

Technische Universität Graz  
Dekanat für Bauingenieurwissenschaften  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft



**Sedimente im physikalischen Modellversuch am  
Beispiel der Wasserkraftanlage Schönau  
Anwendbarkeit und Grenzen**

**Masterarbeit**

**von**

**Sajjad Shafaroudi**

**Vorgelegt zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplomingenieurs**

**der Studienrichtung Bauingenieurwesen**

**Masterstudium Bauingenieurwissenschaften- Geotechnik und Wasserbau**

**Graz, November 2011**

Betreuer der Masterarbeit:  
Herr Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerald Zenz

.....

Mitbetreuender Assistent:  
Herr Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Josef Schneider

.....

## **Eid (Ehrenwörtliche 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 den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, im November 2011

.....

## **Danksagung**

Allen voran möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. Josef Schneider für die ausgezeichnete, intensive Betreuung meiner Diplomarbeit bedanken.

Besonders herzlich möchte ich mich weiteres bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerald Zenz für die Begutachtung und Betreuung meiner Masterarbeit bedanken und für die Möglichkeit, diese am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft beziehungsweise im Labor des Institutes durchführen zu dürfen.

Ein herzliches Dankeschön gilt meinen Eltern, Brüdern und allen Freunden.

## Kurzfassung

Die Feststoffbewegung stellt bei der Planung und Unterhaltung von Flussläufen und Flusskraftwerken oft eine große Herausforderung dar. Bei Flusskraftwerken kann es nach Stauraumpülungen zu Geschiebeanlandungen bei den Kraftwerken und im Unterwasserbereich kommen. Dadurch ergeben sich verschiedene Problemstellungen, wie die Schwierigkeiten im Betrieb durch die Verlandung der Turbineneinläufe, sowie eine Reduzierung des Stauraumvolumens und die Erhöhung des Hochwasserrisikos.

Am Fallbeispiel des Kraftwerks Schönau der Ennskraftwerke AG (Inbetriebnahme 1972) an der Enns in Oberösterreich werden diese Problemstellungen genauer erörtert. Dieses Kraftwerk eignet sich gut als ein Beispiel, da sich das Krafthaus im Innenbogen einer Flusskrümmung befindet.

Um den Einfluss der Verlandung auf die Strömungssituation abschätzen zu können, wird die Sohle des Jahres 2002 als bewegliche Sohle in einem physikalischen Modellversuch (M 1:40) und mit numerischen dreidimensionalen Strömungssimulationen untersucht. Damit können mögliche Verbesserungen durch bauliche bzw. betriebliche Maßnahmen erarbeitet werden.

Bei einem Abfluss unter Schwerkräfteinfluss mit einer freien Oberfläche muss im physikalischen Modellversuch neben der geometrischen Ähnlichkeit auch sichergestellt sein, dass die Froude'sche Zahl sowie die dynamische Ähnlichkeit zwischen Modell und Natur übereinstimmen.

Die Wahl des richtigen Materials als Geschiebe für die bewegliche Sohle im Modell ist abhängig von der dynamischen Ähnlichkeit zwischen den Schubspannungen an der Sohle in Natur und im Modell. Für die Bestimmung der kritischen Schubspannungen in der Sohle für verschiedene Sedimentgrößen wurden die hydraulischen Modellversuche in einem 12 m langen und 20 cm breiten Glasgerinne des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft durchgeführt. Als Ergebnis dieser Masterarbeit wird eine einfache Entscheidungsfindung für die Auswahl des richtigen Materials als Geschiebe für die bewegliche Sohle im Modellversuch ermöglicht.

## Abstract

The movement of sediments often raises difficult questions in the planning and maintenance of hydropower plants. Reservoir flushing can cause sedimentation in the downstream section of river hydropower plants. Uncontrolled and uncoordinated flushing also causes further problems for the following hydropower plant in the downstream reaches. So the same problems appear again, like reducing of the storage volume in upstream, an increasing flood risk and sedimentation of the turbine intake area.

In this case study of the Schönau Ennskraftwerke AG river hydropower plant (start of operation in 1972) at the Enns river in Upper Austria (Oberösterreich) these problems are discussed in detail by using a physical model test on investigating the sediment transport in vicinity of the power house, that is located at the inside curve of river curvature.

To estimate the influence of sedimentation on the streaming situation, the river bed was recreated according to the situation of the year 2002 in the physical model test (M 1:40). Three-dimensional numerical flow calculations were done to point out possible improvements in the structure and operation of the river hydropower plant.

In addition to the geometric similarity, to consider the physical model test as a stream under influence of gravity with a free surface, it has to be ensured, that the Froude number, or dynamic similarity in the model is equal to the Froude number in the river.

It is important to choose a suitable material as a bed load material for the mobile bed model. It has to be considered that the dynamic similarity is kept between the shear stresses of the bed in nature and in the model. A 12 m long and 20 cm wide glass channel at the Institute of Hydraulic Engineering and Water Resource Management was used to determine the critical shear stresses at the bed for various sediments. The results of this thesis give us a suggestion for choosing the appropriate material as sediment for the Schönau hydraulic model.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Kraftwerk (KW) Schönau .....	3
1.3	Beschreibung des Kraftwerkes .....	3
1.4	Hydrologie .....	7
<b>2</b>	<b>Physikalische Modellversuche - KW Schönau</b> .....	<b>8</b>
2.1	Kraftwerk Schönau Modell .....	8
2.2	Geschiebeversuche mit beweglicher Sohle .....	11
2.3	Einbau einer Einlaufschwelle .....	15
2.4	Ziel des Sedimentmodellversuches im Glasgerinne .....	16
<b>3</b>	<b>Grundlagen des Feststofftransports</b> .....	<b>17</b>
3.1	Sedimenttransport in Flüssen .....	17
3.1.1	Systematik .....	18
3.1.2	Transportarten .....	19
3.2	Physikalische Eigenschaften .....	19
3.2.1	Transportbeginn .....	20
3.2.2	Kritische Geschwindigkeit .....	21
3.2.3	Kritische Schubspannung .....	22
3.2.4	Bewegungsbeginn nach Shields .....	25
3.3	Geschiebetransportformeln .....	29
3.4	Transportkörper auf der Sohle .....	31
3.5	Wehre und Stauanlagen .....	33
<b>4</b>	<b>Physikalische Modelle</b> .....	<b>36</b>
4.1	Geometrische Ähnlichkeit .....	36
4.2	Kinematische Ähnlichkeit .....	37
4.3	Dynamische Ähnlichkeit .....	37
4.4	Modellgesetze .....	38
4.5	Hydraulische Modellgesetze mit den dominierenden Kräften Trägheit und Schwere .....	38
4.6	Hydraulische Modellgesetze (bei $M_L = 40$ ) .....	42
4.6.1	Anwendbarkeit und Grenzen .....	44

<b>5</b>	<b>Strömung in offenen Gerinnen</b> .....	45
5.1	Allgemeines .....	45
5.2	Methoden zur Schubspannungsermittlung .....	46
5.2.1	Geschiebetransportformel Variante 1 (G.T.F.V.1).....	46
5.2.2	Geschiebetransportformel Variante 2 (G.T.F.V.2).....	49
5.2.3	Geschiebetransportformel Variante 3 (G.T.F.V.3) .....	50
5.2.4	Geschiebetransportformel Variante Dr. Gehrig (G.T.F.V.D) .....	50
5.3	Ergebnisse für jedes Sediment.....	52
5.3.1	Versuch 1.....	52
5.3.2	Versuch 2.....	53
5.3.3	Versuch 3.....	53
5.3.4	Versuch 4.....	54
5.3.5	Versuch 5.....	54
5.3.6	Kritische Sohlschubspannungen.....	55
5.3.7	Kritischen Sohlgeschwindigkeiten.....	56
5.3.8	Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen mit M.P.M.F. ....	57
<b>6</b>	<b>Analyse</b> .....	58
6.1	Ergebnisse aus G.T.F.V.3 .....	58
6.1.1	Kritische Sohlgeschwindigkeit.....	59
6.1.2	Kritische Sohlschubspannung.....	60
6.1.3	Meyer-Peter und Müller Formel (M.P.M.F.) .....	61
6.1.4	Vergleich der kritischen Sohlschubspannung .....	62
6.1.5	Feststoff-Froudezahl .....	63
6.1.6	Feststoff-Reynoldszahl .....	64
6.1.7	Sedimentologische Durchmesser .....	65
6.2	Ergebnisse aus G.T.F.V.2 .....	67
6.3	Bewegungsbeginn nach Shields für jedes Sediment.....	68
6.3.1	Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,01$ [m].....	68
6.3.2	Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,006$ [m].....	71
6.3.3	Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,0035$ [m].....	74
6.3.4	Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,003$ [m].....	77
6.3.5	Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,0015$ [m].....	80
6.3.6	Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,003$ [m].....	83
6.3.7	Diskussion des Fehlers.....	86



<b>7</b>	<b>Numerische Simulation</b> .....	<b>87</b>
7.1	Kontur-Plot der Sohlschubspannungen in der Natur .....	87
7.2	Lastfall HQ10.....	88
7.3	Lastfall HQ1 .....	89
7.4	Lastfall 1 .....	90
7.5	Lastfall 2 .....	91
7.6	Lastfall 3 .....	92
7.7	Lastfall 4 .....	93
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>94</b>
<b>9</b>	<b>Verzeichnisse</b> .....	<b>96</b>
9.1	Abbildungsverzeichnis.....	96
9.2	Tabellenverzeichnis.....	99
9.3	Literaturverzeichnis .....	100
9.4	Symbolverzeichnis.....	103
<b>10</b>	<b>Wassereigenschaften</b> .....	<b>105</b>
<b>11</b>	<b>Wichtige Formeln der Hydromechanik</b> .....	<b>106</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Die Reduzierung der Fließgeschwindigkeiten in Stauräumen kann zur Sedimentation von Feststoffmaterialien beziehungsweise zur Geschiebeablagerung führen. Dadurch ergeben sich verschiedene Problemstellungen, wie die Reduzierung des Stauraumvolumens, die Erhöhung des Hochwasserrisikos und Probleme bei Anlandungen im Bereich vor Turbineneinläufen. Ebenso kann es zur Geschiebeablagerung in stehenden Gewässern, wie in Stauräumen und Bereichen mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten kommen.

Weiter kann es auch im Bereich der Turbinenausläufe zu einer Anhebung des Wasserspiegels und somit zu einer Reduktion der energetisch nutzbaren Fallhöhe mit einer damit einhergehenden Reduktion der Energieproduktion kommen. Des Weiteren kann es durch die Sedimente zu Schäden an Turbinen kommen.

Zur Lösung werden meist Stauraumspülungen durchgeführt. In manchen Fällen kann aber aufgrund der Stauraumgeometrie, bzw. anderer einschränkender Randbedingungen eine kontrollierte Stauraumspülung nicht durchgeführt werden.<sup>1</sup>

In der Abbildung 1 und 2 sieht man die Baggerungen im Stausee Schönau der Ennskraftwerke AG im Bereich des Zulaufes.

---

<sup>1</sup> Vgl.: Schneider, J. et al., 2010, "Einfluss von Sekundärströmungen auf die Verlandung von Flusskraftwerken am Fallbeispiel KW Schönau- Modellversuch und Numerik". [20]



Abbildung 1: Baggerungen im Stausee Schönau der Ennskraftwerke AG <sup>2</sup>



Abbildung 2: Baggerungen im Stausee Schönau der Ennskraftwerke AG <sup>3</sup>

<sup>2</sup> <http://forum.bauforum24.biz/forum/index.php?showtopic=29372>.

<sup>3</sup> <http://forum.bauforum24.biz/forum/index.php?showtopic=29372>.

## 1.2 Kraftwerk (KW) Schönau

In den letzten Jahren traten verstärkte Verlandungen vor den Maschineneinläufen des KW Schönau auf. Durch bauliche bzw. betriebliche Maßnahmen soll eine Verbesserung der Verlandungssituation und damit eine Minimierung des Baggeraufwandes erreicht werden.<sup>4</sup>



Abbildung 3: Die Tafel des Kraftwerkes<sup>5</sup>

## 1.3 Beschreibung des Kraftwerkes

Das Kraftwerk Schönau liegt bei Flusskilometer 83,37 in einem Rechtsbogen des Ennsflusses (Abbildung 4 und 5). Die 3-feldrige Wehranlage ist an der linken Seite des Ufers im Außenbogen angeordnet. Das Krafthaus ist mit zwei Maschinensätzen an der rechten Seite des Ufers im Innenbogen situiert (Abbildung 6 und 7). Die Wehrfelder besitzen eine Weite von je 12,00 m, (Segmentverschluss mit aufgesetzter Klappe). Die Errichtung der Kraftwerksanlage erfolgte in den Jahren 1969 bis 1972.

---

<sup>4</sup> Vgl.: Schneider, J. et al., 2010, "Einfluss von Sekundärströmungen auf die Verlandung von Flusskraftwerken am Fallbeispiel KW Schönau- Modellversuch und Numerik". [20]

<sup>5</sup> Foto: Wall, J.





Abbildung 4: Kraftwerk Schönau <sup>6</sup>

<sup>6</sup> <http://maps.google.at/maps>.



Abbildung 5: Kraftwerk Schönau <sup>7</sup>

Für die Kraftwerksstandorte der oberösterreichischen Enns sind wasserrechtlich keine Stauraumpülungen vorgesehen. Für Hochwasserereignisse größer als 1.350 [m<sup>3</sup>/s] wird der Stauspiegel beim Kraftwerk ausgehend von 400,50 m.ü.A. linear auf 398,00 m.ü.A. bei 1.900 [m<sup>3</sup>/s] abgesenkt und somit dem Ansteigen der Wasserspiegellagen bei höheren Durchflüssen flussaufwärts Rechnung getragen. <sup>8</sup>

<sup>7</sup> <http://maps.google.at/maps>".

<sup>8</sup> Vgl.: Schneider, J. et al., 2010, "Einfluss von Sekundärströmungen auf die Verlandung von Flusskraftwerken am Fallbeispiel KW Schönau- Modellversuch und Numerik". [20]





Abbildung 6: Kraftwerk Schönau <sup>9</sup>



Abbildung 7: Kraftwerk Schönau <sup>10</sup>

<sup>9</sup> Knoblauch, H., 2010, "Hydraulisches Versuchswesen". [13]

<sup>10</sup> Foto: Shafaroudi, S.

In Tabelle 1 sind die Kenndaten des Kraftwerkes zu sehen.

**Tabelle 1: Kenndaten des Kraftwerks Schönau <sup>11</sup>**

Fluss	Enns
Erstinbetriebnahme	1972
Ausbaufallhöhe	12,1 [m]
Ausbaudurchfluss	286 [m <sup>3</sup> /s]
Engpassleistung	29,80 [MW]
Regeljahresarbeitsvermögen	122,8 Mio [KWh]
Anzahl der Maschinensätze	2
Modernisierung/Leistungssteigerung	Unterwassereintiefung 1982

## 1.4 Hydrologie

In der Tabelle 2 sind die Zuflüsse der oberösterreichischen Enns für den Kraftwerksstandort KW Schönau enthalten.

**Tabelle 2: Enns Zuflüsse <sup>12</sup>**

Ereignis	Durchfluss
Q <sub>A</sub>	286 [m <sup>3</sup> /s]
HQ <sub>1</sub>	750 [m <sup>3</sup> /s]
HQ <sub>10</sub>	1350 [m <sup>3</sup> /s]
HQ <sub>100</sub>	1900 [m <sup>3</sup> /s]
HQ <sub>500</sub>	2240 [m <sup>3</sup> /s]

<sup>11</sup> Schneider, J. et al., 2010, "Einfluss von Sekundärströmungen auf die Verlandung von Flusskraftwerken am Fallbeispiel KW Schönau- Modellversuch und Numerik". [20]

<sup>12</sup> Schneider, J. et al., 2010, "Einfluss von Sekundärströmungen auf die Verlandung von Flusskraftwerken am Fallbeispiel KW Schönau- Modellversuch und Numerik". [20]



## 2 Physikalische Modellversuche - KW Schönau

### 2.1 Kraftwerk Schönau Modell

Im Labor des Institutes für Wasserbau und Wasserwirtschaft (TU Graz) wurde ein Vollmodell im Maßstab 1:40 errichtet (Modelllageplan in Abbildung 8). Das Kraftwerk wurde mit allen relevanten Details nachgebildet (Wehr mit Verschlüssen und Krafthaus mit Öffnungen, welche den Turbinendurchfluss simulieren). Das Modell wurde nach dem Froude'schen Gesetz betrieben.<sup>13</sup> In Tabelle 3 sind die Kenndaten der Abflüsse im Modell und in der Natur angegeben.

**Tabelle 3: Relevante Abflüsse im Modellversuch KW Schönau**<sup>14</sup>

	<b>Q [m<sup>3</sup>/s] Natur</b>	<b>Q [l/s] Modell</b>
<b>Q<sub>A</sub></b>	286	28,3
<b>HQ<sub>1</sub></b>	750	74,1
<b>HQ<sub>10</sub></b>	1350	133,4

Das Flussmodell entspricht einer Naturlänge von etwa 950 m (ca. 530 m oberhalb bis ca. 360 m unterhalb des Kraftwerkes).<sup>15</sup>

Der Geschiebetransport wird in 2 Phasen als feste Sohle (Abbildung 9,10 und 11) und bewegliche Sohle (Abbildung 12 ,13 und 14) erfasst.

<sup>13</sup> Vgl.: Zenz, G. et al., 2010, "Gutachten Kraftwerk Schönau hydraulischer Modellversuch". [23]

<sup>14</sup> Knoblauch, H., 2010, "Hydraulisches Versuchswesen". [13]

<sup>15</sup> Vgl.: Zenz, G. et al., 2010, "Gutachten Kraftwerk Schönau hydraulischer Modellversuch". [23]

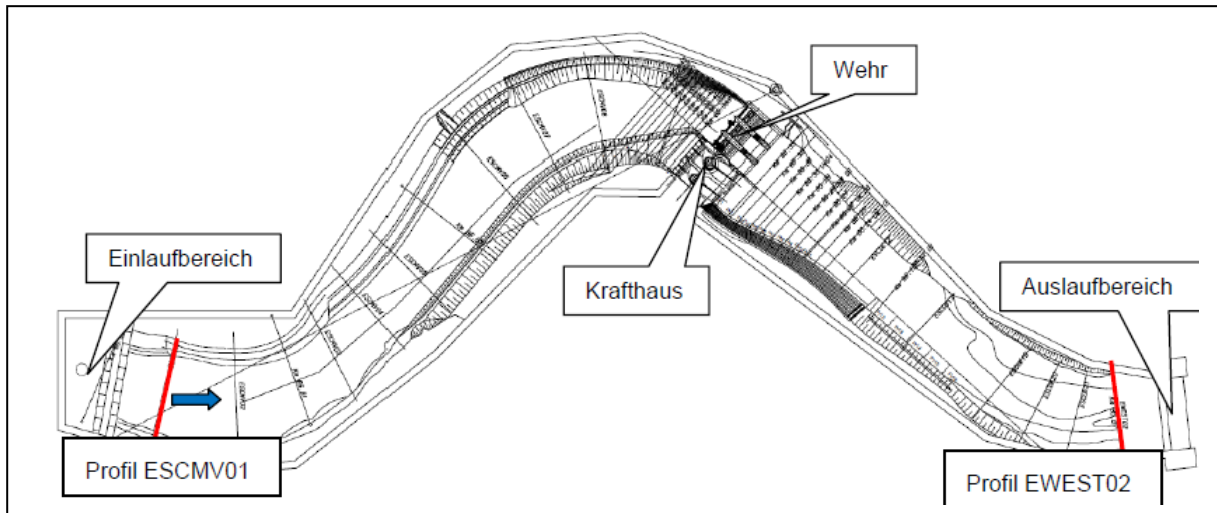


Abbildung 8: Modelllageplan <sup>16</sup>



Abbildung 9: Blick vom Oberwasser Richtung Wehranlage <sup>17</sup>

<sup>16</sup> Zenz, G. et al., 2010, "Gutachten Kraftwerk Schönau hydraulischer Modellversuch". [23]

<sup>17</sup> Zenz, G. et al., 2010, "Gutachten Kraftwerk Schönau hydraulischer Modellversuch". [23]

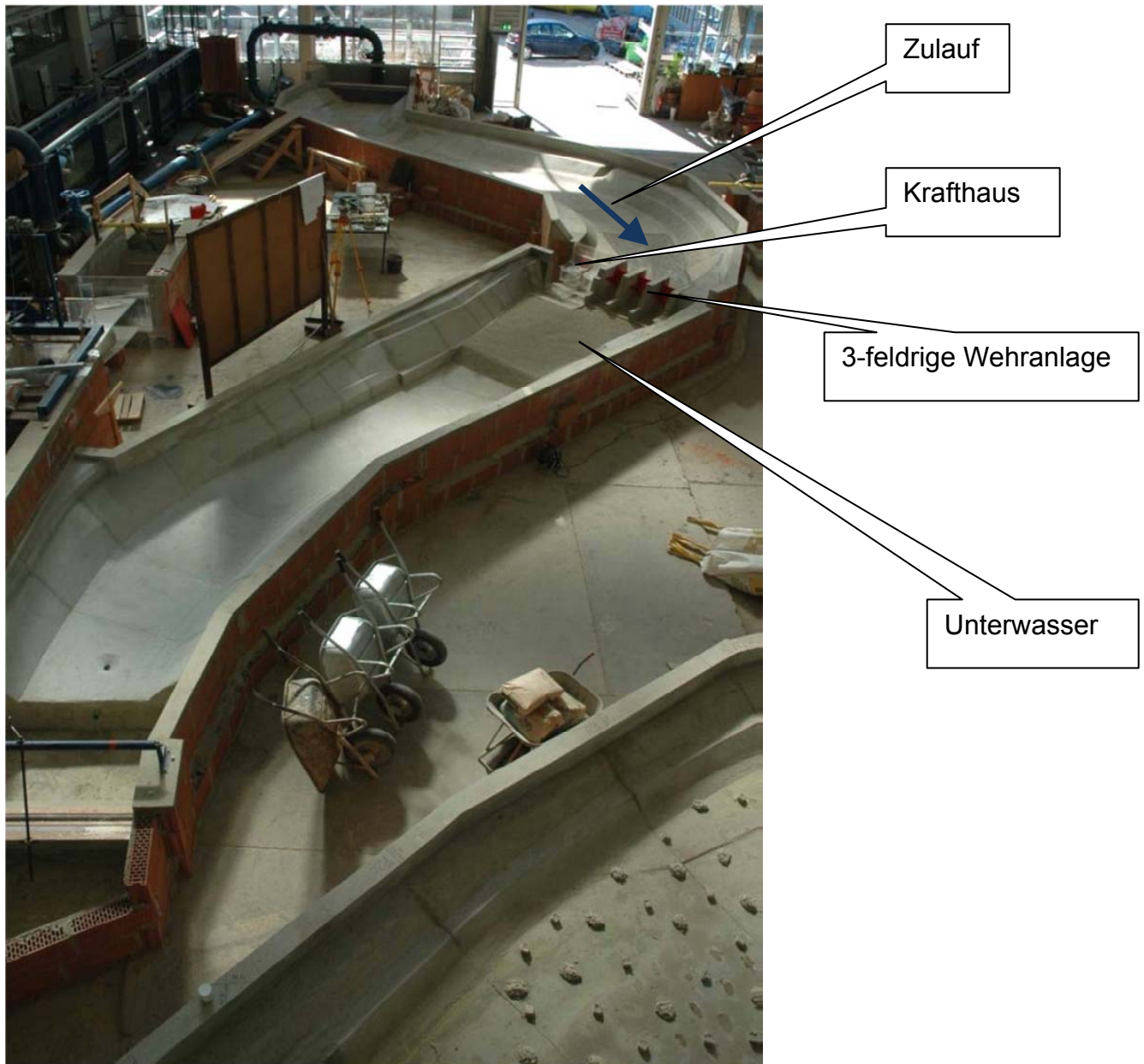


Abbildung 10: Zulauf, Krafthaus, 3-feldrige Wehranlage, Unterwasser <sup>18</sup>

In Abbildung 10 kann man Zulauf, Krafthaus, 3-feldrige Wehranlage und Unterwasser sehen.

<sup>18</sup> Knoblauch, H., 2010, "Hydraulisches Versuchswesen". [13]



Abbildung 11: Gesamtmodell M 1:40<sup>19</sup>

## 2.2 Geschiebeversuche mit beweglicher Sohle

Die Oberwassersohle 2002 wurde als bewegliche Flusssohle in Ziegelsplitt modelliert (Abbildung 12 bis Abbildung 14). Mit verschiedenen Lastfällen und unterschiedlichen Versuchsdauern wurde ein Abfluss ohne Turbinenbetrieb bzw. ein Betrieb mit 2-Turbinenbetrieb untersucht. Der Endzustand der Versuche wurde mit Fotos dokumentiert und gescannt. Zum Beispiel wurde bei einer Versuchsdauer von 4 Stunden im Modell ( $\approx 24$  Stunden in der Natur) der Lastfall 4 ( $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , freier Durchfluss, kein Turbinenbetrieb) untersucht. Das Plateau vor den Einläufen zu den Turbinen wurde ca. 1,2 m mit Ablagerungen überdeckt (von 390 m.ü.A. auf 391,2 m.ü.A.) (Abbildung 12). Im Unterwasser kam es zu massiven Anlandungen im Turbinenauslaufbereich (Abbildung 13).<sup>20</sup>

<sup>19</sup> Zenz, G. et al., 2010, "Gutachten Kraftwerk Schönau hydraulischer Modellversuch". [23]

<sup>20</sup> Vgl.: Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]



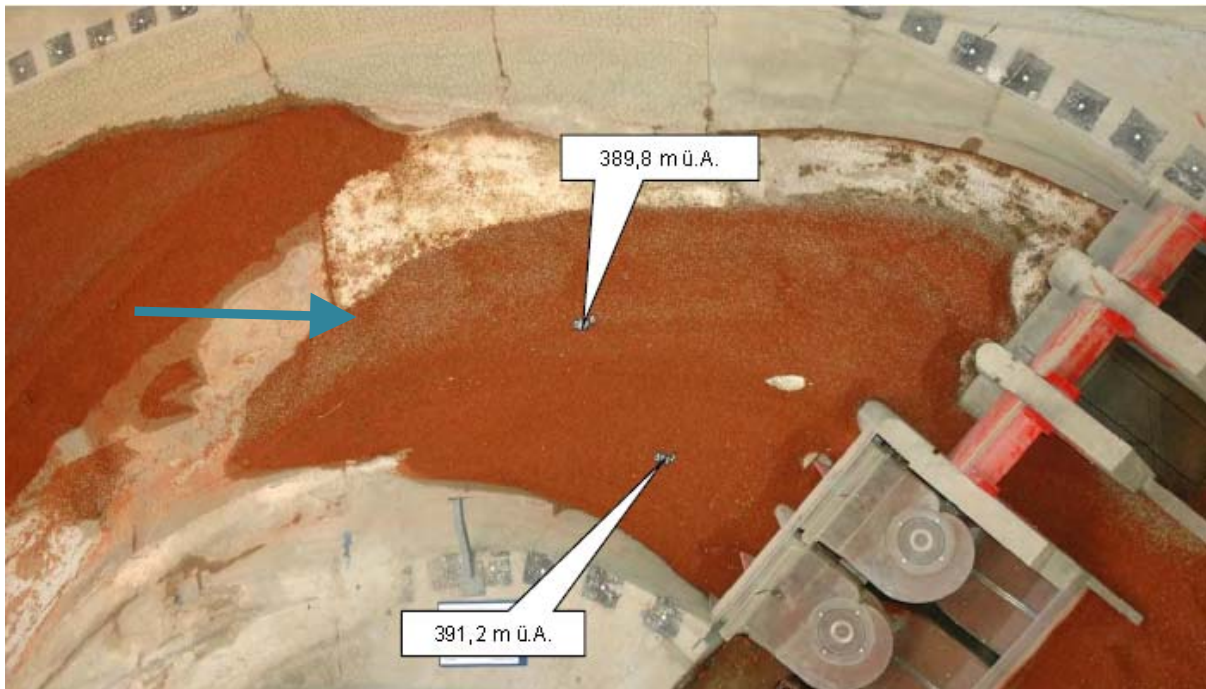


Abbildung 12: Geschiebeversuch mit beweglicher Sohle <sup>21</sup>

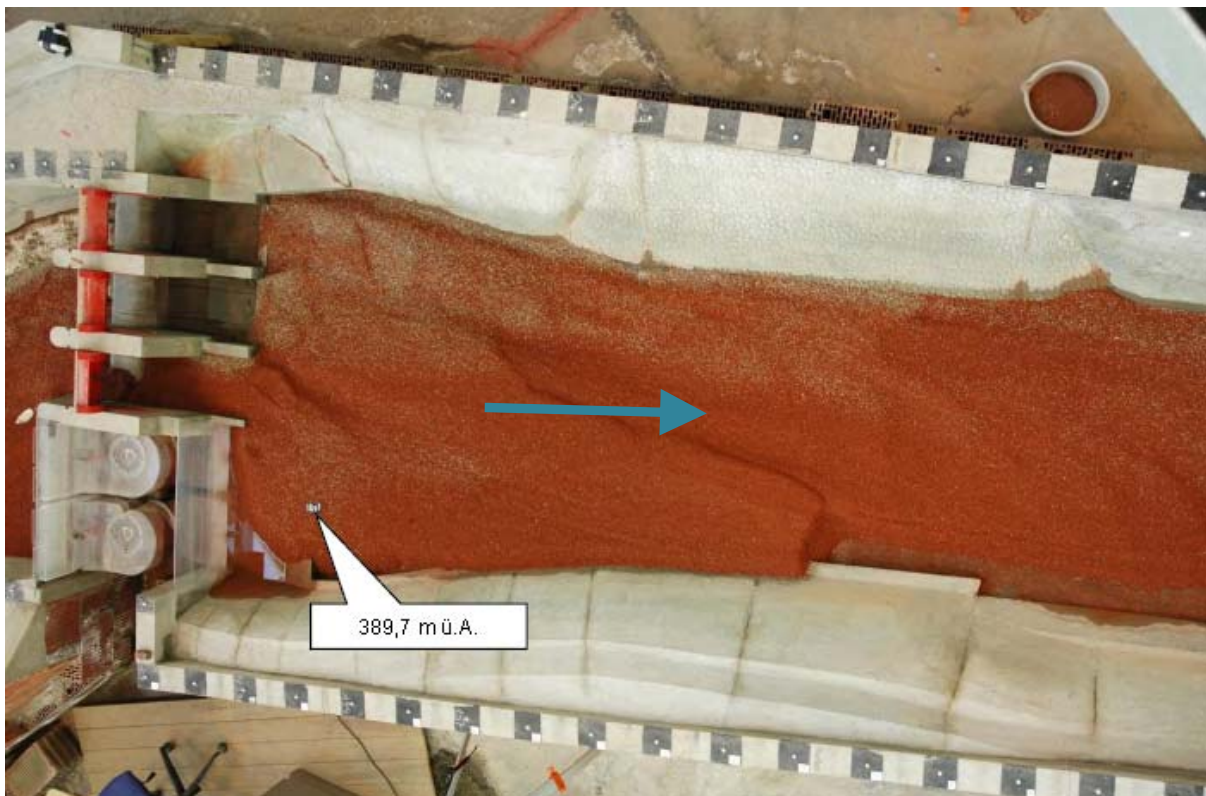


Abbildung 13: Geschiebeversuch mit beweglicher Sohle <sup>22</sup>

<sup>21</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]

<sup>22</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]



**Abbildung 14: Einbau bewegliche Sohle 2002 aus Ziegelsplitt**<sup>23</sup>

Aus den Berechnungen und Messungen lässt sich ableiten, dass sich die Fließgeschwindigkeiten in Fließrichtung und die Sohlschubspannungen durch die Stauzielabsenkung erhöhen, aber der Rückströmbereich größer wird. Bei dem Lastfall mit  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ , Oberwasserspiegel, 398,0 m.ü.A., 2-Turbinenbetrieb und dem Lastfall mit  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ , Oberwasserspiegel, 398,0 m.ü.A., kein Turbinenbetrieb zeigten sich ähnliche Ergebnisse wie bei dem Lastfall  $HQ1=750 \text{ m}^3/\text{s}$ , Oberwasserspiegel, 400,5 m.ü.A., 2-Turbinenbetrieb. Der Geschiebeversuch mit beweglicher Sohle hat gezeigt, dass das Sohlmaterial nur geringfügig ausgetragen wurde, der Großteil des Materials wurde umverteilt. Es bildete sich eine Anlandung im Bereich des Pegels

<sup>23</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]



vor der Einlaufschwelle zu den Turbinen. Die maximale Höhe dieser Ablagerungen betrug 395,5 m.ü.A. <sup>24</sup>

Die Abbildung 15 zeigt den Geschiebeversuch mit beweglicher Sohle und die maximale Höhe dieser Ablagerungen (Sohlaufnahme nach 18 Stunden im Modell).

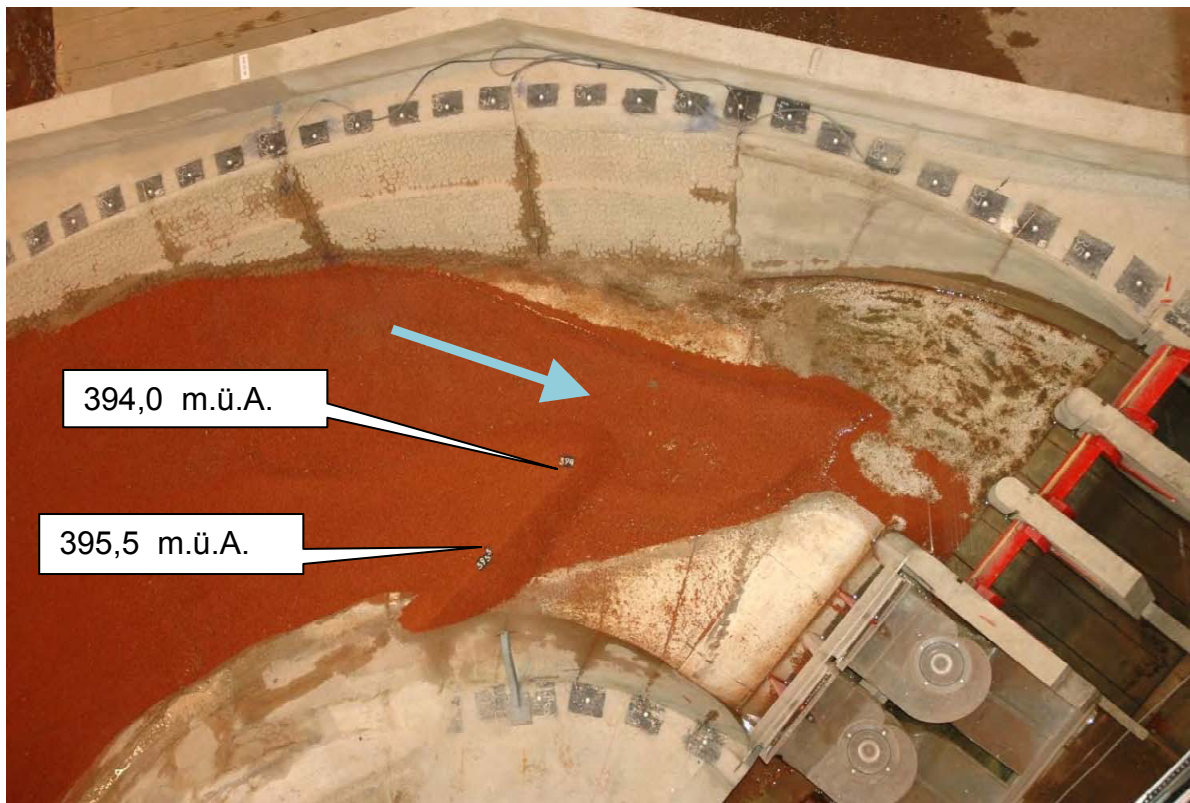


Abbildung 15: Geschiebeversuch mit beweglicher Sohle und Stauabsenkung <sup>25</sup>

<sup>24</sup> Vgl.: Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]

<sup>25</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]

## 2.3 Einbau einer Einlaufschwelle

Im physikalischen Modell wurde im Turbineneinlaufbereich eine Einlaufschwelle auf 395,0 m.ü.A. mit seitlicher Trennwand zwischen Wehr und Krafthaus eingebaut, um den gesamten Geschiebeeintrag in die Wehrfelder zu leiten (Abbildung 16, Abbildung 17).<sup>26</sup>



Abbildung 16: Kraftwerk Schönau Model (Variante Einlaufschwelle)<sup>27</sup>

<sup>26</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]

<sup>27</sup> Foto: Shafaroudi, S.



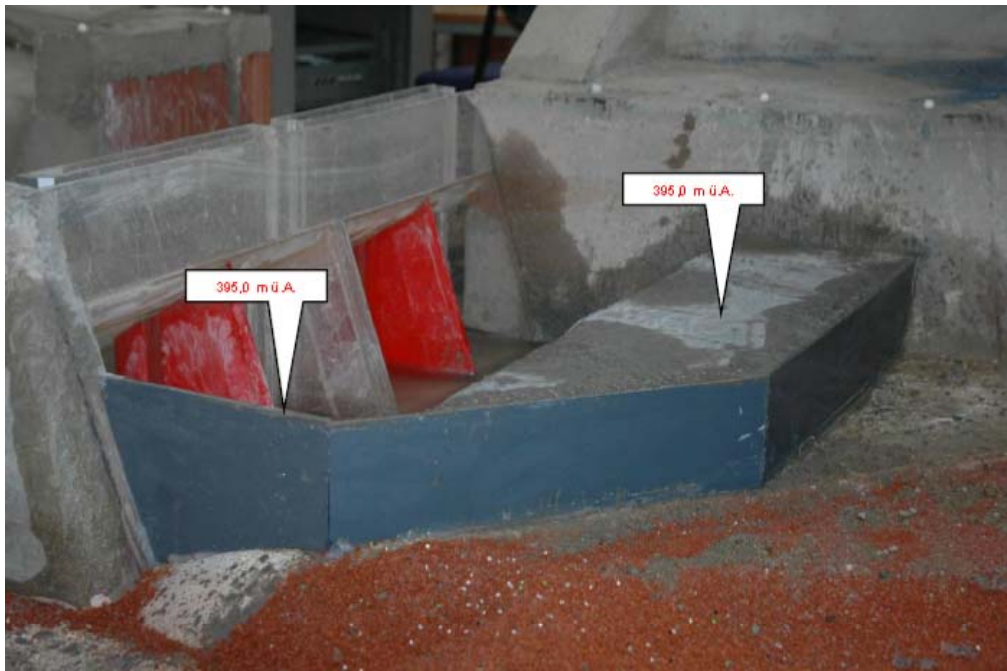


Abbildung 17: Kraftwerk Schönau Model (Variante Einlaufschwelle) <sup>28</sup>

## 2.4 Ziel des Sedimentmodellversuches im Glasgerinne

Der Geschiebetransport im Flussbett ist eine der wichtigsten Fragestellungen für den Bau und den Betrieb von den Wasserkraftwerken. Die Auswirkungen des Geschiebetransports auf ein Wasserkraftwerk können im Modellversuch beobachtet werden. Die Verwendung von Geschiebe im physikalischen Modell ist immer mit Schwierigkeiten in Hinblick der Vergleichbarkeit zwischen Natur und Modell verbunden. Die Schubspannung im Flussbett hat eine wichtige Rolle in den Fließformeln. Die Messung der Geschwindigkeit direkt an der Sohle ist äußerst schwierig. Mit der Hilfe eines Modellversuchs im Glasgerinne sollen die Parameter des Geschiebetransports festgestellt werden. Die Ergebnisse können helfen, die Abhängigkeit des Sediments von der Schubspannung darzustellen, beziehungsweise das passende Geschiebe für den Modellversuch zu ermitteln.

<sup>28</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]

## 3 Grundlagen des Feststofftransports

### 3.1 Sedimenttransport in Flüssen

Die langfristige Entwicklung eines natürlichen Flusses wird in der Regel von den Prozessen des Sedimenttransports beeinflusst. Die ständige Interaktion zwischen der Strömungsrichtung, den Auswirkungen wechselnder Abflüsse auf Erosion, dem Transport und die Ablagerung von Sedimenten sowie die Auswirkungen von Störungen (z.B.: durch Wurzeln von Bäumen) sind die Gründe, warum sich natürliche Flüsse mäanderförmig ausbilden und die unterschiedlichsten Strukturen aufweisen.<sup>29</sup>

Die hohe Zahl der empirischen Parameter in den Sedimenttransportberechnungsformeln werden dadurch beeinflusst. Viele Beziehungen sind immer noch nicht eindeutig geklärt, da die Parameter variieren. Die Gültigkeit von Formeln ist somit immer auf spezielle Rahmenbedingungen und Annahmen beschränkt. Bei den Berechnungen für den Sedimenttransport kann man daher nicht exakte Ergebnisse erwarten.<sup>30</sup>

Oft stellen die Ergebnisse einer Sedimenttransportberechnung lediglich eine Prognose dar, weil die Resultate die Unsicherheiten der Annahmen beinhalten.<sup>31</sup>

---

<sup>29</sup> Vgl.: Bechteler, W., 2002, "Geschiebemessungen". [4]

<sup>30</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

<sup>31</sup> Vgl.: Gonsowski, P. et al. 2011, "Wasserbau". [10]

### 3.1.1 Systematik

Außer Wasser werden auch andere Stoffe von den Fließgewässern transportiert. Diese ungelösten Materialien werden in diesem Kapitel behandelt.<sup>32</sup> Die Systematik des Feststofftransportes ist schematisch in Abbildung 18 dargestellt.

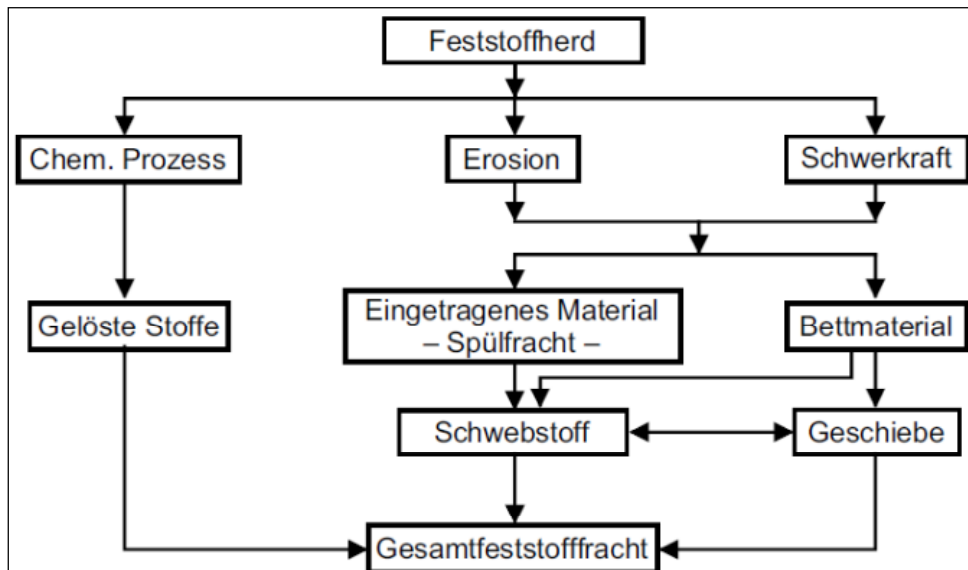


Abbildung 18: Schema zum Feststofftransport<sup>33</sup>

Bei der Herkunft der jeweiligen eingetragenen Materialien ist zwischen Spülfrachtmaterial und Bettungsmaterial zu unterscheiden (Abbildung 18). Die feinkörnige Spülfracht wird fast ausschließlich in Form von suspendierten Feststoffen (Schwebstoff) transportiert. Das Bettungsmaterial ist abhängig von Abfluss, Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Fließgeschwindigkeitsverteilung, Gefälle, Korngröße und Korngrößenverteilung. Das Bettungsmaterial bewegt sich entweder als Geschiebe oder als Schwebstoff. Schwimmende Feststoffe sind in der Regel organischen Ursprungs (Zum Beispiel Blätter, Bäume).<sup>34</sup>

<sup>32</sup> Vgl.: Gonsowski, P. et al. 2011, "Wasserbau". [10]

<sup>33</sup> Patt, H. 2004, "Naturnahe Wasserbau". [16]

<sup>34</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnahe Wasserbau". [16]

### 3.1.2 Transportarten

Die Feststoffmaterialien kommen aus den seitlichen Gewässern oder aus den Sohlen und Banken des Flusses. Die Grenzen zwischen den verschiedenen Transportarten sind nicht immer eindeutig identifizierbar.

Beim Schwebstofftransport bewegen sich die Feststoffteilchen ohne Sohlenkontakt in der Strömung mit. Für diese Transportart sind die Sinkgeschwindigkeiten der Feststoffe (d. h. Korndurchmesser, Korndichte, Kornform und Dichte des Wassers) und die Strömungsparameter (d. h. Geschwindigkeitsverteilung im Gerinne und Turbulenzen) Einflussfaktoren. Im Unterlauf des Flusses hat der Schwebstofftransport nur wenig Einfluss auf die gewässermorphologischen Strukturen.

Der Transport von Sediment spielt sich in den sohlennahen Bereichen ab und ist daher einer der wichtigsten Faktoren bei der Gestaltung des Flussbettes. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn Querbauwerke zum Beispiel Wehre die Längsdurchgängigkeit unterbrechen. Erosions- und Sedimentationsprozesse wechseln in einem natürlichen Fluss ständig einander ab und charakterisieren das Geschiebebudget einer Gewässerstrecke.<sup>35</sup>

## 3.2 Physikalische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften von Wasser und Feststoff, sowie Korndurchmesser für nicht kohäsive Sohlen, also typische Sand und Kiessohlen, sind für den Sedimentversuch wichtig.

Neben der Dichte  $\rho_w$  und der kinematischen Zähigkeit  $\nu_w$  des Wassers (beide als Funktion der Temperatur) sind die Dichte des Feststoffes  $\rho_F$  und dessen Korngrößenverteilung von entscheidender Bedeutung für den Transport vom Sedimenten. Als Eingangsgröße für die Berechnungsformeln wird in der Regel ein charakteristischer Korndurchmesser  $d_{ch}$  verwendet, der die Eigenschaften des Korngemisches widerspiegeln soll.<sup>36</sup>

---

<sup>35</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

<sup>36</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

### 3.2.1 Transportbeginn

Der Aufbau der Gewässersohle hat Einfluss auf deren Stabilität. Abpflasterungsschichten verfestigen die Sohle durch ihren Kornaufbau.<sup>37</sup> Größere Körner sind der Strömung stärker exponiert, halten dafür aber größeren Strömungskräften stand. Kleinere Körner haben einen kleineren Erosionwiderstand, werden aber zwischen den größeren abgeschirmt (Hiding-Effekt; Abbildung 19).<sup>38</sup>

In den Feststofftransportberechnungen werden die verschiedenen Arten der Lagerung durch die Wahl eines charakteristischen Korndurchmessers berücksichtigt.<sup>39</sup>

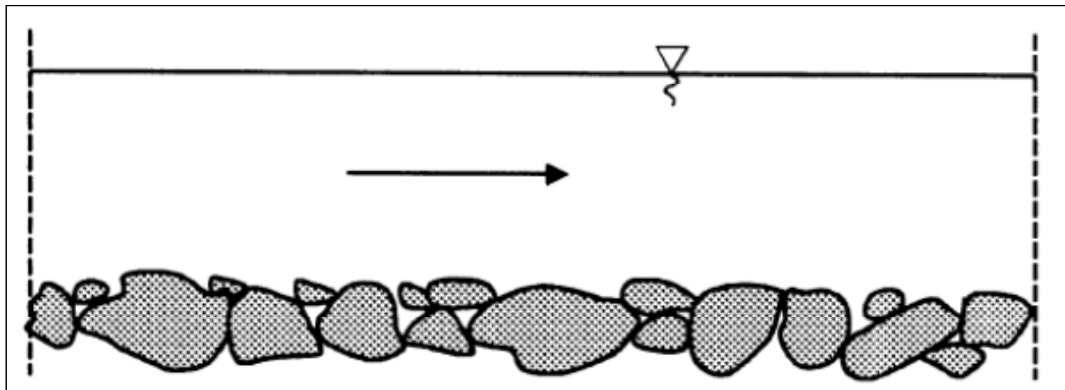


Abbildung 19: Hiding-Effekt bei der Ausbildung der Gewässersohle<sup>40</sup>

Der Großteil der Messdaten, die zur Ableitung von Transportgleichungen verwendet werden, stammen aus Laborstudien. Die Formeln sind in der Regel nur für nicht-bindiges rolliges Material mit  $d > 0,1$  mm gültig. Rechnerisch kann der Bewegungsbeginn über die kritische Geschwindigkeit oder die kritische Schubspannung ermittelt werden.

<sup>37</sup> Vgl.: Gonsowski, P. et al. 2011, "Wasserbau". [10]

<sup>38</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnahe Wasserbau". [16]

<sup>39</sup> Vgl.: Gonsowski, P. et al. 2011, "Wasserbau". [10]

<sup>40</sup> Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]

### 3.2.2 Kritische Geschwindigkeit

Hjulström (1935) hat den Bewegungsbeginn von Quarzsand in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit  $V_m$  und dem charakteristischen Korndurchmesser  $d_{ch}$  gezeigt (Abbildung 20).

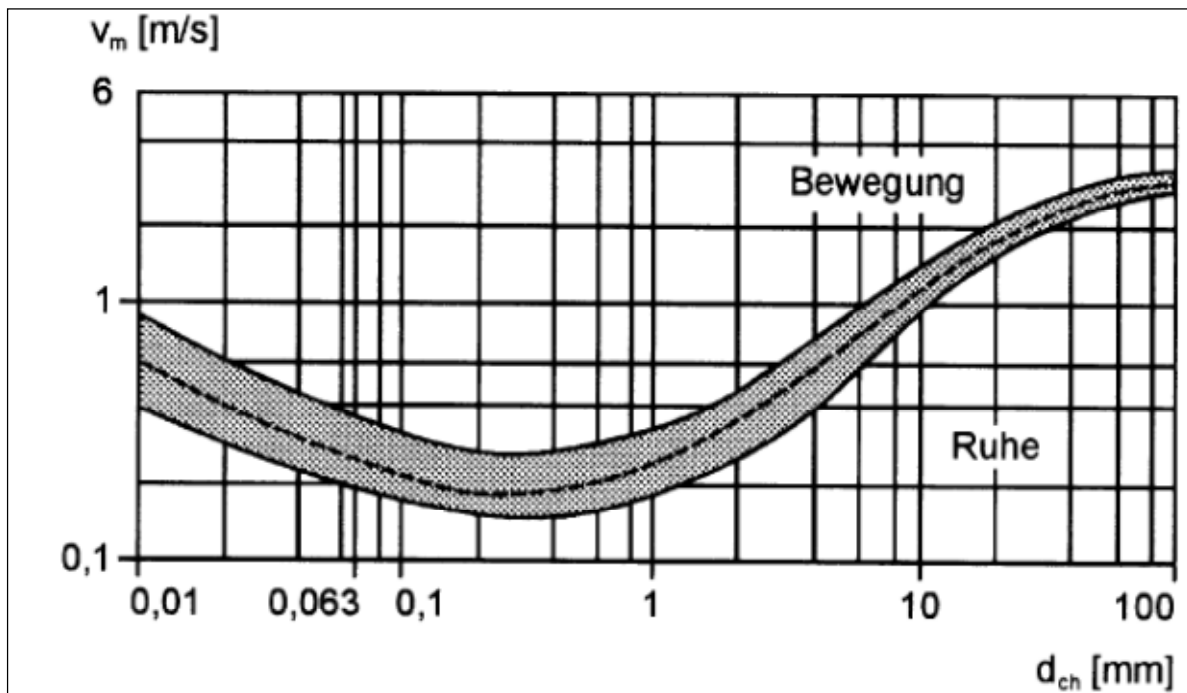


Abbildung 20: Bewegungsbeginn für Quarzmaterial (nach Hjulström, 1935) <sup>41</sup>

Das Diagramm bezieht sich nur auf weitgehend flache Gewässersohlen mit einem hydraulisch großen Umfang und für Wassertiefen von mehr als etwa 1 Meter. Es wird empfohlen, das Diagramm nur bis  $d \approx 0,1$  mm zu benutzen. Der Transportbeginn von kohäsiven Materialien ist nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Unsicherheiten bei der Bestimmung des Bewegungsbeginns ist der Verlauf durch ein „Band“ dargestellt. Oberhalb des „Bandes“ liegt der Bereich „Bewegung“, darunter der Bereich „Ruhe“. Durch Verwendung der oberen (Bewegung mit hoher Wahrscheinlichkeit) oder der unteren Grenzkurve (geringe Bewegungswahrscheinlichkeit) kann das Bewegungsrisiko berücksichtigt werden. <sup>42</sup>

<sup>41</sup> Bechteler, W., 1992, „Geschiebemessungen“. [2]

<sup>42</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, „Naturnaher Wasserbau“. [16]

Eine empirische Beziehung mit der, die kritische mittlere Geschwindigkeit  $V_{m,cr}$  unter Berücksichtigung von Wassertemperatur und Adhäsion bestimmt wurde, entstammt Zanke (1982). Die Gleichung lautet:

$$V_{m,cr} = 2,8 \cdot (\rho' \cdot g \cdot d_{ch})^{0,5} + 14,7 \frac{\nu}{d_{ch}} \cdot c_a$$

Formel 1

$V_{m,cr}$  kritische mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

$$\left( \rho' = \frac{\rho_F - \rho_W}{\rho_W} \right)$$

Formel 2

$\rho'$  relative Feststoffdichte [-]

$g$  Fallbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$d_{ch}$  charakteristischer Durchmesser [m]

$\nu$  Zähigkeit des Wassers [m<sup>2</sup>/s]

$C_a$  Adhäsion [-]

Die Formel gilt für Wassertiefen  $h$  zwischen 0,7 und 2,0 [m] (im Mittel 1,4 [m]). Für natürliche Sande ist die Adhäsion  $C_a = 1$  [-] anzunehmen. <sup>43</sup>

### 3.2.3 Kritische Schubspannung

Die auf das Flussbett wirkende Schubspannung ist nicht gleichmäßig über den ganzen Querschnitt verteilt, sondern in Abhängigkeit vom Gerinneprofil. Es wird unterschieden zwischen den Schubspannungen an den seitlichen Wänden oder Böschungen und der Fließgewässersohle. In einem Trapezprofil wird beispielsweise in etwa eine Verteilung wie in Abbildung 21 und Abbildung 22 gezeigt, auftreten. <sup>44</sup>

<sup>43</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

<sup>44</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

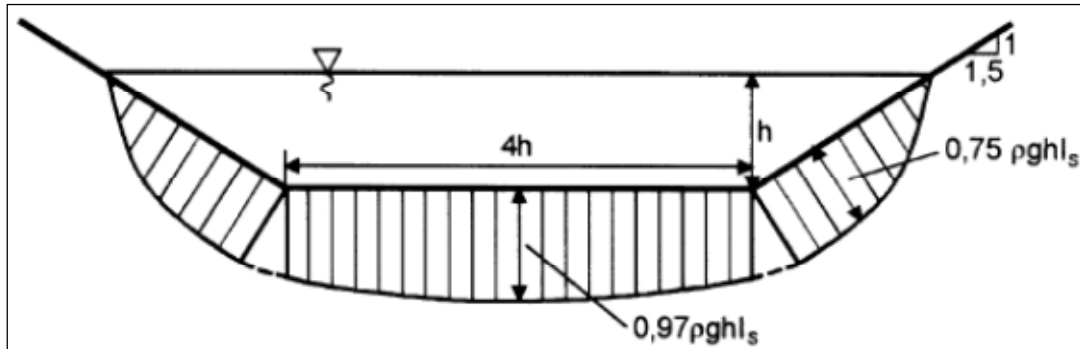


Abbildung 21: Verteilung der Schubspannung in einem trapezförmigen Gerinnequerschnitt <sup>45</sup>

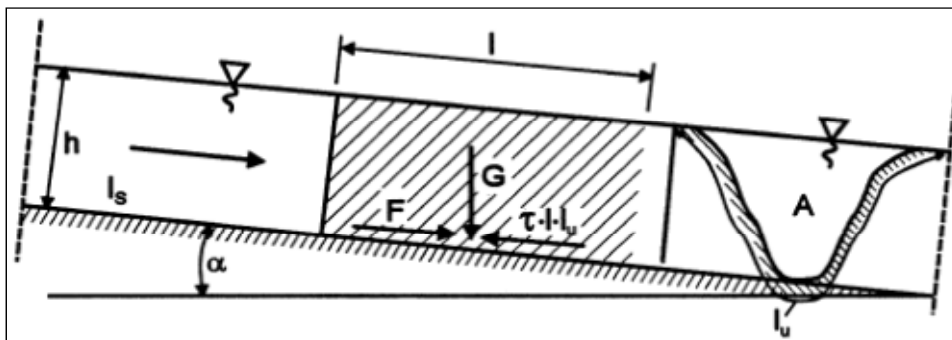


Abbildung 22: Schema zum Schubspannungsansatz im Gewässerbett <sup>46</sup>

Die Gewichtskraft des Wasserkörpers **G** ergibt sich aus:

$$G = l \cdot A \cdot \rho_w \cdot g \quad [\text{N}]$$

Formel 3

- G**      Gewichtskraft des Wasserkörpers [N]
- l**      Länge des Wasserkörpers [m]
- A**      Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]
- ρ<sub>w</sub>**    Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]
- g**      Fallbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]
- h**      Wassertiefe [m]

<sup>45</sup> Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

<sup>46</sup> Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]



Die Komponente der Gewichtskraft  $\mathbf{F}$  des Wasserkörpers in Fließrichtung beträgt (bei kleinen Winkeln  $\alpha$  kann vereinfacht  $\sin\alpha \approx I_s$  angenommen werden):

Formel 4

$$F = G \cdot \sin\alpha = G \cdot I_s = l \cdot A \cdot \rho_w \cdot g \cdot I_s \quad [\text{N}]$$

$I_s$                       Sohlengefälle [-]

$\tau$                         Schubspannung [ $\text{N/m}^2$ ]

Aus der Gleichgewichtsbedingung  $\mathbf{F} = \boldsymbol{\tau} \cdot l \cdot l_u$  ergibt sich

Formel 5

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_s \quad [\text{N/m}^2]$$

mit

$r_{hy} = A / l_u$             hydraulischer Radius [m]

$l_u$                       benetzter Umfang [m]

Für breite (Rechteck-) Gerinne gilt (Gerinnebreite  $\mathbf{b} \gg \mathbf{h}$ ):

Formel 6

$$r_{hy} = \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{b \cdot h}{b + 2h} \approx \frac{b \cdot h}{b} = h \quad [\text{m}]$$

Damit vereinfacht sich zu:

Formel 7

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

Mit Hilfe dieser Beziehung soll die Schubspannung für den Beginn des Transportes bestimmt werden. Wenn die Schubspannung in der Sohle  $\boldsymbol{\tau}$  einen kritischen Wert  $\boldsymbol{\tau}_{cr}$  überschreitet, ist theoretisch das Sohlenmaterial in Bewegung.

### 3.2.4 Bewegungsbeginn nach Shields

Shields (1936) hat für die auf die Kornrauheit der Sohle wirkenden Kräfte ein dimensionsloses Diagramm entwickelt (Abbildung 23). Dieses Diagramm wurde von Zanke (1990) um die Bereiche der unteren Schubspannungen erweitert. weitere wurde bei Werten über die Wahrscheinlichkeit des Bewegungsbeginns zur Verfügung gestellt (Abbildung 24).<sup>47</sup> Das Shields-Diagramm ist bis heute die am meisten benutzte Grundlage für Untersuchungen über den Bewegungsbeginn von Geschiebe.<sup>48</sup>

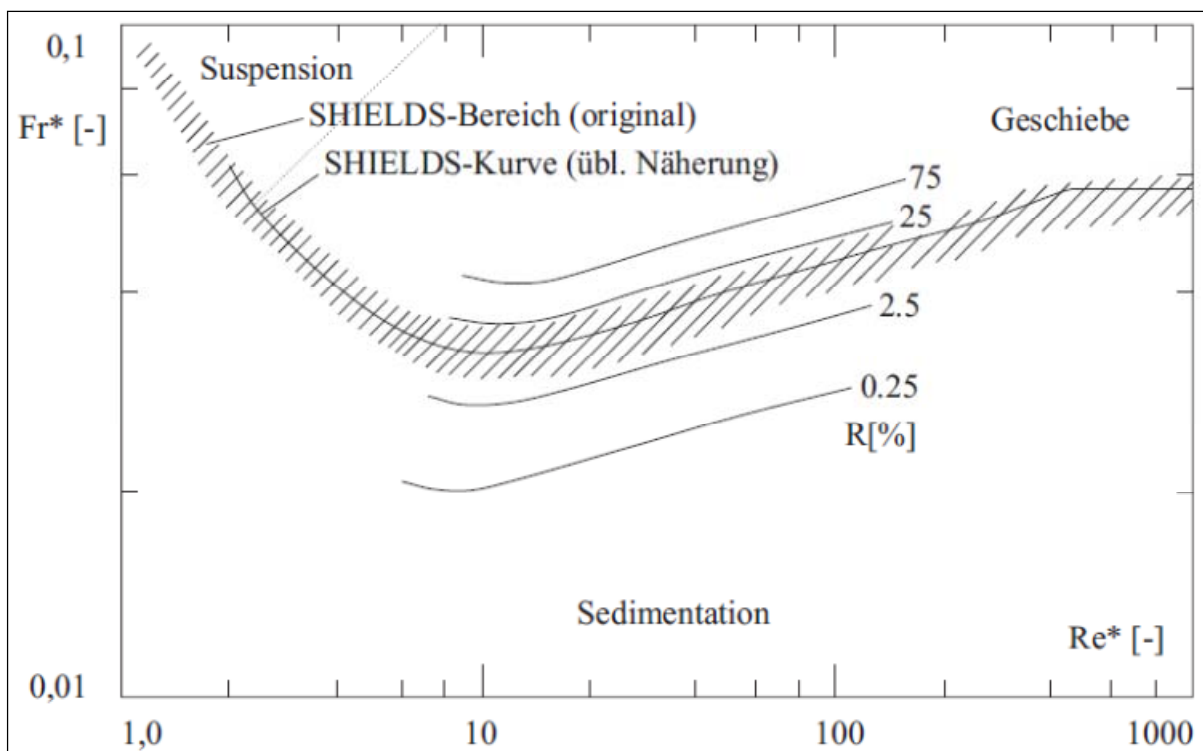


Abbildung 23: Shields-Diagramm ergänzt um das Bewegungsrisiko R<sup>49</sup>

<sup>47</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

<sup>48</sup> Vgl.: Bollrich, G. et al. 1989, "Technische Hydromechanik". [5]

<sup>49</sup> Giesecke, J. et al. 2009, "Wasserkraftanlagen". [9]

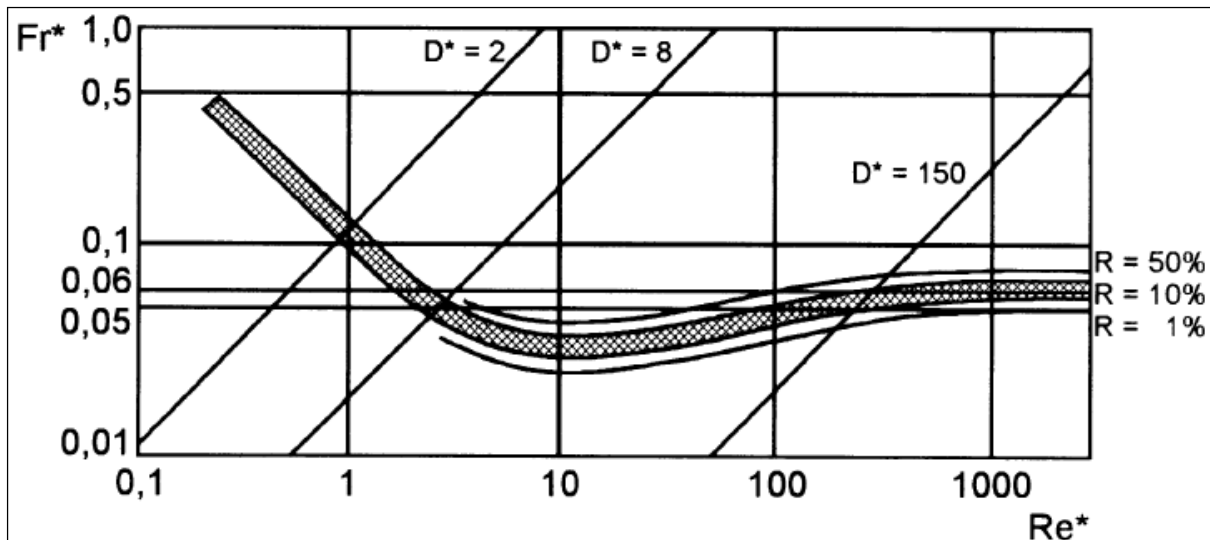


Abbildung 24: Bewegungsbeginn nach Shields (1936) mit Angabe des Bewegungsrisikos ( $R$ ) nach Zanke (1990)<sup>50</sup>

Der kritischen Schubspannung nach Shields (1936) hat eine Bewegungswahrscheinlichkeit von 10%. Es bedeutet, dass 10% Körner an der Gerinnesohle in Bewegung sein sollen. Als Eingangsgrößen für das Diagramm werden folgende Formeln benötigt:<sup>51</sup>

Feststoff-Reynoldszahl  $Re^*$ :

$$Re^* = \frac{V_0^* \cdot d_{ch}}{\nu} \quad [-]$$

Formel 8

$V_s = V_0^*$  Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]

Durch Versuche wurde festgestellt, dass sich die folgenden Zahlenwerte ergeben, (siehe Tabelle 4) die für  $Re^*$  gültig sind. Diese Zahlenwerte liegen im Bereich einer hydraulisch glatten Strömung, (siehe Abbildung 25) zu einer übergangsweise rauhen und bis zu einer hydraulisch rauhen Strömung (siehe Abbildung 26):<sup>52</sup>

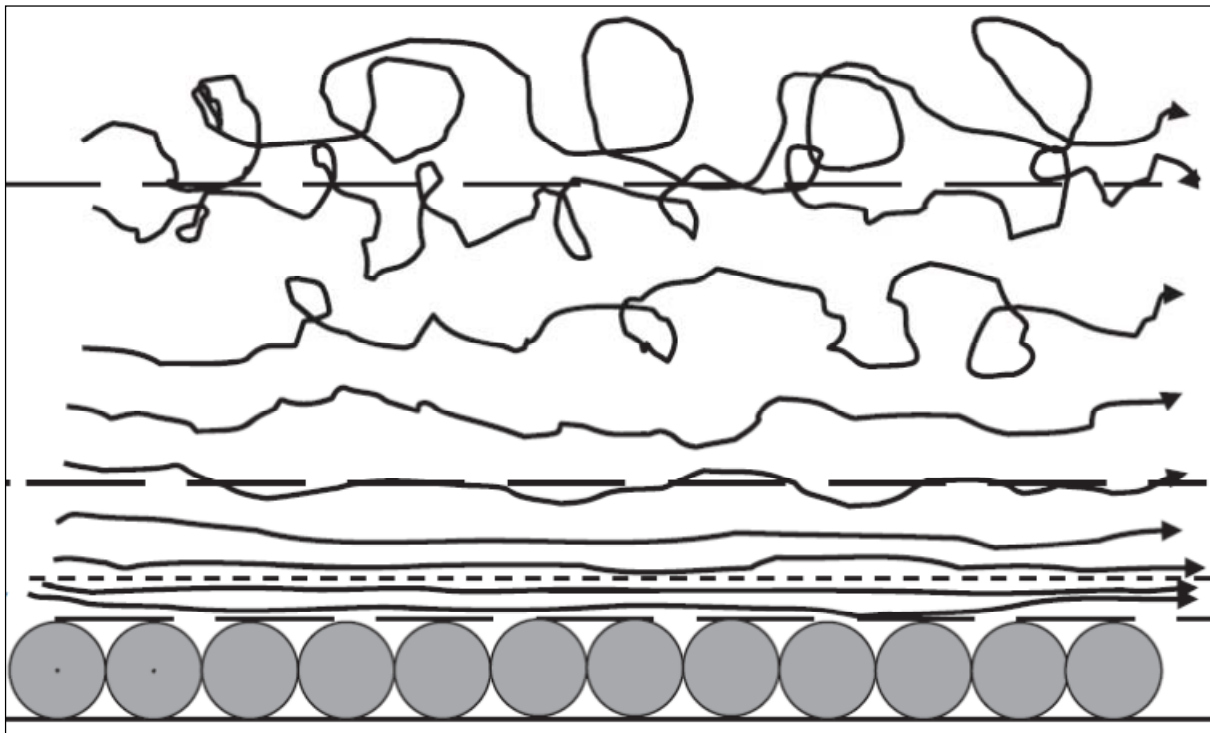
<sup>50</sup> Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]

<sup>51</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

<sup>52</sup> Vgl.: Dingman, S. L. 2009, "Fluvial hydraulics". [7]

Tabelle 4:  $Re^*$  und Strömung

Strömung	$Re^*$
glatt	$>5$
übergangsweise rau	5–70
rau	$>70$

Abbildung 25: Schematische Darstellung der hydraulisch glatten Strömung<sup>53</sup>

<sup>53</sup> Dingman, S. L. 2009, "Fluvial hydraulics". [7]

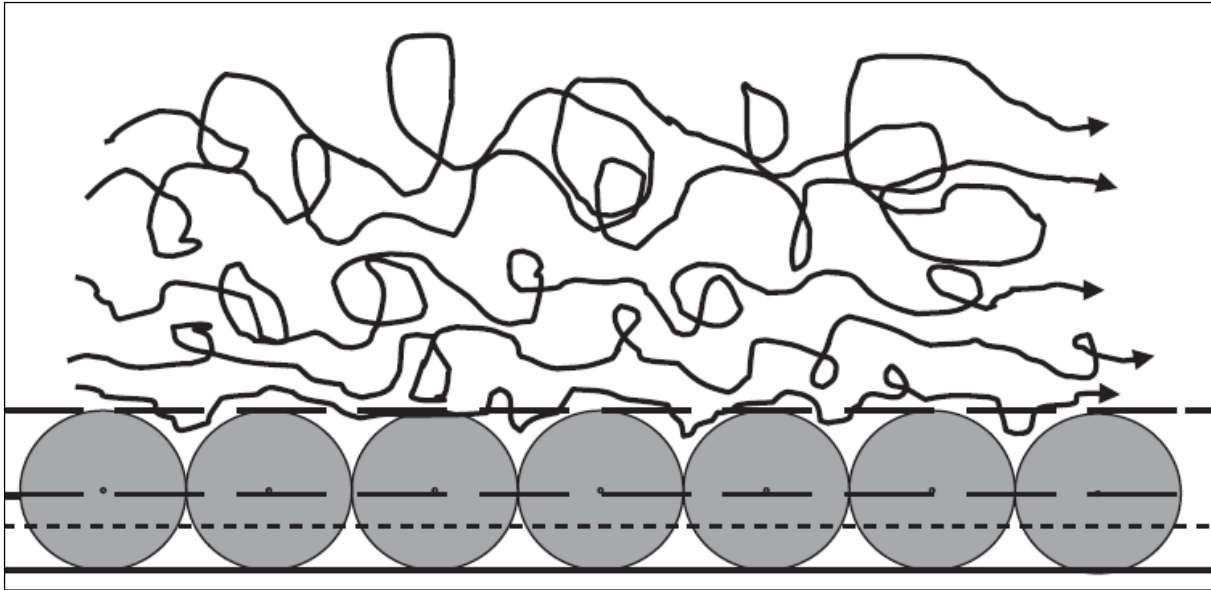


Abbildung 26: Schematische Darstellung der hydraulisch groben turbulenten Strömung <sup>54</sup>

Feststoff-Froudezahl  $Fr^*$ :

Formel 9

$$Fr^* = \frac{V_0^{*2}}{\rho' \cdot g \cdot d_{ch}} \quad [-]$$

sedimentologischer Durchmesser  $D^*$ :

Formel 10

$$D^* = \left( \frac{\rho' \cdot g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_{ch} = \left( \frac{Re^{*2}}{Fr^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [-]$$

relative Feststoffdichte  $\rho'$ :

Formel 11

$$\rho' = \frac{\rho_F - \rho_W}{\rho_W} \quad [-]$$

Die Schubspannungsgeschwindigkeit  $V_s = V_0^*$  an der Sohle beträgt:

Formel 12

$$V_0^* = \sqrt{g \cdot r_{hy} \cdot I_s} \quad [m/s]$$

<sup>54</sup> Dingman, S. L. 2009, "Fluvial hydraulics". [7]

$$V_S = \sqrt{\frac{\tau_S}{\rho_W}} \quad [\text{m/s}]$$

$d_{ch}$  Sedimentkorndurchmesser [m]

Im hydraulisch glatten Bereich ist  $\mathbf{Fr}^* \approx 0,1/\mathbf{Re}^*$  (d.h. viskosen Kräfte dominieren). Im hydraulisch ganz rauen Bereich ( $\mathbf{Re}^* > 300$  bzw.  $\mathbf{D}^* \approx 150 \rightarrow d_s \approx 0,06 \text{ cm}$ ) ist  $\mathbf{Fr}^*$  nicht mehr von  $\mathbf{Re}^*$  abhängig. In diesem Bereich werden Druckkräfte und Formwiderstände für den Start des Transports ausschlaggebend. Zwischen den beiden Bereichen liegt eine Übergangszone, die große praktische Bedeutung hat. Die untere Grenze der Gültigkeit des Shields-Diagramms ist  $\mathbf{D}^* \approx 1$ , d.h.  $d_{ch} \approx 0,05 \text{ mm}$ .<sup>55</sup>

### 3.3 Geschiebetransportformeln

In den Sedimenttransportberechnungen werden die verschiedenen Arten der Lagerung durch die Wahl eines geeigneten charakteristischen Korndurchmessers (z.B. der mittlere Korndurchmesser  $d_m$ ) bestimmt. Das ist natürlich eine Vereinfachung der praktischen Verhältnisse. Bei der Berechnung des Transportbeginns ist bei intakter Oberflächendeckschicht von den mittleren Korndurchmessern  $d_{m,DS}$  der Oberflächendeckschicht auszugehen. Dieser entspricht dem 90%-Siebdurchgang der Unterflächendeckschicht (US) oder kurz  $d_{90,US}$ . Bei zerstörter oder fehlender Deckschicht muss der mittlere Durchmesser der Unterflächendeckschicht  $d_{m,US}$  verwendet werden.<sup>56</sup>

Der Geschiebetransport passiert (= Transportbeginn), wenn die aktuelle Schubspannung eine kritische Größe, die sog. Grenzschubspannung  $\tau_{Gr}$  (kritische Sohlenschubspannung  $\tau_{crit}$ ), überschreitet. Meyer-Peter u. Müller (1949) geben diesen Grenzwert mit folgender Formel an.<sup>57</sup>

<sup>55</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

<sup>56</sup> Vgl.: Gonsowski, P. et al. 2011, "Wasserbau". [10]

<sup>57</sup> Vgl.: Gonsowski, P. et al. 2011, "Wasserbau". [10]

Formel 14

$$\tau_{Gr} = 0,047(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_m \quad [\text{N/m}^2]$$

- $\tau_{Gr}$**  kritische Schubspannung nach Meyer-Peter u. Müller (engl.: critical shear stress)  $[\text{N/m}^2]$
- $\rho_s$**  Dichte des Geschiebekorns (meist ca. 2.600–2.700  $\text{kg/m}^3$ )  $[\text{kg/m}^3]$
- $\rho$**  Dichte des Wassers  $[\text{kg/m}^3]$
- $g$**  Erdbeschleunigung  $[\text{m/s}^2]$
- $d_m$**  mittlerer Korndurchmesser  $[\text{m}]$  (variiert je nach Mischung etwa zwischen  $d_{50}$  und  $d_{75}$ )

### 3.4 Transportkörper auf der Sohle

Die bewegliche Sohle mit verschiedenen Formen (Transportkörpern) ist ein Zeichen für den engen Zusammenhang zwischen Abfluss und Sedimenttransport (Abbildung 27). Die Wechselwirkungen zwischen Strömungsgeschwindigkeit und den verschiedenen Formen der Sohlen machen sich im Verlauf der Sohlenschubspannung  $\tau_s$  (Abbildung 28) deutlich. Die Sohlenschubspannung ist aus zwei Anteilen zusammengestellt:

$$\tau_s = \tau_K + \tau_F \quad [\text{N/m}^2]$$

Formel 15

mit

$\tau_s$  Sohlenschubspannung  $[\text{N/m}^2]$

$\tau_k$  Sohlenschubspannung aus der Kornrauheit der Sedimente  $[\text{N/m}^2]$

$\tau_F$  Sohlenschubspannung aus der Sohlenform  $[\text{N/m}^2]$

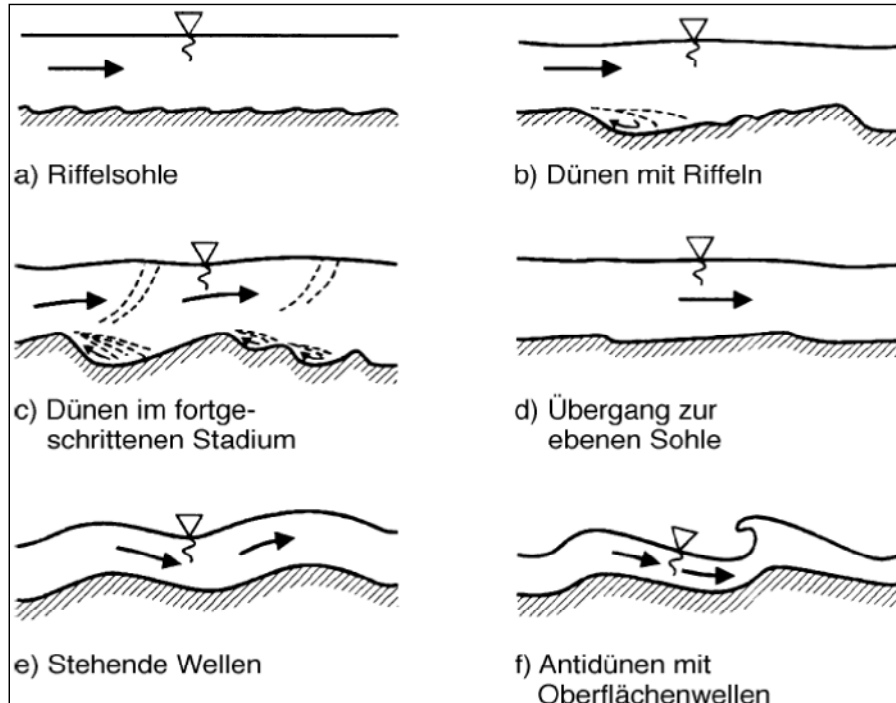


Abbildung 27: Sohlenformen (Transportkörper)<sup>58</sup>

<sup>58</sup> Bechteler, W., 1994, "Geschiebemessungen". [3]



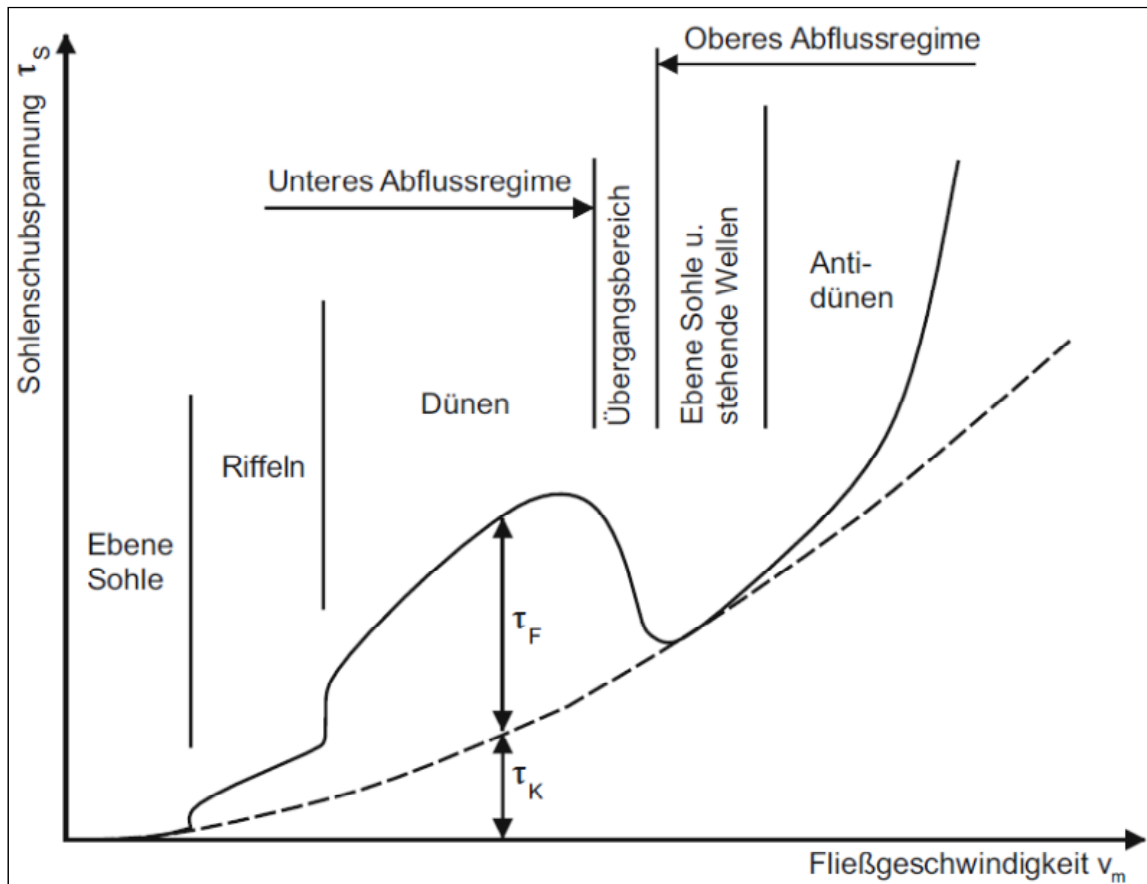


Abbildung 28: Verlauf der Sohlenschubspannung  $\tau_s$  bei verschiedenen Sohlenformen <sup>59</sup>

Man kann drei Abflussregime unterscheiden (Abbildung 28):

- Unteres Abflussregime (ebene Sohle, Riffeln, Dünen)
- Übergangsregime (abflachende Sohlenformen)
- Oberes Abflussregime (ebene Sohle, stehende Wellen, Antidünen).

Bei ebenen Sohlen ist die Sohlenschubspannung aus der Kornrauheit der Sedimente dominiert, während bei Riffeln und Dünen der Formanteil ein überwiegender Teil von der Sohlenschubspannung ist. In der Übergangszone ist die Kornrauheit der Sedimente maßgebend. Im oberen Abflussregime nimmt der Einfluss des Formanteiles wieder zu. Der Einfluss des Sediments wird durch besondere Widerstandsbeziehungen berücksichtigt. <sup>60</sup>

<sup>59</sup> Bechteler, W., 1994, "Geschiebemessungen". [3]

<sup>60</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

### 3.5 Wehre und Stauanlagen

Im Prinzip sind Wehre und Stauanlagen Einschränkung der Durchgängigkeit. Die natürlichen Flüsse fließen auf ihrem Weg von der Quelle zu Mündung durch verschiedene Teilstrecken. Abbildung 29 zeigt die schematische Darstellung eines Flusslaufs.

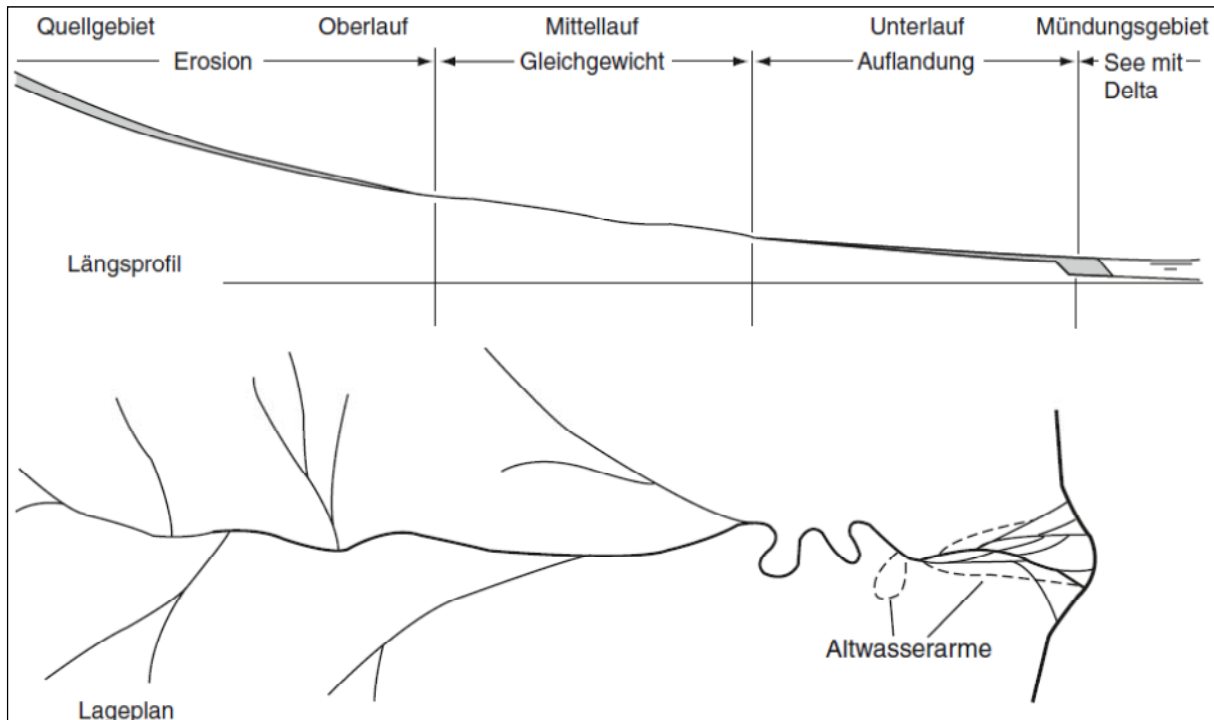


Abbildung 29: Schematische Darstellung eines Flusslaufs <sup>61</sup>

Im Oberlauf, wo das Gewässer Gebirgsflusscharakter hat, sind eingetiefte, enge Täler vorzufinden. In der Mitte dominieren charakteristisch Steil- und Flachstrecken. In Fließabschnitten mit geringem Gefälle, mäandriert und lagert sich ein Teil der Feststoffe ab. Der Unterlauf ist vor dem Mündungsgebiet und liegt meistens in einer Ebene mit geringem Gefälle (Abbildung 30).

<sup>61</sup> Gonsowski, P. et al. 2011, "Wasserbau". [10]

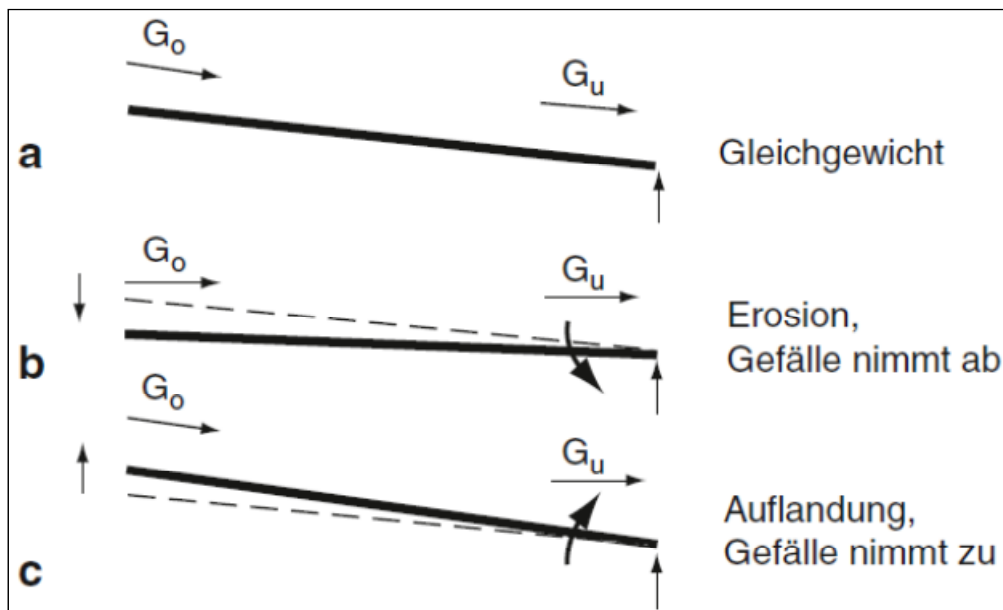


Abbildung 30: Sohlenlagen beweglicher Gerinnesohlen oberhalb eines Fixpunktes. a Gleichgewichtslage, b Erosion und c Auflandung <sup>62</sup>

Fließgeschwindigkeit, Korngröße, Kornverteilung, Gefälle, Abfluss, Feststofffracht, Entwässerung, Fließquerschnitt und Turbulenz sind die wichtigen Transportkomponenten für den Geschiebetransport (Abbildung 31). <sup>63</sup>

Merkmal	Tendenz/Charakteristik
Abfluss	
Struktur der Sohle	
Geschiebefracht	
Schwebstofffracht	
Laufform	

Abbildung 31: Veränderung im Fließverlauf <sup>64</sup>

<sup>62</sup> Gonsowski, P. et al. 2011, "Wasserbau". [10]

<sup>63</sup> Vgl.: Gonsowski, P. et al. 2011, "Wasserbau". [10]

<sup>64</sup> Gonsowski, P. et al. 2011, "Wasserbau". [10]

Eine besondere Einschränkung stellen Querbauwerke für die Entwicklung des Fließgewässers dar. Stauwehre und Dämme in Verbindung mit Energiegewinnung aus Wasserkraft, sowie Wehranlagen für landwirtschaftliche Bewässerungssysteme dienen der Sohlenstabilisierung. Solche Bauwerke verändern das gesamte Fließverhalten einer Strecke des Gewässers und damit die Lebensräume des Gewässers.<sup>65</sup>

Durch die Erhöhung des Staus wird die Transportfließfähigkeit des Flusses reduziert. Mit sinkender Transportkapazität setzen sich die Sedimente im Stauraum ab und es passiert die typische Stauraumsedimentation. Auch wenn Teile der sedimentierten Bereiche durch gelegentliche Stauraumpülungen freigespült werden können, wird der natürliche Sedimenttransport verhindert.

Während einer Stauraumpülung kommt es im Unterwasserbereich zu hohen Feststoffablagerung, die zu einer enormen Belastung der folgenden Gewässerstrecken führen (z.B. starker Sauerstoffmangel und erhöhte Schadstoffkonzentrationen).<sup>66</sup> In Tabelle 5 kann man die Erfahrungswerte kritischer Schubspannungen und Geschwindigkeiten für den Beginn des Geschiebebetriebs sehen.

**Tabelle 5: Erfahrungswerte kritischer Schubspannungen und Geschwindigkeiten für den Beginn des Geschiebebetriebs<sup>67</sup>**

<b>Beschaffenheit der Sohle</b>	<b><math>\tau_0</math> [N/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>V_0</math> [m/s]</b>
Mittelsand: 0,2 ... 0,63 [mm]	2	0,35 ... 0,45
Grobsand: 0,63 ... 2 [mm]	6	0,45 ... 0,6
Grobkies: 20 ... 63 [mm]	45	1,25 ... 1,60
Lockerer Schlamm	2,5	0,10 ... 0,15
festgelagerter Lehm	12	0,70 ... 1,00
Rasen, langanhaltend überströmt	15	1,5
Rasen, vorübergehend überströmt	30	2

<sup>65</sup> Vgl.: Bechteler, W., 2002, "Geschiebemessungen". [4]

<sup>66</sup> Vgl.: Patt, H. 2004, "Naturnaher Wasserbau". [16]

<sup>67</sup> Maniak, U. 2005, "Hydrologie und Wasserwirtschaft". [15]

## 4 Physikalische Modelle

Physikalische Modellversuche bilden die Grundlage für die Auswertung von allen dreidimensionalen Strömungsvorgängen, welche als Problemstellungen bei der Planung von wasserbaulichen Objekten auftreten. Sie werden angewendet, wenn das Strömungsverhalten so kompliziert ist, dass sie nicht theoretisch oder analytisch abgebildet werden können, sondern nur mit einem Modell simuliert werden können. Ein solches geometrisch skaliertes Modell eines Wasserbauwerks wird als physikalisches oder physisches hydraulisches Modell bezeichnet.

Modellversuche beruhen auf dem Ansatz, dass es zwischen Natur und Modell eine geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit geben soll. Das bedeutet, dass messbare Maßnahmen und Vorgänge in beiden Fällen physikalisch ähnlich stattfinden. Diese Kriterien sollen alle erfüllt werden, da man von einer „mechanischen Ähnlichkeit“ zwischen physikalischem Modell und der realen Wasserbaustruktur spricht.<sup>68</sup>

### 4.1 Geometrische Ähnlichkeit

Aufgrund der geometrischen Ähnlichkeit sollen alle geometrischen Parameter wie Länge, Breite und Höhe mit der gleichen Maßstabszahl  $M_L$  von der Natur auf das Modell übertragen werden.<sup>69</sup>

Längenmaßstab:

Formel 16

$$M_L = \frac{L_{Natur}}{L_{Modell}}$$

Es gibt die geometrische Ähnlichkeit, wenn alle Distanzen und Abmessungen in der Natur und im Modell in einem konstanten Verhältnis zueinander stehen.

---

<sup>68</sup> Vgl.: Strobl, T. 2006, „Wasserbau“. [21]

<sup>69</sup> Vgl.: Strobl, T. 2006, „Wasserbau“. [21]

## 4.2 Kinematische Ähnlichkeit

Die Forderung nach kinematischer Ähnlichkeit erzeugt eine konstante Maßstabszahl  $M_t$  zwischen Modell und Natur, die für alle zeitabhängigen Verfahren gelten soll.<sup>70</sup>

Zeitmaßstab:

Formel 17

$$M_t = \frac{t_{Natur}}{t_{Modell}}$$

Kinematische Ähnlichkeit verlangt konstante Bedingungen der Geschwindigkeit und Beschleunigung in Natur und Modell.

## 4.3 Dynamische Ähnlichkeit

Wegen der dynamische Ähnlichkeit müssen alle in einer Strömung wirkenden Kräfte im Modell im gleichen Verhältnis wie in der Natur sein, d.h. die Maßstabszahlen  $M_F$  bei der Übertragung der Kräfte zwischen Natur und Modell müssen identisch sein z.B. Trägheit, Schwerkraft, Reibung und Kapillarität, Staudruck und Elastizität.<sup>71</sup>

Kräftemaßstab:

Formel 18

$$M_F = \frac{F_{Natur}}{F_{Modell}}$$

Dynamische Ähnlichkeit basiert auf der geometrischen und kinematischen Ähnlichkeit und meint, dass in der Natur und im Modell einander entsprechende Kräfte sich immer im gleichen Verhältnis zueinander befinden.

---

<sup>70</sup> Vgl.: Strobl, T. 2006, "Wasserbau". [21]

<sup>71</sup> Vgl.: Strobl, T. 2006, "Wasserbau". [21]

## 4.4 Modellgesetze

Die Differenzierung der Modellgesetze ist je nach der Wahl der zwei Kräfte abhängig, die mit gleichem Maßstab von der Natur auf das Modell zu übertragen werden. Aufgrund der allgegenwärtigen Strömungsgeschwindigkeit in der Natur und im Modell ist die Trägheitskraft eine der dominierenden Kräfte. Die zweite dominierende Kraft bestimmt das zu wählende Modellgesetz. Die Gesetze sind benannt nach den Wissenschaftlern, die das Gesetz als erste Forscher formuliert haben (Tabelle 6).<sup>72</sup>

**Tabelle 6: Einige im Wasserbau wichtige Modellgesetze und die darin dominierenden Kräfte**<sup>73</sup>

<b>Gesetz</b>	<b>Dominierende Kräfte</b>
Froude	Trägheit und Schwere
Reynolds	Trägheit und Reibung
Weber	Trägheit und Kapillarkraft
Thoma	Trägheit und Druck
Cauchy/Mach	Trägheit und Elastizität

## 4.5 Hydraulische Modellgesetze mit den dominierenden Kräften Trägheit und Schwere

Als hydraulisches Modell wird die geometrisch verkleinerte Nachbildung des Prototyps im hydraulischen Labor bezeichnet. Zwischen den Kräften im Modell und im Naturbauwerk muss eine mechanische Ähnlichkeit vorliegen, um die Modellergebnisse auf die Natur übertragen zu können. Der Rechtsanspruch nach mechanischer Ähnlichkeit eines Modells mit seinem Prototyp setzt die Kriterien voraus, welche in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 beschrieben sind.

- L**      Dimension der Länge [m]
- t**      Dimension der Zeit [s]
- V**      Dimension der Geschwindigkeit [m/s]

<sup>72</sup> Vgl.: Strobl, T. 2006, "Wasserbau". [21]

<sup>73</sup> Strobl, T. 2006, "Wasserbau". [21]

– **Trägheitskraft:**

Formel 19

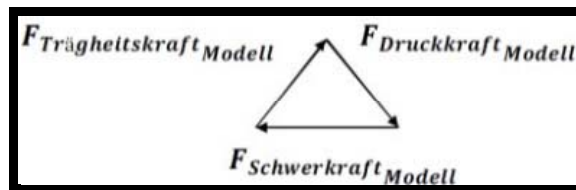
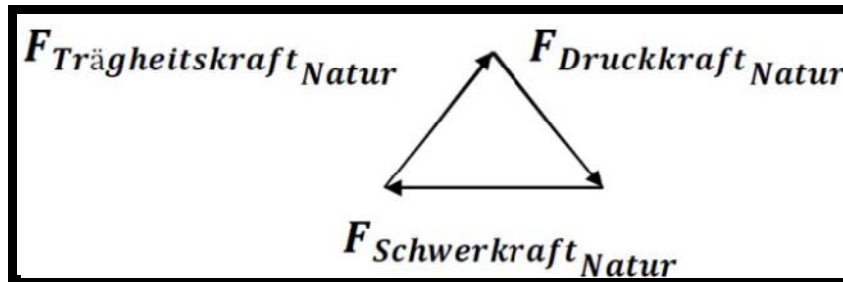
$$F_{Trägheit} = m \cdot a = \rho \cdot L^3 \cdot \frac{V}{t} = \rho \cdot L^2 \cdot \frac{V}{\frac{t}{L}} = \rho \cdot L^2 \cdot V^2$$

– **Schwerkraft:**

Formel 20

$$F_{Schwerkraft} = m \cdot g = \rho \cdot L^3 \cdot g$$

dominierende Kräfte:



Formel 21

$$\frac{F_{Träg. Modell}}{F_{Träg Natur}} = \frac{F_{Schwer. Modell}}{F_{Schwer Natur}} = \frac{F_{Druck. Modell}}{F_{Druck Natur}}$$

Formel 22

$$\left( \frac{F_{Träg.}}{F_{Schwer.}} \right)_{Modell} = \left( \frac{F_{Träg.}}{F_{Schwer.}} \right)_{Natur}$$

Das Froude'sche Modellgesetz verlangt, dass Verhältnis zwischen den Trägheitskräften und der Schwerkraft in der Natur und im Modell gleich ist.

Formel 23

$$\frac{Trägheitskraft}{Schwerkraft} = \frac{\rho \cdot L^2 \cdot V^2}{\rho \cdot L^3 \cdot g} = \frac{V^2}{g \cdot L} = Fr^2$$



Die Froude'sche Zahl **Fr** wird durch das Verhältnis zwischen Fließgeschwindigkeit **V** und der Wurzel aus der Fließtiefe **h** mal der Erdbeschleunigung **g** definiert:<sup>74</sup>

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \quad [-]$$

Formel 24

Damit ergibt sich:

$$Fr_N = Fr_M$$

Formel 25

$$\frac{V_{Natur}}{\sqrt{g \cdot h_{Natur}}} = \frac{V_{Modell}}{\sqrt{g \cdot h_{Modell}}}$$

Formel 26

Es wird folgendermaßen abgekürzt; **R** für relativ, **M** für Modell und **N** für Natur.

Da die Erdbeschleunigung in der Natur und im Modell gleich ist, können sie gekürzt werden. Das Ergebnis stellt sich wie folgt dar:

$$\frac{V_M}{\sqrt{g \cdot L_M}} = \frac{V_N}{\sqrt{g \cdot L_N}}$$

Formel 27

$$\frac{\frac{V_M}{\sqrt{g \cdot L_M}}}{\frac{V_N}{\sqrt{g \cdot L_N}}} = 1$$

Formel 28

$$\frac{V_R}{\sqrt{L_R}} = 1$$

Formel 29

$$V_R = \frac{V_M}{V_N}$$

Formel 30

<sup>74</sup> Vgl.: Strobl, T. 2006, "Wasserbau". [21]

Formel 31

$$L_R = \frac{L_M}{L_N}$$

Die Geschwindigkeiten in Natur und Modell sind damit im Verhältnis  $L_R$  zueinander.

– **Geschwindigkeit**

Formel 32

$$V_R = \sqrt{L_R}$$

Formel 33

$$V_R = L_R^{\frac{1}{2}}$$

– **Abfluss:**

Formel 34

$$Q_R = A_R \cdot V_R$$

Formel 35

$$\frac{Q_M}{Q_N} = \frac{A_M}{A_N} \cdot \frac{V_M}{V_N}$$

Formel 36

$$Q_R = L_R^2 \cdot L_R^{\frac{1}{2}} = L_R^{\frac{5}{2}}$$

– **Kraft:**

Formel 37

$$F_R = \rho_R \cdot Q_R \cdot V_R$$

Formel 38

$$F_R = \rho_R \cdot L_R^2 \cdot V_R^2$$

Formel 39

$$F_R = \rho_R \cdot L_R^2 \cdot L_R$$

Formel 40

$$F_R = \rho_R \cdot L_R^3$$

– **Schubspannung:**

Formel 41

$$\tau_R = \rho_R \cdot V_R^2$$

Formel 42

$$\tau_R = \rho_R \cdot L_R$$

## 4.6 Hydraulische Modellgesetze (bei $M_L=40$ )

Das hydraulische Modell des KW Schönau wurde nach dem Froude'schen Ähnlichkeitskriterium errichtet, der Modellmaßstab wurde mit 1:40 festgelegt. Es definiert der Maßstabfaktor ( $M_L=1/L_r$ ) das Verhältnis der Längen ( $L_N$ ) in der Natur zu den Längen ( $L_M$ ) im Modell ( $L_r= L_M/L_N$ ). So ergeben sich die anderen Übertragungsfunktionen nach folgenden Beziehungen:

- **Längenmaßstab** [m] :

$$M_L = \frac{L_N}{L_M}$$

Formel 43

$$M_L = \frac{L_N}{L_M} = \frac{40}{1} = 40$$

Formel 44

Durch die Maßstabfaktoren mit einem gewählten Längenmaßstab von 1: 40 zwischen Modell und Natur (d.h.  $M_L = 40$ ) ergeben sich für die anderen hydraulischen und dynamischen Größen folgende Werte:

- **Fließzeit, Versuchsdauer** [s] :

$$M_t = M_L^{\frac{1}{2}}$$

Formel 45

$$M_L^{\frac{1}{2}} = 40^{\frac{1}{2}} = 6,32$$

Formel 46

- **Geschwindigkeit** [m/s]:

$$M_V = \frac{M_L}{M_t} = \frac{M_L}{M_L^{\frac{1}{2}}} = M_L^{\frac{1}{2}}$$

Formel 47

$$M_L^{\frac{1}{2}} = 40^{\frac{1}{2}} = 6,32$$

Formel 48

- **Abfluss** [m<sup>3</sup>/s]:

Formel 49

$$M_Q = \frac{M_L^3}{M_t} = \frac{M_L^3}{M_L^{\frac{1}{2}}} = M_L^{\frac{5}{2}}$$

Formel 50

$$M_L^{\frac{5}{2}} = 40^{\frac{5}{2}} = 10119$$

- **Kraft** [N]:

Formel 51

$$M_F = \frac{M_\rho \cdot M_L^4}{M_t^2} = \frac{M_L^4}{M_L} = M_L^3$$

Formel 52

$$M_L^3 = 64000$$

- **Schubspannung** [N/m<sup>2</sup>]:

Formel 53

$$M_\tau = \frac{M_F}{M_L^2} = M_L$$

Formel 54

$$M_L = \frac{L_N}{L_M} = \frac{40}{1} = 40$$

Das bedeutet, dass:

- sich die zeitlichen Abläufe des Strömungsprozesses im Modell im Vergleich zur Natur 6,32 mal schneller abspielen.
- die gemessenen oder beobachteten Geschwindigkeiten im Modell sind 6,32 mal kleiner als in der Natur.
- ein Abfluss im Modell von 1 Liter pro Sekunde entspricht in der Natur einem Abfluss von 10119 [l/s], bzw. ungefähr 10 [m<sup>3</sup>/s].
- die auftretenden Kräfte im Modell entsprechen den Kräften in der Natur mit 1/64000.

- die auftretenden Schubspannungen in Modell sind nur 1/40 der Schubspannungen in der Natur.

#### 4.6.1 Anwendbarkeit und Grenzen

Es gibt Einschränkungen in der Anwendbarkeit im Froude'schen Modell. So wird für die Modellversuche bei Flusskraftwerken ein Froude'sches Modell mit bewegter Sohle unter folgenden Kriterien festgesetzt:

- Der Fließzustand (Strömen  $Fr < 1$  oder Schießen  $Fr > 1$ ) ist in einem Froude'schen Modell in der Natur und im Modell gleich, auch der Ort des Übergangs zwischen Strömen und Schießen.
- Eine turbulente Strömung in der Natur muss auch im Modell turbulent sein.
- Um Sedimenttransport und Feststoffbewegung zu untersuchen, muss zusätzlich zu den Ähnlichkeitsbedingungen des Froude'schen Modells auch die Ähnlichkeit der Sedimentbewegung erfüllt werden. Das gilt für den Beginn des Sedimenttransports, aber auch für die Bewegung und den Transport des Geschiebes. Bei Verwendung von natürlichem Geschiebe in Modellen mit beweglicher Sohle ist daher unbedingt zu berücksichtigen, dass das Modellgeschiebe bestimmte Mindestkorngrößen haben muss ( $\varnothing \geq 0,5 \text{ mm}$ ), da sonst im Modell Kohäsionskräfte wirken, die in der Natur nicht auftreten.
- In der Regel bedeutet es, dass die geometrische Maßstabszahl nicht zu groß sein darf. Ausreichend große Modelle ergeben sich auch aus der Anforderung einer ausreichend großen Reynoldszahlen bei der Kornumströmung (Reynoldszahl des Korns  $\geq 400$ ; im Shields-Diagramm).
- Gelegentlich wird versucht, durch die Verwendung von Modellgeschiebe mit geringerer Dichte (z. B. Kunststoffgranulat), zu kleine Korngrößen im Modell zu vermeiden.<sup>75</sup>

---

<sup>75</sup> Vgl.: Strobl, T. 2006, "Wasserbau". [21]

## 5 Strömung in offenen Gerinnen

### 5.1 Allgemeines

In den folgenden Kapiteln dieser Masterarbeit werden zuerst die Methoden zur Schubspannungsermittlung bei Strömungen in offenen Gerinnen beschrieben. Die Schubspannungen werden in offenen Gerinnen mit glatten Glaswänden und mit einer mehr oder weniger rauen Rinnensohle für unterschiedliche Sedimente ermittelt; die bei Versuchen am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz verwendet werden. Mit dem Modellversuch im Glasgerinne sollen verschiedene Parameter des Geschiebetransportes festgestellt werden. Die Versuchsrinne ist in der Abbildung 32 dargestellt. Die Ergebnisse aus den Versuchen werden mit dem Bewegungsbeginn nach Shields (1936) mit Angabe des Bewegungsrisikos ( $R$ ) nach Zanke verglichen.



Abbildung 32: Glasgerinne <sup>76</sup>

---

<sup>76</sup> Foto: Shafaroudi, S.

Alle Ergebnisse der ermittelten kritischen Schubspannungen werden mit Berechnungen nach Mayer-Peter und Müller (**M.P.M.F.**) verglichen. In weiterführenden Kapiteln werden die kritischen Schubspannungen für Sedimente, die in physikalischen Modellversuchen verwendet werden, mit dem Konturausdruck der Sohlspannungen in der Natur (numerische Simulation, Software **SSIIM2**) verglichen. Abschließend wird das geeignete passende Material für die Verwendung in den Geschiebeversuchen mit beweglicher Sohle des KW Schönau Modelles, aufgrund gleichbleibender dynamischer Ähnlichkeit im Modell und in der Natur ausgewählt.

## 5.2 Methoden zur Schubspannungsermittlung

In diesem Kapitel wird auf jene Methoden zur Schubspannungsermittlung eingegangen, die bei den Versuchen, welche in dieser Arbeit beschrieben werden, angewandt wurden.

### 5.2.1 Geschiebetransportformel Variante 1 (G.T.F.V.1)

Dieses Kapitel zeigt die Geschiebetransportformel der kritischen Sohl Schubspannungen und der kritischen Sohlgeschwindigkeiten. Die Ergebnisse wurden für jedes Sediment mit der Geschiebetransportformel **G.T.F.V.1** ermittelt (Kapitel 5.3). In den Tabellen 7 bis 11 die Ergebnisse dargestellt. Die Untersuchungen **G.T.F.V.1** wurden nur zur Kontrolle der Hauptergebnisse **G.T.F.V.3**, welche in Kapitel 6 zusammengefasst sind, durchgeführt.

Für die Bestimmung der Kornrauheit  $k_s = k_r$  kann folgende Beziehung verwendet werden:<sup>77</sup>

$$k_r = \frac{26}{d_m^{1/6}} \quad [\text{m}^{1/3} / \text{s}]$$

Formel 55

$d_m$  mittlerer Korndurchmesser der Sohle [m]

oder

<sup>77</sup> Vgl.: Bechteler, W., 2002, "Geschiebemessungen". [4]



Formel 56

$$k_r = \frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}} \quad [\text{m}^{1/3}/\text{s}]$$

$d_{90}$  Korndurchmesser beim 90-Prozent-Durchgang [m]

mittlere Rauheit Wand und Sohle:

Formel 57

$$k_m = \frac{\sum k_i U_i}{U} \quad [\text{m}^{1/3}/\text{s}]$$

$h$  die benetzte Höhe des Glasgerinnes [m]

$b$  die Breite des Glasgerinnes [m]

$U$  der benetzte Umfang des Glasgerinnes [m]

mittlere Rauheit Wand und Sohle

Formel 58

$$k_m = \frac{(k_w * 2h) + (b * k_s)}{2h + b} \quad [\text{m}^{1/3}/\text{s}]$$

die Geschwindigkeit:

Formel 59

$$V = k \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad [\text{m}/\text{s}]$$

Formel 60

$$R = \left( \frac{V}{k \cdot I^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad [\text{m}]$$

hydraulischer Radius:

Formel 61

$$R = \left( \frac{V}{I^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{2}} * \frac{1}{k^{\frac{2}{3}}} \quad [\text{m}]$$

die Schubspannung (Manning-Strickler-Gleichung):

Formel 62

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

$\tau_w$  Schubspannung an den Seitenwänden [N/m<sup>2</sup>]

$\tau_m$  mittlere Schubspannung am ganzen Profilmumfang [N/m<sup>2</sup>]

Formel 63

$$\tau_m(b + 2h) = \tau_s * b + \tau_w * 2h$$

**k<sub>s</sub>** Rauheit der Sohle [m<sup>1/3</sup>/s]**k<sub>w</sub>** Rauheit der Wand [m<sup>1/3</sup>/s]**k<sub>m</sub>** mittlere Rauheit Wand und Sohle [m<sup>1/3</sup>/s]

Formel 64

$$\frac{(b + 2h) \left(\frac{V_m}{I^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{k_m^{\frac{3}{2}}} = \frac{b \left(\frac{V_s}{I^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{k_s^{\frac{3}{2}}} + \frac{2h \left(\frac{V_w}{I^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{k_w^{\frac{3}{2}}}$$

**V<sub>s</sub>** Geschwindigkeit an der Sohle [m/s]**V<sub>w</sub>** Geschwindigkeit an den Seitenwänden [m/s]**V<sub>m</sub>** mittlere Geschwindigkeit am ganzen Profilmumfang [m/s]

Schubspannungsgeschwindigkeit an der Sohle:

Formel 65

$$V_s = \left[ \frac{\left[ \left( \frac{(b+2h) \left(\frac{V_m}{I^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{k_m^{\frac{3}{2}}} \right) - \left( \frac{2h \left(\frac{V_w}{I^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{k_w^{\frac{3}{2}}} \right) \right]^{\frac{2}{3}}}{\frac{b}{k_s^{\frac{3}{2}}}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [\text{m/s}]$$

Formel 66

$$V_s = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho_w}} \quad [\text{m/s}]$$

Schubspannung an der Sohle:

Formel 67

$$\tau_s = \rho_w \cdot V_s^2 \quad [\text{N/m}^2]$$

mittlere Geschwindigkeit am ganzen Profilmumfang

Formel 68

$$V_m = \frac{Q}{bh} \quad [\text{m/s}]$$

Geschwindigkeit an den Seitenwänden

Formel 69

$$V_w = 0,7V_m \quad [\text{m/s}]$$

### 5.2.2 Geschiebetransportformel Variante 2 (G.T.F.V.2)

Dieses Kapitel zeigt die Geschiebetransportformel der kritischen Sohlschubspannungen und der kritischen Sohlgeschwindigkeiten. Die Ergebnisse wurden für jedes Sediment mit Geschiebetransportformel **G.T.F.V.2** kalkuliert (Kapitel 5.3). Es werden in der Tabelle 7 bis 11 die Ergebnisse dargestellt. Die Untersuchungen **G.T.F.V.2** wurden zur Kontrolle der Hauptergebnisse **G.T.F.V.3** erfordert.

Die Komponente der Gewichtskraft:

Formel 70

$$\tau \cdot l \cdot l_u = F$$

Formel 71

$$\tau \cdot l \cdot l_u = l \cdot A \cdot \rho_w \cdot g \cdot I_s$$

Formel 72

$$\tau \cdot l(b + 2h) = l \cdot A \cdot \rho_w \cdot g \cdot I_s$$

Formel 73

$$\tau_s \cdot l \cdot b + \tau_w \cdot l \cdot 2h = l \cdot A \cdot \rho_w \cdot g \cdot I_s$$

Formel 74

$$\tau_s \cdot b + \tau_w \cdot 2h = A \cdot \rho_w \cdot g \cdot I_s$$

Formel 75

$$\tau_s = \frac{A \cdot \rho_w \cdot g \cdot I_s - \tau_w \cdot 2h}{b} \quad [\text{N/m}^2]$$

Formel 76

$$\tau_s = \frac{A \cdot \rho_w \cdot g \cdot I_s - (\tau - \tau_s) 2h}{b} \quad [\text{N/m}^2]$$

Formel 77

$$\tau_s = \frac{(\tau \cdot 2h) - (A \cdot \rho_w \cdot g \cdot I_S)}{(2h - b)} \quad [\text{N/m}^2]$$

### 5.2.3 Geschiebetransportformel Variante 3 (G.T.F.V.3)

Dieses Kapitel zeigt die Geschiebetransportformel der kritischen Sohlschubspannungen und der kritischen Sohlgeschwindigkeiten. Die Ergebnisse wurden für jedes Sediment mit Geschiebetransportformel **G.T.F.V.3** kalkuliert (Kapitel 5.3). Es werden in der Tabelle 7 bis 11 die Ergebnisse dargestellt. Die Untersuchungen **G.T.F.V.3** beschreiben die Hauptergebnisse.

Schubspannung:

Formel 78

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

Schubspannungsgeschwindigkeit an der Sohle:

Formel 79

$$V_s = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho_w}} \quad [\text{m/s}]$$

### 5.2.4 Geschiebetransportformel Variante Dr. Gehrig (G.T.F.V.D)

Dieses Kapitel zeigt die Geschiebetransportformel der kritischen Sohlschubspannungen und der kritischen Sohlgeschwindigkeiten. Die Ergebnisse wurden für jedes Sediment mit Geschiebetransportformel **G.T.F.V.D** kalkuliert (Kapitel 5.3). Es wurde in der Tabelle 7 bis 11 die Ergebnisse dargestellt. Die Untersuchungen **G.T.F.V.D** wurden nur zur Kontrolle der Hauptergebnisse **G.T.F.V.3** erfordert.

Schubspannungsgeschwindigkeit an der Sohle:

Formel 80

$$V_s = k_s \cdot R_s^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad [\text{m/s}]$$

**R<sub>s</sub>**      hydraulischer Sohlenradius [m]

**R<sub>m</sub>**      mittlerer hydraulischer Radius der Rinne (Sohle und Wände) [m]

hydraulischer Sohlenradius

Formel 81<sup>78</sup>

$$R_S = \left( \frac{k_m}{k_s} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot R_m \quad [\text{m}]$$

die Rauheit der Wand:

Formel 82

$$k_m = \frac{\sum k_i U_i}{U} \quad [\text{m}^{1/3}/\text{s}]$$

Formel 83

$$k_m = \frac{(k_w * 2h) + (b * k_s)}{2h + b} \quad [\text{m}^{1/3}/\text{s}]$$

Schubspannung an der Sohle:

Formel 84

$$\tau_s = V_s^2 * \rho_w \quad [\text{N}/\text{m}^2]$$

---

<sup>78</sup> Gehrig, W., 1967, "Über die Frage der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen". [14]

## 5.3 Ergebnisse für jedes Sediment

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Untersuchungen von Sedimenten mit einem charakteristischen Durchmesser und mit der bestimmten Feststoffdichte dargestellt werden. Die Ergebnisse wurden für jedes Sediment mit allen Geschiebetransportformeln ermittelt. In Folgenden werden die bei den Versuchen verwendeten Bezeichnungen zusammenfassend aufgelistet.

### Die Sohlenschubspannung:

$\tau_{s(1)}$ : Die Sohlenschubspannung von **G.T.F.V.1** [N/m<sup>2</sup>]

$\tau_{s(2)}$ : Die Sohlenschubspannung von **G.T.F.V.2** [N/m<sup>2</sup>]

$\tau_{s(3)}$ : Die Sohlenschubspannung von **G.T.F.V.3** [N/m<sup>2</sup>]

$\tau_{s(D)}$ : Die Sohlenschubspannung von **G.T.F.V.D** [N/m<sup>2</sup>]

### Die Sohlengeschwindigkeit:

$V_{s(1)}$ : Die Sohlengeschwindigkeit von **G.T.F.V.1** [m/s]

$V_{s(2)}$ : Die Sohlengeschwindigkeit von **G.T.F.V.2** [m/s]

$V_{s(3)}$ : Die Sohlengeschwindigkeit von **G.T.F.V.3** [m/s]

$V_{s(D)}$ : Die Sohlengeschwindigkeit von **G.T.F.V.D** [m/s]

### 5.3.1 Versuch 1

Beim Versuch 1 wurde Sediment mit dem charakteristischen Durchmesser von 0,01 [m] und der Feststoffdichte von 2600 [Kg/m<sup>3</sup>] verwendet (Tabelle 7).

Tabelle 7: Die Sohlenschubspannung und die Sohlengeschwindigkeit mit  $d_{ch} = 0,01$  [m] und  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>]

$\tau_s(2)$	$\tau_s(1)$	$\tau_s(D)$	$\tau_s(3)$
10,387	9,964	12,234	6,594
$V_s(2)$	$V_s(1)$	$V_s(D)$	$V_s(3)$
0,100	0,099	0,110	0,081

### 5.3.2 Versuch 2

Beim Versuch 2 wurde Sediment mit dem charakteristischen Durchmesser von 0,006 [m] und der Feststoffdichte von 2600 [Kg/m<sup>3</sup>] verwendet (Tabelle 8).

Tabelle 8: Die Sohlenschubspannung und die Sohlengeschwindigkeit mit  $d_{ch} = 0,006$  [m] und  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>]

$\tau_s(2)$	$\tau_s(1)$	$\tau_s(D)$	$\tau_s(3)$
9,006	7,768	8,443	5,739
$V_s(2)$	$V_s(1)$	$V_s(D)$	$V_s(3)$
0,093	0,088	0,092	0,080

### 5.3.3 Versuch 3

Beim Versuch 3 wurde Sediment mit dem charakteristischen Durchmesser von 0,0035 [m] und der Feststoffdichte von 2600 [Kg/m<sup>3</sup>] verwendet (Tabelle 9).

Tabelle 9: Die Sohlenschubspannung und die Sohlengeschwindigkeit mit  $d_{ch} = 0,0035$  [m] und  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>]

$\tau_s(2)$	$\tau_s(1)$	$\tau_s(D)$	$\tau_s(3)$
5,625	4,383	4,276	4,299
$V_s(2)$	$V_s(1)$	$V_s(D)$	$V_s(3)$
0,075	0,066	0,065	0,066

### 5.3.4 Versuch 4

Beim Versuch 4 wurde Sediment mit dem charakteristischen Durchmesser von 0,003 [m] und der Feststoffdichte von 2300 [Kg/m<sup>3</sup>] verwendet (Tabelle 10).

Tabelle 10: Die Sohlenschubspannung und die Sohlengeschwindigkeit mit  $d_{ch} = 0,003$  [m] und  $\rho_s = 2300$  [kg/m<sup>3</sup>]

$\tau_s(2)$	$\tau_s(1)$	$\tau_s(D)$	$\tau_s(3)$
5,014	3,584	3,062	3,792
$V_s(2)$	$V_s(1)$	$V_s(D)$	$V_s(3)$
0,070	0,059	0,055	0,062

### 5.3.5 Versuch 5

Beim Versuch 5 wurde Sediment mit dem charakteristischen Durchmesser von 0,0015 [m] und der Feststoffdichte von 2600 [Kg/m<sup>3</sup>] verwendet (Tabelle 11).

Tabelle 11: Die Sohlenschubspannung und die Sohlengeschwindigkeit mit  $d_{ch} = 0,0015$  [m] und  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>]

$\tau_s(2)$	$\tau_s(1)$	$\tau_s(D)$	$\tau_s(3)$
4,679	2,520	1,717	3,313
$V_s(2)$	$V_s(1)$	$V_s(D)$	$V_s(3)$
0,067	0,050	0,041	0,058



### 5.3.6 Kritische Sohlschubspannungen

Dieses Kapitel zeigt den Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen (Abbildung 33). Die Ergebnisse wurden für jedes Sediment mit allen Geschiebetransportformeln (G.T.F.V. 1, 2, 3, D) errechnet.

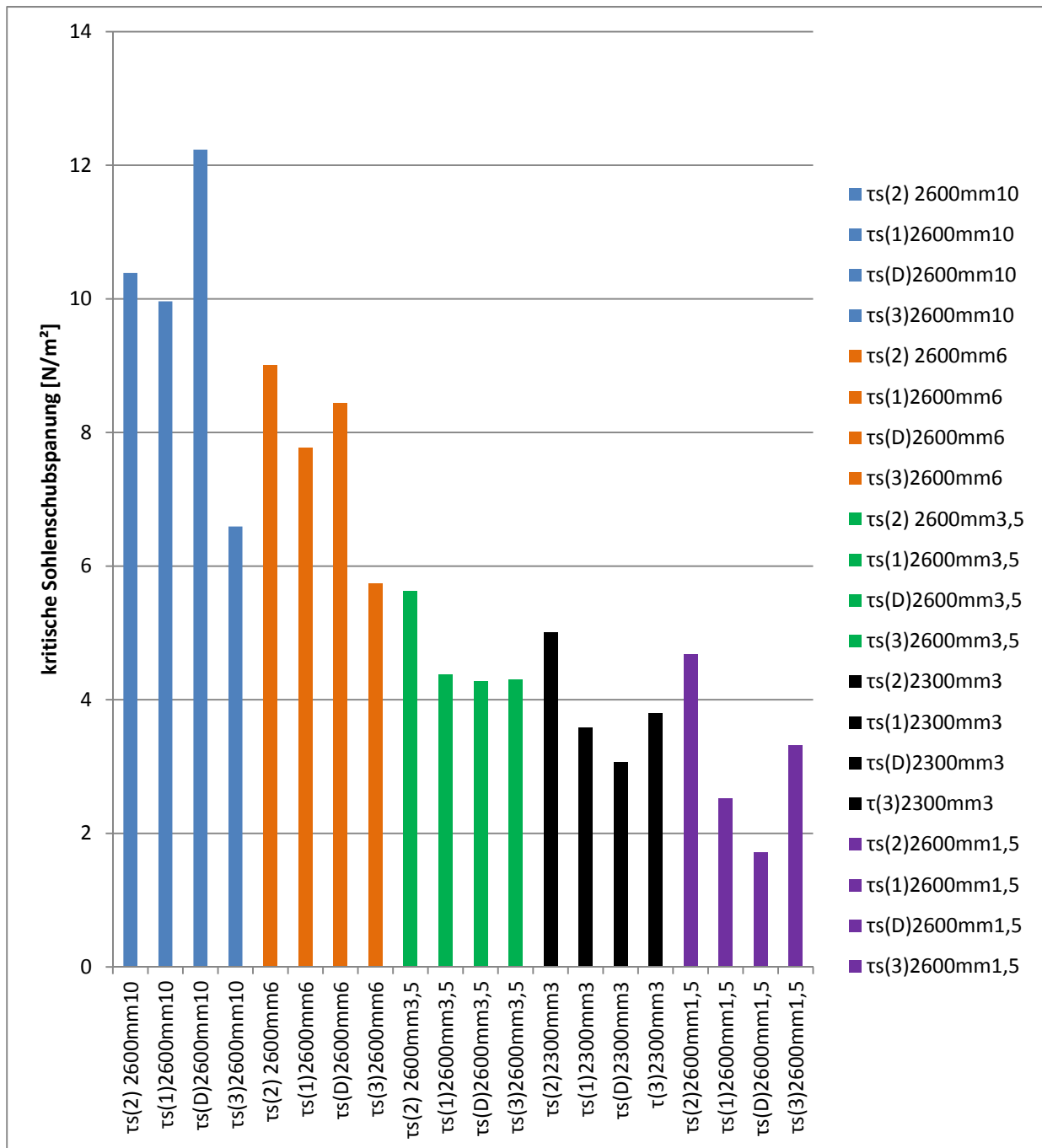


Abbildung 33: Der Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen (G.T.F.V.1, 2, 3, D)

### 5.3.7 Kritischen Sohlgeschwindigkeiten

Dieses Kapitel zeigt den Vergleich der kritischen Sohlgeschwindigkeiten (Abbildung 34). Die Ergebnisse wurden für jedes Sediment mit alle Geschiebetransportformel (G.T.F.V. 1, 2, 3, D) ermittelt.

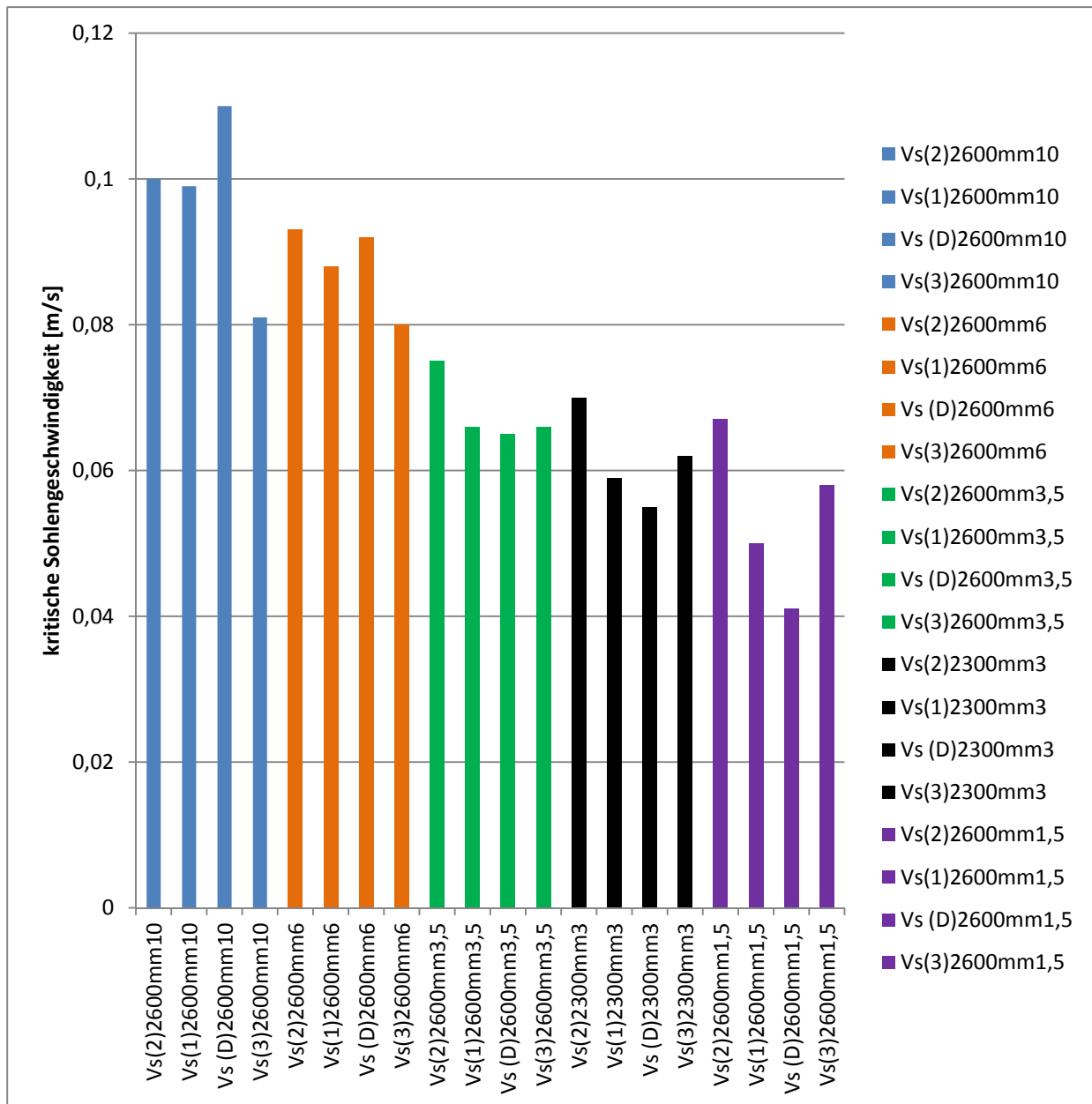


Abbildung 34: Der Vergleich der kritischen Sohlgeschwindigkeiten ( G.T.F.V.1, 2, 3, D)

### 5.3.8 Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen mit M.P.M.F.

Dieses Kapitel zeigt den Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen, die in Abbildung 35 dargestellt sind. Die Ergebnisse wurden für jedes Sediment mit allen Geschleibetransportformel (G.T.F.V.1, 2, 3, D) und mit der Meyer-Peter und Müller Formel gerechnet. Tabelle 12 fasst die Berechnungen tabellarisch zusammen.

Tabelle 12: Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen

[mm]	[N/m <sup>2</sup> ]	[N/m <sup>2</sup> ]	[N/m <sup>2</sup> ]	[N/m <sup>2</sup> ]	[N/m <sup>2</sup> ]
<b>d<sub>ch</sub></b>	<b><math>\tau_s</math> (3) G.T.F.V.3</b>	<b><math>\tau_s</math> (2) G.T.F.V.2</b>	<b><math>\tau_s</math> (Meyer-Peter und Müller)</b>	<b><math>\tau_s</math>(1) G.T.F.V.1</b>	<b><math>\tau_s</math> (D) G.T.F.V.D</b>
10	6,594	10,387	7,377	9,964	12,234
6	5,739	9,006	4,426	7,768	8,443
3,5	4,299	5,625	2,582	4,383	4,276
3	3,792	5,014	1,798	3,584	3,062
1,5	3,313	4,679	1,107	2,52	1,717

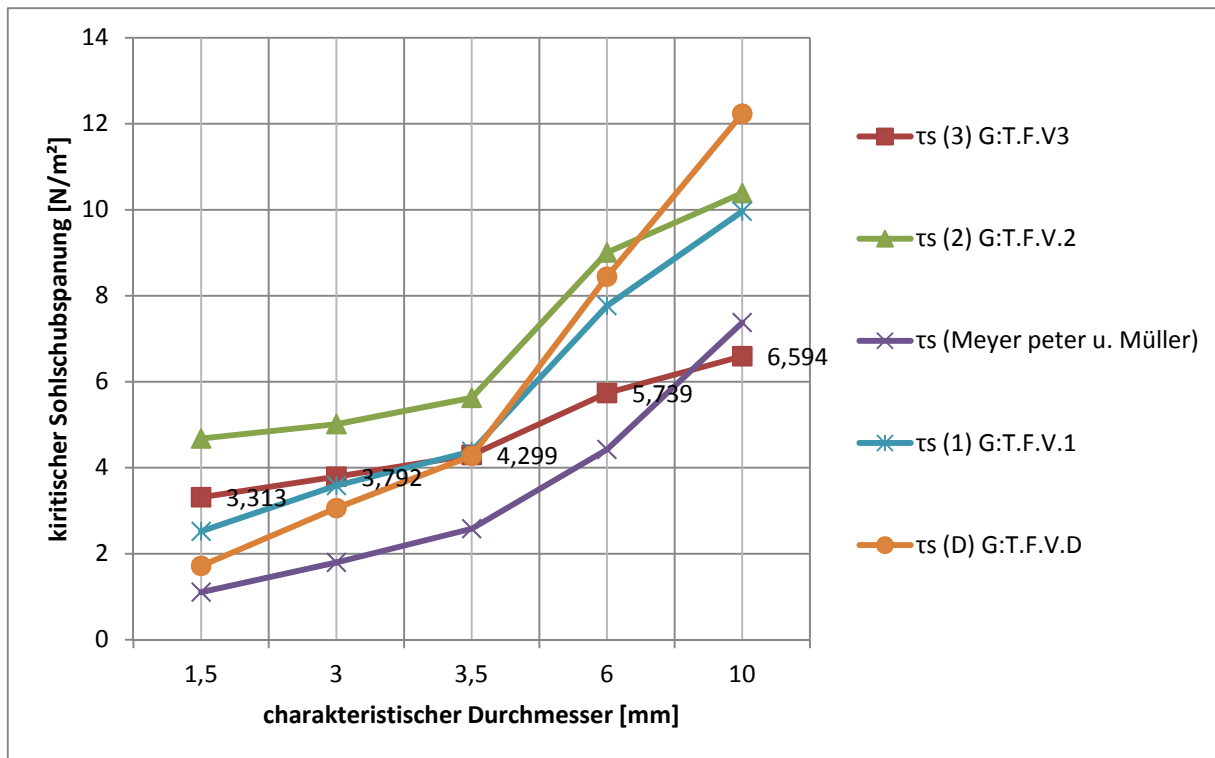


Abbildung 35: Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen

## 6 Analyse

Die aussagekräftigsten Aussagen in Rahmen dieser Untersuchung stellen die Ergebnisse der Versuchswerte von **G.T.F.V.3** dar. Die Untersuchungen **G.T.F.V.2** wurden zur Kontrolle die Hauptergebnisse durchgeführt. Die Versuchswerte wurden im Diagramm Shields (1936) mit Angabe des Bewegungsrisikos **R** nach Zanke (1990) dargestellt.

### 6.1 Ergebnisse aus G.T.F.V.3

Dieses Kapitel zeigt den Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen, und der kritischen Sohlgeschwindigkeiten (Tabelle 12 und 13). Die Ergebnisse werden für jedes Sediment mit Geschiebetransportformel 3 (**G.T.F.V.3**) und mit Meyer-Peter und Müller Formel errechnet. Es werden in der Tabelle 14 die Ergebnisse **Fr\***, **Re\*** und **D\*** dargestellt.

Tabelle 13: Die Ergebnisse aus G.T.F.V.3 für alle Korngröße

<b>G.T.F.V.3</b>	<b>Q</b> [m <sup>3</sup> /s]	<b>h</b> [m]	<b>d<sub>ch</sub></b> [m]	<b>V<sub>3s</sub></b> [m/s]	<b>τ<sub>3s</sub></b> [N/m <sup>2</sup> ]	<b>ρ<sub>F</sub></b> [kg/m <sup>3</sup> ]
Sediment	0,0343	0,155	0,01	0,081	6,594	2600
Sediment	0,03	0,155	0,006	0,080	5,739	2600
Quarz	0,0315	0,233	0,0035	0,066	4,299	2600
Ziegelsplitt	0,03	0,253	0,003	0,062	3,792	2300
Quarz	0,0259	0,311	0,0015	0,058	3,313	2600
Kunststoff	0,01	0,218	0,003	0,025	0,611	1300

Tabelle 14: Die Ergebnisse aus G.T.F.V.3 für alle Korngröße

$\tau_{Gr}$ (Meyer-Peter u. Müller)[N/m <sup>2</sup> ]	$Fr^*$	$Re^*$	$D^*$	$d_{ch}$ [m]
7,377	0,042	625	210	0,01
4,426	0,067	367	126	0,006
2,582	0,078	177	73	0,0035
1,798	0,099	142	59	0,003
1,107	0,141	66	32	0,0015
0,415	0,069	57	36	0,003

### 6.1.1 Kritische Sohlgeschwindigkeit

In Tabelle 15 wird die kritische Sohlgeschwindigkeit der Ergebnisse mit **G.T.F.V.3** für verschiedene charakteristische Durchmesser ermittelt.

Tabelle 15: Die kritische Sohlgeschwindigkeit aus G.T.F.V.3 für verschiedene  $d_{ch}$ 

$d_{ch}$ [m]	$V_{3s}$ [m/s]
0,01	0,081
0,006	0,08
0,0035	0,066
0,003	0,062
0,0015	0,058
0,003	0,025

Die Abbildung 36 zeigt die kritische Sohlgeschwindigkeit der Ergebnisse mit **G.T.F.V.3** für verschiedene charakteristische Durchmesser.

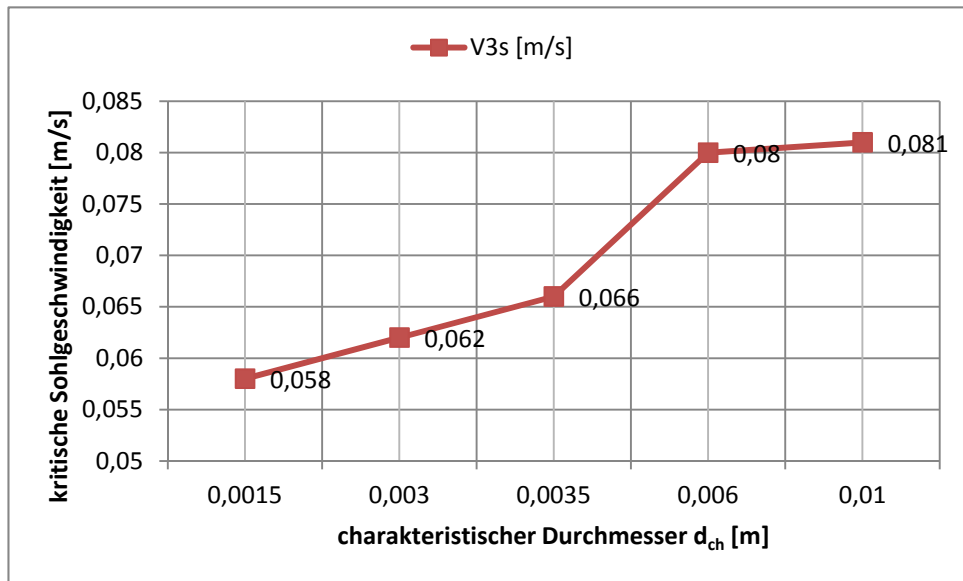


Abbildung 36 Die kritische Sohlggeschwindigkeit mit G.T.F.V.3 errechnet

### 6.1.2 Kritische Sohlschubspannung

In Tabelle 16 wird die kritische Sohlschubspannung der Ergebnisse mit **G.T.F.V.3** für verschiedene charakteristische Durchmesser dargestellt.

Tabelle 16: Die kritische Sohlschubspannung aus G.T.F.V.3 für verschiedene  $d_{ch}$

$d_{ch}$ [m]	$\tau_{3s}$ [N/m <sup>2</sup> ]
0,01	6,594
0,006	5,739
0,0035	4,299
0,003	3,792
0,0015	3,313
0,003	0,611

Abbildung 37 zeigt die kritische Sohlschubspannung für die Ergebnisse mit **G.T.F.V.3** für verschiedene charakteristische Durchmesser.

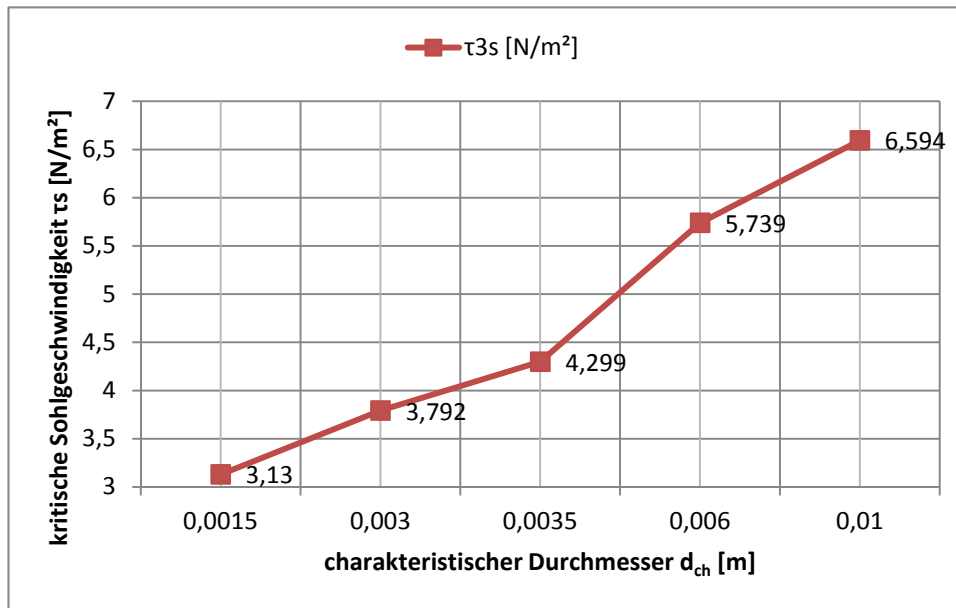


Abbildung 37: Die kritische Sohlschubspannung bestimmt aus G.T.F.V.3

### 6.1.3 Meyer-Peter und Müller Formel (M.P.M.F.)

In Tabelle 17 wird die kritische Sohlschubspannung ermittelt mittels der Meyer-Peter und Müller Formel für verschiedene charakteristische Durchmesser dargestellt.

Tabelle 17: Die kritische Sohlschubspannung mittels M.P.M.F. für verschiedene  $d_{ch}$

$d_{ch}$ [m]	$\tau_{Gr}$ (Meyer-Peter u. Müller) [N/m <sup>2</sup> ]
0,01	7,377
0,006	4,426
0,0035	2,582
0,003	1,798
0,0015	1,107

Die Abbildung 38 zeigt die kritische Sohlschubspannung, welche mittels der Meyer-Peter und Müller Formel für verschiedene charakteristische Durchmesser errechnet wurde.

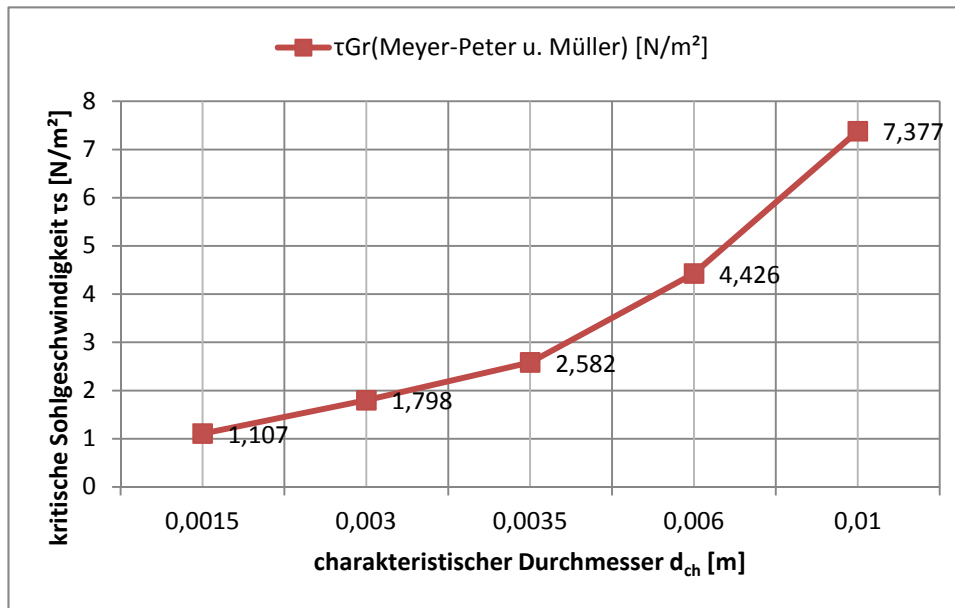


Abbildung 38: Die kritische Sohlschubspannung ermittelt mittels M.P.M.F.

#### 6.1.4 Vergleich der kritischen Sohlschubspannung

In Tabelle 18 ist der Vergleich der kritischen Sohlschubspannung ermittelt durch die Meyer-Peter und Müller Formel (M.P.M.F.) mit den Ergebnissen der Versuchswerte G.T.F.V.3 für verschiedene charakteristische Durchmesser dargestellt.

Tabelle 18: Meyer-Peter u. Müller Formel und G.T.F.V.3

$d_{ch}$ [m]	$\tau_{3s}$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\tau_{Gr}$ (Meyer-Peter u. Müller) [N/m <sup>2</sup> ]
0,01	6,594	7,377
0,006	5,739	4,426
0,0035	4,299	2,582
0,003	3,792	1,798
0,0015	3,313	1,107

Die Abbildung 39 zeigt den Vergleich der kritischen Sohlschubspannung mit den Ergebnissen der Meyer-Peter und Müller Formel und den Ergebnissen der Versuchswerte G.T.F.V.3 für verschiedene charakteristische Durchmesser.



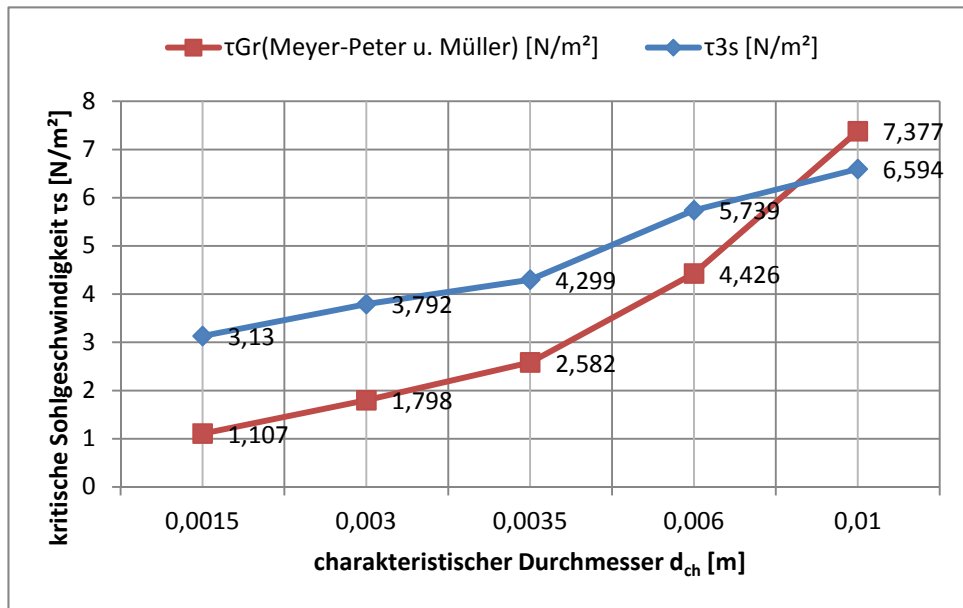


Abbildung 39: Meyer-Peter und Müller Formel und G.T.F.V.3

### 6.1.5 Feststoff-Froudezahl

In Tabelle 19 wird die Feststoff-Froudezahl ( $Fr^*$ ), errechnet aus den Ergebnissen der Versuchswerte **G.T.F.V.3** für verschiedene charakteristische Durchmesser dargestellt.

Tabelle 19: Die Feststoff-Froudezahl ( $Fr^*$ ) aus G.T.F.V.3

$d_{ch}$ [m]	$Fr^*$
0,01	0,042
0,006	0,067
0,0035	0,078
0,003	0,099
0,0015	0,141

Abbildung 40 zeigt die kritische Feststoff-Froudezahl ( $Fr^*$ ) für die Versuchswerte **G.T.F.V.3** für verschiedene charakteristische Durchmesser.

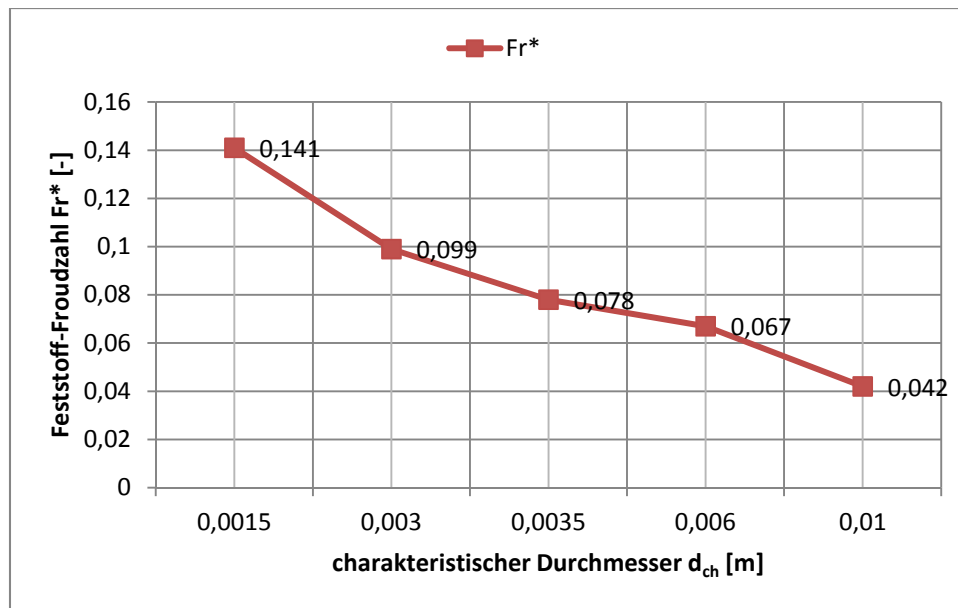


Abbildung 40: Die Feststoff-Froudezahl ( $Fr^*$ ) aus G.T.F.V.3

### 6.1.6 Feststoff-Reynoldszahl

In Tabelle 20 wird die Feststoff-Reynoldszahl ( $Re^*$ ), welche aus den Ergebnissen der Versuchswerte für **G.T.F.V.3** für verschiedene charakteristische Durchmesser ermittelt wurde, dargestellt.

Tabelle 20: Die Feststoff-Reynoldszahl ( $Re^*$ ) von G.T.F.V.3

$d_{ch}$ [m]	$Re^*$
0,01	625
0,006	367
0,0035	177
0,003	142
0,0015	66

Abbildung 41 zeigt die kritische Feststoff-Reynoldszahl ( $Re^*$ ) für die Versuchswerte **G.T.F.V.3** für verschiedene charakteristische Durchmesser.

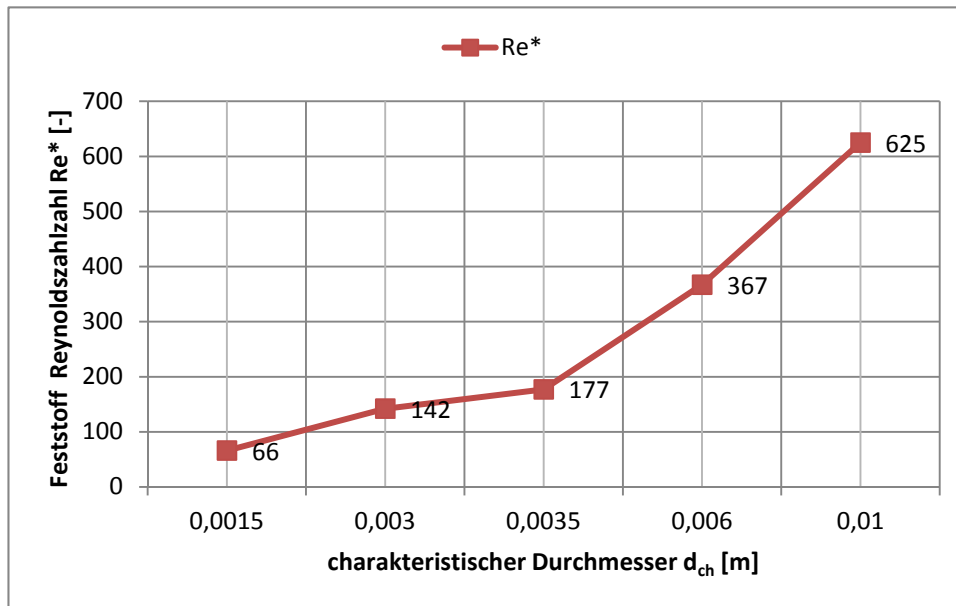


Abbildung 41: Die Feststoff-Reynoldszahl ( $Re^*$ ) von G.T.F.V.3

### 6.1.7 Sedimentologische Durchmesser

In Tabelle 21 sind die sedimentologischen Durchmesser ( $D^*$ ) der Ergebnisse der Versuchswerte **G.T.F.V.3** für verschiedene charakteristische Durchmesser dargestellt.

Tabelle 21: Der sedimentologische Durchmesser ( $D^*$ ) von G.T.F.V.3

$d_{ch}$ [m]	$D^*$
0,01	210
0,006	126
0,0035	73
0,003	59
0,0015	32

Abbildung 42 zeigt die sedimentologischen Durchmesser ( $D^*$ ) mit **G.T.F.V.3** für verschiedene charakteristische Durchmesser.

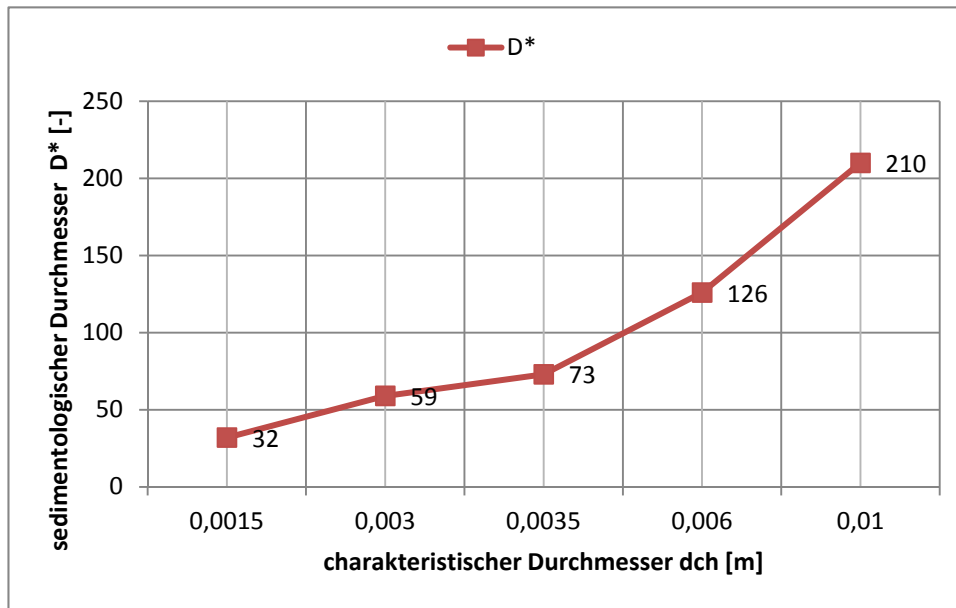


Abbildung 42: sedimentologischer Durchmesser ( $D^*$ ) von G.T.F.V.3

## 6.2 Ergebnisse aus G.T.F.V.2

Dieses Kapitel beschreibt den Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen und der kritischen Sohlgeschwindigkeiten mit **G.T.F.V.2** und **M.P.M.F.** (Tabelle 22 und 23). In Tabelle 23 sind **Fr\***, **Re\*** und **D\*** dargestellt. Diese Untersuchungen **G.T.F.V.2** wurden nur zur Kontrolle **G.T.F.V.3** durchgeführt.

Tabelle 22: Die Ergebnisse G.T.F.V.2 für alle Korngrößen

G.T.F.V.2	Q [m <sup>3</sup> /s]	h [m]	d <sub>ch</sub> [m]	V <sub>2s</sub> [m/s]	τ <sub>2s</sub> [N/m <sup>2</sup> ]	ρ <sub>F</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
Sediment	0,0343	0,155	0,01	0,100	10,387	2600
Sediment	0,03	0,155	0,006	0,093	9,006	2600
Quarz	0,0315	0,233	0,0035	0,075	5,625	2600
Ziegelsplitt	0,03	0,253	0,003	0,070	5,014	2300
Quarz	0,0259	0,311	0,0015	0,067	4,679	2600
Kunststoff	0,01	0,218	0,003	0,025	0,611	1300

Tabelle 23: Die Ergebnisse G.T.F.V.2 für alle Korngrößen

τ <sub>Gr</sub> (Meyer-Peter u. Müller)[N/m <sup>2</sup> ]	Fr*	Re*	D*	d <sub>ch</sub> [m]
7,377	0,064	772	210	0,01
4,426	0,091	427	126	0,006
2,582	0,101	201	73	0,0035
1,798	0,129	162	59	0,003
1,107	0,193	78	32	0,0015
0,415	0,069	57	36	0,003

## 6.3 Bewegungsbeginn nach Shields für jedes Sediment

Im vorliegenden Kapitel werden Ergebnisse der Ermittlung des Bewegungsbeginn nach Shields (1936) mit Angabe des Bewegungsrisikos  $R$  nach Zanke (1990) zusammengefasst dargestellt.

### 6.3.1 Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,01$ [m]

Abbildung 43 zeigt das im Modellversuch verwendete Sediment mit einem Durchmesser von  $d_{ch} = 0,01$  [m] und  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>]. Abbildung 44 zeigt das Sediment im Glasgerinne.



Abbildung 43: Sediment mit einem Durchmesser von 0,01 [m] <sup>79</sup>



Abbildung 44: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von 0,01 [m] <sup>80</sup>

<sup>79</sup> Foto: Johansson, C.

### 6.3.1.1 Bewegungsbeginn ermittelt mit G.T.F.V.3

Abbildung 45 zeigt den Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,01$  [m] und einer Dichte von  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>] mit G.T.F.V.3.

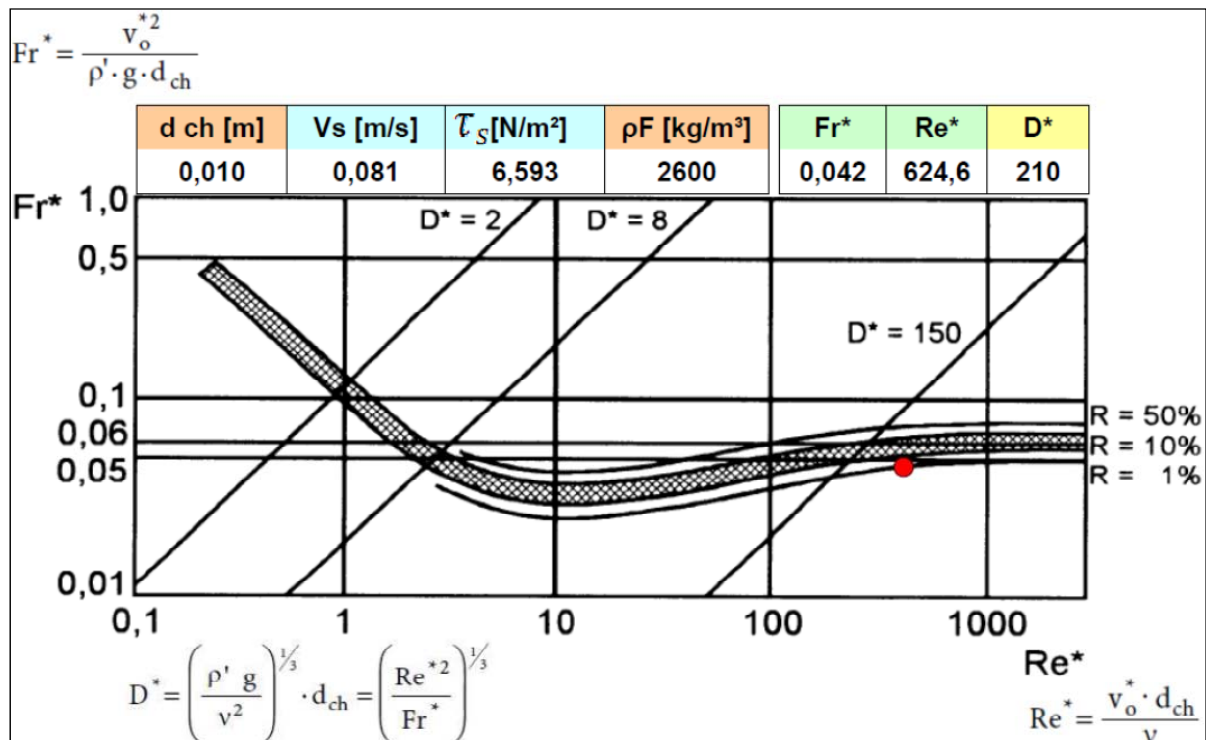


Abbildung 45: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und  $d_{ch} = 0,01$  [m]<sup>81</sup>

<sup>80</sup> Foto: Shafaroudi, S.

<sup>81</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]

### 6.3.1.2 Bewegungsbeginn ermittelt mit G.T.F.V.2

In Abbildung 46 ist der Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,01$  [m] und einer Feststoffdichte  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>] mit G.T.F.V.2 dargestellt.

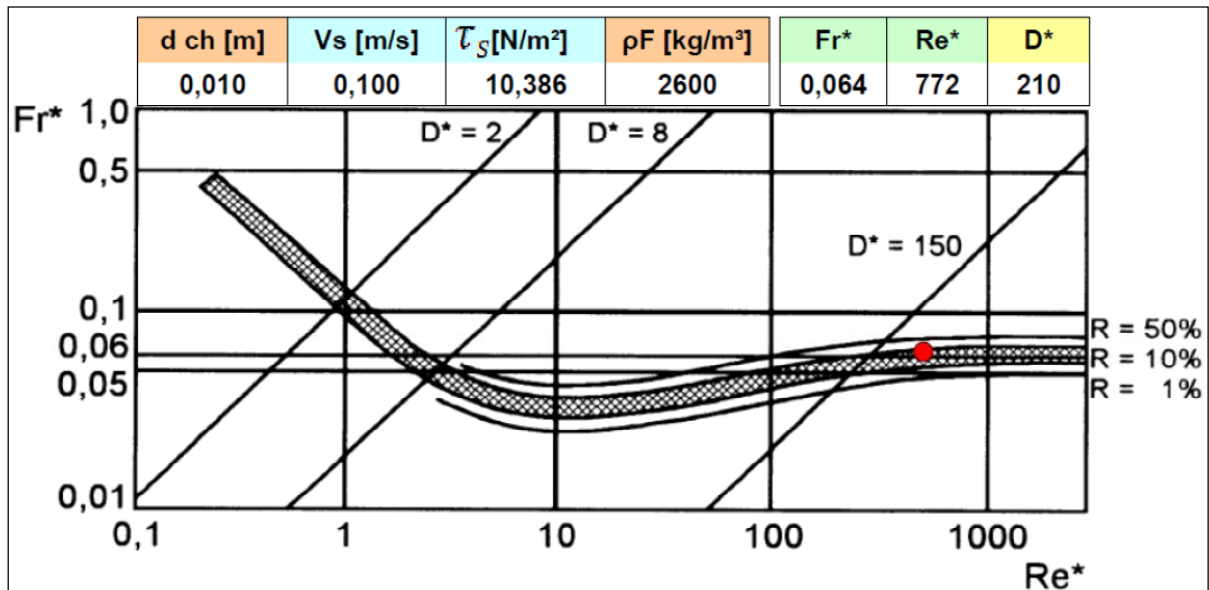


Abbildung 46: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und  $d_{ch} = 0,01$  [m].<sup>82</sup>

<sup>82</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]



### 6.3.2 Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,006$ [m]

Abbildung 47 zeigt das im Modellversuch verwendete Sediment mit einem Durchmesser von  $d_{ch} = 0,006$  [m] und  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>]. Abbildung 48 zeigt das Sediment im Glasgerinne.



Abbildung 47: Sediment mit einem Durchmesser von  $0,006$  [m]<sup>83</sup>



Abbildung 48: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von  $0,006$  [m]<sup>84</sup>

<sup>83</sup> Foto: Johansson, C.

<sup>84</sup> Foto: Shafaroudi, S.

### 6.3.2.1 Bewegungsbeginn ermittelt mit G.T.F.V.3

Abbildung 49 zeigt den Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,006$  [m] und einer Dichte von  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>] mit **G.T.F.V.3**.

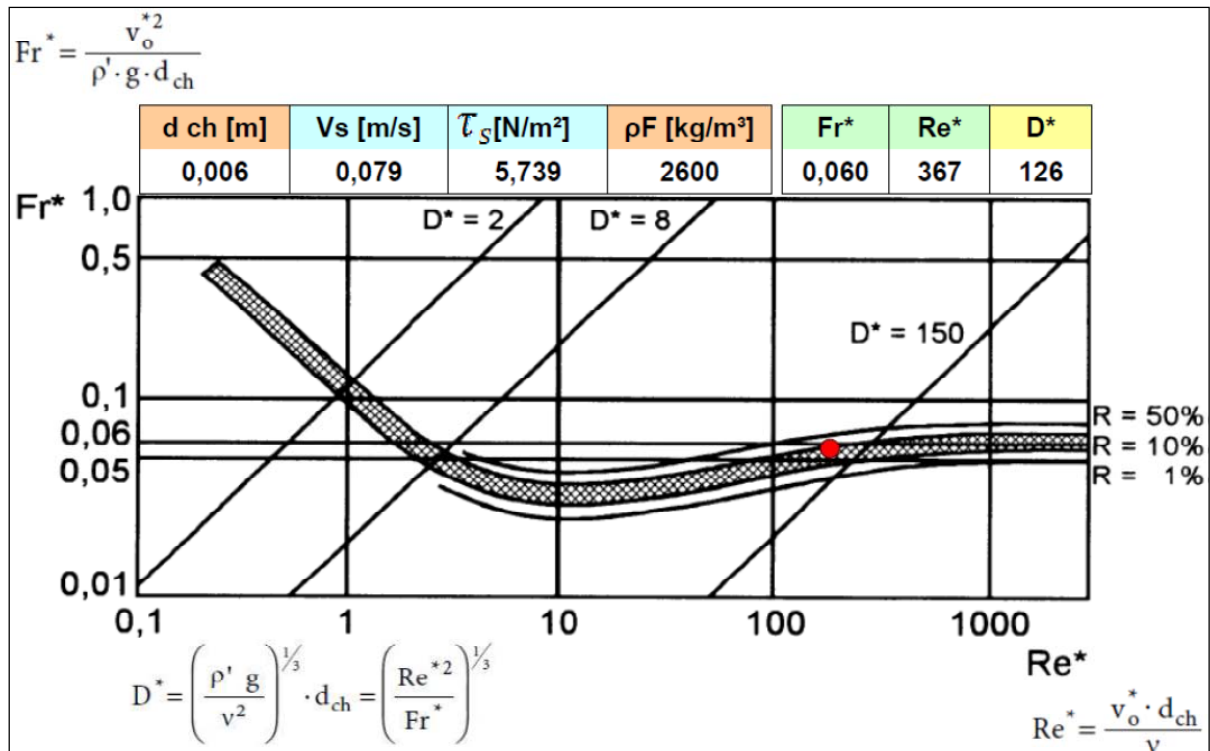


Abbildung 49: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und  $d_{ch} = 0,006$  [m]<sup>85</sup>

<sup>85</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]

### 6.3.2.2 Bewegungsbeginn mit dem Ergebnis von G.T.F.V.2

Abbildung 50 ist der Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsriskos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,006$  [m] und einer Feststoffdichte  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>] mit **G.T.F.V.2** dargestellt.

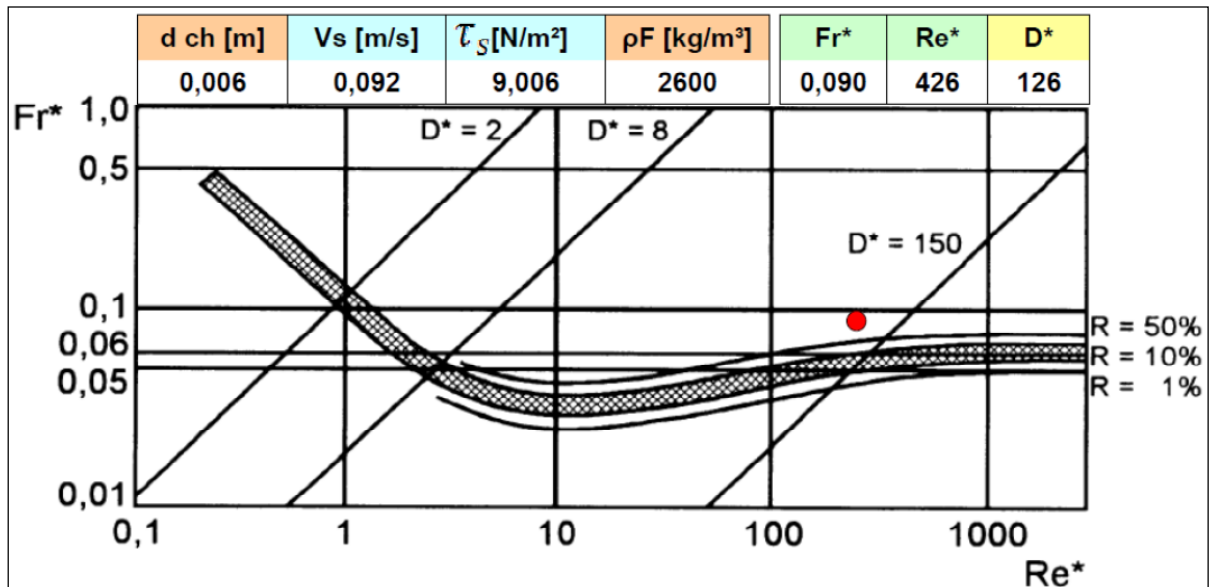


Abbildung 50: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und  $d_{ch} = 0,006$  [m]<sup>86</sup>

<sup>86</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]

### 6.3.3 Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,0035$ [m]

Abbildung 51 zeigt das im Modellversuch verwendete Sediment mit einem Durchmesser von  $d_{ch} = 0,0035$  [m] und  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>]. Abbildung 52 zeigt das Sediment im Glasgerinne.



Abbildung 51: Sediment (Quarzsand) mit einem Durchmesser von  $0,0035$  [m]<sup>87</sup>



Abbildung 52: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von  $0,0035$  [m]<sup>88</sup>

<sup>87</sup> Foto: Johansson, C.

<sup>88</sup> Foto: Shafaroudi, S.

6.3.3.1 Bewegungsbeginn ermittelt mit G.T.F.V.3

Abbildung 53 zeigt den Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos **R** nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,0035$  [m] und einer Dichte von  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>] mit **G.T.F.V.3**.

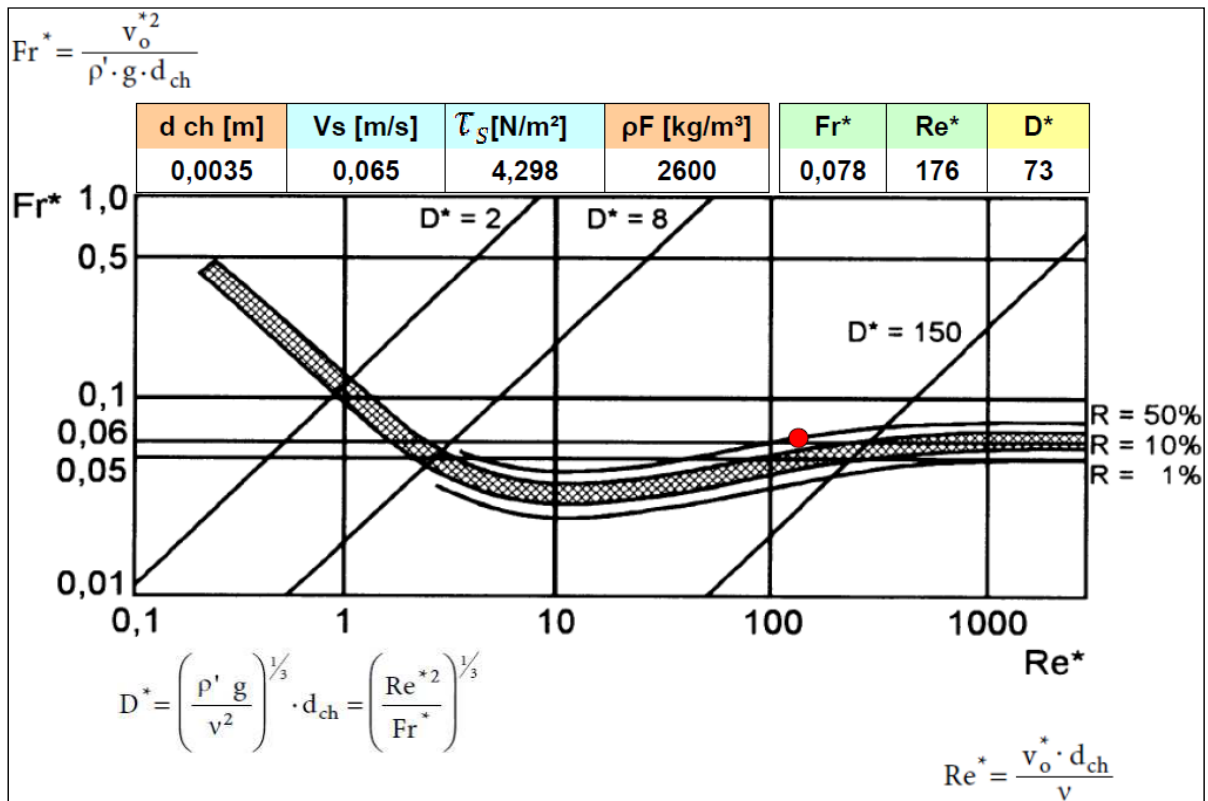


Abbildung 53: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und  $d_{ch} = 0,0035$  [m]<sup>89</sup>

<sup>89</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]



### 6.3.3.2 Bewegungsbeginn mit dem Ergebnis von G.T.F.V.2

Abbildung 54 ist der Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,0035$  [m] und einer Feststoffdichte  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>] mit **G.T.F.V.2** dargestellt.

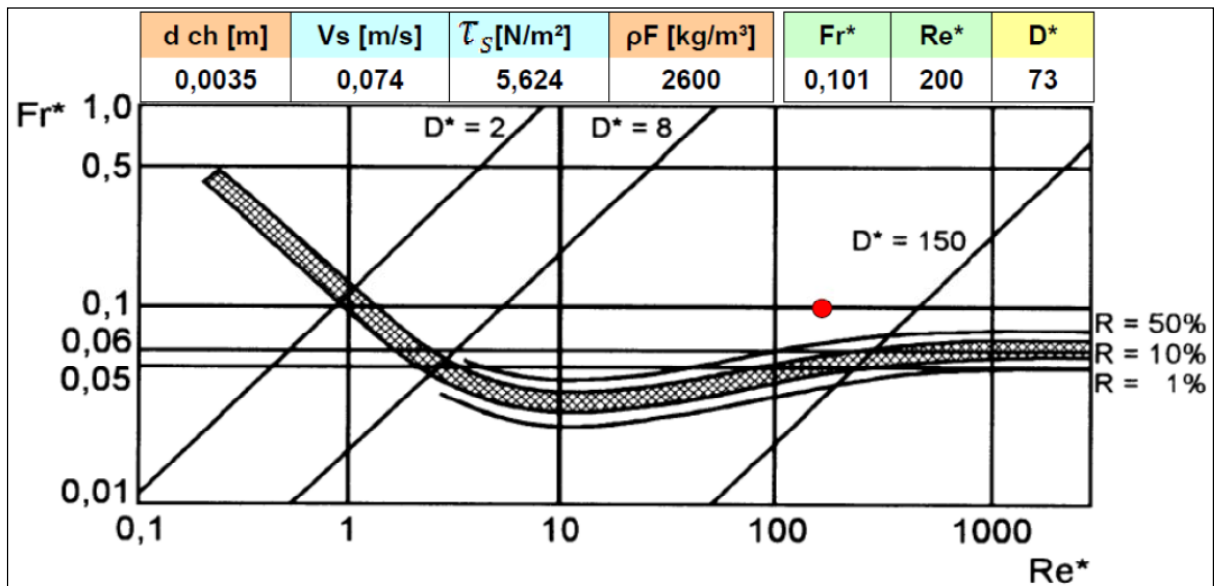


Abbildung 54: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und  $d_{ch} = 0,0035$  [m]<sup>90</sup>

<sup>90</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]

### 6.3.4 Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,003$ [m]

Abbildung 45 zeigt das im Modellversuch verwendete Sediment mit einem Durchmesser von  $d_{ch} = 0,003$  [m] und  $\rho_s = 2300$  [kg/m<sup>3</sup>]. Abbildung 46 zeigt das Sediment im Glasgerinne.



Abbildung 55: Sediment (Ziegelsplitt) mit einem Durchmesser von  $0,003$  [m]<sup>91</sup>



Abbildung 56: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von  $0,003$  [m]<sup>92</sup>

<sup>91</sup> Foto: Johansson, C.

### 6.3.4.1 Bewegungsbeginn ermittelt mit G.T.F.V.3

Abbildung 57 zeigt Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,003$  [m] und einer Dichte von  $\rho_s = 2300$  [kg/m<sup>3</sup>] mit **G.T.F.V.3**.

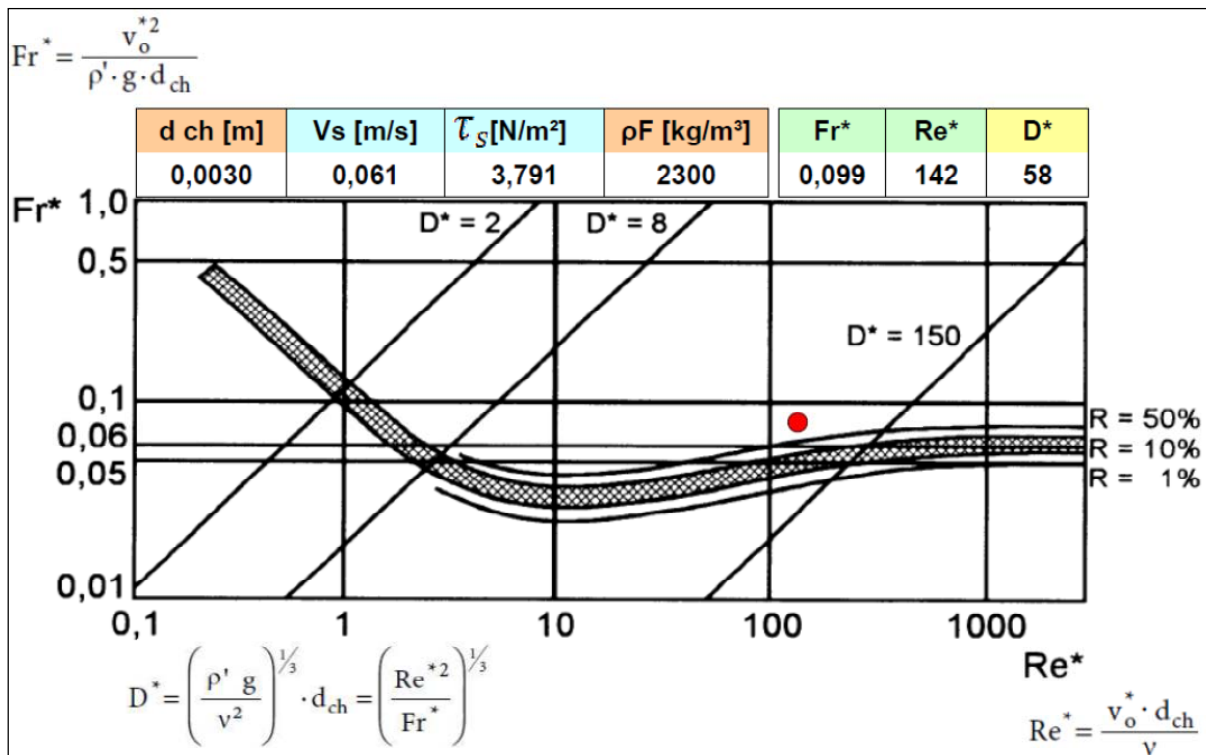


Abbildung 57: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und  $d_{ch} = 0,01$  [m]<sup>93</sup>

### 6.3.4.2 Fehler für den Bewegungsbeginn nach Shields und G.T.F.V.3:

In diesem Kapitel wird der Fehler für den Berechnungsbeginn von Shields und **G.T.F.V.3** abgeschätzt. Dafür wird die Formel 85 herangezogen.

Formel 85

$$Fehler = \frac{(V_s - V_{R10\%})}{V_{R10\%}} \quad [\%]$$

$V_{R10\%}$  Geschwindigkeit in Shields-Diagramms in  $R = 10\%$  [m/s]

$V_{R10\%} = 0,047$  [m/s].

<sup>92</sup> Foto: Shafaroudi, S.

<sup>93</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]



Die Berechnung des Fehlers nach Formel 85:

$$\text{Fehler} = ((0,061 - 0,047) / 0,047) * 100 = 31 \%$$

Somit beträgt der Fehler 31%.

### 6.3.4.3 Bewegungsbeginn mit dem Ergebnis von G.T.F.V.2

Abbildung 58 ist der Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsriskos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,003$  [m] und einer Feststoffdichte  $\rho_s = 2300$  [kg/m<sup>3</sup>] mit G.T.F.V.2 dargestellt.

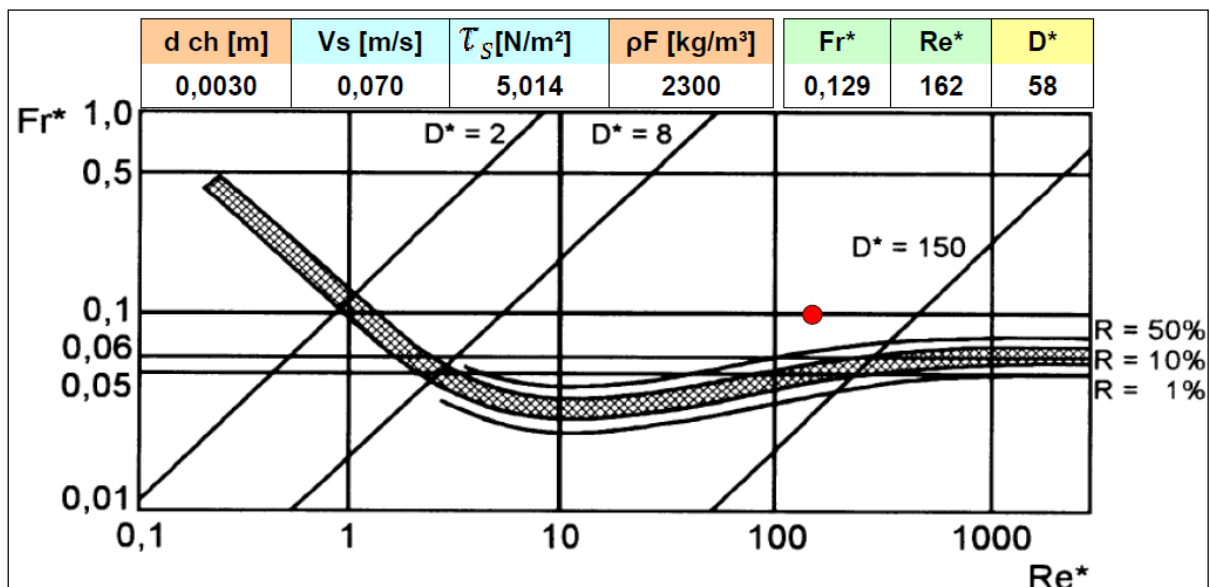


Abbildung 58: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und  $d_{ch} = 0,003$  [m]<sup>94</sup>

<sup>94</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]

### 6.3.5 Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,0015$ [m]

Abbildung 59 zeigt das im Modellversuch verwendete Sediment mit einem Durchmesser von  $d_{ch} = 0,0015$  [m] und  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>]. Abbildung 60 zeigt das Sediment im Glasgerinne.



Abbildung 59: Sediment (Quarzsand) mit einem Durchmesser von 0,0015 [m]<sup>95</sup>



Abbildung 60: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von 0,0015 [m]<sup>96</sup>

<sup>95</sup> Foto: Johansson, C.

### 6.3.5.1 Bewegungsbeginn ermittelt mit G.T.F.V.3

Abbildung 61 zeigt den Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,0015$  [m] und einer Dichte von  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>] mit **G.T.F.V.3**.

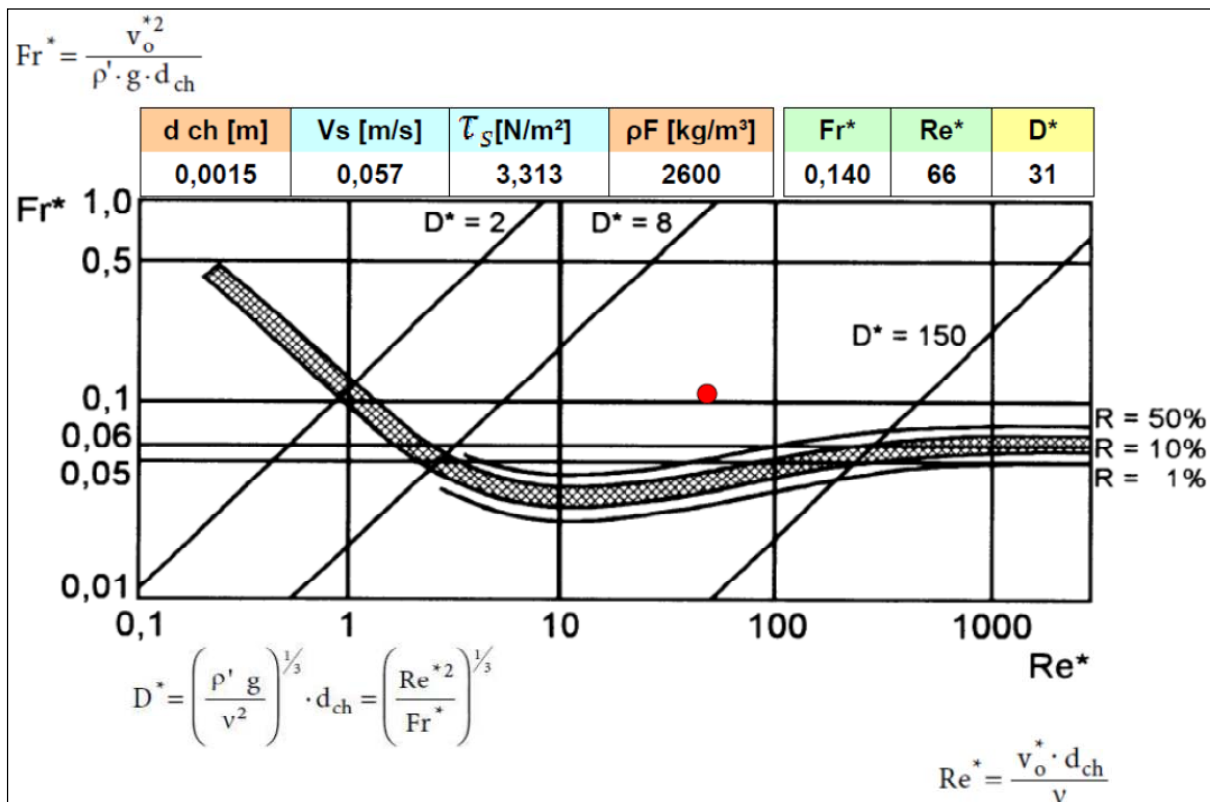


Abbildung 61: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und  $d_{ch} = 0,0015$  [m]<sup>97</sup>

### 6.3.5.2 Fehler für den Bewegungsbeginn nach Shields und G.T.F.V.3

$V_{R10\%} = 0,03$  [m/s].

Aus Formel 85:

$$\text{Fehler} = ((0,057 - 0,03) / 0,03) \cdot 100 = 91\%$$

Der Fehler beträgt 91%.

<sup>96</sup> Foto: Shafaroudi, S.

<sup>97</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]

### 6.3.5.3 Bewegungsbeginn mit dem Ergebnis von G.T.F.V.2

Abbildung 62 ist der Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,0015$  [m] und einer Feststoffdichte  $\rho_s = 2600$  [kg/m<sup>3</sup>] mit G.T.F.V.2.

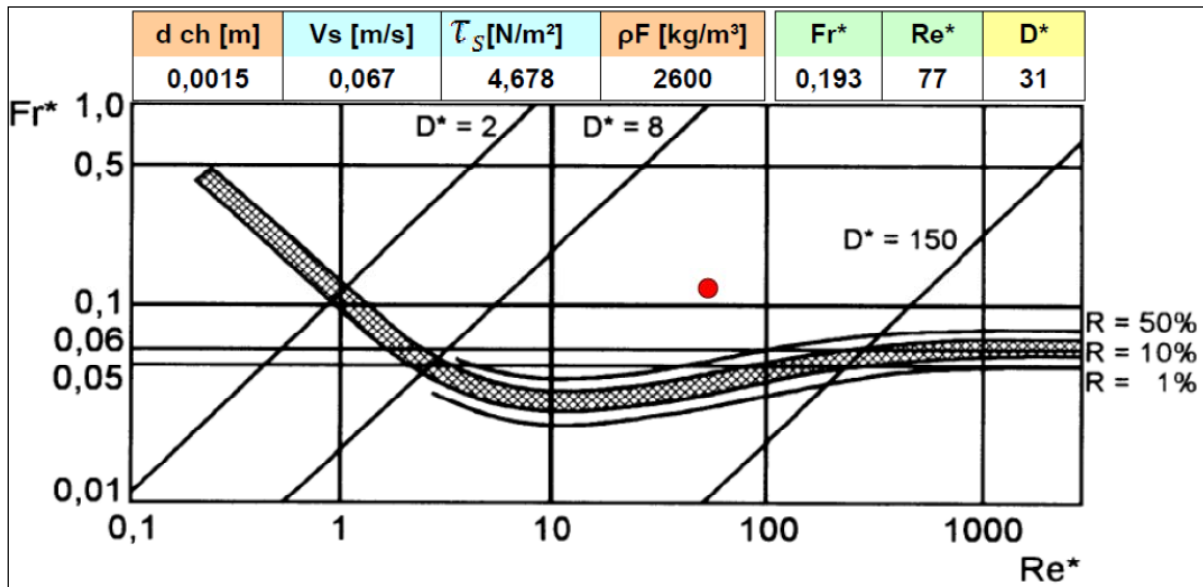


Abbildung 62: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und  $d_{ch} = 0,01$  [m]<sup>98</sup>

<sup>98</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]

### 6.3.6 Bewegungsbeginn nach Shields für $d_{ch} = 0,003$ [m]

Abbildung 63 zeigt das im Modellversuch verwendete Sediment mit einem Durchmesser von  $d_{ch} = 0,003$  [m] und  $\rho_s = 1300$  [kg/m<sup>3</sup>]. Abbildung 64 zeigt das Sediment im Glasgerinne.



Abbildung 63: Sediment mit einem Durchmesser von 0,003 [m] <sup>99</sup>

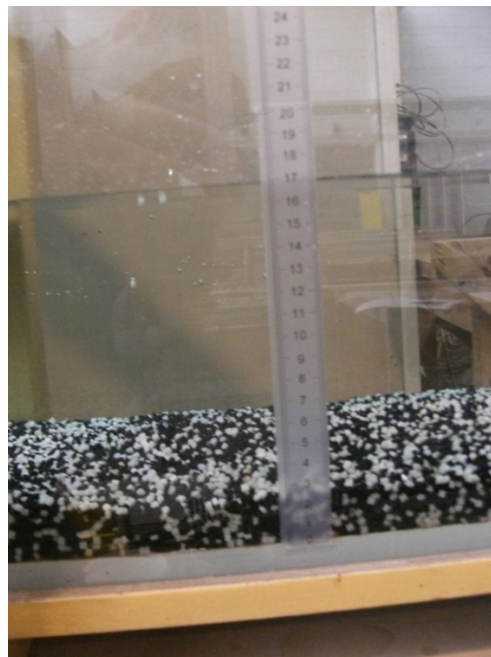


Abbildung 64: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von 0,003 [m] <sup>100</sup>

<sup>99</sup> Foto: Johansson, C.

### 6.3.6.1 Bewegungsbeginn ermittelt mit G.T.F.V.3

Abbildung 65 zeigt Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsrisikos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,003$  [m] und  $\rho_s = 1300$  [kg/m<sup>3</sup>] mit G.T.F.V.3.

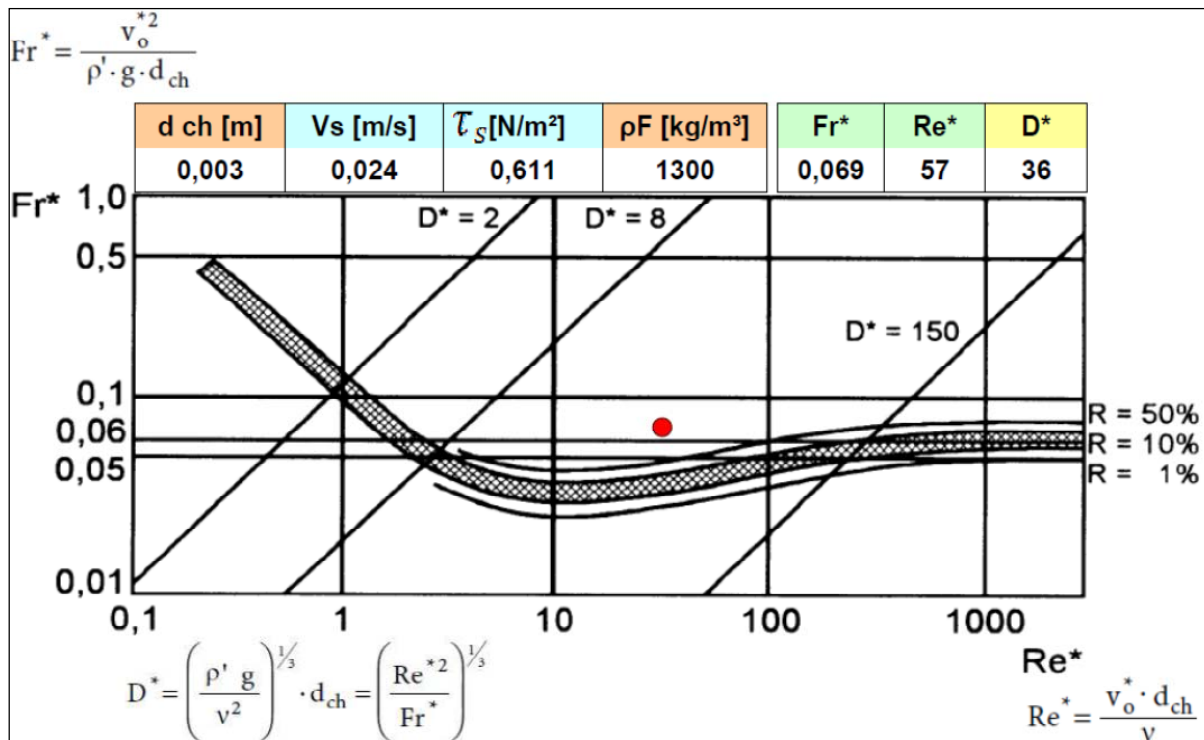


Abbildung 65: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und  $d_{ch} = 0,003$  [m]<sup>101</sup>

### 6.3.6.2 Fehler für den Bewegungsbeginn nach Shields und G.T.F.V.3

$$V_{R10\%} = 0,019 \text{ [m/s].}$$

Aus Formel 85:

$$\text{Fehler} = ((0,024 - 0,019) / 0,019) * 100 = 30\%$$

Der Fehler beträgt 30%.

<sup>100</sup> Foto: Shafaroudi, S.

<sup>101</sup> Diagramm: Shields Diagramm aus Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]



### 6.3.6.3 Bewegungsbeginn mit dem Ergebnis von G.T.F.V.2

Abbildung 66 ist der Bewegungsbeginn nach Shields mit Angabe des Bewegungsriskos  $R$  nach Zanke für das Sediment mit  $d_{ch} = 0,003$  [m] und einer Feststoffdichte  $\rho_s = 1300$  [kg/m<sup>3</sup>] mit G.T.F.V.2.

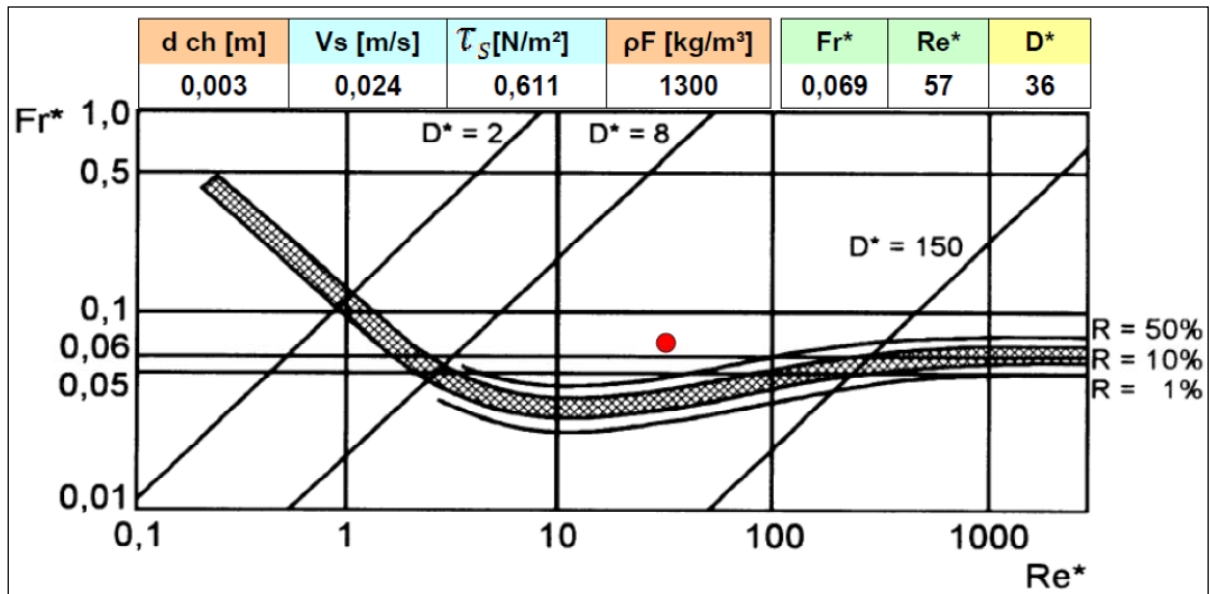


Abbildung 66: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und  $d_{ch} = 0,003$  [m]<sup>102</sup>

<sup>102</sup> Diagramm: Bechteler, W., 1992, "Geschiebemessungen". [2]

### 6.3.7 Diskussion des Fehlers

Die Beobachtung bei den Versuchen, die in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurden, haben Fehler gezeigt, deren Ursachen folgendermaßen erklärt werden können:

- Verdichten und Zusammendrücken der Modellsedimente
- Deckkraft Effekte (Hiding-Effect)
- Beobachten bis die volle Bewegung zu sehen ist
- Größe des Gerinnes im Vergleich mit der Größe von des Kornes
- Durchflusskontrolle
- Stationäre ungleichförmig verzögerte Bewegung

*„ Der Aufbau der Gewässersohle hat maßgeblichen Einfluss auf deren Stabilität. Deck- oder Abpflasterungsschichten verfestigen die Sohle durch ihr Korngerüst und führen zu einer wesentlichen Erhöhung der Sohlenstabilität. Es ist also ein wesentlicher Unterschied, ob ein lose liegendes Korn dem Strömungsangriff ausgesetzt ist oder ein Korn, das in eine Deckschicht eingebettet ist “<sup>103</sup>*

---

<sup>103</sup> Gonsowski, P. et al. 2011, “Wasserbau”. [10]



## 7 Numerische Simulation

### 7.1 Kontur-Plot der Sohlschubspannungen in der Natur

Die Berechnungen für die Sohlschubspannungen in der Natur wurden mit der Software SSIM2 (Technisch-Naturwissenschaftliche Universität Trondheim, Norwegen NTNU) durchgeführt.

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass die auftretenden Schubspannungen im Modell nur 1/40 der Schubspannungen in der Natur entsprechen. Die numerische Simulation für die Sohlschubspannungen wurde am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft im Rahmen der Modellversuche für das KW Schönau durchgeführt. Die Simulation zeigt bei Lastfall HQ10 (HQ10 = 1350 [m<sup>3</sup>/s], 400,5 m.ü.A., kein Turbinenbetrieb), dass sich in der Natur Schubspannungen zwischen minimal 2 [N/m<sup>2</sup>] und maximal 30 [N/m<sup>2</sup>] verteilen. Umgerechnet für diesen Lastfall betragen die Sohlschubspannungen im Modell zwischen minimal 0,05 [N/m<sup>2</sup>] und maximal 0,75 [N/m<sup>2</sup>].

Die Modellsedimente mit der geeigneten Korngröße für die Untersuchungen mit der beweglichen Sohle im Modell KW Schönau sollen sich bei der vorhandenen Sohlschubspannung bewegen. Kapitel 6 (Analyse) zeigt, dass die Sedimente (ausgenommen Kunststoff), die in den Versuchen verwendet wurden, keine geeigneten Materialien für Untersuchungen mit beweglicher Sohle im Modell KW Schönau sind, da der Bewegungsbeginn für verschiedene Korngrößen, eine größere Sohlschubspannung benötigt.

## 7.2 Lastfall HQ10

Wie bereits erwähnt, stellt der Lastfall HQ10 einen Durchfluss von 1350 [m<sup>3</sup>/s] in der Natur bei einem Stauziel von 400,5 m.ü.A. und keinem Turbinenbetrieb dar.

Abbildung 67 zeigt den Verlauf der Verteilung der Sohlschubspannungen in [N/m<sup>2</sup>] beim Lastfall HQ10.

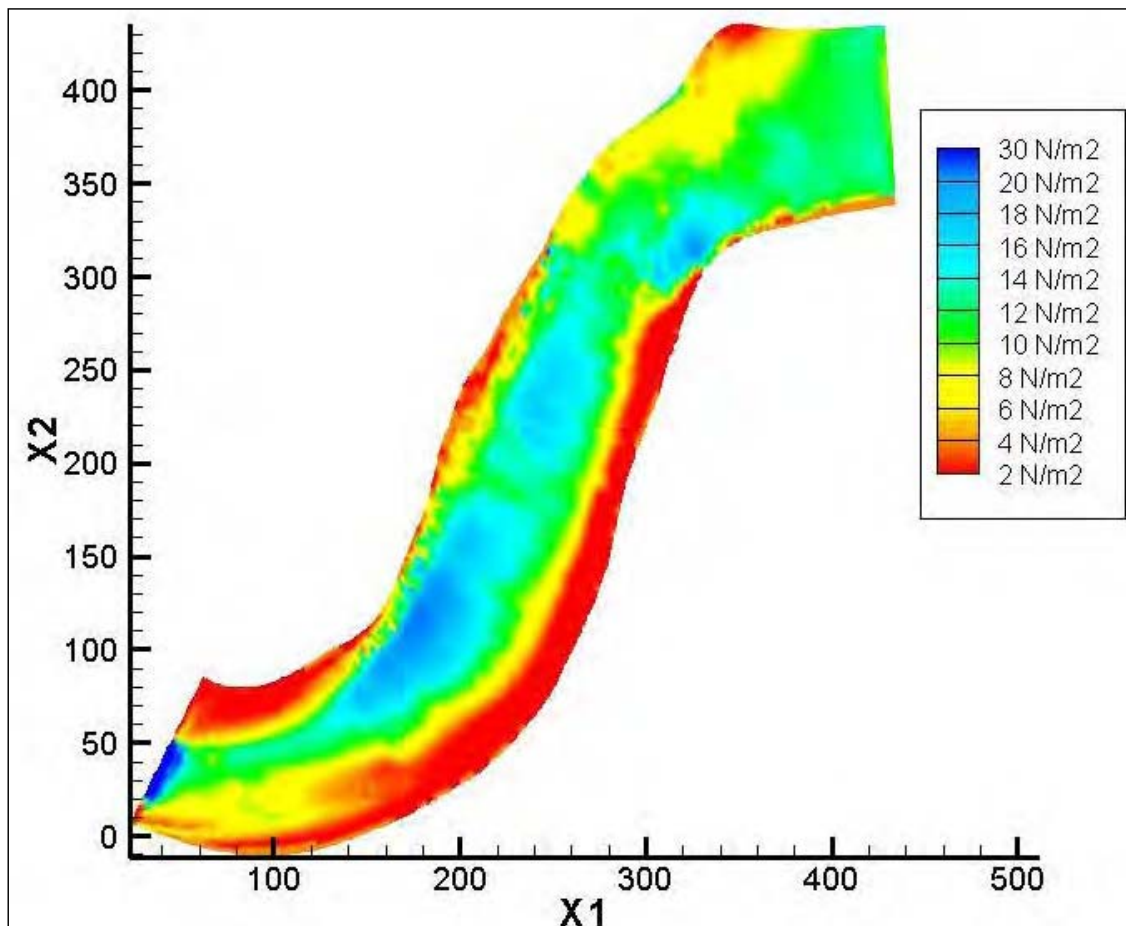


Abbildung 67: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall HQ10<sup>104</sup>

<sup>104</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]

### 7.3 Lastfall HQ1

Der Lastfall HQ1 beschreibt den Abfluss von 750 [m<sup>3</sup>/s] in der Natur bei einer Stauhöhe von 400,5 m.ü.A. und unter den Betrieb beider Turbinen.

Abbildung 68 zeigt den Verlauf der Verteilung der Sohlschubspannungen in [N/m<sup>2</sup>] für den Lastfall HQ1.

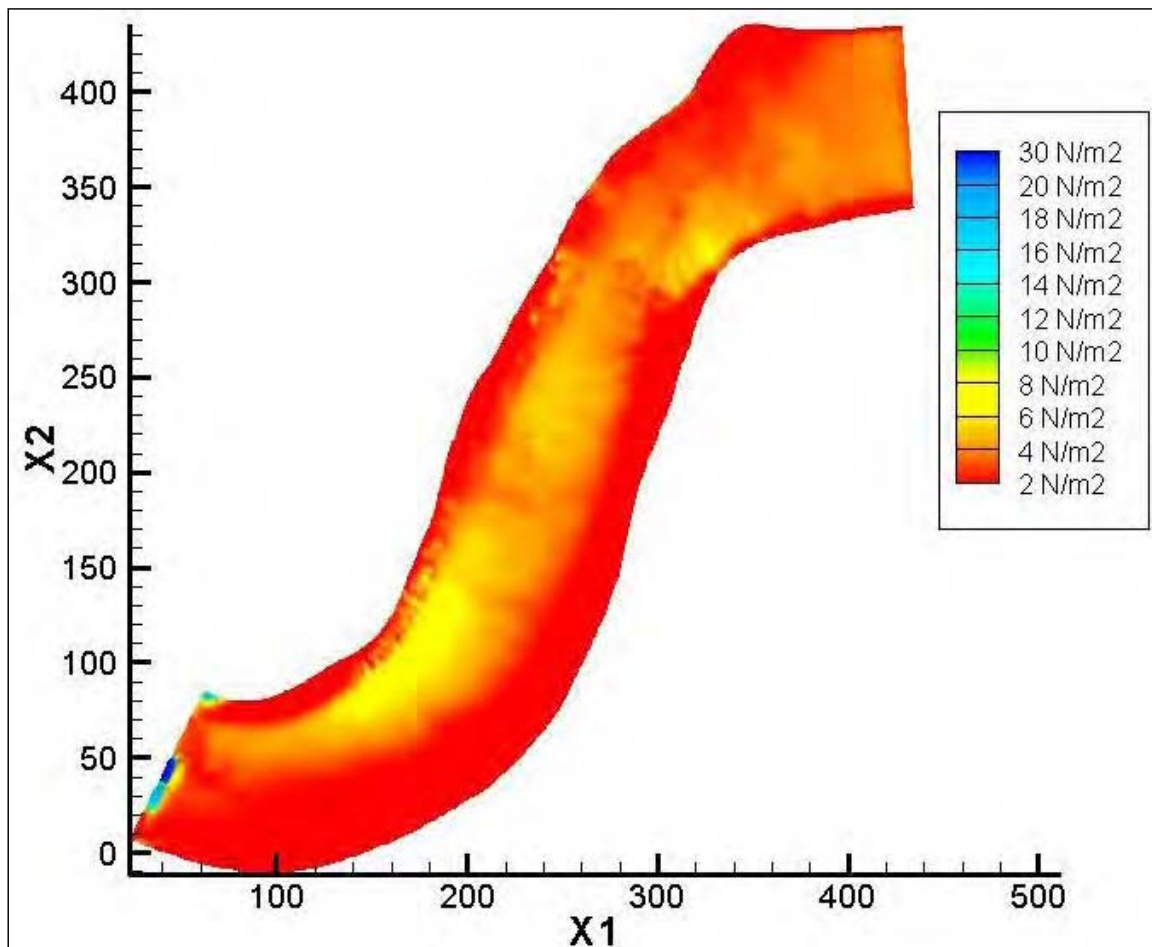


Abbildung 68: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall HQ1 <sup>105</sup>

<sup>105</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]

## 7.4 Lastfall 1

Der Lastfall 1 beschreibt den Abfluss von 1000 [m<sup>3</sup>/s] in der Natur bei einem Stauziel von 398,0 m.ü.A. und unter den Betrieb beider Turbinen.

Abbildung 69 zeigt den Verlauf der Verteilung der Sohlschubspannungen in [N/m<sup>2</sup>] beim Lastfall 1.

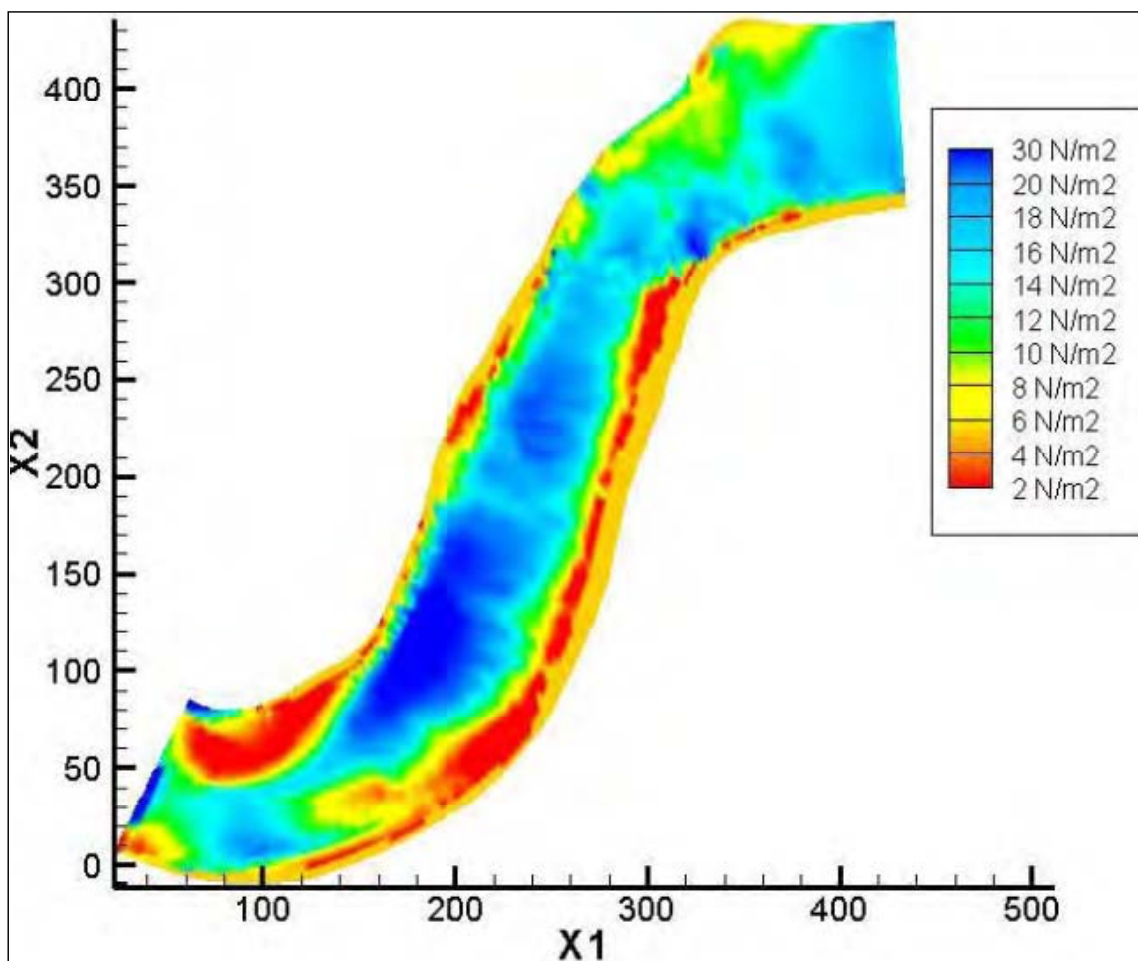


Abbildung 69: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall 1 <sup>106</sup>

<sup>106</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]

## 7.5 Lastfall 2

Der Lastfall 2 beschreibt den Abfluss von 1000 [m<sup>3</sup>/s] in der Natur bei einer Stauhöhe von 398,0 m.ü.A. und keinen Turbinenbetrieb.

Abbildung 70 zeigt den Verlauf der Verteilung der Sohlschubspannungen in [N/m<sup>2</sup>] für den Lastfall 2.

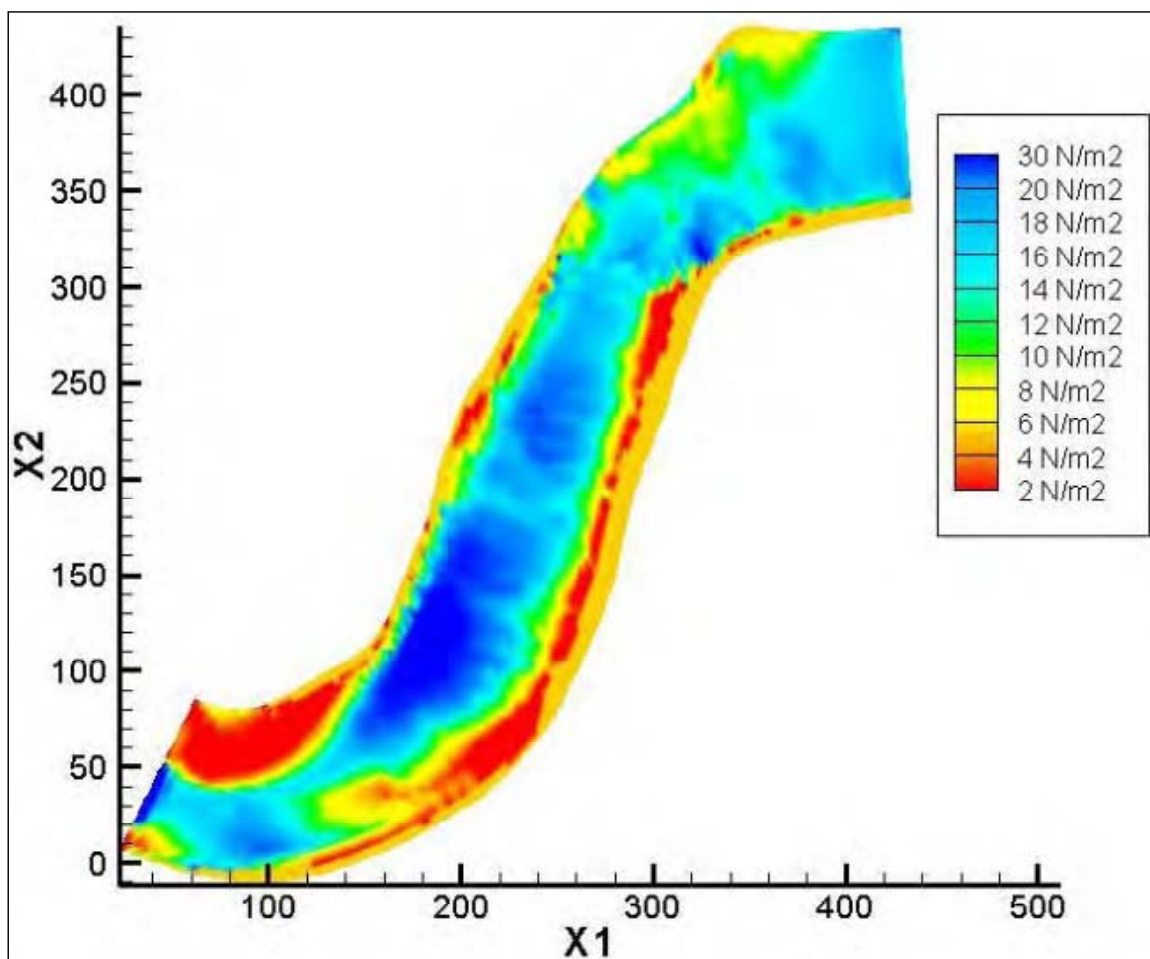


Abbildung 70: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall 2 <sup>107</sup>

<sup>107</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]

## 7.6 Lastfall 3

Der Lastfall 3 beschreibt den Abfluss von 500 [m<sup>3</sup>/s] in der Natur bei einer Stauhöhe von 398,0 m.ü.A. und unter den Betrieb beider Turbinen.

Abbildung 71 Zeigt den Verlauf der Verteilung der Sohlschubspannungen in [N/m<sup>2</sup>] für den Lastfall 3.

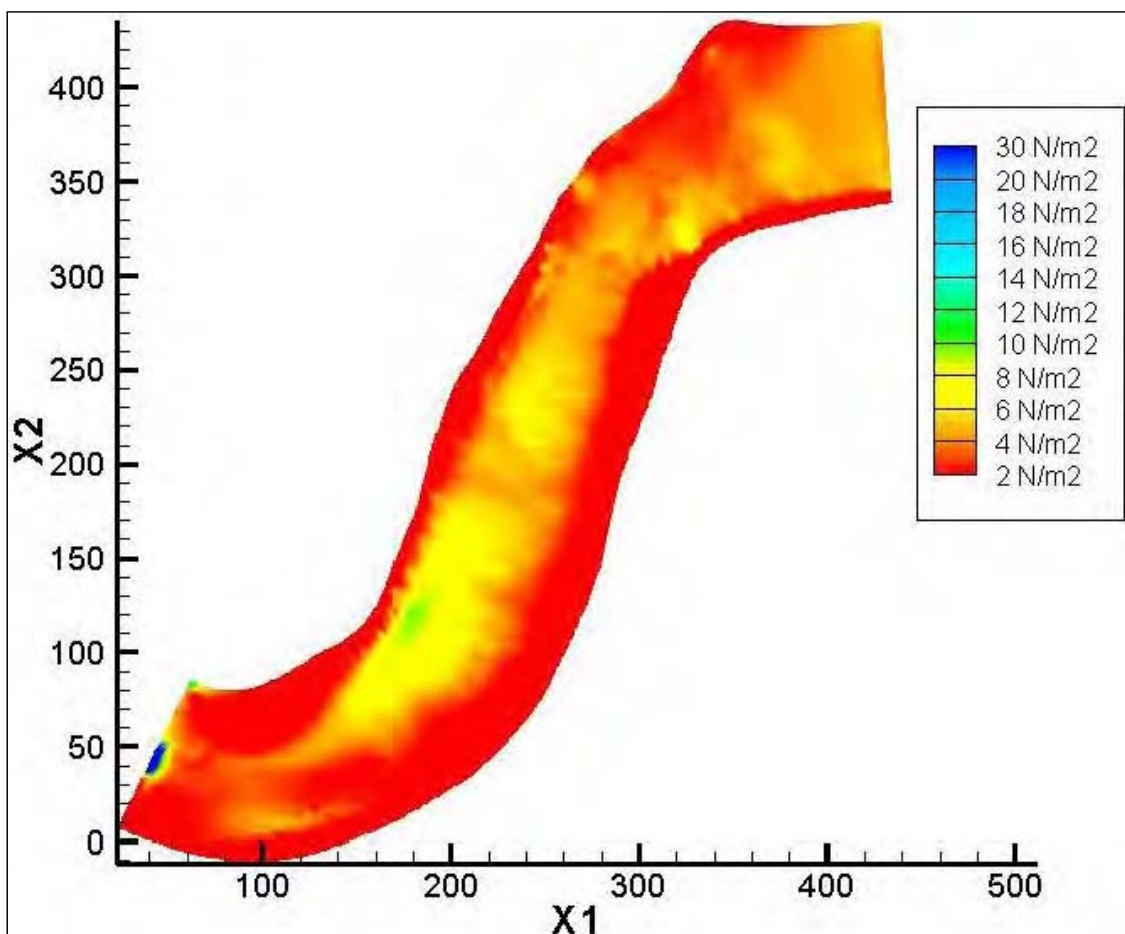


Abbildung 71: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall 3 <sup>108</sup>

<sup>108</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]

## 7.7 Lastfall 4

Der Lastfall 4 beschreibt den Abfluss von 500 [m<sup>3</sup>/s] in der Natur bei einer Stauhöhe von 398,0 m.ü.A. und keinen Turbinenbetrieb.

Abbildung 72 zeigt den Verlauf der Verteilung der Sohlschubspannungen in [N/m<sup>2</sup>] für den Lastfall 4.

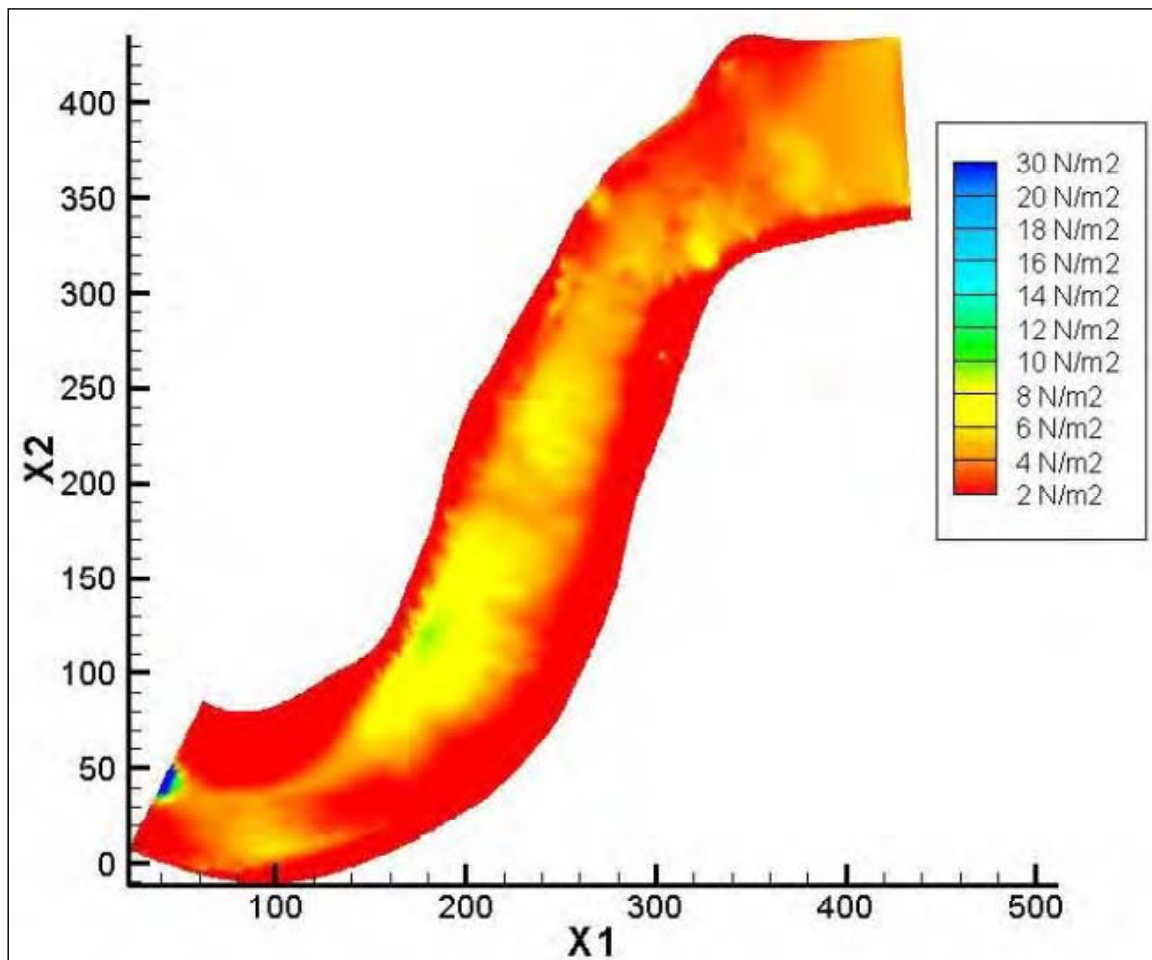


Abbildung 72: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall 4<sup>109</sup>

<sup>109</sup> Zenz, G. et al., 2010, "numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau". [24]



## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die kritischen Schubspannungen für die Sedimente, welche in Versuchen im Labor des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz verwendet werden, ermittelt und die Ergebnisse der kritischen Sohlschubspannungen mit den Sohlschubspannungen in der Natur verglichen. Die geeigneten Materialien werden für die Verwendung in den Geschiebeversuchen mit beweglicher Sohle in KW Schönau Modell gewählt, Voraussetzung dafür ist, dass die dynamische Ähnlichkeit in Modell und Natur gleich bleibt.

Der durchgeführte Modellversuch hatte letztendlich das Ziel, Aussagen über den Geschiebetransport im Stauraum des Kraftwerks Schönau während des Spülablaufs treffen zu können. Eine rechnerische Ermittlung der kritischen Sohlschubspannung für das im Modellversuch verwendete Geschiebe hat ergeben, dass für Ziegelsplitt die Sohlschubspannung im Bereich von  $3,792 \text{ [N/m}^2\text{]}$  mit dem Shieldsparameter  $\text{Fr}^*=0,099$ ,  $\text{Re}^*=141$  und  $\text{D}^*= 59$  liegt.

Um einen Bezug zur Natur herzustellen, wurde das geeignete Sediment im Modell abhängig von den Daten aus dem Software SSIM2 für verschiedene Lastfälle, so gewählt, dass die Sohlschubspannungen im Modell zwischen maximal  $0,75 \text{ [N/m}^2\text{]}$  und minimal  $0,05 \text{ [N/m}^2\text{]}$  liegen. Besonders für die Lastfälle mit geringerem Durchfluss wie zum Beispiel, bei  $\text{HQ}_1 = 750 \text{ [m}^3\text{/s]}$ ,  $400,5 \text{ m.ü.A.}$  und 2-Turbinenbetrieb, sollte ein Sediment im Modell verwendet werden, bei welchem mit  $0,05 \text{ [N/m}^2\text{]}$  Sohlschubspannung der Bewegungsbeginn stattfindet.

Sogenannte Hybridmodelle, das sind Modelle, die eine Verknüpfung zwischen beiden Arten der hydraulischen Modellierungen (numerisch und physikalisch) herstellen, ermöglichen eine direkte Lösung zum Auswählen die passenden Sedimente in den physikalischen Modellen.

Es hat sich gezeigt, dass viele Materialien im Labor weniger gut geeignet sind, da der Bewegungsbeginn für verschiedene Korngrößen, einer großen Sohlschubspannung bedarf. Tabelle 24 und Abbildung 73 zeigen zusammenfassend die Ergebnisse mit **G.T.F.V.3** für alle Korngrößen.



Tabelle 24: Die Ergebnisse aus G.T.F.V.3 für alle Korngröße (Wiederholung der Tabelle 13)

G.T.F.V.3	Q [m <sup>3</sup> /s]	h [m]	d <sub>ch</sub> [m]	V <sub>3s</sub> [m/s]	τ <sub>3s</sub> [N/m <sup>2</sup> ]	ρ <sub>F</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
Sediment	0,0343	0,155	0,01	0,081	6,594	2600
Sediment	0,03	0,155	0,006	0,080	5,739	2600
Quarz	0,0315	0,233	0,0035	0,066	4,299	2600
Ziegelsplitt	0,03	0,253	0,003	0,062	3,792	2300
Quarz	0,0259	0,311	0,0015	0,058	3,313	2600
Kunststoff	0,01	0,218	0,003	0,025	0,611	1300

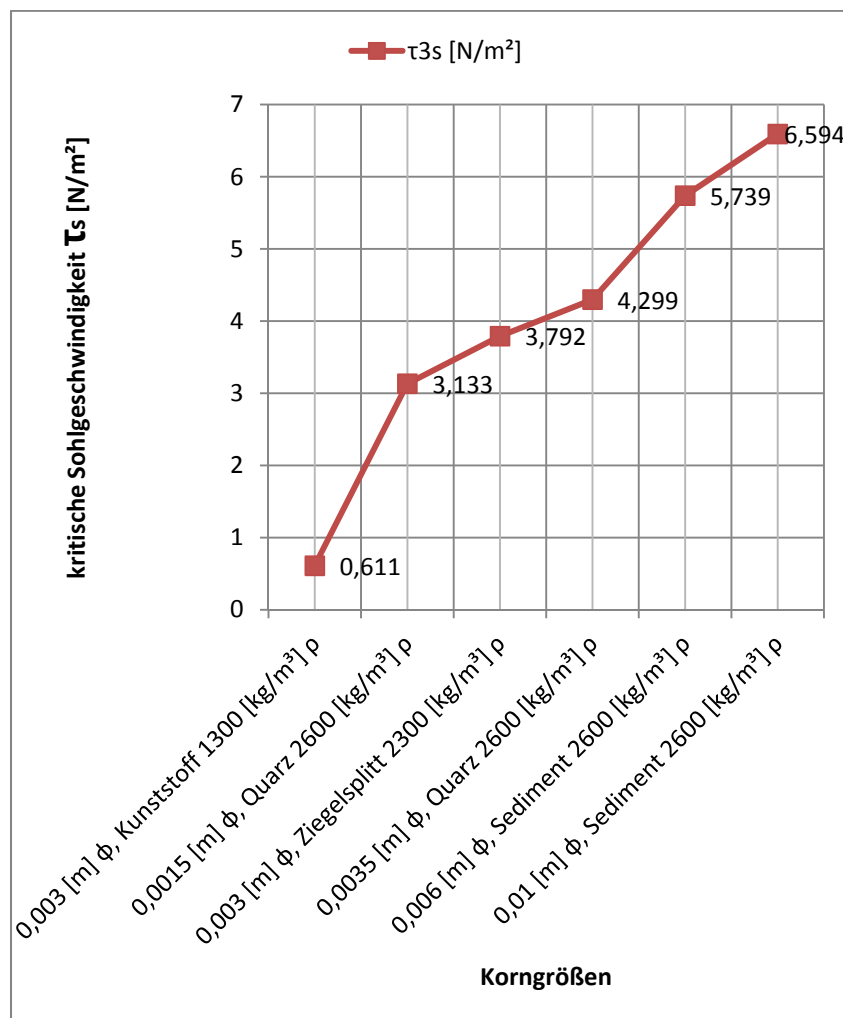


Abbildung 73: Die kritische Sohlschubspannung bestimmt aus G.T.F.V.3

## 9 Verzeichnisse

### 9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Baggerungen im Stausee Schönau der Ennskraftwerke AG .....	2
Abbildung 2: Baggerungen im Stausee Schönau der Ennskraftwerke AG .....	2
Abbildung 3: Die Tafel des Kraftwerkes .....	3
Abbildung 4: Kraftwerk Schönau .....	4
Abbildung 5: Kraftwerk Schönau .....	5
Abbildung 6: Kraftwerk Schönau .....	6
Abbildung 7: Kraftwerk Schönau .....	6
Abbildung 8: Modelllageplan .....	9
Abbildung 9: Blick vom Oberwasser Richtung Wehranlage .....	9
Abbildung 10: Zulauf, Krafthaus, 3-feldrige Wehranlage, Unterwasser .....	10
Abbildung 11: Gesamtmodell M 1:40 .....	11
Abbildung 12: Geschiebeversuch mit beweglicher Sohle .....	12
Abbildung 13: Geschiebeversuch mit beweglicher Sohle .....	12
Abbildung 14: Einbau bewegliche Sohle 2002 aus Ziegelsplitt .....	13
Abbildung 15: Geschiebeversuch mit beweglicher Sohle und Stauabsenkung .....	14
Abbildung 16: Kraftwerk Schönau Model (Variante Einlaufschwelle) .....	15
Abbildung 17: Kraftwerk Schönau Model (Variante Einlaufschwelle) .....	16
Abbildung 18: Schema zum Feststofftransport .....	18
Abbildung 19: Hiding-Effekt bei der Ausbildung der Gewässersohle .....	20
Abbildung 20: Bewegungsbeginn für Quarzmaterial (nach Hjulström, 1935) .....	21
Abbildung 21: Verteilung der Schubspannung in einem trapezförmigen Gerinnequerschnitt .....	23
Abbildung 22: Schema zum Schubspannungsansatz im Gewässerbett .....	23
Abbildung 23: Shields-Diagramm ergänzt um das Bewegungsrisiko R .....	25
Abbildung 24: Bewegungsbeginn nach Shields (1936) mit Angabe des Bewegungsrisikos (R) nach Zanke (1990) .....	26
Abbildung 25: Schematische Darstellung der hydraulisch glatten Strömung .....	27
Abbildung 26: Schematische Darstellung der hydraulisch groben turbulenten Strömung ....	28
Abbildung 27: Sohlenformen (Transportkörper) .....	31
Abbildung 28: Verlauf der Sohlenschubspannung ts bei verschiedenen Sohlenformen .....	32
Abbildung 29: Schematische Darstellung eines Flusslaufs .....	33
Abbildung 30: Sohlenlagen beweglicher Gerinnesohlen oberhalb eines Fixpunktes. a Gleichgewichtslage, b Erosion und c Auflandung .....	34

Abbildung 31: Veränderung im Fließverlauf .....	34
Abbildung 32: Glasgerinne .....	45
Abbildung 33: Der Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen (G.T.F.V.1, 2, 3, D).....	55
Abbildung 34: Der Vergleich der kritischen Sohlgeschwindigkeiten ( G.T.F.V.1, 2, 3, D).....	56
Abbildung 35: Vergleich der kritischen Sohlschubspannungen .....	57
Abbildung 36 Die kritische Sohlengeschwindigkeit mit G.T.F.V.3 errechnet.....	60
Abbildung 37: Die kritische Sohlenschubspannung bestimmt aus G.T.F.V.3 .....	61
Abbildung 38: Die kritische Sohlenschubspannung ermittelt mittels M.P.M.F. ....	62
Abbildung 39: Meyer-Peter und Müller Formel und G.T.F.V.3 .....	63
Abbildung 40: Die Feststoff-Froudezahl ( $Fr^*$ ) aus G.T.F.V.3 .....	64
Abbildung 41: Die Feststoff-Reynoldszahl ( $Re^*$ ) von G.T.F.V.3.....	65
Abbildung 42: sedimentologischer Durchmesser ( $D^*$ ) von G.T.F.V.3 .....	66
Abbildung 43: Sediment mit einem Durchmesser von 0,01 [m] .....	68
Abbildung 44: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von 0,01 [m] .....	68
Abbildung 45: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und $d_{ch} = 0,01$ [m].....	69
Abbildung 46: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und $d_{ch} = 0,01$ [m].....	70
Abbildung 47: Sediment mit einem Durchmesser von 0,006 [m] .....	71
Abbildung 48: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von 0,006 [m] .....	71
Abbildung 49: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und $d_{ch} = 0,006$ [m].....	72
Abbildung 50: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und $d_{ch} = 0,006$ [m].....	73
Abbildung 51: Sediment (Quarzsand) mit einem Durchmesser von 0,0035 [m] .....	74
Abbildung 52: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von 0,0035 [m] .....	74
Abbildung 53: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und $d_{ch} = 0,0035$ [m].....	75
Abbildung 54: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und $d_{ch} = 0,0035$ [m].....	76
Abbildung 55: Sediment (Ziegelsplitt) mit einem Durchmesser von 0,003 [m].....	77
Abbildung 56: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von 0,003 [m] .....	77
Abbildung 57: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und $d_{ch} = 0,01$ [m].....	78
Abbildung 58: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und $d_{ch} = 0,003$ [m].....	79
Abbildung 59: Sediment (Quarzsand) mit einem Durchmesser von 0,0015 [m] .....	80
Abbildung 60: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von 0,0015 [m] .....	80
Abbildung 61: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und $d_{ch} = 0,0015$ [m].....	81
Abbildung 62: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und $d_{ch} = 0,01$ [m].....	82
Abbildung 63: Sediment mit einem Durchmesser von 0,003 [m] .....	83
Abbildung 64: Sediment in der Versuchsrinne mit einem Durchmesser von 0,003 [m] .....	83
Abbildung 65: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.3 und $d_{ch} = 0,003$ [m].....	84
Abbildung 66: Bewegungsbeginn nach Shields, G.T.F.V.2 und $d_{ch} = 0,003$ [m].....	85
Abbildung 67: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall HQ10 .....	88

Abbildung 68: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall HQ1 ..... 89

Abbildung 69: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall 1 ..... 90

Abbildung 70: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall 2 ..... 91

Abbildung 71: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall 3 ..... 92

Abbildung 72: Die Verteilung der Sohlschubspannungen für den Lastfall 4 ..... 93

Abbildung 73: Die kritische Sohlenschubspannung bestimmt aus G.T.F.V.3 ..... 95

## 9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenndaten des Kraftwerks Schönau .....	7
Tabelle 2: Enns Zuflüsse .....	7
Tabelle 3: Relevante Abflüsse im Modellversuch KW Schönau .....	8
Tabelle 4: $Re^*$ und Strömung .....	27
Tabelle 5: Erfahrungswerte kritischer Schubspannungen und Geschwindigkeiten für den Beginn des Geschiebebetriebs .....	35
Tabelle 6: Einige im Wasserbau wichtige Modellgesetze und die darin dominierenden Kräfte .....	38
Tabelle 7: Die Sohlenschubspannung und die Sohlengeschwindigkeit mit $d_{ch} = 0,01$ [m] und $\rho_s = 2600$ [kg/m <sup>3</sup> ] .....	53
Tabelle 8: Die Sohlenschubspannung und die Sohlengeschwindigkeit mit $d_{ch} = 0,006$ [m] und $\rho_s = 2600$ [kg/m <sup>3</sup> ] .....	53
Tabelle 9: Die Sohlenschubspannung und die Sohlengeschwindigkeit mit $d_{ch} = 0,0035$ [m] und $\rho_s = 2600$ [kg/m <sup>3</sup> ] .....	53
Tabelle 10: Die Sohlenschubspannung und die Sohlengeschwindigkeit mit $d_{ch} = 0,003$ [m] und $\rho_s = 2300$ [kg/m <sup>3</sup> ] .....	54
Tabelle 11: Die Sohlenschubspannung und die Sohlengeschwindigkeit mit $d_{ch} = 0,0015$ [m] und $\rho_s = 2600$ [kg/m <sup>3</sup> ] .....	54
Tabelle 12: Vergleich der kritischen Sohlenschubspannungen.....	57
Tabelle 13: Die Ergebnisse aus G.T.F.V.3 für alle Korngröße .....	58
Tabelle 14: Die Ergebnisse aus G.T.F.V.3 für alle Korngröße .....	59
Tabelle 15: Die kritische Sohlgeschwindigkeit aus G.T.F.V.3 für verschiedene $d_{ch}$ .....	59
Tabelle 16: Die kritische Sohlenschubspannung aus G.T.F.V.3 für verschiedene $d_{ch}$ .....	60
Tabelle 17: Die kritische Sohlenschubspannung mittels M.P.M.F. für verschiedene $d_{ch}$ .....	61
Tabelle 18: Meyer-Peter u. Müller Formel und G.T.F.V.3 .....	62
Tabelle 19: Die Feststoff-Froudezahl ( $Fr^*$ ) aus G.T.F.V.3.....	63
Tabelle 20: Die Feststoff-Reynoldszahl ( $Re^*$ ) von G.T.F.V.3.....	64
Tabelle 21: Der sedimentologische Durchmesser ( $D^*$ ) von G.T.F.V.3.....	65
Tabelle 22: Die Ergebnisse G.T.F.V.2 für alle Korngrößen.....	67
Tabelle 23: Die Ergebnisse G.T.F.V.2 für alle Korngrößen.....	67
Tabelle 24: Die Ergebnisse aus G.T.F.V.3 für alle Korngröße (Wiederholung der Tabelle 13) .....	95

### 9.3 Literaturverzeichnis

- [1] Baumgartner, Herwig. *Wendehorst Beispiele aus der Baupraxis*. Edited by Otto W. Wetzell. Wiesbaden: Teubner, 2007.
- [2] Bechteler, Wilhelm. *Geschiebemessungen: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.(DVWK)*. Berlin: Paul Parey 1992.
- [3] Bechteler, Wilhelm. *Geschiebemessungen: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.(DVWK)*. Berlin: Paul Parey 1994.
- [4] Bechteler, Wilhelm. *Geschiebemessungen: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.(DVWK)*. Berlin: Paul Parey 2002.
- [5] Bollrich, Gerhard, Helmut Martin, und Günter Preißler. *Technische Hydro-mechanik*. Berlin: Verl. für Bauwesen, 1989.
- [6] Böge, Alfred, und Gert Böge. *Technische Mechanik: Statik - Dynamik – Fluid-mechanik - Festigkeitslehre*. Wiesbaden: Vieweg, 2006.
- [7] Dingman, S. L. *Fluvial hydraulics*. Oxford , New York: Oxford University Press, 2009.
- [8] Gehrig, Wilhelm. *Über die Frage der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen*. Tchnischen Hochschule Hannover. Fakultät für Bauwesen der Technischen Hochschule Hannover 1967.
- [9] Giesecke, Jürgen, Emil Mosonyi, und Stephan Heimerl. *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb*. Berlin: Springer Berlin, 2009.
- [10] Gonsowski, Peter, und Patt, Heinz. *Wasserbau: Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen*. Berlin: Springer Berlin, 2011.

- [11] Heigerth, Günther. *Hydromechanik und Hydraulik*. Technische Universität Graz. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 2006.
- [12] Indlekfer, Horst. *Wasserbau-Heft 5 Abflussberechnung für Fließgewässer bei Rauheit- sowie Profiligliederung auf der Grundlage der Strickler –Formel*. Aachen 2003.
- [13] Knoblauch, Helmut. *Hydraulisches Versuchswesen*. Technische Universität Graz. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 2010.
- [14] Kobus, Helmut. *Wasserbauliches Versuchswesen*. Universität Stuttgart. Institut für Wasserbau 1984.
- [15] Maniak, Ulrich. *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*. Berlin: Springer, 2005.
- [16] Patt, Heinz, Jürging, Peter und Kraus, Werner. *Naturnaher Wasserbau: Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern*. Berlin: Springer, 2004.
- [17] Preser, Frank. *Klausurtrainer Hydromechanik für Bauingenieure: Praxisorientierte Aufgaben mit Lösungen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [18] Rössert, Robert. *Hydraulik im Wasserbau*. München , Wien: Oldenbourg, 1988.
- [19] Schlurmann, Torsten. *Wasserbauliches Versuchswesen*. Bergische Universität Wuppertal 2002.
- [20] Schneider, Josef, Gerald Zenz, Simone Ortner, Gabriele Harb, Clemens Dorfmann, Gerhard Zarfl, und Josef Lettner. *Einfluss von Sekundärströmungen auf die Verlandung von Flusskraftwerken am Fallbeispiel KW Schönau- Modellversuch und Numerik*. Technische Universität Graz. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 2010.

[21] Strobl, Theodor. *Wasserbau: Aktuelle Grundlagen - neue Entwicklungen*. Berlin: Springer, 2006.

[22] Strybny, Jann, und Romberg, Oliver. *Ohne Panik Strömungsmechanik!: Ein Lernbuch zur Prüfungsvorbereitung, zum Auffrischen und Nachschlagen*. Wiesbaden: Vieweg, 2007.

[23] Zenz, Gerald, Josef Schneider, Simone Ortner, Gabriele Harb, Clemens Dorfmann, und Fritz Lazar. *Gutachten Kraftwerk Schönau hydraulischer Modellversuch*. Technische Universität Graz. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 2010.

[24] Zenz, Gerald, Josef Schneider, Simone Ortner, Gabriele Harb, Clemens Dorfmann, und Fritz Lazar. *numerischer und hydraulischer Modellversuch KW Schönau*. Technische Universität Graz. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 2010.



## 9.4 Symbolverzeichnis

Symbol	Dimension	Bedeutung
<b>A</b>	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche (Fließquerschnitt)
<b>b</b>	[m]	Breite des Glasgerinnes
<b>d</b>	[m]	Korndurchmesser
<b>d<sub>ch</sub></b>	[m]	charakteristischer Korndurchmesser
<b>d<sub>m</sub></b>	[m]	mittlerer Korndurchmesser der Sohle
<b>d<sub>90</sub></b>	[m]	Korndurchmesser beim 90-Prozent-Durchgang
<b>D*</b>	[-]	sedimentologischer Durchmesser
<b>F</b>	[N]	Komponente der Gewichtskraft
<b>Fr</b>	[-]	Froudezahl
<b>Fr*</b>	[-]	Feststoff-Froudezahl
<b>g</b>	[m/s <sup>2</sup> ]	Fallbeschleunigung
<b>h</b>	[m]	Wassertiefe (benetzte Höhe des Glasgerinnes)
<b>I</b>	[-]	Gefälle
<b>I<sub>s</sub></b>	[-]	Sohlgefälle
<b>k<sub>m</sub></b>	[m <sup>1/3</sup> /s]	Mittlere Rauheit Wand und Sohle
<b>k<sub>w</sub></b>	[m <sup>1/3</sup> /s]	Rauheit der Wand
<b>k<sub>r</sub></b>	[m <sup>1/3</sup> /s]	Koeffizient der Kornrauheit (Kornrauheit)
<b>k<sub>s</sub></b>	[m <sup>1/3</sup> /s]	Sohlrauheit nach ATV-DVWK 2003c
<b>K<sub>Str</sub></b>	[m <sup>1/3</sup> /s]	Beiwert nach Manning-Strickler (Koeffizient)
<b>l<sub>u</sub></b>	[m]	benetzter Umfang
<b>Q</b>	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss
<b>r<sub>hy</sub></b>	[m]	hydraulischer Radius
<b>R</b>	[m]	hydraulischer Radius
<b>Re</b>	[-]	Reynoldszahl
<b>Re*</b>	[-]	Feststoff-Reynoldszahl
<b>R<sub>s</sub></b>	[m]	hydraulischer Sohlenradius
<b>R<sub>m</sub></b>	[m]	mittlere hydraulische Radius der Rinne
<b>U</b>	[m]	Umfang
<b>V<sub>m</sub></b>	[m/s]	mittlere Geschwindigkeit am ganzen Profilumfang
<b>V<sub>w</sub></b>	[m/s]	Geschwindigkeit an den Seitenwänden
<b>V<sub>0*</sub>, V<sub>s</sub></b>	[m/s]	Schubspannungsgeschwindigkeit an der Sohle

$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität (Zähigkeit des Wassers)
$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Geschiebekorns
$\rho'$	[-]	relative Feststoffdichte
$\rho_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Wassers
$\tau$	[N/m <sup>2</sup> ]	Schubspannung
$\tau_{Gr}$	[N/m <sup>2</sup> ]	kritische Schubspannung (critical shear stress)
$\tau_m$	[N/m <sup>2</sup> ]	mittlere Schubspannung beim ganzen Profilumfang
$\tau_w$	[N/m <sup>2</sup> ]	Schubspannung an den Seitenwänden
$\tau_s$	[N/m <sup>2</sup> ]	Schubspannung an der Sohle

## 10 Wassereigenschaften

Stoffwerte (20°C, Normaldruck):

Wasser	$\nu_w = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$	$\rho_w = 1000,0 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Luft	$\nu_L = 14,9 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$	$\rho_L = 1,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Erdöl	$\nu_{\ddot{o}} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$	$\rho_{\ddot{o}} = 824,0 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\tau = \eta \frac{dV}{dz} \quad [\text{N/m}^2]$$

$$F = A \cdot \eta \frac{dV}{dz} \quad [\text{N}]$$

Werte für Berechnungen von Wasserdrücken und strömungen:

Dichte	$\rho_w = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	(bei 4°C)
Kinematische Viskosität	$\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$	(bei 10°C)
Elastizitätsmodul	$E_w = 2,06 \cdot 10^9 \text{ [N/m}^2\text{]}$	
Fallbeschleunigung	$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$	

## 11 Wichtige Formeln der Hydromechanik

- **Wichte und Dichte:**

$$\gamma_W = \rho_W \cdot g$$

- **Hydrostatischer Druck:**

$$P = \gamma_W \cdot h = \rho_W \cdot g \cdot h$$

- **Druck (allgemein):**

$$P = \frac{F}{A}$$

- **Massenerhaltung:**

$$Q_{ein} = Q_{aus}$$

$$A_{ein} \cdot V_{ein} = A_{aus} \cdot V_{aus}$$

- **Kontinuitätsgleichung:**

$$Q = V \cdot A = const.$$

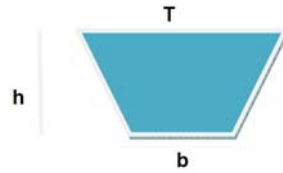
- **Energieerhaltung:**

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_W \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_W \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + h_v$$

- **Bernoulli-Gleichung ohne Energieverlust:**

$$h_E = Z + \frac{P}{\rho_W \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} = h_{geod} + h_D + h_{kin} = const.$$

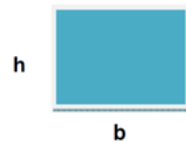
## – Froude-Zahl:



$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot \frac{A}{T}}}$$

$$D = \frac{A}{T}$$

Für (Rechteck-) Gerinne gilt:



$$D = \frac{A}{T} = \frac{b \cdot h}{b} = h$$

## – Bernoulli-Gleichung mit Energieverlusten:

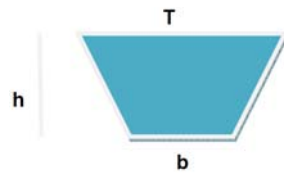
$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_w \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_w \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \sum h_v$$

$$\sum h_v = \sum h_{v_{kont.}} + \sum h_{v_{örtl.}}$$

$$\sum h_{v_{kont.}} = \sum_i \left( \lambda_i \cdot \frac{L_i}{d_i} \cdot \frac{V_i^2}{2g} \right)$$

$$\sum h_{v_{örtl.}} = \sum_i \left( \xi_i \cdot \frac{V_i^2}{2g} \right)$$

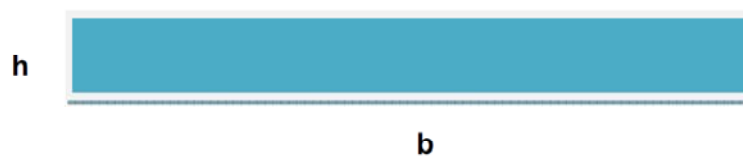
## – Reynolds-Zahl:



$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot r_{hy}}{\eta} = \frac{V \cdot r_{hy}}{\nu}$$

$$r_{hy} = \frac{A}{l_u}$$

Für breite (Rechteck-) Gerinne gilt (Gerinnebreite,  $b \gg h$ ),



$$r_{hy} = \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{b \cdot h}{b + 2h} \approx \frac{b \cdot h}{b} = h$$

## – Freispiegelgerinne:

$$V = k \cdot r_{hy}^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

## – Impulssatz:

$$F_I = \rho_W \cdot V \cdot Q$$