

# Möglichkeiten und Grenzen von Schwallspülungen bei Anlagen zur Mischwasserbewirtschaftung

Dr.-Ing. Jörg Schaffner

Steinhardt Wassertechnik GmbH, Röderweg 10, D – 65232 Taunusstein,

E-mail: [Joerg.Schaffner@steinhardt.de](mailto:Joerg.Schaffner@steinhardt.de)

**Kurzfassung:** Sedimentablagerungen in Abwasserkanälen reduzieren deren hydraulische Leistungsfähigkeit und belasten angeschlossene Gewässer und Kläranlagen. Die Schwallspülung ist ein historisches Verfahren, welches weltweit zur Reinigung von Abwasserkanälen und Regenbecken eingesetzt wird. Zahlreiche Spülverfahren wurden gerade von deutschen Herstellern entwickelt und bieten bei korrektem Einsatz die Möglichkeit einer energie- und ressourcenschonenden Reinigung. Neben den Vorteilen, die eine Schwallspülung bietet, ist es aber notwendig auch die limitierenden hydraulischen Randbedingungen zu beachten, die eine erfolgreiche Spülung behindern können. Eine realistische Einschätzung dieser Bedingungen während der Planungsphase eines Schwallspül-systems erfordert Erfahrung und den Einsatz von modernen Berechnungsmethoden für Spülwellen. Die numerische Modellierung von Schwallspülungen war der Gegenstand wissenschaftlicher und praktischer Untersuchungen und hat sich als Werkzeug zur Berechnung von Spülwellen in der Praxis bewährt. Das vorliegende Paper betrachtet die genannten Aspekte und zieht zum Abschluss ein kritisches Fazit.

**Key-Words:** Schwallspülung, Kanalsedimente, numerische Modellierung, Reinigung von Regenbecken und Kanälen, Grenzbedingungen.

## 1 Einleitung

Die Nutzung von Schwallwellen ist eine der ältesten Methoden um Abwasserkanäle von Ablagerungen zu reinigen. Die erste erwähnte Spülung von Kanälen war die der Cloaca Maxima in Rom ca. 500 – 550

v.C. Während des Mittelalters gerieten die Kenntnisse der Römerzeit in Vergessenheit. Die ersten bekannten Schwallspülungen der Neuzeit stammen aus Paris im Jahre 1663 und England 1678. Am Ende des 19. Jahrhunderts war die Schwallspülung in den großen europäischen Städten eingeführt. (Bertrand-Krajewski, 2003) (Abbildung 1)

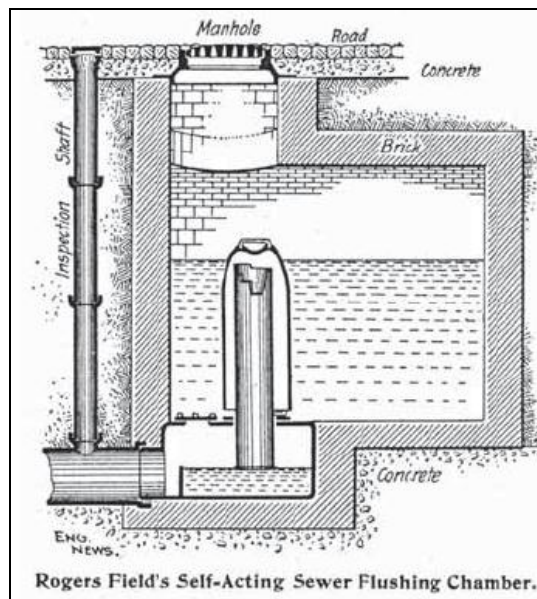


Abbildung 1: Roger Field's selbsttätige Kanalspülkammer, 1896 (Bertrand-Krajewski, 2003)

Nach dem 2. Weltkrieg geriet diese Technik der Kanalreinigung erneut in Vergessenheit und wurde Anfang der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts wieder entdeckt. Speziell in Deutschland wurden von mehreren Firmen zahlreiche Spülsysteme entwickelt, um unterschiedlichen Kanalbauwerken und deren hydraulischen Randbedingungen gerecht zu werden. Heute kann man die Schwallspülung von Kanälen und Becken als weltweit bewährte Technik bezeichnen, die bei sinnvoller Anwendung ihre Reinigungsleistung in zahllosen Projekten unter Beweis gestellt hat. Eine umfangreiche Zusammenfassung numerischer, experimenteller und praktischer Untersuchungen zu Schwallwellen ist in Schaffner (2008) zu finden.

Im Folgenden sollen sowohl die Möglichkeiten von Schwallspülungen in Haupt- und Nebensammlern, sowie in Regenbecken beschrieben, als auch die Einsatzgrenzen dieser Technik kritisch betrachtet werden. Ein besonderer Fokus wird dabei auf die Methoden der Berechnung von

Spülwellen gelegt, die als Nachweis der potentiellen Reinigungsleistung dienen können.

## 2 Kanalsedimente

### 2.1 Entstehung und Inhaltsstoffe

Die Sedimentation von Feststoffen erfolgt, wenn die Strömungsverhältnisse keinen Transport dieser Stoffe ermöglichen. Dies kann auf eine zu geringe Transportkapazität der Strömung, aber auch auf zu geringe horizontale Strömungskräfte zurückgeführt werden. Das bedeutet, die durch Turbulenz erzeugte Komponente der Strömung reicht nicht mehr aus, um die Feststoffe gegen die Gravitation in Schwebelage zu halten.

Die Zusammensetzung und Inhaltsstoffe von Kanalablagerungen sind stark abhängig vom jeweiligen Einzugsgebiet. Im Allgemeinen handelt es sich um bei den eingetragenen Feststoffen z. B. um Papier, Haare, Fasern, Sand und Splitt, die in Größe, Dichte und Struktur sehr unterschiedlich sein können. Nach Blumberg und Bauer (1994) können Ablagerungen als Paste mit mineralischen Einschlüssen beschrieben werden. Die sich einstellenden Ablagerungsformen sind von den hydraulischen Strömungsverhältnissen abhängig und können in Höhe zwischen Millimetern und Dezimetern differieren.

Kanalablagerungen werden durch erhöhten Abfluss im Kanal (z. B. Starkregenereignisse, Reinigungsmaßnahmen etc.) remobilisiert, d. h. es kommt infolge einer Abflusssteigerung zu einem Überschreiten der kritischen Fließbedingungen und so zur Erosion der Feststoffe. Der entscheidende Parameter ist dabei die kritische Sohlschubspannung, die bei Überschreiten von  $\tau_{\text{krit}}$  für den Beginn des Feststofftransports verantwortlich ist. Zeitliche und örtliche Schwankungen des Strömungsangriffs infolge von Turbulenzen tragen ebenfalls zum Bewegungsbeginn bei. Nach dem Überschreiten der Haltekräfte der Ablagerungen, kommt es zum Herauslösen von einzelnen Körnern bis hin zum Ablösen ganzer Kornverbände. Der bekannteste Ansatz zur Berechnung des Bewe-

gungsbegins ist der nach Shields (1936). Eine Zusammenfassung der Berechnungsansätze ist in Kirchheim (2005) zu finden (Schaffner, 2003).

Kanalsedimente zeigen ein breites Spektrum von kritischen Schubspannungen (Ashley et al., 2004). Ein durchschnittlicher Wert für die kritische Schubspannung von Kanalablagerungen wurde durch Ristenpart (1995) mit einer Spanne von 3 N/m<sup>2</sup> bis 5 N/m<sup>2</sup> angegeben, um zufriedenstellende Reinigungsergebnisse einer Spülwelle sicherzustellen. Dieser Wert wurde von Dettmar (2005) und Schaffner (2008) bestätigt.

## 2.2 Auswirkungen von Ablagerungen und Reinigungsmaßnahmen

Ortsfeste Ablagerungen an der Sohle des Kanals reduzieren den Fließquerschnitt  $A$  [m<sup>2</sup>] und damit auch den hydraulischen Radius  $r$  [m] des betroffenen Kanalprofils (Abbildung 2). Aufgrund ihrer Abhängigkeit vom hydraulischen Radius verringert sich die Fließgeschwindigkeit  $v$  [m/s] mit steigender Höhe der Kanalablagerungen.

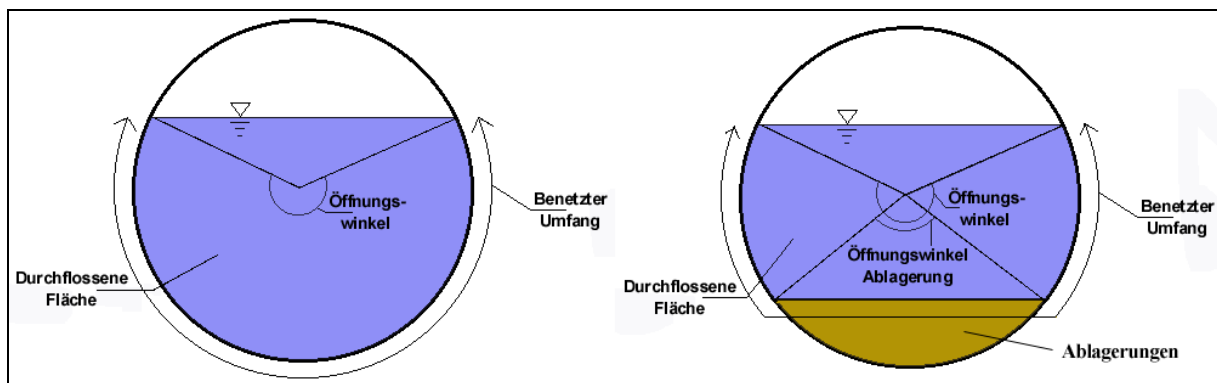


Abbildung 2: Kanalquerschnitt ohne und mit Ablagerungen.

Die mit den ortsfesten Kanalablagerungen verbundene Erhöhung der Rauheit an der Sohle des Kanals bewirkt ebenfalls eine Reduzierung der Schubspannung am Boden. Die daraus resultierende Verminderung des Abflusses fördert wiederum weitere Ablagerungen, die langfristig eine regelmäßige Kanalreinigung erforderlich machen.

Die Reinigung eines Kanals mittels Hochdruckspülung ist die häufigste Art der Kanalsäuberung in Deutschland. Sie weist aber erhebliche Nachteile auf. Die Hochdruckspülung ist sehr energieaufwändig und

erzeugt dadurch hohe Kosten. Sie belastet durch den Gebrauch von Frischwasser die Ressourcen und erzeugt für das Bedienungspersonal sehr unhygienische Arbeitsbedingungen (Schaffner, 2003).

### 2.3 Ablagerungen in Regenbecken und Hauptsammlern

Die bewusst erzeugte geringe Strömungsgeschwindigkeit in Regenbecken begünstigt die Ablagerungen von zunächst schwebenden Stoffen und nach der Entleerung der Becken verbleiben die meisten dieser Stoffe an der Beckensohle. Ohne eine Reinigungseinrichtung werden sich diese Ablagerungen während der nächsten Trockenperiode zu einer Schicht konsolidieren und anschließend verfestigen. Langfristig beginnen die Ablagerungen die hydraulische Leistung des Beckens zu beeinflussen und stellen Geruchsbelästigungen dar. Abbildung 3 zeigt Ablagerungen in einem Regenbecken und einem Hauptsammler.



Abbildung 3 : Ablagerungen in einem Regenbecken (links) und einem Hauptsammler (rechts).

In Hauptsammlern der Mischkanalisation wird die Sedimentation durch schwache Längsgefälle, geringe Trockenwetterabflüsse und geringe Fließgeschwindigkeiten begünstigt. Während eines Regenwetterabflusses werden nicht alle Ablagerungen abgetragen und der zuvor beschriebene Kreislauf der Ablagerungen und die Reduzierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit des Kanalquerschnittes beginnt. Aus diesem Grunde kann es bei starken Ablagerungen und Querschnittreduzierungen zu einem häufigeren Anspringen von Regenüberläufen und der damit verbundenen Gewässerbelastung kommen. Umfangreiche

Untersuchungen zum Thema Kanalablagerungen finden sich in Ashley et al. (2004), Ashley et al. (2005) und Kirchheim (2005).

### 3 Hydraulik von Spülwellen

#### 3.1.1 Analytische Ansätze

Spülwellen können hydraulisch gesehen wie Dammbruchwellen betrachtet werden und entstehen durch den Zusammenbruch eines freistehenden Wasserkörpers aufgrund von Gravitation und Druckkräften. Sie gelten mathematisch gesehen als sogenannte Anfangswertprobleme (Riemannproblem), bei denen die Initialbedingungen als nahezu konstant definiert werden. Lediglich in einem Punkt, an der Front des Wasserkörpers, sind sie unstetig. Die hydrodynamischen Gleichungen zur Beschreibung der Massen- und Impulserhaltung von Dammbruchwellen sind die Navier-Stokes Gleichungen (3-D), die Flachwassergleichungen (2-d) unter Annahme von hydrostatischen Verhältnissen und die Saint-Venant Gleichungen (1-D) (Schaffner, 2008).

Es sind zahlreiche analytische Ansätze zur Beschreibung von Dammbruchwellen verfügbar, doch alle basieren auf vereinfachenden Grundannahmen, die es nicht ermöglichen Spülwellen unter dem Einfluss von Längsneigung und Reibung aufgrund von Ablagerungen in z. B. Kreis- oder Eiprofilen zu berechnen.

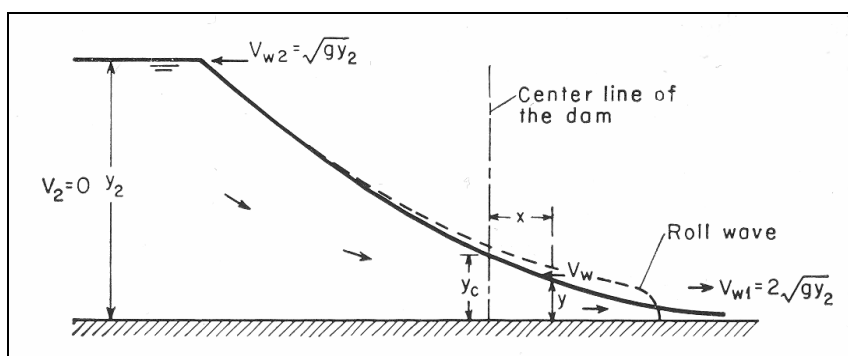


Abbildung 4: Dammbruchwelle – Spülwelle ohne Unterwasserstand (Chow, 1959).

Der älteste analytische Ansatz hierzu wurde von Ritter (1892) entwickelt und basiert auf der Annahme eines trockenen horizontalen Rechteck-

gerinnes ohne Reibung und eines unbegrenzten Wasservolumens stromauf der Dammbuchstelle (Abbildung 4).

Vorausgesetzt, dass das eingestaute Spülvolumen ( $h = y_2$ ) zum Zeitpunkt  $t = 0$  keine Fließgeschwindigkeit besitzt ( $V_2 = 0$ ) und eine trockene Gerinnesohle stromabwärts der Spülklappe vorhanden ist ( $y_1 = 0$ ), kann die Geschwindigkeit der Welle  $V_w$  an einem bestimmten Punkt (Wasserspiegelhöhe  $y$ ) mit Gleichung 1 beschrieben werden:

$$V_w = 3\sqrt{g \cdot y} - 2\sqrt{g \cdot y_2} \quad (1)$$

Abbildung 4 zeigt ebenfalls den Verlauf einer Dammbuchwelle (gestrichelte Rollwave) unter Einfluss von Sohlreibung. Diese Lösung von Dressler (1952), die Verbesserung der Ritter Gleichung, beinhaltet den Einfluss der Reibung auf die Form, die Ausbreitung und die Geschwindigkeit der Dammbuchwelle. Anders als bei Lösungen, die eine trockene Kanalsohle voraussetzen, leitete Stoker (1957) eine analytische Lösung für eine Dammbuchwelle auf einer benetzten Sohle basierend auf die Saint-Venant Gleichung ab (Schaffner, 2008).

Zur Berechnung von Schwallwellen in Regenbecken verwendeten Yu und Tan (2005) die Lösung von Lauber und Hager (1998) für die Berechnung der Wellenhöhe, Wellengeschwindigkeit und Schubspannungen, um den Reinigungseffekt eines Spülschildsystems mit begrenzter Wasserversorgung in einem physikalischen Experiment zu untersuchen.

### 3.1.2 Numerische Modellierung

Aufgrund der zahlreichen Einschränkungen und der vereinfachten Annahmen der analytischen Ansätze ist die Verwendung von kalibrierten numerischen Modellen für die Berechnung bzw. Abbildung von Spülwellen und deren Reinigungsleistung der geeignete Weg (Steinhardt GmbH, 2008; Brede, 2007). Abhängig von der verfügbaren Rechenkapazität, der Rechenzeit, der Feinheit des numerischen Gitters und der gewünschten Genauigkeit der Ergebnisse können ein-, zwei- oder dreidimensionale numerische Modelle gewählt werden.

Eindimensionale Modelle basieren auf den Saint-Venant Gleichungen und bieten schnelle Berechnungen mit breiten- und tiefengemittelten Ergebnissen. Sie sind häufig sehr einfach anzuwenden, doch die Verwendung von numerischen Verfahren muss sorgfältig gewählt werden. Modelle, die konstante und differenzierbare Funktionen voraussetzen, sind ungeeignet, um sehr unetetige Strömungsverhältnisse wie Spülwellen zu beschreiben (Steinhardt GmbH, 2008).

Zweidimensionale Berechnungsmodelle basieren auf den tiefengemittelten Navier-Stokes Gleichungen, die auch als Flachwassergleichungen bezeichnet werden. Die grundlegenden Annahmen sind eine hydrostatische Druckverteilung über die Wassertiefe sowie eine tiefenkonstante horizontale Geschwindigkeit. Die Modelle werden sehr häufig in der Simulation von Flussgebieten, z. B. bei der Hochwasservorhersage eingesetzt und bieten aufgrund ihrer Annahmen tiefengemittelte Ergebnisse für einen Abflussquerschnitt. Die Modellerstellung ist relativ einfach und die Berechnungsdauern sind als moderat zu bezeichnen (Schaffner, 2008).

Dreidimensionale Modelle lösen die Navier-Stokes Gleichung mit Hilfe von Turbulenzmodellen für komplexe Geometrien und können dabei sehr detaillierte Ergebnisse erzielen. Die Sohlschubspannung kann beispielsweise in den unteren Gitterzellen des Strömungsfeldes sehr genau mittels der turbulenten kinetischen Energie eines  $k-\epsilon$  Turbulenzmodells berechnet werden. Die Nachteile von dreidimensionalen Modellen liegen zum einen in der sehr aufwändige Gitternetzherstellung sowie den sehr langen Rechenzeiten. Planungsaufgaben für längere Kanäle oder Kanalnetze sind mit 3-d Modellen momentan nicht praktikabel (Oberlack et al., 2005; Schaffner, 2008).

## **4 Möglichkeiten von Spülwellen**

### **4.1 Schwallspülungen in Regenbecken und Kanälen im Nebenschluss**

Die häufigsten Spülvorrichtungen für rechteckige Regenbecken und Stauraumkanäle in Nebensammlern sind Spülklappen, Spülkippen und



Vakuum-Spülsysteme. Runde Regenbecken können mit speziellen Spülsystemen gereinigt werden, die radiale Schwallwellen erzeugen (Schaffner, 2008). In der Regel ist Regen- oder Mischwasser das Spülmedium für Klappen- oder Vakuumsysteme. Während der Befüllung der Regenbecken oder Staukanäle werden Vorratskammern gefüllt, die das notwendige Spülvolumen zurückhalten und es nach der Entleerung des jeweiligen Bauwerks für die Reinigung der Sohle von Ablagerungen mit einer einzigen Spülwelle freigeben (Abbildung 5).

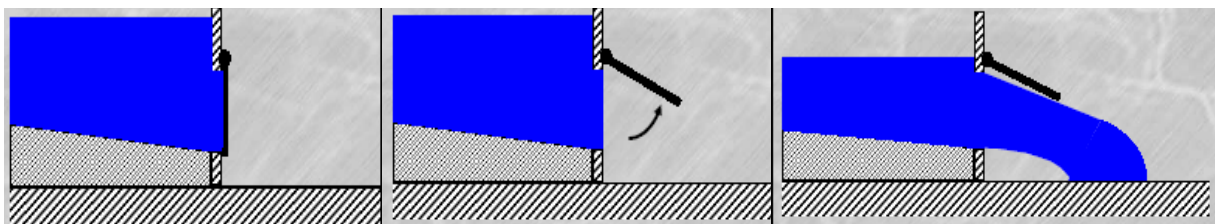


Abbildung 5: Prinzip des Klappenspülsystems

Klappensysteme können, abhängig vom Spülvolumen und dem Längsgefälle des Bauwerks, eine effektive Reinigungslänge von bis zu 400 m erreichen (Schaffner, 2008).

Abbildung 6 (links) zeigt die Anfangsphase einer Spülwelle durch ein Klappensystem. In Abbildung 6 (rechts) ist ein Spülklappensystem in einem Stauraumkanal abgebildet.



Abbildung 6: Spülklappensystem in einem Regenbecken (links) und einem Stauraumkanal (rechts) (Steinhardt GmbH)

Eine weiteres Reinigungssystem für Regenbecken sind Spülkippen. Sie werden an der Beckenoberkante oder Bauwerksdecke montiert und extern mit Frischwasser, Regenwasser oder Brauchwasser befüllt. Nach

Auslösung der Spülung rutscht das Spülvolumen an der Beckenwand nach unten und bildet an der Beckensohle eine Spülwelle (Abbildung 7).

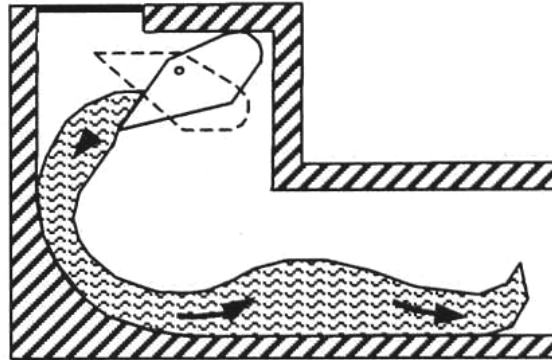


Abbildung 7: Prinzipskizze Spülkippe (Dettmar, 2005)

Die effektive Spüllänge von Spülkippen hängt von der gewählten Kapazität und der Fallhöhe ab. Aufgrund der Tatsache, dass das Spülvolumen komplett in Sekundenbruchteilen entleert wird und die Beckenwand entlang zur Sohle rutscht bzw. fällt entsteht eine Spülwelle mit einer sehr großen Anfangsgeschwindigkeit. Da jedoch kein weiteres Spülwasser nachfolgt ist die Transportkapazität einer solchen Welle als gering einzustufen. Durch den hohen Lufteintrag und die daraus resultierende geringere Dichte der Spülwelle sind die erzielten Sohlschubspannungen und damit die Reinigungsleistung der Spülkippe begrenzt. Unter Idealbedingungen kann die effektive Spüllänge 50 m erreichen (Schaffner, 2008).

Spülklappen oder Vakuumsysteme lassen das vorhandene Spülvolumen durch eine breite aber relativ niedrige rechteckige Öffnung verzögert frei und kreieren eine dammbruchartige Spülwelle mit deutlich längerer Fließzeit als z. B. eine Spülkippe. Mit dieser Methode entsteht eine Spülwelle mit einer hohen Fließgeschwindigkeit entlang der Spülbahn. Das Spülvolumen ist in der Regel so bemessen, dass die Entleerung der Speicherkammer erst abgeschlossen ist, wenn die Spitze der Welle das Ende der Spülstrecke erreicht. Dadurch ist ein hohes Transportvermögen der Spülwelle, ähnlich wie bei einer Dammbuchwelle, auch über lange Spülstrecken gewährleistet. Der Verlauf der Sohlschubspannungen von Spülwellen, die z. B. durch Klappensysteme erzeugt werden, zeigt kurze und extrem hohe Maxima zu Beginn der

Spülstrecke. Diese reduzieren sich dann langsam. Am Ende der Spülstrecke sind, bei korrekter Bemessung des Spülvolumens, auch bei längeren Stauraumkanälen die kritische Erosionsschubspannungen noch deutlich überschritten (Kirchheim et al., 2005).

## 4.2 Schwallspülungen in Mischwasserkanälen

Das hydraulische Prinzip für die Schwallspülung von Hauptsammlern ist das Aufstauen des notwendigen Volumens hinter einem Spülschild im Kanal – ohne zusätzliche Speicherkammern – und das Entlassen der Welle durch das plötzliche Öffnen des Schildes. Die Reinigung kann präventiv in regelmäßigen Abständen oder aber nach langen Trockenzeiten bei Bedarf erfolgen, wenn sich eine Sedimentschicht aufgebaut hat (Abbildung 8).



Abbildung 8: Hydraulischer Kanalspüler (Steinhardt GmbH)

Hydraulisch betriebene Spüleinrichtungen arbeiten unter kontrollierten Bedingungen, wobei die Stauhöhe und der stromabwärtige Wasserstand durch Ultraschallsonden gemessen werden und das Öffnen der Klappe durch eine programmierbare Steuerung geregelt wird. Daher können z. B. Datum und Uhrzeit einer Reinigung frei gewählt werden. Abhängig von den örtlichen Gegebenheiten der Ablagerungen, der Kanalhydraulik und den Anforderungen des Betreibers ist es möglich ein detailliertes Spülprotokoll einzurichten, das im Betrieb flexibel angepasst werden kann. Ebenso ist es möglich, problematische hydraulische Standorte, wie z. B. stromabwärtige Drosseln in einem Entlastungsbauwerk zu

berücksichtigen. Durch die Schaffung einer großen, aber kontrollierten ersten Spülwelle werden die meisten Ablagerungen im Kanal entfernt. An der Drossel wird die Spülwelle abgebremst und rückgestaut, so dass es zu einer Sedimentation kommen kann bis das Spülvolumen abgelaufen ist. Eine zweite kleinere Spülwelle, die mit kleinen Verlusten in der Fließgeschwindigkeit an der Drossel entwässert wird, transportiert diese abgesetzten Sedimente. Es ist auch möglich, die Höhe der Spülwelle an der Drossel an die Höhe der Schwelle des Regenentlastungsbauwerks anzupassen, so dass es nicht zu ungewollten Entlastungen kommt.

Hauptsammler mit einem Durchmesser von 500 – 3500 mm können mit hydraulisch betriebenen Spülschilden gereinigt werden. Die effektive Spüllänge kann, je nach Randbedingungen, bis zu mehrere Kilometer betragen. Die limitierenden Faktoren für Kanalspülungen werden in den Folgekapiteln beschrieben.

Der von der Spülwelle durchströmte Kanalquerschnitt ist im Vergleich zur meist langen Einstaustrecke stromauf relativ klein und verursacht so einen lange Abflussdauer des Spülvolumens entlang der Spülstrecke. Die erzielten Sohlschubspannungen von Systemen mit Spülschilden in Hauptsammlern sind im Vergleich zu Beckenspülungen gerade in der Initialphase deutlich geringer. Doch aufgrund der langen Ablaufdauer der Spülwelle und dem sehr hohen Transportvermögen des Spülvolumens sind lediglich Sohlschubspannungen knapp über dem kritischen Erosionswert notwendig um eine zufrieden stellende Reinigung der abgelagerungsbehafteten Kanalhaltungen zu gewährleisten (Brede, 2007; Steinhardt und Schaffner, 2006).

Spülschilde in Hauptsammlern sind derzeit noch nicht so weit verbreitet wie z. B. Klappensysteme oder Spülkippen in Regenbecken. In den letzten Jahren wurden die Möglichkeiten einer Schwallspülung in Mischwasserkanälen von vielen Kanalnetzbetreibern erkannt und eingesetzt. Gerade bei dieser Anwendung ist eine fundierte Auslegung des Spülsystems erforderlich und kann in sinnvoller Weise durch die zuvor beschriebenen eindimensionalen Berechnungsmodelle unterstützt werden.

### 4.3 Schwallspülungen von Dükerbauwerken

Die Reinigung von Sonderbauwerken mittels Schwallspülung stellt eine besondere Herausforderung an die Auswahl und Dimensionierung des Spülsystems. Düker sind häufig anzutreffende Sonderbauwerke, die aufgrund ihrer Geometrie zu verstärkten Ablagerungen neigen. Die herkömmliche Reinigung von Dükern mit Hochdruckspülern ist sehr aufwändig und kostenintensiv. Eine Alternative ist die Anwendung von Spülschilden im Unterhaupt des Dükerbauwerkes.

Durch den Einstau des Dükeroberwassers und das plötzliche Öffnen des Schildes entsteht die zuvor beschriebene Sunkwelle, die den Düker durchläuft und hohe Sohlschubspannungen erzeugt (Schaffner und Steinhardt, 2009 und 2011a).

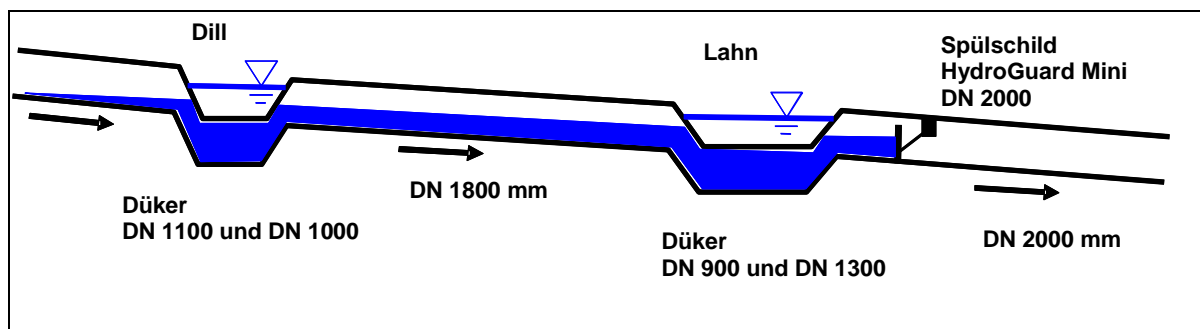


Abbildung 9: Anwendung eines Spülschildes zur Dükerreinigung in Wetzlar.

Abbildung 9 zeigt ein Beispiel für eine Anwendung eines hydraulisch betätigten Spülschildes in der Stadt Wetzlar. Die Staulänge passiert zwei Düker unter den Flüssen Dill und Lahn. Hier wird die hydraulische Wirkung der negativen Sunkwelle zur Reinigung der Düker von biologischen Ablagerungen genutzt (Steinhardt GmbH, 2008).

## 5 Grenzen von Spülwellen

### 5.1 Limitierende Faktoren für Spülenwellen in Hauptsammlern

#### 5.1.1 Geringer oder hoher Trockenwetterabfluss

Der Trockenwetterabfluss ist bei der Spülung in Hauptsammlern für das Einstauen des Spülvolumens hinter dem Spülschild verantwortlich. Bei geringen Trockenwetterabflüssen kann es z. B. bei der Notwendigkeit großer Spülvolumina dazu kommen, dass der Einstau zahlreiche Stunden dauern kann. Lange Einstaudauern führen zu Ablagerungen im Einstaubereich, die möglicherweise von der Sunkwelle nicht abgetragen werden. Zusätzlich kommt es zu Geruchsbelästigungen, wenn das eingestaute Spülvolumen gerade bei sommerlichen Wetterlagen über einen größeren Zeitraum im Kanal steht.

Ein Grenzbereich der Kanalspülung mit geringem Trockenwetterabfluss liegt bei Haltungen, die sich unmittelbar vor der Kläranlage befinden. Bei ungünstigen hydraulischen Verhältnissen kann es aufgrund langer Einstauzeiten des Spülvolumens zu einem Trockenfallen der Haltung und so zu einer Unterversorgung von z. B. kleinen Kläranlagen in ländlichen Gebieten kommen. Die Spülwelle selbst bringt dann Schmutzstoffe in großer Menge stoßartig zur Kläranlage und belastet deren Betrieb zusätzlich.

Mischwasserkanäle, die einen sehr großen Trockenwetterabfluss aufweisen, können aber auch ein Problem für die Effektivität einer Schwallspülung darstellen. Wenn der Einstau des benötigten Spülvolumens beispielsweise in nur wenigen Minuten stattfindet, kann sich der Spülbereich stromab des Spülschildes nur unzureichend entleeren. Die Folge ist, dass die Spülwelle direkt in ein noch vorhandenes Wasserpolster, resultierend aus dem noch vorhandenen Trockenwetterabfluss, einströmt, welche die Welle abbremst und so ihre Wirkung stark schwächt (Schaffner und Steinhardt, 2011b).

In der Praxis tritt der erste Fall des geringen Trockenwetterabflusses deutlich häufiger auf als der zweite Fall. Kanäle mit hohen Trockenwetterabflüssen weisen in der Regel eine ausreichend große Sohlschub-

spannung auf und müssen seltener gereinigt werden. Eine Möglichkeit, die Problematik der langen Einstaudauer zu vermeiden, ist eine Spültaktik bei Regenwetter. Dabei wird der erste stärkere Abfluss eines Regenereignisses für den Einstau und die Spülung genutzt. Nach dem Abklingen des Regenwetterabflusses kann noch einmal Spülvolumen zurückgehalten und nach Entleerung unten liegenden Haltungen zur Reinigung genutzt werden.

#### 5.1.2 Geringes oder hohes Längsgefälle an der Kanalsohle

Kanäle oder Teilbereiche des Kanalnetzes mit geringem Sohlgefälle bieten die Möglichkeit, große Spülvolumina einzustauen. Die Einstaudauer kann dabei jedoch wie bereits erläutert zum Problem werden. Beim Einsatz eines einzelnen Spülschildes kann es auch dazu kommen, dass Sedimente aus einem Teil des flachen Netzes in einen anderen Teil gespült werden, wo sie sich auf Grund mangelnder Transportkapazität des Kanals wieder ablagern. In diesem Falle sollte der Betreiber das Netz als Ganzes betrachten und einen Weitertransport der Ablagerungen bis zur Kläranlage durch den Einbau entsprechender Spülsysteme in kaskadenförmiger Anordnung gewährleisten.

Kanäle mit hohem Sohlgefälle weisen in der Regel ausreichend hohe Sohlschubspannungen auf und benötigen keine Spüleinrichtungen. Wenn jedoch der Einstaubereich eines Kanalspülers für ein ablagerungsbehaftetes Teilstück in ein steiles Kanalstück fällt, kann es vorkommen, dass kein ausreichendes Spülvolumen vorgehalten werden kann und die effektive Spüldistanz reduziert wird. In diesem Falle ist es nötig, nur ein kleines Teilstück zu spülen und weiter stromab ein weiteres Spülorgan zu platzieren.

#### 5.1.3 Seitliche Zuflüsse und Unterwasserstände

Seitliche Zuflüsse zu einer Spülstrecke stromab der Schwallspüleinrichtung oder geringe Einstauzeiten aufgrund hohen Trockenwetterabflusses und die damit verbundene geringe Entleerung der Spülstrecke, führen zu Unterwasserständen, die eine Spülwelle stark behindern können. Numerische Untersuchungen von Schaffner und Steinhardt (2011b) zeigen, dass es bei bestimmten hydraulischen Verhältnissen notwendig werden kann, das ursprüngliche Spülvolumen um bis zu

500 % zu erhöhen, um eine effektive Schwallwelle zu erzeugen. Andernfalls läuft die Spülwelle in ein Wasserpolster und verliert ihre Fließgeschwindigkeit und die damit hohen verbundenen Sohlschubspannungen.

#### 5.1.4 Sonderbauwerke

Sonderbauwerke in der Mischwasserkanalisation wie z. B. die bereits beschriebenen Regenüberläufe, Stauraumkanäle mit Drosselorganen an deren Ende oder Dükerbauwerke behindern den Ablauf einer Spülwelle und reduzieren die effektive Länge einer Kanalspülung. Der Einsatz numerischer Strömungsmodelle ist in diesen Fällen von großem Vorteil, da die ideale Spülwelle in unterschiedlichen Varianten berechnet und angepasst werden kann.

## 5.2 Spülwirkungen von Sunkwellen

Die bereits beschriebene Sunkwelle entsteht bei einer plötzlichen Öffnung des Spülschildes und erzeugt im Einstaubereich ebenfalls hohe Schubspannungen. Natürlich sind die absoluten Werte nicht so groß wie im Kopf der Spülwelle, doch sind sie häufig ausreichend, um Sedimente aufzuwirbeln, die sich während der Einstauzeit abgesetzt haben. Bei Ansatz des Standardspülvolumens können ca. 30 – 45 % der Einstaulänge von gerade abgesetzten Partikeln gereinigt werden. Verfestigte Sedimente, die schon vor dem Einstau bestanden, können in der Regel nicht von der Sunkwelle gereinigt werden. Diese sind im Rahmen einer Grundreinigung des Kanals zu entfernen.

## 5.3 Einflussfaktoren für Spülenwellen in Regenbecken

Regenbecken werden immer nach deren Entleerung gespült und sind von den bisher genannten hydraulischen Randbedingungen kaum betroffen. Es sind eher die baulichen Voraussetzung wie z. B. ein ausreichendes Längsgefälle von mindestens 0,5 % und ein Quergefälle von 0 % in den Spülstraßen, die ein Spülsystem erfolgreich machen. Wichtig ist auch ein ausreichend großer Spülsumpf, welcher das Spülvolumen komplett aufnimmt und es nicht zurück ins Becken reflektiert. Wünschenswert ist auch die Möglichkeit einer frühzeitigen Befüllung der



Speicherammern mit Misch- oder Regenwasser, so dass bei einem Teileinstau des Beckens dieses trotzdem gereinigt werden kann. Sollten diese Grundvoraussetzungen nicht gegeben sein, ist es nicht sinnvoll, eine Schwallspülung einzuplanen, da hier ein Reinigungserfolg sehr fragwürdig erscheint.

## 6 Fazit

Der Einsatz von Spülwellen zur Reinigung von Regenbecken und Abwasserkanälen im Haupt- und Nebenschluss ist eine vielfach eingesetzte Technik, die, sorgfältig geplant und angewendet, bei zahlreichen Projekten ihre Wirksamkeit unter Beweis gestellt hat. Die für den Kanalbetrieb positiven Auswirkungen sind, neben der wichtigen Erhaltung der hydraulischen Leistungsfähigkeit ablagerungsbehafteter Kanäle, die Verringerung von Entlastungsereignissen an Regenüberlaufbauwerken. Auf diese Weise reduziert sich in der Folge der damit verbundene stoffliche und hydraulische Stress auf angeschlossene Gewässer. Ferner können durch eine regelmäßige Kanalspülung belastende Schmutzstöße auf Kläranlagen verhindert und eine mögliche Schädigung der Abwasserrohre durch Schwefelsäurekorrosion minimiert werden. Geruchsbelästigungen durch Kanalablagerungen, gerade in den Sommermonaten, können auf diese Weise ebenfalls vermieden werden. Der Einsatz von Schwallspülungen ermöglicht auch eine Energie- und Kostenreduzierung durch die Nutzung der im Kanalnetz vorhandenen Ressourcen.

Diesen Vorteilen stehen die aufgezeigten Grenzen der Schwallspülung bei ungünstigen hydraulischen Verhältnissen gegenüber. Es ist sehr wichtig bei einer Einplanung von Schwallspülsystemen die lokalen hydraulischen Situationen realistisch zu beurteilen und auch mögliche Fehlerquellen zu beachten. Bestandsdaten oder ältere Kanalnetzberechnungen als Grundlage für die Planung einer Kanalspülung sind häufig mit großen Unsicherheiten behaftet und sollten daher kritisch hinterfragt werden. Wichtige hydraulische Randbedingungen wie z. B. Trockenwetterabflüsse oder seitliche Einmündungen sollten, wenn eine mangelhafte Datenlage es nötig macht, vor Ort im Kanal überprüft werden. Solche Aufwendungen sind natürlich kostenintensiv und werden

in der Planungsphase für den Hersteller von Kanalspülsystemen in der Regel nicht vergütet. Die Folge ist dann in manchen Fällen eine unseriöse Einplanung eines Spülsystems, das im späteren Betrieb nicht den Erwartungen des Betreibers entspricht. Auch eine mangelnde Erfahrung in Bezug auf den Einsatz von Spülsystemen seitens eines planenden Ingenieurbüros oder eines Herstellers kann zu unbefriedigenden Ergebnissen führen und spiegelt unter Umständen nicht das eigentliche Potenzial dieser Technik wider.

Die Bewertung oder der hydraulische Nachweis der Reinigungsleistung einer Schwallspülung ist mit analytischen Methoden nur unzureichend durchführbar. Gegenüber Kanalnetzbetreibern und Genehmigungsbehörden ist eine korrekt angewendete numerische Modellierung der einzige Weg Aufschlüsse über das Ablaufverhalten und die potentielle Reinigungsleistung der Spülwelle zu erhalten. Diese Möglichkeit wurde in zahlreichen wissenschaftlichen und praktischen Untersuchungen nachgewiesen und hat sich in den letzten Jahren in der Praxis bewährt.

Grundsätzlich stellt sich heute nicht mehr die Frage nach der generellen Effektivität von Schwallspülungen. Es ist vielmehr die richtige Anwendung der vorhandenen Techniken in unterschiedlichen Situationen und die kritische Beachtung der hydraulischen Randbedingungen, die letztendlich die Machbarkeitsgrenzen der Schwallspülung definieren.

## 7 Literatur

- Ashley RM, Bertrand-Krajewski J.-L., Hvitved-Jacobsen T. und Verbanck M. (Eds) (2004). Solids in Sewers Characteristics, Effects and Control of Sewer Solids and Associated Pollutants, Scientific and Technical Report, IWA, London.
- Ashley R., Bertrand-Krajewski J.-L. und Hvitved-Jacobsen T. (2005). Sewer solids—20 years of investigation, Water Science & Technology Vol. 52 No 3 pp 73–84.
- Bertrand-Krajewski, J.-L. (2003): Sewer sediment management: some historical aspects of egg-shaped sewers and flushing tanks, Water Science and Technology, Pergamon Press, 47, (4), 109-122.

- Brede, T. (2007). Numerische Abbildung von Spülwellen zur Reinigung des Hauptsammlers zur Kläranlage der Stadt Frankenberg, Master Thesis, Chair of Fluid Dynamics, Technische Universität Darmstadt, Germany.
- Blumberg, D.; Bauer, W. [1994]: Beseitigung von Ablagerungen in Abwasserkanälen großer Durchmesser, KA – Korrespondenz Abwasser, Heft 12, S. 1063 – 1072.
- Chow, Ven Te (1959). Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Dettmar, J. (2005). Beitrag zur Verbesserung der Reinigung von Abwasserkanälen, Fakultät für Bauingenieurwesen der RWTH Aachen, Dissertation.
- Dressler R.F. (1952). Hydraulic Resistance Effect upon the Dam-Break Function, Journal of Research, 49 (3), 217-225.
- Kirchheim, N. (2005). Kanalablagerungen in der Mischkanalisation, Deutsche Vereinigung fuer Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), Hennef.
- Kirchheim N., Schaffner J. und Oberlack M. (2005). Parameter study of a flush wave using numerical modelling, 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen/Denmark.
- Lauber G. und Hager W.H. (1998). Experiments to dambreak wave: Sloping channel, Journal of Hydraulic Research 36(5), 761-773.
- Oberlack M., Schaffner J., und Kirchheim N. (2005). Wirkungsweise und Anwendungsgrenzen eines Schwallspülsystems zur Reinigung von Stauraumkanälen, Abschlussbericht Projekt Deutsche Bundesumweltstiftung, Fachgebiet für Hydromechanik und Hydraulik, TU Darmstadt, Germany.
- Ristenpart, E. (1995). Feststoffe in der Mischwasserkanalisation, Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover, 11.
- Ritter A. (1892). Die Fortpflanzung von Wasserwellen, Zeitschrift Deutscher Ingenieure, 36 (33), pp. 947 – 954.
- Schaffner, J. (2003). Hydromechanische Grundlagen der Schwallspülung, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft Nr. 130, Technische Universität Darmstadt.
- Schaffner, J. (2008). Numerical Investigations on the Function of Flush Waves in a Reservoir Sewer, Ph.D. thesis, Department for Hydromechanics and Hydraulics, Technical University Darmstadt, Germany.

- Schaffner, J., und Steinhardt, J. (2009). Numerical investigations of sewer flushing sunk waves - Analysis of hydraulic boundary conditions and cleaning effectiveness, 8th International Conference on Urban Drainage Modelling, Tokyo, Japan.
- Schaffner, J. und Steinhardt, J. (2011a). Numerical investigations on the cleaning efficiency of artificial created surge waves in sewer siphons, International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, noch nicht veröffentlicht.
- Schaffner, J. und Steinhardt, J. (2011b). Numerical Investigations on the Effect of Sewer Cleaning Flush Waves under the Influence of Downstream Water Levels, International Stormwater and Urban Water Systems Conference, Monograph 14, Toronto, Kanada.
- Shields, A. (1936). Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt f. Wasserbau, Berlin, Heft 26.
- Steinhardt GmbH (2008). Lastabhängig vorausschauend geregelte Kanalspülung zur gewässerschonenden Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage – LASTSPUEL, Final report, Taunusstein, Germany.
- Steinhardt J., und Schaffner J. (2006). Numerical investigation of the self-acting flushing system HydroFlush GS in Frankenberg/Germany, 2nd International IWA Conference on Sewer Operation and Maintenance SOM, Vienna/Austria.
- Stoker, J. J. (1957). Water Waves – The Mathematical Theory with Applications, Interscience Publisher, New York.
- Yu G., Tan S.K. (2005). Performances of Hydraulics and Bedload Sediment Flushing in Rigid Channel using Surge Flows, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 102, (2), 171-179.

**Korrespondenz an:****Dr.-Ing. Jörg Schaffner**

Steinhardt Wassertechnik GmbH, Röderweg 10, D – 65232 Taunusstein

Tel: +49/6128/9165-0

Fax: +49/6128/9165-27

E-mail: [joerg.schaffner@steinhardt.de](mailto:joerg.schaffner@steinhardt.de)