

# DIPLOMARBEIT

## DER GESCHIEBETRANSPORT BEI EINER STAURAUMSPÜLUNG

VORGELEGT VON

**WOLFGANG PICHLER**

GRAZ, MÄRZ 2006

EINGEREICHT AM

INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

BEGUTACHTER:

O.UNIV.-PROF. DIPL.-ING. DR.TECHN. GÜNTHER HEIGERTH

BETREUER:

ASS.-PROF. DIPL.-ING. DR.TECHN. HELMUT KNOBLAUCH

DIPL.-ING. HANNES BADURA

**Erklärung:**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, und die in den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, im März 2006

### **Danksagung:**

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Helmut Knoblauch und Herrn Hannes Badura recht herzlich für die umfangreiche Unterstützung bei den Messungen im Labor und den Auswertungen der Ergebnisse bedanken.

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit ist ein Teil des EU Interreg IIIb Projektes ALPRESERV, welches sich mit der Verlandungsproblematik von Stauräumen im Alpenraum beschäftigt. Das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz ist dabei unter anderem mit einem Modellversuch für den Stauraum des Kraftwerks Bodendorf beteiligt.

Der Modellversuch hatte zum Ziel, die hydraulischen Parameter des Geschiebetransports während einer Stauraumspülung am Kraftwerk Bodendorf zu ermitteln. Es wurden dabei die Phänomene der Deckschichtbildung, sowie die Parameter Bewegungsbeginn und maximale Bettstabilität untersucht.

In einem ersten Schritt wurden Sohlschubspannungen für eine feste Sohle ermittelt. Anschließend wurde für verschiedene Neigungen des Glasgerinnes der Geschiebetransport bestimmt. Das dabei verwendete Sediment wurde aus dem Stauraum entnommen. Für diese bewegliche Sohle wurden Sohlschubspannungen mit Hilfe von Geschwindigkeits- und Turbulenzmessungen ermittelt.

Ein Bezug zur Natur wurde durch die Erstellung eines digitalen Geländemodells und eine damit verbundene Modellierung des Stauraums hergestellt. Der im Stauraum tatsächlich auftretende Bewegungsbeginn der Sedimente konnte somit ermittelt werden. Es wurde der Zusammenhang zwischen Mindestabfluss und Mobilisierungsgrad der Sohle und der jeweils transportierten Korngrößen hergestellt. Weiters wurde auf die Bedeutung des bewegten Geschiebes für die Fischfauna der Mur eingegangen.

## **Abstract**

This thesis is part of the EU project ALPRESERV which deals with sediment management of Alpine reservoirs. The Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management (Graz University of Technology) contributes to this project by making a hydraulic model.

The objective of this experiment was to study the hydraulic parameters of bed load transportation during the flushing of the reservoir of the run-off river power station Bodendorf. The development of the armour layer, the determination of critical shear stress and the maximum bed stability of pavement have been analysed.

First of all the shear stress for a specified, fixed bed was determined. Afterwards the bed load transportation for different slopes of the flume was figured out. The sediments used in the experiment were taken out of the reservoir. With velocity and turbulence measurements the bed shear stresses were identified for this mobile bed.

A 1D – numerical model gives the relationship between model flume and nature. On the basis of this reservoir – related model the shear stresses for different discharges in each cross section could be calculated. Thus the relation of minimum flow during flushing and the degree of movement of the river bed and the transported aggregates was established. Another issue of this thesis is the description of the influence of bed load transportation on the fish fauna in the river Mur.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Allgemeines</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Problematik der Stauraumpülung des KW Bodendorf</b> .....	<b>1</b>
<b>1.3 Ziele des Modellversuchs</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 Allgemeines</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2 Parameter des Geschiebetransports</b> .....	<b>4</b>
2.2.1 Kornwiderstand und Formwiderstand .....	4
2.2.2 Bewegungsbeginn .....	4
2.2.3 Schubspannung .....	5
2.2.4 Kritische Schubspannung und SHIELDS-Parameter .....	5
2.2.5 Sortiereffekt .....	7
2.2.6 Deckschichtbildung und maximale Bettstabilität .....	7
<b>2.3 Methoden zur Schubspannungsermittlung</b> .....	<b>8</b>
2.3.1 Allgemeines .....	8
2.3.2 Ermittlung nach GEHRIG .....	8
2.3.3 Ermittlung nach GESSLER .....	9
2.3.4 Ermittlung unter Berücksichtigung der Turbulenz .....	9
2.3.5 Ermittlung aus logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen .....	11
<b>3 Modellversuch</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1 Allgemeines</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2 Geschiebeentnahme aus dem Stauraum</b> .....	<b>13</b>
<b>3.3 Aufbau des Versuchs</b> .....	<b>15</b>
3.3.1 Glasgerinne .....	15
3.3.2 Waage .....	16
3.3.3 Geschwindigkeits- und Distanzmessgerät .....	17
<b>3.4 Versuchsdurchführung</b> .....	<b>17</b>
3.4.1 Phasen .....	17
3.4.2 Variation des Gefälles und der Durchflüsse .....	21
<b>3.5 Messungen</b> .....	<b>22</b>
3.5.1 Allgemeines .....	22
3.5.2 Gewicht des transportierten Geschiebes .....	23
3.5.3 Siebanalysen .....	27

3.5.4 Sohlvermessungen .....	27
3.5.5 Geschwindigkeiten in Fließrichtung .....	28
3.5.6 Turbulenzmessung .....	29
3.5.7 Zusammenfassung .....	29
<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 Allgemeines .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2 Kornverteilungen des Geschiebes im Modellversuch .....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 Sohlschubspannungen.....</b>	<b>31</b>
4.3.1 Berechnung nach GEHRIG und GESSLER .....	31
4.3.2 Ermittlung unter Berücksichtigung der Turbulenz.....	31
4.3.3 Ermittlung aus logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen .....	32
4.3.4 Numerische Berechnung mit dem Programm HecRas .....	34
<b>4.4 Geschiebetransport .....</b>	<b>35</b>
4.4.1 Allgemeines .....	35
4.4.2 Sohlschubspannungsbereich von 2,1 bis 7,2 N/m <sup>2</sup> .....	35
4.4.3 Sohlschubspannungsbereich von 7,0 bis 12,1 N/m <sup>2</sup> .....	36
4.4.4 Sohlschubspannungsbereich von 7,0 bis 12,1 N/m <sup>2</sup> (2. Messung).....	37
4.4.5 Sohlschubspannungsbereich von 10,2 bis 17,1 N/m <sup>2</sup> .....	39
4.4.6 Sohlschubspannungsbereich von 8,9 bis 22,1 N/m <sup>2</sup> .....	40
4.4.7 Sohlschubspannungsbereich von 12,8 bis 22,1 N/m <sup>2</sup> (2. Messung).....	41
<b>4.5 Sortiereffekt .....</b>	<b>43</b>
<b>4.6 Sohlvermessungen und Lage des Wasserspiegels.....</b>	<b>45</b>
<b>5 Auswertung und Analyse der Ergebnisse.....</b>	<b>49</b>
<b>5.1 Sohlschubspannungen.....</b>	<b>49</b>
5.1.1 Ermittlung unter Berücksichtigung der Turbulenz.....	49
5.1.2 Ermittlung aus logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen .....	49
5.1.3 Zusammenfassung der Problematik .....	50
<b>5.2 Geschiebetransport .....</b>	<b>50</b>
<b>5.3 Numerische Berechnung.....</b>	<b>54</b>
<b>5.4 Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Substratansprüchen von Fischen...58</b>	<b>58</b>
<b>6 Zusammenfassung.....</b>	<b>62</b>
<b>7 Literatur.....</b>	<b>64</b>
<b>8 Verzeichnisse.....</b>	<b>65</b>
<b>8.1 Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>65</b>
<b>8.2 Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>67</b>

---

<b>8.3 Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>68</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>69</b>
<b>9.1 Geschwindigkeitsprofile .....</b>	<b>69</b>
<b>9.2 Vergleichsmessung .....</b>	<b>71</b>
9.2.1 Profil Nr. 1, 100 Hz .....	71
9.2.2 Profil Nr. 1, 200 Hz .....	72
9.2.3 Profil Nr.2, 100 Hz .....	73
9.2.4 Profil Nr. 2, 200 Hz .....	74
<b>9.3 Geschiebetransport .....</b>	<b>75</b>
9.3.1 Vergleich der 1. und 2. Messung bei der Neigung 4,65 %.....	75
9.3.2 Vergleich der 1. und 2. Messung bei der Neigung 10,0 %.....	75
9.3.3 Berechnung des Geschiebetriebs nach MEYER-PETER/MÜLLER.....	76
<b>9.4 Geschiebetransport in der Natur .....</b>	<b>83</b>



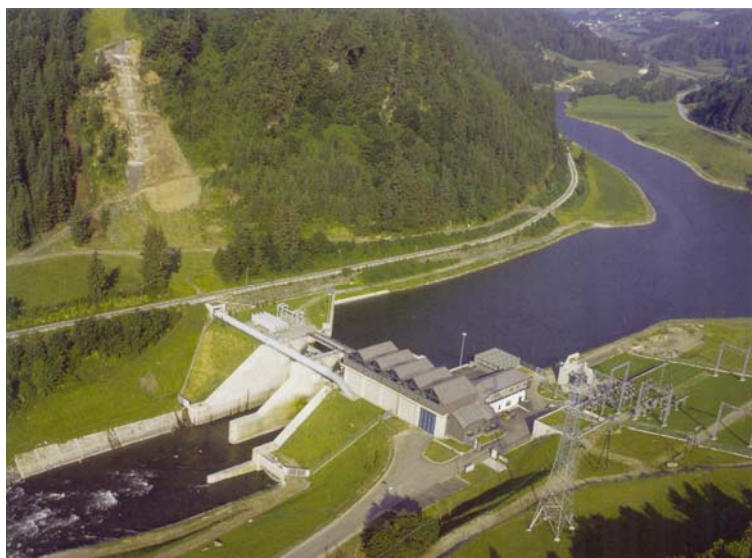
# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Der Bau einer Wehranlage zur Betreibung eines Wasserkraftwerkes bedeutet für den Flusslauf eine Unterbrechung. Die im natürlichen Fluss transportierten Feststoffe stoßen mit dem Wehr an eine künstliche Grenze und lagern sich im Stauraum ab. Aus ökonomischen, ökologischen und sicherheitstechnischen Gründen ist es notwendig, den Stauraum des untersuchten Kraftwerks Bodendorf durch Spülungen von Zeit zu Zeit zu entlanden. Die Probleme dabei liegen in der Verfestigung der Sedimente im Stauraum bei zunehmender Lagerungszeit, der Verlandung der Betriebseinrichtungen und dem fehlenden Geschiebe im Unterwasserbereich mit den damit verbundenen ökologischen Auswirkungen und einer Verminderung der Hochwassersicherheit. Mit einem Modellversuch für eine solche Stauraumspülung und letztendlich mit deren Optimierung beschäftigt sich diese Diplomarbeit.

## 1.2 Problematik der Stauraumspülung des KW Bodendorf

Im Mittelpunkt der Betrachtungen dieser Arbeit steht das Kraftwerk Bodendorf an der Mur. Dieses befindet sich im Oberen Murtal und bildet den Kopfspeicher einer Reihe von Kraftwerken an der oberen Mur (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1: KW Bodendorf nach Fertigstellung (Quelle: Verbund-Austrian Hydro Power AG)**

In diesem Fall wurde und wird der Stauraum durch so genannte Freispiegelspülungen entlandet. Dabei wird der Wasserspiegel im Stauraum soweit abgesenkt, dass es am Wehr zu einem ungestauten Abfluss kommt und die Sedimente ungehindert in das Unterwasser befördert werden können.

Die Durchführung von Stauraumspülungen ist an die in den Wasserrechtsbescheiden der Steiermärkischen Landesregierung festgesetzten Auflagen gebunden. Eine der maßgebenden Auflagen betrifft dabei den Mindestabfluss. Der Mindestabfluss legt den Beginn des Ab- und Aufstauvorgangs fest. Es wird somit gewährleistet, dass während der gesamten Spüldauer der Feststofftransport sichergestellt wird. Bei zu geringem Abfluss wird vorwiegend Sand transportiert. Dadurch kann es im Unterwasserbereich zur Einschlammung von Feinmaterial in Schotterlückenräumen kommen, wichtige Laichplätze gehen dabei verloren. In Tabelle 1 finden sich die in den bisherigen Wasserrechtsbescheiden festgelegten Mindestabflüsse mit den darin festgelegten Zeiträumen, in denen Spülungen erlaubt sind.

WR Bescheid	$Q_{\min}$	$Q_{\min}/HQ_1$	Anzahl der Spülungen	Zeitraum
GZ: 3-32 ST 16-95/96 vom 12.4.1995	100 m <sup>3</sup> /s	0,77	Genehmigung einer einmaligen Spülung	Zwischen 15. Mai und 30. Sept.
GZ: 3-32.00 B 2-98/11 vom 29.7.1998	80 m <sup>3</sup> /s	0,62	Genehmigung von 3 Spülungen innerhalb von 5 Jahren	Zwischen 15. Mai und 30. Sept.
GZ: FA13A-32.00 B 2-05/68 vom 22.3.2005	80 m <sup>3</sup> /s	0,62	Genehmigung einer einmaligen Spülung	Zwischen 15. April und 15. Mai
	160 m <sup>3</sup> /s (Vorabstau bei 120)	1,23 (0,92)	Genehmigung einer einmaligen Spülung	Zwischen 15. Mai und 30. Sept. 05

**Tabelle 1: Mindestwassermengen laut Wasserrechtsbescheiden**

### **1.3 Ziele des Modellversuchs**

Mit der Verlandungsproblematik von Stauräumen in den Alpen beschäftigt sich das EU Interreg IIIb Projekt ALPRESERV. Dieses Projekt, an dem auch das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der TU Graz beteiligt ist, umfasst Naturmessungen, numerische Berechnungen und die Durchführung eines Modellversuchs für das Kraftwerk Bodendorf.

Der Modellversuch wurde im HERMANN-GRENGG-Laboratorium am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft durchgeführt und hatte zum Ziel, den Bewegungsbeginn des Geschiebes im Stauraum, das heißt die kritische Sohlschubspannung, zu ermitteln. Es sollte das Phänomen der Deckschichtbildung und dessen Einfluss auf den Geschiebetransport untersucht werden. Von Interesse war auch, wann diese Deckschicht schließlich aufreißt und damit die maximale Bettstabilität erreicht wird.

Hier werden noch einmal die wichtigsten Ziele des Versuchs zusammengefasst:

- Bestimmung des Bewegungsbeginns des Geschiebes im Stauraum, das heißt die Bestimmung der kritischen Schubspannung
- Untersuchung des Phänomens der Deckschichtbildung und dessen Einfluss auf den Geschiebetransport
- Bestimmung der maximalen Bettstabilität (Aufreißen der Deckschicht)
- Bestimmung der transportierten Korngrößen

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden alle Parameter, die für den Modellversuch relevant sind, erläutert (vgl. BECHTELER, 2004). Es wird außerdem ein Einblick in verschiedene Methoden der Schubspannungsermittlung gegeben.

### 2.2 Parameter des Geschiebetransports

#### 2.2.1 Kornwiderstand und Formwiderstand

Eine gleichförmige Flüssigkeitsbewegung ist dadurch gekennzeichnet, dass zwischen Schwerkraft und Reibungskraft an der Gerinnewandung Gleichgewicht herrscht. Diese Reibungskraft ist neben dem hydraulischen Radius und dem Energieliniengefälle von der Oberflächenbeschaffenheit der Wandung abhängig. Der für die Beschreibung der Rauigkeit der Oberfläche verwendete Wert ist meist die Stricklerrauigkeit  $k_{st}$  [ $m^{1/3}/s$ ], die Eingang in die Fließformel nach MANNING/STRICKLER findet. Schwierigkeiten in der Beschreibung der Oberflächenrauigkeit ergeben sich bei beweglicher Sohle.

Beim Sohlenwiderstand wird zwischen dem Kornwiderstand und dem Formwiderstand unterschieden. Unter dem Kornwiderstand versteht man den Widerstand einer rauen, eben angenommenen Sohle. Der Widerstand infolge Riffel oder Dünen wird hingegen als Formwiderstand bezeichnet. Bei dem durchgeführten Modellversuch wird zwischen Korn- und Formwiderstand keine Unterscheidung gemacht.

#### 2.2.2 Bewegungsbeginn

Ein wichtiger Parameter der Sedimentbewegung ist der Bewegungsbeginn. Bei Überschreitung eines kritischen Zustands beginnen sich Sedimente zu bewegen. Ein solcher kritischer Zustand ist beispielsweise die in Kapitel 2.2.3 beschriebene kritische Schubspannung.

### 2.2.3 Schubspannung

Wie schon Kapitel 2.2.1 erwähnt wurde, stehen bei einer gleichförmigen Bewegung die sich aus der Schwerkraft ergebenden antreibenden Kräfte mit den rückhaltenden Reibungskräften im Gleichgewicht (siehe Abbildung 2).

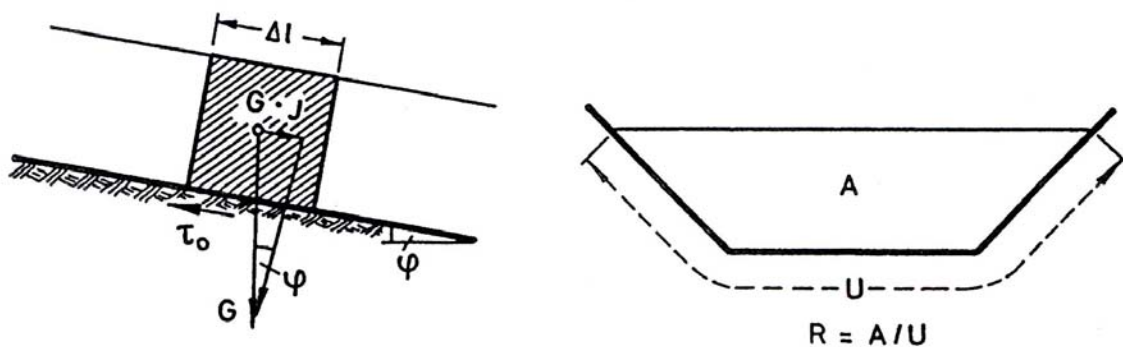


Abbildung 2: Kräfte am Flüssigkeitselement

Durch Aufstellen dieser Gleichgewichtsbedingung erhält man die am häufigsten verwendete Formel zur Schubspannungsermittlung:

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot R \cdot I \quad [\text{N/m}^2] \quad (\text{BECHTELER, 2004})$$

Für verzögerten Abfluss gilt:

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot h_m \cdot (I_{\text{Sohle}} + I_{\text{WSP}}) - I_{\text{WSP}} \cdot \rho_w \cdot v_m^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (\text{BECHTELER, 2004})$$

In Kapitel 2.3 werden weitere Methoden der Schubspannungsermittlung erklärt.

### 2.2.4 Kritische Schubspannung und SHIELDS-Parameter

Neben den angeführten Berechnungen der kritischen Schubspannung gibt es dafür auch empirische Ansätze. Einer von diesen Ansätzen findet sich in dem Diagramm von SHIELDS (1936) wieder. Dieses Diagramm wurde von Ulrich ZANKE (1982) in modifizierter Form mit Angabe des Bewegungsrisikos R dargestellt (siehe Abbildung 3).

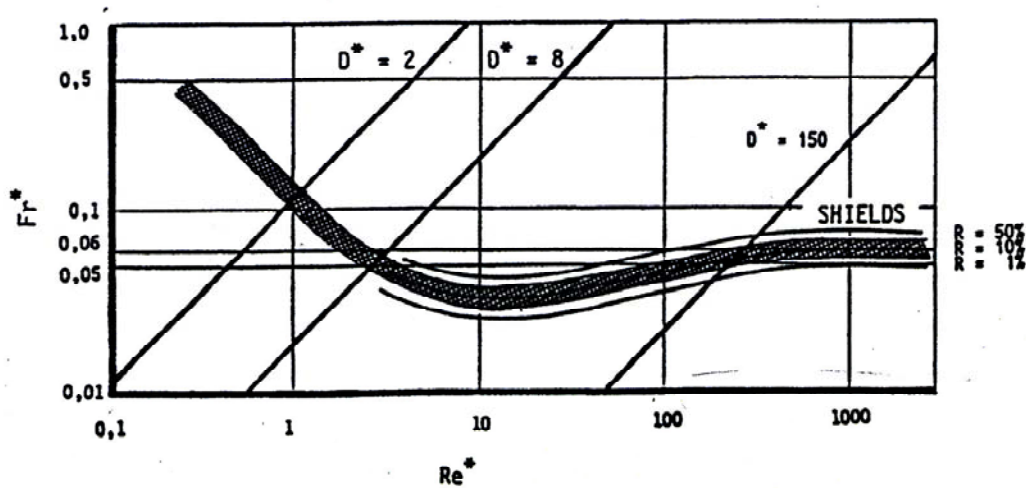


Abbildung 3: Bewegungsbeginn nach SHIELDS (1936) mit Angabe des Bewegungsrisikos R nach ZANKE (1982)

Laut SHIELDS gibt es einen Zusammenhang zwischen der Feststoff-Froude-Zahl  $Fr^*$  und der Feststoff-Reynolds-Zahl  $Re^*$ . Die Formeln für die beiden Zahlen lauten wie folgt (BECHTELER, 2004):

$$Fr^* = \frac{v_0^{*2}}{\rho' \cdot g \cdot d_{ch}} \quad Re^* = \frac{v_0^* \cdot d_{ch}}{\nu} \quad \text{mit} \quad \rho' = \frac{\rho_F - \rho_W}{\rho_W} \quad \text{und} \quad v_0^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_W}}$$

Die kritische Sohlschubspannung kann nach MEYER-PETER/MÜLLER in folgender Weise ermittelt werden:

$$\tau_{gr} = \Theta_{cr} \cdot (\rho_F - \rho_W) \cdot g \cdot d_m \quad [\text{N/m}^2]$$

mit

$$d_m = \sum_{d_{\min}}^{d_{\max}} \Delta p_i \cdot \frac{\bar{d}_i}{100} \quad [\text{m}]$$

und

$$\bar{d}_i = \frac{1}{2} \cdot (d_i + d_{i+1}) \quad [\text{m}]$$

Der Faktor  $\Theta_{cr}$  ist der so genannte SHIELDS-Parameter für den Bewegungsbeginn und wird meist mit 0,047 angesetzt. Bei diesem Faktor sind bereits einige Körner in Bewegung. Ist die Sohle in Ruhe, wird der Faktor auf 0,03 gesetzt, und wenn bereits zahlreiche Körner in Bewegung sind, beträgt er 0,06.

### 2.2.5 Sortiereffekt

In einem natürlichen Flussbett kommt es stromabwärts zu einer Sortierung des abgelagerten Sediments. Durch die Reduktion der Schleppspannung in Aufweitungsstrecken lagert sich dort gröberes Material ab. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, bedarf es der Einführung eines fraktionierten Transportmodells. Hier werden die transportierten Sedimente in Klassen verschiedener Korngrößen unterteilt. Die Transportkapazität wird dann für jede Klasse separat ermittelt und anschließend zu einem Gesamttransport aufsummiert.

### 2.2.6 Deckschichtbildung und maximale Bettstabilität

Laut DVWK (DVWK 1997 Nr. 118) ergibt sich für die Deckschichtbildung folgende Definition:

„Als Deck- oder Abpflasterungsschichten werden Schichten bezeichnet, die die Stärke eines Kornes aufweisen. Sie entstehen durch selektive Erosionsprozesse und schützen das darunter liegende Sohlenmaterial vor Strömungsangriffen. Der Vorgang der Deckschichtbildung oder Sohlenpflasterung lässt sich wie folgt beschreiben.

Bei Durchflüssen mittlerer Größe, und damit verbundenen Schubspannung ebenfalls von mittlerer Größe, wird ein Teil der kleinen und mittelgroßen Körner erodiert und nach unterstrom abtransportiert. Als Folge des Verlustes dieser Körner findet bei vernachlässigbarer Geschiebezufuhr von oberstrom an der Sohlenoberfläche eine Anreicherung von gröberem Partikeln statt. Mit zunehmender Prozessdauer nimmt die Anzahl der gröberem, stabilitätsfördernden Partikel in der Sohle zu, so dass das darunter liegende Material (Unterschicht) vor weiterer Erosion geschützt wird. Die großen und mittelgroßen Körner verkanten und verhaken sich und bilden eine stabile Deckschicht.

Falls die Schubspannungen den kritischen Wert  $\tau_{gr}$  für die maximale Bettstabilität überschreiten, können sich zu wenig stabilitätsfördernde Partikel an der Sohlenoberfläche ablagern bzw. bricht die vorhandene Deckschicht auf. In diesem

Fall wird der Prozess der Sohlenerosion solange anhalten, bis die hohe Schubspannung infolge Reduktion des Durchflusses oder der Sohleineigung wieder abgenommen hat. Der Zustand, bei dem die Schubspannung den erwähnten kritischen Wert  $\tau_{gr}$  erreicht, wird mit maximaler Bettstabilität bezeichnet“ (DVWK 1997 Nr. 118).

## **2.3 Methoden zur Schubspannungsermittlung**

### **2.3.1 Allgemeines**

In diesem Kapitel wird auf jene Methoden zur Schubspannungsermittlung eingegangen, die beim Modellversuch angewandt wurden. Dies sind die Ermittlung

- nach GEHRIG (1965),
- nach GESSLER (1967),
- unter Berücksichtigung der Turbulenz und
- aus dem Ansatz von logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen.

Durch die relativ geringe Breite des Glasgerinnes (30 cm) und dem sich daraus ergebenden großen Einfluss der Seitenwände wurde zur Schubspannungsermittlung nur der sohlwirksame hydraulische Radius herangezogen.

### **2.3.2 Ermittlung nach GEHRIG**

Die Sohlschubspannung errechnet sich nach der in Kapitel 2.2.3 angeführten Formel:

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot R_s \cdot I \quad [\text{N/m}^2]$$

Nach GEHRIG ergibt sich der der hydraulische Sohlenradius aus

$$R_s = \left( \frac{k_m}{k_s} \right)^{3/2} \cdot R_m \quad [-] \quad \text{mit}$$



$$\left(\frac{k_m}{k_s}\right)^{3/2} = \frac{b + 2 \cdot h - 2 \cdot h \cdot \left(\frac{k_m}{k_w}\right)^{3/2}}{b} \quad [-],$$

mit  $R_m$ : mittlerer hydraulische Radius der Rinne (Sohle und Wände)

$k_m$ : mittlerer Rauigkeitswert von Wand und Sohle

$k_s$ : Rauigkeit der Sohle

$I$ : Gefälle (= Sohlgefälle = Wasserspiegelgefälle)

Eine genaue Herleitung der angeführten Formeln für den hydraulischen Radius nach GEHRIG und nach GESSLER findet sich in der Diplomarbeit „Bestimmung der hydraulischen Parameter für die Stauraumpülung des KW Bodendorf“ (vgl. MEINDL, 2005).

### 2.3.3 Ermittlung nach GESSLER

Die Sohlschubspannung errechnet sich wiederum nach der in Kapitel 2.2.3 angeführten Formel:

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot R_s \cdot I \quad [\text{N/m}^2]$$

GESSLER berechnet den der Sohle zugeordneten hydraulischen Radius mit:

$$R_s = \frac{\bar{u}_m^2}{8 \cdot g \cdot J} \cdot \lambda_s \quad [-],$$

mit  $\lambda_s$ : Reibungsbeiwert der Sohle

$\bar{u}_m$ : mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt

$I$ : Gefälle (= Sohlgefälle = Wasserspiegelgefälle)

### 2.3.4 Ermittlung unter Berücksichtigung der Turbulenz

Im Gegensatz zu einer laminaren Strömung, bei der sich die Flüssigkeitsteilchen in getrennten zueinander parallelen Schichten mit annähernd gleicher Geschwindigkeit

bewegen, bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen bei einer turbulenten Strömung in ungeordneten Bahnen mit schwankender Geschwindigkeit. Die Flüssigkeitsteilchen bewegen sich dabei auch quer zur Hauptströmungsrichtung. Für die momentane Schubspannung ergibt sich eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit in Fließrichtung ( $v_s$ ) und quer dazu ( $v_n$ ):

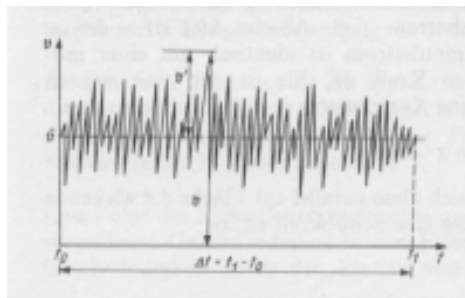
$$\tau = \rho_w \cdot v_s \cdot v_n \quad [\text{N/m}^2]$$

Von Interesse ist jedoch nicht die momentane Schubspannung, sondern ihr zeitliches Mittel:

$$\tau = \rho_w \cdot \overline{v_s \cdot v_n} \quad [\text{N/m}^2]$$

Mit der Einführung der Schwankungskomponente  $v'$  um den zeitlichen Mittelwert der Geschwindigkeit  $\bar{v}$  erhält man als Lösung für die Schubspannung infolge Turbulenz (siehe Abbildung 4):

$$\tau = \rho_w \cdot \overline{v_s' \cdot v_n'} \quad [\text{N/m}^2]$$



**Abbildung 4: Turbulente Schwankung der Geschwindigkeit (Quelle: „Technische Hydromechanik 1“, BOLLRICH)**

Man erhält somit einen  $\rho_w$ -fachen Mittelwert aus dem Produkt der Schwankungsgeschwindigkeit in Fließrichtung und quer dazu. Die Schubspannungsgeschwindigkeit ergibt sich daraus zu

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_w}}$$

### 2.3.5 Ermittlung aus logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen

In einer idealen Flüssigkeit (keine Reibungskräfte) werden nur Normalkräfte übertragen, das heißt die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt wäre konstant. In einer realen Flüssigkeit hingegen wirken Reibungskräfte, die Geschwindigkeiten an den begrenzenden Wänden sind daher stets Null. Somit ergibt sich eine Geschwindigkeitsverteilung über den Gerinnequerschnitt, die mit einer logarithmischen Funktion beschrieben werden kann. Die Formel dafür lautet wie folgt:

$$v(z) = \frac{v^*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

mit

$$v^* = \kappa \cdot a \text{ (Schubspannungsgeschwindigkeit).}$$

Der Faktor  $\kappa$  ist die KARMAN-Konstante. Diese Konstante wurde durch Versuche von NIKURADSE bestimmt und hat einen Wert von 0,4. Bei zunehmender Schwebstoffkonzentration kann der Faktor auf 0,2 sinken. Der Wert  $z$  beschreibt die vertikale Koordinate in Wassertiefenrichtung und  $z_0$  ist der Abstand von einem Bezugshorizont ausgehend zu einem Punkt in dem die Geschwindigkeit gleich Null ist (siehe Abbildung 5).

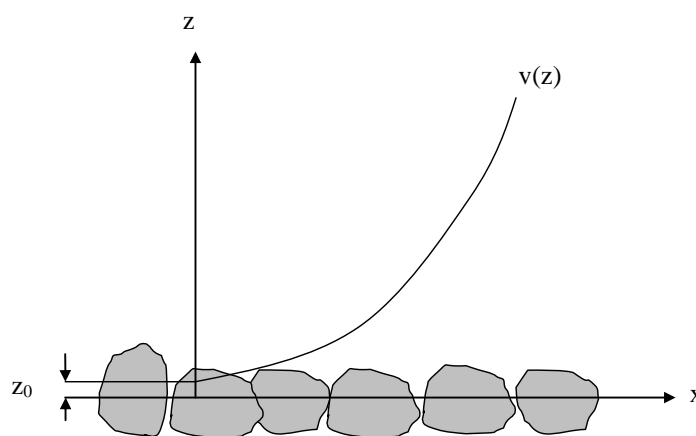


Abbildung 5: Logarithmische Geschwindigkeitsverteilung

Die Sohlschubspannung lässt sich durch die Erstellung einer logarithmischen Trendfunktion aus dem gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofil ermitteln. Diese Trendfunktion hat folgende Form:

$$v(z) = a \cdot \ln(z) + b$$

$v(z)$  bezeichnet dabei die Geschwindigkeit in Fließrichtung,  $a$  und  $b$  sind Parameter der Trendfunktion und  $z$  beschreibt die Wassertiefe.

Für die Sohlschubspannung ergibt sich somit:

$$\tau = \rho_w \cdot v^{*2} \quad [\text{N/m}^2]$$

## 3 Modellversuch

### 3.1 Allgemeines

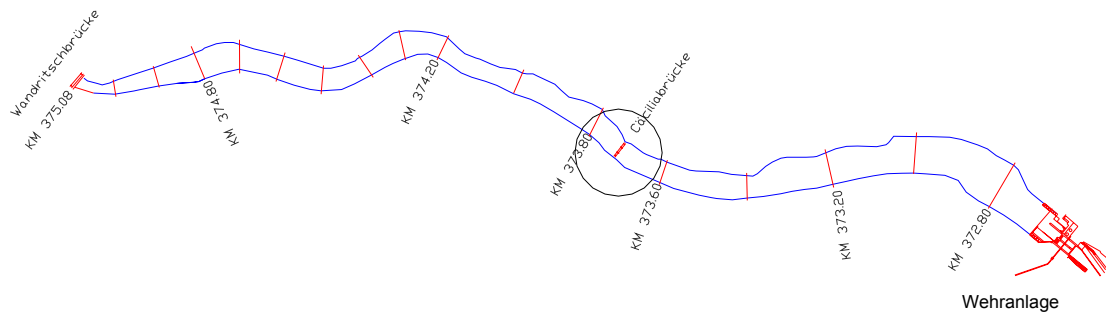
Das Kapitel „Modellversuch“ beschäftigt sich mit den einzelnen Phasen des Modellversuchs entsprechend seiner chronologischen Abfolge. Die Ziele des Modellversuchs wurden bereits in Kapitel 1.3 beschrieben.

### 3.2 Geschiebeentnahme aus dem Stauraum

Das im Modellversuch verwendete Sediment war Originalsediment, das aus dem Stauraum im Stausee Bodendorf entnommen wurde (siehe Abbildung 6). Die Entnahme erfolgte mit einem Bagger von der Cäcilia-Brücke aus, welche sich bei Fkm 373,70 befindet (siehe Abbildung 7).

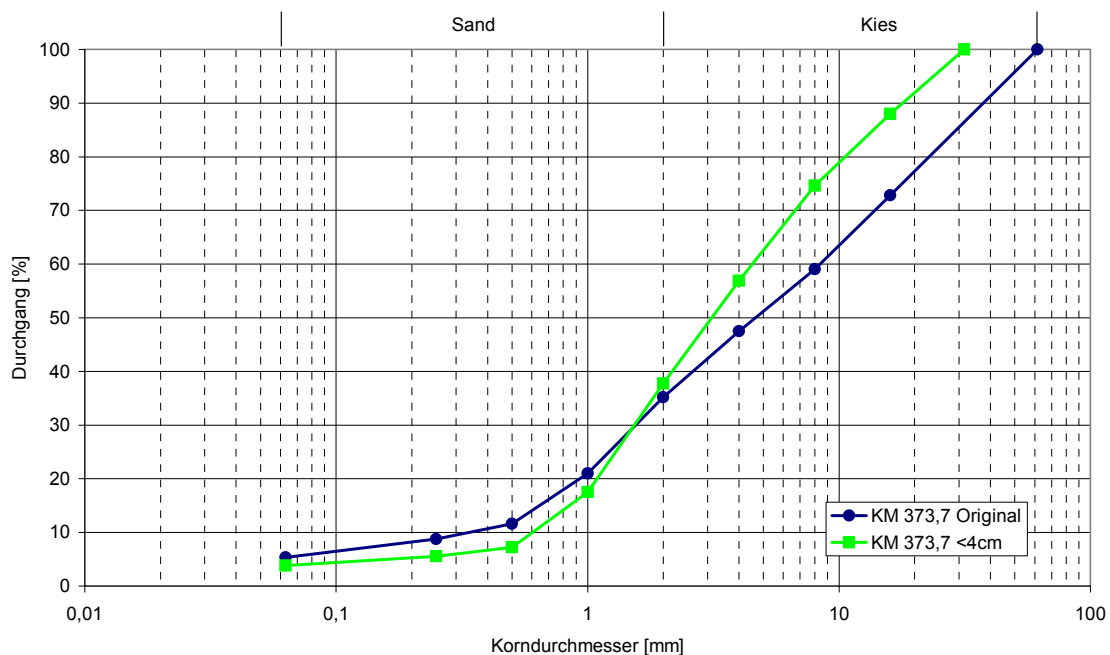


Abbildung 6: Entnahme des Sediments aus dem Stauraum



**Abbildung 7: Lageplan des Stauraums**

Von dem entnommenen Material wurden anschließend Siebanalysen durchgeführt. Die Siebanalyse für das entnommene Sediment im Stauraum ergab einen Größtkorndurchmesser von 60 mm. Für die Durchführung des Modellversuchs war es notwendig alle Körner mit einem größeren Durchmesser als 40 mm abzusieben. Der Grund dafür lag in der relativ geringen Breite (30 cm) des Glasgerinnes (siehe Kapitel 3.3.1). Zu große Körner hätten sich im Gerinne verkanten können und damit die Aussagekraft der Versuchsergebnisse verringern können. Eine Gegenüberstellung der Sieblinie des Originalgeschiebes mit der Sieblinie für die Körner kleiner als 40 mm findet sich in Abbildung 8.



**Abbildung 8: Körnungslinie des Geschiebes (original und < 40 mm)**

Die wichtigsten Kennzahlen für das im Modellversuch verwendete Sediment sind in Tabelle 2 dargestellt.

$d_{10}$ [mm]	$d_{50}$ [mm]	$d_{90}$ [mm]	$d_m$ [mm]
0,64	3,32	18,26	3,63

Tabelle 2: Kennzahlen für das Geschiebe < 40 mm

### 3.3 Aufbau des Versuchs

#### 3.3.1 Glasgerinne

Der Modellversuch „Deckschichtbildung Bodendorf“ wurde im Tieflabor des HERMANN-GRENGG-Laboratoriums am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der TU Graz durchgeführt. Der Hauptbestandteil der Versuchsanordnung war ein 8,0 m langes, 30 cm breites und 70 cm hohes Glasgerinne (siehe Abbildung 9). Der Modellmaßstab des Versuchs betrug 1:1, es handelte sich daher um einen Ausschnitt aus der Natur.



Abbildung 9: Glasgerinne mit Geschwindigkeitsmessgerät Vectrino+

Das an der Sohle des Glasgerinnes eingebrachte Geschiebe war das in Kapitel 3.2 beschriebene Originalgeschiebe mit Durchmessern, die kleiner als 40 mm sind. Dieses Sediment sollte die Flusssohle originalgetreu nachbilden. Zur kontinuierlichen Geschiebemessung stand eine Waage (siehe Kapitel 3.3.2) und zur Messung von Geschwindigkeiten, Turbulenzen und Abständen ein Geschwindigkeitsmessgerät zur Verfügung (siehe Kapitel 3.3.3).

Das Glasgerinne ist an vier Stellen durch Schrauben höhenmäßig verstellbar, wodurch sich jede für den Versuch verwendete Neigung einstellen ließ. Die Durchflüsse, mit denen die Messungen durchgeführt wurden, reichten von 10 l/s bis zu 140 l/s. Das benötigte Wasser kam aus dem Hochbehälter des Labors. Durch die mit 100 l/s beschränkte Kapazität der Leitung aus dem Hochbehälter (DN 150) versorgte eine Zusatzleitung (DN 50) das Modell bei höheren Durchflüssen bis zu 140 l/s.

Als Beruhigung der Oberflächenströmung wurde am Einlauf des Glasgerinnes eine schwimmende Platte eingebaut, die die Wellenbildung während des Versuchs verringerte.

### 3.3.2 Waage

Zur kontinuierlichen Geschiebemessung stand ein Geschiebeauffangbehälter zur Verfügung. Dieser Auffangbehälter war auf einer Wägezelle aufgehängt, über die online das Gewicht unter Auftrieb gemessen wurde. Die gemessenen Spannungen wurden in Gewichtsänderungen umgerechnet, die Spannung von einem Volt entspricht dabei 10 kg (siehe Abbildung 10).

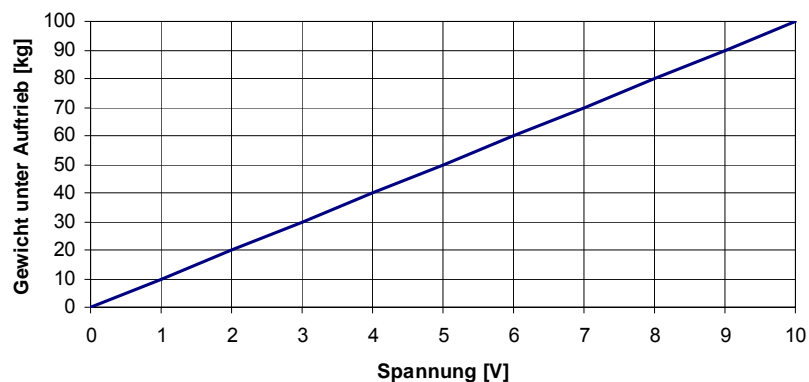
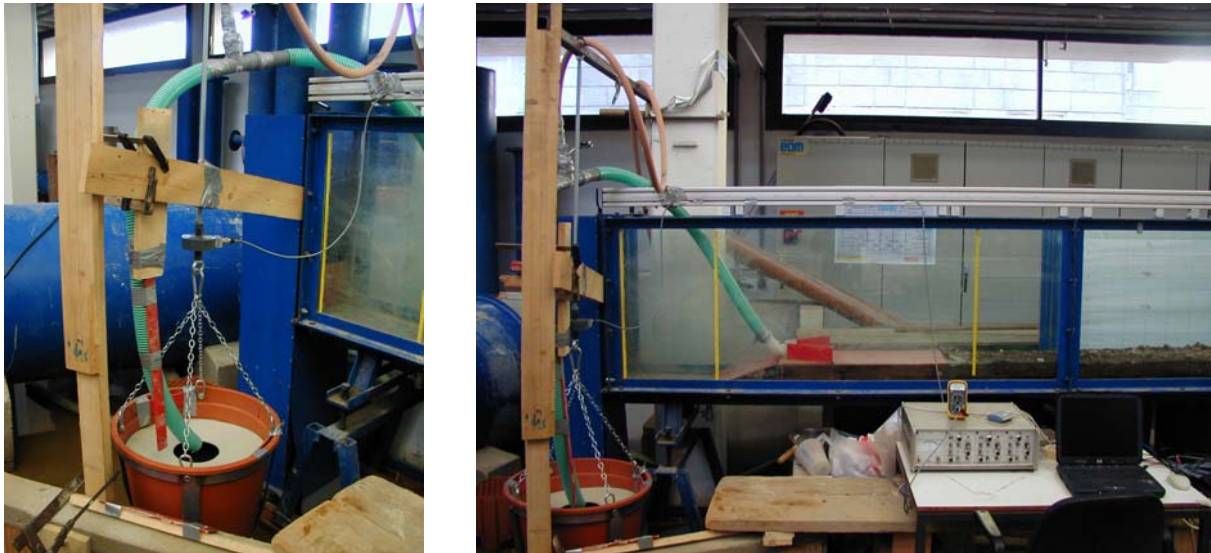


Abbildung 10: Linearer Zusammenhang Spannung - Gewicht





**Abbildung 11: Glasrinne mit Absaugschlauch und (rotem) Auffangbehälter (links)**

Das sich im Glasrinne bewegendes Geschiebe gelangt in einen Trichter und wird über einen Absaugschlauch in den Auffangbehälter befördert (siehe Abbildung 11).

### **3.3.3 Geschwindigkeits- und Distanzmessgerät**

Die in den Versuchen durchgeführten Geschwindigkeits- und Distanzmessungen wurden mit dem von der Firma Nortek (Oslo, Norwegen) entwickelten Vectrino+ durchgeführt (siehe Abbildung 9). Dieses Geschwindigkeitsmessgerät beruht auf der Akustik-Doppler-Messmethode (vgl. MEINDL, 2005).

## **3.4 Versuchsdurchführung**

### **3.4.1 Phasen**

Der Modellversuch „Deckschichtbildung – Bodendorf“ wurde in drei Phasen durchgeführt

- 1. Phase: Feste Sohle
- 2. Phase: Bewegliche Sohle mit Geschiebeauffangschale
- 3. Phase: Bewegliche Sohle mit aufgehängtem Geschiebeauffangbehälter

In der 1. Phase wurde im Glasgerinne eine stabile, raue Sohle eingebaut. Dafür wurde auf eine Kunststoffplatte Originalgeschiebe mit Silikon aufgeklebt (siehe Abbildung 12). Zur Sohlschubspannungsermittlung musste ein stationärer Abfluss eingestellt werden, bei dem das Energiegefälle parallel zur Sohle verlief. Der dafür entsprechende Wasserstand wurde durch Bewegung des Schützes am Ende des Glasgerinnes eingestellt. Der zur Bestimmung der Schubspannung erforderliche hydraulische Radius wurde anschließend für alle Durchflüsse (10 bis 140 l/s) ermittelt. Die Ermittlung erfolgte nach den Verfahren von GEHRIG und GESSLER (siehe Kapitel 2.3; vgl. MEINDL, 2005).

Für die 2. Phase wurde die Platte mit der festen Sohle durch Originalgeschiebe aus dem Stauraum ersetzt. Aus der festen Sohle wurde somit eine bewegliche Sohle. Zusätzlich wurde am Ende des Gerinnes eine Auffangschale für das Geschiebe eingebaut (siehe Abbildung 12). Der Versuch ist für verschiedene Gerinneneigungen mit verschiedenen Durchflüssen durchgeführt worden. Am Ende jeder Messung, das heißt vor der nächsten Durchflussteigerung, wurde die Auffangschale entfernt und die Trockenmasse des bewegten Geschiebes ermittelt (vgl. MEINDL, 2005).

Die 3. Phase unterscheidet sich von 2. Phase dadurch, dass nun die Geschiebeauffangschale durch einen aufgehängten Geschiebeauffangbehälter ersetzt wurde (siehe Kapitel 3.3.2). Dadurch wurde eine kontinuierliche Messung des Geschiebetriebs möglich. Am Ende jeder Messung wurde auch hier das Trockengewicht des im Behälter gesammelten Geschiebes ermittelt. Das war notwendig, um die Ergebnisse aus der kontinuierlichen Messung zu korrigieren, da die erzielten Ergebnisse das Gewicht unter Auftrieb ergaben und nicht das tatsächliche Gewicht des Feststoffes.

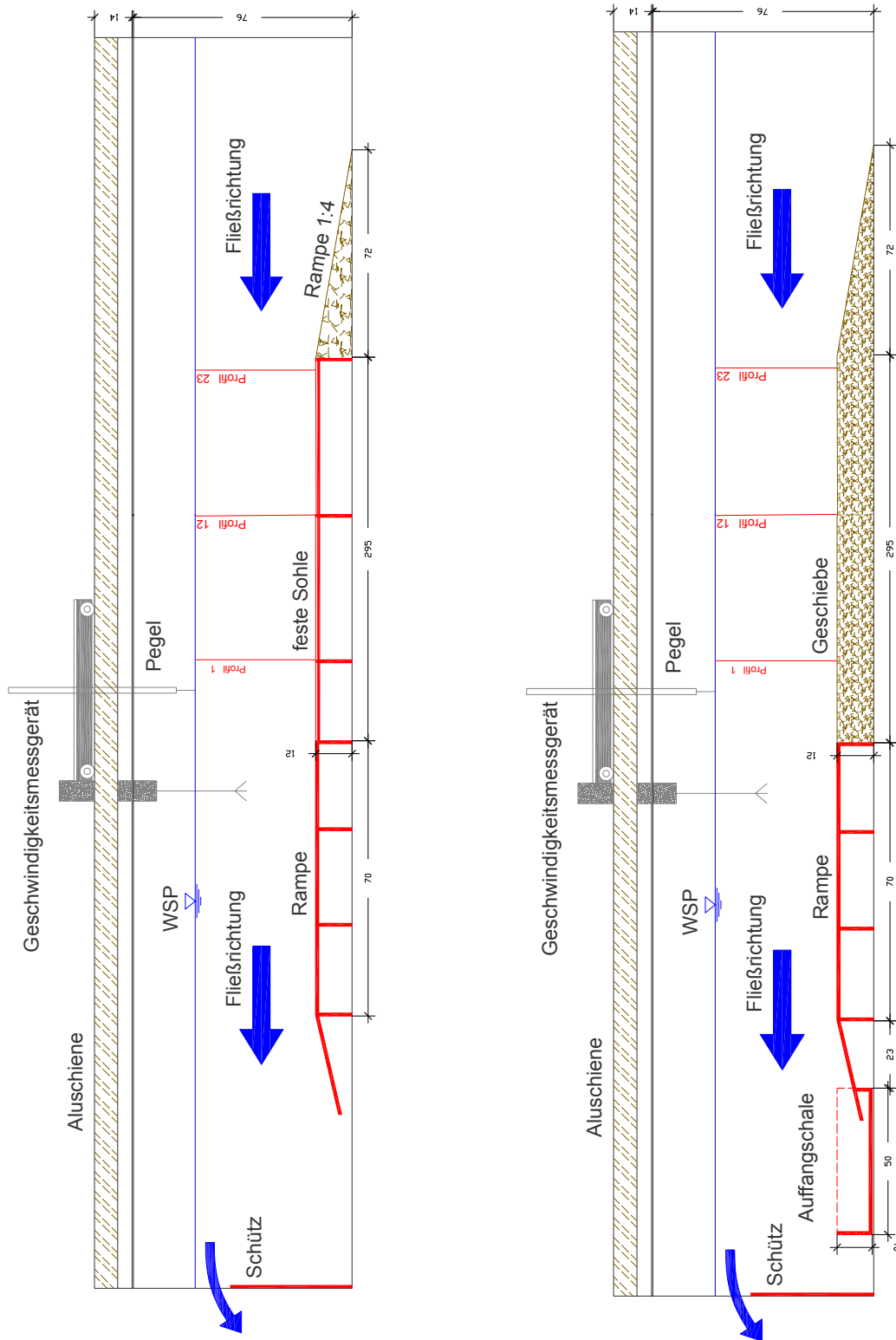


Abbildung 12: Versuchsaufbau der Phase 1 (links) und Phase 2 (rechts)

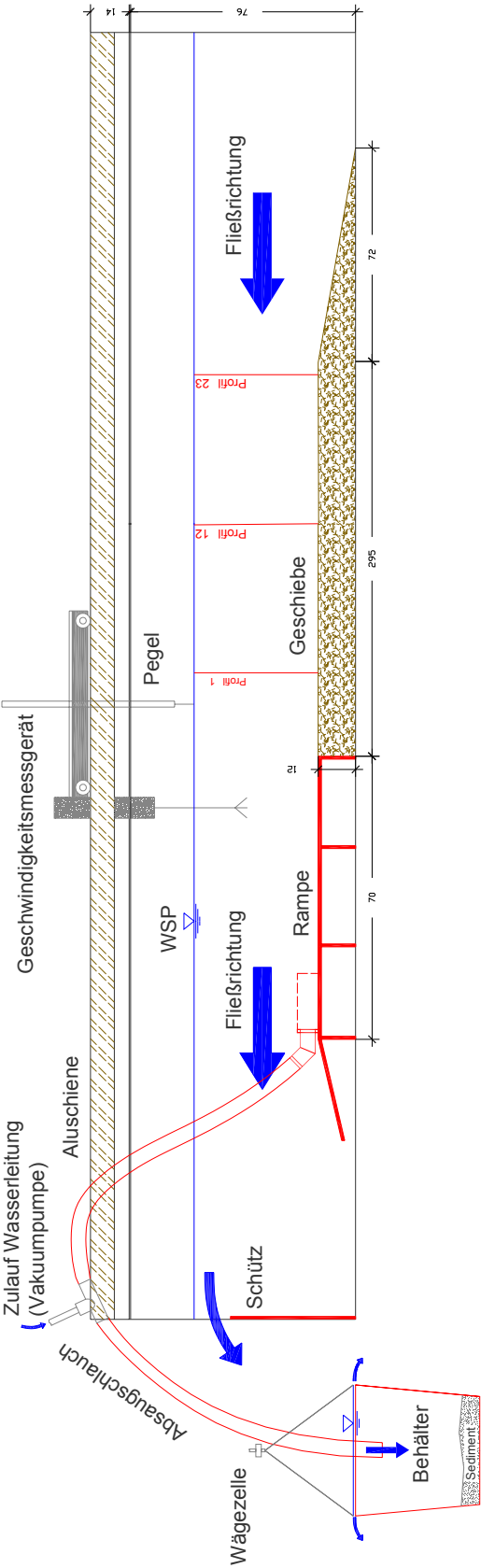
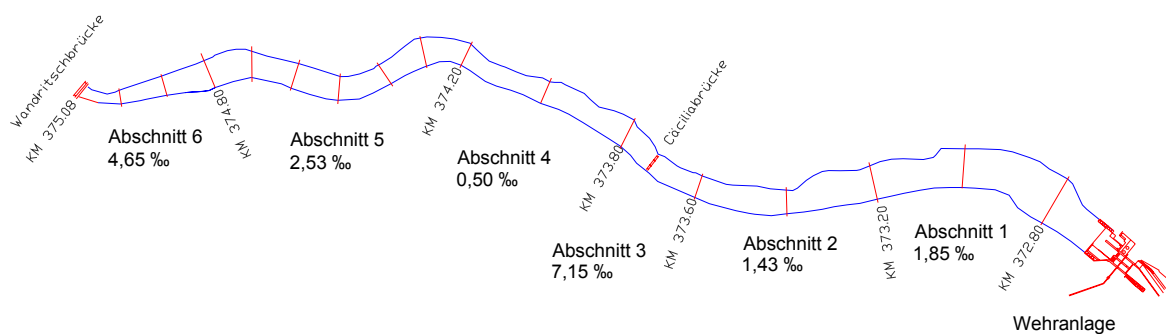


Abbildung 13: Versuchsaufbau der Phase 3

### 3.4.2 Variation des Gefälles und der Durchflüsse

Zur Erreichung unterschiedlicher Schubspannungen im Glasgerinne wurden sowohl die Neigungen als auch die Durchflüsse verändert. Das verwendete Glasgerinne musste daher in seiner Neigung verstellbar sein (siehe Kapitel 3.3.1). Die dabei eingestellten 6 Neigungen entsprechen jenen im Stauraum (siehe Abbildung 14). Im Modellversuch wurden jedoch nur die Neigungen 2,53 ‰, 4,65 ‰ und 7,15 ‰ untersucht. Um höhere Sohlschubspannungen zu erzielen, wurden zusätzlich Versuche mit einer Neigung von 10 ‰ durchgeführt. Die Durchflüsse wurden dabei von 10 l/s bis maximal 140 l/s gesteigert.



**Abbildung 14: Abschnitte im Stauraum mit verschiedenen Neigungen**

Die 1. Phase wurde, wie bereits in Kapitel 3.4.1 beschrieben, mit einer stabilen, rauhen Sohle durchgeführt. Diese Versuche erfolgten für vier verschiedene Neigungen. Dabei wurden für jede Neigung die Durchflüsse beginnend bei 10 l/s in 10er Schritten bis maximal 140 l/s gesteigert (siehe Tabelle 3).

Abschnitte im Stauraum	Neigung	Durchfluss Q [l/s]
Abschnitt 5	2,53 ‰	10 - 130 l/s
Abschnitt 6	4,65 ‰	10 - 140 l/s
Abschnitt 3	7,15 ‰	10 - 140 l/s
zusätzliche Neigung	10,0 ‰	10 - 140 l/s

**Tabelle 3: Überblick über die 1. Phase**

In der 2. Phase, jener mit beweglicher Sohle mit Auffangschale (siehe Kapitel 3.4.1), wurden die Durchflüsse wiederum in 10 l/s–Schritten gesteigert. Dieser Versuch wurde jedoch nur für zwei Neigungen durchgeführt (siehe Tabelle 4).

<b>Abschnitte im Stauraum</b>	<b>Neigung</b>	<b>Durchfluss Q [l/s]</b>
Abschnitt 5	2,53 ‰	10 - 130 l/s
zusätzliche Neigung	10,0 ‰	20 - 110 l/s

**Tabelle 4: Überblick über die 2. Phase**

Für die 3. Phase (siehe Kapitel 3.4.1), jene mit beweglicher Sohle und aufgehängtem Geschiebeauffangbehälter, wurden drei verschiedene Neigungen untersucht. Die Durchflüsse wurden hier von 50 bis 140 l/s gesteigert. Die dazwischen liegenden Durchflüsse waren 60, 80, 100 und 120 l/s (siehe Tabelle 5).

<b>Abschnitte im Stauraum</b>	<b>Neigung</b>	<b>Durchfluss Q [l/s]</b>
Abschnitt 6	4,65 ‰	50 - 140 l/s
Abschnitt 3	7,15 ‰	50 - 140 l/s
zusätzliche Neigung	10,0 ‰	50 - 140 l/s

**Tabelle 5: Überblick über die 3. Phase**

## **3.5 Messungen**

### **3.5.1 Allgemeines**

Das Kapitel „Messungen“ beschäftigt sich mit allen Messungen, die im Laufe des Modellversuchs notwendig waren. Dabei handelt es sich um Messungen, die während des Versuches durchgeführt wurden, wie die Gewichtsmessungen des Geschiebes, den Vermessungen der Sohle und den Geschwindigkeitsmessungen. Es wird ebenso auf die anschließend durchgeführten Ermittlungen des

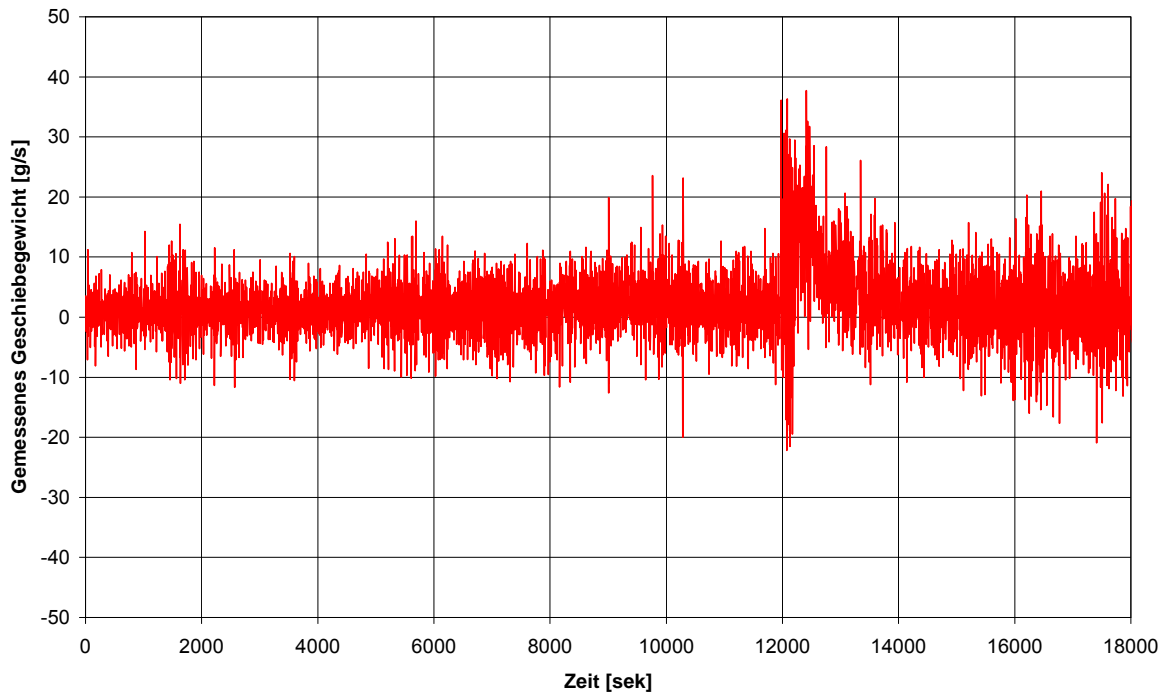
Trockengewichts des Geschiebes und die Durchführung der Siebanalysen eingegangen.

### **3.5.2 Gewicht des transportierten Geschiebes**

Ein Ziel der 2. und 3. Phase (Phasen mit beweglicher Sohle) war es, den Geschiebetrieb [ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ] ( $m$  = Breite des Gerinnes in Laufmeter) für jeden Durchfluss zu ermitteln. Es war daher notwendig, das Trockengewicht [ $\text{kg}$ ] des transportierten Geschiebes zu ermitteln.

In der zweiten Phase wurde das transportierte Geschiebe in einer Auffangschale am Ende des Glasgerinnes gesammelt. Am Ende jeder Messung wurde die Auffangschale ausgebaut und anschließend das Trockengewicht ermittelt. Die Trockengewichtsbestimmung wurde vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau an der TU Graz durchgeführt.

Die Geschiebemessung mit aufgehängtem Geschiebeauffangbehälter (siehe Kapitel 3.3.2) erfolgte in der 3. Phase. Vorteil dieser Messung gegenüber jener in der 2. Phase war die Erfassung des Geschiebegewichtes in Abhängigkeit von der Versuchsdauer. Es handelte sich dabei um eine kontinuierliche, integrative Onlinemessung. In Abbildung 15 ist das gemessene Geschiebegewicht in Abhängigkeit von der Zeit angegeben. Die Schwankungen des gemessenen Gewichts um die Nullachse ergeben sich durch die Bewegung des aufgehängten Geschiebebehälters.



**Abbildung 15: Geschiebengewicht unter Auftrieb in Abhängigkeit von der Versuchsdauer**

Durch Aufsummieren der Gewichtsänderung des Behälters durch die dem Förderstrom entnommenen Sedimente erhält man eine Summenlinie des Gewichts über die Zeit (siehe Abbildung 16). Da das transportierte Geschiebe über eine Heberleitung in den mit Wasser gefüllten Behälter transportiert wurde, war das gemessene Gewicht nicht das tatsächliche, sondern das Gewicht unter Auftrieb. Das Ergebnis war somit ein Gewichtsverlauf unter Auftrieb in Abhängigkeit von der Zeit.



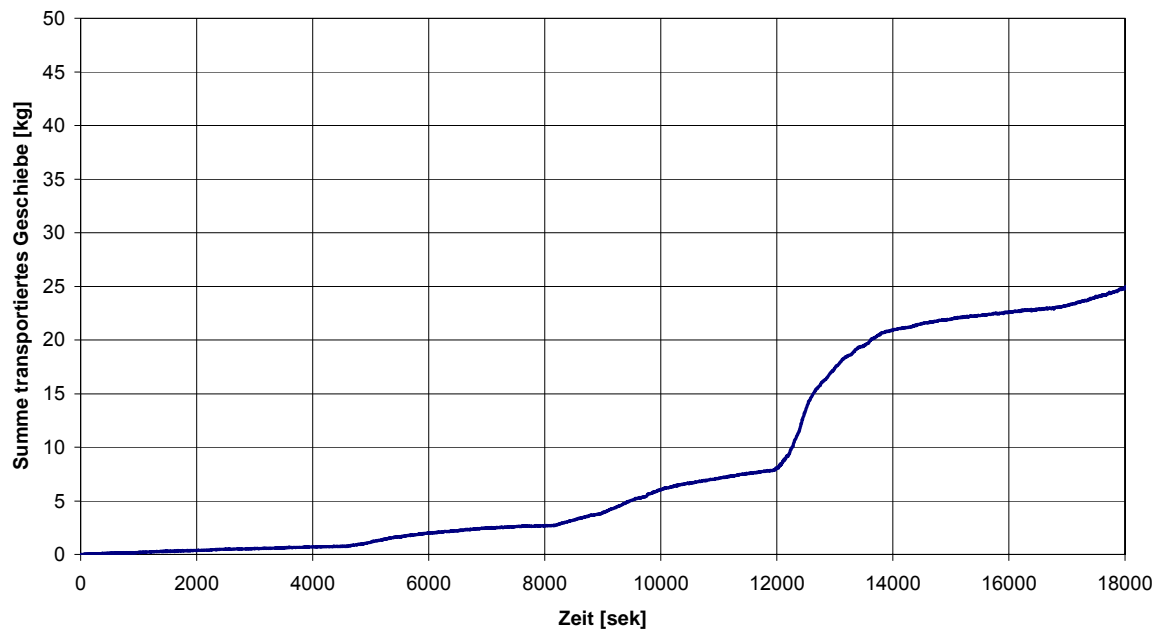


Abbildung 16: Summenlinie des transportierten Geschiebes unter Auftrieb

Um nun den Gewichtsverlauf zu korrigieren, wurde für das im Modellversuch verwendete Geschiebe die Dichte bestimmt. Es wurde dabei von 11 Proben die Rohdichte bestimmt und anschließend der Mittelwert gebildet (siehe Tabelle 6).

Probe	Ausgangsvolumen Wasser	Masse der Probe	Endvolumen Wasser	Volumen-differenz	Dichte Probe
Nr.	[ml]	[kg]	[ml]	[m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
1	565,0	0,45	740,0	0,000175	2571,43
2	560,0	0,45	730,0	0,000170	2647,06
3	555,0	0,70	840,0	0,000285	2456,14
4	550,0	0,35	685,0	0,000135	2592,59
5	545,0	1,20	1000,0	0,000455	2637,36
6	540,0	0,65	810,0	0,000270	2407,41
7	535,0	0,35	675,0	0,000140	2500,00
8	445,0	0,40	605,0	0,000160	2500,00
9	445,0	0,35	570,0	0,000125	2800,00
10	440,0	0,35	570,0	0,000130	2692,31
11	460,0	0,55	685,0	0,000225	2444,44
				<b>Mittelwert</b>	2568,07

Tabelle 6: Dichtebestimmung des Sediments

Mit Hilfe der ermittelten Dichte des Sediments konnte die tatsächlich transportierte Masse berechnet werden. Die Umrechnung erfolgte wie folgt: Aus

$$m' = m - \rho_w \cdot V_s \quad \text{mit} \quad V_s = \frac{m}{\rho_s} \quad \text{folgt:}$$

$$m = m' + \frac{m'}{\rho_s} \quad [\text{kg}]$$

Unter  $m'$  ist die Masse unter Auftrieb, unter  $m$  die Trockenmasse, unter  $\rho_w$  die Dichte des Wassers, unter  $V_s$  das Volumen der trockenen Sedimente und unter  $\rho_s$  die Trockendichte der Körner zu verstehen.

In Tabelle 7 sind die Masse unter Auftrieb und die Trockenmasse angegeben. Zum Vergleich der Massen wurde schließlich noch vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau die Gesamtmasse des Geschiebes am Ende jedes Versuchs ermittelt. Hier zeigt sich deutlich, dass die Werte mit der gewogenen Trockenmasse deutlich höher sind als jene mit der korrigierten Wichte. Der Grund dafür liegt wohl darin, dass die nach Tabelle 6 ermittelte Dichte nicht für alle im Versuch verwendeten Sedimente repräsentativ ist. Aus diesem Grund wurde schließlich die Summenlinie nach Abbildung 16 mit den Werten der tatsächlich transportierten Massen korrigiert. Die Lösung dieser Korrektur ist in Abbildung 17 dargestellt.

Masse [kg]	Neigung [‰]		
	4,65	7,15	10,00
unter Auftrieb	27,12	23,07	22,38
Korrektur lt. Tab. 6	37,68	32,05	31,10
gewogene Trockenmasse	43,40	36,26	31,97

**Tabelle 7: Vergleich der Massen des transportierten Sediments**

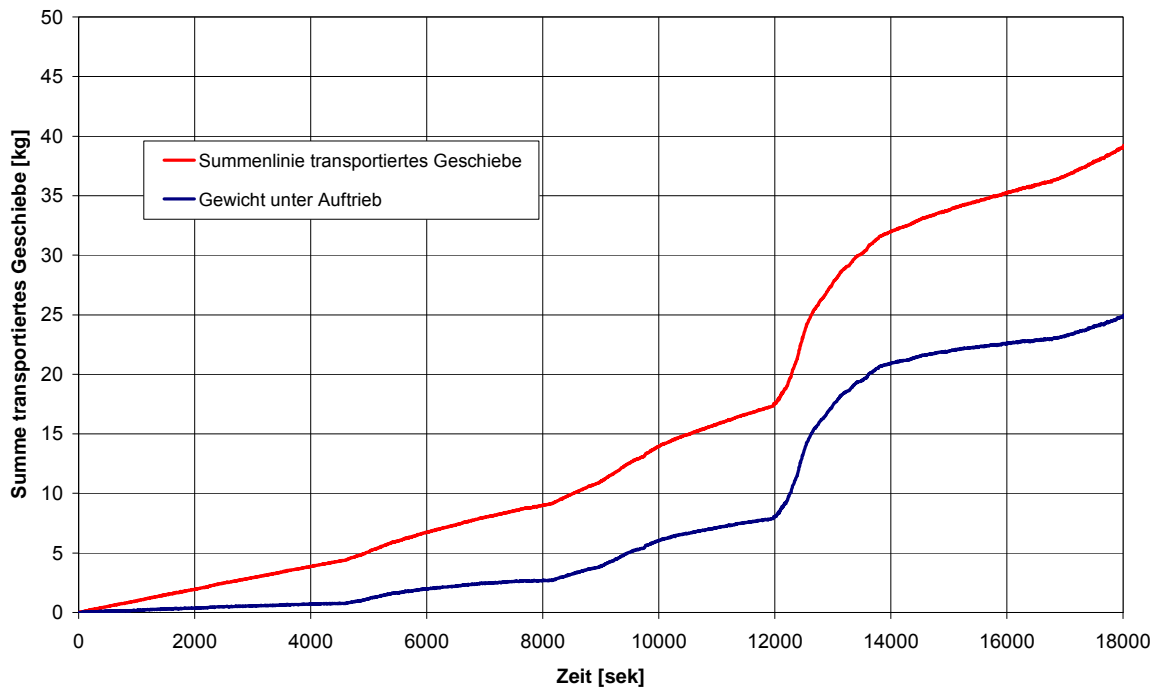


Abbildung 17: Korrektur des Gewichtsverlaufs

### 3.5.3 Siebanalysen

Für den Versuch mit einer Gerinneneigung von 10,0 ‰ wurden mit dem aufgefangenen Geschiebe Siebanalysen durchgeführt. Dabei wurden für das aufgefangene Geschiebe für alle Durchflüsse die Körnungslinien ermittelt. Aus dem maßgebenden Korndurchmesser  $d_m$  wurde die kritische Sohlschubspannung nach MEYER-PETER/MÜLLER berechnet (siehe Kapitel 2.2.4).

Weiters wurde am Ende des Versuchs (nach einem Durchfluss von 140 l/s) mit einer Neigung von 4,65 ‰ eine Siebanalyse der Deckschicht durchgeführt.

### 3.5.4 Sohlvermessungen

Am Ende eines jeden Versuchs, das heißt vor der nächsten Steigerung des Durchflusses, wurde die Sohle vermessen. Für diese Distanzmessungen wurde das Messgerät Vectrino+ verwendet (siehe Kapitel 3.3.3), das auf einem beweglichen Schlitten in der Mitte des Glasgerinnes angebracht war. In der 2. Phase stand zur Bewegung des Messgerätes ein Elektromotor zur Verfügung. Somit konnte eine kontinuierliche Messung der Sohleintiefungen in Längsrichtung des Glasgerinnes über eine Strecke von 2,5 m gemacht werden. In der 3. Phase jedoch wurde das

Messgerät händisch weitergeschoben und im Abstand von 10 cm über eine Länge von 2,0 m die Sohlvermessung durchgeführt.

### 3.5.5 Geschwindigkeiten in Fließrichtung

Für die Geschwindigkeitsmessung in Fließrichtung wurde ein Bezugsquerschnitt im Glasgerinne herangezogen. Es war dies das Profil P12, welches sich in der Mitte der eingebauten Sohle befindet (siehe Abbildung 13). Für diese Messungen wurde ebenfalls das Geschwindigkeitsmessgerät Vectrino+ verwendet. Die Geschwindigkeits- und Sohlvermessungen erfolgten in der Längsachse des Glasgerinnes.

In 2. Phase wurde versucht, die Sohl Schubspannung graphisch zu ermitteln. Dafür war es notwendig, Geschwindigkeitsprofile zu ermitteln. Es wurden mit dem Messgerät Vectrino+ in einem Raster von 6 cm Breite und 5 bis 8 cm Höhe mittlere Geschwindigkeiten gemessen (vgl. MEINDL, 2005).

Um die Schubspannungen aus logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen zu ermitteln, wurden in der 3. Phase Geschwindigkeitsprofile im Bezugsquerschnitt erstellt. Von der Sohle des Gerinnes wurden im Abstand von jeweils 1 cm die Geschwindigkeiten gemessen. Die wichtigsten Einstellungen während der Geschwindigkeits- und Turbulenzmessungen finden sich in Abbildung 18.

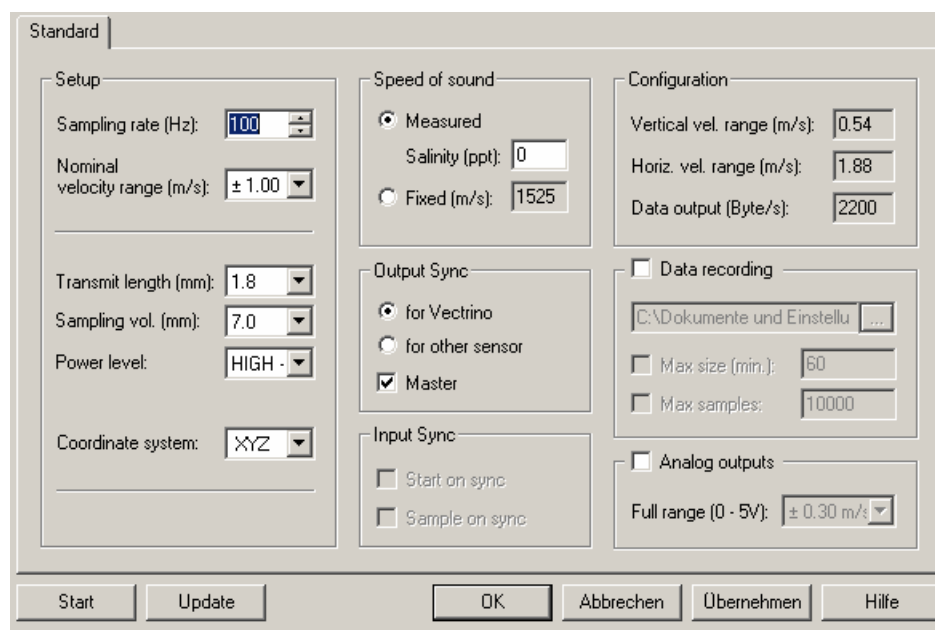


Abbildung 18: Screenshot der Vectrino+ - Software

Die Auswertung der Messungen (für die Geschwindigkeiten und die Turbulenzen) erfolgte mit dem Programm ExploreV der Firma NORTEK AS. Geschwindigkeiten, die den dreifachen Wert der Standardabweichung der aufgezeichneten Messwerte überschritten, wurden herausgefiltert (vgl. ExploreV Software Manual, 2000).

### 3.5.6 Turbulenzmessung

In der 3. Phase wurde versucht, die Schubspannungen mittels Turbulenz zu ermitteln. Die dafür notwendigen Turbulenzmessungen wurden ebenfalls mit dem Geschwindigkeitsmessgerät Vectrino+ durchgeführt. Das Messgerät wurde so positioniert, dass der Messpunkt der Sonde genau über der Sohle aufgenommen werden konnte. Der minimale Abstand von der eingebauten Sohle zum Messpunkt betrug 0,35 mm.

### 3.5.7 Zusammenfassung

Hier sollen noch einmal die wichtigsten Messungen in den einzelnen Phasen zusammengefasst werden:

Versuch	Neigung	Durchfluss Q [l/s]	Auswertung
Phase 1	2,53 ‰	10 - 130 l/s	Sohlbezogene Rauigkeit Ermittlung Geschwindigkeitsprofil Berechnung hydr. Radius über Abflusstiefe
	4,65 ‰	10 - 140 l/s	
	7,15 ‰	10 - 140 l/s	
	10,0 ‰	10 - 140 l/s	
Phase 2	2,53 ‰	10 - 130 l/s	Massenermittlung Sohlvermessung Geschwindigkeitsmessung
	10,0 ‰	20 - 110 l/s	Massenermittlung Sieblinie Sohlvermessung Geschwindigkeitsmessung
Phase 3	4,65 ‰	50 - 140 l/s	Kontinuierliche Massenermittlung Geschwindigkeitsmessung Turbulenzmessung Sieblinie Deckschicht
	7,15 ‰	50 - 140 l/s	
	10,0 ‰	50 - 140 l/s	

**Tabelle 8: Zusammenfassung der durchgeführten Auswertungen**

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Allgemeines

Schwerpunkte der folgenden Seiten bilden die verschiedenen Verfahren zur Schubspannungsermittlung sowie die Diagramme für den Geschiebetransport. Es finden sich hier aber auch die Ergebnisse der Sohl- und Wasserspiegelvermessungen.

### 4.2 Kornverteilungen des Geschiebes im Modellversuch

Das in dem Modellversuch verwendete Geschiebe wurde bereits in Kapitel 3.2 beschrieben. In Abbildung 19 ist noch einmal die Sieblinie des im Versuch verwendeten Sediments dargestellt:

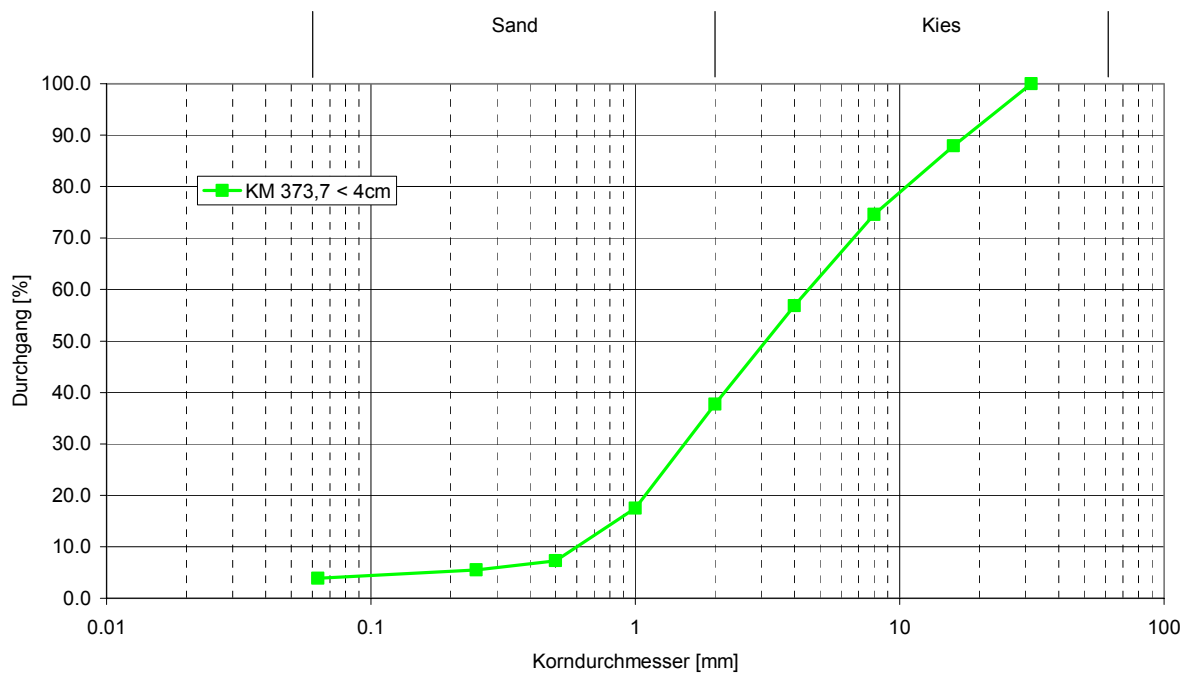


Abbildung 19: Körnungslinie des Geschiebes (d < 40 mm)

## 4.3 Sohlschubspannungen

### 4.3.1 Berechnung nach GEHRIG und GESSLER

Mit Hilfe der in Kapitel 2.3 beschriebenen Formeln zur rechnerischen Ermittlung der Sohlschubspannungen wurden für verschiedene Neigungen in Abhängigkeit von den Durchflüssen die Schubspannungen ermittelt (siehe Abbildung 20). Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der Verfahren nach GEHRIG und nach GESSLER zeigt, dass die Formel nach GESSLER geringfügig höhere Schubspannungen ergibt als jene nach GEHRIG. Die Abweichungen der beiden Ergebnisse ergeben sich aus einem unterschiedlichen Rauigkeitsansatz.

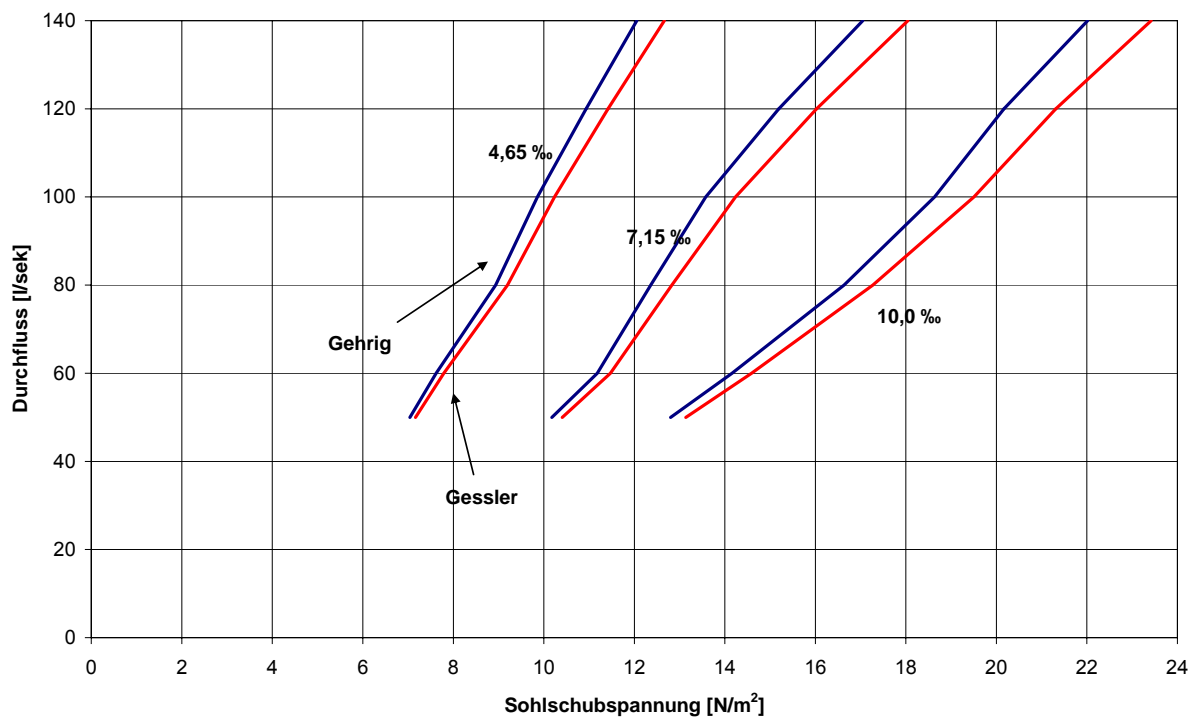


Abbildung 20: Schubspannungsermittlung nach GEHRIG und GESSLER

### 4.3.2 Ermittlung unter Berücksichtigung der Turbulenz

Eine Möglichkeit zur Schubspannungsermittlung besteht in der Messung der Turbulenz. Auch diese erfolgte mit dem Geschwindigkeitsmessgerät Vectrino+ (siehe Kapitel 3.5.6). In der Abbildung 21 sind die Ergebnisse der Schubspannungsermittlung für die drei unterschiedlichen Gerinneneigungen zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse aus der Turbulenz wesentlich geringere Werte aufweisen als jene aus den Berechnungen nach

GEHRIG und GESSLER. Die Ergebnisse schwanken so stark, dass auch keine Trends auszumachen sind.

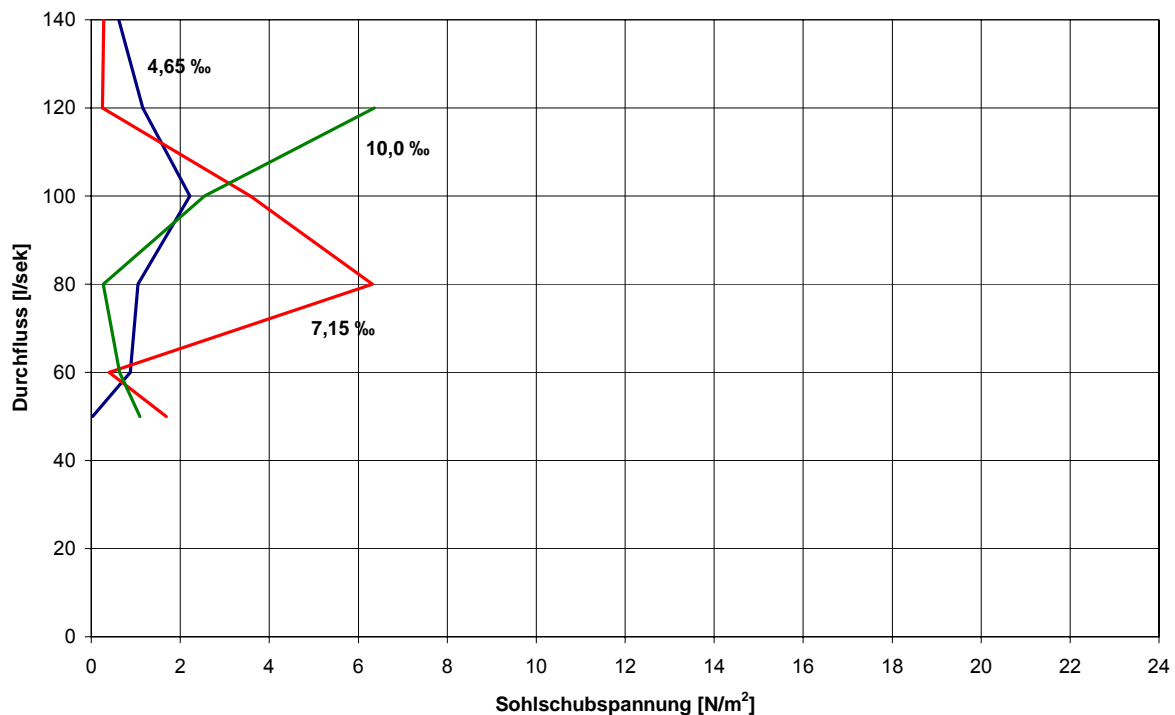
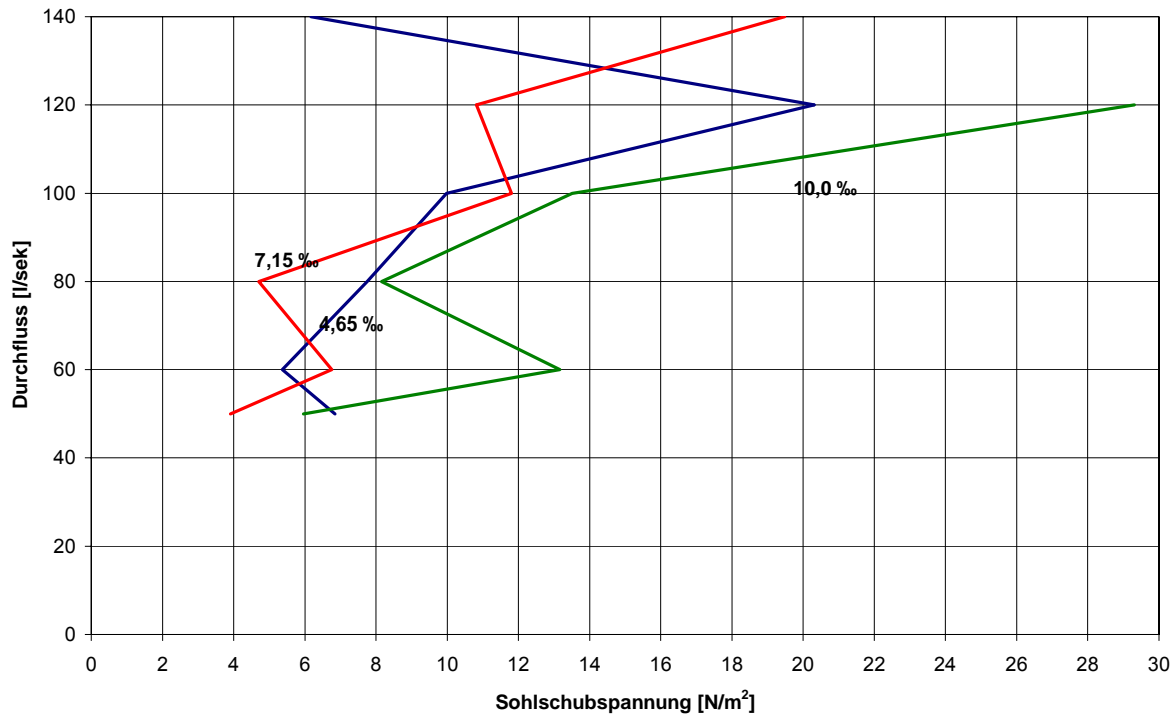


Abbildung 21: Schubspannungsermittlung durch Turbulenzmessung

### 4.3.3 Ermittlung aus logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen

Die Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse der Schubspannungsermittlung aus logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen (siehe Kapitel 3.5.5). Im Gegensatz zu den Turbulenzmessungen erreichen die Schubspannungen hier höhere Werte. Aber diese sind durchwegs geringer als die Berechnungsergebnisse nach GEHRIG. Die grundsätzliche Tendenz ist jedoch den Berechnungen ähnlich. Schwankungen der Ergebnisse zeigen sich auch hier. So verringert sich zum Beispiel bei der Neigung von 4,65 ‰ und einem Durchfluss von 140 l/s die Sohlschubspannung wieder.





**Abbildung 22: Schubspannungsermittlung aus log. Geschwindigkeitsprofilen**

In Abbildung 23 sind Geschwindigkeitsprofile exemplarisch für die Neigung von 4,65 ‰ und für drei Durchflüsse ( $Q=60/100/140$  l/s) dargestellt. Es sind die verschiedenen Messpunkte (aufgenommen in der Längsachse des Glasgerinnes im Bezugsquerschnitt P12) mit den entsprechenden Fließgeschwindigkeiten aufgetragen. Mit den gemessenen Fließgeschwindigkeiten ergeben sich logarithmische Trendlinien mit der Form  $v(z) = a \cdot \ln(z) + b$  (siehe Kapitel 2.3.5).

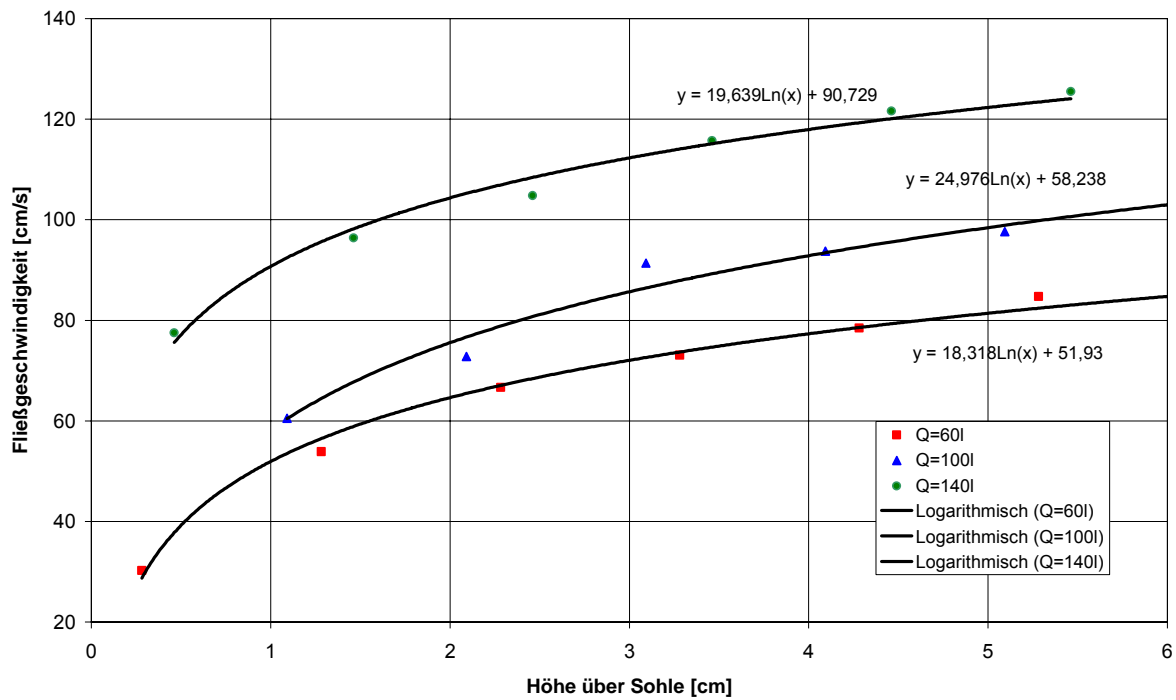


Abbildung 23: Geschwindigkeitsprofile bei der Neigung 4,65 ‰

#### 4.3.4 Numerische Berechnung mit dem Programm HecRas

Zur Kontrolle der Ergebnisse aus den Berechnungen nach GEHRIG und GESSLER wurde für die Neigung 10,0 ‰ eine numerische Berechnung durchgeführt. Die Berechnung erfolgte mit dem Programm HecRas. Die ermittelten Ergebniskurven aus der Numerik zeigen, dass die Ergebnisse gut übereinstimmen (siehe Abbildung 24). Die erzielten Ergebnisse sind jedoch alle etwas kleiner als jene nach GEHRIG.

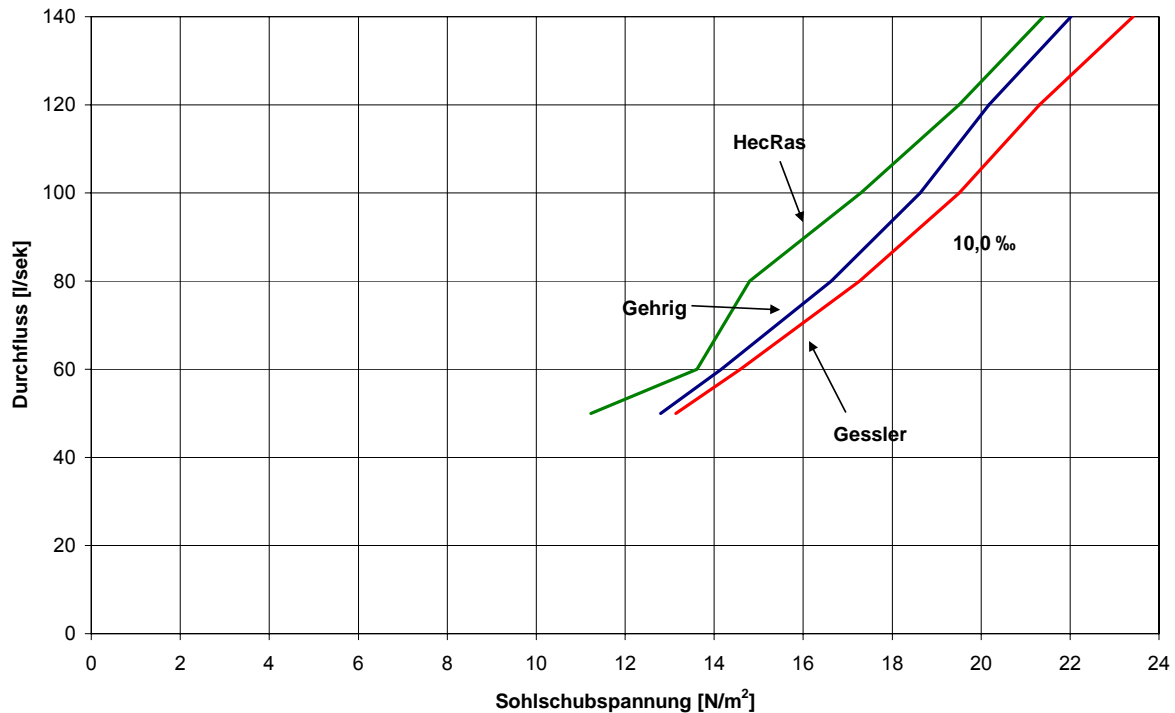


Abbildung 24: Vergleich der Schubspannungsermittlung mit der numerischen Berechnung

## 4.4 Geschiebetransport

### 4.4.1 Allgemeines

Die Ergebnisse aus den Messungen des Geschiebetransports in der 2. und 3. Phase werden hier dargestellt. Die angegebenen Schubspannungsbereiche, welche den einzelnen Gerinneneigungen entsprechen, sind berechnete Schubspannungen aus der Formel nach GEHRIG.

### 4.4.2 Sohlschubspannungsbereich von 2,1 bis 7,2 N/m<sup>2</sup>

Der angegebene Schubspannungsbereich von 2,1 bis 7,2 N/m<sup>2</sup> ergab sich bei dem Versuch mit einer Gerinneneigung von 2,53 ‰ und Durchflüssen von 10 bis 130 l/s (Phase 2; vgl. MEINDL, 2005). Die Ergebnisse der Geschiebemessungen sind in der Abbildung 25 dargestellt. Die Graphik zeigt die Summenlinie des im Auffangbehälter gesammelten und vor jeder Durchflusssteigerung gewogenen Geschiebes in Abhängigkeit von der Versuchsdauer. Die dazwischen liegenden Werte wurden linear interpoliert. Weiters zeigt das Diagramm den Geschiebetrieb [g/(s\*m)]. Dieser wurde

als Mittelwert über die Versuchsdauer mit einem bestimmten Durchfluss errechnet. Es ergibt sich somit ein Wert für jeden Durchfluss bzw. jede Schubspannung.

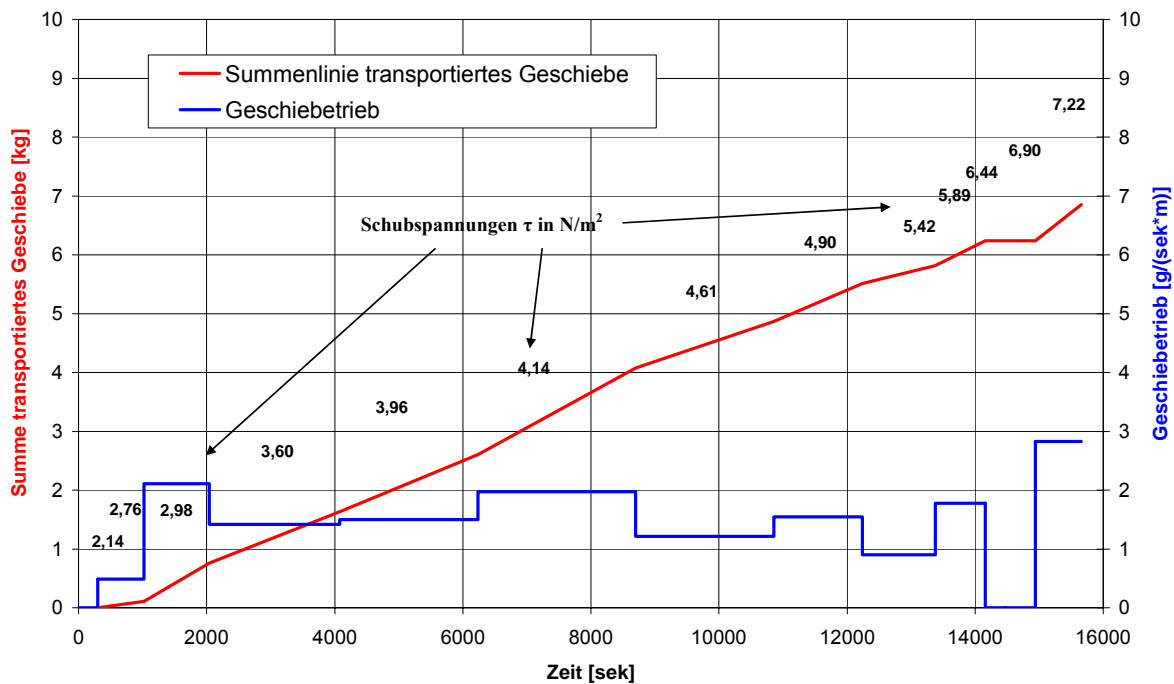


Abbildung 25: Geschiebetransport bei Schubspannung von 2,14 bis 7,20  $\text{N/m}^2$  ( $I=2,53 \text{ ‰}$ )

#### 4.4.3 Sohlschubspannungsbereich von 7,0 bis 12,1 $\text{N/m}^2$

Dieser Versuch wurde bei einer Gerinneneigung von 4,65 ‰ und bei Durchflüssen von 50 bis 140 l/s durchgeführt. Es erfolgte dabei eine kontinuierliche Geschiebemessung (Phase 3). Die Abbildung 26 zeigt das Ergebnis der Geschiebemessung. Die Summenlinie des Geschiebetransports [kg] zeigt, dass der zeitliche Verlauf des Transports keineswegs linear verläuft. Im Bereich von 10,9  $\text{N/m}^2$  (120 l/s) zeigt sich ein auffallend großer Gradient des Geschiebetransports und des Geschiebetrags in den ersten 30 Minuten des Versuchs. Der weitere Verlauf des Anstiegs ist wieder bedeutend flacher.

Der auf der zweiten Achse aufgetragene Geschiebetrieb [ $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ] ergab sich aus Mittelwerten über eine Zeitspanne von fünf Minuten. Bei diesen Werten zeigt sich deutlich, dass der Geschiebetrieb jeweils am Beginn jeder Durchflusssteigerung am höchsten ist und anschließend wieder abnimmt.

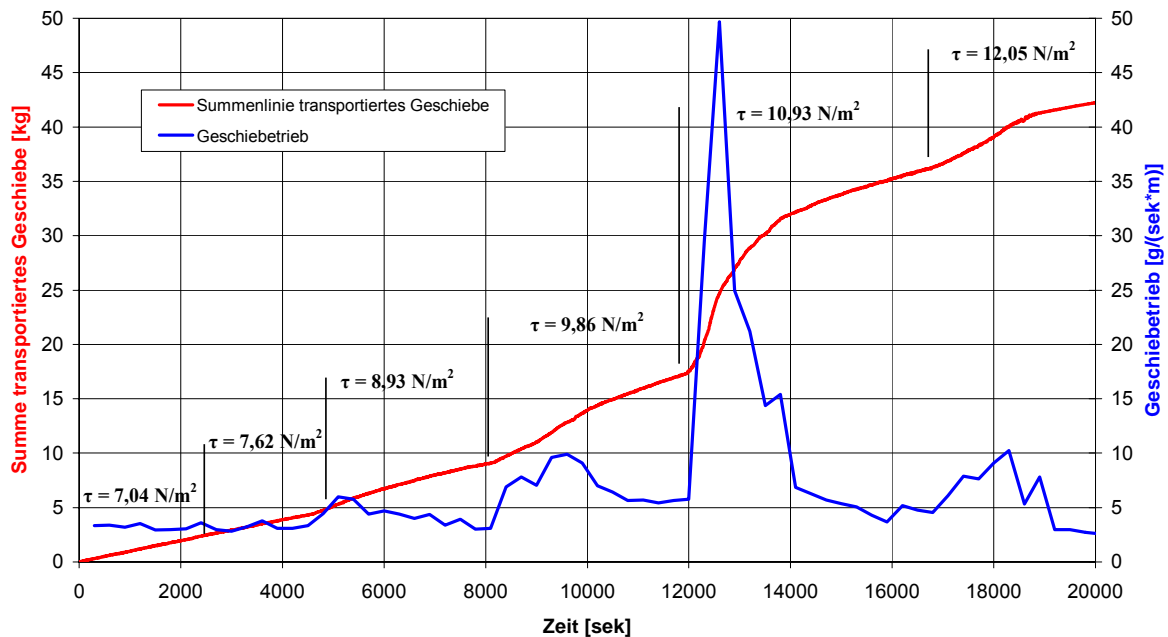
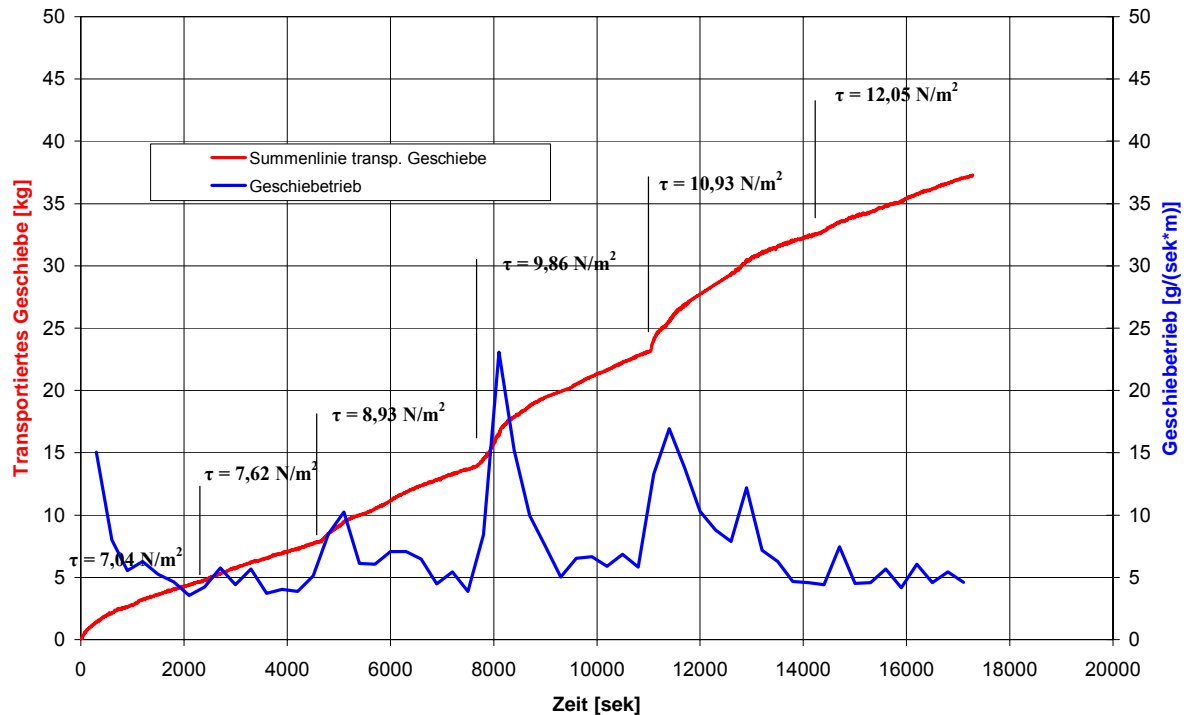


Abbildung 26: Geschiebetransport bei Schubspannung von 7,04 bis 12,05 N/m<sup>2</sup> (I=4,65 ‰)

#### 4.4.4 Sohlschubspannungsbereich von 7,0 bis 12,1 N/m<sup>2</sup> (2. Messung)

Zur Überprüfung der Plausibilität der Ergebnisse aus Kapitel 4.4.3 wurde diese Messung wiederholt. Auch hier zeigt sich beim Verlauf des Geschiebetriebs ein hoher Betrag am Beginn jeder Messung. Die höchsten Werte ergaben sich dabei bei Schubspannungen von 9,8 und 10,9 N/m<sup>2</sup>. Der in der 1. Messung auftretende extrem hohe Geschiebetrieb bei 10,9 N/m<sup>2</sup> findet sich im Ergebnis der 2. Messung nicht wieder.



**Abbildung 27: Geschiebetransport bei Schubspannung von 7,04 bis 12,05 N/m<sup>2</sup> (I=4,65 ‰, 2. Messung)**

Am Ende dieses Versuchs wurde eine Siebanalyse der ausgebildeten Deckschicht gemacht. Die sich ergebende Körnungslinie ist in Abbildung 28 dargestellt. Ein Vergleich mit den Körnungslinien des Originalgeschiebes und des im Versuch verwendeten Geschiebes zeigt deutlich, dass kleine Korndurchmesser weitgehend ausgeschwemmt wurden und Körner zwischen 1 und 4 cm Durchmesser übrig blieben. Die Tabelle 9 zeigt die Veränderung der Geschiebeparameter im Vergleich zum Originalgeschiebe im Modellversuch.

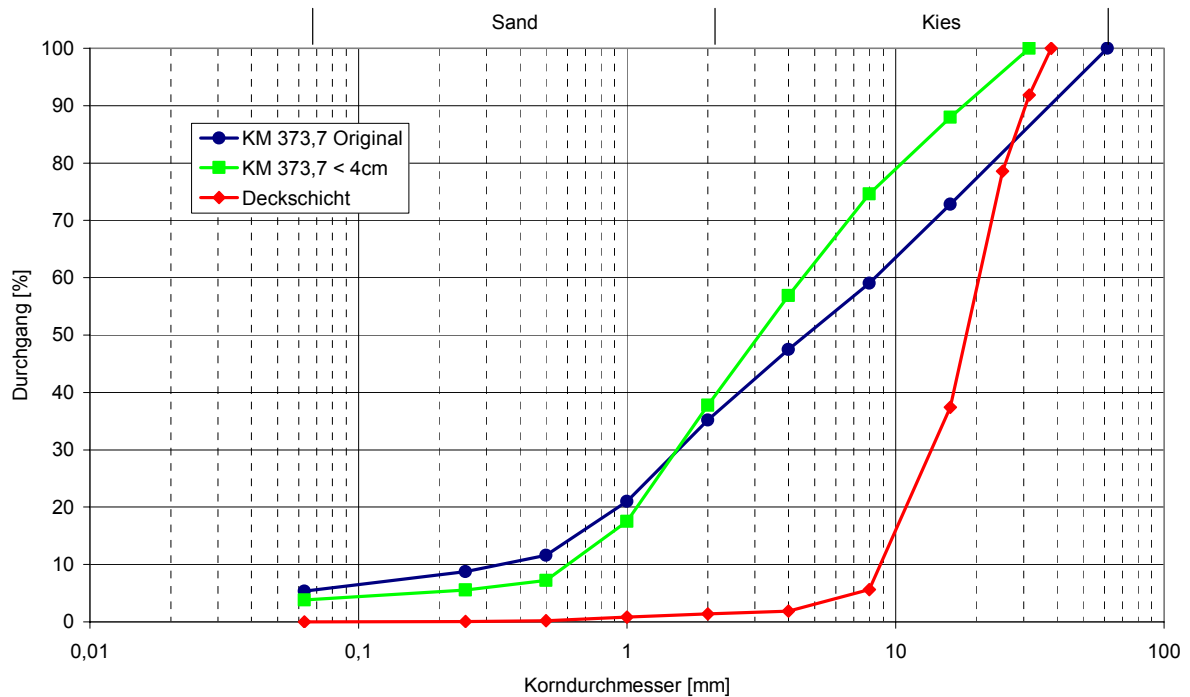


Abbildung 28: Körnungslinie der Deckschicht

Körnungslinie	$d_{10}$ [mm]	$d_{50}$ [mm]	$d_{90}$ [mm]	$d_m$ [mm]
Sedimente < 40 mm	0,64	3,32	18,26	3,63
Deckschicht	9,11	18,75	30,58	21,94

Tabelle 9: Vergleich der Geschiebeparameter

#### 4.4.5 Sohlschubspannungsbereich von 10,2 bis 17,1 N/m<sup>2</sup>

Die Geschiebemessung bei einer Neigung von 7,15 ‰ und Durchflüssen von 50 bis 140 l/s war Bestandteil der 3. Phase. Bei den Ergebniskurven fällt auf, dass der Transport bei 15,19 N/m<sup>2</sup> am stärksten ansteigt (siehe Abbildung 29). Der Gesamttransport am Ende des Versuchs (nach 20.000 Sekunden) ist im Vergleich zu jenem bei einem Bereich von 7,0 bis 12,1 N/m<sup>2</sup> jedoch geringer.

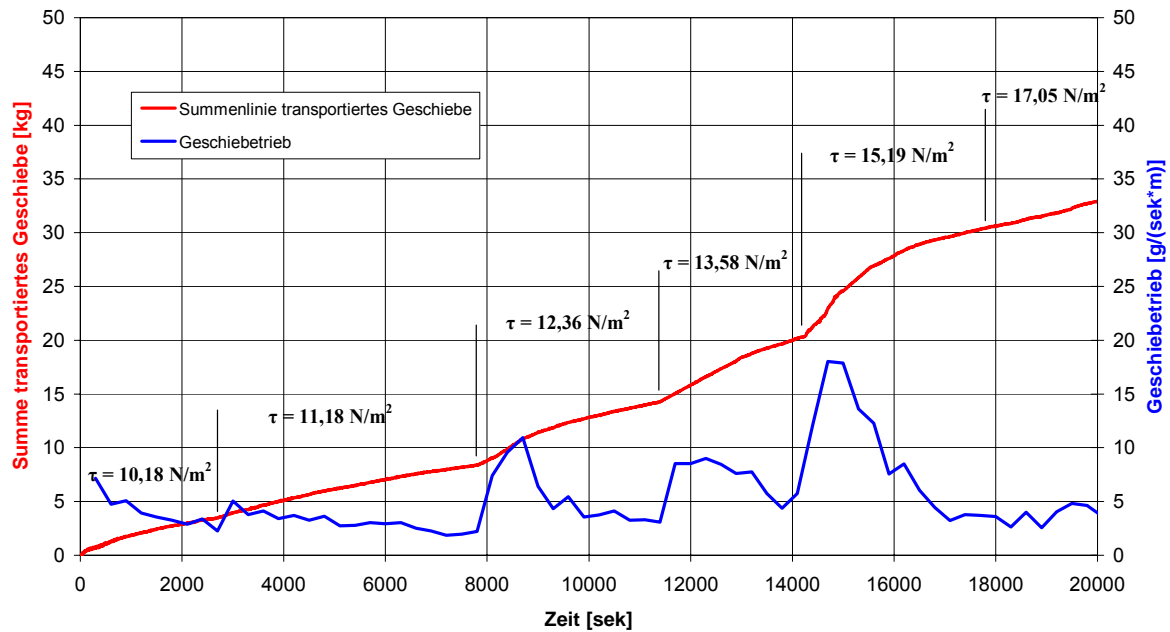


Abbildung 29: Geschiebetransport bei Schubspannung von 10,18 bis 17,05 N/m<sup>2</sup> (I=7,15 ‰)

#### 4.4.6 Sohlschubspannungsbereich von 8,9 bis 22,1 N/m<sup>2</sup>

Der Schubspannungsbereich bis zu 22,1 N/m<sup>2</sup> (Neigung: 10,0 ‰) wurde zweimal gemessen. In Abbildung 30 ist das Ergebnis der in der 2. Phase durchgeführten Geschiebemessung dargestellt (vgl. MEINDL, 2005).



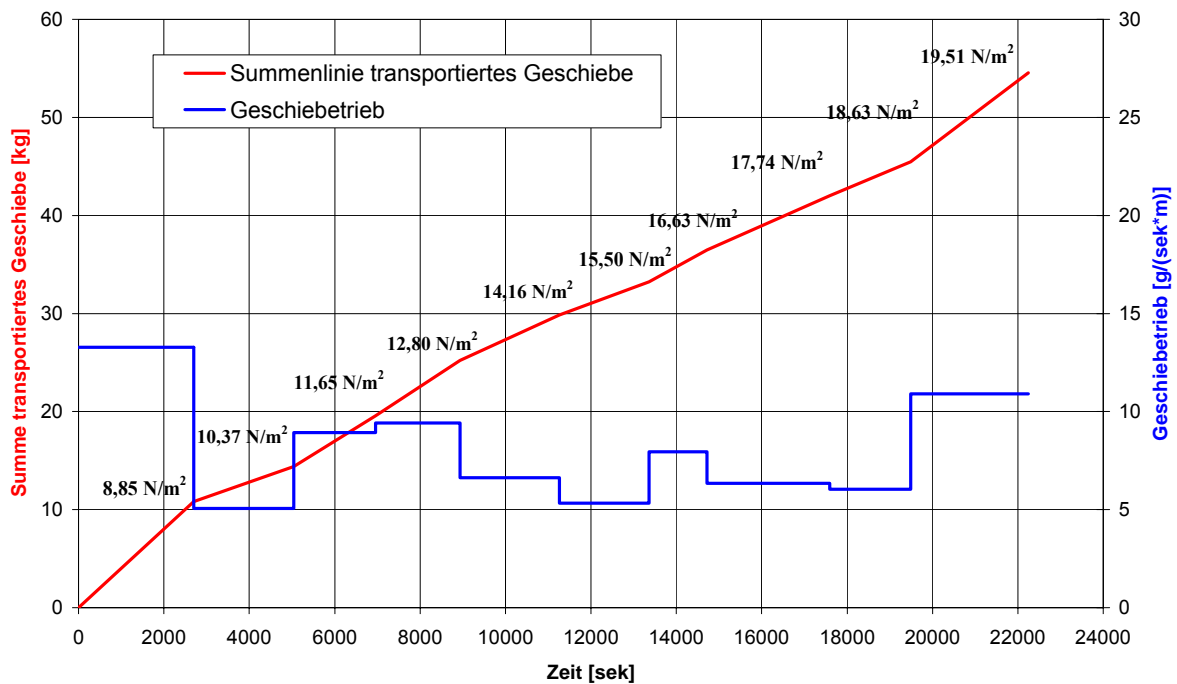


Abbildung 30: Geschiebetransport bei Schubspannung von 8,90 bis 22,10 N/m<sup>2</sup> (I=10,0 ‰)

#### 4.4.7 Sohlschubspannungsbereich von 12,8 bis 22,1 N/m<sup>2</sup> (2. Messung)

In der 3. Phase wurde der Versuch mit einer Neigung von 10,0 ‰ wiederholt, um auch eine kontinuierliche Geschiebemessung zu machen (siehe Abbildung 31). Hier zeigt sich ein bedeutend größerer Anstieg des Geschiebetransportverlaufs in Abhängigkeit von der Zeit.

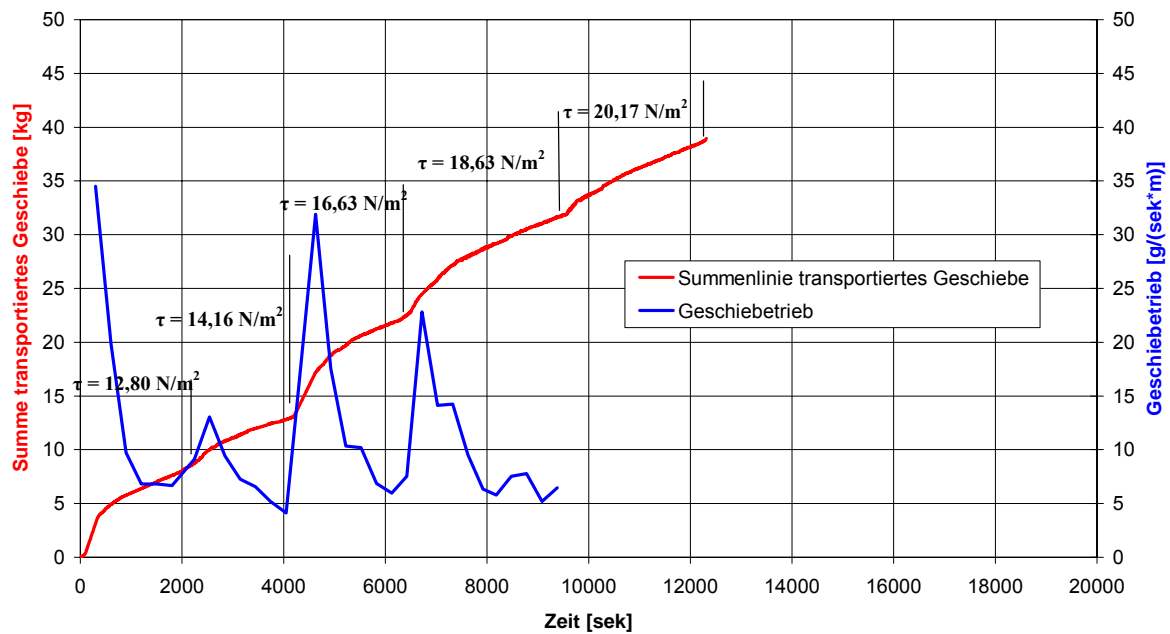


Abbildung 31: Geschiebetransport bei Schubspannung von 12,80 bis 20,10 N/m<sup>2</sup> ( $I=10,0\text{‰}$ )

Dieser Versuch wurde nur bis zu einer errechneten Schubspannung von 20,17 N/m<sup>2</sup> durchgeführt. Bei einer Schubspannung von 22,02 N/m<sup>2</sup> musste der Versuch nach einer Panne bereits nach wenigen Minuten abgebrochen werden. Aus den wenigen vorhandenen Messwerten wurde daher eine lineare Trendlinie (strichliert) des weiteren Verlaufs gezeichnet (siehe Abbildung 32).

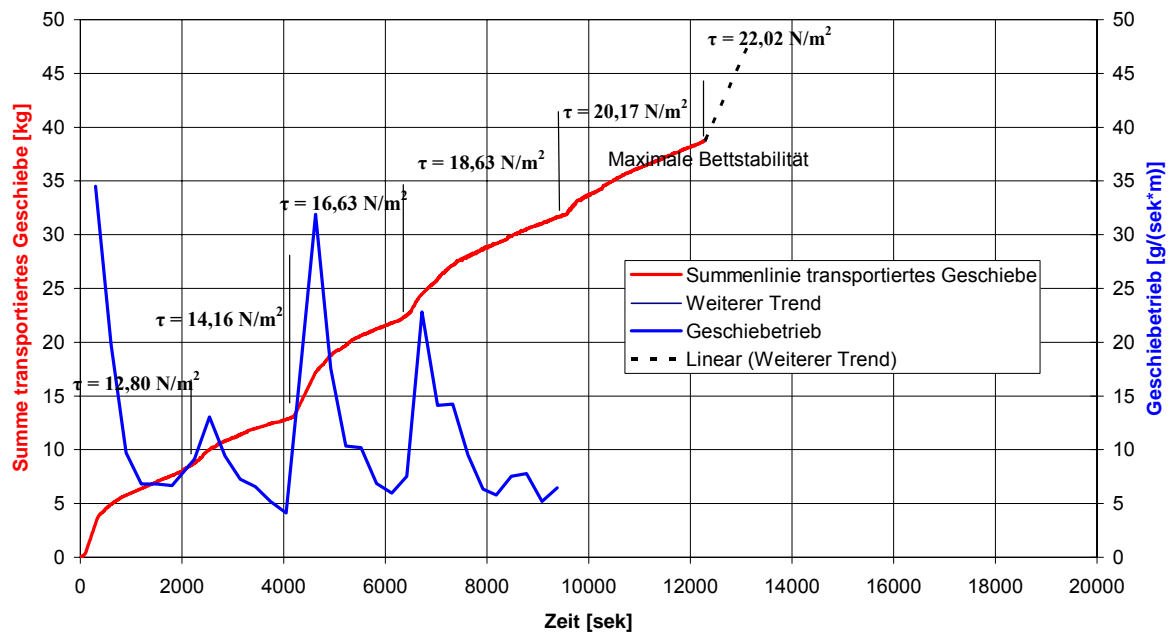


Abbildung 32: Maximale Bettstabilität und mobile Sohle ( $I=10,0 \text{ ‰}$ )

#### 4.5 Sortiereffekt

In der 2. Phase wurden bei einer Gerinneneigung von  $10,0 \text{ ‰}$  vom aufgefangenen Geschiebe Siebanalysen durchgeführt. Die Körnungslinien für fünf ausgewählte Abflüsse bzw. Schubspannungen sind in Abbildung 33 dargestellt. Es zeigt sich, dass bei zunehmender Abflusserhöhung auch die Durchmesser der transportierten Körner größer werden.

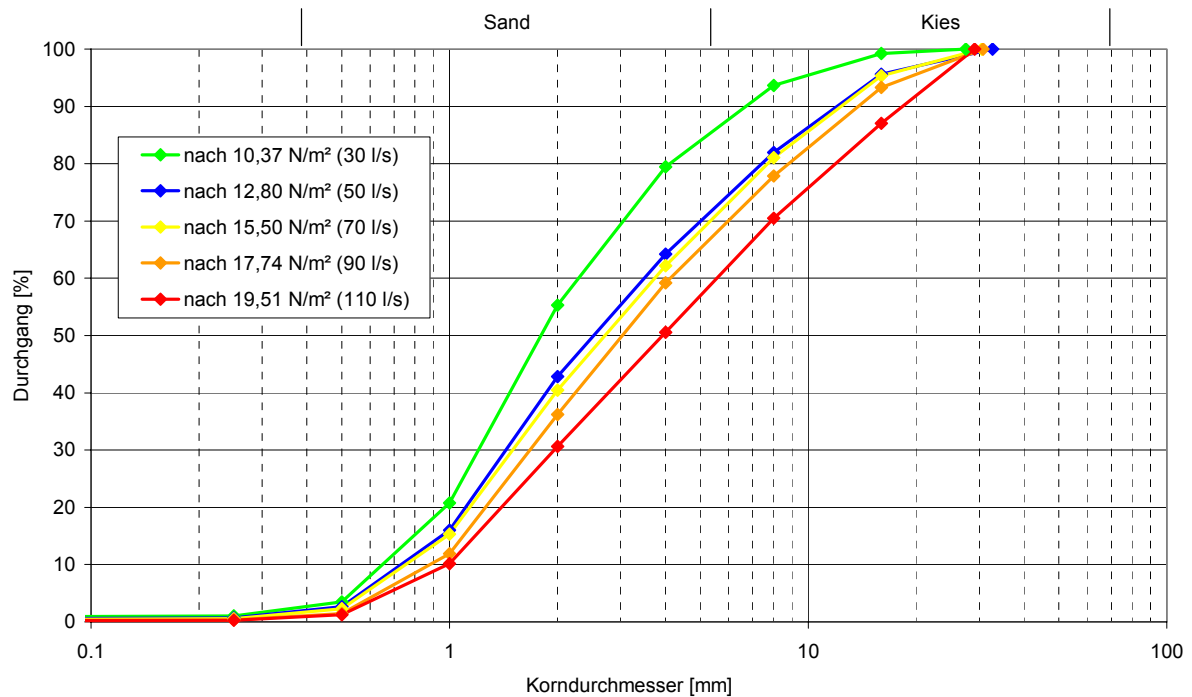


Abbildung 33: Körnungslinien des transportierten Geschiebes

Mit der Ermittlung von  $d_m = 3,62 \text{ mm}$  für das eingebaute Geschiebe kann die kritische Schleppspannung ermittelt werden. Dies erfolgt mit der Formel nach Meyer-Peter/Müller:

$$\tau_{gr} = \Theta_{cr} \cdot (\rho_F - \rho_W) \cdot g \cdot d_m$$

mit  $\rho_F = 2568 \text{ kg/m}^3$  und  $\rho_W = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

Die kritischen Schubspannungen ergeben sich zu:

Für  $\Theta_{cr} = 0,03$ :  $\tau_{gr} = 1,67 \text{ N/m}^2$

Für  $\Theta_{cr} = 0,047$ :  $\tau_{gr} = 2,62 \text{ N/m}^2$

Für  $\Theta_{cr} = 0,06$ :  $\tau_{gr} = 3,34 \text{ N/m}^2$

Für die Körnungslinien wurden die Geschiebekennzahlen  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  und  $d_m$  [mm] berechnet und in Abhängigkeit von den auftretenden Schubspannungen dargestellt (siehe Abbildung 34).

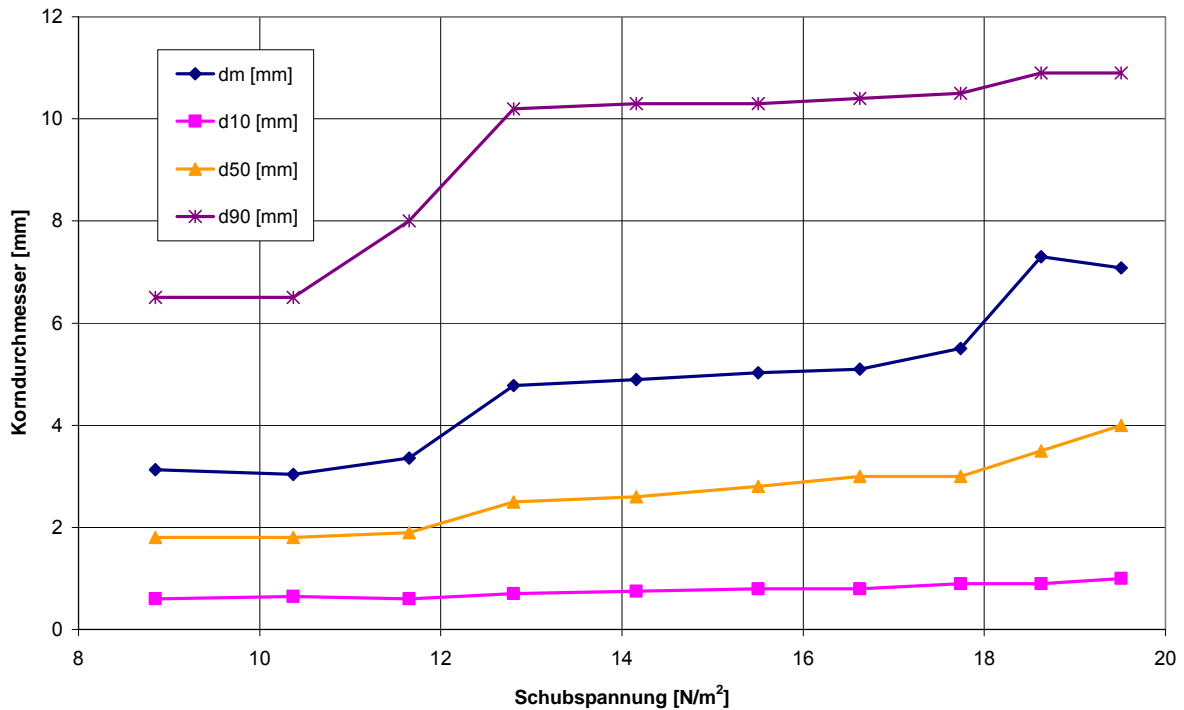


Abbildung 34: Geschiebekennzahlen in Abhängigkeit von den Schubspannungen

#### 4.6 Sohlvermessungen und Lage des Wasserspiegels

In allen Versuchsphasen wurden die Neigungen der eingebauten Sohle und die jeweiligen Wasserspiegellagen aufgezeichnet. Eine Zusammenfassung für alle Neigungen und Durchflüsse findet sich in der Tabelle 10.

Für die Versuchsdurchführung war es notwendig einen gleichförmigen Abfluss zu erzielen, das heißt einen sohlparallelen Wasserspiegel einzustellen. Durch den Einbau des Auffangtrichters in Phase 3 ergab sich jedoch ein Rückstau, durch den eine genaue Einstellung nicht mehr möglich war.

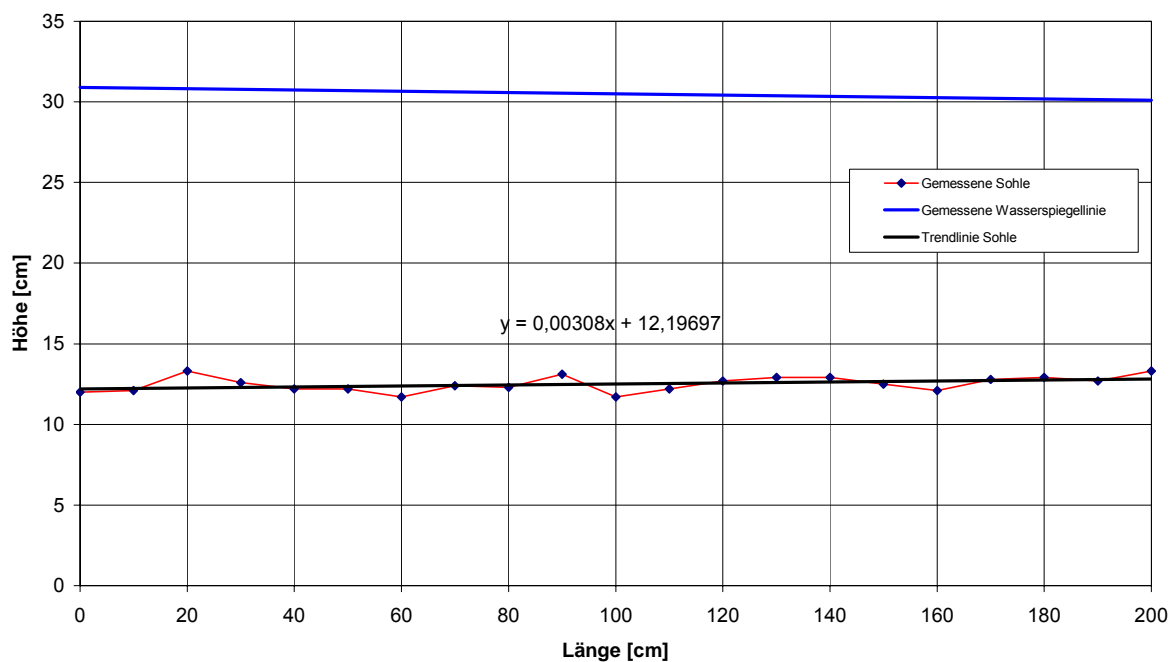
Bei der Sohlneigung des eingebauten Sediments fiel auf, dass die Neigung der Sohle vor Beginn der Versuche nicht exakt mit der Gerinneneigung übereingestimmt hat (siehe Tabelle 10).

Gerinneneigung	Messung	Sohlneigung	Wasserspiegelneigung
<b>0,00253</b>	Ausgangszustand	0,00213	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 10l/sek	0,00237	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 20l/sek	0,00267	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 30l/sek	0,00265	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 40l/sek	0,00235	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 50l/sek	0,00218	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 60l/sek	0,00218	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 70l/sek	0,00248	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 80l/sek	0,00198	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 90l/sek	0,00178	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 100l/sek	0,00183	0,00253
<b>0,00253</b>	nach 130l/sek	0,00163	0,00253
<b>0,00465</b>	Ausgangszustand	0,00973	0,000800
<b>0,00465</b>	nach 50l/sek	0,00928	0,000800
<b>0,00465</b>	nach 60l/sek	0,01027	0,002090
<b>0,00465</b>	nach 80l/sek	0,00972	0,001445
<b>0,00465</b>	nach 100l/sek	0,00451	0,002940
<b>0,00465</b>	nach 120l/sek	0,00403	0,005300
<b>0,00465</b>	nach 140l/sek	0,00720	0,004650
<b>0.00465 (2. Messung)</b>	Ausgangszustand	0,00453	0,003370
<b>0.00465 (2. Messung)</b>	nach 50l/sek	0,00238	0,003370
<b>0.00465 (2. Messung)</b>	nach 60l/sek	0,00214	0,003800
<b>0.00465 (2. Messung)</b>	nach 80l/sek	0,00441	0,003800
<b>0.00465 (2. Messung)</b>	nach 100l/sek	0,00181	0,004220
<b>0.00465 (2. Messung)</b>	nach 120l/sek	-0,00368	0,004650
<b>0.00465 (2. Messung)</b>	nach 140l/sek	-0,00268	0,004650
<b>0,00715</b>	Ausgangszustand	0,01090	0,002450
<b>0,00715</b>	nach 50l/sek	0,00954	0,002450
<b>0,00715</b>	nach 60l/sek	0,00879	0,000740
<b>0,00715</b>	nach 80l/sek	0,00586	0,006720
<b>0,00715</b>	nach 100l/sek	0,00376	0,005010
<b>0,00715</b>	nach 120l/sek	0,00161	0,005870
<b>0,00715</b>	nach 140l/sek	0,00138	0,005870
<b>0,01000</b>	Ausgangszustand	0,01910	0,01000
<b>0,01000</b>	nach 20l/sek	0,00320	0,01000
<b>0,01000</b>	nach 30l/sek	0,00540	0,01000
<b>0,01000</b>	nach 40l/sek	0,00575	0,01000
<b>0,01000</b>	nach 50l/sek	0,00575	0,01000
<b>0,01000</b>	nach 60l/sek	0,00764	0,01000
<b>0,01000</b>	nach 70l/sek	0,00998	0,01000
<b>0,01000</b>	nach 80l/sek	0,00925	0,01000
<b>0,01000</b>	nach 90l/sek	0,00625	0,01000
<b>0,01000</b>	nach 100l/sek	0,00405	0,01000
<b>0.0100 (2. Messung)</b>	Ausgangszustand	0,00786	0,003590
<b>0.0100 (2. Messung)</b>	nach 50l/sek	0,00554	0,003590
<b>0.0100 (2. Messung)</b>	nach 60l/sek	0,00430	0,007860
<b>0.0100 (2. Messung)</b>	nach 80l/sek	0,00380	0,009570
<b>0.0100 (2. Messung)</b>	nach 100l/sek	0,00275	0,010850
<b>0.0100 (2. Messung)</b>	nach 120l/sek	0,00121	0,010430
<b>0.0100 (2. Messung)</b>	nach 150l/sek	-	-

Tabelle 10: Sohlneigungen und Wasserspiegelneigungen aller Phasen des Versuchs (1., 2. und 3. Phase)

Die Vermessung der Sohle in der 2. und 3. Phase erfolgte mit dem Messgerät Vectrino+ (siehe Kapitel 3.5.4). Die Abbildung 35 und die Abbildung 36 zeigen exemplarisch das Ergebnis einer solchen Sohlvermessung für eine Neigung von 4,65 ‰ und einem Durchfluss von 80 l/s.

Die Abbildung 35 zeigt die einzelnen Messpunkte der Sohlage mit der dazugehörigen linear verlaufenden Trendlinie. Weiters ist die Lage des Wasserspiegels während dieser Messung dargestellt.



**Abbildung 35: Relative Neigungen der Sohle und des Wasserspiegels,  $I=4,65$  ‰,  $Q=80$  l/s**

Da es sich bei diesen Neigungen um Neigungen relativ zum Glasgerinne handelt, wurde diese noch in absolute Neigungen umgerechnet, welche in der Abbildung 36 eingetragen sind. Dies sind auch die Neigungen, die in Tabelle 10 zu finden sind.

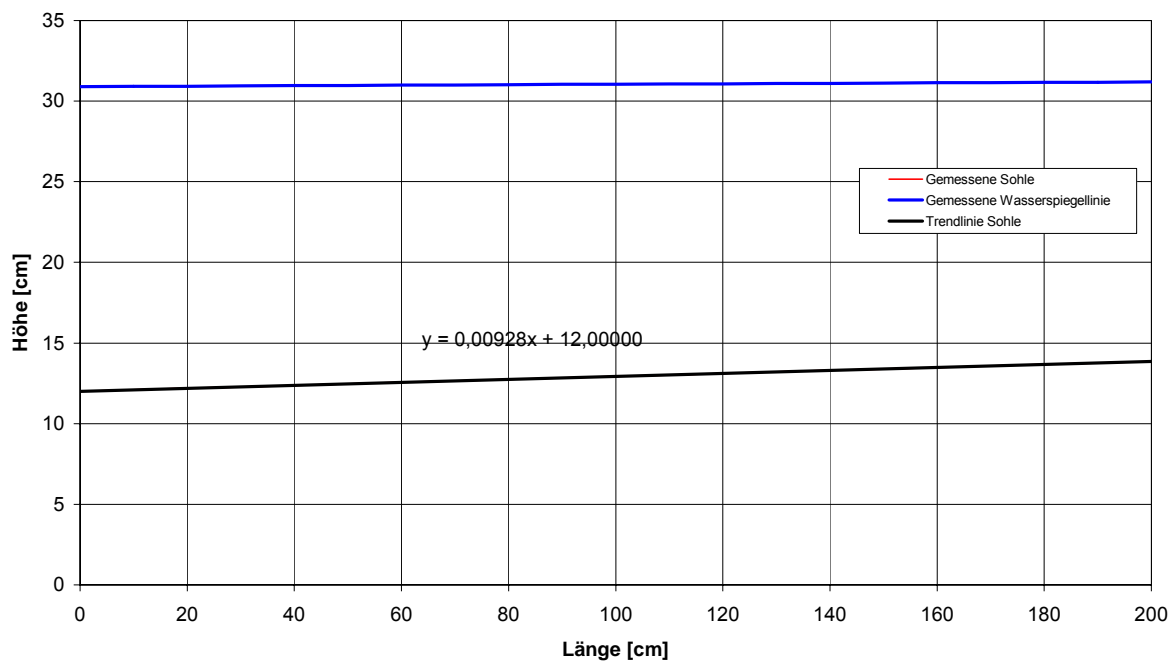


Abbildung 36: Absolute Neigungen der Sohle und des Wasserspiegels,  $I=4,65\text{‰}$ ,  $Q=80\text{ l/s}$



## 5 Auswertung und Analyse der Ergebnisse

### 5.1 Sohlschubspannungen

#### 5.1.1 Ermittlung unter Berücksichtigung der Turbulenz

In Kapitel 4.3.2 sind die Ergebnisse der Schubspannungen für drei Gerinneneigungen in Abhängigkeit vom Durchfluss dargestellt. Die Abbildung 21 zeigt, dass die Werte für die Schubspannungen wesentlich geringer als jene nach den Berechnungen nach GEHRIG und GESSLER sind. Im Verlauf der Kurven sind keine eindeutigen Trends ersichtlich. Eine zusätzlich durchgeführte Vergleichsmessung sollte weitere Aufschlüsse zu dieser Problematik geben. Die Messung erfolgte wiederum im Glasgerinne mit dem Geschwindigkeitsmessgerät Vectrino+. Dieser Versuch wurde jedoch nicht mit einer beweglichen Sohle mit Sedimenten sondern mit einer festen Sohle, bestehend aus einer Kunststoffmatte, durchgeführt. Mit der Auswertungssoftware ExploreV wurden auch hier die Schwankungskomponenten der Geschwindigkeiten ( $v'_s$  und  $v'_n$ ) und damit die Schubspannungen ermittelt. Die Turbulenzmessungen erfolgten in zwei eng nebeneinander liegenden Profilen im Abstand von 1,0 cm und mit verschiedenen Abtastfrequenzen (100 Hz und 200 Hz) des Geschwindigkeitsmessgerätes. Die sich im Anhang befindende Tabelle zeigt auch hier eine sehr starke Streuung der Ergebnisse.

#### 5.1.2 Ermittlung aus logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen

Die Schubspannungsermittlung aus den logarithmischen Geschwindigkeitsprofilen ergab ebenfalls keine eindeutigen Trends (siehe Kapitel 4.3.3). Zur Verdichtung der Daten wurde auch hier eine Vergleichsmessung mit einer festen Sohle durchgeführt. Diese Messung erfolgte im Rahmen des in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Versuchs. Aus der Tabelle im Anhang ist ersichtlich, dass die Ergebnisse je nach Abtastfrequenz nicht sehr stark variieren, jedoch dass die Schubspannung im nur 1 cm entfernten Profil einen höheren Wert aufweist.

### 5.1.3 Zusammenfassung der Problematik

Die nicht eindeutigen Ergebnisse bei den Messungen mit dem Geschwindigkeitsmessgerät Vectrino+ legen eine Suche nach den möglichen Ursachen nahe. Bei den Geschwindigkeitsmessungen mit beweglicher Sohle wurde das Vectrino+ so eingestellt, dass der erste Messpunkt möglichst nahe der Sohloberfläche, nämlich bei 0,5 cm, positioniert wurde. Bei der Auswertung der Ergebnisse hat sich jedoch herausgestellt, dass im Verlauf des Versuchs dieser unterste Messpunkt nicht mehr 0,5 sondern bis zu 4,5 cm von der Sohle entfernt war. Der Grund dafür lag in der ständigen Veränderung und Eintiefung der Sohle mit zunehmender Durchflusssteigerung. Wichtige Werte in Sohlnähe wurden somit zum Teil nicht aufgenommen. Ein weiteres Problem der Genauigkeit des Messrasters lag im Versuchsaufbau. Die höhenmäßige Verstellung des Vectrinos um 0,5 bzw. 1,0 cm erfolgte händisch durch Öffnen der Schrauben, an denen das Messgerät befestigt war. Die Höhen exakt einzustellen, war daher praktisch nicht möglich.

Zur weiteren Untersuchung des Problems der Geschwindigkeitsmessung wäre es sicher notwendig, den Versuchsaufbau zu verändern. Eine Verstellung des Messgerätes in seiner Höhe müsste motorgesteuert funktionieren. Das Gerät sollte sich automatisch den Punkt suchen, der sich möglichst nahe an der Sohle befindet und vom Messgerät gerade noch erfassbar ist (ungefähr 5,0 mm). Damit könnte man sich automatisch an Veränderungen der Sohloberfläche anpassen. Ein weiterer Vorteil wäre eine Einstellung der Messpunkte in konstant kleinen Abständen. Zur Datenverdichtung wäre es notwendig, nicht nur ein Profil in der Mitte des Glasgerinnes zu erfassen, sondern mehrere Messungen über die Länge des Gerinnes durchzuführen.

## 5.2 Geschiebetransport

Die Ergebnisse des Geschiebetransports sind in Kapitel 4.4 dargestellt. Eine Zusammenfassung aller Versuche findet sich in Abbildung 37. Die darin enthaltenen Werte für den mittleren Geschiebetrieb  $[g/(m*s)]$  sind Mittelwerte über eine Versuchsdauer von 30 Minuten für einen bestimmten Durchfluss.

Bei allen Ergebniskurven lässt sich das Phänomen der Deckschichtbildung erkennen. Die Sohle verfestigt sich immer wieder mit größeren Körnern und reißt anschließend

wieder auf. Dieses Verfestigen und Aufreißen sieht man im Abnehmen und Ansteigen des Geschiebetriebes.

Beim Betrachten der 1. Messung mit einer Neigung von 4,65 ‰ erkennt man einen Wert von über 25 g/(m\*s) bei  $Q = 120$  l/s, der sich deutlich von allen anderen Werten abhebt. Die Wiederholungsmessung dieser Neigung hat jedoch einen Wert solcher Größe nicht mehr ergeben. Abgesehen von diesem „Ausreißer“ passen die beiden Messungen gut zusammen (siehe Anhang). Der Versuchsaufbau mit dem in seiner Neigung mit Hilfe von Schrauben verstellbaren Glasgerinne und der nicht konstant verfestigten mobilen Sohle ist wohl die Ursache für unterschiedliche Ergebnisse unter scheinbar gleichen Versuchsbedingungen.

Die einzelnen Ergebniswerte sind in Abbildung 38 dargestellt. Der „Ausreißer“ wurde hier jedoch entfernt. Den Punkten im Diagramm wurde eine potenzielle Trendlinie hinzugefügt. Bei  $22 \text{ N/m}^2$  ist die maximale Bettstabilität erreicht, und es beginnt sich die gesamte Sohle zu bewegen. Die strichlierte Linie zeigt den weiteren Trend des Geschiebetransports (siehe auch Abbildung 32).

Zum Vergleich wurde der Geschiebetrieb für die drei dargestellten Neigungen nach der Formel von MEYER-PETER/MÜLLER (1948) ermittelt. Die dabei berechneten Werte sind um ein vielfaches höher als jene aus dem Modellversuch (siehe Anhang). Das ergibt sich dadurch, dass in der Formel Effekte wie Sortierung und Deckschichtbildung nicht berücksichtigt werden. Die Versuche zeigen demnach die Bedeutung der Deckschichtbildung bei der Durchführung einer Stauraumspülung. Weiters wurde der Geschiebetrieb noch für die einzelnen Korngruppen ( $d_m$  von 0,06 bis 16,0 mm) mit der Formel von MEYER-PETER/MÜLLER ermittelt und anschließend aufaddiert. Die dabei erzielten Ergebnisse sind denen sehr ähnlich, die nur einem mittleren  $d_m$  erzielt wurden (siehe Anhang).

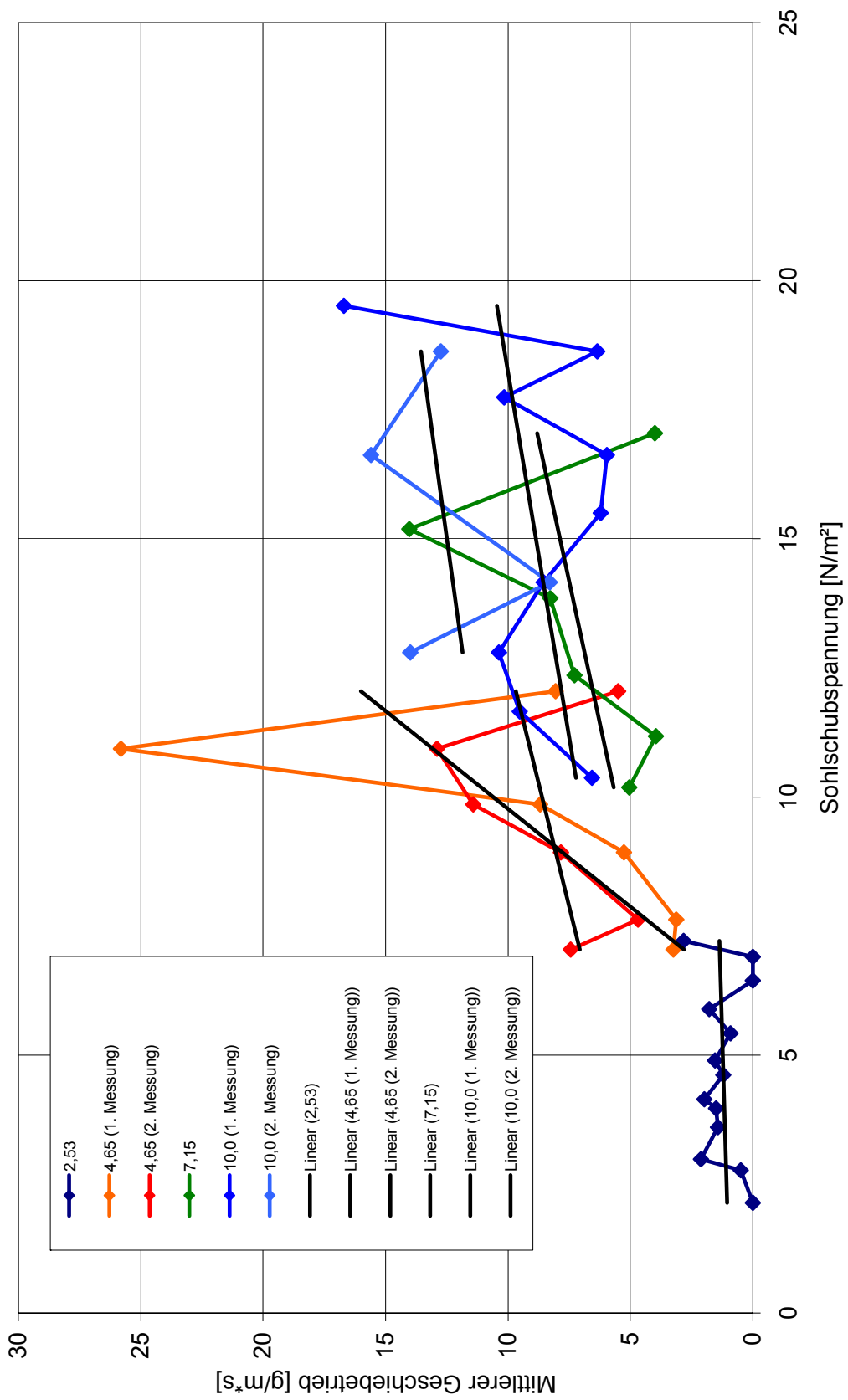


Abbildung 37: Ergebnisse des Geschiebetriebs für alle Versuche

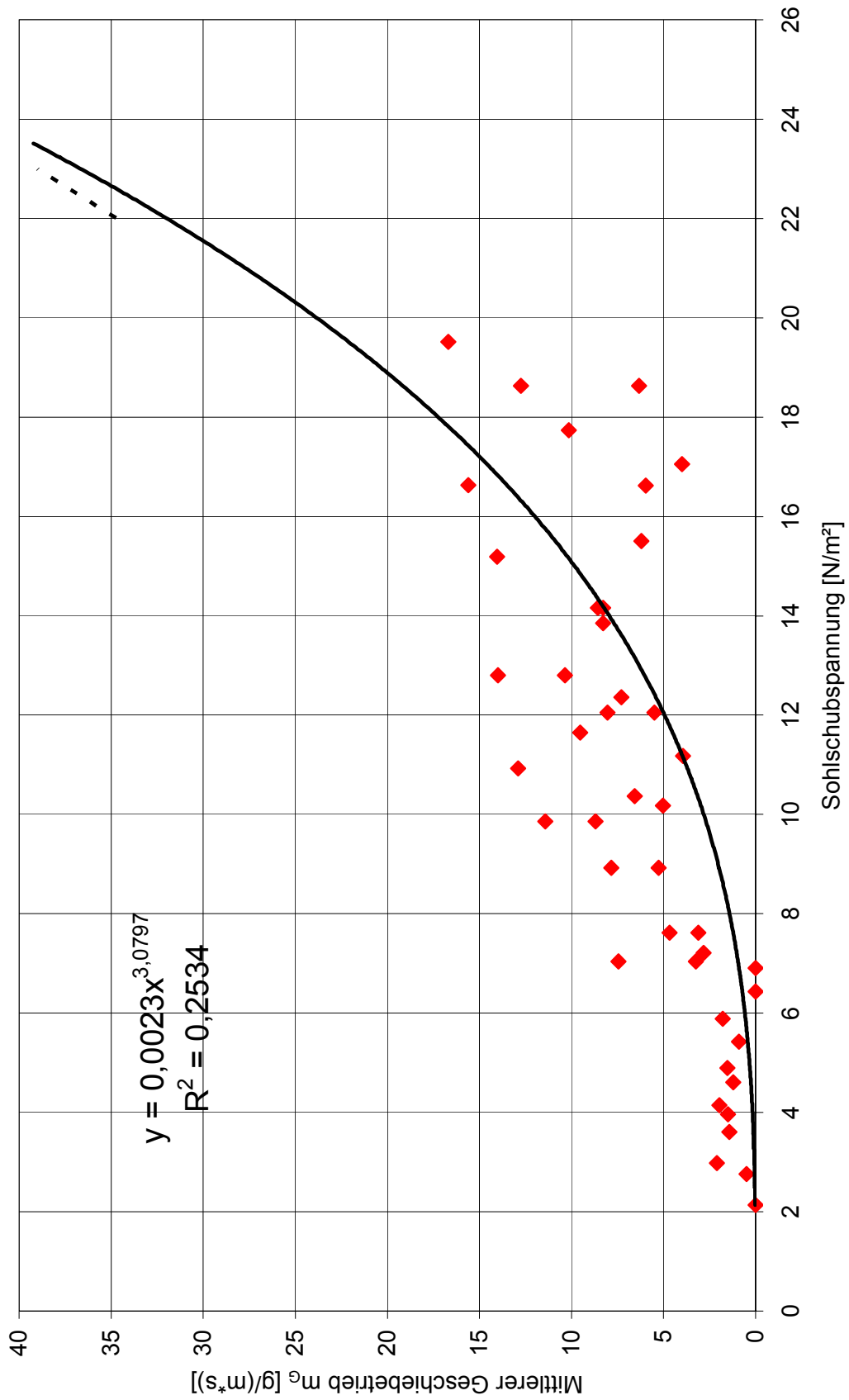


Abbildung 38: Ergebnisse des Geschiebetriebs für alle Versuche mit Trendlinie

### **5.3 Numerische Berechnung**

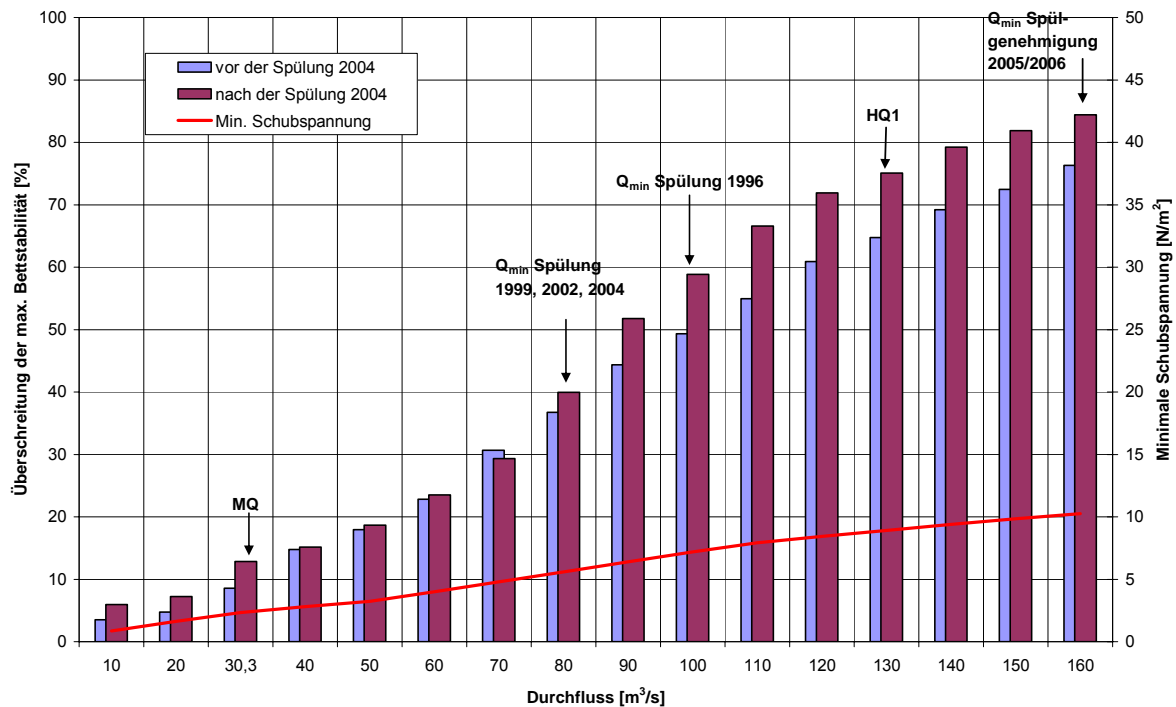
Für die praktische Durchführung einer Stauraumspülung sind nun die tatsächlich auftretenden Schubspannungen von Bedeutung. Aus diesem Grund wurde der Stauraum des KW Bodendorf mittels Echolotung vor und nach der Spülung im Jahr 2004 aufgenommen und ein digitales Geländemodell erstellt. Die dabei entstandenen Sohlprofile im Abstand von 20 m fanden Eingang in eine numerische Berechnung mit dem Programm HEC-RAS, mit dem für verschiedene Abflüsse (von 10 m<sup>3</sup>/s bis 160 m<sup>3</sup>/s) die auftretenden Schubspannungen ermittelt wurden. Dazwischen liegende Sohlprofile wurden im Abstand von 1,0 m linear interpoliert. Das ergab schließlich für den gesamten Stauraum eine Anzahl von 2434 Profilen.

Das Ergebnis der numerischen Berechnungen findet man in Abbildung 39. Sie zeigt, bei wieviel Prozent der 2434 Sohlprofile die maximale Bettstabilität (22 N/m<sup>2</sup>) für einen bestimmten Abfluss bei einem freien Durchfluss am Wehr überschritten wird. Auf der zweiten y-Achse sind die tatsächlich im Stauraum vorkommenden minimalen Schubspannungen aufgetragen (siehe auch Tabelle 11).

Im Wasserrechtsbescheid vom 12.4.1995 wurde ein Mindestwasserabfluss von 100 m<sup>3</sup>/s festgelegt. Für diesen Abfluss weisen zwischen 49 % (vor der Spülung 2004) und 59 % (nach der Spülung 2004) der Querprofile eine mobile Sohle auf. Mit diesem Abfluss wurde im Jahr 1996 der Stauraum gespült.

In den Jahren 1999, 2002 und 2004 wurde mit dem im Wasserrechtsbescheid vom 29.7.1998 vorgeschriebenen Abfluss von 80 m<sup>3</sup>/s gespült. Dabei war zwischen 37 % (vor der Spülung 2004) und 40 % (nach der Spülung 2004) des Stauraums in Bewegung.

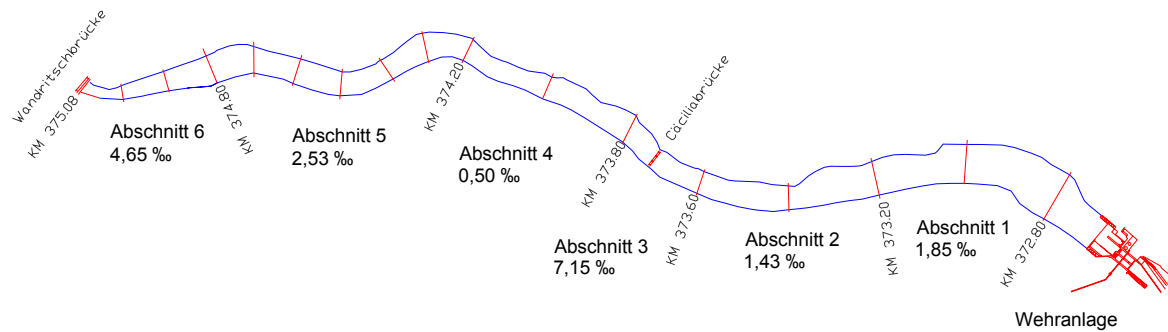
Seit der letzten Spülung im Jahr 2004 fand keine mehr statt. Seit dem 22.3.2005 ist nun der WR-Bescheid in Kraft, der einen Mindestwasserabfluss von 160 m<sup>3</sup>/s vorschreibt. Bei einem solchen Abfluss wären zwischen 75 % (vor der Spülung 2004) und 85 % (nach der Spülung 2004) der Profile in Bewegung.



**Abbildung 39: Ergebnisse der 1D-numerischen Berechnung**

In Tabelle 11 finden sich die minimalen Schubspannungen in den einzelnen Abschnitten. Der Abschnitt 1 beginnt ca. 140 m von der Wehranlage entfernt. Nach Abbildung 37 ist der Bewegungsbeginn von Sand und Feinkies bei einer Schubspannung von ca.  $2,5 \text{ N/m}^2$ . Nimmt man an, dass bei einem  $MQ=30,3 \text{ m}^3/\text{s}$  der Mur ein Freispiegelabfluss am Wehr des Kraftwerks Bodendorf herrscht, wäre im gesamten Stauraum die kritische Schubspannung überschritten. Kleine Sedimentkörner würden sich somit bereits bewegen.

Der sich ebenfalls in Tabelle 11 befindende Kornparameter  $d_{50}$  soll zeigen, welche mittleren Korndurchmesser bei der minimalen Schubspannung bewegt werden. Für die Mindestabflüsse 80, 100 und  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  bedeutet dies, dass der mittlere Durchmesser  $d_{50}$  zwischen 0,9 mm und 1,9 mm liegt. Wichtig ist jedoch darauf hinzuweisen, dass diese minimalen Schubspannungen nur in einzelnen Bereichen auftreten. In anderen Bereichen sind sie viel größer und können damit auch größere Korndurchmesser transportieren. Wie aus Abbildung 39 ersichtlich, werden sogar bei kleinen Abflüssen in einzelnen Bereichen bereits Schubspannungen erreicht, die sogar die maximale Bettstabilität überschreiten lassen.



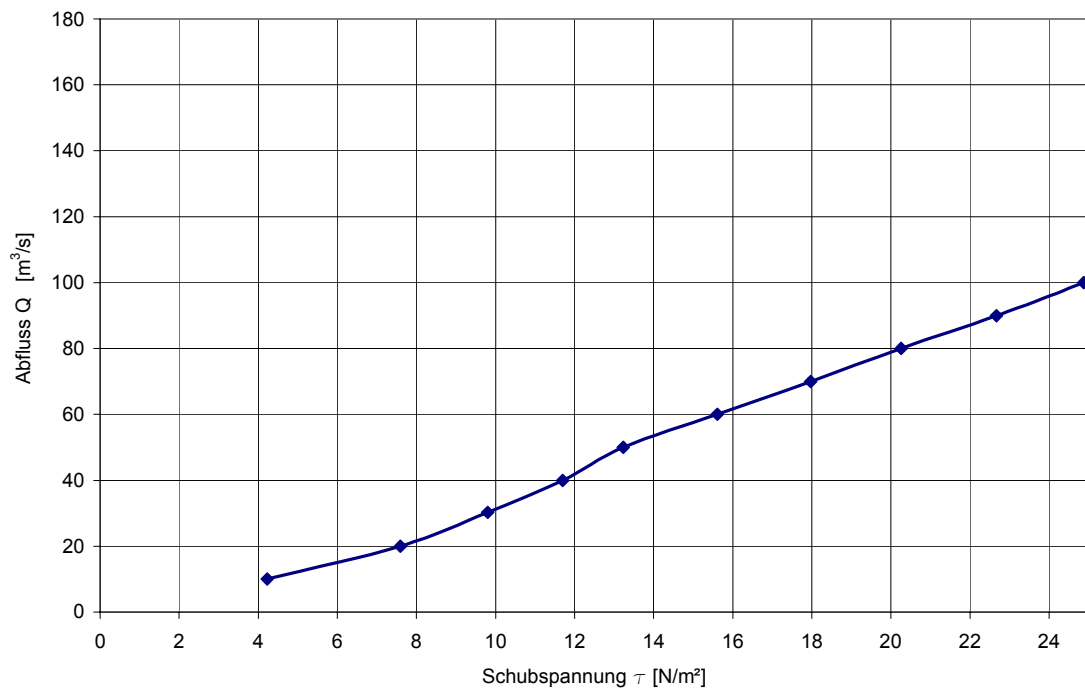
Durchfluss Q [m <sup>3</sup> /s]	Minimale Schubspannung [N/m <sup>2</sup> ]						Gesamter Stauraum	d <sub>50</sub> [mm] für τ <sub>MIN</sub>
	Abschnitt							
	6	5	4	3	2	1		
10	1,28	0,85	0,96	1,63	1,50	2,25	0,85	0,02
20	2,10	1,64	2,32	3,81	2,98	4,59	1,64	0,17
30,3	2,72	2,32	3,78	5,75	4,38	6,90	2,32	0,30
40	3,39	2,81	5,15	7,20	5,63	9,00	2,81	0,40
50	3,95	3,23	6,55	8,60	6,85	10,95	3,23	0,48
60	4,77	4,00	7,91	9,90	8,01	12,45	4,00	0,63
70	5,59	4,79	9,25	11,15	9,14	13,86	4,79	0,78
80	6,38	5,58	10,55	12,36	10,23	15,18	5,58	0,94
90	7,15	6,39	11,64	13,52	11,28	16,45	6,39	1,10
100	7,89	7,19	12,16	14,61	12,28	17,65	7,19	1,25
110	8,63	7,93	12,70	15,67	13,27	18,85	7,93	1,40
120	9,34	8,43	13,14	16,73	14,24	20,00	8,43	1,49
130	10,01	8,91	13,48	17,67	15,15	21,14	8,91	1,59
140	10,67	9,38	13,88	18,58	16,04	22,24	9,38	1,68
150	11,30	9,85	14,39	19,47	16,87	23,31	9,85	1,77
160	11,87	10,26	14,95	20,33	17,69	24,37	10,26	1,85

Tabelle 11: Minimale Schubspannungen in den einzelnen Abschnitten im Stauraum

### Geschiebetransport in der Natur:

Für sieben repräsentative Querprofile im Stauraum wurden mit dem Programm HEC-RAS für verschiedene Abflüsse die zugehörigen Schubspannungen ermittelt. Die Abbildung 40 zeigt als Beispiel das Ergebnis einer solchen Berechnung für das Querprofil bei km 374,93.





**Abbildung 40: Abfluss–Schubspannung–Beziehung für Profil km 374,93**

Im Modellversuch wurde für verschiedene Schubspannungen der zugehörige Geschiebetrieb festgestellt (siehe Zusammenfassung in Abbildung 38). Mit den numerisch berechneten Abfluss-Schubspannung–Beziehungen kann nun ein Bezug zur Natur hergestellt werden. Dies geschieht durch Zusammenfassung der Abbildung 38 und der Abbildung 40 in ein Diagramm. Das Ergebnis für km 374,93 findet sich in Abbildung 41. Somit lässt sich der Geschiebetrieb für jeden beliebigen Abfluss in der Natur durch folgende Vorgangsweise ermitteln (vgl. MEINDL, 2005):

1. Abfluss Natur (Q) wählen
2. Q mit  $Q/\tau$  – Linie schneiden
3. Schnitt mit Geschiebetrieb-Trendlinie
4. Geschiebetrieb für die Natur ablesen

Die Ergebnisdiagramme für die restlichen sechs Querprofile finden sich im Anhang.

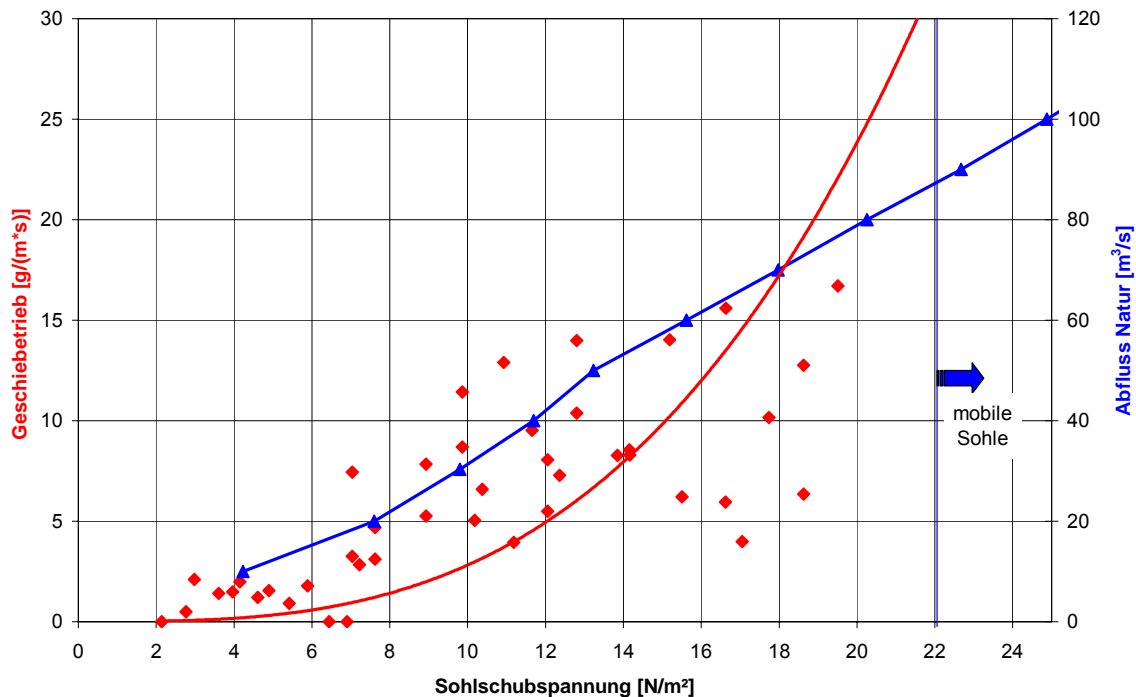


Abbildung 41: Zusammenhang Geschiebetrieb und Abfluss in der Natur für km 374,93

#### 5.4 Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Substratansprüchen von Fischen

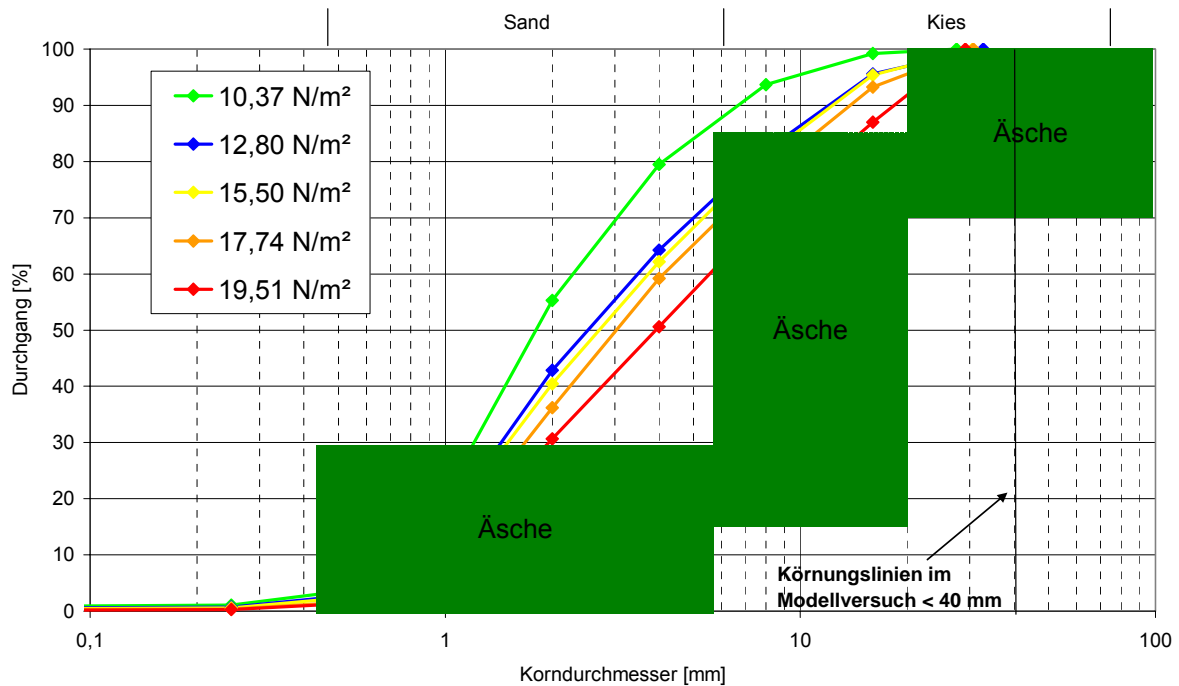
Für die Durchführung einer Stauraumspülung sind nicht nur technische Aspekte sondern auch die Auswirkungen auf die Fischbiozönose von Bedeutung. Da es sich bei den wichtigsten Fischarten der oberen Mur vorwiegend um Kieslaicher handelt, soll sichergestellt sein, dass auch nach einer erfolgten Stauraumspülung den Fischen genügend Laichhabitate zur Verfügung stehen. Für eine Spülung bedeutet das, dass der Wasserabfluss (bzw. Schubspannung) groß genug ist, um auch größere Sedimente transportieren zu können.

Im Speziellen wird in diesem Kapitel auf die Substratansprüche bei Laichhabitaten der wichtigsten Fischarten der oberen Mur eingegangen. Dies sind die Äsche als Leitfischart und die Bachforelle. Es werden dabei die Substratpräferenzen der oben angeführten Fischarten mit dem transportierten Sediment im Modellversuch verglichen.

In den Abbildungen 38 und 39 sind die Körnungslinien des transportierten Geschiebes bei unterschiedlichen Sohlschubspannungen eingetragen. Die schattierten Bereiche kennzeichnen darin die Substratpräferenzen der jeweiligen Fischart. Dort wo sich die schattierten Flächen mit den Körnungslinien überlagern, liegt das transportierte Geschiebe im Bereich der Substratpräferenz. Es wird darauf hingewiesen, dass im Modellversuch Korngrößen über 40 mm ausgesiebt wurden. Für Körnungslinien mit größeren maximalen Korngrößen können daher keine sicheren Aussagen getroffen werden.

### **Äschen:**

Nach GÖNCZI (1989) setzen sich die Äschenlaichhabitate zu 20-30 % aus Sand, 50-70 % Kies (< 2 cm) und 20-30 % Steinen (2-10 cm) zusammen (siehe Abbildung 42); vgl. JUNGWIRTH u.a., 2003). Hier erkennt man, dass sich die bevorzugten Bereiche zum Laichen am meisten überschneiden. Mit fortschreitender Versuchsdauer, das heißt mit zunehmender Erhöhung der Schubspannungen, werden immer mehr Körner bewegt, die von den Äschen als Laichplätze angenommen werden. Für die Kieslaicher, also auch für die Bachforellen, ist es von großer Bedeutung, dass bei zunehmender Sohlschubspannung naturgemäß auch größere Korndurchmesser transportiert werden (siehe auch Kapitel 4.5).



**Abbildung 42: Substratpräferenzen der Äsche**

### Bachforellen:

Die Abbildung 43 zeigt die Körnungslinien des transportierten Geschiebes mit den Substratpräferenzen der Bachforellen. Diese gehören zu den Kieslaichern und haben ein präferiertes Laichsubstrat von ca. 50 mm mittlerer Korngröße. Entscheidender als die durchschnittliche Korngröße ist jedoch der Anteil der Feinsedimente. Diese liegen laut OTTAWAY et al. (1981) für Feinsedimente < 1 mm bei 6-17 % und für Sedimente < 0,8 mm bei 7 % (vgl. JUNGWIRTH u.a., 2003).

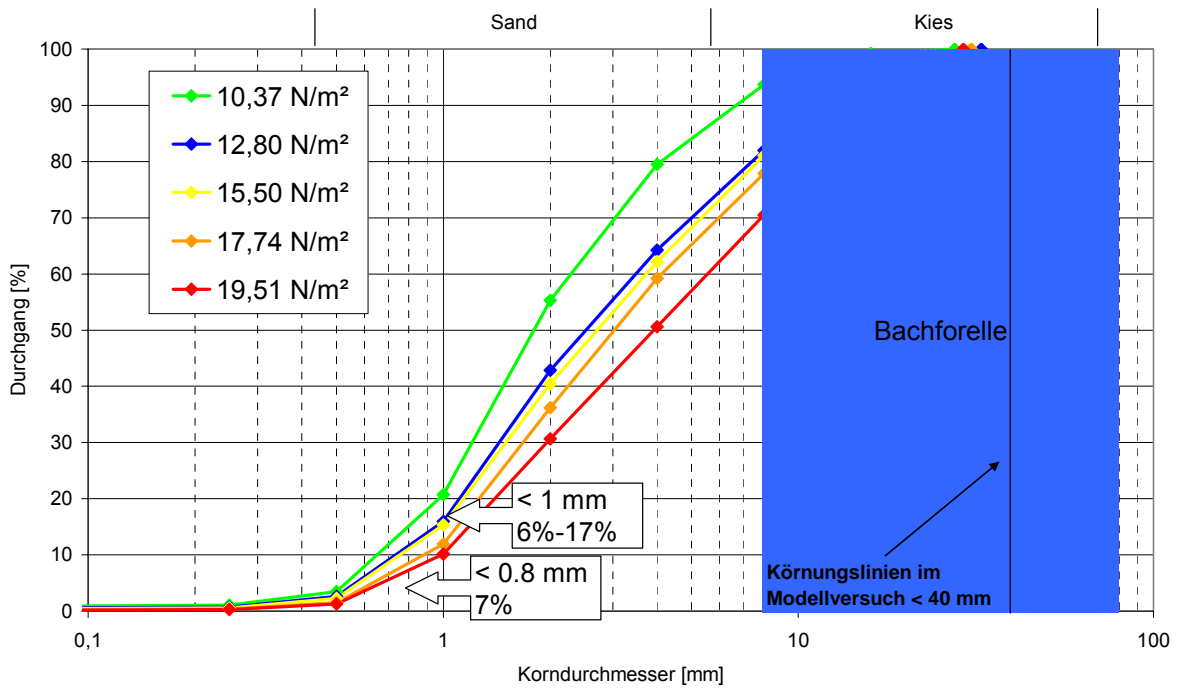


Abbildung 43: Substratpräferenzen der Bachforelle

## 6 Zusammenfassung

Der Modellversuch in einem Glasgerinne wurde im Tieflabor des HERMANN-GRENGG-Laboratoriums am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der TU Graz durchgeführt. Der Modellmaßstab betrug dabei 1:1. Das im Versuch eingebaute Geschiebe aus dem Stauraum des KW Bodendorf sollte die Flusssohle originalgetreu nachbilden. Ein Ziel war letztendlich darüber Aussagen treffen zu können, welche Korngrößen bei einer durchgeführten Stauraumpülung tatsächlich transportiert werden und in welchen Abschnitten die Sohle bei unterschiedlichen Abflüssen „mobil“ wird.

Ein wichtiger Bestandteil der Untersuchungen im Rahmen des Modellversuchs für das Kraftwerk Bodendorf waren die Schubspannungsermittlungen. Die dabei erzielten Ergebnisse mit Hilfe von Geschwindigkeits- und Turbulenzmessungen waren nicht aussagekräftig. Weiterführende Messungen mit einem veränderten Versuchsaufbau mit einem automatisch gesteuerten Messgerät wären hier sicherlich notwendig. Es wäre damit die Möglichkeit gegeben, die Daten zu verdichten und die Aussagekraft der Ergebnisse zu vergrößern. Die für die Auswertung des Geschiebetransports angegebenen Schubspannungen waren daher jene aus den Berechnungen nach der Formel von GEHRIG.

Der durchgeführte Modellversuch hatte letztendlich das Ziel, Aussagen über den Geschiebetransport im Stauraum des Kraftwerks Bodendorf während des Spülablaufs treffen zu können. Bei der Betrachtung der Ergebnisse des Geschiebetransports ist der große Einfluss der Sohlvergrößerung sehr klar ersichtlich. Die Sohle beginnt sich nach Austrag kleinerer Körner immer wieder zu stabilisieren, es bildet sich also eine Deckschicht. Diese reißt bei einer Erhöhung der Schubspannung zeitweise auf, um sich anschließend wieder zu stabilisieren. Die Versuche haben gezeigt, dass bei einer Schubspannung von  $22 \text{ N/m}^2$  die Deckschicht endgültig aufreißt und damit die gesamte Sohle in Bewegung gerät. Man spricht von einem Überschreiten der maximalen Bettstabilität. Eine rechnerische Ermittlung der kritischen Sohlschubspannung (Bewegungsbeginn) für das im Modellversuch verwendete Geschiebe hat ergeben, dass diese im Bereich von  $1,7 \text{ N/m}^2$  bis  $3,3 \text{ N/m}^2$  liegt, je nach dem wie groß der SHIELDS-Parameter gewählt wird (von 0,03 bei ruhender Sohle bis zu 0,06 bei bereits bewegter Sohle). Im Modellversuch wurde der Bewegungsbeginn bei einer Sohlschubspannung von

2,5 N/m<sup>2</sup> festgestellt. Das ergibt eine gute Übereinstimmung zwischen dem errechneten und dem im Modellversuch ermittelten Wert.

Um einen Bezug zur Natur herzustellen, wurden mit den Daten aus Echolotvermessungen des Stauraums numerische Berechnungen der Schubspannungen durchgeführt. Die Berechnungen haben ergeben, dass diese kritische Schubspannung bereits bei dem MQ von 30,3 m<sup>3</sup>/s bei einem angenommenen Freispiegelabfluss am Wehr überschritten wird. Feinkies und Sand sind bei diesem Abfluss im gesamten Stauraum in Bewegung. Es hat sich weiters ergeben, dass bei einer Wassermenge von 160 m<sup>3</sup>/s, der Mindestwassermenge laut derzeit gültigem Wasserrechtsbescheid, in bis zu 85 % des Stauraums die maximale Bettstabilität überschritten wird.

Zum Abschluss wurden noch mögliche Auswirkungen einer Stauraumspülung auf die Fischfauna unterhalb des Stauraums Bodendorf untersucht. Genauer gesagt, ging es dabei um bevorzugten Substratansprüche der Fischarten Äsche und Bachforelle. Diese Fischarten bevorzugen vor allem Kies für ihre Laichplätze. Von Bedeutung ist daher, dass bei einer Stauraumspülung der Transport größerer Kornfraktionen sichergestellt wird, wozu ein genügend großer Abfluss notwendig ist. Bei der derzeit gültigen Mindestwassermenge von 160 m<sup>3</sup>/s und den damit verbundenen hohen Schubspannungen scheint ein genügend großer Kiestransport gegeben zu sein.

## 7 Literatur

- [1] BECHTELER, W.: „Feststofftransport“, Vorlesungsskriptum 2004, Universität der Bundeswehr München
- [2] BOLLRICH, G.: „Technische Hydromechanik 1“, Verlag Bauwesen Berlin 1996
- [3] DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (DVWK): „Geschiebemessungen“, Verlag Paul Parey Hamburg und Berlin 1992
- [4] DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (DVWK): Nr. 118, 1997
- [5] ExploreV Software Manual, Version 1.5, Nortek, Norway, 2000
- [6] JUNGWIRTH, M. u.a.: „Angewandte Fischökologie an Fließgewässern“, Facultas Verlags- und Buchhandels AG 2003
- [7] MEINDL, C.: „Bestimmung der hydraulischen Parameter für die Stauraumpülung des KW Bodendorf, Diplomarbeit an der TU Graz 2005
- [8] Vectrino Velocimeter User Guide, Nortek, Norway, 2004
- [9] ZANKE, U.: „Grundlagen der Sedimentbewegung“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1982



## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Abkürzungsverzeichnis

Q	[m <sup>3</sup> /s]	Wasserabfluss
Q <sub>min</sub>	[m <sup>3</sup> /s]	Mindestabfluss
MQ	[m <sup>3</sup> /s]	Mittlerer Durchfluss
HQ1	[m <sup>3</sup> /s]	1-jähriges Hochwasser
I	[-]	Gefälle
I <sub>SOHLE</sub>	[-]	Sohlgefälle
I <sub>WSP</sub>	[-]	Wasserspiegelgefälle
$\tau$	[N/m <sup>2</sup> ]	Schubspannung
$\tau_{cr}$	[N/m <sup>2</sup> ]	kritische Schubspannung
v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit
v <sub>m</sub>	[m/s]	mittlere Geschwindigkeit
v <sub>0</sub> <sup>*</sup>	[m/s]	Schubspannungsgeschwindigkeit
v <sub>s</sub>	[m/s]	Geschwindigkeit in Fließrichtung
v <sub>n</sub>	[m/s]	Geschwindigkeit quer zur Fließrichtung
d	[mm]	Korndurchmesser
d <sub>ch</sub>	[mm]	charakteristischer Korndurchmesser
d <sub>m</sub>	[mm]	mittlerer Korndurchmesser
$\rho'$	[-]	relative Feststoffdichte

---

$\rho_F$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Feststoffdichte
$\rho_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Wassers
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$R$	[m]	hydraulischer Radius ( $R=A/U$ )
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Fließquerschnitt
$U$	[m]	benetzter Umfang
$k_s$	[mm]	Rauigkeit der Sohle
$k_m$	[mm]	mittlere Rauigkeit von Sohle und Wand
$\lambda_s$	[-]	Reibungsbeiwert der Sohle
$Fr$	[-]	Froude-Zahl
$Fr^*$	[-]	Feststoff-Froude-Zahl
$Re$	[-]	Reynolds-Zahl
$Re^*$	[-]	Feststoff-Reynolds-Zahl
$m_G$	[g/(m*s)]	Geschiebetrieb, $m$ bezeichnet die Breite des Gerinnes
$\Theta_{cr}$	[-]	SHIELDS-Paramter für den Bewegungsbeginn

## 8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: KW Bodendorf nach Fertigstellung (Quelle: Verbund-Austrian Hydro Power AG) .....	1
Abbildung 2: Kräfte am Flüssigkeitselement .....	5
Abbildung 3: Bewegungsbeginn nach SHIELDS (1936) mit Angabe des Bewegungsrisikos R nach ZANKE (1982) .....	6
Abbildung 4: Turbulente Schwankung der Geschwindigkeit (Quelle: „Technische Hydromechanik 1“, BOLLRICH).....	10
Abbildung 5: Logarithmische Geschwindigkeitsverteilung .....	11
Abbildung 6: Entnahme des Sediments aus dem Stauraum.....	13
Abbildung 7: Lageplan des Stauraums .....	14
Abbildung 8: Körnungslinie des Geschiebes (original und < 40 mm) .....	14
Abbildung 9: Glasgerinne mit Geschwindigkeitsmessgerät Vectrino+.....	15
Abbildung 10: Linearer Zusammenhang Spannung - Gewicht .....	16
Abbildung 11: Glasgerinne mit Absaugschlauch und (rotem) Auffangbehälter (links).....	17
Abbildung 12: Versuchsaufbau der Phase 1 (links) und Phase 2 (rechts).....	19
Abbildung 13: Versuchsaufbau der Phase 3.....	20
Abbildung 14: Abschnitte im Stauraum mit verschiedenen Neigungen .....	21
Abbildung 15: Geschiebegewicht unter Auftrieb in Abhängigkeit von der Versuchsdauer .....	24
Abbildung 16: Summenlinie des transportierten Geschiebes unter Auftrieb.....	25
Abbildung 17: Korrektur des Gewichtsverlaufs .....	27
Abbildung 18: Screenshot der Vectrino+ - Software .....	28
Abbildung 19: Körnungslinie des Geschiebes (d < 40 mm) .....	30
Abbildung 20: Schubspannungsermittlung nach GEHRIG und GESSLER .....	31
Abbildung 21: Schubspannungsermittlung durch Turbulenzmessung.....	32
Abbildung 22: Schubspannungsermittlung aus log. Geschwindigkeitsprofilen .....	33
Abbildung 23: Geschwindigkeitsprofile bei der Neigung 4,65 ‰ .....	34
Abbildung 24: Vergleich der Schubspannungsermittlung mit der numerischen Berechnung .....	35
Abbildung 25: Geschiebetransport bei Schubspannung von 2,14 bis 7,20 N/m <sup>2</sup> (I=2,53 ‰) .....	36
Abbildung 26: Geschiebetransport bei Schubspannung von 7,04 bis 12,05 N/m <sup>2</sup> (I=4,65 ‰) .....	37
Abbildung 27: Geschiebetransport bei Schubspannung von 7,04 bis 12,05 N/m <sup>2</sup> (I=4,65 ‰, 2. Messung).....	38
Abbildung 28: Körnungslinie der Deckschicht.....	39
Abbildung 29: Geschiebetransport bei Schubspannung von 10,18 bis 17,05 N/m <sup>2</sup> (I=7,15 ‰) .....	40
Abbildung 30: Geschiebetransport bei Schubspannung von 8,90 bis 22,10 N/m <sup>2</sup> (I=10,0 ‰) .....	41
Abbildung 31: Geschiebetransport bei Schubspannung von 12,80 bis 20,10 N/m <sup>2</sup> (I=10,0 ‰) .....	42
Abbildung 32: Maximale Bettstabilität und mobile Sohle (I=10,0 ‰) .....	43
Abbildung 33: Körnungslinien des transportierten Geschiebes .....	44
Abbildung 34: Geschiebekennzahlen in Abhängigkeit von den Schubspannungen.....	45
Abbildung 35: Relative Neigungen der Sohle und des Wasserspiegels, I=4,65 ‰, Q=80 l/s.....	47
Abbildung 36: Absolute Neigungen der Sohle und des Wasserspiegels, I=4,65 ‰, Q=80 l/s.....	48
Abbildung 37: Ergebnisse des Geschiebetriebs für alle Versuche .....	52

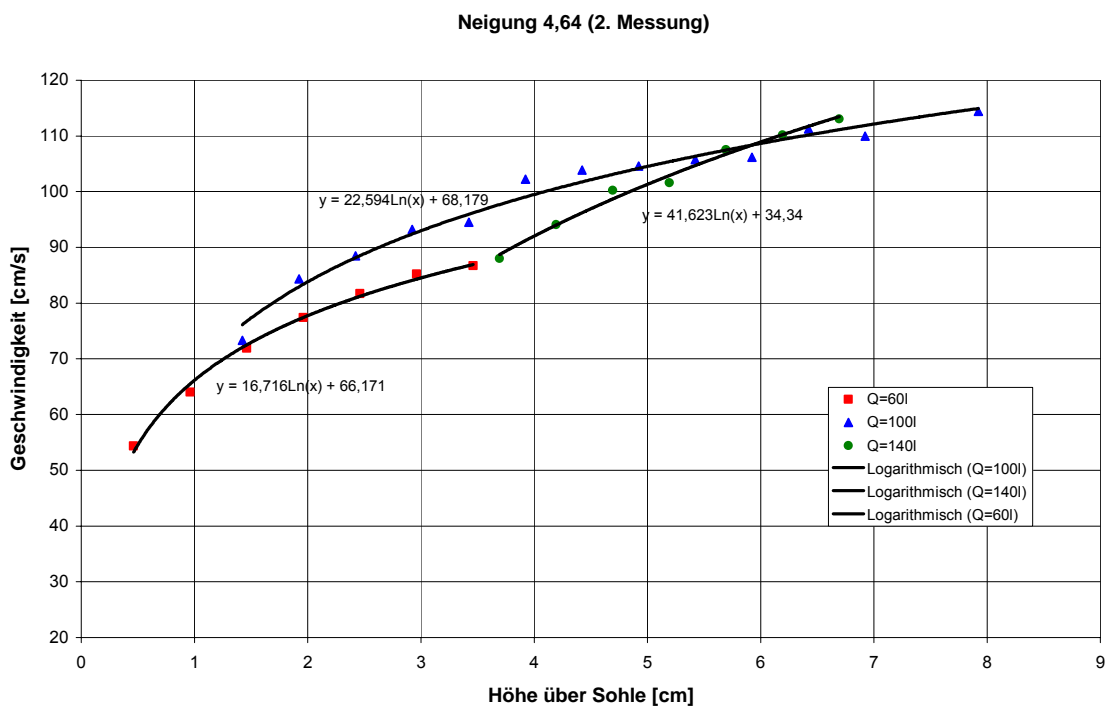
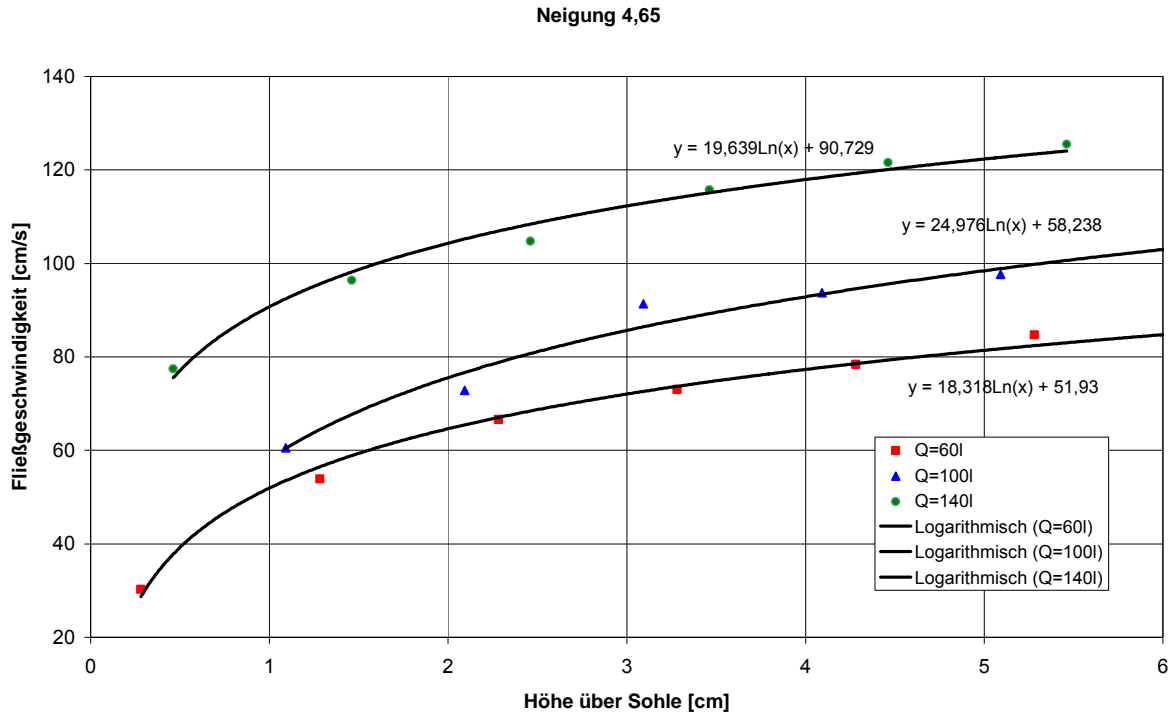
<i>Abbildung 38: Ergebnisse des Geschiebetriebes für alle Versuche mit Trendlinie.....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 39: Ergebnisse der 1D-numerischen Berechnung .....</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 40: Abfluss–Schubspannung–Beziehung für Profil km 374,93.....</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 41: Zusammenhang Geschiebetrieb und Abfluss in der Natur für km 374,93.....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 42: Substratpräferenzen der Äsche.....</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 43: Substratpräferenzen der Bachforelle .....</i>	<i>61</i>

### **8.3 Tabellenverzeichnis**

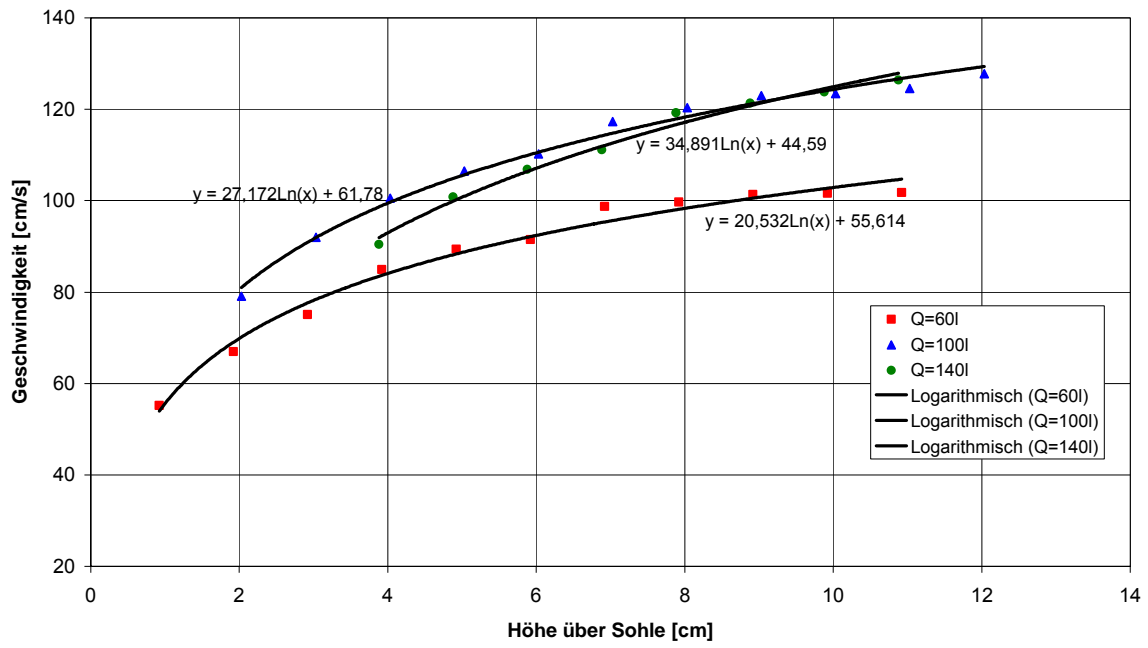
<i>Tabelle 1: Mindestwassermengen laut Wasserrechtsbescheiden .....</i>	<i>2</i>
<i>Tabelle 2: Kennzahlen für das Geschiebe &lt; 40 mm .....</i>	<i>15</i>
<i>Tabelle 3: Überblick über die 1. Phase .....</i>	<i>21</i>
<i>Tabelle 4: Überblick über die 2. Phase .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 5: Überblick über die 3. Phase .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 6: Dichtebestimmung des Sediments.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 7: Vergleich der Massen des transportierten Sediments.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 8: Zusammenfassung der durchgeführten Auswertungen .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 9: Vergleich der Geschiebeparameter.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabelle 10: Sohlneigungen und Wasserspiegelneigungen aller Phasen des Versuchs (1., 2. und 3. Phase) .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabelle 11: Minimale Schubspannungen in den einzelnen Abschnitten im Stauraum .....</i>	<i>56</i>

# 9 Anhang

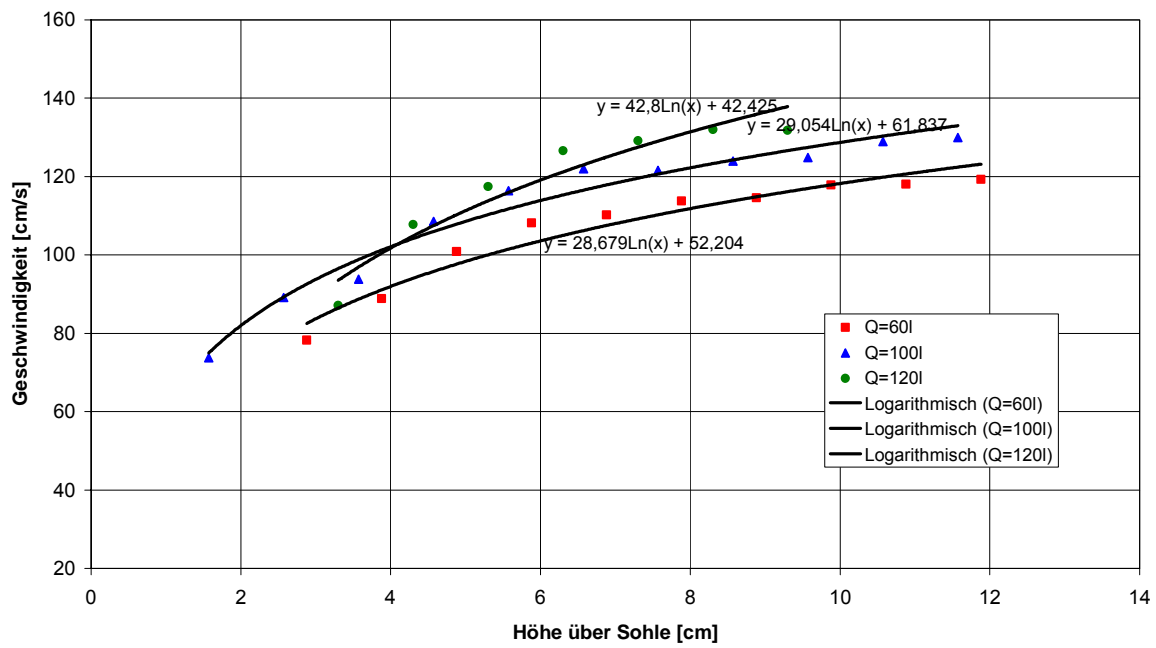
## 9.1 Geschwindigkeitsprofile



Neigung 7,15



Neigung 10,0

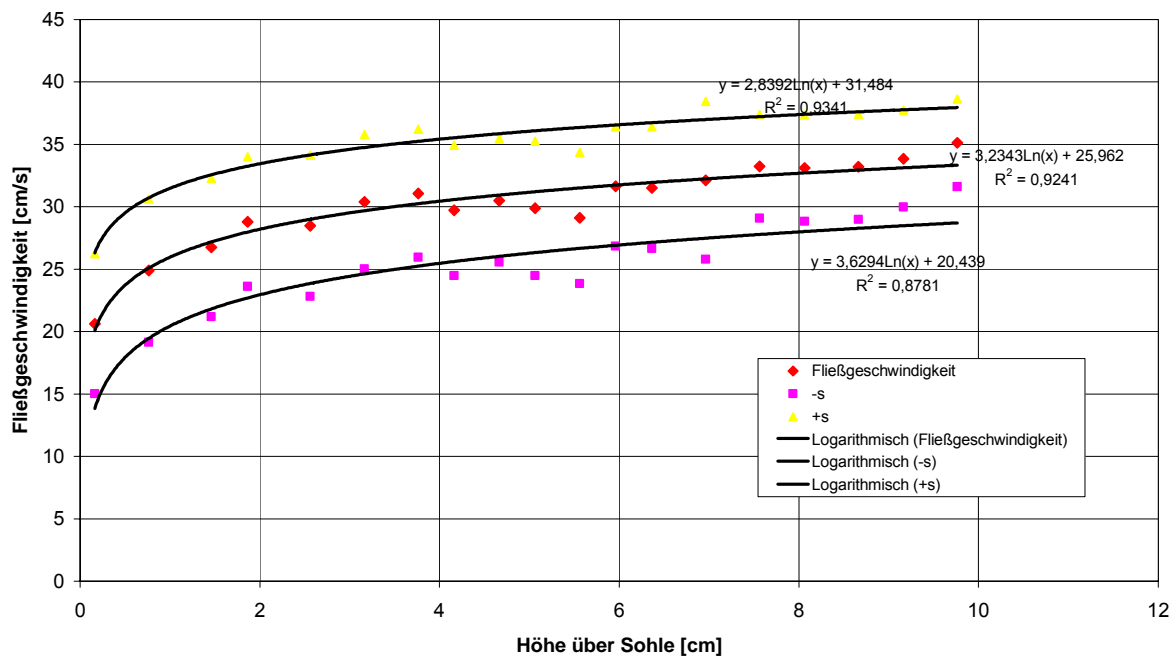


## 9.2 Vergleichsmessung

### 9.2.1 Profil Nr. 1, 100 Hz

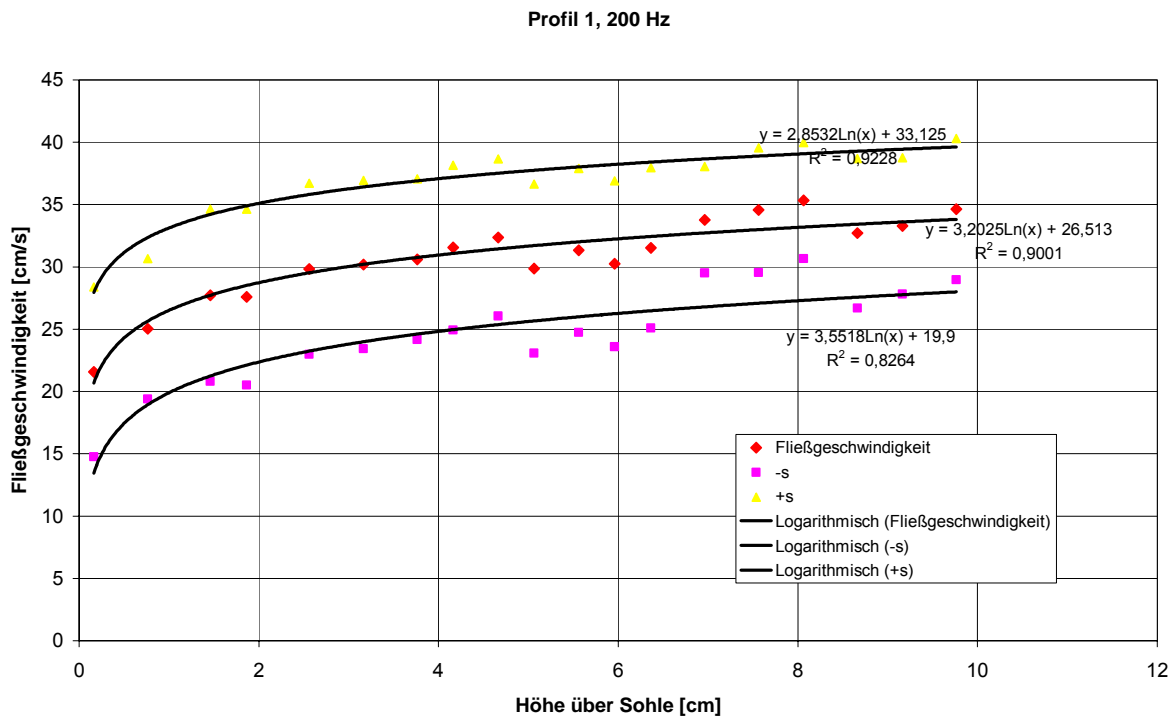
Höhe über der Sohle [cm]	s (-)	Geschwindigkeit [cm/sek]	s (+)	Schubspannung [N/m <sup>2</sup> ]	u'v'
0,16	15,03	20,63	26,23	0,17	1,88
0,76	19,16	24,89	30,62		0,44
1,46	21,20	26,74	32,28		
1,86	23,61	28,81	34,01		
2,56	22,83	28,49	34,15		
3,16	25,03	30,41	35,79		
3,76	25,94	31,07	36,20		
4,16	24,49	29,71	34,93		
4,66	25,56	30,50	35,44		
5,06	24,48	29,87	35,26		
5,56	23,83	29,10	34,37		
5,96	26,84	31,63	36,42		
6,36	26,64	31,52	36,40		
6,96	25,80	32,12	38,44		
7,56	29,09	33,25	37,41		
8,06	28,84	33,10	37,36		
8,66	28,98	33,20	37,42		
9,16	29,99	33,86	37,73		
9,76	31,61	35,13	38,65		
	29,15		36,49		
	26,89		35,93		
	20,32		34,88		

Profil 1, 100 Hz



### 9.2.2 Profil Nr. 1, 200 Hz

Höhe über der Sohle [cm]	s (-)	Geschwindigkeit [cm/sek]	s (+)	Schubspannung [N/m <sup>2</sup> ]	u'v'
0,16	14,76	21,58	28,40	0,16	0,02
0,76	19,40	25,03	30,66		0,41
1,46	20,80	27,72	34,64		
1,86	20,53	27,58	34,63		
2,56	22,96	29,84	36,72		
3,16	23,43	30,18	36,93		
3,76	24,16	30,61	37,06		
4,16	24,94	31,55	38,16		
4,66	26,07	32,36	38,65		
5,06	23,09	29,87	36,65		
5,56	24,74	31,32	37,90		
5,96	23,60	30,25	36,90		
6,36	25,10	31,52	37,94		
6,96	29,51	33,78	38,05		
7,56	29,56	34,56	39,56		
8,06	30,68	35,32	39,96		
8,66	26,69	32,70	38,71		
9,16	27,82	33,29	38,76		
9,76	28,98	34,64	40,30		
	27,13		37,69		
	27,59		38,63		
	18,48		38,38		

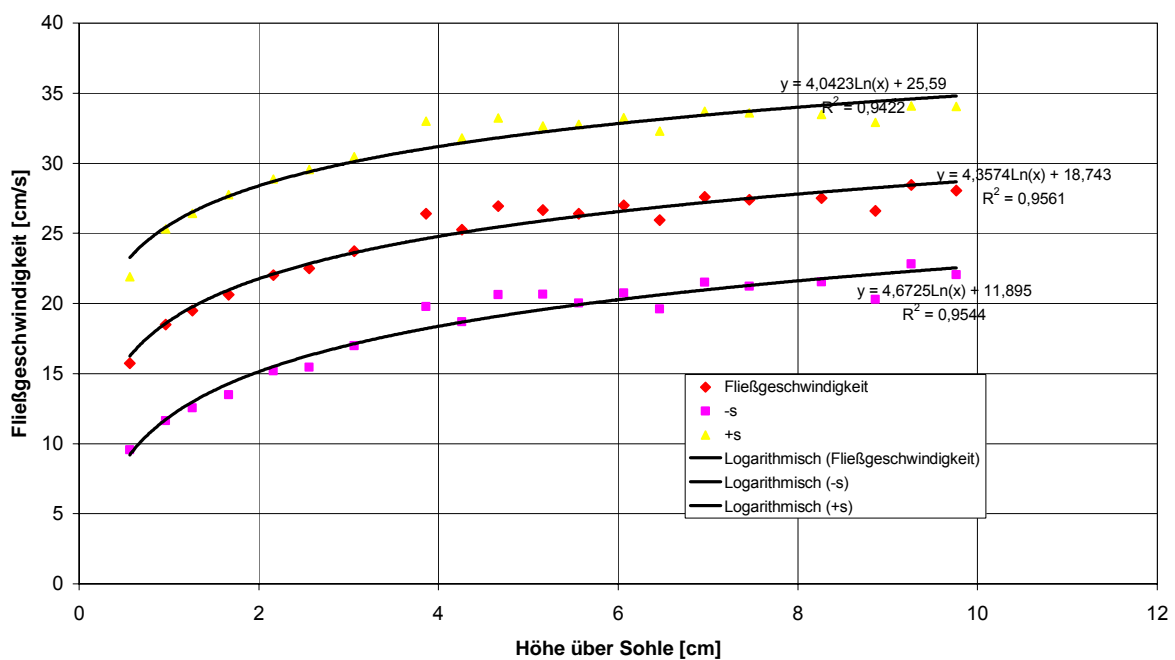




### 9.2.3 Profil Nr.2, 100 Hz

Höhe über der Sohle [cm]	s (-)	Geschwindigkeit [cm/sek]	s (+)	Schubspannung [N/m <sup>2</sup> ]	u'v'
0,56	9,57	15,74	21,91	0,30	1,91
0,96	11,65	18,49	25,33		
1,26	12,55	19,49	26,43		
1,66	13,50	20,63	27,76		
2,16	15,19	22,03	28,87		
2,56	15,45	22,50	29,55		
3,06	16,99	23,73	30,47		
3,86	19,77	26,39	33,01		
4,26	18,69	25,25	31,81		
4,66	20,64	26,93	33,22		
5,16	20,66	26,66	32,66		
5,56	20,02	26,39	32,76		
6,06	20,73	27,00	33,27		
6,46	19,59	25,94	32,29		
6,96	21,52	27,61	33,70		
7,46	21,21	27,41	33,61		
8,26	21,53	27,51	33,49		
8,86	20,29	26,61	32,93		
9,26	22,83	28,45	34,07		
9,76	22,03	28,05	34,07		
	22,43		34,41		
	21,62		33,88		
	21,41		34,41		

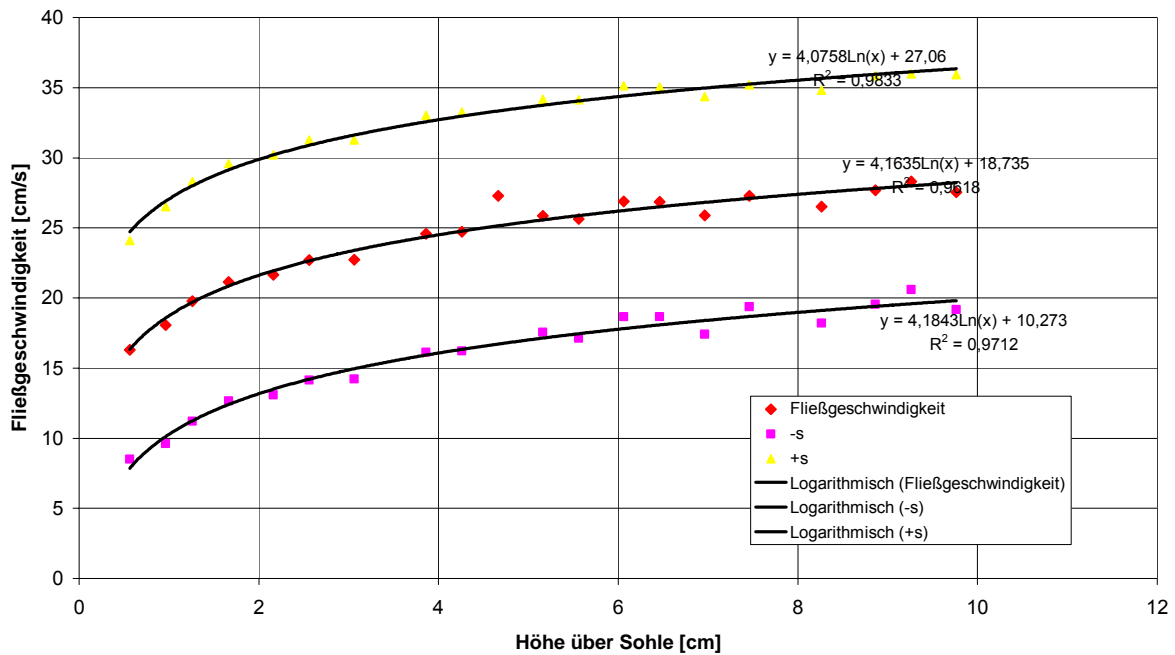
Profil 2, 100 Hz



### 9.2.4 Profil Nr. 2, 200 Hz

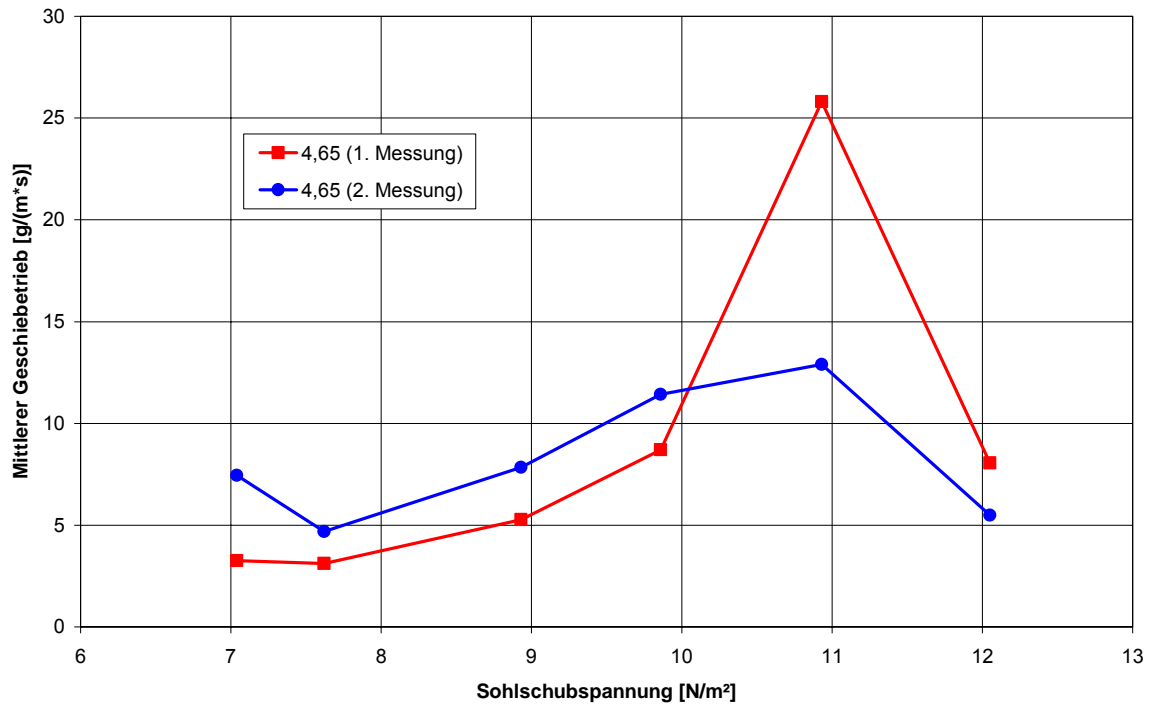
Höhe über der Sohle [cm]	s (-)	Geschwindigkeit [cm/sek]	s (+)	Schubspannung [N/m <sup>2</sup> ]	u'v'
0,56	8,49	16,29	24,09	0,28	2,81
0,96	9,61	18,07	26,53		
1,26	11,21	19,76	28,31		
1,66	12,66	21,13	29,60		
2,16	13,08	21,65	30,22		
2,56	14,13	22,69	31,25		
3,06	14,23	22,74	31,25		
3,86	16,12	24,58	33,04		
4,26	16,20	24,73	33,26		
4,66		27,29			
5,16	17,54	25,86	34,18		
5,56	17,14	25,64	34,14		
6,06	18,65	26,89	35,13		
6,46	18,66	26,85	35,04		
6,96	17,41	25,89	34,37		
7,46	19,38	27,29	35,20		
8,26	18,21	26,52	34,83		
8,86	19,53	27,69	35,85		
9,26	20,60	28,30	36,00		
9,76	19,16	27,54	35,92		
	20,11		36,43		
	20,56		36,46		
	18,88		37,06		

Profil 2, 200 Hz

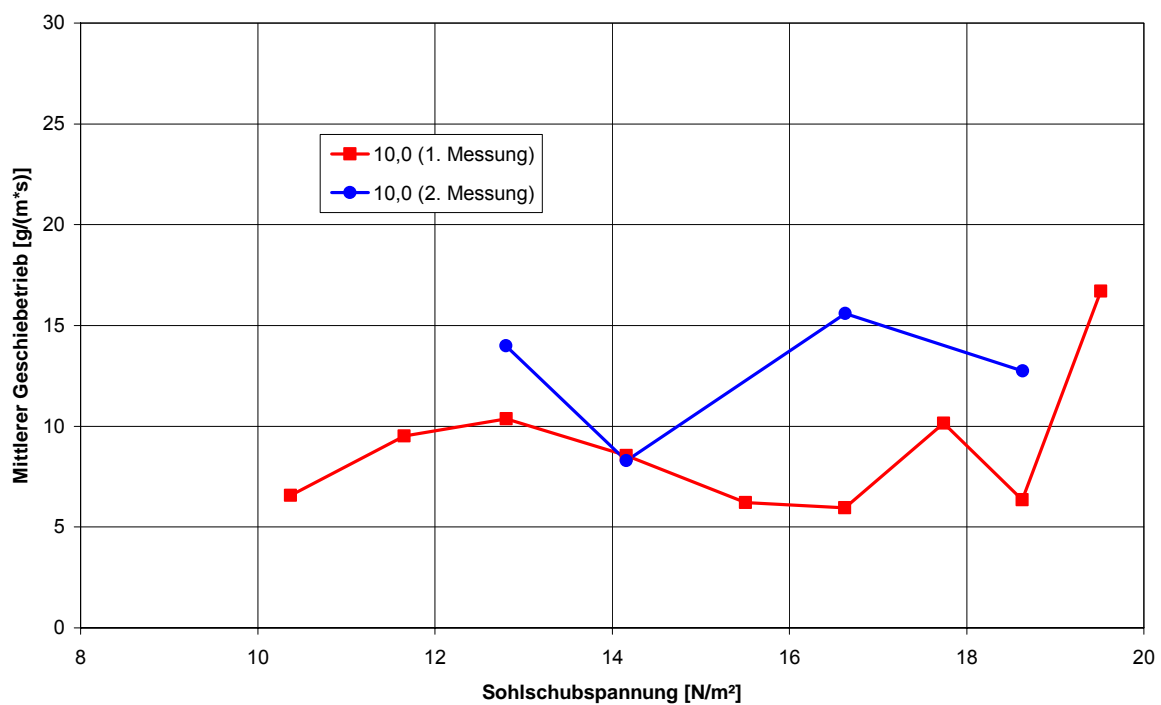


## 9.3 Geschiebetransport

### 9.3.1 Vergleich der 1. und 2. Messung bei der Neigung 4,65 ‰



### 9.3.2 Vergleich der 1. und 2. Messung bei der Neigung 10,0 ‰



### 9.3.3 Berechnung des Geschiebetriebs nach MEYER-PETER/MÜLLER

Anmerkungen zu den Ergebnistabellen für die Berechnungen nach MEYER-PETER/MÜLLER (MPM):

Spalte 1: Dichte der im Versuch verwendeten Körner

Spalte 2: Dichte des Wassers

Spalte 3: Mittlerer Korndurchmesser (in Zeile 1:  $d_m$  für gesamte Körnungslinie; restliche Zeilen:  $d_m$  für einzelne Korngruppen – 0,06 mm bis 16 mm)

Spalte 4: Aktuelle Schubspannung nach GEHRIG für bestimmte Neigung und Abfluss

Spalte 5: Ergebnis der kritischen Schubspannung für ein bestimmtes  $d_m$  (mittlerer Korndurchmesser)

Spalte 6 und 7: Ergebnis des Geschiebetriebs nach MPM

Spalte 8: Massenanteil der einzelnen Korngruppen

Spalte 9: Ergebnis des Geschiebetriebs der einzelnen Korngruppen entsprechend des Massenanteils der gesamten Körnung

Spalte 10: Summe der Ergebnisse aus Spalte 9

Bei Kornfraktionen, bei denen die aktuelle Schubspannung kleiner als jene der kritischen Schubspannung ist, befindet sich die Anmerkung „Körner nicht in Bewegung“.

Formel für den Geschiebetrieb nach MPM (BECHTELER, 2004):

$$m_G = \frac{\rho_F}{\rho_F - \rho_W} \cdot \frac{8}{g} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho_W}} \cdot [\rho_W \cdot g \cdot \mu \cdot I \cdot R_S - 0,047 \cdot \rho' \cdot \rho_W \cdot g \cdot d_m]^{3/2} \quad [\text{kg/ms}] \quad \text{mit}$$

$$\tau_{ac} = \rho_W \cdot g \cdot \mu \cdot I \cdot R_S \quad \text{und} \quad \tau_{cr} = 0,047 \cdot \rho' \cdot \rho_W \cdot g \cdot d_m$$

- Neigung: 2,53%

$\rho_F$	$\rho_W$	$d_m$	$\tau_{ac}$	$\tau_{cr}$	$m_g$ [kg/m <sup>3</sup> s]	$m_g$ [g/m <sup>3</sup> s]	Massen-Anteil (%)	$m_g$ [kg/m <sup>3</sup> s]	Summe Kornfraktionen [kg/m <sup>3</sup> s]
2568	1000	3,63	2,98	1,68	0,039	39,29			0,042
2568	1000	0,06	2,98	0,03	0,134	133,60	3,9	0,005	
2568	1000	0,25	2,98	0,12	0,128	127,78	1,7	0,002	
2568	1000	0,50	2,98	0,23	0,120	120,14	1,7	0,002	
2568	1000	1,00	2,98	0,46	0,105	105,34	10,3	0,011	
2568	1000	2,00	2,98	0,92	0,078	77,76	20,2	0,016	
2568	1000	4,00	2,98	1,85	0,032	31,83	19,1	0,006	
2568	1000	8,00	2,98	3,69	#ZAHL!	#ZAHL!	17,7	#ZAHL!	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	16,00	2,98	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	3,63	3,60	1,68	0,070	70,39			0,063
2568	1000	0,06	3,60	0,03	0,178	177,85	3,9	0,007	
2568	1000	0,25	3,60	0,12	0,171	171,44	1,7	0,003	
2568	1000	0,50	3,60	0,23	0,163	163,00	1,7	0,003	
2568	1000	1,00	3,60	0,46	0,147	146,54	10,3	0,015	
2568	1000	2,00	3,60	0,92	0,115	115,44	20,2	0,023	
2568	1000	4,00	3,60	1,85	0,061	61,23	19,1	0,012	
2568	1000	8,00	3,60	3,69	#ZAHL!	#ZAHL!	17,7	#ZAHL!	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	16,00	3,60	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	3,63	3,96	1,68	0,091	91,03			0,077
2568	1000	0,06	3,96	0,03	0,205	205,41	3,9	0,008	
2568	1000	0,25	3,96	0,12	0,199	198,68	1,7	0,003	
2568	1000	0,50	3,96	0,23	0,190	189,81	1,7	0,003	
2568	1000	1,00	3,96	0,46	0,172	172,47	10,3	0,018	
2568	1000	2,00	3,96	0,92	0,139	139,49	20,2	0,028	
2568	1000	4,00	3,96	1,85	0,081	81,02	19,1	0,015	
2568	1000	8,00	3,96	3,69	0,004	3,66	17,7	0,001	
2568	1000	16,00	3,96	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	3,63	4,14	1,68	0,102	101,99			0,084
2568	1000	0,06	4,14	0,03	0,220	219,68	3,9	0,008	
2568	1000	0,25	4,14	0,12	0,213	212,80	1,7	0,004	
2568	1000	0,50	4,14	0,23	0,204	203,71	1,7	0,003	
2568	1000	1,00	4,14	0,46	0,186	185,95	10,3	0,019	
2568	1000	2,00	4,14	0,92	0,152	152,08	20,2	0,031	
2568	1000	4,00	4,14	1,85	0,092	91,58	19,1	0,018	
2568	1000	8,00	4,14	3,69	0,008	7,91	17,7	0,001	
2568	1000	16,00	4,14	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	3,63	4,61	1,68	0,133	132,51			0,106
2568	1000	0,06	4,61	0,03	0,258	258,41	3,9	0,010	
2568	1000	0,25	4,61	0,12	0,251	251,14	1,7	0,004	
2568	1000	0,50	4,61	0,23	0,242	241,53	1,7	0,004	
2568	1000	1,00	4,61	0,46	0,223	222,70	10,3	0,023	
2568	1000	2,00	4,61	0,92	0,187	186,59	20,2	0,038	
2568	1000	4,00	4,61	1,85	0,121	121,12	19,1	0,023	
2568	1000	8,00	4,61	3,69	0,023	23,19	17,7	0,004	
2568	1000	16,00	4,61	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	3,63	4,90	1,68	0,153	152,63			0,121
2568	1000	0,06	4,90	0,03	0,283	283,33	3,9	0,011	
2568	1000	0,25	4,90	0,12	0,276	275,83	1,7	0,005	
2568	1000	0,50	4,90	0,23	0,266	265,92	1,7	0,005	
2568	1000	1,00	4,90	0,46	0,246	246,45	10,3	0,025	
2568	1000	2,00	4,90	0,92	0,209	209,03	20,2	0,042	
2568	1000	4,00	4,90	1,85	0,141	140,67	19,1	0,027	
2568	1000	8,00	4,90	3,69	0,035	35,01	17,7	0,006	
2568	1000	16,00	4,90	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	3,63	5,42	1,68	0,191	191,00			0,149
2568	1000	0,06	5,42	0,03	0,330	329,89	3,9	0,013	
2568	1000	0,25	5,42	0,12	0,322	322,00	1,7	0,005	
2568	1000	0,50	5,42	0,23	0,312	311,55	1,7	0,005	
2568	1000	1,00	5,42	0,46	0,291	291,01	10,3	0,030	
2568	1000	2,00	5,42	0,92	0,251	251,34	20,2	0,051	
2568	1000	4,00	5,42	1,85	0,178	178,09	19,1	0,034	
2568	1000	8,00	5,42	3,69	0,060	59,88	17,7	0,011	
2568	1000	16,00	5,42	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	Körner nicht in Bewegung

$\rho_F$	$\rho_W$	$d_m$	$\tau_{ac}$	$\tau_{cr}$	$m_g$ [kg/m <sup>3</sup> s]	$m_g$ [g/m <sup>3</sup> s]	Massen-Anteil (%)	$m_g$ [kg/m <sup>3</sup> s]	Summe Kornfraktionen [kg/m <sup>3</sup> s]
2568	1000	3,63	5,89	1,68	0,228	228,06			0,176
2568	1000	0,06	5,89	0,03	0,374	373,96	3,9	0,014	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	0,25	5,89	0,12	0,366	365,73	1,7	0,006	
2568	1000	0,50	5,89	0,23	0,355	354,82	1,7	0,006	
2568	1000	1,00	5,89	0,46	0,333	333,35	10,3	0,034	
2568	1000	2,00	5,89	0,92	0,292	291,76	20,2	0,059	
2568	1000	4,00	5,89	1,85	0,214	214,35	19,1	0,041	
2568	1000	8,00	5,89	3,69	0,086	85,90	17,7	0,015	
2568	1000	16,00	5,89	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	
2568	1000	3,63	6,44	1,68	0,274	274,13			
2568	1000	0,06	6,44	0,03	0,428	427,81	3,9	0,017	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	0,25	6,44	0,12	0,419	419,20	1,7	0,007	
2568	1000	0,50	6,44	0,23	0,408	407,79	1,7	0,007	
2568	1000	1,00	6,44	0,46	0,385	385,27	10,3	0,040	
2568	1000	2,00	6,44	0,92	0,342	341,54	20,2	0,069	
2568	1000	4,00	6,44	1,85	0,260	259,53	19,1	0,050	
2568	1000	8,00	6,44	3,69	0,120	120,08	17,7	0,021	
2568	1000	16,00	6,44	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	
2568	1000	3,63	6,90	1,68	0,315	314,77			
2568	1000	0,06	6,90	0,03	0,475	474,67	3,9	0,018	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	0,25	6,90	0,12	0,466	465,76	1,7	0,008	
2568	1000	0,50	6,90	0,23	0,454	453,93	1,7	0,008	
2568	1000	1,00	6,90	0,46	0,431	430,58	10,3	0,044	
2568	1000	2,00	6,90	0,92	0,385	385,13	20,2	0,078	
2568	1000	4,00	6,90	1,85	0,299	299,46	19,1	0,057	
2568	1000	8,00	6,90	3,69	0,151	151,46	17,7	0,027	
2568	1000	16,00	6,90	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	

- Neigung: 4,65%

$\rho_F$	$\rho_W$	$d_m$	$\tau_{ac}$	$\tau_{cr}$	$m_g$ [kg/m <sup>3</sup> s]	$m_g$ [g/m <sup>3</sup> s]	Massen-Anteil (%)	$m_g$ [kg/m <sup>3</sup> s]	Summe Kornfraktionen [kg/m <sup>3</sup> s]
2568	1000	3,63	7,04	1,68	0,328	327,50			0,250
2568	1000	0,06	7,04	0,03	0,489	489,26	3,9	0,019	
2568	1000	0,25	7,04	0,12	0,480	480,25	1,7	0,008	
2568	1000	0,50	7,04	0,23	0,468	468,30	1,7	0,008	
2568	1000	1,00	7,04	0,46	0,445	444,70	10,3	0,046	
2568	1000	2,00	7,04	0,92	0,399	398,74	20,2	0,081	
2568	1000	4,00	7,04	1,85	0,312	311,99	19,1	0,060	
2568	1000	8,00	7,04	3,69	0,161	161,48	17,7	0,03	
2568	1000	16,00	7,04	7,38	#ZAHL!	#ZAHL!	13,3	#ZAHL!	Körner nicht in Bewegung
2568	1000	3,63	7,62	1,68	0,382	382,02			0,290
2568	1000	0,06	7,62	0,03	0,551	551,21	3,9	0,021	
2568	1000	0,25	7,62	0,12	0,542	541,83	1,7	0,009	
2568	1000	0,50	7,62	0,23	0,529	529,39	1,7	0,009	
2568	1000	1,00	7,62	0,46	0,505	504,79	10,3	0,052	
2568	1000	2,00	7,62	0,92	0,457	456,77	20,2	0,092	
2568	1000	4,00	7,62	1,85	0,366	365,68	19,1	0,070	
2568	1000	8,00	7,62	3,69	0,205	205,20	17,7	0,036	
2568	1000	16,00	7,62	7,38	0,003	3,03	13,3	0,000	
2568	1000	3,63	8,93	1,68	0,515	515,01			0,396
2568	1000	0,06	8,93	0,03	0,700	699,88	3,9	0,027	
2568	1000	0,25	8,93	0,12	0,690	689,73	1,7	0,012	
2568	1000	0,50	8,93	0,23	0,676	676,23	1,7	0,012	
2568	1000	1,00	8,93	0,46	0,650	649,51	10,3	0,067	
2568	1000	2,00	8,93	0,92	0,597	597,15	20,2	0,121	
2568	1000	4,00	8,93	1,85	0,497	496,94	19,1	0,095	
2568	1000	8,00	8,93	3,69	0,316	315,98	17,7	0,056	
2568	1000	16,00	8,93	7,38	0,051	50,69	13,3	0,007	
2568	1000	3,63	9,86	1,68	0,617	617,15			0,478
2568	1000	0,06	9,86	0,03	0,812	812,39	3,9	0,031	
2568	1000	0,25	9,86	0,12	0,802	801,72	1,7	0,013	
2568	1000	0,50	9,86	0,23	0,788	787,52	1,7	0,013	
2568	1000	1,00	9,86	0,46	0,759	759,39	10,3	0,078	
2568	1000	2,00	9,86	0,92	0,704	704,15	20,2	0,143	
2568	1000	4,00	9,86	1,85	0,598	597,94	19,1	0,114	
2568	1000	8,00	9,86	3,69	0,404	403,76	17,7	0,072	
2568	1000	16,00	9,86	7,38	0,103	102,72	13,3	0,014	
2568	1000	3,63	10,93	1,68	0,742	742,04			0,581
2568	1000	0,06	10,93	0,03	0,949	948,57	3,9	0,037	
2568	1000	0,25	10,93	0,12	0,937	937,32	1,7	0,016	
2568	1000	0,50	10,93	0,23	0,922	922,37	1,7	0,016	
2568	1000	1,00	10,93	0,46	0,893	892,69	10,3	0,092	
2568	1000	2,00	10,93	0,92	0,834	834,32	20,2	0,169	
2568	1000	4,00	10,93	1,85	0,722	721,60	19,1	0,138	
2568	1000	8,00	10,93	3,69	0,513	513,25	17,7	0,091	
2568	1000	16,00	10,93	7,38	0,176	176,03	13,3	0,023	
2568	1000	3,63	12,05	1,68	0,881	880,74			0,696
2568	1000	0,06	12,05	0,03	1,098	1098,45	3,9	0,042	
2568	1000	0,25	12,05	0,12	1,087	1086,64	1,7	0,018	
2568	1000	0,50	12,05	0,23	1,071	1070,92	1,7	0,018	
2568	1000	1,00	12,05	0,46	1,040	1039,72	10,3	0,107	
2568	1000	2,00	12,05	0,92	0,978	978,24	20,2	0,198	
2568	1000	4,00	12,05	1,85	0,859	859,09	19,1	0,164	
2568	1000	8,00	12,05	3,69	0,637	636,87	17,7	0,113	
2568	1000	16,00	12,05	7,38	0,266	265,69	13,3	0,035	

- Neigung: 7,15%

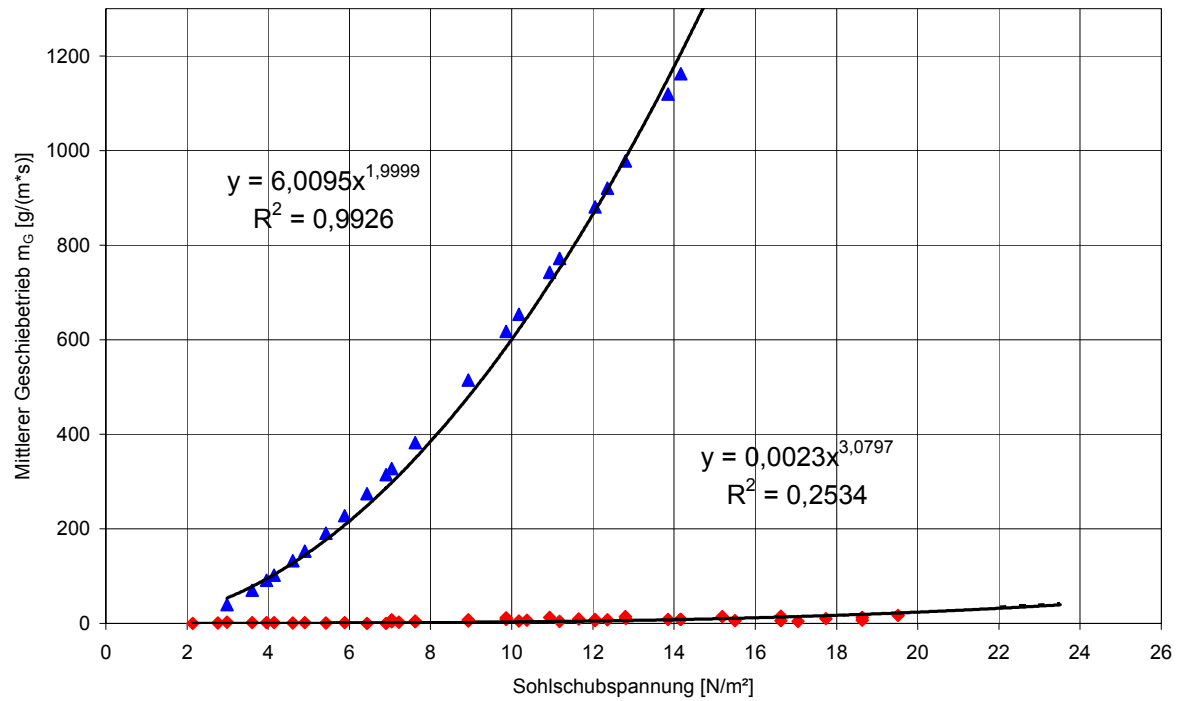
$\rho_F$	$\rho_W$	$d_m$	$\tau_{ac}$	$\tau_{cr}$	$m_g$ [kg/m <sup>3</sup> s]	$m_g$ [g/m <sup>3</sup> s]	Massen-Anteil (%)	$m_g$ [kg/m <sup>3</sup> s]	Summe Kornfraktionen [kg/m <sup>3</sup> s]
2568	1000	3,63	10,18	1,68	0,654	653,70			0,508
2568	1000	0,06	10,18	0,03	0,852	852,38	3,9	0,033	
2568	1000	0,25	10,18	0,12	0,842	841,53	1,7	0,014	
2568	1000	0,50	10,18	0,23	0,827	827,10	1,7	0,014	
2568	1000	1,00	10,18	0,46	0,798	798,50	10,3	0,082	
2568	1000	2,00	10,18	0,92	0,742	742,31	20,2	0,150	
2568	1000	4,00	10,18	1,85	0,634	634,11	19,1	0,121	
2568	1000	8,00	10,18	3,69	0,436	435,58	17,7	0,08	
2568	1000	16,00	10,18	7,38	0,123	123,26	13,3	0,02	
2568	1000	3,63	11,18	1,68	0,772	772,31			0,606
2568	1000	0,06	11,18	0,03	0,981	981,38	3,9	0,038	
2568	1000	0,25	11,18	0,12	0,970	970,01	1,7	0,016	
2568	1000	0,50	11,18	0,23	0,955	954,88	1,7	0,016	
2568	1000	1,00	11,18	0,46	0,925	924,86	10,3	0,095	
2568	1000	2,00	11,18	0,92	0,866	865,78	20,2	0,175	
2568	1000	4,00	11,18	1,85	0,752	751,60	19,1	0,144	
2568	1000	8,00	11,18	3,69	0,540	540,07	17,7	0,096	
2568	1000	16,00	11,18	7,38	0,195	194,97	13,3	0,026	
2568	1000	3,63	12,36	1,68	0,921	920,51			0,730
2568	1000	0,06	12,36	0,03	1,141	1141,21	3,9	0,044	
2568	1000	0,25	12,36	0,12	1,129	1129,25	1,7	0,019	
2568	1000	0,50	12,36	0,23	1,113	1113,33	1,7	0,019	
2568	1000	1,00	12,36	0,46	1,082	1081,71	10,3	0,111	
2568	1000	2,00	12,36	0,92	1,019	1019,40	20,2	0,206	
2568	1000	4,00	12,36	1,85	0,899	898,53	19,1	0,172	
2568	1000	8,00	12,36	3,69	0,673	672,63	17,7	0,119	
2568	1000	16,00	12,36	7,38	0,293	292,60	13,3	0,039	
2568	1000	3,63	13,85	1,68	1,120	1119,62			0,897
2568	1000	0,06	13,85	0,03	1,354	1354,19	3,9	0,052	
2568	1000	0,25	13,85	0,12	1,342	1341,52	1,7	0,022	
2568	1000	0,50	13,85	0,23	1,325	1324,66	1,7	0,023	
2568	1000	1,00	13,85	0,46	1,291	1291,14	10,3	0,132	
2568	1000	2,00	13,85	0,92	1,225	1224,96	20,2	0,248	
2568	1000	4,00	13,85	1,85	1,096	1096,15	19,1	0,210	
2568	1000	8,00	13,85	3,69	0,853	853,30	17,7	0,151	
2568	1000	16,00	13,85	7,38	0,433	433,40	13,3	0,058	
2568	1000	3,63	15,19	1,68	1,309	1309,46			1,057
2568	1000	0,06	15,19	0,03	1,556	1555,83	3,9	0,060	
2568	1000	0,25	15,19	0,12	1,543	1542,56	1,7	0,026	
2568	1000	0,50	15,19	0,23	1,525	1524,89	1,7	0,026	
2568	1000	1,00	15,19	0,46	1,490	1489,74	10,3	0,153	
2568	1000	2,00	15,19	0,92	1,420	1420,28	20,2	0,288	
2568	1000	4,00	15,19	1,85	1,285	1284,72	19,1	0,246	
2568	1000	8,00	15,19	3,69	1,028	1027,60	17,7	0,182	
2568	1000	16,00	15,19	7,38	0,575	574,86	13,3	0,077	
2568	1000	3,63	17,05	1,68	1,589	1588,88			1,294
2568	1000	0,06	17,05	0,03	1,851	1850,75	3,9	0,071	
2568	1000	0,25	17,05	0,12	1,837	1836,69	1,7	0,031	
2568	1000	0,50	17,05	0,23	1,818	1817,95	1,7	0,031	
2568	1000	1,00	17,05	0,46	1,781	1780,67	10,3	0,183	
2568	1000	2,00	17,05	0,92	1,707	1706,89	20,2	0,346	
2568	1000	4,00	17,05	1,85	1,562	1562,48	19,1	0,299	
2568	1000	8,00	17,05	3,69	1,287	1286,77	17,7	0,228	
2568	1000	16,00	17,05	7,38	0,792	792,11	13,3	0,106	



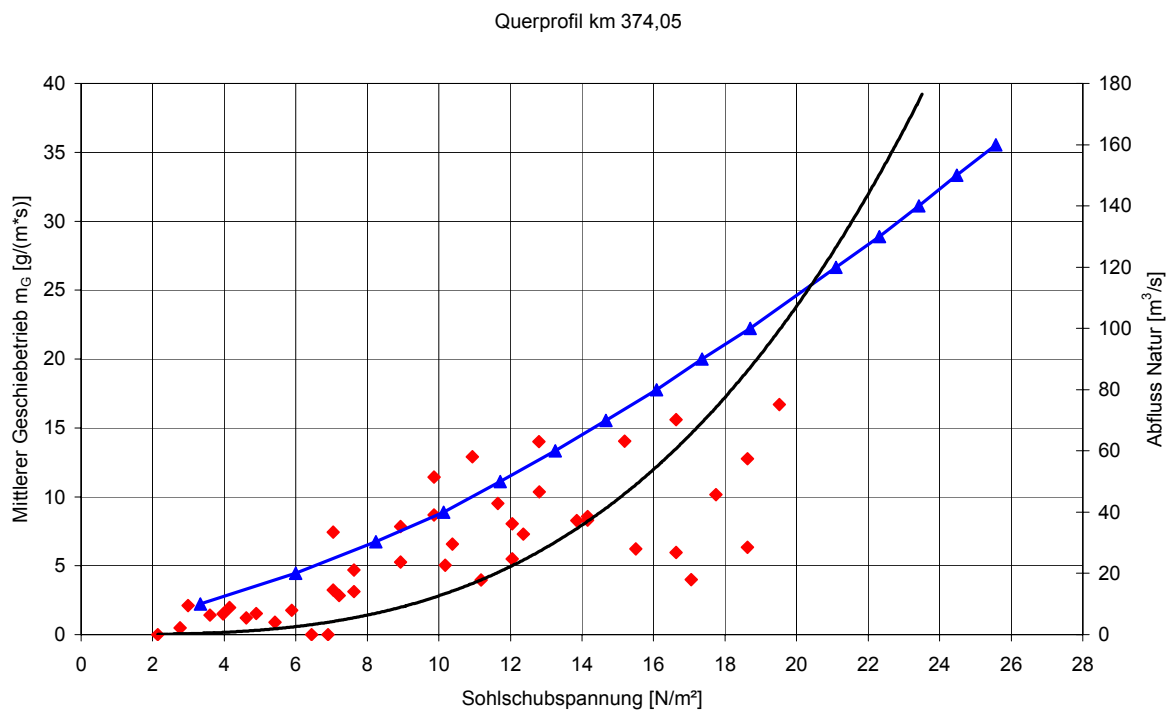
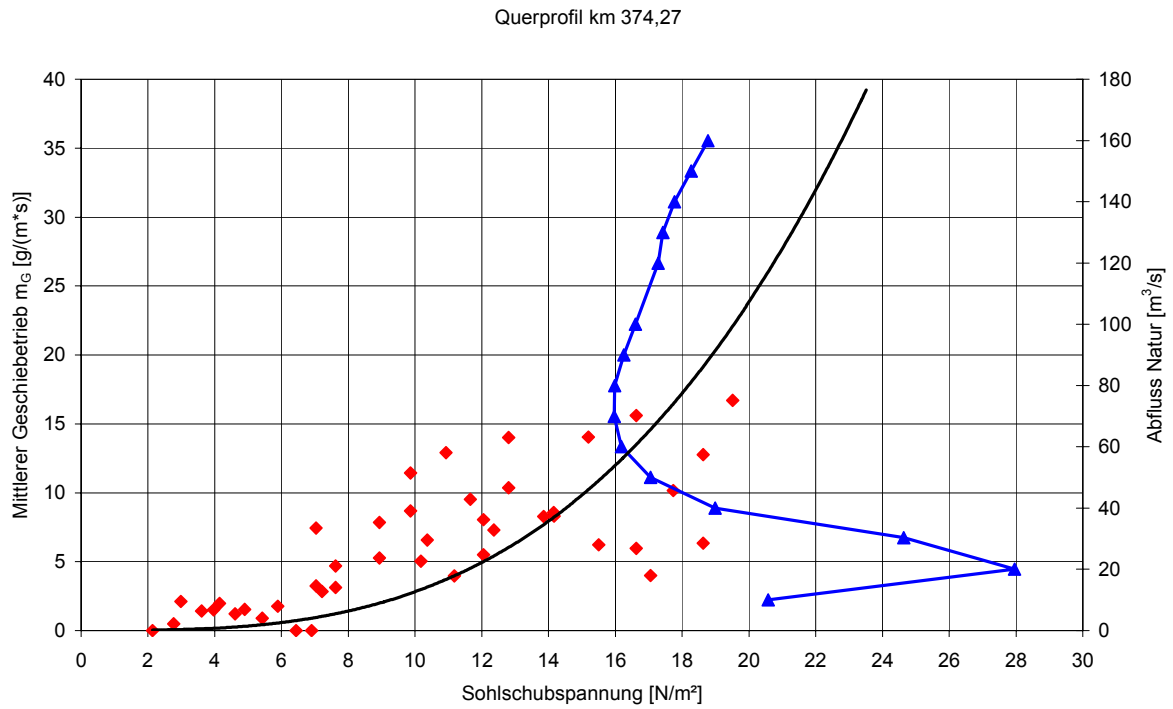
- Neigung: 10,0%

$\rho_F$	$\rho_W$	$d_m$	$\tau_{ac}$	$\tau_{cr}$	$m_g$ [kg/m <sup>3</sup> s]	$m_g$ [g/m <sup>3</sup> s]	Massen-Anteil (%)	$m_g$ [kg/m <sup>3</sup> s]	Summe Kornfraktionen [kg/m <sup>3</sup> s]
2568	1000	3,63	12,80	1,68	0,978	977,95			0,778
2568	1000	0,06	12,80	0,03	1,203	1202,84	3,9	0,046	
2568	1000	0,25	12,80	0,12	1,191	1190,66	1,7	0,020	
2568	1000	0,50	12,80	0,23	1,174	1174,46	1,7	0,020	
2568	1000	1,00	12,80	0,46	1,142	1142,27	10,3	0,117	
2568	1000	2,00	12,80	0,92	1,079	1078,79	20,2	0,218	
2568	1000	4,00	12,80	1,85	0,956	955,52	19,1	0,183	
2568	1000	8,00	12,80	3,69	0,724	724,48	17,7	0,13	
2568	1000	16,00	12,80	7,38	0,332	332,25	13,3	0,04	
2568	1000	3,63	14,16	1,68	1,163	1162,65			0,933
2568	1000	0,06	14,16	0,03	1,400	1400,00	3,9	0,054	
2568	1000	0,25	14,16	0,12	1,387	1387,20	1,7	0,023	
2568	1000	0,50	14,16	0,23	1,370	1370,14	1,7	0,023	
2568	1000	1,00	14,16	0,46	1,336	1336,24	10,3	0,137	
2568	1000	2,00	14,16	0,92	1,269	1269,29	20,2	0,257	
2568	1000	4,00	14,16	1,85	1,139	1138,88	19,1	0,218	
2568	1000	8,00	14,16	3,69	0,893	892,66	17,7	0,158	
2568	1000	16,00	14,16	7,38	0,465	464,93	13,3	0,062	
2568	1000	3,63	16,63	1,68	1,524	1524,22			1,239
2568	1000	0,06	16,63	0,03	1,783	1782,67	3,9	0,069	
2568	1000	0,25	16,63	0,12	1,769	1768,79	1,7	0,030	
2568	1000	0,50	16,63	0,23	1,750	1750,29	1,7	0,030	
2568	1000	1,00	16,63	0,46	1,713	1713,48	10,3	0,176	
2568	1000	2,00	16,63	0,92	1,641	1640,65	20,2	0,332	
2568	1000	4,00	16,63	1,85	1,498	1498,19	19,1	0,287	
2568	1000	8,00	16,63	3,69	1,227	1226,56	17,7	0,217	
2568	1000	16,00	16,63	7,38	0,741	741,05	13,3	0,099	
2568	1000	3,63	18,63	1,68	1,840	1839,99			1,508
2568	1000	0,06	18,63	0,03	2,114	2114,34	3,9	0,082	
2568	1000	0,25	18,63	0,12	2,100	2099,64	1,7	0,035	
2568	1000	0,50	18,63	0,23	2,080	2080,05	1,7	0,036	
2568	1000	1,00	18,63	0,46	2,041	2041,04	10,3	0,209	
2568	1000	2,00	18,63	0,92	1,964	1963,78	20,2	0,398	
2568	1000	4,00	18,63	1,85	1,812	1812,26	19,1	0,347	
2568	1000	8,00	18,63	3,69	1,522	1521,68	17,7	0,270	
2568	1000	16,00	18,63	7,38	0,994	994,04	13,3	0,133	

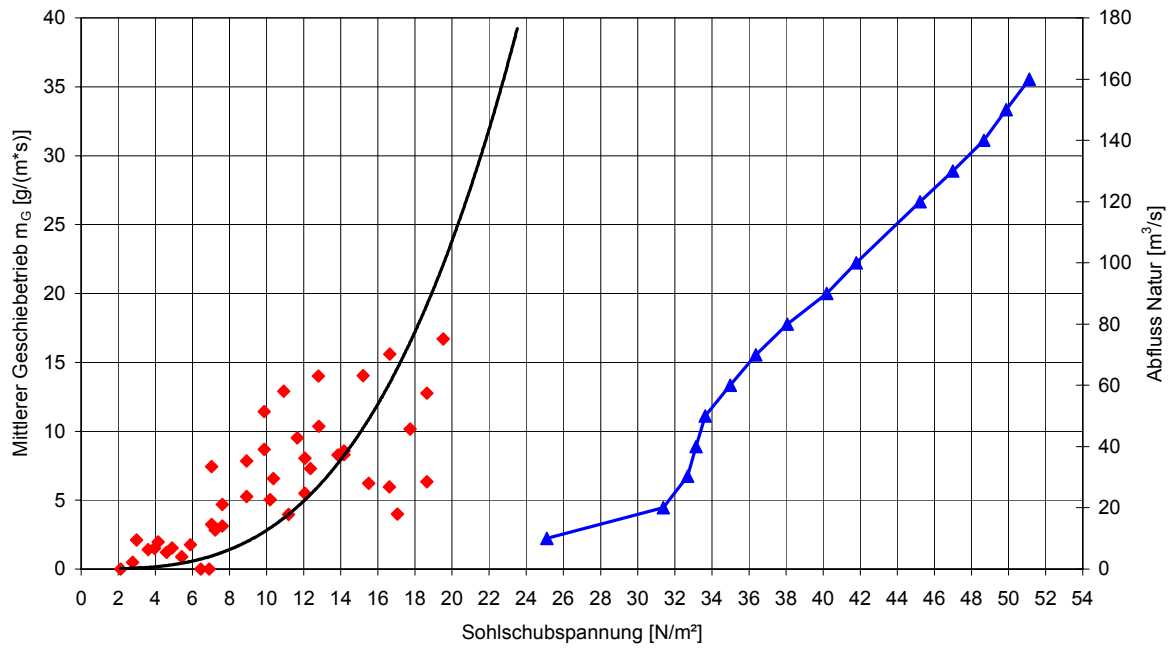
- Vergleich Geschiebetrieb aus dem Modellversuch und nach MPM



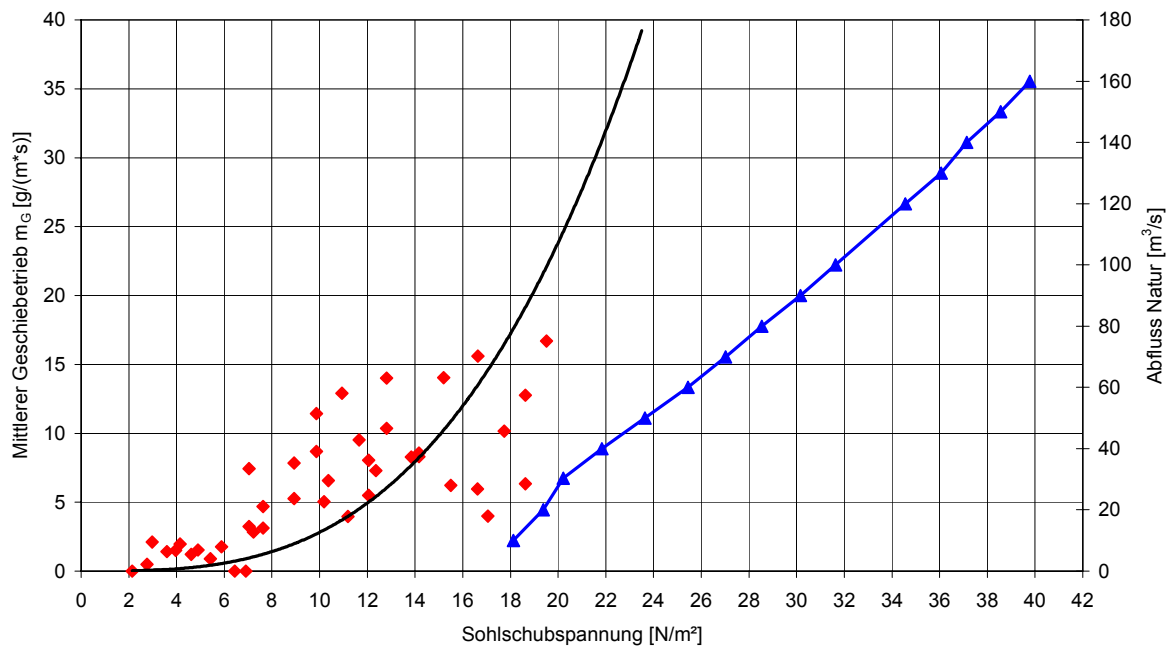
### 9.4 Geschiebetransport in der Natur



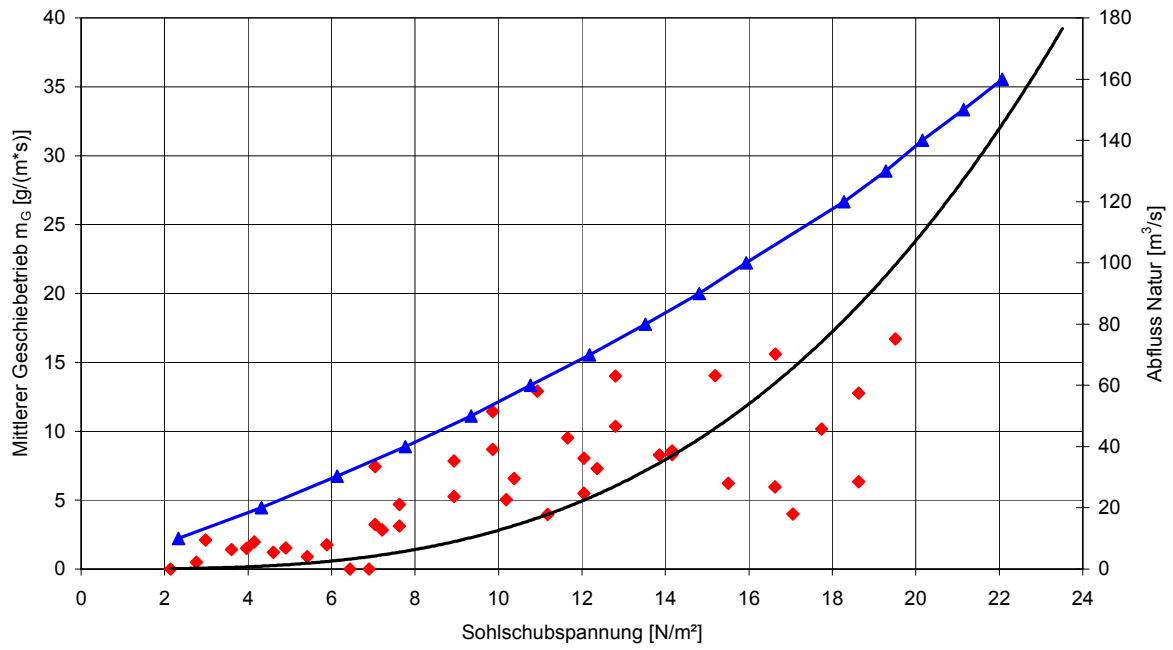
Querprofil km 373,83



Querprofil km 373,73



Querprofil km 373,61



Querprofil km 373,11

