



**Tschechische Technische Universität Prag
Fakultät für Bauingenieurwesen
Institut für Siedlungswasserwirtschaft**

Doktorstudium: **Bauingenieurwesen**
Studienrichtung: **WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT**

Ing. Vojtěch Bareš

**ANALÝZA NEUSTÁLENÉHO PROUDĚNÍ S VOLNOU
HLADINOU V KRUHOVÉM POTRUBÍ**
ANALYSE DER TURBULENTEN FREISPIEGELSTRÖMUNG IM
KREISPROFIL

Dissertation - Zusammenfassung

Supervisor: **Prof. Ing. Jaroslav Pollert, DrSc.**

Prague, Oktober 2005

ZUSAMMENFASSUNG

Abflüsse in städtischen Kanalnetzen sind sowohl im Misch- als auch im Trennsystem durch starke Instationaritäten gekennzeichnet, die sowohl von Regenfällen als auch von verschiedenen anderen Faktoren herrühren. Feld- und Laborstudien haben gezeigt, dass während dynamischer Abflussereignisse die Bewegung von Sedimenten, die Verteilung suspendierter Stoffe, sowie Abflußprozesse Unterschiede im Vergleich zum stationären Zustand aufweisen. Da das zur Zeit vorhandene Wissen nicht ausreichend ist, um die obenerwähnten Prozesse hinreichend genau zu beschreiben, sind detailliertere Untersuchungen der instationären Fließ- und Turbulenzeigenschaften in Abwasserkanälen erforderlich. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit die Eigenschaften von instationären turbulenten Strömungen in offenen Gerinnen theoretisch und experimentell untersucht. Die experimentellen Arbeiten wurden in einem Modellgerinne mit kreisförmigem Querschnitt durchgeführt, wobei die Versuche sowohl mit glatten als auch mit rauen Wänden durchgeführt wurden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Beziehungen zwischen Instationaritäten und bestimmten charakteristischen Zustandsgrößen von Durchfluss und Turbulenz bei Teilfüllung zu bestimmen. Ausserdem soll der Einfluß von Sedimenten auf die räumliche Verteilung der gegebenen Zustandsgrößen untersucht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten zu einem besseren Verständnis von instationären Stofftransport- und Umwandlungsprozessen in städtischen Entwässerungssystemen beitragen.

Methode (Kapitel 2 und 3)

Die theoretischen Gleichungen für i) mittlere longitudinale Fließgeschwindigkeit, ii) Schubspannungsgeschwindigkeit und iii) Sohl Schubspannungen wurden kritisch betrachtet. Ihre Herleitung basiert auf der Theorie der Stömungen in turbulenten Grenzschichten und den grundlegenden Gleichungen, insbesondere den Reynolds Bewegungsgleichungen, der Saint-Venant Bewegungsgleichung der Kontinuitätsgleichung. Die Theorie des Sedimenttransports ist in Bezug auf spezifische Abflusseigenschaften in Entwässerungssystemen diskutiert worden.

Ein Modellgerinne aus Plexiglasrohren mit konstantem Sohlgefälle wurde erstellt, um unterschiedliche konstante Flußzustände und dreiecksförmige Abflussganglinien zu untersuchen. Die Sedimentablagerungen wurden aus Kies mit annäherungsweise konstanter Korngröße modelliert. Geschwindigkeit- und Turbulenzverteilung wurden direkt mit einem Ultraschall-Geschwindigkeits Profiler gemessen. Diese experimentelle Anordnung erlaubte in Kombination mit einer umfangreichen Datenanalyse die Erfassung von komplexen Informationen über Strömungs- und Turbulenzeigenschaften (z.B. Fließtiefe, mittlere Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten). Da die genaue Definition der zeitlichen Mittelwerte von gemessenen Zustandsgrößen einer der schwierigsten Aspekte von instationären Strömungsexperimenten ist, wurde ein Butterworth Filter sowohl vorwärts als auch rückwärts in der Zeit auf die Messdaten angewendet. Es zeigte sich, daß dieser Ansatz der Schnellen Fourier-Transformation überlegen ist, insbesondere in Grenzbereichen des gefilterten Signals.

Stationäre Freispiegelströmung im Kreisprofil (Kapitel 4)

Im Rahmen dieser Arbeit wurden insgesamt 72 Strömungsexperimente unter stationären Bedingungen durchgeführt, die als Referenz dienen. Die Versuche wurden dabei teilweise im glatten Rohr und teilweise mit künstlichen Sedimentablagerungen, die zu einer rauhen Gerinnesohle führen, durchgeführt. Die Relation zwischen tiefen-integrierter Geschwindigkeit U und querschnittsgemittelter Geschwindigkeit V wurde ermittelt. Dimensionalitäts-tests der Strömung zeigen, daß die Geschwindigkeitsprofile in der Rohrmitte die gleichen Eigenschaften haben wie die von zweidimensionalen Strömungen mit relativer Fließtiefe $h/D < 0.5$.

Die Geschwindigkeitsverteilung kann zufriedenstellend beschrieben werden, wenn in den inneren Regionen das log-Gesetz und in der äußeren Region der turbulenten Schicht das Gesetz von Cole verwendet wird. Die Werte der Integrationskonstanten B_s , B_R und des Coles Parameter P konnten verifiziert werden. Die Reibungsansätze wurden sowohl für glatte und rauhe Zustände aufgestellt und überprüft.

In den Strömungsexperimenten mit rauher Sohle wurden die Turbulenzintensität und die Verteilung der Reynoldsspannungen analysiert. Es zeigte sich, daß die vertikale Verteilung der Turbulenzintensität durch die theoretischen Gleichungen beschrieben werden kann, die in der Literatur vorgeschlagen werden. Es wurde bestätigt, daß die Verteilung der Reynoldsspannungen bei stationärem uniformen Strömungszustand einen linearen Verlauf annimmt. Auch die Verteilung der Mischungslänge stimmt gut mit der von Prandtl formulierten Hypothese überein.

Der Einfluß der Querschnittsgeometrie und relativen Fließtiefe h/D auf lokale Werte der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* wurde untersucht. Die lokalen Werte von u_* wurden dabei experimentell durch i) die Clauser Methode und ii) direkte Messung der Reynoldsspannungen analysiert. Die erreichten Resultate zeigen eine gute Korrelation zwischen den beiden Methoden. Ausserdem wurden die vereinfachten Saint Venant Gleichungen benutzt, um Werte von u_* , bezogen auf den benetzten Umfang O , zu berechnen. Die Resultate zeigen einen starken Einfluß der Querschnittsgeometrie auf die lokalen Werte von u_* über den Sedimentablagerungen. Für die Experimente mit glatter Wand war die Verteilung von u_* über O dahingegen fast gleichförmig. Interessant ist weiterhin, dass sich die relativen Werte von u_* bei Zunahme von h/D verringern.

Instationäre Freispiegelströmung im Kreisprofil (Kapitel 4 und 5)

36 Experimente sind mit instationären Fliessvorgängen und rauhen Sedimentablagerungen durchgeführt worden. Dreiecksförmige Abflussganglinien mit unterschiedlichen Instationaritäten wurden im experimentellen Gerinne erzeugt. Das spezielle Datenerfassungssystem erlaubte dabei eine sehr niedrige zeitliche Auflösung, um alle Messgrößen synchronisiert zu kontrollieren. Um die experimentelle Wiederholbarkeit zu demonstrieren und den resultierenden Fehler in der ermittelten Schubspannungsgeschwindigkeit u_* zu schätzen, wurde eine der Abflussganglinien 14 mal wiederholt. Es konnte gezeigt werden, daß die relative Standardabweichung von u_* ungefähr 5.0 % beträgt, wenn die Clauser Methode angewendet wird. Ausserdem wurde ermittelt, daß instationäre Fliessvorgänge durch den globalen Instationaritätsparameter Ω und den Druckgradienten b_{im} charakterisiert werden können.

Die Analyse der Abflussganglinie zeigte, dass sie sich dort wie eine dynamische Welle verhielt, wo zeitliche Verzögerungen von Schubspannungsgeschwindigkeit $u_*(t)$, querschnittsgemittelter Geschwindigkeit $V(t)$, Abfluss $Q(t)$ und Fließtiefe $h(t)$ alle evident waren. In Übereinstimmung mit den theoretischen Annahmen für eine komplette dynamische Welle erreichte die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* zuerst den Maximalwert, gefolgt von der querschnittsgemittelten Geschwindigkeit V , dem Durchfluss Q und der Fließtiefe h . Dieses führt zu der allgemein bekannten Hysterese-Kurve.

Die Analyse der Geschwindigkeitsverteilung zeigte, daß die horizontalen Geschwindigkeitskomponenten nahe der Sohle ihre Maximalwerte erst später erreichen als diejenigen nahe der Oberfläche. Weiterhin sind die Werte im ansteigenden Ast der Ganglinie im Allgemeinen größer als die im abfallenden Ast. Die Geschwindigkeitsverteilung in der inneren Region kann durch das Wandgesetz beschrieben werden, während Coles Wirbelgesetz die Geschwindigkeit in der äußeren Region beschreibt. Wie vermutet wurde, wird der Coles Parameter P durch die Instationarität der Strömung beeinflusst. Um den empirischen Zusammenhang zwischen P und b_{un} zu beschreiben wurde im Rahmen dieser Arbeit ein geeignetes Modell entwickelt.

Die zeitliche und räumliche Verteilung der Turbulenzintensität und der Reynoldsspannungen in der vertikalen Rohrmitte wurde identifiziert. Im Allgemeinen sind die Werte der turbulenten Eigenschaften im fallenden Ast der Abflussganglinie größer. Hinsichtlich der vertikalen Verteilung stimmen die experimentellen Ergebnisse ebenfalls gut mit den theoretischen Gleichungen, die in der Literatur vorgeschlagen wurden, überein. Ausserdem liefern die Resultate Grund zu der Annahme, daß die Parameter der Verteilung der Turbulenzintensität vom Fließparameter b_{un} abhängen. Interessanterweise zeigen die Experimente ausserdem, daß die vertikale Verteilung der Mischungslänge nicht durch die Instationarität der Strömung beeinflusst wird.

Unterschiedliche experimentelle Methoden wurden angewendet und bewertet, um die Schubspannungsgeschwindigkeit u^* zu ermitteln. Die Clauser Methode und die direkte Messung der Reynoldsspannung führen zu ähnlichen Resultate der lokalen Werte von u^* in der Mitte der Sedimentablagerungen. Jedoch ist die Standardabweichung der geschätzten u^* für die Methode von Clauser erheblich kleiner. Alle Terme der Saint Venant Gleichungen werden einzeln aus den mit hoher zeitlicher Auflösung gemessenen Variablen $V(t)$, $h(x, t)$ unter Verwendung der dynamischen und kinematischen Fließgesetze errechnet. Die räumliche Veränderung der Fließtiefe $\partial h/\partial x$ ist der bedeutendste Term zur Ermittlung der Spannungseigenschaften. Wegen des Einflusses der Querschnittsgeometrie führt die Berechnung von lokalen Werten von u^* mittels der dynamischen Saint Venant Gleichungen zu geringeren Werten als die Bestimmung von u^* mit den oben genannten Methoden. Der genaue Einfluß der Querschnittsgeometrie auf die ungleichförmige Verteilung von u^* entlang des benetzten Umfangs O wird in dieser Arbeit aufgezeigt. Dabei wurde eine starke Hysterese in der Beziehung zwischen der Fließtiefe h und "realen" dynamischen Werten der Schubspannungsgeschwindigkeit u^* beobachtet.

Die einzelnen Einflussgrößen auf die Sohl Schubspannungen wurden identifiziert. Die Einflüsse von i) Sohlneigung, ii) Ungleichförmigkeit des Durchflusses, iii) Instationarität und iv) Querschnittsgeometrie wurden analysiert. Wenn die Fliesseigenschaften nicht miteinbezogen werden, führt dies zu einer klaren Fehlinterpretation der berechneten Sohl Schubspannungen. Daraus ergibt sich die wichtige Schlussfolgerung, daß die Sohl Schubspannung während instationärer Strömung in Entwässerungssystemen nicht durch stationäre Ansätze beschrieben werden kann. Dennoch können vergleichbare Resultate erreicht werden, wenn beim stationäre Ansatz die Wasserspiegellage als Energiegefälle i_e angesetzt wird. Aufgrund der Erkenntnisse dieser Arbeit müssen diejenigen Modellierungsansätze für den Sedimenttransport, die auf Sohl Schubspannungen basieren, daher die spezifischen Attribute der Strömung berücksichtigen.

Der Einfluss der Strömung auf Reibungseffekte wurde untersucht. Die Relation zwischen dem Parameter b_{un} und der additiven Konstante \overline{B}_R wurde in der vorliegenden Arbeit ermittelt. Es zeigte sich, das Reibungseffekte bei grossen Fließtiefen in instationären Strömungen geringer sind als in stationären Strömungen.

Ausserdem wurde der Einfluß der instationären Strömungseigenschaften auf Durchflussmessungen in Entwässerungssystemen (Methoden) und die Modellierung des partikulären Stofftransportes untersucht. Die Mehrzahl der verfügbaren Messgeräte berechnet den Durchfluss aus dem Verhältnis zwischen durchschnittlicher querschnittsgemittelter Geschwindigkeit V und maximaler Geschwindigkeit im Querschnitt u_{max} . Die Abhängigkeit zwischen V/u_{max} und der relativen Fließtiefe h/D wurde aufgrund der Strömungsexperimenten ermittelt. Außerdem wird die empirische Relation

zwischen V/u_{max} und dem Fließparameter b_{in} beschrieben. Die Sensitivität von Sedimenttransportmodellen bezüglich des zeitlichen Verhaltens der Sohlschubspannung wurde ermittelt. Es zeigte sich, dass die Anwendung von Transportmodellen, die auf stationären Strömungsbedingungen basieren, in instationären Strömungssituationen zu großen Fehlern in den berechneten Sedimenttransportraten führt.

Fasst man die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen, so konnte der Einfluß von instationären Strömungseigenschaften in offenen Gerinnen auf verschiedene Strömungsparameter eindeutig gezeigt werden. Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Methode erlaubt es, die hochgradig dynamischen Prozesse der oben beschriebenen Fließzustände zu untersuchen. Das ist gerade im Hinblick auf Kanalisationen sehr relevant und es wird erwartet, dass das erarbeitete Wissen zu einem besseren Verständnis von instationären Stofftransport- und Umwandlungsprozessen in städtischen Entwässerungssystemen beiträgt.