form des Kopfes ein Zusammenhang, der die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Kopfes scheinbar nicht beeinflusst.

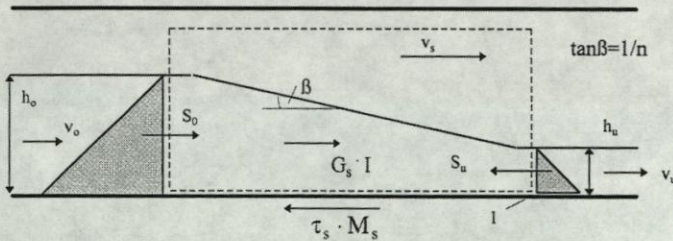


Bild 14: Kräfteansatz am Schwallkopf

Bei Messungen im 1200' er Kanal wurde eine sehr flache Neigung des Kopfes bis zu $1/n=1/200$ festgestellt. Zum Teil war diese Tatsache natürlich der Abflußfunktion des sich absenkenden Drehbogens geschuldet. Die Welle „überholte“ sich praktisch und steilte sich auf. Ähnliche langgezogene Schwallköpfe wurden aber auch im Labor bei plötzlicher Wasserfreigabe festgestellt.

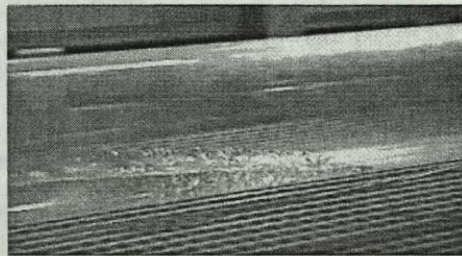


Bild 15: Schwallkopf im Labormodell

Durch die Vernachlässigung der Reibung und des Gefälleinflusses kann die Schwallgeschwindigkeit auch aus Gleichung 26 abgeleitet werden und ergibt sich dann für den rückgestauten Schwall zu:

$$v_s = v_u + \sqrt{\frac{g \cdot A_o}{2 \cdot d} \cdot \left(\frac{A_o}{A_u} + 1 \right)} \quad (32)$$

Bild 15 zeigt den Vergleich der Gleichungen 23 für die Grenzgeschwindigkeit, 32 für die Wechselsprungberechnung und die vollständige Berechnung mit Reibungseinfluß und verschiedenen angenommenen Schwallkopfneigungen. Wird die Grenzgeschwindigkeit (Gleichung 23) als Schwallwellengeschwindigkeit vorausgesetzt, dann ist damit der Zusammenhang zwischen Wasserstand und Geschwindigkeit definiert und aus Gleichung 31 ergibt sich der Zusammenhang zwischen Rauheit und Schwallkopfneigung.

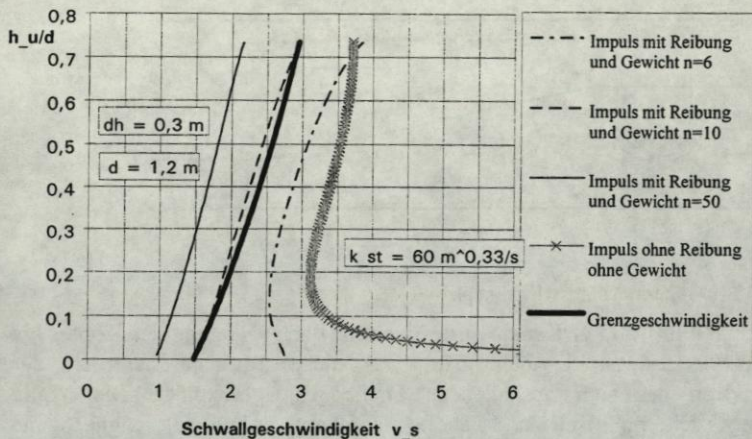


Bild 15: Schwallgeschwindigkeiten nach verschiedenen Formeln

Die gemessenen Schwallkopfgeschwindigkeiten ergaben gute Übereinstimmung mit der berechneten kritischen Geschwindigkeit (Grenzgeschwindigkeit Bild 15).

Thesen

Aus den bisher durchgeführten Untersuchungen wurden folgende Thesen abgeleitet:

- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Schwallkopfes in einem flachen Abwasserkanal ist abhängig vom Wasserstand am Schwallkopf und der Kanalgeometrie. Sie entspricht der Grenzgeschwindigkeit.
- Die Form und Neigung des Schwallkopfes ist abhängig von der Rauheit des Kanals und den geometrischen Größen.

Diese Thesen sollen durch Modell- und Praxisuntersuchungen weiter überprüft werden. Dazu ist insbesondere der Aufbau eines Modelles mit beweglicher Sohle zur Simulation und Untersuchung der Bewegung des Schwallkopfes geplant.

Schlußfolgerungen

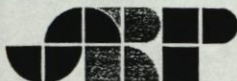
Wie können Teilchen aus einem Ablagerungsverbund gelöst werden? Für die Lockerung und den Transport von Ablagerungen sind schnelle turbulente Strömungen erforderlich. Eine in vielen Veröffentlichungen angesprochene „z.T. getestete und vor allem zur Reinigung von Rückhaltebecken eingesetzte Methode ist die Schwallspülung. Hinsichtlich der Räumwirkung erweist sich der Schwall auf trockener Sohle als günstiger. Mit vereinfachten Berechnungsmethoden, z.B. für das Kreisprofil, kann eine Abschätzung der Bewegung des Wassers im Kanal und die dadurch hervorgerufene Kraftwirkung auf vorhandene Ablagerungen durchgeführt werden. Mit der Beziehung zwischen Wellengeschwindigkeit und Wasserstand als Randbedingung sowie der Durchflußganglinie einer Spülung kann die Entwicklung der Schwallwelle im Kanal, z.B. mit Hilfe der Saint-Venant-Gleichungen, berechnet werden. Die Ausdehnung einer Schwallspülung entlang einer Kanalstrecke ist damit nicht nur von den Kanalbedingungen selbst, sondern auch von der durch die Spülung ausgelösten Abflußfunktion (Ganglinie) abhängig. Nach praktischen Messungen und Erfahrungen kann sie mehrere tausend Meter betragen.

Quellennachweis

- Aigner 1994** Aigner, D. :Hydraulische Berechnung von offenen Gerinnen. Wasserwirtschaft Wassertechnik,6/94 Verlag für Bauwesen Berlin 1994
- Aigner/Cherubim 1993** Aigner, D.; Cherubim, C. :Hydraulische Modellversuche zur Untersuchung des Drehbogens. Abschlußbericht, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden 1993
- Brombach 1993** Brombach, H.; Michelbach,S.; Wöhrle,C. :Feststoffe in der Mischwasserkanalisation - Sedimentation und Remobilisierung. korrespondenz abwasser 40. jg. 12/1993
- Fröhlich 1985** Fröhlich, G. : Über den Einfluß der Sohlform auf den Sandtransport bei geringen Feststoffkonzentrationen in teil- und vollgefüllten Rohrleitungen. Mitt. des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 88, Braunschweig 1985.
- Hager 1990** Hager, W. H.:Froude-Zahl im Kreisprofil. Korrespondenz Abwasser, 7/90 37.Jahrgang, S. 789-791
- Sander 1998** Sander, Th.: Ablagerungsprozeß und Feststofftransport in Abwasserleitungen. Mitt. des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 105, Braunschweig 1989.
- Zäschke 1970** Zäschke, W.: Wassersprung in kreisförmigen Gerinnen. fourgre's Nr.2, Sept.1970, Informations de la Fe'de'ration Europeéene des Fabricants de Tuyaux en Gre's.

Symbolverzeichnis

A	m^2	Fläche
ΔA	m^2	Flächendifferenz
a	m^2	Querschnittsfläche des Sedimentes
b	m	Wasserspiegelbreite
c	-	Beiwert
d	m	Durchmesser
Fr	-	Froudezahl
G_s'	N	Gewichtskraft unter Auftrieb
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h	m	Wassertiefe
h^{gr}	m	Grenzwassertiefe
I_E	-	Energieliniengefälle
I	-	Sohlgefälle
k_{ST}	$m^{1/3}/s$	Manningbeiwert
L	m	Länge
l_u	m	benetzter Umfang
M_s	m^2	Mantelfläche
n	-	Neigung
\tilde{p}	N/m^2	Druckpulsation
Q	m^3/s	Durchfluß
r	m	Radius
r_{hy}	m	hydraulischer Radius
r_s	m	Schwerpunktsabstand zum Kreismittelpunkt
Si	-	Shieldparameter
V	m^3	Volumen
v	m/s	Geschwindigkeit
v_{gr}	m/s	Grenzgeschwindigkeit
z_s	m	Schwerpunktsabstand zum Wasserspiegel
α, β	$^\circ$	Winkel
ν	m/s^2	kinematische Viskosität
ρ	kg/m^3	Dichte
λ	-	Reibungbeiwert
τ	N/m^2	Schubspannung



Schneider & Partner
Ingenieurbüro für Bauwesen GmbH

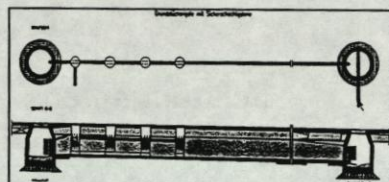
Ruppenweg 24, 96317 Kronach
Tel.: 09261/566-0, Fax: 09261/51268

96317 Kronach	01109 Dresden
97475 Zeil am Main	07745 Jena
95447 Bayreuth	08527 Plauen
98617 Meiningen	60433 Frankfurt

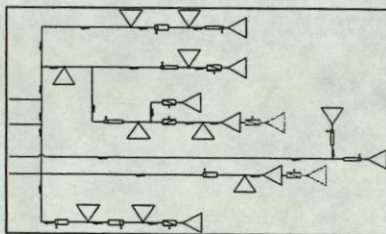
- Abwasserbehandlung
- Stadtentwässerung
- Wasserversorgung
- Verkehrsplanung
- Straßentwurf
- Vermessung
- EDV-Dienstleistungen
- Statik - Tragwerksplanung
- Brückenbau
- Architektur
- Technische Ausrüstung/EMSR-Technik
- Raum- und Umweltplanung
- Projektsteuerung

STADTENTWÄSSERUNG

- Generalentwässerungsplanung
- Kanalplanung
- Gewässerausbau
- Regenwasserbehandlung
- Stadthydrologische Sonderleistungen



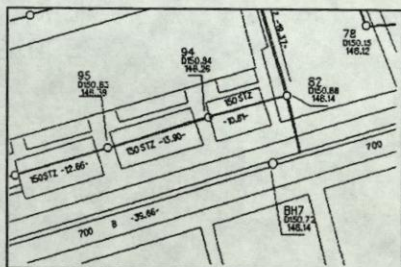
KANALNETZSTEUERUNG



- Überwachung und Erfassung der Betriebsdaten an den Entlastungsanlagen
- Niederschlags- und Abflußmessung
- Auswertung der Meßdaten
- Nachweis des aktivierbaren Kanalspeichervolumens
- Niederschlags- und Abflußsimulationsmodelle
- Ermittlung des Steuerungspotentials in Hinblick auf Kanalnetzbewirtschaftung
- Kosten- und Wirksamkeitsanalyse

GEODATENSYSTEME

- Liegenschaftsverwaltung
Stadtgrundkarte
- Netzinformationssysteme
Verkehrsanlagen
- Biotop-/ Baumkataster
Altlastenkataster
- Architektur
Facility Management
- Raumplanung
Städtebau





HYDROPROJEKT
INGENIEURGESELLSCHAFT

**Planung und Consulting
für umweltgerechten Wasserbau**

Leistungen aus einer Hand

- **Wasserbau**
- **Wasserwirtschaft**
- **Umwelttechnik**
- **Sondergebiete**

Hydroprojekt Ingenieurgesellschaft mbH

Firmensitz:

Dittelstedter Grenze 3

99099 Erfurt

Tel.: 0361 43760

Fax: 0361 436405

Büros in: Berlin, Blankenburg, Dresden, Erfurt



HST

HYDRO-SYSTEMTECHNIK

*Partner der
Wasserwirtschaft*

Ihr Partner rund um 's RÜB

Unser Unternehmen ist ein kompetenter Partner für die Lieferung komplexer mechanischer, maschinentechnischer und elektronischer Meß-, Steuer- und Regelsysteme für die Wasserwirtschaft im kommunalen und industriellen Bereich.

Stellvertretend sei genannt:

- * **HydroDat**® - Betriebsmanagementsystem
- * Meß-/Regeltechnik - MID, Venturi-Abflußregelung, **HydroMat**®
- * **ASK**-Wehr - schwimmergesteuertes Klappenwehr
- * **GSK**-Wehr - Gewichtsstauklappe
- * **ALH**-Wehr - luftgesteuertes Heberwehr
- * **UWA**-Drossel - unterwassergesteuerte Abflußdrossel
- * **RSK** - Hochwasser-Rückstauklappe
- * **AWS**-Spülkippe - automatisch wirkende Spülkippe zur Beckenreinigung

Seit über 10 Jahren verstehen wir uns als „**Partner der Wasserwirtschaft**“ und genießen in Fachkreisen den Ruf, qualitativ hochwertige Arbeit zu leisten.

Hydro-Systemtechnik GmbH

Caspar-David-Friedrich-Str. 37

D-01217 Dresden

Telefon: 0351-4716421/ Fax: 0351-4641872

INTEGRATION KEIN PROBLEM...

Industrielle Bildverarbeitung
mit EPSa Image und EPSa HSDS

Modulare Meßdaten-
erfassung und Steuerung
mit dem System MFB 1600

Datenlogger, Labor- und
Prozeßmeßgeräte

Rufen Sie uns
einfach an!

☎ 03671/
595120

Kontakten
Sie uns bei
den Messen:

MessComp
Wiesbaden
5.-7.9.95
Halle 4
Stand 447/448

IDENT/VISION
Stuttgart
11.-13.10.95
Halle 7.0. - 018

INTERKAMA
Düsseldorf
30.10.-4.11.95
Halle 10 · B04



Elektronik & Präzisionsbau Saalfeld GmbH
Remschützer Straße 1 · D-07318 Saalfeld
Telefon 03671/595-0 · Fax 03671/595-100

Bisher erschienene Mitteilungen:

- Nr. 1 1989 Römisch, Klaus
 Empfehlung zur Bemessung von Hafeneinfahrten

 Lattermann, Eberhard
 Bemessungsgrundlagen für Dichtungen und Deckwerke im
 Wasserbau
- Nr. 2 1990 Krüger, Frank
 Schubspannungsverteilungen in offenen, geradlinigen Trapez-
 und Rechteckgerinnen

 Martin, Helmut; Pohl, Reinhard
 Überflutungssicherheit von Talsperren
- Nr. 3 1990 Pohl, Reinhard
 Die Entwicklung der wasserbaulichen Lehre und Forschung
 an der Technischen Universität Dresden

 Pohl, Reinhard
 Die Berechnung der auf- und überlaufvermindernden
 Wirkungen von Wellenumlenkern im Staudammbau
- Nr. 4 1991 Haufe, Ellen
 Hydromechanische Untersuchungen von Mischungs-,
 Flockungs- und Sedimentationsprozessen in der
 Trinkwasseraufbereitung
- Nr. 5 1994 Wasserbaukolloquium 1993
 Die Elbe – Wasserstraße und Auen
- Nr. 6 1995 Wasserbaukolloquium 1994
 Wasserkraft und Umwelt
- Nr. 7 1995 Wasserbaukolloquium '95
 Hydromechanische Beiträge zum Betrieb von Kanalnetzen



Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hubert Engels
(1854 - 1945)



TU Dresden

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

Institutsvorstand

- Prof.-Dr.-Ing. habil. H.-B. Horlacher, geschäftsführ. Direktor
 Prof.-Dr.-Ing. habil. H. Martin, stellvertretender Direktor
 Prof.-Dr.-Ing. habil. H. Wagner, stellvertretender Direktor

Lehrstühle

Konstruktiver Wasserbau

Prof.-Dr.-Ing. habil. H.-B. Horlacher
 ☎ (0351) 463 4397

Technische Hydromechanik

Prof.-Dr.-Ing. habil. H. Martin
 ☎ (0351) 463 4526

Fluß- und Seebau

Prof.-Dr.-Ing. habil. H. Wagner
 ☎ (0351) 463 4397

Wissenschaftliche Mitarbeiter

- Doz. Dr.-Ing. D. Aigner,
 Leiter des Hubert-Engels-Laboratoriums ☎ (0351) 463 4725
 Dipl.-Ing. D. Carstensen ☎ (0351) 463 3524
 Dipl.-Ing. C. Cherubim ☎ (0351) 463 4685
 Dr.-Ing. H.-G. Coers ☎ (0351) 463 5331
 Dipl.-Ing. S. Dornack ☎ (0351) 463 2399
 Dipl.-Ing. R. Elze ☎ (0351) 463 3676
 apl. Prof. Dr.-Ing. habil. E. Lattermann ☎ (0351) 463 2964
 Dipl.-Ing. H. Martin ☎ (0351) 463 4019
 Dipl.-Ing. U. Müller ☎ (0351) 463 6119
 Dr.-Ing. R. Pohl ☎ (0351) 463 5693
 Dipl.-Ing. J. Wilhelm ☎ (0351) 463 3524

TU Dresden Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

☐ 01 069 Dresden, George-Bähr-Straße 1
 Beyer-Bau der TU Dresden, Zimmer 82 - 84 und 47 - 54
 ☎ 01 062 Dresden ☎ (0351) 463 4397 ☎ (0351) 463 7120
 e-mail: wb_thm@bbbs5.bau.tu-dresden.de
 telex 02278 teunidd

Forschungsaktivitäten

- Betriebseinrichtungen an Stauanlagen
- Berechnung und Messung von transienten Ein- und Mehrphasenströmungen in Druckrohrleitungen
- Stabilitätsuntersuchungen für überströmbare Dämme
- Überflutungssicherheit von Talsperren
- Schubspannungsverteilung in offenen, gekrümmten Gerinnen
- Naturnahe Gestaltung von Fließgewässern
- Materialverhalten von bituminösen Dichtungen
- Deckschichten im Wasserbau
- hydromechanische Aspekte der Mischungs- und Flockungsprozesse in der Wasseraufbereitung
- Anlagenhydraulik, Turbulenzmodelle
- Hochwasserschutz im Binnen- und Küstenbereich
- Uferausbildung unter Wellenbelastung

- bauwerksnahe Wellenbewegung im Seebau und an Stauanlagen, Wellendämpfung
- Schraubenstrahleinwirkung
- Dichtungen im Wasserbau
- **Physikalische und numerische Modellversuche** zu den genannten Problemkreisen
- Anfertigung von **Gutachten** zu allen wasserbaulichen und hydromechanischen Aufgabenstellungen

Im Hubert-Engels-Laboratorium, das bereits 1898 als erstes ständiges Wasserbaulabor der Welt gegründet worden ist, besteht die Möglichkeit, hydraulische Modellversuche für zahlreiche Aufgaben aus dem Bereich des Wasserbaus durchzuführen. Dazu zählen u.a. Druck-, Geschwindigkeits-, Turbulenz- und Durchflußmessungen und Versuche zu speziellen Anlagen des Wasserbaus, der Wasseraufbereitung oder zu mit Flüssigkeiten durchströmten Industrieanlagen.

Ausstattung

Hubert - Engels - Laboratorium

im Gebäude der Fakultät Bauingenieurwesen

- Laborräume, Wasserkreislauf
 (A = 650 m², Q = 300 l/s)
- Flußbaurinne l = 30 m b = 2 m
- Glasrinne l = 32 m b*h = 0.80*0.80 m²
- Kipprinne l = 10 m b*h = 0.30*0.40 m²
 (mögliche Neigung 13°)
- Rohrleitungsversuchsstand
- überdachte Freifläche ca. 165 m² mit Anschluß an Wasserkreislauf
- Durchflußmeßgeräte (volumetrisch, Eichwehre, IDM voll- und teilgefüllt, Venturi)
- Geschwindigkeitsmeßgeräte (Laser-Doppler-Anemometer ein- und mehrdimensional, Mikroflügel,

- induktive Geschwindigkeitssonden, Ultraschallsonden, Staurohr, Bildauswertung)
- Wasserstands- und Druckmeßgeräte (Pegel, Drucksonden, Ultraschall, Wellenpegel u.a.)
- Schwingungsmeßgeräte
- Schubspannungsmeßgeräte
- Geräte zur automatischen Meßwerterfassung
- Videotechnik mit Schnittplatz
- Werkstätten

Freigelände im Weißeritztal bei Dresden

(Q = 10 m³/s, I = 2 %)

Computernetz

PC-Ausstattung, IBM/RISC 6000, Anschluß an das Campusnetz der TU und Internet, Zugriff zum Universitätsrechenzentrum

Bibliothek