



Doctoral Thesis

Flow characteristics, particle motion and invert abrasion in sediment bypass tunnels

Author(s):

Auel, Christian

Publication Date:

2014

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010243883> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS ETH NO. 22008

**FLOW CHARACTERISTICS, PARTICLE MOTION AND INVERT
ABRASION IN SEDIMENT BYPASS TUNNELS**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

CHRISTIAN AUDEL

Dipl.-Ing., RWTH Aachen University

born on 21st May 1979

citizen of

Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Robert M. Boes

Prof. Dr. Tetsuya Sumi

Dr. Ismail Albayrak

2014

Abstract

Sediment bypass tunnels are an effective countermeasure against reservoir sedimentation. They are operated at supercritical sediment-laden open channel flow conditions. The major drawback of these tunnels, besides high construction costs, is the severe invert abrasion caused by these flows provoking high annual maintenance costs. The project goal was to analyze the fundamental physical processes and to develop design criteria to decrease these negative effects. A laboratory study was performed in a scaled hydraulic model flume. The project was divided in three main test phases giving new insights into the dynamics of turbulence structures and particle motions, resulting bed abrasion and their interactions in a supercritical open channel flow, respectively. In phase A the mean and turbulent flow characteristics were investigated. In phase B single sediment particle motion was analyzed. In phase C the invert abrasion development in time and space was examined.

Phase A revealed that secondary current cells affect the turbulent flow pattern leading to high bed shear stress at the wall vicinity. In phase B it was found, that particles were dominantly transported in saltation. Relationships between the saltation probability, and particle hop lengths and heights to the flow Shields parameter were found. The specific impact energy was determined by the impact velocity, number of impacts and the amount of particles transported in time. In phase C the results show that bed abrasion progresses with time both in the lateral and vertical direction. Two lateral incision channels developed along the flume side walls at narrow flow conditions occurring at low flume-width to flow-depth aspect ratios $b/h < 4-5$, whereas randomly distributed pot-holes were found at wide channels where $b/h > 4-5$. The observed abrasion patterns match well with the spanwise bed shear stress distributions found in phase A. Furthermore it was found that the abraded mass linearly increases with the transported sediment mass allowing for a linear fit. Further results showed that abrasion increased with flow intensity and sediment transport rate, with highest values for the mean particle diameter category, whereas abrasion decreased with increasing material strength.

Finally, a new formulation was developed based on Sklar's *saltation abrasion model*. A new abrasion coefficient C_A is introduced correlating the impact energy and material properties with the gravimetric abrasion rate.

Zusammenfassung

Sedimentumleitstollen, eine effektive Massnahme gegen die Verlandung von Stauseen, leiten die mit dem Fluss transportierten Sedimente in schiessendem Freispiegelabfluss in das Unterwasser der Talsperre. Der Nachteil dieser Stollen ist, neben den hohen Konstruktionskosten, die starke Abrasion der Stollensohle, die zu hohen Unterhaltskosten führt. Das Ziel dieser Forschungsarbeit war die Untersuchung der grundlegenden physikalischen Prozesse, um Bemessungskriterien zu entwickeln, die diese negativen Effekte verhindern bzw. signifikant minimieren. Aus diesem Grund wurden Versuche in einem massstäblich skalierten Modell im Labor durchgeführt. Die Arbeit war in drei Versuchsteile gegliedert, in denen neue Erkenntnisse über die Turbulenzcharakteristik (Phase A), Sedimentbewegung (Phase B) und Sohlenabrasion (Phase C) in schiessendem Abfluss gewonnen wurden.

Versuchsphase A zeigte, dass Sekundärströmungen das Strömungsfeld beeinflussen und zu erhöhten Sohlschubspannungen im Nahbereich der Berandung führen. In Phase B wurde erkannt, dass sich die Partikel hauptsächlich springend fortbewegen. Es wurden Beziehungen zwischen Sprungwahrscheinlichkeit, Sprunglänge sowie –höhe und dem dimensionslosen Shields Parameter hergeleitet. Die spezifische Aufprallenergie eines Partikels wurde bestimmt als Produkt von Aufprallgeschwindigkeit, Anzahl der Aufpralle und Menge an transportiertem Material. In Phase C zeigte sich, dass die Sohlenabrasion sowohl mit der Zeit als auch im Ausmass fortschreitet. Zwei laterale Abrasionsrinnen bildeten sich bei engen Fliessquerschnitten, während bei weiten Querschnitten eher zufällig verteilte Kolklöcher zu beobachten waren. Diese Abrasionsmuster korrelierten gut mit der Verteilung der Sohlschubspannung aus Versuchsphase A. Des Weiteren wurde ein linear steigender Zusammenhang zwischen der abradierten Sohl- und transportierten Sedimentmasse gefunden. Weitere Resultate zeigten, dass die Abrasion mit der Fliessintensität und der Sedimenttransportrate steigt, wobei die höchsten Werte bei Versuchen mit dem mittleren Partikeldurchmesser beobachtet wurden, während die Abrasionsrate bei steigender Festigkeit des Sohlmaterials sinkt.

Schliesslich wurde Sklars *saltation abrasion model* weiterentwickelt und der Abrasionskoeffizient C_A eingeführt, der die Aufprallenergie und Materialeigenschaften der Sohle mit der gravimetrischen Abrasionsrate korreliert.