

Bestimmung der kritischen Schubspannung bei kohäsiven Sedimenten

Masterarbeit

eingereicht am

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
der

Technischen Universität Graz

im

Oktober 2011

Gerfried Klammer BSc, 0430759

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 Masterprojekt bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, im Oktober 2011

Betreuer | Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz
Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Josef Schneider
Dipl.-Ing. Gabriele Harb

Kurzfassung

Im Wasserbau werden für die Erstellung von Prognosen und Szenarien numerische Berechnungen durchgeführt. Um aussagekräftige Ergebnisse liefern zu können benötigen diese genaue Eingangswerte, welche durch Modellversuche bestimmt werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung jener kritischen Schubspannung, welche zur Massenerosion angelandeter kohäsiver Sedimente notwendig ist.

Die Ermittlung erfolgt mittels Modellversuchen, welche durch mathematische Berechnungen validiert werden. Nach Entnahme und Einbau ungestörter Proben in einem Glasgerinne erfolgt die Messung der Geschwindigkeiten in horizontaler und vertikaler Richtung mittels Particle Image Velocimetry, kurz PIV genannt. Aus diesen Ergebnissen errechnet sich in weiterer Folge die Schubspannung. Während des Versuches wird schrittweise der Durchfluss und somit die einwirkenden Schubspannungen erhöht. Durch Beobachtung des Erosionsverlaufes an der Probe im Glasgerinne lässt sich eine Aussage über die kritische Schubspannung tätigen.

Um Messungen im Speicher vornehmen zu können wird weiters untersucht, ob sich eine Beziehung zwischen einer Drehflügelmessung und den Ergebnissen der Labor-messung herleiten lässt.

Abstract

In hydraulic engineering numerical calculations are used to accomplish forecasts and scenarios. For meaningful results exact input values are needed. The present work deals with the determination of a critical shear stress which is necessary for the erosion of cohesive sediment.

The investigation is carried out by means of a model trial, which is validated by mathematical calculations. After extraction and fitting of undisturbed samples in a flume, the measurements of velocities in horizontal and vertical direction by means of particle image velocimetry (PIV) were carried out. From these results finally the shear stress was calculated.

During the experiment the flow is gradually increased and so do the shear stresses. By observing the progression of erosion on the sample inside the flume, a statement about the critical shear stress is possible.

To perform in situ measurements, it will be examined, whether it is possible to derive a relationship between vane shear measurements and the results of laboratory measurements.

Danksagung

An erster Stelle bedanken möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz für die konstruktiven Gespräche und der Möglichkeit, die gute Ausstattung des Labors und des Institutes für die Arbeit nutzen zu können.

Im Besonderen gilt mein Dank meinen Betreuern Dipl.Ing. Gabriele Harb und Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Josef Schneider, welche sich für ihre ausgesprochen gute Betreuung viel Zeit nahmen und Fragen und Gesprächen immer sehr aufgeschlossen gegenüber standen.

Meinen Eltern Romy und Diethelm möchte ich an dieser Stelle für die Ermöglichung des Studiums sowie für die Unterstützung zur Erreichung dieses Zieles danken.

Ein Dankeschön gilt auch Bärbel und Karl-Heinz für ihre Unterstützung.

Meiner Freundin Angelika danke ich für die vielen aufmunternden Gespräche und Anregungen während der letzten Monate.

Meinen Kommilitonen im Wasserbauzeichensaal möchte ich für die interessanten und abwechslungsreichen Diskussionen sowie für die gemeinsam verbrachten Stunden danken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Ziel	2
2	Abschätzung und Modellbildung	3
2.1	Abschätzung der kritischen Schubspannung	3
2.1.1	Ermittlung mittels Tabellenwerken	3
2.1.2	Ansatz von Zanke	3
2.1.3	Ansatz von Mavis/Laushey und Zanke	6
2.1.4	Zusammenfassung der Abschätzung	7
2.2	Das hydraulische Modell	8
2.2.1	Definition der Fließformel	8
2.2.2	Berechnung des Normalabflusses	10
2.2.3	Berechnung der Schubspannung	11
3	In Situ Messung	15
3.1	Messung mit der Drehflügelsonde	15
3.1.1	Die Scherfestigkeit von Böden	15
3.1.2	Die Ermittlung der Scherparameter mittels der Drehflügelsonde	17
3.2	Feldmessungen	19
3.2.1	Durchführung der Feldmessungen	19
3.2.2	Messergebnisse der Drehflügelmessung	20
4	Der Glasgerinneversuch	23
4.1	Vorbereitungen	23
4.1.1	Probenentnahme	23
4.1.2	Auswahl des Gerinnes	25
4.2	Aufbau des Versuches	26
4.2.1	Anpassen des hydraulischen Modelles an die Abschätzung . .	26
4.2.2	Adaptierung des Gerinnes	28
4.2.3	Probeneinbau	30
4.2.4	Messsystem	31
4.3	Durchführung	33
4.3.1	Der Probelauf	33
4.3.2	Die Kalibrierung	35
4.3.3	Versuchsreihen 1-6	36
5	Auswertung	41
5.1	Berechnungen	41
5.1.1	Dynamic Studio	41

5.1.2	Schubspannungsermittlung allgemein	46
5.2	Analyse	48
5.2.1	Vergleich der Höhen	48
5.2.2	Vergleich der Geschwindigkeiten	50
5.2.3	Vergleich der Schubspannungen	52
5.2.4	Ermittlung der kritischen Schubspannung	57
5.2.5	Auswertung der Messergebnisse aus der Drehflügelmessung .	58
6	Zusammenfassung	59
A	Anhang	61
B	Anhang	72

Abkürzungsverzeichnis

δ	Grenzschichtdicke
ν	Viskosität
ρ_B	eff. Dichte eines bindigen Bodens einschließlich Wassergehalt
ρ_F	Dichte des Fluids
ρ_S	Dichte des Sediments
σ'	effektive Spannung
σ	(totale) Spannung
τ	Scherfestigkeit
τ_0	Wandschubspannung
τ_{crit}	kritische Schubspannung
φ	Reibungswinkel
A	benetzte Querschnittsfläche
c	Kohäsion
g	Erdbeschleunigung
h	Wasserhöhe
h_r	Reibungsverlusthöhe
I	Gerinnelängsneigung
I_E	Energieliniengefälle
k	absolute hydraulische Rauigkeit
k_m	Beiwert nach Strickler (im Mittel)
k_{st}	Beiwert nach Strickler
k_s	Beiwert nach Strickler (Sohle)
k_w	Beiwert nach Strickler (Wand)
l_u	benetzter Umfang
Q	Durchfluss
u_{*c}	Schubspannungsgeschwindigkeit zu Beginn der Sedimentbewegung
u_{mc}	mittlere Geschwindigkeit über die Tiefe bei Beginn der Sedimentbewegung
v	mittlere Fließgeschwindigkeit
v_{crit}	kritische Fließgeschwindigkeit
w	Wassergehalt
ρ'	relative Dichte
τ_m	Mittlere Schubspannung am gesamten Profilmfang
τ_{peak}	maximale Scherfestigkeit

$\tau_{residual}$	Dauerschermfestigkeit
τ_s	Schubspannung an der Sohle
τ_w	Schubspannung an den Seitenwänden
a	Adhäsion
d	Korndurchmesser
Q_{eff}	effektive Durchflussmenge
Q_{Pump}	gesamt gepumpte Durchflussmenge
S_U	Standardabweichung Geschwindigkeit U
S_V	Standardabweichung Geschwindigkeit V
S_v	unentwässerte Schermfestigkeit
U	Horizontalgeschwindigkeit
u_{cs}	Geschwindigkeit an der Sohle bei Beginn der Sedimentbewegung
V	Vertikalgeschwindigkeit
GB	Gigabyte
kHz	Kilohertz
mJ	Millijoule
nm	Nanometer
OW	Oberwasser
u	Porenwasserdruck

1 Einleitung

Jeder Fluss transportiert neben der Wasserfracht auch Feststoffe unterschiedlicher Korngrößen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit mit sich. Diese bewegen sich als Geschiebe mit deutlich geringerer Geschwindigkeit im Sohlbereich oder als Schwebstoffe in der Flüssigkeit verteilt. Beiden ist gemein, dass die Körner der Schwerkraft folgen und sich in Richtung der Sohle bewegen wollen. Dies benötigt unterschiedliche Zeiten; während Schwebstoffe, welche eine sehr kleine Masse haben, sehr langsam absinken und durch Turbulenzen wieder aufgewirbelt werden, kommt Geschiebe sehr viel schneller zur Ruhe. In Bereichen mit geringen Geschwindigkeiten bilden sich damit Ablagerungen, welche unter Umständen einen negativen Einfluss auf die Geometrie eines Flussquerschnittes oder eines Stauraumes haben (z.B. Hochwassersicherheit, Verringerung der Wirtschaftlichkeit).

1.1 Problemstellung

Dieses Verhalten zu beschreiben erfordert Beobachtungen in der Natur und in einem Modellversuch. Da nicht nur das momentan vorherrschende Bild von Bedeutung ist, sondern auch Prognosen und Szenarien erforderlich sind, bedient man sich numerischer Berechnungen. Diese liefern sehr gute Annäherungen, jedoch können sie die komplexen Vorgänge der Natur nicht exakt beschreiben und sind von der Qualität der Eingangswerte abhängig. Gerade im Wasserbau sind die Berechnungen von sehr vielen Einflussfaktoren abhängig. Es wird daher eine Auswahl signifikanter Faktoren getroffen. Von großer Bedeutung ist auch die Qualität der Werte. Lediglich grob geschätzte Größen liefern Ergebnisse mit geringer Aussagekraft.

Am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz werden numerische Berechnungen für die Kraftwerkskette an der Mur zwischen Leoben und Graz durchgeführt. Das Kraftwerk Pernegg, welches sich in diesem Bereich befindet, wird mit Wasser aus dem Stauraum Zlaten gespeist. Im Stauraum Zlaten (Abbildung 1.1) befinden sich an der Bogeninnenseite Sedimentbänke. Ein Teilbereich der numerischen Berechnung beschäftigt sich mit dem Geschiebehaushalt des Flusses und somit auch mit der Erosion an Sohle und Sedimentbänken.

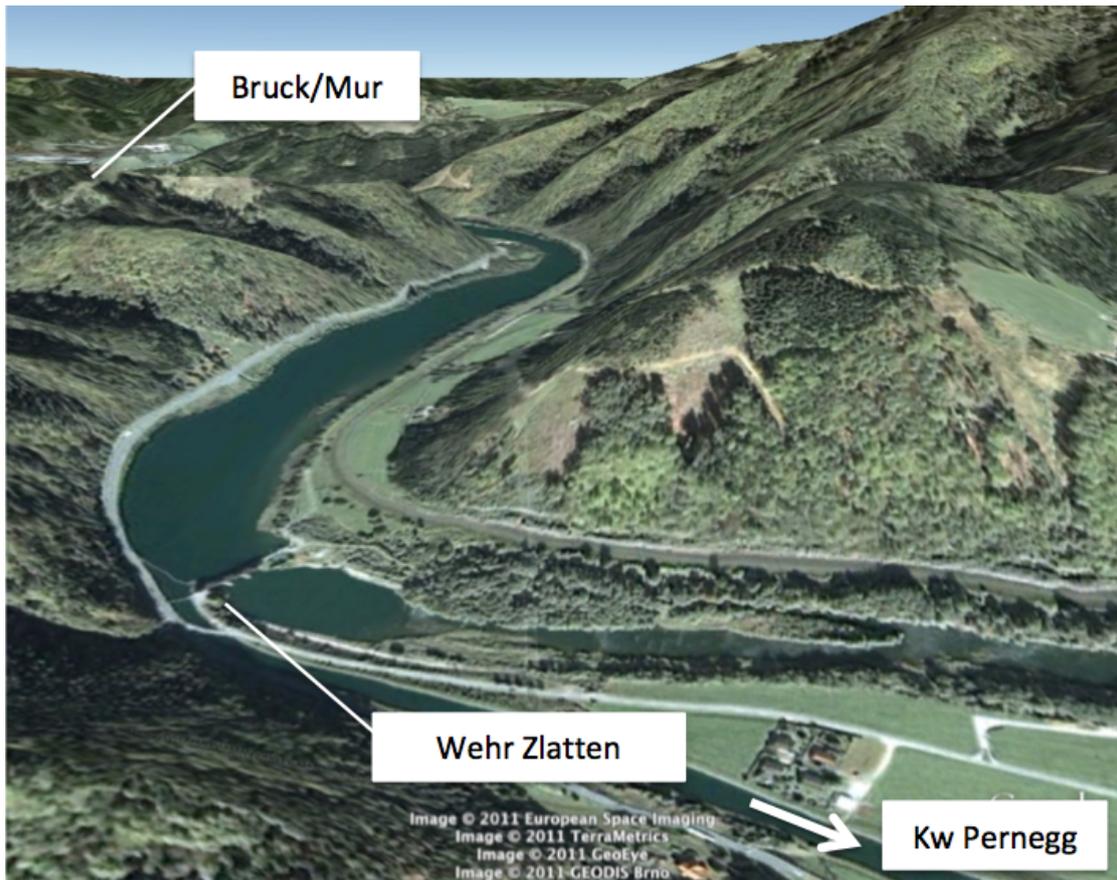


Abbildung 1.1: Überblick über den Stauraum Zlaten (Bild: Google Earth)

1.2 Ziel

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Aussage über eine Größe der zur Massenerosion führenden kritischen Schubspannung. Anders als rollige Böden unterliegen bindige Böden weitaus mehr Einflussparametern was ihr Verhalten unter einer Schubspannungsbelastung anbelangt. Von Bedeutung sind nicht nur die mechanischen Zusammenhänge, sondern auch die chemischen Kräfte zwischen den Bodenteilchen. Diese gänzlich zu erfassen ist derzeit noch nicht möglich. Einzelne Arbeiten liefern für bestimmte Zusammensetzungen von Böden gute Ergebnisse. Da eine Abschätzung nicht die gewünschte Genauigkeit liefert, wird das Sediment einer Laborprüfung unterzogen. Durch den Vergleich mit einer mathematischen Berechnung sollen die ermittelten Schubspannungswerte validiert und ein Wert der kritischen Schubspannung für numerische Berechnungen genannt werden. Um eine rasche Abschätzung vor Ort vornehmen zu können, wird die Aussagekraft einer Drehflügelmessung untersucht.

2 Abschätzung und Modellbildung

In diesem Kapitel erfolgt die Abschätzung der auftretenden kritischen Schubspannung sowie die Erstellung eines mathematischen Modells zur Berechnung des Normalabflusses und in weiterer Folge der auftretenden Schubspannungen.

2.1 Abschätzung der kritischen Schubspannung

In der Literatur finden sich mehrere Arbeiten, welche sich mit der kritischen Sohl-schubspannung beschäftigen. Im Folgenden wird eine Auswahl vorgestellt, um einen Anhalt für die Größenordnung der kritischen Schubspannung bzw. der kritischen Geschwindigkeit zu gewinnen.

2.1.1 Ermittlung mittels Tabellenwerken

In der Werktafel lt. RÖSSERT (1994, S.164) findet sich für die kritische Schubspannung τ_{crit} bei horizontaler Sohle für sandigen Lehm der Wert von $10 - 12 \frac{N}{m^2}$.

BOLLRICH (1992, S.267) nennt für τ_{crit} bei festgelagerten Lehm, Ton bzw. Schlamm den Wert von $\sim 12 \frac{N}{m^2}$ und eine Fließgeschwindigkeit v_{crit} von $0,7 - 1,0 \frac{m}{s}$.

2.1.2 Ansatz von Zanke

ZANKE (1982, S. 179 ff) unterscheidet bei der Erosion bindiger Böden zwei Fälle: fester Boden mit geringem Wassergehalt sowie weicher Boden mit hohem Wassergehalt. In seine Untersuchungen fließen die Scherfestigkeit sowie der Wassergehalt mit ein. Im vorliegenden Versuch wird in der ersten Annahme von einem festen Boden mit geringem Wassergehalt und einer hydraulisch glatten Sohle ausgegangen.

Bei einer turbulenten Strömung mit hydraulisch glatter Sohle wird die Rauigkeit des Kornes zur Gänze von der zähen Unterschicht überdeckt. Dies lässt sich für diese Abschätzung wie folgt zeigen:

Als Randbedingungen werden vorausgesetzt:

- $\nu = 0,01 \frac{cm^2}{s}$
- $I = 1\%$
- $h = 20 \text{ cm}$

Die Grenzschichtdicke δ errechnet sich zu

$$\delta = \frac{11,63 \nu}{u_*} = \frac{11,63 * 0,01}{14} = 0,008 \quad [cm] \quad (2.1)$$

(ZANKE 1982, S.41f)

mit der Schubspannungsgeschwindigkeit u_*

$$u_* = \sqrt{g h I} = \sqrt{981 * 20 * 0,01} = 14,0 \quad [cm/s] \quad (2.2)$$

(ZANKE 1982, S.18)

Aus Tabellen (KIRSCHMER 1974, S.20) lässt sich für die absolute hydraulische Rauigkeit von Glas bzw. Kunststoff ($k \leq 0,002 \text{ mm}$) und von sorgfältig geglätteten Beton ($k \leq 0,05 \text{ mm}$) ermitteln. Vergleicht man nun den Wert der Grenzschichtdicke ($0,008 \text{ cm} = 0,08 \text{ mm}$) mit den Werten der absoluten Rauigkeit, zeigt sich, dass diese unter dem Wert der Grenzschichtdicke liegen und somit hydraulisch glatte Strömung vorliegt. Es sei gesagt, dass dies nur für einen Anfangszustand gilt. Sobald Erosion und somit eine Aufrauung stattfindet, schlägt die Strömung in eine hydraulisch rauhe um.

Die Schubspannungsgeschwindigkeit zu Beginn der Sedimentbewegung (u_{*c}) ist von Parametern wie der Adhäsionsspannung, der Rissfläche und der Proportion der ausbrechenden Scholle abhängig. Um die Eigenschaften dieser Parameter in Ansatz zu bringen, wird auf die unentwässerte Scherfestigkeit S_v zurückgegriffen. Für die Abschätzung wird aus den zuvor aus der Drehflügelmessung (Kapitel 3.2.2) gewonnenen Werten für S_v ein charakteristischer Wert angenommen. Somit folgt mit

$$S_v = 16 \frac{kN}{m^2} = 1,6 * 10^4 \frac{g}{cm \ s^2} \quad (2.3)$$

sowie mit $\rho_F = 1 \frac{g}{cm^3}$ für u_{*c}

$$u_{*c} \simeq \left(\frac{S_v}{\rho_F} \right)^{1/2} = 126,5 \frac{cm}{s} \quad (2.4)$$

(ZANKE 1982, S.181)

Der Vergleich von u_{*c} mit u_* (Formel 2.2) zeigt, dass diese, als Maximalwert anzusehende Schubspannungsgeschwindigkeit kleiner ist. Somit muss eine neue Annahme für den Boden getroffen werden.

Zwischen festem und flüssigem Boden ist ein Übergangsbereich definiert (ZANKE 1982, S.184), welcher folgend untersucht wird. Die Schubspannungsgeschwindigkeit zu Beginn der Sedimentbewegung im Übergangsbereich ist definiert durch

$$u_{*c} = A + B - (A B)^{(1/2)} \quad (2.5)$$

(ZANKE 1982, ebd.)

mit den Parametern

$$A = 0,004 \left(\frac{S_v}{\rho_F} \right)^{0,5} = 0,004 \left(\frac{1,6 * 10^4}{1} \right)^{0,5} = 0,506 \quad (2.6)$$

$$B = 0,905 \left(\frac{\rho_B * \rho_F}{\rho_B^2 - \rho_F^2} g \nu \right)^{1/3} = 0,905 \left(\frac{1,44 * 1}{1,44^2 - 1^2} * 9,81 * 0,01 \right)^{1/3} = 2,137 \quad (2.7)$$

(ZANKE 1982, ebd.)

Mittels $\rho_S = 2,6 \frac{g}{cm^3}$ und eines Wassergehaltes von $w = 100\%$ errechnet sich der Wert für die effektive Dichte des bindigen Bodens einschließlich des Wassergehaltes zu

$$\rho_B = \frac{(1 + w) \rho_s}{1 + w \frac{\rho_S}{\rho_F}} = \frac{(1 + 1) * 2,6}{1 + 1 * \frac{2,6}{1}} = 1,44 \frac{g}{cm^3} \quad (2.8)$$

(ZANKE 1982, S.184)

Die Ergebnisse der Parameter gemäß Formel 2.6 und 2.7 eingesetzt in Formel 2.5 ergibt

$$u_{*c} = 0,506 + 2,137 - (0,506 * 2,137)^{(1/2)} = 1,6 \frac{cm}{s} \quad (2.9)$$

Dieser Wert ist als plausibel anzusehen. Damit lässt sich die mittlere Geschwindigkeit über die Tiefe bei Beginn der Sedimentbewegung errechnen zu

$$u_{mc} = 2,5 u_{*c} \ln \left(3,32 \frac{u_{*c} h}{\nu} \right) = 2,5 * 1,603 * \ln \left(3,32 * \frac{1,603}{0,01} \right) = 37,1 \frac{cm}{s} \quad (2.10)$$

(ZANKE 1982, ebd.)

2.1.3 Ansatz von Mavis/Laushey und Zanke

Eine wesentlicher Beitrag zur Ermittlung des Bewegungsbeginns ist der Ansatz nach Hjulström (HJULSTRÖM 1935), welcher auf empirischen Messungen beruht. Hjulström gibt als Randbedingung eine Wassertiefe von einem Meter an und deckt den Korngrößenbereich 10^{-3} bis 10^2 mm ab. Das Ergebnis ist ein Kurvenband, welches den Beginn der Geschiebebewegung in Abhängigkeit des Korndurchmessers d liefert. In Annäherung an dieses Band definieren MAVIS und LAUSHEY als Bewegungsbeginn

$$u_{cs} = 15,2 d^{4/9} \rho'^{1/2} \quad (2.11)$$

(ZANKE 1982, S.170)

Da in dieser Gleichung ν nicht enthalten ist, gilt sie nur für den hydraulisch rauhen Bereich und kann für eine Abschätzung erst zu einem Zeitpunkt nach dem Erosionsbeginn eingesetzt werden.

Um die Zähigkeitseinflüsse mitzubersichtigen, gibt Zanke in guter Annäherung an die Hjulström-Kurve folgende Gleichung an

$$u_{mc} = 2,8 (\rho' g d)^{1/2} + 14,7 \frac{\nu}{d} a \quad (2.12)$$

(ZANKE 1982, ebd.)

Es folgt mit $d_{50} = 0,0015$ cm (zufolge der vorliegenden Sedimentuntersuchung der VERBUND-Umwelttechnik GmbH, siehe Abbildung B.1) sowie

$$\rho' = \frac{\rho_S - \rho_F}{\rho_F} = \frac{2,65 - 1}{1} = 1,65 \frac{g}{cm^3} \quad (2.13)$$

(ZANKE 1982, S.377)

eingesetzt in Formel 2.12

$$u_{mc} = 2,8 (1,65 * 981 * 0,0015)^{1/2} + 14,7 * \frac{0,01}{0,0015} * 1 = 102 \frac{cm}{s} \quad (2.14)$$

Der Wert für den Einfluss der Adhäsion entspricht dem Wert für natürliche Sande. Dies entspricht keineswegs dem eingesetzten Material, jedoch spiegelt dieser Wert, wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, die erwarteten Ergebnisse am ehesten wider. Um Verwechslungen mit der Kohäsion zu vermeiden, wird die Adhäsion in dieser Berechnung mit a abgekürzt. Da in diesen Gleichungen mehrere Parameter angenommen werden, können sie lediglich als grober Anhalt für eine Größenordnung für u_{mc} verwendet werden.

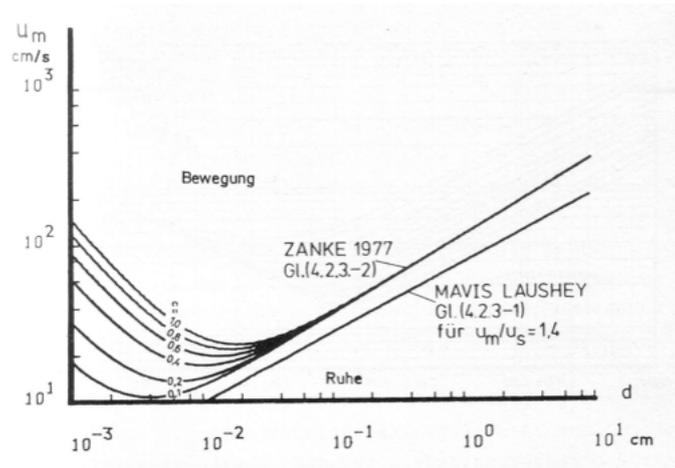


Abbildung 2.1: Beginn der Geschiebebewegung nach MAVIS / LAUSHEY und ZANKE (ZANKE 1982, S.171)

2.1.4 Zusammenfassung der Abschätzung

Die Abschätzung ergibt folgendes Bild:

Die Werte für u_{mc} liegen im Bereich von $37 - 102 \frac{cm}{s}$. Für τ_{crit} ergibt sich der Wertebereich $10 - 12 \frac{N}{m^2}$.

2.2 Das hydraulische Modell

2.2.1 Definition der Fließformel

Für die Erstellung eines hydraulischen Modells wird ein mathematischer Zusammenhang zwischen der Fließgeschwindigkeit v , der Wassermenge Q sowie den Gerinneparametern benötigt um eine Aussage über die auftretende Schubspannung treffen zu können. Unter den Gerinneparametern versteht man das Längsgefälle I , die Wassertiefe h , die benetzte Querschnittsfläche A , den benetzten Umfang U sowie die Information über die Rauigkeit der Wandungen, ausgedrückt durch den Beiwert nach Strickler k_{st} . Nach BOLLRICH (1992, S.243) lässt sich dieser Zusammenhang mittels einer Fließformel beschreiben. Folgende Randbedingungen müssen als gegeben vorausgesetzt werden:

- Stationäre Fließbewegung
- Gleichförmiges Fließen
- Konstantes Längsgefälle
- Konstantes Wasserspiegelgefälle
- Konstantes Energieliniengefälle

Vereinfachend folgt zufolge der ersten beiden Randbedingungen, dass das Längsgefälle, das Wasserspiegelgefälle und das Energieliniengefälle gleich groß ist und somit die Linien parallel liegen.

In der allgemeinen Ableitung wird ein Gleichgewicht zwischen den treibenden Kräften zufolge der Schwerkraft und den rückhaltenden Kräften zufolge der Reibung gefordert. Nach Abbildung 2.2 ermittelt sich die treibende Kraft F_G aufgrund des Gewichts des Wassers F_G zwischen Querschnitt 1 und 2 zu

$$F_G \sin\alpha = A l \rho_F g \sin\alpha \quad (2.15)$$

(BOLLRICH 1992, S.243)

Als weitere Annahme folgt die Beschränkung auf sehr geringe Längsneigungen. Für das Gefälle der Energielinie gilt

$$I_E = h_r/l = \sin\alpha \quad (2.16)$$

(BOLLRICH 1992, ebd.)

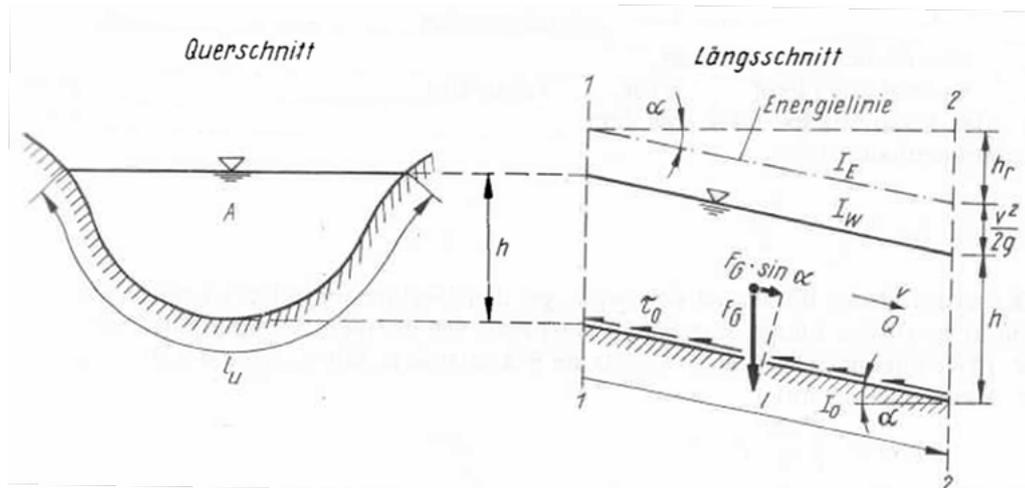


Abbildung 2.2: Ansatz zur Ermittlung der Fließformel (BOLLRICH 1992, S.243)

Wegen $\alpha \ll 1$ folgt $I_E = \sin \alpha \approx \tan \alpha$. Somit lässt sich Formel 2.15 vereinfachen zu

$$F_G \sin \alpha = A \rho_F g h_r \quad (2.17)$$

(BOLLRICH 1992, ebd.)

Die rückwirkende Kraft F_R wird durch die Wandschubspannung τ_0 erzeugt, welche entlang der benetzten Gerinneoberfläche wirkt.

$$F_R = \tau_0 l_u l \quad (2.18)$$

(BOLLRICH 1992, S.244)

Da in einem Gerinne nicht laminare sondern zumeist turbulente Strömungsverhältnisse vorliegen, gilt für die Herleitung der Wandschubspannung folgender nichtlinearer Ansatz:

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \rho v^2 \quad (2.19)$$

(BOLLRICH 1992, S.158)

Nach dem Einsetzen von Formel 2.19 in Formel 2.18 lassen sich die treibenden und die rückwirkenden Kräfte gleichsetzen.

$$A \rho_F g h_r = \frac{\lambda}{8} \rho v^2 l_u l \quad (2.20)$$

(BOLLRICH 1992, S.244)

Die Fließgeschwindigkeit folgt nach dem Auflösen der Gleichung zu

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \sqrt{\frac{A}{l_u} \frac{h_r}{l}} \quad (2.21)$$

(BOLLRICH 1992, ebd.)

Wird die erste Wurzel als Beiwert C benannt und für A/l_u der hydraulische Radius R eingeführt, folgt mit $h_r/l = I_E$ und $I_E = I_0$ die Fließformel nach Brahms und Chezy zu

$$v = C \sqrt{R I_0} \quad (2.22)$$

Weiterführende Arbeiten zur Anpassung des Beiwerts C wurden u.a. von Gauckler, Manning und Strickler durchgeführt. Der von ihnen erarbeitete Ansatz ist empirischer Natur und liefert $C = k_{st} R^{1/6}$. Eingesetzt in Formel 2.22 folgt die verbreitete Fließformel nach Strickler

$$v = k_{st} R^{2/3} I^{1/2} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.23)$$

(BOLLRICH 1992, S.246)

k_{st} liegt für verschiedene Oberflächenbeschaffenheiten einer Gerinnewandung vor und ist in Abbildung 2.3 nachzulesen.

2.2.2 Berechnung des Normalabflusses

Der nächste Schritt bei der Erstellung des hydraulischen Modells ist die Definition einer Beziehung zwischen v und der Durchflussmenge Q . Dies erfolgt mittels der Kontinuitätsgleichung

$$Q = v A \quad (2.24)$$

Zur Ermittlung des Normalabflusses wird Formel 2.23 in die Kontinuitätsgleichung eingesetzt. Da $A = f(h, b)$ und $U = f(b, h)$ ist, lässt sich mittels Variation der Wasserhöhe h iterativ Q_{rech} gleich Q_{vorh} setzen. Unter Verwendung der nun bekannten Wasserhöhe h und der Formel nach Strickler ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit v in Abhängigkeit des Durchflusses.

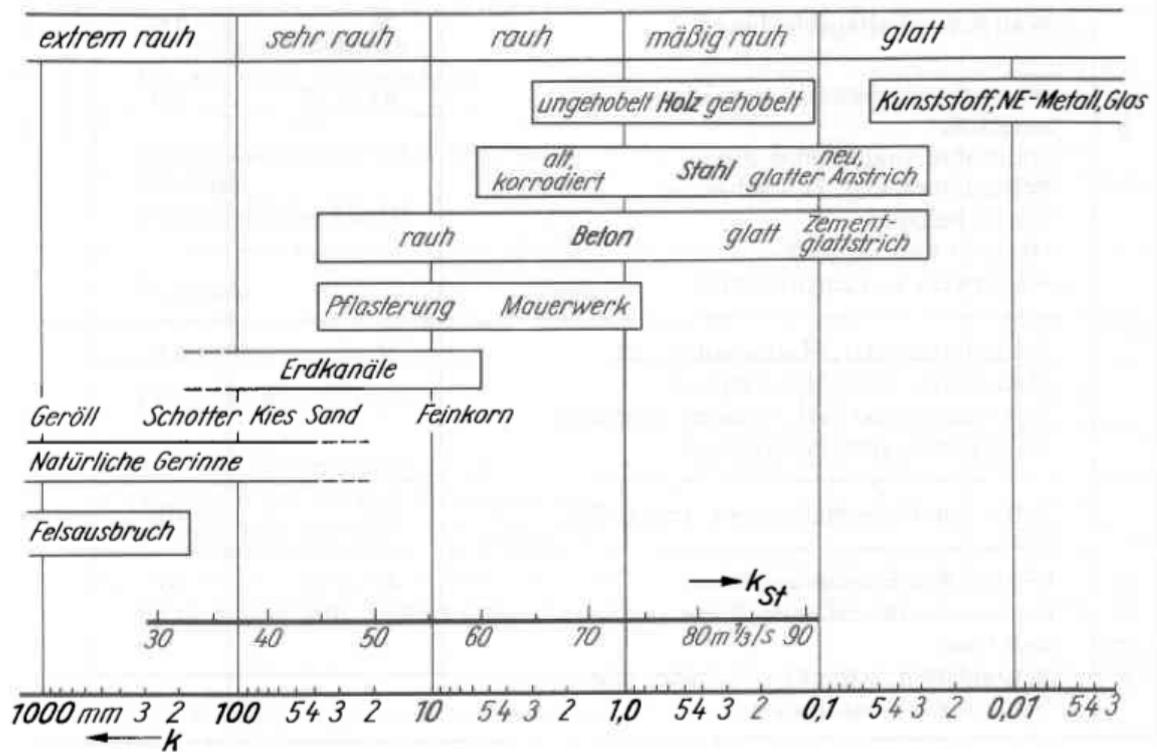


Abbildung 2.3: Beiwerte k_{st} nach Manning und Strickler (BOLLRICH 1992, S.247)

2.2.3 Berechnung der Schubspannung

Das Integrieren der auftretenden Schubspannung in Abhängigkeit von v ist der abschließende Schritt bei der Erstellung des hydraulischen Modells. Die Definition der Wandschubspannung baut auf den Überlegungen in Kapitel 2.2.1 auf. Als Ausgangspunkt dient wieder die Gegenüberstellung der treibenden und der rückwirkenden Kräfte

$$F_R = \tau_0 U l = F_G \sin \alpha = A l \rho_F g I \quad (2.25)$$

(BOLLRICH 1992, S.266)

Mit $A/U = R$ und der Vereinfachung $\rho_F * g = 10000 \text{ N/m}^3$ folgt

$$\tau_0 = 10000 R I \quad (2.26)$$

in der Einheit N/m^2 .

Diese vereinfachende Berechnung impliziert, dass die Rauigkeiten und somit die Stricklerbeiwerte an Gerinnesohle und Gerinnewänden gleich groß sind.

In der Praxis werden jedoch die Schubspannungen nicht in gleichem Maße über den Umfang verteilt sein, sondern zufolge der verschiedenen Rauigkeiten differieren. Um einen Vergleich mit anderen Gerinnegeometrien - und in weiterer Folge auch mit der Natur - zu erhalten, wird die Schubspannung auf die Gerinnesohle bezogen. GEHRIG (1967, S.249) definiert die Schubspannung zu

$$\tau = \gamma R_s I \quad (2.27)$$

(GEHRIG 1967, S.249.)

wobei R_s der hydraulische Radius der Sohle ist. Nach Abbildung 2.4 ermittelt sich R_s wie folgt:

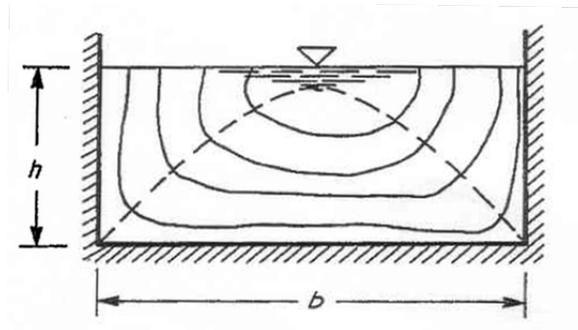


Abbildung 2.4: Verteilung der Schubspannungen (GEHRIG 1967 S.250)

$$\tau_m (b + 2h) = \tau_s b + \tau_w 2h \quad (2.28)$$

(GEHRIG 1967, S.250.)

- τ_m = Mittlere Schubspannung am gesamten Profilmumfang
- τ_s = Schubspannung an der Sohle
- τ_w = Schubspannung an den Seitenwänden

Angemerkt sei der Unterschied der Beiwerte k_{st} , welcher der Stricklerbeiwert allgemein ist, und k_s , der den Stricklerbeiwert der Sohle ausdrückt.

Mit $\tau_m = \gamma R_m I$, $\tau_s = \gamma R_s I$ und $\tau_w = \gamma R_w I$ eingesetzt in Formel 2.28 folgt

$$\gamma R_m I(b + 2h) = \gamma R_s I b + \gamma R_w I 2h \quad (2.29)$$

(GEHRIG 1967, ebd.)

Nach dem Kürzen von I und γ

$$R_m (b + 2h) = R_s b + R_w 2h \quad (2.30)$$

(GEHRIG 1967, ebd.)

Im nächsten Schritt wird unter Verwendung der Stricklerformel (Formel 2.23), umgeformt

$$R = \left(\frac{v}{k_{st} I^{1/2}} \right)^{3/2} \quad (2.31)$$

(GEHRIG 1967, ebd.)

Gleichung 2.28 zu

$$\frac{b + 2h}{k_m^{3/2}} \left(\frac{v_m}{I^{1/2}} \right)^{3/2} = \frac{b}{k_s^{3/2}} \left(\frac{v_s}{I^{1/2}} \right)^{3/2} + \frac{2h}{k_w^{3/2}} \left(\frac{v_w}{I^{1/2}} \right)^{3/2} \quad (2.32)$$

(GEHRIG 1967, S.251)

In dieser Formel ist v_m die mittlere Geschwindigkeit über das gesamte Profil. Gemäß Abbildung 2.4 erfolgt die Unterteilung des Querschnittes in Wand und Sohle mittels der strichlierten Linie. Aus der Übergangsbedingung für die Isotachen im Bereich Wand und Sohle folgt $v_w = v_s$, diese müssen aufgrund der Stetigkeit wiederum gleich v_m sein. Somit lässt sich Gleichung 2.32 vereinfacht schreiben

$$\frac{b + 2h}{k_m^{3/2}} = \frac{b}{k_s^{3/2}} + \frac{2h}{k_w^{3/2}} \quad (2.33)$$

(GEHRIG 1967, ebd.)

Für das Verhältnis der Stricklerbeiwerte folgt

$$\left(\frac{k_m}{k_s} \right)^{3/2} = \frac{b + 2h - 2h \left(\frac{k_m}{k_w} \right)^{3/2}}{b} \quad (2.34)$$

(GEHRIG 1967, ebd.)

Somit bestimmt sich mit $k_w = 110$ für den Rauigkeitsbeiwert der Glaswände R_s zu

$$R_s = \left(\frac{k_m}{k_s} \right)^{3/2} R_m \quad (2.35)$$

(GEHRIG 1967, S.252)

R_m ist der mittlere hydraulische Radius. Gehrig errechnet den mittleren Rauigkeitsbeiwert k_m aus dem gemessenen Gefälle. Dies ist möglich, da in den von ihm durchgeführten Versuchen die Normalabflusstiefe bei verschiedenen Durchflüssen konstant bleibt und die variable Größe die Längsneigung ist (siehe GEHRIG 1967, S.252 sowie Tafel 1).

Da das vorliegende hydraulische Modell eine fixe Längsneigung aufweist (siehe Kapitel 4.3.1), wird hier k_m an die gemessene mittlere Geschwindigkeit angepasst. Dies entspricht eher der Realität, da zufolge schwankender Wasserspiegel das Verhältnis der Wand- zu Sohlfläche variiert. Dies bedeutet, dass bei höherem Wasserspiegel ein größerer Einfluss der Wandflächen vorliegt und demzufolge der mittlere Rauigkeitsbeiwert (nach Strickler) sich ebenfalls (leicht) erhöhen muss.

Liegt noch kein Messergebnis vor, so wird für die Abschätzung ein Wert $k_m = 100$ vorgeschlagen.

Somit modifiziert sich die Gleichung zur Ermittlung der Schubspannung (Gleichung 2.26) zu

$$\tau_0 = 10000 R_s I \quad [N/m^2] \quad (2.36)$$

3 In Situ Messung

3.1 Messung mit der Drehflügelsonde

3.1.1 Die Scherfestigkeit von Böden

Bei Bodenmechanischen Fragestellungen ist der Begriff der Scherfestigkeit von elementarer Bedeutung. Darunter versteht man - bildlich gesprochen - die Fähigkeit des Bodens ohne Stützmaßnahmen standfeste Böschungen auszubilden. Allgemein definiert sich die Scherfestigkeit durch die Fähigkeit eines Stoffes, Schubspannungen aufzunehmen, ohne dabei zu versagen. Einfluss darauf haben 2 Parameter, die Reibung und die Kohäsion c .

Die Kohäsion ist ein Bodenkennwert und abhängig von den zufolge der sehr geringen Korngröße und dem Wassergehalt des Bodens auftretenden Haftkräften. Sie ist auch ohne Zusatzbelastung mittels einer Normalspannung vorhanden.

Die Reibung ist der Widerstand zweier Körper gegen Verschiebungen, definiert durch den Reibungswinkel φ und die zugehörige Normalspannung. Der Reibungswinkel in der Bodenmechanik stellt, aufbauend auf den Reibungsbeiwert μ der Physik, die innere Reibung von Böden dar.

Zusammengeführt werden diese beiden Parameter mittels der Gleichung nach Mohr - Coulomb

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi \quad (3.1)$$

und liefern die Scherfestigkeit τ eines Bodens.

Boden besteht im Allgemeinen aus 3 Komponenten: Feststoff, Wasser und Luft. Eine Belastung wird im Normalfall über das Korngerüst aufgenommen und im Boden verteilt. Dabei wird das Korn zufolge des Hook'schen Gesetzes gestaucht und der Porenanteil verringert. Verringert sich das Volumen der Luft durch Zugabe von Wasser gegen Null, spricht man von einem wassergesättigten Boden. Wird nun plötzlich eine Belastung aufgebracht, so wird diese im ersten Moment zur Gänze

vom inkompressiblen Porenwasser aufgenommen und erst im weiteren Verlauf, sofern das Wasser aus dem Boden herausgepresst werden kann, auf das Korngerüst übertragen. Im Verlauf dieses Vorganges, welcher Konsolidierung genannt wird, verringert sich der Porenwasserüberdruck gegen Null.

Die Spannung, welche auf das Korngerüst wirkt, wird effektive Spannung σ' genannt. Diese bewirkt die Reibungskräfte. Die gesamt aufgebrachte Spannung nennt sich totale Spannung σ , die Differenz zwischen totaler und effektiver Spannung ist durch den Porenwasserdruck u gegeben.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.2)$$

Wird nun bindiges Material, wie bspw. Ton oder Schluff von Wasser überströmt, baut sich ein Porenwasserüberdruck auf. Diesen zu messen ist schwierig, daher erfolgt die Rechnung mit den Scherparametern für den undrainierten und gleichzeitig unkonsolidierten Zustand. Gleichung 3.1 ändert sich zufolge der auftretenden totalen Spannungen zu

$$\tau = c_u + \sigma \tan\varphi_u \quad (3.3)$$

Im Fall eines gesättigten Bodens jedoch wird $\varphi_u = 0$ und die Gleichung vereinfacht sich zu

$$\tau = c_u \quad (3.4)$$

Dies bedeutet, dass der Einfluss der Normalspannung verschwindet und bei einer Messung nur noch der Scherparameter c_u ermittelt werden muss.

Zur Ermittlung der Scherparameter bindiger und rolliger Böden stehen einige Messverfahren zur Verfügung:

Der Triaxialversuch bietet unter Laborbedingungen umfangreiche Möglichkeiten zur Messwertgewinnung. Es sind sowohl drainierte als auch undrainierte Bedingungen möglich. Ebenso besteht die Möglichkeit, Bodenproben - konsolidiert und unkonsolidiert - einem dreiaxialen Spannungszustand auszusetzen.

Ebenfalls unter Laborbedingungen erfolgt der Kastenscherversuch; bei diesem besteht die Möglichkeit, Versuche mit Böden im konsolidierten als auch im unkonsolidierten Zustand unter drainierten Bedingungen durchzuführen.

Als dritter Laborversuch sei der Einaxiale Druckversuch als Sonderfall des Triaxialversuches genannt.

Die drei Versuche werden der Übersicht halber genannt. Da sie für eine Feldmessung nicht geeignet sind, erfolgt an dieser Stelle keine genauere Beschreibung. Für weitere

Ausführungen wird auf die Fachliteratur verwiesen.

Ist der bindige Boden nun besonders weich und soll im Felde geprüft werden, bietet sich die Messung mittels der Drehflügelsonde an.

3.1.2 Die Ermittlung der Scherparameter mittels der Drehflügelsonde

Wie in Abbildung 3.1 ersichtlich besteht eine Drehflügelsonde aus folgenden Bauteilen: Die Sondenspitze besteht aus 4 kreuzförmig angeordneten Flügeln. Sie ist mit-



Abbildung 3.1: Drehflügelsonde H60, Fa.Geonor (www.geonor.com)

tels eines Gestänges mit der Messeinrichtung verbunden. Diese besteht aus einem Gehäuse mit Handgriff, welches drehbar ausgeführt ist. Im Inneren befindet sich eine geeichte Drehfeder zur Messung des Drehmomentes. Die Anzeige des Messwertes erfolgt durch einen Schleppzeiger auf einer Skala.

Die Größe des Flügels richtet sich nach der Beschaffenheit des Bodens. Für die Versuchsdruchführung wird die Spitze in den Boden bis zur Solltiefe eingedrückt und anschließend lotrecht mit geringer Winkelgeschwindigkeit gedreht. Versagt der Boden im Grenzzustand kann das erste Messergebnis, die maximale Scherfestigkeit τ_{peak} abgelesen werden (siehe Abbildung 3.2). Je nach Konsistenz des Bodens kann eine Entfestigung stattfinden und bei Aufrechterhaltung der Drehbewegung eine Dauerschermfestigkeit $\tau_{residual}$ ermittelt werden. Bei sehr weichen, plastischen Tonen entfällt diese Unterscheidung, die momentane Scherfestigkeit nähert sich mit fortschreitender Versuchsdauer asymptotisch einer maximalen Scherfestigkeit an.

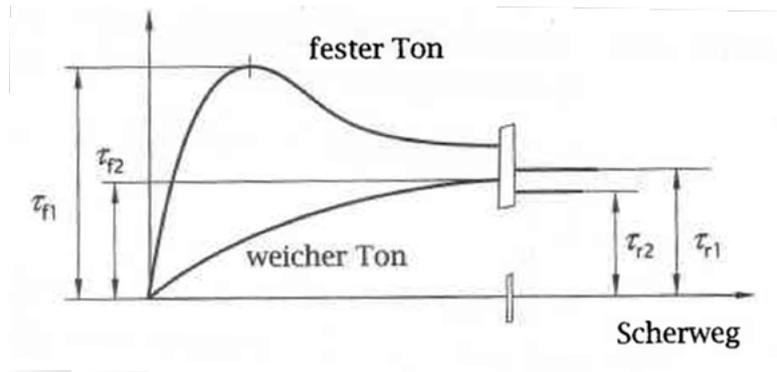


Abbildung 3.2: Scherspannungs - Weg - Diagramm (bindige Böden) (SCHMIDT 2002, S.145)

Der an der Skala abgelesene Wert wird in Abhängigkeit der gewählten Flügelgröße gemäß Tabelle 3.1 faktorisiert und liefert direkt die Scherfestigkeit τ in der Einheit kN/m^2 .

Tabelle 3.1: Faktoren für die Flügelgrößen (Bedienungsanleitung H60, Fa. Geonor)

Flügelgröße	Faktor
16x32 mm	2
20x40 mm	1
25,4x50,8 mm	0,5

3.2 Feldmessungen

3.2.1 Durchführung der Feldmessungen

Im Bereich des Stauraumes Zlatten wurden zu 2 Zeitpunkten (19.4. und 19.5.2011) Messungen mit der Drehflügelsonde durchgeführt. Am 19.4.2011 wurden mittels eines Bootes mehrere Punkte beiderseits des Ufers befahren, um einen Überblick über die Bodenverhältnisse zu bekommen. Abbildung 3.3 zeigt die Positionen der Messorte entlang des Flussabschnittes.

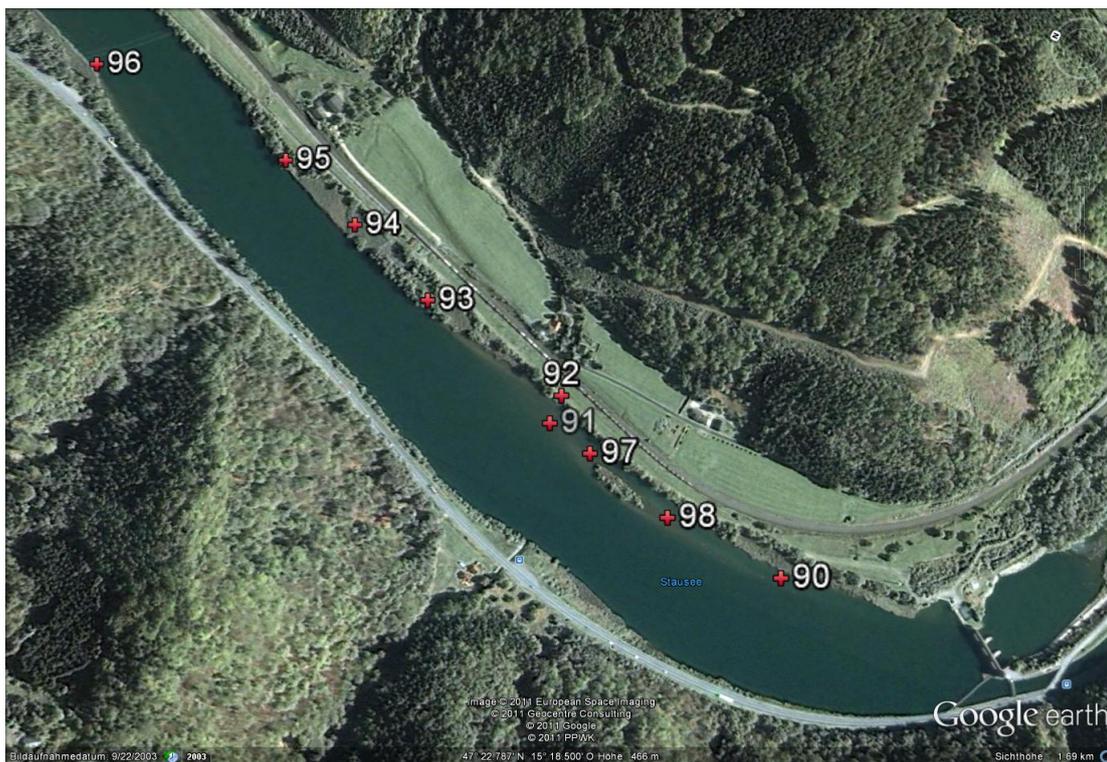


Abbildung 3.3: Messpunkte vom 19.4.2011 (Bild: Google Earth)

Abbildung 3.4 zeigt die Situation an der Bogeninnenseite bei Punkt 92. Man erkennt die Sedimentbank, welche in mit Schilf bewachsen ist. Wie in Anhang B.1 ersichtlich liegen die Korngrößen im Bereich Schluff. Die Breite beträgt rund 10m, die Wassertiefe zu diesem Zeitpunkt rund 50 cm. Diese Abbildung zeigt auch den Messvorgang mit der Drehflügelsonde. In der praktischen Durchführung werden zur Mittelwertbildung an jedem Punkt mehrere Messungen vorgenommen. Der Punkt selbst wird lagemäßig nach den Gegebenheiten vor Ort ausgewählt. Zu beachten ist, dass mit der Sonde keine Hindernisse durchstoßen werden und ein durch vorherige Begehung ungestörter Bereich gewählt wird. Bei den Versuchen wurde die Flügelgröße 25,4 x 50,8 mm gewählt. Je Messpunkt wurde ermittelt:



Abbildung 3.4: Praktischer Messvorgang an Punkt 92 (Bild: Autor)

- τ_{peak} (für $t = 5 \text{ cm}$)
- $\tau_{residual}$ (für $t = 5 \text{ cm}$)
- τ_{peak} (für $t = 20 \text{ cm}$)
- $\tau_{residual}$ (für $t = 20 \text{ cm}$)

Eine Tiefe von 5 cm bedeutet, dass über dem Flügel eine Überdeckung von 5 cm vorliegt, die Sondenspitze somit $\sim 10 \text{ cm}$ eingedrückt werden muss. Für $t=20 \text{ cm}$ gilt sinngemäß das gleiche.

3.2.2 Messergebnisse der Drehflügelmessung

Die Ergebnisse der Messung vom 19.4. - bereits gemäß Abbildung 3.1 mit 0,5 faktorisiert - sind in Tabelle 3.2 ersichtlich. Für jeden Messpunkt wird der Mittelwert der Scherfestigkeit von 5 Messungen gebildet, angezeigt in der Spalte „Mittel“. Punkt 94 liegt in einem Schilfgürtel, ist es nicht möglich hier aussagekräftige Messungen in tieferen Schichten vorzunehmen. Der Boden bei Punkt 95 ist stark durchwurzelt. Im Bereich Punkt 96 sind Störungen durch Baggerungen vorhanden. Punkt 97 ist

Tabelle 3.2: Auswertung für die Scherfestigkeit [kN/m^2] der ersten Messreihe vom 19.4.2011

Drehflügelmessung vom 19.04.2011													
Pos.		t = 5cm					t Mittel	t = 20cm					t Mittel
90	Peak	5	9	8	9,5	7	7,7	7	11	10	12	10	10
	Residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
91	Peak	13	13	15	15	15	14,2	15	14	15	17	16	15,3
	Residual	0	6	9	9	5	5,8	5	10	9	9,5	9	8,5
92	Peak	17	12	15	20	15	15,8	13	20	20	18	22	18,5
	Residual	7	7	7	10	10	8,2	6	7	10	8	10	8,2
93	Peak	14	12	10	8	8	10,4	17	17	13	20	16	16,6
	Residual	8	7	7,5	5	6	6,7	9	9	7,5	10	7	8,5
94	Peak	6	13	13	11	13	11,2	18	0	0	0	0	18
	Residual	4	8	8	8	9	7,4	8	0	0	0	0	9,5
95	Peak	29	6	16	10	25	17,2	20	25	21	25	35	25,2
	Residual	19	3	7	4	14	9,4	14	15	12	16	15	14,4
96	Peak	11	12	7	14	17	12,2	26	27	27	20	28	25,6
	Residual	4	5	4	10	9	6,4	12	10	13	9	12	11,1
97	Peak	7	11	11	10	9	9,6	16	25	22	20	24	21,4
	Residual	2	5	4	2	2	3	7	15	11	11	13	11,4
98	Peak	20	15	15	19	9	15,6	10	14	15	17	31	17,4
	Residual	10	6	6	11	4	7,4	6	4	6	11	16	8,6

durch eine Schichtenbildung gekennzeichnet, die Deckschicht besteht aus Schluff, die untere Schicht aus Sanden.

Die Mittelwerte der Scherfestigkeit über die 9 Messpunkte betragen:

- $\tau_{peak} = 12,6 \text{ kN/m}^2$ (für $t = 5 \text{ cm}$)
- $\tau_{residual} = 6,0 \text{ kN/m}^2$ (für $t = 5 \text{ cm}$)
- $\tau_{peak} = 18,7 \text{ kN/m}^2$ (für $t = 20 \text{ cm}$)
- $\tau_{residual} = 8,9 \text{ kN/m}^2$ (für $t = 20 \text{ cm}$)

Die Werte der Scherfestigkeit in größerer Tiefe sind zufolge der höheren Überdeckung im Allgemeinen größer.

Um die Messungen zu bestätigen wurde am 19.5.2011 eine weitere Messreihe bei Punkt 92 vorgenommen. Die restlichen Punkte sind entweder nur mit Boot zu erreichen oder wiesen - dem Stand der Jahreszeit entsprechend - zu großes Schilfwachstum auf. Die Ergebnisse, gemäß Tabelle 3.1 mit 0,5 faktorisiert, sind in Tabelle 3.3 ersichtlich:

Tabelle 3.3: Auswertung für die Scherfestigkeit [kN/m^2] der zweiten Messreihe vom 19.5.2011

Drehflügelmessung vom 19.05 2011											
Punkt 92 Bewachsen (im Schilf)											
	t = 10cm										t Mittel
Peak	17	16	20	17	14	14	15	20	16	7	15,6
Residual	11	11	14	12	7	5	6	9	6	3	8,4
	t = 50cm										
Peak	14	14	14	16	21	19	18	19	16	20	17,0
Residual	5	7	7	9	13	11	10	12	9	11	9,4

Drehflügelmessung vom 19.05 2011											
Punkt 92 Unbewachsen (7m vor Ufer)											
	t = 10cm										t Mittel
Peak	17	15	20	14	13	15	16	28	19	18	17,4
Residual	7	11	9	10	5	5	8	12	7	6	7,9
	t = 50cm										
Peak	20	15	16	13	15	15	18	15	14	11	15,1
Residual	11	6	5	5	7	9	11	8	8	5	7,4

Der Vergleich mit den an 19. April für Punkt 92 gemessenen Werten zeigt, dass die Scherfestigkeit vergleichbare Größen aufweist. In beiden Fällen wurde im Uferbereich gemessen, der geringe Schilfbewuchs zum Zeitpunkt der zweiten Messung stellt keine Beeinträchtigung dar. Weiters wurde die Sonde tiefer in den Boden eingeführt.

Als zusätzlicher Messpunkt wurde ein unbewachsener Bereich im Abstand von 7m vom Ufer hinzugenommen. Die Fragestellung hier ist, inwiefern sich hier Änderungen der Scherfestigkeit ergeben.

Es fällt auf, dass im bewachsenen Bereich die Scherfestigkeiten in der Tiefe höher sind, während im unbewachsenen Bereich die Deckschicht höhere Werte aufweist. Es wird vermutet, dass die Schicht in der Tiefe ein anderes Material bzw. eine andere Konsistenz ausweist oder sich zufolge biologischer Prozesse die Eigenschaften verändern.

4 Der Glasgerinneversuch

In diesem Kapitel werden die Probengewinnung und die Details zum Versuchsaufbau und zur Durchführung beschrieben. Das Hauptaugenmerk liegt bei der Nachvollziehbarkeit des Versuches.

4.1 Vorbereitungen

4.1.1 Probenentnahme

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben liegt der für die Entnahme in Betracht kommende Bereich an der Bogeninnenseite des Stauraumes. Das dort vorzufindende Material ist Schluff. Wird von bindigen Böden eine Probe genommen, kann dies auf 2 Arten geschehen:

- Entnahme als ungestörte Probe
- Entnahme als gestörte Probe

Um eine gestörte Probe zu entnehmen, wird Material mittels einer Schaufel ausgehoben und in ein Transportgefäß verbracht. Gestört heißt, dass sie gelockert und in ihrem Wassergehalt verändert ist. Bei einer solchen Probe sind beispielsweise folgende Informationen nicht mehr feststellbar: Wichte des feuchten Bodens, der Steifemodul, die Scherfestigkeit und der Porenanteil.

Für den Versuch bedeutet dies, dass eine gestörte Probe vor allem als Füllmaterial Verwendung finden wird.

Bei einer ungestörten Probe sind die oben genannten Informationen noch vorhanden. Zu beachten gilt es, den Boden möglichst erschütterungsfrei zu entnehmen. Durch Erschütterungen tritt eine Umlagerung des Bodens ein, der Porenanteil und die Lagerungsdichte werden verändert. Wird der Boden Zwängungen ausgesetzt, besteht die Möglichkeit, dass dieser eine Vorbelastung erfährt oder sich der Belastung durch eine Formänderung zu entziehen versucht.

Als praktische Lösung für die Entnahme wird ein Ausstechzylinder gewählt. Dieser wird am Boden aufgesetzt und eingepresst. Die Bodenprobe befindet sich im Inneren und kann weitgehend ungestört entnommen werden.

Wie in Abbildung 4.1 ersichtlich besteht der Ausstechzylinder aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 14 cm, welches an der Unterseite eine Schneidkante und an der Oberseite einen Rand aufweist. Die Schneidkante ist einseitig geschliffen, so dass die Schräge nach aussen zeigt. Dies bewirkt eine Verdrängung des Bodens, während die Probe innen glatt abgeschert wird. Der Rand dient der leichteren Handhabung beim Herausziehen.



Abbildung 4.1: Entnahme der ungestörten Probe mittels Ausstechzylinders (Bild: Autor)

Der Zylinder, welcher über seine gesamte Höhe von 20 cm eingedrückt wird, kann mitsamt der Probe auf zwei Arten wieder entnommen werden:

Bei der Entnahme mittels Unterdruck wird auf den Rand ein dicht schließender Deckel gesetzt. Das bindige Material dichtet die Seiten des Zylinders ab und es entsteht ein Unterdruck, welcher dafür sorgt dass die Probe beim Heben nicht herausgleitet. Im Bereich der Schneidkante bildet sich eine Spannungsspitze und der Boden reißt ab.

Bei der Entnahme mittels einer Schaufel wird der eingedrückte Zylinder mitsamt der Probe freigelegt und ausgestochen.

Im Zuge dieses Versuches werden beide Varianten durchgeführt. Auf Grund praktischer Überlegungen werden an beiden Terminen der Drehflügelmessung Proben entnommen. Während zum ersten Zeitpunkt die Variante mittels Unterdruck problemlos funktioniert ist das einen Monat später nicht mehr möglich. Bei jedem Entnahmeversuch gleitet die Probe aus dem Zylinder heraus und wird unbrauchbar. Eine Erklärung hierfür ist vermutlich eine Änderung der organischen Vorgänge im Boden, welche den Aufbau eines Unterdruckes nicht mehr zulassen.

In Summe werden fünf ungestörte Proben im Bereich des Messpunktes 92 entnommen, eine im Bereich Messpunkt 94. Bis zum Einbau werden die Proben unter Wasser gelagert um die gleichen Bedingungen wie in der natürlichen Umgebung sicherzustellen.

4.1.2 Auswahl des Gerinnes

Zur Durchführung des Versuches stehen im Wasserbaulabor der TU Graz zwei Gerinne zur Wahl. Sie unterscheiden sich in ihrer Breite von 76 cm und 30 cm. Das Hauptkriterium für die Auswahl ist ein möglicher Einfluss der Randeffekte.

Fließt ein Medium in einem künstlichen oder natürlichen Gerinne treten Wechselwirkungen zwischen dem Medium und den Wandungen auf. Diese auftretenden Schubspannungen wirken der Strömung entgegen und üben eine Beeinflussung auf die Geschwindigkeit aus, welche sich mit zunehmendem Abstand von der Wandung verringert. Für den vorliegenden Versuch stellt sich die Frage nach der Mindestbreite des Gerinnes, damit es im Bereich der eingebauten Probe zu keiner Beeinträchtigung kommt. BOLLRICH (1992, S. 267 f) führt an, dass die Geschwindigkeit und somit auch die Schubspannung über die Gerinnewand nicht gleichmäßig verteilt ist.

Nach Abbildung 4.2 lässt sich jedoch qualitativ die Aussage treffen, dass die Maxima der Schubspannung und folglich die Geschwindigkeiten an Wänden und Boden vergleichbar groß sind.

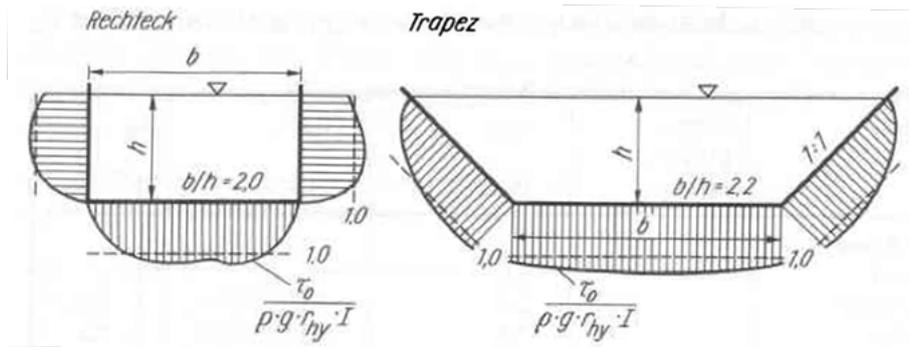


Abbildung 4.2: Herleitung des Randeffects über die reale Schubspannungsverteilung (BOLLRICH 1992, S.268)

Es wird angenommen, dass bei einer Breite von 76 cm keine signifikante Beeinflussung des Bereiches um die Probe mehr festzustellen ist. Nach Abschluss der Messungen und dem Vorliegen der Geschwindigkeitsverteilungen lässt sich im Nachhinein dieser Beweis erbringen. Abbildung 5.5 auf Seite 47 zeigt beispielhaft die Schubspannungsverteilung bei maximaler Wassermenge über die Höhe. Die Messkurve zeigt, dass ab einem bestimmten Punkt die Schubspannung nicht mehr vorhanden ist. Dieser Punkt liegt in diesem Fall auf einer Höhe von 40 mm. Auf die Seitenwände übertragen bedeutet dies einen beeinflussten Bereich der Gerinnebreite von 80 mm bzw. 8 cm. Das Glasgerinne verfügt über eine Breite von 76 cm, die eingebaute Probe über einen Durchmesser von 14 cm. Somit ergibt sich für den Wert der Mindestbreite rund 22 cm. Da jedoch im Bereich der unteren Gerinnecken zufolge der ungünstigen Geometrie auch eine deutliche Abminderung der Geschwindigkeit und somit eine weitere Beeinflussung stattfindet, ist dem breiten Gerinne der Vorzug zu geben.

Ein weiteres Kriterium ist das Erfordernis des schonenden Einbaus der Probe, dies ist in diesem Gerinne ebenfalls besser möglich.

4.2 Aufbau des Versuches

4.2.1 Anpassen des hydraulischen Modelles an die Abschätzung

Das hydraulische Modell gemäß Kapitel 2.2 liefert als Ergebnis Werte für v und τ . Variable Eingangswerte sind der Durchfluss Q , die Gerinnebreite b , die Gerinnelängsneigung I sowie die Stricklerbeiwerte k_s , k_w , k_m . Zuzufolge der Abschätzung der kritischen Schubspannung nach Kapitel 2.1.4 ergeben sich die Werte zu

- $u_{mc} \approx 0,37 - 1,02 \frac{m}{s}$
- $\tau_{crit} \approx 10 - 12 \frac{N}{m^2}$.

Somit gilt es die Variablen dahingehend anzunehmen, dass damit die Ergebnisse mit der Abschätzung übereinstimmen.

Für die Gerinnebreite b lässt sich der Wert 0,76 m fixieren. Ebenso lassen sich die Stricklerbeiwerte aufgrund der Herleitung gemäß Kapitel 2.2.3 und der Beschaffenheit des Sedimentes beziehungsweise der Glaswände gemäß Abbildung 2.3 zu $k_s = 95$, $k_w = 110$ und $k_m = 100$ abschätzen.

Als Variablen bleiben Q und I über. Für I werden 4 Werte untersucht: 0,5 %, 1,0%, 1,5% und 2,0%. Für den Durchfluss 13 Durchflussmengen zwischen 40 und 160 l/s.

Eingesetzt in das hydraulische Modell folgt das Ergebnis gemäß Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 Aus praktischen Erwägungen ist es erforderlich, die Längsneigung

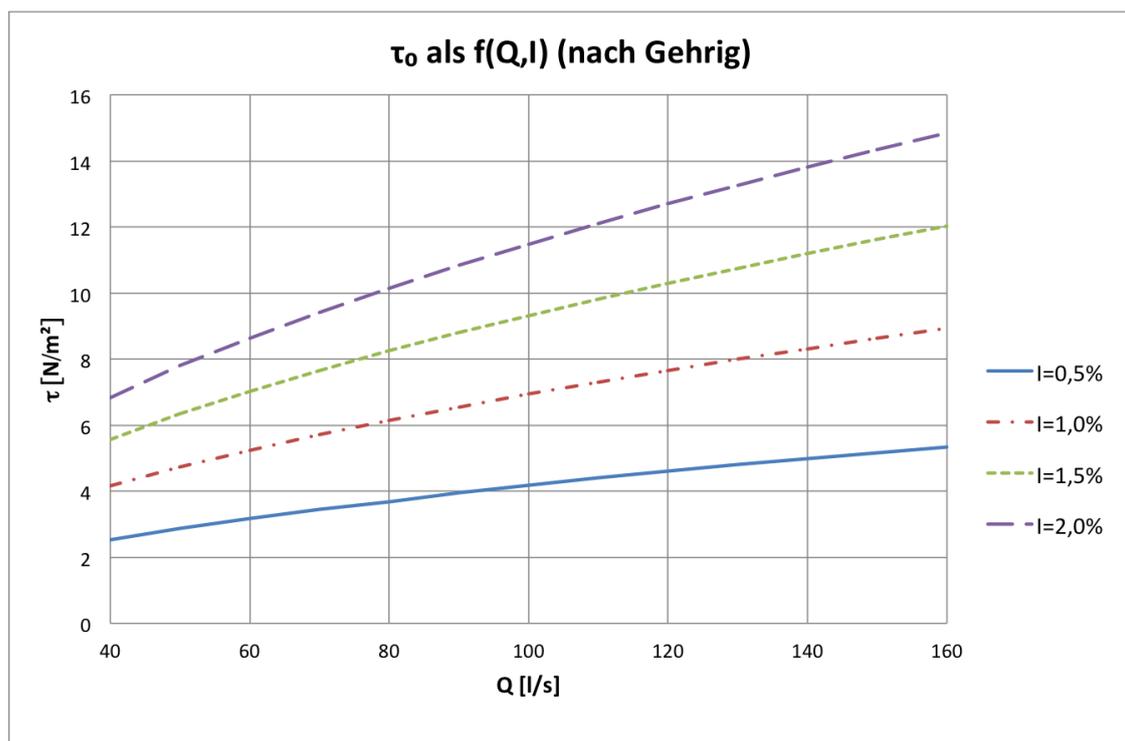


Abbildung 4.3: Abschätzung der Schubspannung nach Gehrig

während der Versuchsdurchführung nicht verändern zu müssen. Daher sollte die Längsneigung einen möglichst signifikanten Bereich der Schubspannung und der Geschwindigkeit abdecken. Vergleicht man die 4 Kurvenscharen in Abbildung 4.3, so zeigt sich, dass die Kurven für $I=1,0\%$ und $I=1,5\%$ am ehesten mit der Abschätzung für τ übereinstimmen.

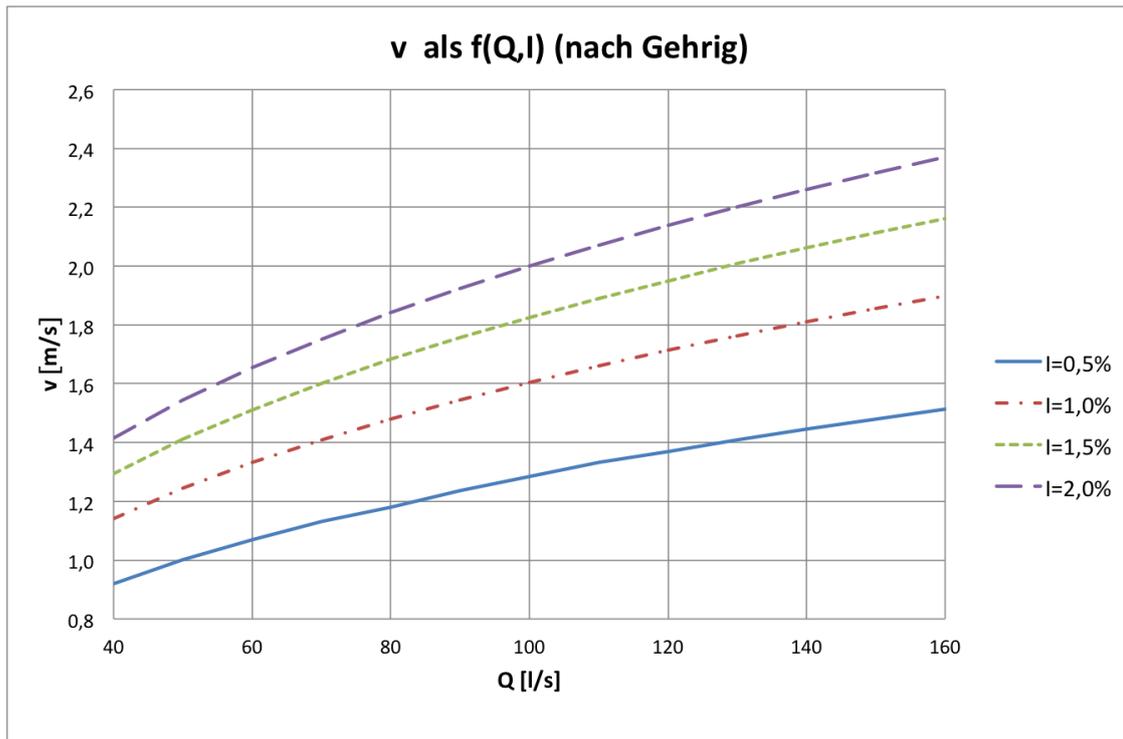


Abbildung 4.4: Abschätzung der mittleren Geschwindigkeit nach Gehrig

Hingegen zeigt Abbildung 4.4 bei der Kurve für $I=0,5\%$ bereits bei geringen Durchflüssen ($Q=50\text{ l/s}$) den als Maxima prognostizierten Wert $v = 1,02\text{ m/s}$.

Weiters zeigt sich auch, dass es keine Längsneigung gibt, die beide Abschätzungen abdeckt. Der Abschätzung der Schubspannung wird eine höhere Aussagekraft zugeschrieben. Eine Längsneigung von $I=1\%$ stellt sich als der beste Kompromiss heraus.

Somit kann durch Variation des Durchflusses von $Q=40\text{ l/s}$ bis $Q=160\text{ l/s}$ ein Schubspannungsbereich von $\tau=4,2 - 8,9\text{ N/m}^2$ bzw. ein Geschwindigkeitsbereich von $v=1,1 - 1,9\text{ m/s}$ abgedeckt werden.

4.2.2 Adaptierung des Gerinnes

In Kapitel 4.3.1 wird eine Längsneigung von 1% vorgegeben. Da das vorhandene Gerinne in seiner ursprünglichen Form keine integrierte Verstellmöglichkeit bietet, ist der Einbau einer Rampe mit dem geforderten I nötig. Abbildung 4.5 zeigt schematisch die Einbauten.

Prinzipskizze Glasgerinne mit Einbauten

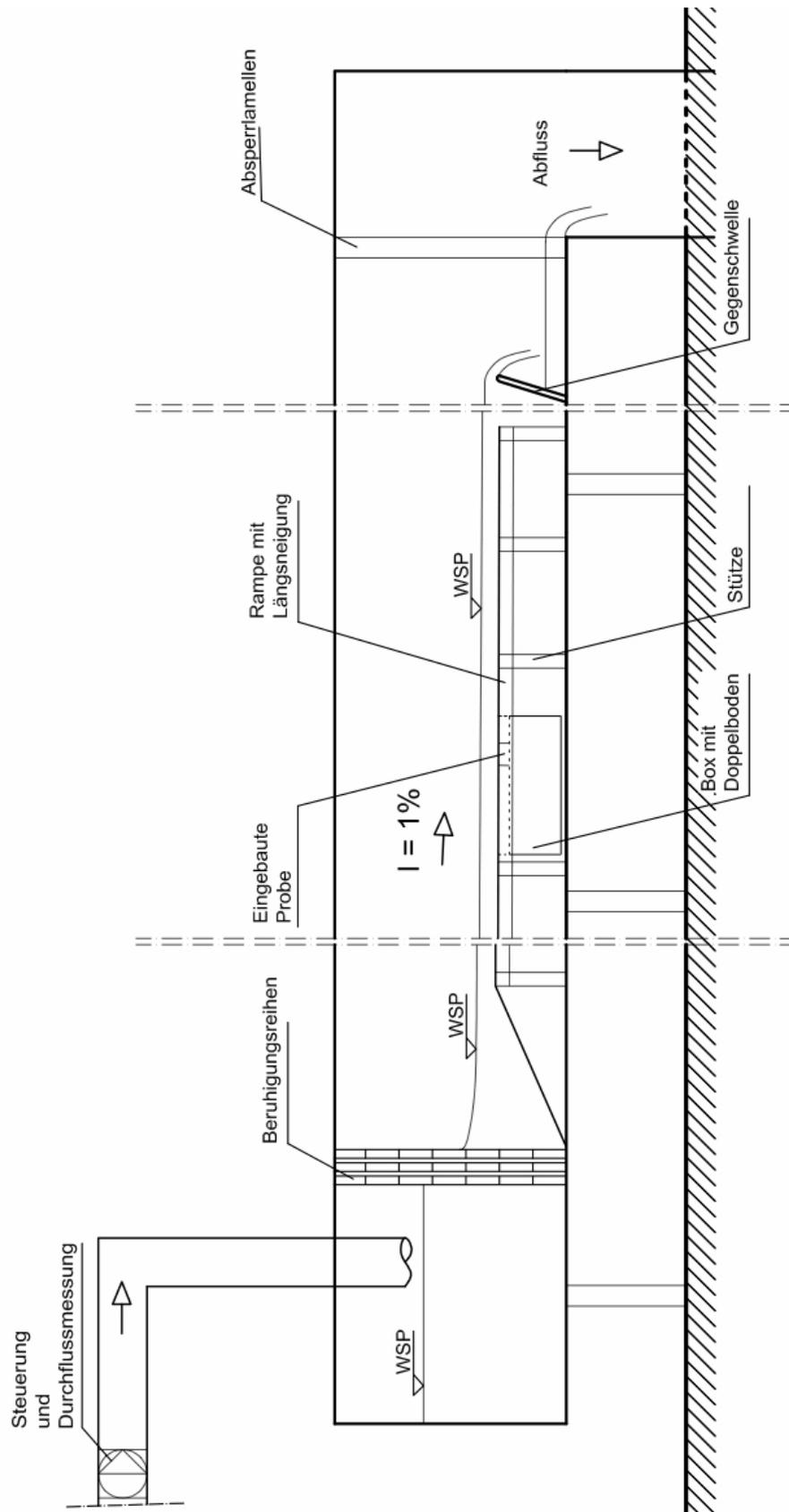


Abbildung 4.5: Prinzipskizze des Glasgerinnes mit den Einbauten

Oberwasserseitig sind Beruhigungsreihen angeordnet, um das hochturbulente Wasser aus der Zuleitung zu beruhigen. Diese sind dreireihig angeordnet und bestehen aus einem Gitter mit jeweils abnehmender Maschengröße. Im Anschluss wird das Wasser über die Rampe geleitet. Der Raum unterhalb dieser wird ebenfalls mit Wasser gefüllt, um Beschädigungen zu vermeiden. Um diesen Vorgang zu beschleunigen werden oberwasserseitig Öffnungen angebracht. Die Höhe der Rampe beträgt am höchsten Punkt 50 cm und nimmt entsprechend der Längsneigung ab. Diese Höhe ist erforderlich, um den Einbau einer Box (100x50x40 cm) bewerkstelligen zu können. In dieser eingebaut befindet sich die Probe. Unterwasserseitig ist eine Gegenschwelle angeordnet. Ihre Aufgabe ist es, ein Auffangbecken für erodierte Probenteile zu bilden. Die Höhe ist dahingehend eingestellt dass ein Aufstau stattfindet, die Stauwurzel jedoch deutlich unterhalb der Box zu liegen kommt. Das abfließende Wasser wird mechanisch aufbereitet und gelangt wieder in den Kreislauf des Labors.

4.2.3 Probeneinbau

Wird eine Probe experimentell geprüft, so ist neben aussagekräftigen Ergebnissen auch deren Reproduzierbarkeit verlangt. Um für sämtliche Probekörper gleiche Bedingungen zu gewährleisten, sind folgende Randbedingungen einzuhalten:

- definierte Lage und Höhe im Gerinne
- gleiche Oberflächenbeschaffenheit der Probe und der Umgebung
- Einbau ohne Beeinträchtigung der Probe
- Dauer und Ablauf des Versuches ident

Die ersten drei Punkte werden mithilfe einer vorgefertigten Box sichergestellt.

Erste Planungen der Box sehen vor, diese entnehmbar zu machen, um die Probe ausserhalb des Gerinnes sorgsam einbauen zu können. Der doppelte Boden mit Aussparung für die Probe lässt sich entfernen, um diese in dem Freiraum darunter mit korrekter Höhe (höhengleich mit der Rampe) einzubauen. Danach wird der Bereich um die Probe mit der gestörten Probe höhengleich aufgefüllt. Die Probe ist im unterwasserseitigen Zweidrittelpunkt situiert um eine Anpassung der Strömungsverhältnisse zwischen der glatten Sohle der Rampe und der rauheren Probenoberfläche zu erhalten.

Da im praktischen Betrieb Probleme mit dem Einheben und der Auftriebssicherung auftreten, wird die Box im Gerinne fixiert. Ebenso lässt sich die Variation der Höhe der Probe nur sehr aufwendig bewerkstelligen, weswegen die Aussparung

verschlossen wird und die Probe entsprechend abgelängt (7 cm) und auf den Boden plan aufgesetzt wird (siehe Abbildung 4.6).



Abbildung 4.6: Blick auf die Box im Gerinne, Einbau der Probe (Bild: Autor)

Aufgrund der Steifigkeit und Kompaktheit der Probe ist dies möglich ohne diese für den Versuch unbrauchbar zu machen. Abschließend wird auch bei dieser Variante des Einbaus der umgebende Bereich mit der gestörten Probe aufgebaut.

4.2.4 Messsystem

Für die Ermittlung der Schubspannung ist es messtechnisch am einfachsten, die Geschwindigkeit im Gerinne zu messen und entsprechend umzurechnen. Hierzu gibt es mehrere Messmethoden:

- optisch mittels Laser - PIV (Particle Image Velocimetry)
- akustische Systeme (Vectrino)
- induktive Systeme
- mechanische Messeinrichtungen (Flügelschraube)

Im vorliegenden Versuch wird das System PIV (Particle Image Velocimetry) verwendet. Dieses ermittelt ein zweidimensionales Geschwindigkeitsvektorfeld in einer Ebene.

Eine Skizze (Abbildung 4.7) soll schematisch den Vorgang erklären:

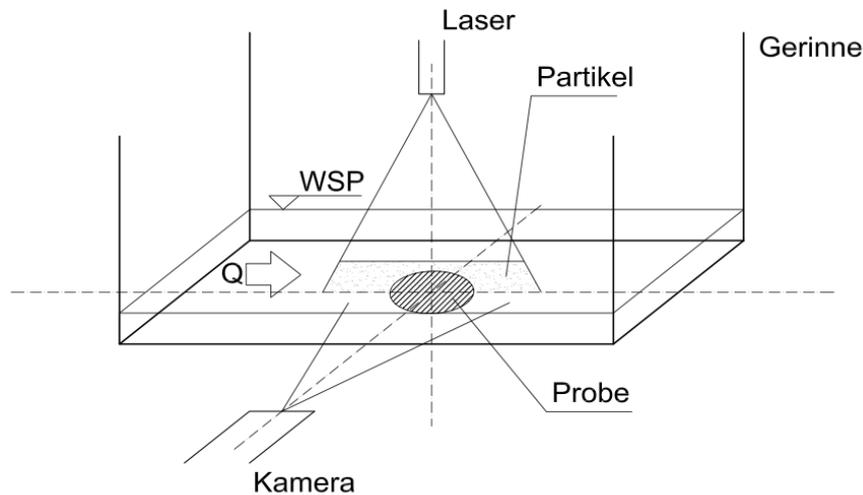


Abbildung 4.7: Skizze des Messsystems PIV (Laser und Kamera)

Das Messsystem besteht aus einem Laser, welcher den Strahl fächerförmig aufspaltet und eine Ebene erzeugt. Diese steht lotrecht im Gerinne und taucht mit ihrem unteren Bereich in das Wasser ein. Dabei werden zufolge des energiereichen Lichts Partikel im Wasser zum Leuchten gebracht. Rechtwinklig dazu steht ausserhalb des Gerinnes eine kalibrierte Hochgeschwindigkeitskamera. Diese nimmt durch die Glasscheibe die Partikel im Zeitintervall von wenigen Millisekunden auf. Die entstandenen Bilder werden kreuzkorreliert und in weiterer Folge ein Geschwindigkeitsvektorfeld errechnet. Dieses Vektorfeld ist Grundlage für die weitere Auswertung.

Der Laser für diese Messung ist ein gepulster Laser der Fa. Litron (Modell LDY303-PIV) mit einer Wellenlänge von 527 nm. Die Frequenz lässt sich zwischen 0,2 - 10 kHz mit einer Energiedichte von 1,85 - 21,5 mJ variieren. Aus Gründen der Sicherheit wird das Gerinne im Bereich des Lasers und der Kamera mit einer Einhausung versehen. Die Partikel im Wasser sind natürlichen Ursprungs (Schwebstoffe zufolge vorrangigangener Versuche). Bei sehr reinem Wasser müssten diese zugegeben werden.

Die Hochgeschwindigkeitskamera der Fa. Photron (Photron Fastcam SA-1) erreicht bei der verwendeten Auslösung von 1024x1024 Pixel eine Aufnahmefrequenz von 1000 Hz. Der Arbeitsspeicher besitzt eine Größe von 16 GB. Die Bilder werden während der Messung zwischengespeichert und in Anschluss auf den Rechner übertragen. Auf diesem ist die Software Dynamic Studio der Fa. Dantec Dynamics installiert, mit welcher die Steuerung des Messsystems sowie die Berechnung des Vektorfeldes und der weiteren Auswertungen erfolgen.

4.3 Durchführung

4.3.1 Der Probelauf

Um Erfahrung mit dem System zu gewinnen und um eine Kalibrierung des PIV vorzunehmen wird am 4.7.2011 ein Probelauf durchgeführt.

Dazu wird eine ungestörte Probe wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben eingebaut und ein Durchfluss von 30 l/s eingestellt. Dabei zeigt sich, dass der Wasserverlust zufolge der Durchströmung des Bereiches unterhalb der Rampe nicht vernachlässigbar gering ist. Durch Variation der Durchflussmenge lässt sich hierfür der Wert von 7 l/s ermitteln, welcher bei den Auswertungen, wie in Formel 4.1 dargestellt, berücksichtigt werden muss.

$$Q_{eff} = Q_{Pump} - 7 \text{ [l/s]} \quad (4.1)$$

Bei diesen effektiv 23 l/s zeigen sich bereits Auswirkungen auf die Probenoberfläche. Wie in Abbildung 4.8 ersichtlich treten an der gestörten Probe starke Erosionsspuren auf. Die Feinteile werden vor allem im Umkreis organischer Einschlüsse (Ast in Bildmitte) gelöst. Dadurch bilden sich Riefen mit mehreren cm Länge. Im Gegensatz dazu reicht dieser Durchfluss nicht aus, um Erosion an der ungestörten Probe zu verursachen.



Abbildung 4.8: Erosion an gestörter Probe, $Q=23$ l/s, Bildbreite: 10 cm (Bild: Autor)

Ein weiteres Problem stellt die Kolkbildung im Übergang von der Rampe zu der gestörten Probe dar. Wie in Abbildung 4.9, Bild 1 dargestellt, wirkt die Rampe wie eine Abrisskante und es bilden sich Wirbel.

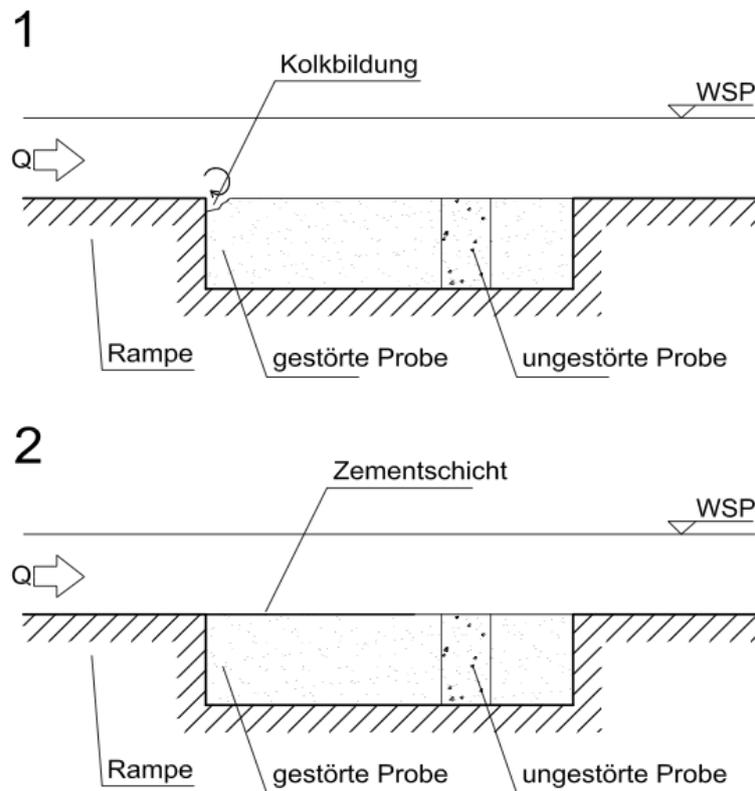


Abbildung 4.9: Bildung und Vermeidung des Kolkes

Der dadurch entstehende Kolk beeinflusst die weitere Strömung dahingehend, dass die Messung verfälscht werden würde. Abhilfe schafft das Auftragen einer Zementschicht. Diese Schicht, schematisch in Bild 2 dargestellt, nimmt in ihrer Stärke in Richtung der ungestörten Probe ab, so dass ein kontinuierlicher Übergang gegeben ist. Erreicht wird dieser Übergang durch das Aufbringen des Zementes mittels eines Siebes und anschließendem Glattsteichens mit einer Spachtel. Dies stellt sicher, dass die Rauhigkeit der Oberfläche annähernd jener der Probe entspricht. Die Aushärtung erfolgt über Nacht.

Während des Versuches zeigt sich, dass die Zementschicht ihre Funktion erfüllt. Da die Zementschicht auch unterwasserseitig aufgebracht wird, kann es dort aufgrund des direkten Strömungsangriffes zu großflächigen Ablösungen der Zementschicht kommen. Dies tritt jedoch erst bei hohen Durchflüssen auf und es entstehen keine Einwirkungen auf die ungestörte Probe.

4.3.2 Die Kalibrierung

Die Kalibrierung des Messsystemes umfasst das Einrichten des Bildausschnittes, die Fokussierung auf die Laserebene sowie das Definieren einer Referenzlänge im Bild. Eine korrekte Kalibrierung liefert ein Ergebnis wie in Abbildung 4.10 beispielhaft gezeigt.

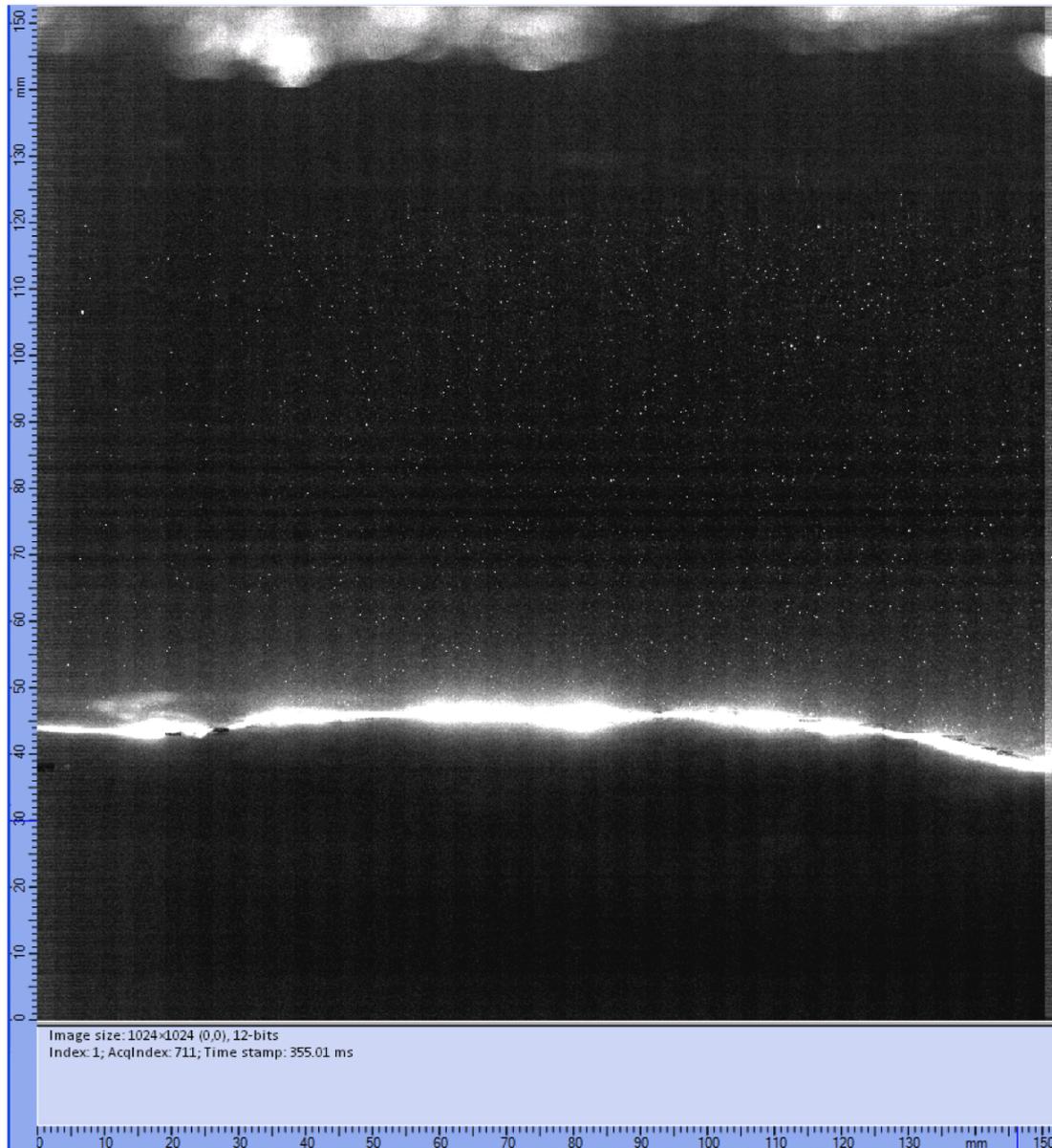


Abbildung 4.10: Beispiel eines kalibrierten Bildes

Das Einrichten des Bildausschnittes mittels der Kameraposition muss zwei gegensätzlichen Randbedingungen genügen. Zum einen ist der Ausschnitt möglichst groß zu wählen, um eine Aussagekraft des Vektorfeldes zu erhalten. Andererseits können bei zu großer Wahl die Partikel im Wasser nicht mehr korrekt erkannt werden. Der gewählte Bildausschnitt beträgt für die folgenden Versuche etwa 15x15 cm. Eine

weitere Anforderung an die Position der Kamera folgt aus der Geometrie des Messaufbaues. Die Achse der Linsen muss bei jeder Wasserspiegellohe unterhalb dieser liegen. Der Grund dafür ist, dass die freie Wasseroberfläche für die Optik undurchsichtig ist. Ein Umstellen der Kamera würde eine erneute Kalibrierung nach sich ziehen, deswegen muss diese Forderung für jeden Durchfluss erfüllt sein.

Das Linsensystem der Hochgeschwindigkeitskamera muss so eingestellt werden, dass die vom Laser aufgespannte Ebene ein scharfes Bild ergibt. Bereiche davor oder dahinter sind im Bild verschwommen.

Da das von der Kamera aufgenommene Bild keine Skalierung besitzt, muss eine Referenzlänge definiert werden. Dies geschieht mittels eines Meterstabes, welcher in die Ebene des Lasers gehalten wird. Durch die im Bild erscheinende Zentimeterteilung können zwei Punkte mit definierten Abstand eingegeben werden. Erfolgt dieser Schritt nicht, können vom Programm keine korrekten Vektorgrößen errechnet werden.

4.3.3 Versuchsreihen 1-6

Es werden in Summe 6 Versuchsreihen durchgeführt. Eine Versuchsreihe umfasst den Einbau der Probe, das Messen mit dem System PIV sowie die Auswertung der Ergebnisse. Auffälligkeiten oder Besonderheiten werden bei der jeweiligen Reihe im Detail beschrieben. Zusätzlich werden bei einigen Versuchsreihen Drehflugelmessungen vorgenommen. Diese Messungen stehen unter Vorbehalt, da zufolge der geringen Schichtstärke keine Überdeckung der Sondenspitze gegeben ist.

Vor Beginn der Versuchsreihen muss noch die notwendige Menge der aufgenommenen Bilder abgeschätzt werden. Eine höhere Anzahl bedeutet, dass in weiterer Folge eine genauere Berechnung möglich ist. Es können jedoch nicht beliebig viele Bilder aufgenommen werden, da ansonsten die Berechnungszeit zu lange wäre. Aufgrund der vermutlich relativ geringen Geschwindigkeit in vertikaler Richtung wird von einer erforderlichen Menge von 2500 Bildern ausgegangen.

In Abbildung 4.11 wird beispielhaft die Auswirkung auf eine horizontale Geschwindigkeit U gezeigt, wenn doppelt so viele Bilder aquiriert werden. In den für die Auswertung relevanten Bereichen ($h = 0-5$ mm beziehungsweise oberes Ende der Kurve) ist eine gute UberEinstimmung gegeben. Der Bereich vor dem Übergang in die Vertikale weist Abweichungen auf. Diese sind im Hinblick auf die verlängerte Rechenzeit jedoch vernachlässigbar.

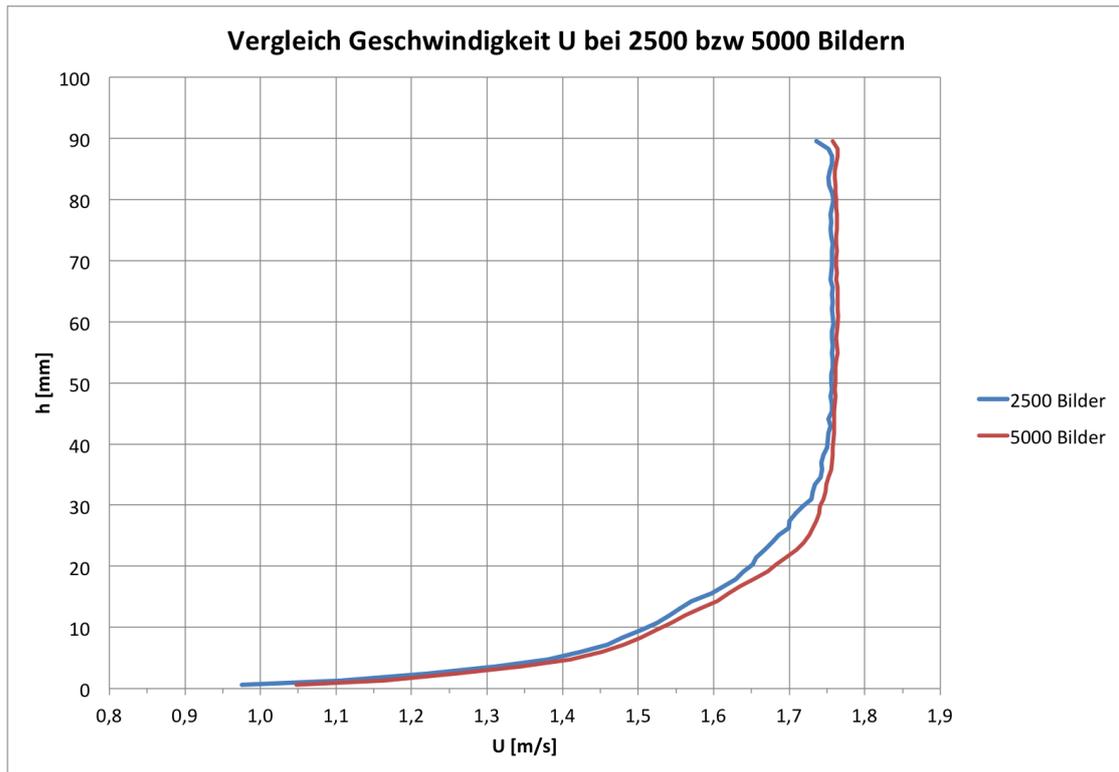


Abbildung 4.11: Auswirkung der Bildermenge auf die Geschwindigkeit U

Der typische zeitliche Ablauf einer Versuchsreihe stellt sich gemäß Tabelle 4.1 dar. Jeder Durchfluss wird über eine Zeit von 6 Minuten aufrechterhalten. In dieser Zeit soll sich der Wasserspiegel einpendeln, des weiteren Auswirkungen der Schubspannung auf die Probenoberfläche auftreten. Nach dieser Zeit werden mittels des Systems PIV die Messdaten aquiriert.

Tabelle 4.1: Zeitlicher Ablauf einer Versuchsreihe

Beginn		$t = 0$ min
$Q = 33$ l/s	6 min	$t = 6$
Aquirierung		
Auslesen	3 min	$t = 9$
$Q = 53$ l/s	6 min	$t = 15$
Aquirierung		
Auslesen	3 min	$t = 18$
$Q = 73$ l/s	6 min	$t = 24$
Aquirierung		
Auslesen	3 min	$t = 27$
$Q = 93$ l/s	6 min	$t = 33$
Aquirierung		
Auslesen	3 min	$t = 36$
$Q = 113$ l/s	6 min	$t = 42$
Aquirierung		
Auslesen	3 min	$t = 45$
Ende		

Die abschließenden 3 Minuten werden für das Auslesen der Bilder vom Speicher der Kamera benötigt. Am Ende einer Versuchsreihe wird die Probenoberfläche fotografisch protokolliert, um die zeitliche Veränderung der Erosion darstellen zu können.

Versuchsreihe 1 Durchgeführt am 21.7.2011. $Q = 33, 53, 73, 93$ und 113 l/s. Es werden Drehflügelmessungen vorgenommen, für die gestörte Probe wird 20 kN/m^2 ermittelt, für die ungestörte 24 kN/m^2 . Keine Auffälligkeiten im Versuchsablauf.

Versuchsreihe 2 Durchgeführt am 22.7.2011. $Q = 33, 53, 73, 93$ und 113 l/s. Es zeigt sich, dass die ungestörte Probe der Beanspruchung standhält und keine signifikanten Erosionsspuren zeigt.

Versuchsreihe 3 Durchgeführt am 22.7.2011. $Q = 73, 93$ und 113 l/s. Es wird die Probe aus Versuchsreihe 2 weiterverwendet, jedoch wird eine Initialrinne angebracht. Diese wird mit der Kelle im oberen Teil der ungestörten Probe eingeritzt. Das Ziel ist ein verbesserter Angriff der Schubkräfte auf die Probe. Es zeigt sich, dass bereits beim Hochfahren der Pumpe auf 73 l/s größere Teile schollenartig wegbrechen. Abbildung 4.12 zeigt Probe 2 am Ende der Versuchsreihe.

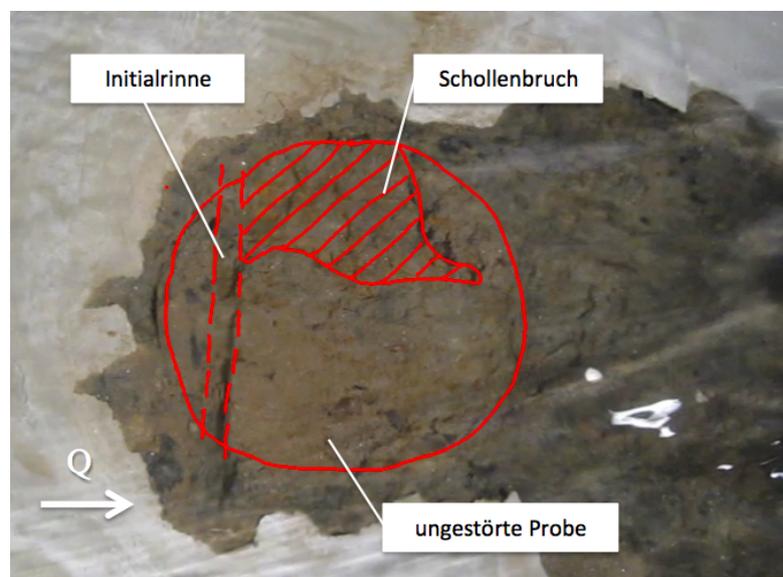


Abbildung 4.12: Erosionsbild für Versuchsreihe 3 (Bild: Autor)

Versuchsreihe 4 Durchgeführt am 25.7.2011. $Q = 33, 53, 73, 93$ und 113 l/s. Die Besonderheit bei dieser Probe ist ein Ast, welcher im vorderen mittigen Bereich heraussteht. Es wird untersucht, inwiefern dadurch Auswirkungen auf den Erosionsprozess auftreten. Abbildung 4.13 zeigt den Fortschritt der Erosion.

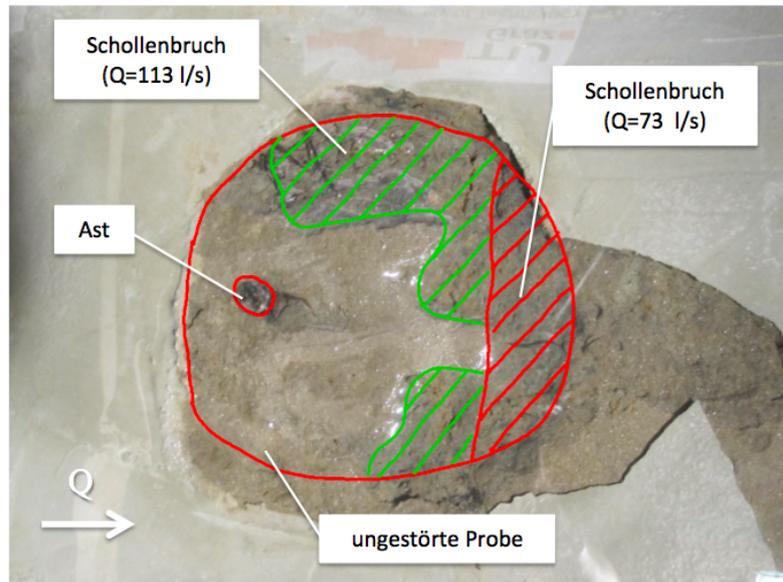


Abbildung 4.13: Erosionsbild für Versuchsreihe 4 (Bild: Autor)

Versuchsreihe 5 Durchgeführt am 25.7.2011. $Q = 73, 93$ und 113 l/s. Diese Versuchsreihe baut auf der vorherigen auf. Auch hier wird eine Initialrinne eingeritzt, um den weiteren Verlauf beobachten zu können. In Abbildung 4.14 ist der Ausbruch bei 93 l/s zu sehen. Die vorgenommenen Drehflügelmessungen ergaben folgende Werte: ungestörte Probe - 14 kN/m², gestörte Probe - 20 kN/m².

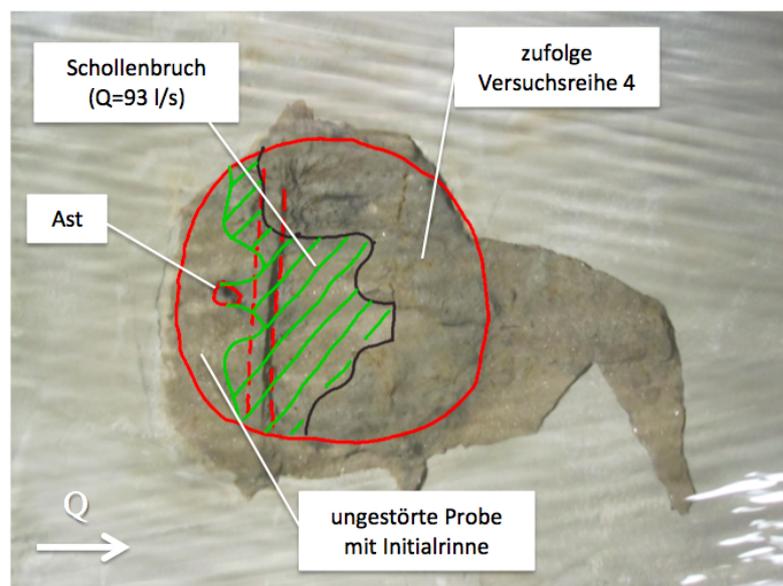


Abbildung 4.14: Erosionsbild für Versuchsreihe 5 (Bild: Autor)

Versuchsreihe 6 Durchgeführt am 26.7.2011. $Q = 33, 43, 53, 63, 73$ und 83 l/s . Die ungeraden Zahlen sollen Interpolationswerte für die Auswertung liefern. Die Auffälligkeit bei dieser Probe ist ihre Schichtung und eher weiche Konsistenz. Abbildung 4.15 zeigt die die dadurch entstandene signifikante Erosion.

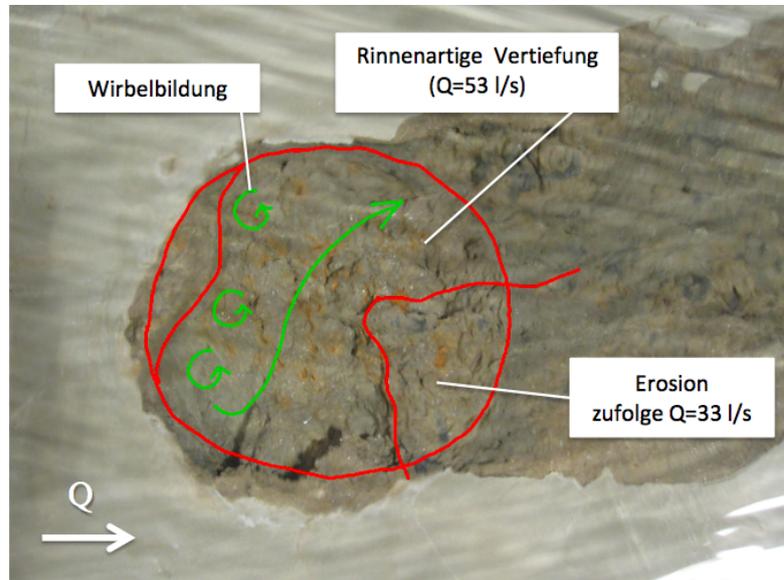


Abbildung 4.15: Erosionsbild für Versuchsreihe 6 (Bild: Autor)

5 Auswertung

5.1 Berechnungen

In diesem Kapitel wird die Aufbereitung der Messergebnisse für die spätere Analyse beschrieben.

5.1.1 Dynamic Studio

Die Aufbereitung der Messergebnisse erfolgt mit der Software Dynamic Studio der Fa. Dantec Dynamics. Es wird ein Überblick über diesen Vorgang und den dafür verwendeten Funktionen gegeben (DANTEC 2008).

Abbildung 5.1 zeigt einen Ausschnitt der Benutzeroberfläche des Programms. Im Fenster „Database“ scheinen die Projektdaten zur Bearbeitung auf. Der geöffnete Ordner umfasst die unter Kapitel 4.3.2 beschriebene Kalibrierung sowie die einzelnen Versuchsläufe, hier „Run“ (mit jeweiliger Uhrzeit) genannt. Für jede der 6 Versuchsreihen erfolgt ein „Run“ für je eine Durchflussmenge. Der Menüpunkt „Photron SA1 Camera 40l“ umfasst die jeweils aufgenommenen rund 2000 Bilder. Diese stellen die Rohdaten für die weitere Analyse dar. In der Abschätzung gemäß Kapitel 4.3.3 wird von 2500 Bildern ausgegangen. Die Differenz erklärt sich durch die Anlaufzeit der Kamera, die in dieser Zeit aufgenommenen Bilder zeigen noch keine Aussagekraft.

Aus der Summe der Bilder wird im nächsten Schritt mit der Funktion „Image Mean“ die mittlere Helligkeit von übereinstimmenden Pixel errechnet. Mit diesen ist zum Beispiel ein durchgängiger Grauschleier zufolge den Aufnahmebedingungen gemeint. Die Partikel werden nicht erfasst, da sie ihre Position mit jedem Bild ändern. Das dadurch entstandene verschmierte Bild wird benötigt, um mit der Funktion „Image Arithmetic“ eine Differenz zwischen diesem und den Rohdaten zu bilden. Das Ergebnis ist ein klar definierter Partikelstrom.

Nun folgt die Umrechnung der Bildinformation in Vektoren. Die Funktion „Adaptive Correlation“ errechnet die Geschwindigkeitsvektoren. Dazu wird das Bild mit

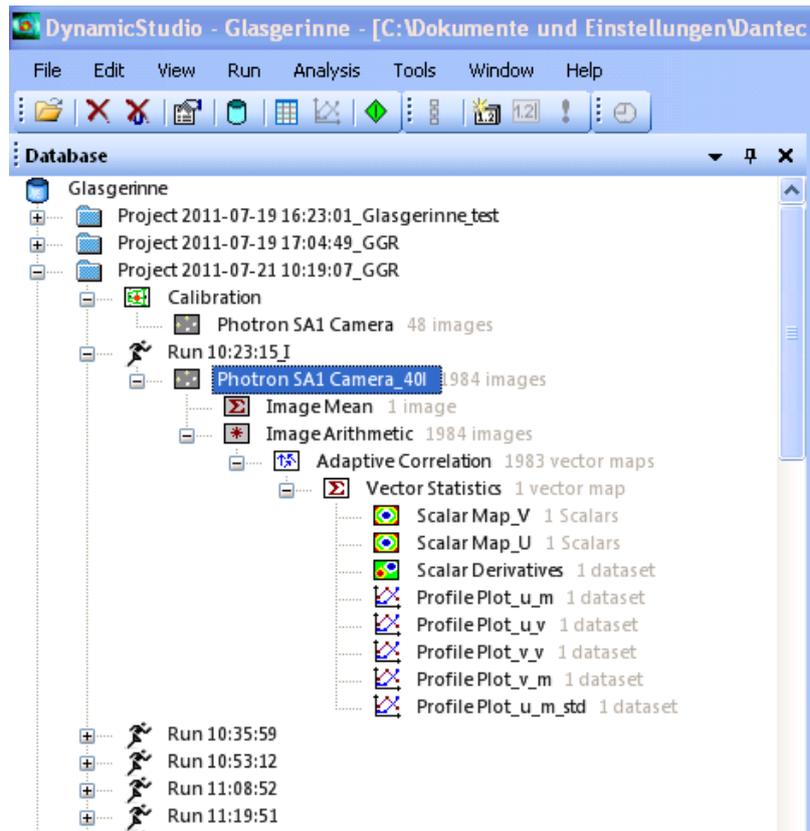


Abbildung 5.1: Ausschnitt der Benutzeroberfläche des Programms Dynamic Studio

einem Raster überzogen und jeder Partikel über zwei bis drei Bilder verfolgt. Zu beachten ist, dass der jeweilige Partikel sich in dieser Zeit innerhalb eines Rasterfeldes bewegt. Ist dies nicht der Fall, ist die Größe des Feldes entsprechend abzuändern.

Eine zusätzliche, in Abbildung 5.1 nicht dargestellte Funktion ist „Range Validation“. Es lässt sich hiermit die Größe der Vektoren begrenzen. Beispielsweise sei bekannt, dass die maximal auftretende Geschwindigkeit 2 m/s beträgt. Wenn zufolge einer fehlerhaften Interpolation seitens des Programmes Vektoren mit einem Betrag größer als zwei auftreten, können diese global herausgefiltert werden.

Mit den bisher durchgeführten Berechnungen liegen rund 2000 Vektorgraphiken vor. Aus diesen wird im letzten Schritt mit der Funktion „Vektor Statistics“ ein mittleres Geschwindigkeitsvektorfeld gebildet. Die Rastergröße für dieses Feld beträgt 1,19 x 1,19 mm. Dies ist somit, abgesehen von Interpolationen, die erreichbare Auflösung.

Mit diesem Vektorfeld können nun die gewünschten Ergebnisse berechnet werden. Für den Versuch sind dies:

- Geschwindigkeit U
- Geschwindigkeit V
- Standardabweichung U
- Standardabweichung V

Unter der Geschwindigkeit U versteht man die horizontale Geschwindigkeitskomponente. Mit V wird eine vertikale Komponente benannt. Dies gilt analog für die Standardabweichung.

Die Ergebnisse werden für die Versuchsreihen 1-6 (Q jeweils 33, 53, 73, 93 und 113 l/s) ermittelt.

Geschwindigkeit U

In der Graphischen Darstellung „Scalar Map“ werden jedem Rasterpunkt in Abhängigkeit der Betragsgröße des Vektors gemäß eines Farbcodes die entsprechende Farbe zugeordnet. Abbildung 5.2 zeigt beispielhaft eine typische Darstellung für die Geschwindigkeit U (Q = 113 l/s).

Neben der logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung (orange-rote Schichtung) erkennt man im obersten Bildteil die Auswirkungen der Wolkenbildung bzw. Unschärfe. Bedingt durch den stationären Abfluss müsste in diesem Bereich ein glatter Übergang zu einer Geschwindigkeit gleich Null stattfinden. Im unteren Bilddrittel erkennt man die Probenoberfläche (blau). Der Bereich darunter wurde vom Programm anhand des Bildrauschens der Aufnahme interpoliert. Diesen Werten ist keine Aussagekraft zuzumessen. Im rechten Bildbereich sind zwei grüne „Becken“ erkennbar. Durch die Eintiefung zufolge der Erosion ist dieser Bereich für die Kamera nicht einsehbar. Da die Strömung auch dort ausgeprägt ist, werden vom Programm Interpolationen durchgeführt. Die Werte in diesem Bereich können für eine Berechnung nicht herangezogen werden.

Für den Vergleich der Geschwindigkeiten müssen aus dem Vektorfeld für eine definierte Stelle numerische Werte generiert werden. Relevant ist die Geschwindigkeitsverteilung oberwasserseitig der Probe bzw. in Probenmitte. Mit der Funktion „Profile Plot“ kann entlang einer Linie, definiert durch einen Start- und Endpunkt, der jeweilige Wert ermittelt und tabellarisch sowie graphisch dargestellt werden.

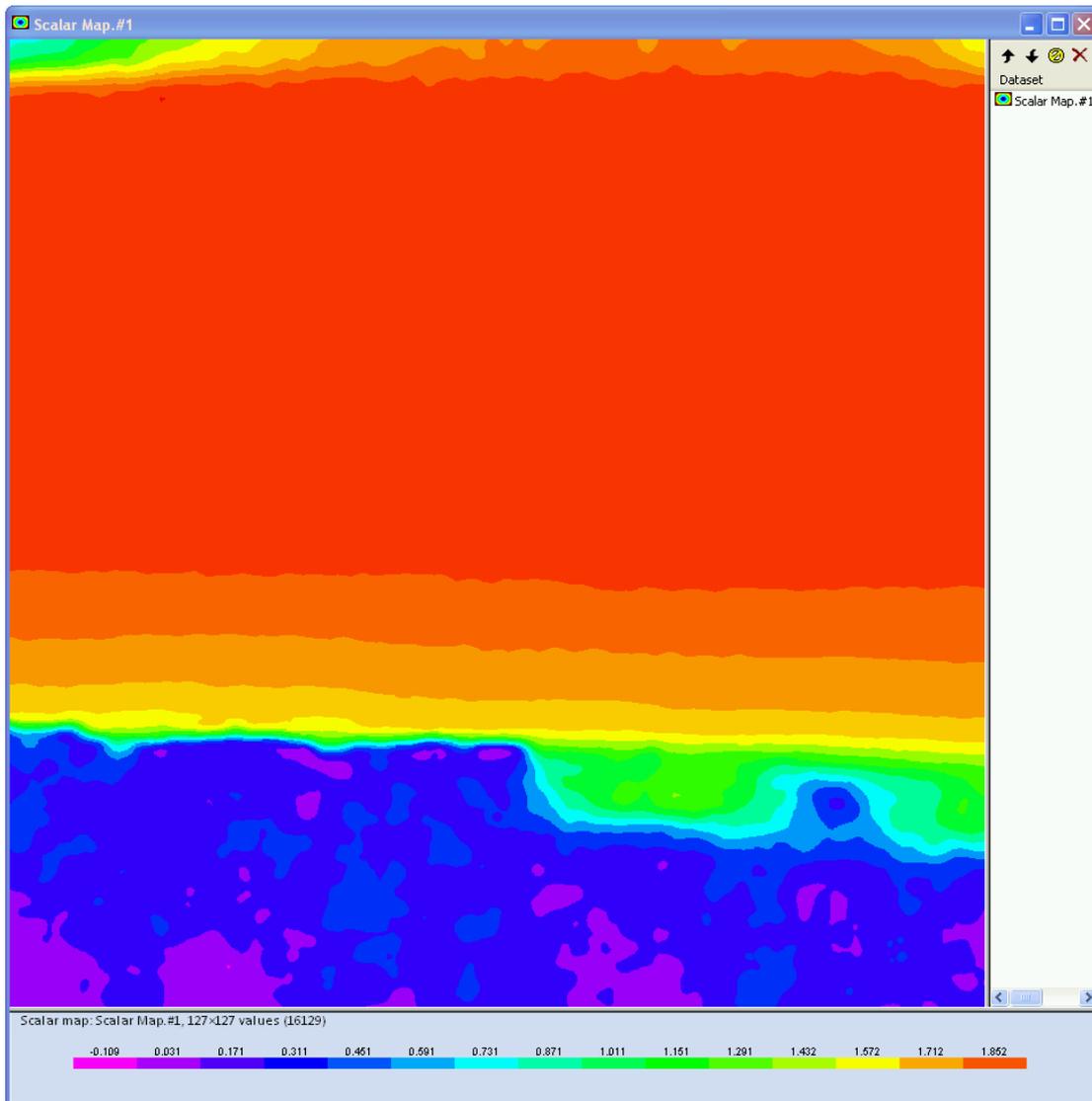


Abbildung 5.2: Graphische Darstellung der Geschwindigkeit U [m/s] ($Q = 113$ l/s)

Zu beachten ist, den Startpunkt der Linie exakt auf der Probenoberfläche zu positionieren. Liegt dieser Punkt darunter, werden die falschen Interpolationswerte aus diesem Bereich mit ausgelesen, liegt er darüber, gehen Messwerte verloren. Die Position des Endpunktes liegt über der Wasseroberfläche. Der Grund liegt darin, dass diese im Vektorfeld nicht genau erkennbar ist. Die Geschwindigkeitsprofile weisen nun auch Werte aus dem Bereich darüber auf. In einem Tabellenverarbeitungsprogramm werden die Höhen mittels einer Iteration angepasst.

Mittels der Kontinuitätsgleichung (Formel 2.24 auf Seite 10) lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Fläche und der bekannten Durchflussmenge herstellen. Die Fläche berechnet sich über ein numerisches Integral, dessen Grenzen die Ordinate

bzw. die Kurve der Geschwindigkeit und die tatsächliche Breite $b=0,76$ m sind.

$$Q = \Delta h b \sum_{h=0}^n v_h \quad (5.1)$$

Δh entspricht der Rastergröße des Vektorfeldes (1,19 mm). Die Höhe ist variabel, n wird solange variiert, bis die errechnete Durchflussmenge der vorhandenen entspricht.

Minimale vertikale Geschwindigkeiten sind zufolge der leichten Wölbung der Proben (siehe Abbildung 4.10) und der im späteren Verlauf des Versuches auftretenden Erosion ebenfalls vorhanden. Da diese in ihrem Betrag so klein sind, ergeben sich bei einer Vektoraddition für die Resultierende keine signifikant höheren Werte. Daher wird diese Geschwindigkeitskomponente vernachlässigt.

Es wurden neben den Geschwindigkeiten U in Probenmitte zusätzlich Geschwindigkeiten im Oberwasserbereich der Probe gemessen (etwa 1 cm vor der Probe). Diese dienen zu Vergleichszwecken, da in diesem Bereich noch keine Einflüsse zufolge Erosion auftreten.

Abbildung 5.3 zeigt beispielhaft einen „Profile Plot“ der Geschwindigkeit U ($Q = 113$ l/s).

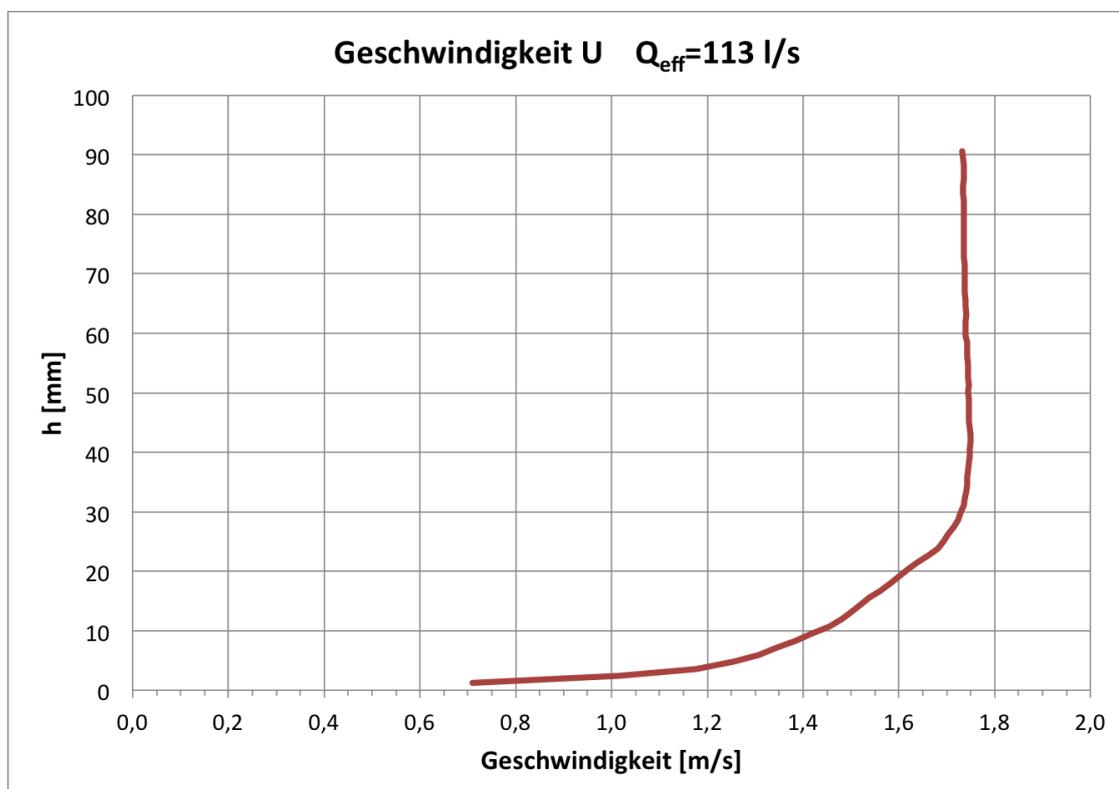


Abbildung 5.3: Beispiel für einen Profile Plot der Geschwindigkeit U

Standardabweichung

Die Funktion „Profile Plot“ ermöglicht weiters die Ermittlung der Standardabweichungen der Geschwindigkeiten U und V. Analog der Geschwindigkeitsermittlung wird eine Linie definiert und den Rasterpunkten entsprechend die Werte ermittelt.

Abbildung 5.4 zeigt beispielhaft einen „Profile Plot“ der Standardabweichung der Geschwindigkeit U und V ($Q = 113 \text{ l/s}$).

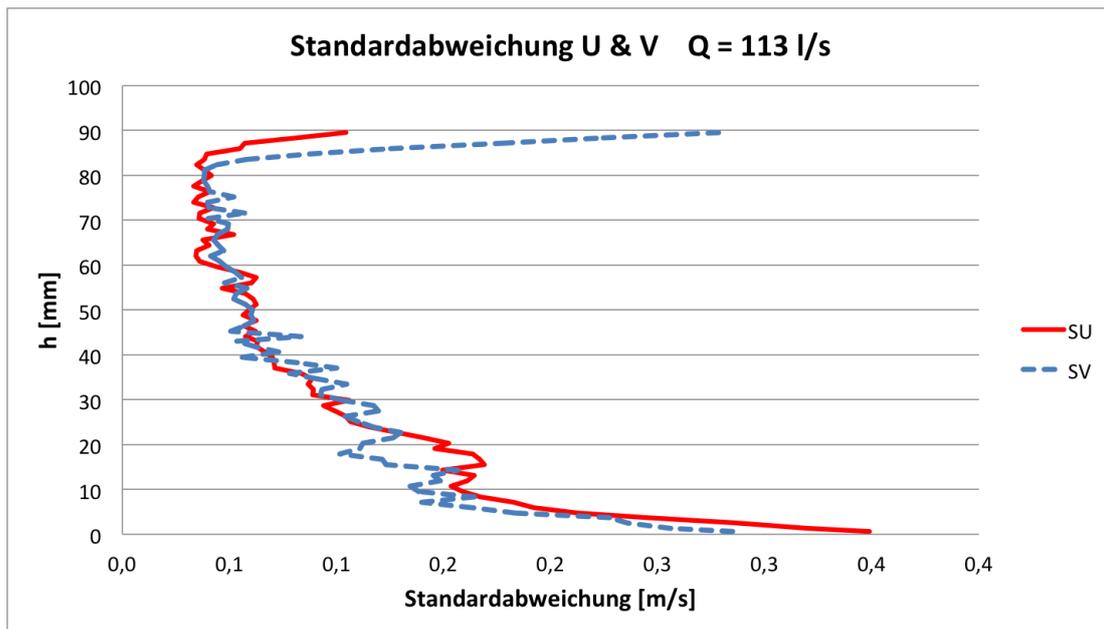


Abbildung 5.4: Beispiel für einen Profile Plot der Standardabweichung U & V

5.1.2 Schubspannungsermittlung allgemein

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Schubspannungsermittlung. Eine elementare Berechnungsart wurde bereits in Kapitel 2.2.3 vorgestellt. Da das System PIV zweidimensionale Berechnungen ermöglicht, bietet sich die Ermittlung über die Standardabweichungen der Geschwindigkeiten an. Aus den in Kapitel 5.1.1 ermittelten Werten lässt sich die Schubspannung wie folgt rechnen:

$$\tau = 1000 (S_u^2 + S_v^2) \quad [N/m^2] \quad (5.2)$$

Abbildung 5.5 zeigt beispielhaft eine Schubspannung zufolge eines Durchflusses von 113 l/s und einer Wasserhöhe von 90 mm . Die Schubspannung wirkt nur bis zu etwa der halben Wasserhöhe, darüber ist sie Null. Erst kurz vor der Wasseroberfläche,

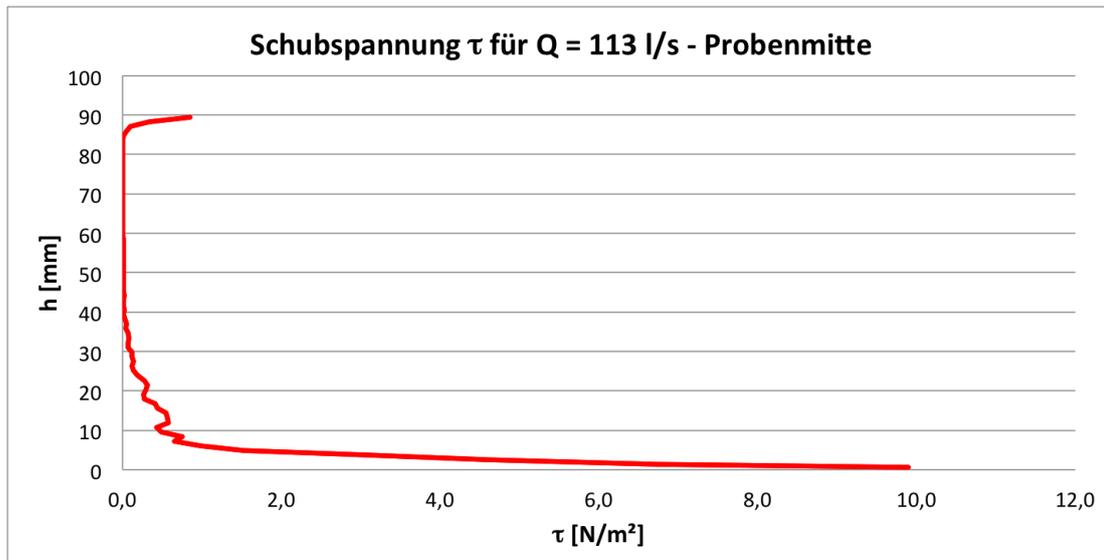


Abbildung 5.5: Beispiel Schubspannung über die Höhe

bei dem Mediumwechsel Wasser-Luft, treten wieder geringe Schubspannungen auf. Theoretisch dürften an einer freien Oberfläche jedoch keine Spannungen auftreten. Erklärbar ist dies mit der Qualität der Kameraaufnahme. Betrachtet man beispielsweise Abbildung 4.10 auf Seite 35, so fällt die Wolkenbildung bzw. Unschärfe in dem Übergangsbereich auf. Da nun in diesem Bereich die Geschwindigkeiten vom Programm interpoliert werden, treten höhere Standardabweichungen und damit auch Schubspannungen auf. In der bodennahen Schicht steigen die Schubspannungen überproportional an.

Zusammenfassend zeigt Tabelle 5.1 die aufbereiteten Messergebnisse.

Tabelle 5.1: Übersicht über die Messergebnisse

Geschwindigkeit U						Standardabweichung V					
	Durchfluss Q [l/s]						Durchfluss Q [l/s]				
Probe	33	53	73	93	113	Probe	33	53	73	93	113
1	✓	✓	✓	✓	✓	1	x	x	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓	2	x	x	✓	✓	✓
3	x	✓	✓	✓	✓	3	x	x	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓	4	x	x	✓	✓	✓
5	x	✓	✓	✓	✓	5	x	x	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	x	x	6	x	x	✓	x	x

Standardabweichung U						Schubspannung					
	Durchfluss Q [l/s]						Durchfluss Q [l/s]				
Probe	33	53	73	93	113	Probe	33	53	73	93	113
1	x	x	✓	✓	✓	1	x	x	✓	✓	✓
2	x	x	✓	✓	✓	2	x	x	✓	✓	✓
3	x	x	✓	✓	✓	3	x	x	✓	✓	✓
4	x	x	✓	✓	✓	4	x	x	✓	✓	✓
5	x	x	✓	✓	✓	5	x	x	✓	✓	✓
6	x	x	✓	x	x	6	x	x	✓	x	x

5.2 Analyse

Das Ziel dieses Kapitels ist die Validierung der Messergebnisse und eine Aussage über die kritische Schubspannung.

5.2.1 Vergleich der Höhen

Die erste und zugleich einfachste Möglichkeit der Bestätigung der Messergebnisse ist der Vergleich der Wasserspiegelhöhen. Diese können in dieser Arbeit auf 3 Arten ermittelt werden:

(1) Geschätzt aus den Bildern der PIV-Messung: In den Bildern wird der Verlauf des Wasserspiegels geschätzt und die Höhendifferenz zur Probenoberfläche ermittelt.

(2) Auswertung Dynamic Studio (Kapitel 5.1.1): Die Höhe ergibt sich aus einer Iteration und hängt über die Kontinuitätsgleichung mit dem vorhandenen Durchfluss zusammen. Diese Höhe spiegelt die Versuchsergebnisse wider.

(3) Mittels der Normalabflussberechnung (Kapitel 2.2): Die Höhe entspricht der mathematischen Berechnung und ist unabhängig von den Versuchsergebnissen.

Die Ergebnisse der Höhenermittlung sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst:

Tabelle 5.2: Vergleich der ermittelten Höhen

Gegenüberstellung der Höhen [mm]															
Q [l/s]	33			53			73			93			113		
Ermittlungsart	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Probe 1	34	39	39		51	53		66	66	81	79	78	92	92	89
Probe 2	34	39	39	49	52	53	65	69	66	80	79	78	92	91	89
Probe 3		40	39	61	53	53	63	67	66	77	79	78	92	91	89
Probe 4	33	41	39	53	54	53	67	67	66	79	79	78	93	91	89
Probe 5			39	50	53	53	65	67	66	79	79	78	91	91	89
Probe 6	31	40	39	49	52	53	63	65	66			78			89
Mittelwert	33	40	39	52	53	53	65	67	66	79	79	78	92	91	89

Legende:

(1) Geschätzt aus den Bildern der PIV-Messung

(2) Auswertung Dynamic Studio

(3) Zuzufolge der Normalabflussberechnung

Versuchsreihe 6 endet in der Tabelle bei einem Durchfluss von 83 l/s, darüber liegen keine Messergebnisse vor. Für diese Versuchsreihe ist $Q = 73$ l/s der größte vergleichbare Durchfluss. Die fehlenden restlichen Werte konnten nicht hinreichend genau ermittelt werden, durch die Mittelwertbildung fällt dies jedoch nicht ins Gewicht. Grafisch dargestellt (Abbildung 5.6) zeigt sich, dass in weiten Teilen eine Kongruenz der drei Werte vorliegt.

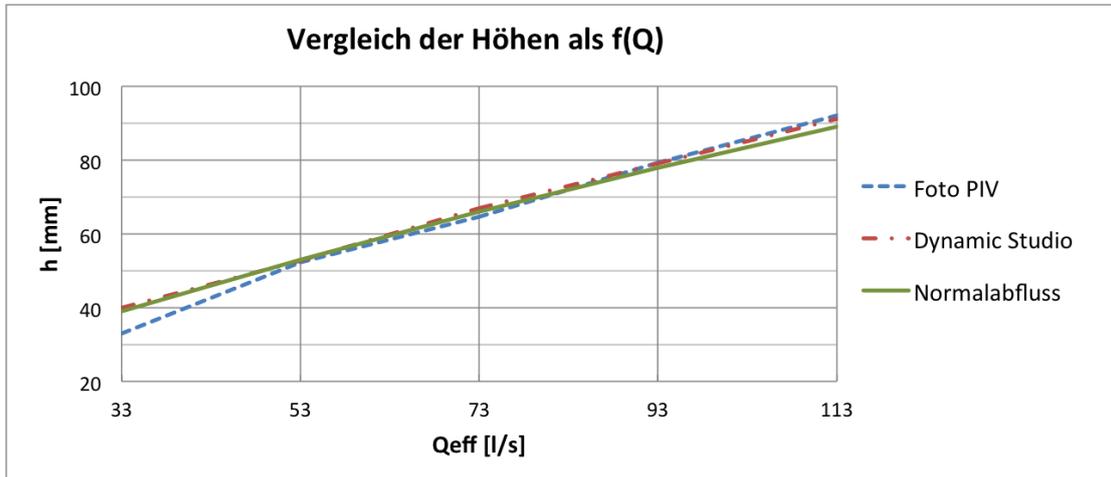


Abbildung 5.6: Grafischer Vergleich der ermittelten Höhen

Bei $Q=33$ l/s fällt eine Abweichung bei der Schätzung des Bildes aus der PIV-Messung auf. Dies ist wie folgt zu erklären: Die Position der Kamera im Versuchsaufbau muss so eingestellt sein, dass sie bei jeder Durchflusshöhe den kompletten, vom Laser beleuchteten Bereich aufnehmen kann (siehe Kapitel 4.3.2).

Wie in Abbildung 5.7 ersichtlich wurde die Kamera jedoch zu hoch positioniert.

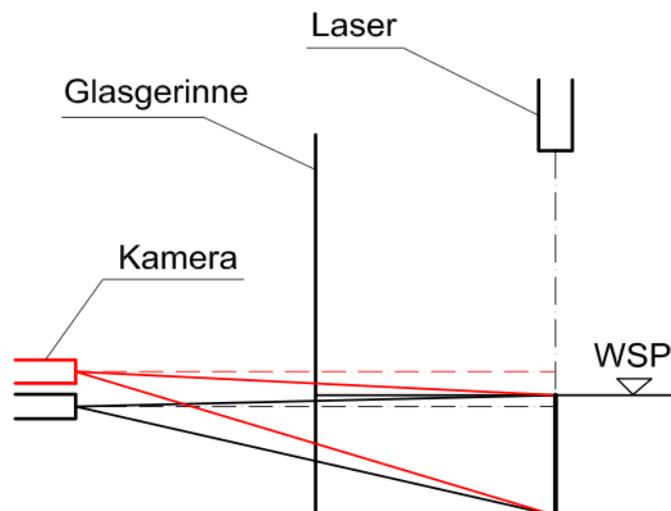


Abbildung 5.7: Auswirkung der zu hoch positionierten Kamera

Schwarz dargestellt wäre die korrekte Position. Die Kameraachse befindet sich unter dem Wasserspiegel und erfasst die gesamte vom Laser beleuchtete Ebene. Rot dargestellt ist die eingebaute Position. Da die Achse über dem Wasserspiegel liegt, befindet sich dieser auf der späteren Aufnahme als verschwommener Bereich und verdeckt den obersten Bereich der Ebene. Die Ablesung der Höhe fällt zu tief aus. Da der Wasserspiegel für höhere Durchflüsse über der Achse der Kamera liegt, tritt dieser Effekt dort nicht mehr auf.

5.2.2 Vergleich der Geschwindigkeiten

Für diesen Vergleich bietet sich die Überlagerung der Geschwindigkeitsprofile gleicher Durchflüsse an. Die Wasserspiegelmöhen ergeben sich gemäß Kapitel 5.2.1. Die Abbildungen sind gesammelt in Anhang A dargestellt.

Q=33l/s: In Abbildung A.1 und A.2 zeigt sich der Einfluss der zu hoch eingebauten Kamera. Im Bereich $h = 30\text{-}40$ mm kommt es zu einem signifikanten Abfall der Geschwindigkeit, weiters streuen die Linien stark. Der steigende Ast der Kurve weist hingegen eine geringe Abweichung auf. In Probennähe ($h=0\text{-}5$ mm) gibt es ebenfalls starke Streuungen der Geschwindigkeiten. Durch diese Einschränkungen ist den Ergebnissen dieser Durchflussmenge nur eine begrenzte Aussagekraft beizumessen. Ausser bei Versuchsreihe 6 trat nirgends Erosion zufolge dieser Durchflussmenge auf. Aus diesem Grund wurde das Verhalten der Probe bei 33 l/s ausführlicher untersucht (Probe VI 1-3). Eine Änderung des Geschwindigkeitsprofils ist nicht festzustellen.

Q=53l/s: Auch hier zeigt sich gemäß Abbildung A.3 und A.4 noch ein geringer Einfluss der fehlerhaft eingebauten Kamera im Bereich der Wasseroberfläche. Die Auswirkungen sind jedoch vernachlässigbar gering. In Probennähe ist bereits eine sehr gute Kongruenz der Linien zu beobachten. Weiters ist dort der Anstieg der Geschwindigkeit aussagekräftig. In Probenmitte liegt die Kurve für Probe 6 deutlich über den anderen. Dies ist mit der bereits ausgeprägten Eintiefung und der dadurch resultierenden veränderten Strömung zu erklären.

Q=73l/s: (Abbildung A.5 und A.6) Die Kurven weisen bis auf den Bereich des Bauches eine gute Übereinstimmung auf. Ab diesem Durchfluss zeigt sich der Übergang zur Vertikalen in einer Höhe von 35-40 mm. Allgemein lässt sich festhalten, dass die Qualität der Ergebnisse mit zunehmender Durchflussmenge besser wird.

Q=93l/s: (Abbildung A.7 und A.8) Die Punkte für Q=73 l/s gelten hier in gleichem Maße. Probe 3 zeigt Abweichungen. Erklärbar ist dies mit einer zu hoch eingestellten Pumpleistung.

Q=113l/s: (Abbildung A.9 und A.10) Es sind keine Auffälligkeiten ersichtlich.

Aus den Datensätzen jedes Profils lässt sich die mittlere Geschwindigkeit errechnen. Tabelle 5.3 zeigt die Gegenüberstellung zu den Ergebnissen gemäß der Normalabflussberechnung (Kapitel 2.2.2)

Tabelle 5.3: Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten

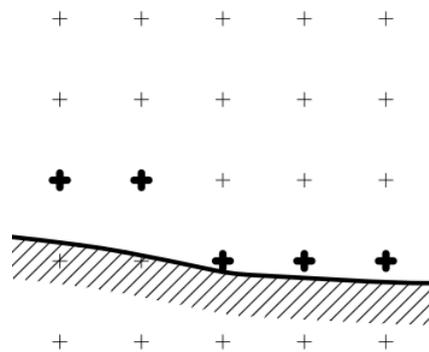
	Normalabfluss	Auswertung Messung
Q [l/s]	v _{mittel} [m/s]	v _{mittel} [m/s]
33	1,12	1,10
53	1,34	1,33
73	1,44	1,45
93	1,57	1,57
113	1,67	1,68

Es zeigt sich, dass die Werte gut übereinstimmen und somit die Messergebnisse brauchbar sind.

5.2.3 Vergleich der Schubspannungen

Da bei den Geschwindigkeiten die Qualität der Messung mit zunehmender Durchflussmenge zunimmt, wird ein erster Schubspannungsvergleich zufolge $Q=113$ l/s vorgenommen. Wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben erfolgt die Berechnung entlang einer Linie, welche an der Probenoberfläche beginnt. Die Position ist ident mit der Lage des Geschwindigkeitsprofils. Exakte Werte existieren an den Rasterpunkten, deswegen wird für den Wert der Schubspannung der erste Punkt oberhalb der Probenoberfläche gewählt. Abbildung 5.8 zeigt diesen Zusammenhang.

Abbildung 5.8: Lage der Probe im Rasterfeld



Der Abstand von der Probenoberfläche zu diesem Punkt beträgt somit zwischen 0 und 1,19mm.

Das Ergebnis dieser Ermittlung ist in Tabelle 5.4 dargestellt. Es zeigt sich, dass 2 Werte deutlich über den anderen liegen.

Q = 113 l/s	Schubspannung	Höhe
Probe	[N/m ²]	[mm]
1	8,07	1,10
2	28,42	0,42
3	17,68	1,12
4	8,34	1,05
5	9,90	0,60

Tabelle 5.4: Schubspannung am ersten Rasterpunkt für $Q=113$ l/s

Um diese beiden Werte erklären zu können, wird für Probe 2 sowie für Probe 4 zu Vergleichszwecken eine Schubspannungsverteilung erstellt. In Fließrichtung wird in einem Abstand von 10 mm jeweils die Schubspannung ermittelt und in einem Diagramm dargestellt. Zusätzlich wird die Höhe aufgetragen. Um diese im gleichen

Maßstab darstellen zu können, werden die Werte zehnfach überhöht. Somit können auf der Ordinate beide Einheiten dargestellt werden.

Abbildung 5.9 zeigt die Schubspannungsverteilung für Probe 2.

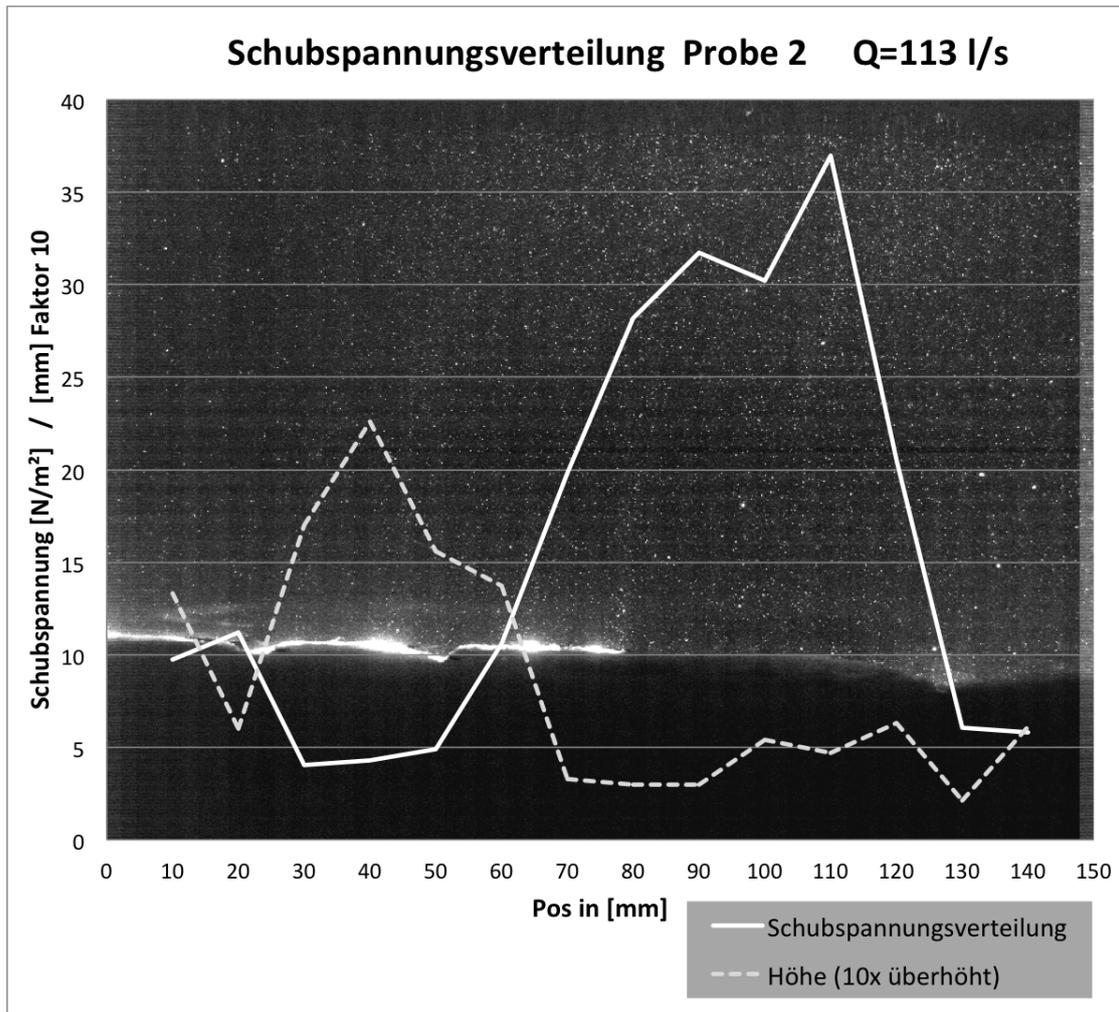


Abbildung 5.9: Schubspannungsverteilung Probe 2

Zur Orientierung ist das Bild von Probe 2 hinterlegt. Es ist eindeutig der Zusammenhang zwischen der Höhe über der Probenoberfläche und dem Wert der Schubspannung zu sehen.

Weiters fällt auf, dass der Wert der Höhe im linken Bildbereich größer ist. Der Grund dafür liegt in den an der Oberfläche ersichtlichen Glanzpunkten. Diese entstehen, wenn der Laser auf ein Material trifft, welches Quarz oder Glimmer enthält. Die auftreffenden Strahlen werden in alle Richtungen reflektiert und verursachen eine lokale Überbelichtung. In diesem Bereich kann die Software keine Partikel erfassen und deswegen keine exakten Werte bestimmen. Die ersten verfügbaren Werte liegen darüber. Für die Schubspannung bedeutet dies, dass die Ergebnisse zu niedriger ausfallen.

Der in Tabelle 5.4 genannte große Wert wurde an Position 80 ermittelt. Da die Überstrahlung hier endet, konnten die Schubspannungswerte seitens der Software bis knapp über die Probenoberfläche ermittelt werden.

Probe 4 weist plausible Werte auf. Der Vergleich mit der Schubspannungsverteilung für Probe 4 bestätigt die Beobachtungen. In Abbildung 5.10 weist der Bereich rechts der Mitte eine ausgeprägte Glanzstelle auf, die Werte der Schubspannung sind niedrig. Der Bereich um den Ast bei Position 70 weist Störungen zufolge der veränderten Strömung auf. Die Spannungsspitze bei Position 30 entsteht zufolge einer Stufe in der Probenoberfläche. Dies entspricht der Realität, da dort verstärkt die Strömungskräfte angreifen können. Es zeigt sich, dass die Wahl der Stelle der Ermittlung Einfluss auf die Größe der Schubspannung hat.

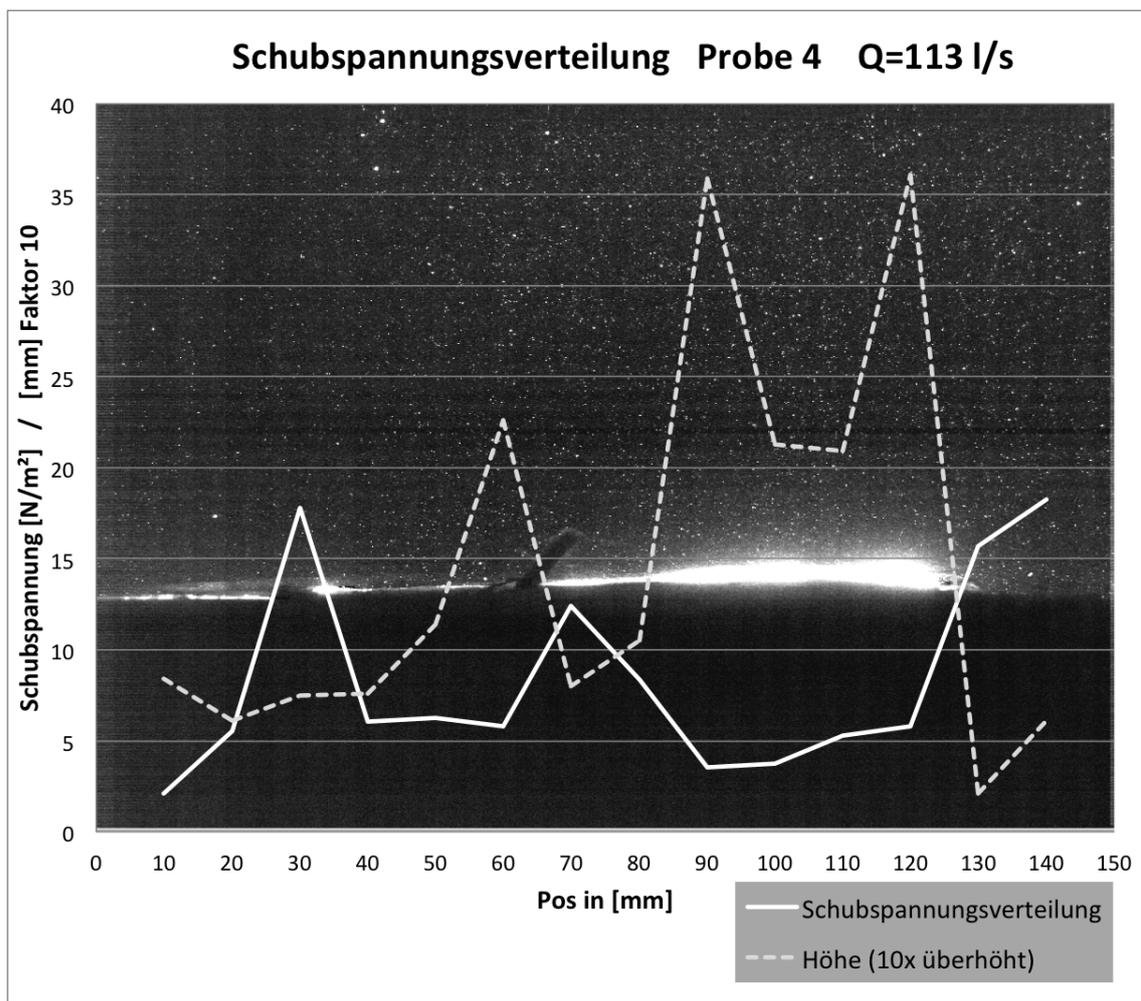


Abbildung 5.10: Schubspannungsverteilung Probe 4

Eine Angleichung der Höhen, wie in Abbildung 5.11 dargestellt, liefert folgendes Ergebnis:

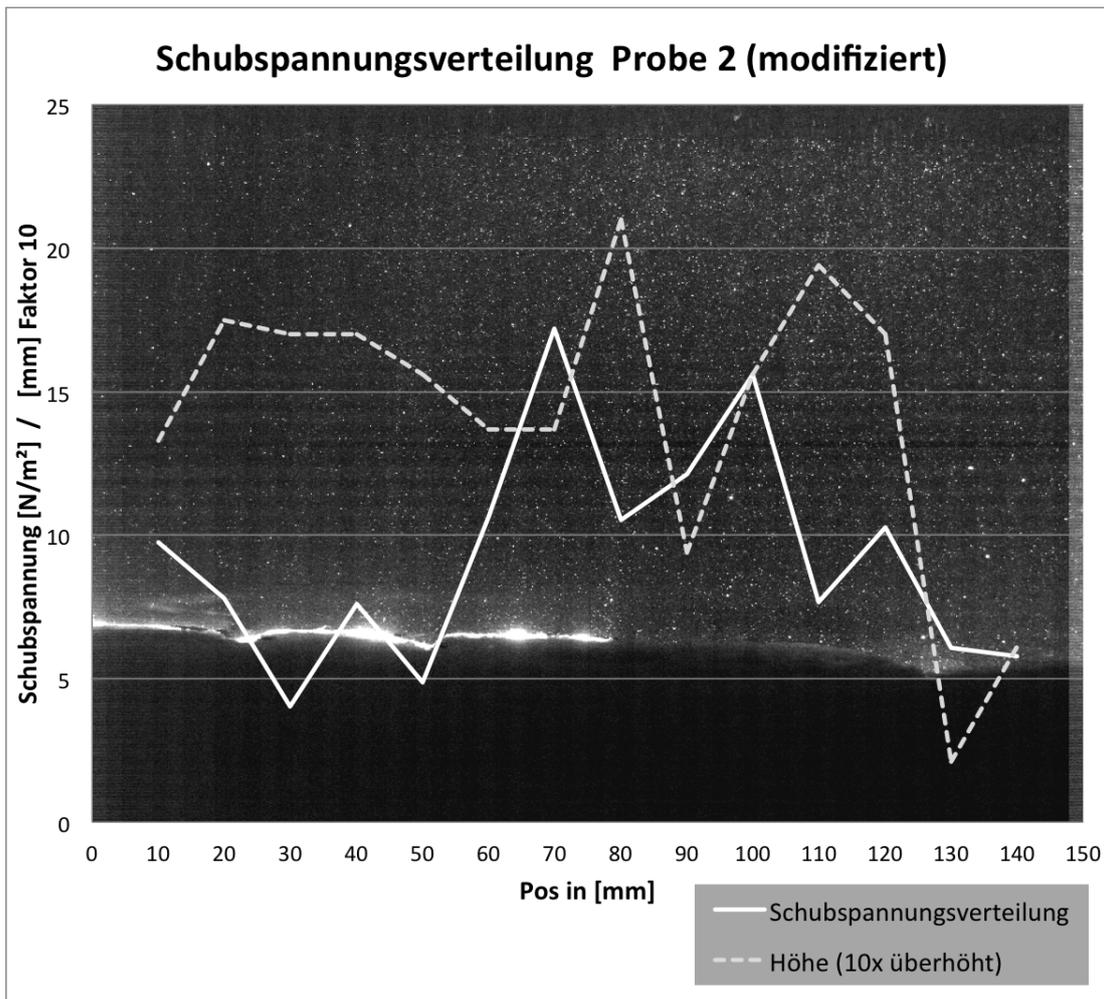


Abbildung 5.11: Schubspannungsverteilung Probe 2 mit modifizierten Höhen

Die mittlere Höhe über der Probenoberfläche beträgt 1,4 mm. Man erkennt, dass die Schubspannungsspitze rechts der Mitte angeglichen ist. Die neu ermittelten Werte für Probe 2 und 3 (Tabelle 5.4) betragen $9,2 \text{ N/m}^2$ beziehungsweise $13,7 \text{ N/m}^2$.

Die mittlere Schubspannung beträgt somit bei $Q=113 \text{ l/s}$ $10,0 \text{ N/m}^2$.

Da dies ein plausibler Wert ist, wird für die weitere Ermittlung die Schubspannung in einer Höhe von rund 1,4 mm über der Probenoberkante herangezogen.

Für die restlichen Durchflüsse werden aufgrund des hohen Aufwandes keine Schubspannungsverteilungen erstellt. Es wird versucht, eine Position an der Probenoberfläche zu finden, welche eine aussagekräftige Berechnung der Schubspannung ermöglicht.

Folgende Randbedingungen müssen berücksichtigt werden:

- mittlere Ablesehöhe von 1,4mm
- Berücksichtigung der Glanzstellen
- Berücksichtigung von lokalen Störungen
- Aussparung von interpolierten Bereichen

Abbildung 5.12 zeigt die Positionswahl unter Einhaltung der Randbedingungen anhand eines praktischen Beispiels:

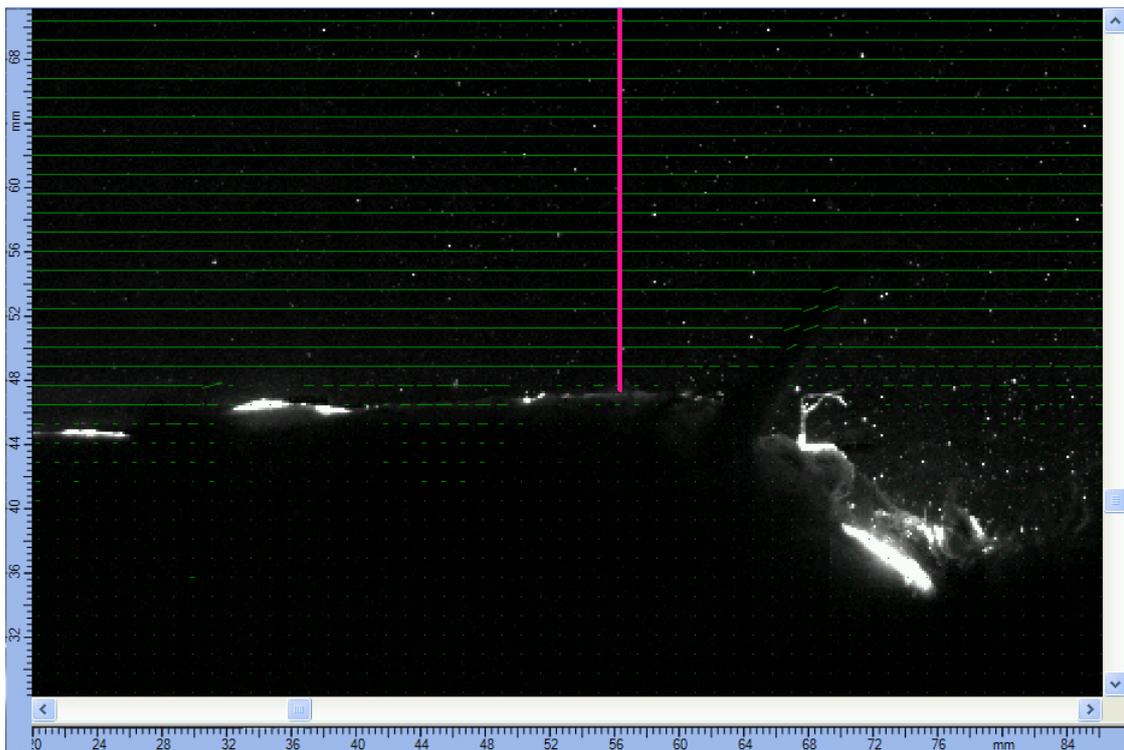


Abbildung 5.12: Auswahl der Position anhand der Randbedingungen

Dargestellt ist die erodierte Probenoberfläche mit dem darüberliegenden Partikelstrom. Darin sind die Geschwindigkeitsvektoren sichtbar. Aufgrund der sehr geringen vertikalen Strömung erscheinen diese Linienförmig. Die rote Linie stellt die Position der Schubspannungsermittlung dar. Rechts dieser Linie bei Position 68, ist ein Ast als lokale Störung zu sehen. Wegen der hier auftretenden Wirbelströmung weisen die Vektoren eine vertikale Komponente auf. Links zu Beginn des Bildes sowie zwischen Position 32 und 36 sind Glanzstellen ersichtlich. Die restlichen Bereiche in der linken Bildhälfte können aufgrund der Eintiefungen (interpolierte Vektoren) nicht gewählt werden. Ebenso wenig ist der rechte Bildbereich ab Position 68 geeignet, da hier eine massive Eintiefung zufolge der Erosion vorliegt. Die einzige Möglichkeit für eine Berechnung besteht somit bei Position 56.

5.2.4 Ermittlung der kritischen Schubspannung

Bei einer Analyse der Erosionsbilder in Kapitel 4.3.3 erkennt man, dass die Erosion bei einem Durchfluss von rund 73 l/s beginnt. Eine Probe weist davor schon Ablösungen auf, bei zwei weiteren sind dafür höhere Schubspannungen notwendig. Die Bilder zeigen auch, dass sich diese beginnende Erosion rasch ausweitet und zu einer Massenerosion führt.

Die Schubspannung ermittelt sich somit unter Verwendung von Formel 5.2 auf Seite 46. In Tabelle 5.5 ist die Zusammenstellung der Schubspannungen für die sechs Versuchsreihen ersichtlich.

Tabelle 5.5: Schubspannungen für $Q=73$ l/s und 93 l/s

Q = 73 l/s			Q = 93 l/s		
Probe	h [mm]	τ [N/m ²]	Probe	h [mm]	τ [N/m ²]
1	1,7	10,5	1	1,8	12,2
2	1,0	5,3	2	1,0	6,6
3	1,8	2,8	3	0,6	5,8
4	1,3	4,7	4	0,6	7,1
5	0,6	4,0	5	1,4	9,1
6	0,6	1,7			
Mittel	1,2	4,8	Mittel	1,1	8,2

Es zeigt sich, dass die Einzelwerte der Höhe als auch der Schubspannung trotz Einhaltung der Randbedingungen stark variieren. Die Mittelwertbildung liefert jedoch plausible Werte.

Für den Beginn der Erosion ermittelt sich der Wert von

$$4,8 \pm 3,0 \text{ N/m}^2.$$

Der Wert der kritischen Schubspannung für die Massenerosion liegt bei

$$8,2 \pm 2,5 \text{ N/m}^2.$$

5.2.5 Auswertung der Messergebnisse aus der Drehflügelmessung

Von den in Kapitel 3.2.2 gewonnenen Ergebnissen lassen sich die Werte τ_{peak} der Tiefe 5-10 cm mit der kritischen Schubspannung in Beziehung bringen. Die oberste Schicht besteht aus wenig gefestigten Sedimenten und wird bei geringeren Schubspannungen gelöst.

Da die Entnahme der ersten 5 Proben an Punkt 92 erfolgte, werden gemäß Tabelle 3.2 (Seite 21) sowie Tabelle 3.3 (Seite 22) die dort ermittelten Werte herangezogen ($15,8 \text{ KN/m}^2$ beziehungsweise $15,6 \text{ KN/m}^2$).

Wenn nun Massenerosion bei einer kritischen Schubspannung von $8,2 \pm 2,5 \text{ N/m}^2$ auftritt, lässt sich die Aussage treffen, dass dieser Wert in Beziehung mit den im Mittel $15,7 \text{ KN/m}^2$ betragenen Werten der Drehflügelmessung steht. Der Unterschied in der Größenordnung erklärt sich durch die Art der Beanspruchung des Sediments. Es bedarf wenig Einwirkung um ein Sediment Schicht für Schicht abzutragen. Erfolgt die Scherbeanspruchung entlang einer Ebene innerhalb eines Körpers, baut sich ein deutlich höherer Widerstand auf.

Wird vor Ort mit der Drehflügelsonde nun dieser Wert erreicht, kann davon ausgegangen werden, dass mit Massenerosion zu rechnen ist.

Da die Werte für $\tau_{residual}$ durchwegs geringer sind, wird gelockertes Sediment, solange die Schubspannung nicht wesentlich unterschritten wird, nicht mehr anlanden. Für die restlichen Punkte gilt, dass mit einer Ausnahme (Punkt 95) überall Massenerosion auftreten würde. Die gemessenen Schubspannungen in der Tiefe weisen zufolge der Überdeckung höhere Werte auf. Wird diese im Laufe des Erosionsprozesses abgetragen sinken die Werte auf das oben genannte Maß ab.

Es ist somit möglich, die während der Versuchsreihen gemessenen Werte mit den vor Ort ermittelten in Beziehung zu setzen.

6 Zusammenfassung

Die Arbeit befasst sich mit der Frage nach der erforderlichen kritischen Schubspannung um an bindigen Böden eine Massenerosion hervorzurufen. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge konnte diese Fragestellung nur mittels eines Modellversuches zufriedenstellend beantwortet werden.

Eine Problemstellung war, die Versuchsparameter so zu wählen, dass die Messergebnisse den vor Ort auftretenden Werten entsprechen. Erreicht wurde dies mittels einer Abschätzung sowie durch den Vergleich mit einem hydraulischen Modell.

Weiters beeinflusst die Auswahl und Entnahme der Probe die späteren Ergebnisse. Durch die Entnahme mittels eines Ausstechzylinders konnte die Probe möglichst ungestört entnommen werden. Die Art des Einbaus musste die Situation vor Ort widerspiegeln, jedoch auch eine Reproduzierbarkeit gewährleisten. Der Einbau in eine Box in Verbindung mit einer Zementdeckschicht stellte dies sicher.

Durch die Messung mit dem System PIV konnte eine Aussage über die auftretenden Schubspannungen bis knapp über die Probenoberfläche ($\sim 1,4\text{mm}$) getätigt werden. Andere Messsysteme erfassen diesen relevanten Bereich nicht. Es zeigte sich, dass die Qualität der PIV-Messung vom verwendeten Material (reflektierende Bestandteile), der Positionierung der Messkomponenten sowie der Kalibrierung abhängig ist. Die Auswertung der ermittelten Schubspannung zeigt eine hohe Schwankung der Werte in Abhängigkeit der Messposition. Dies führt zu dem Erkenntnis, dass einzelne Werte eine geringe Aussagekraft besitzen. Erst die Ermittlung einer Schubspannungsverteilung entlang der Probe beziehungsweise die Ermittlung an mehreren Proben lieferte plausible Werte.

Der Beginn der Massenerosion konnte mittels Beobachtung der Probe während des Versuches festgestellt werden. Es zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Konsistenz sowie einer Schichtung der Probe.

Als Ergebnis ermittelt sich für den Beginn der Erosion der Wert von

$$4,8 \pm 3,0 \text{ N/m}^2.$$

Der Wert der kritischen Schubspannung für die Massenerosion liegt bei

$$\mathbf{8,2} \pm 2,5 \text{ N/m}^2.$$

Die Messung mit der Drehflügelsonde liefert aussagekräftige Ergebnisse. Wird ein Wert von rund $15,7 \text{ KN/m}^2$ erreicht, kann in diesem Bereich davon ausgegangen werden, dass Massenerosion auftritt. Liegen andere Bodenverhältnisse vor sind weiterführende Untersuchungen nötig.

A Anhang

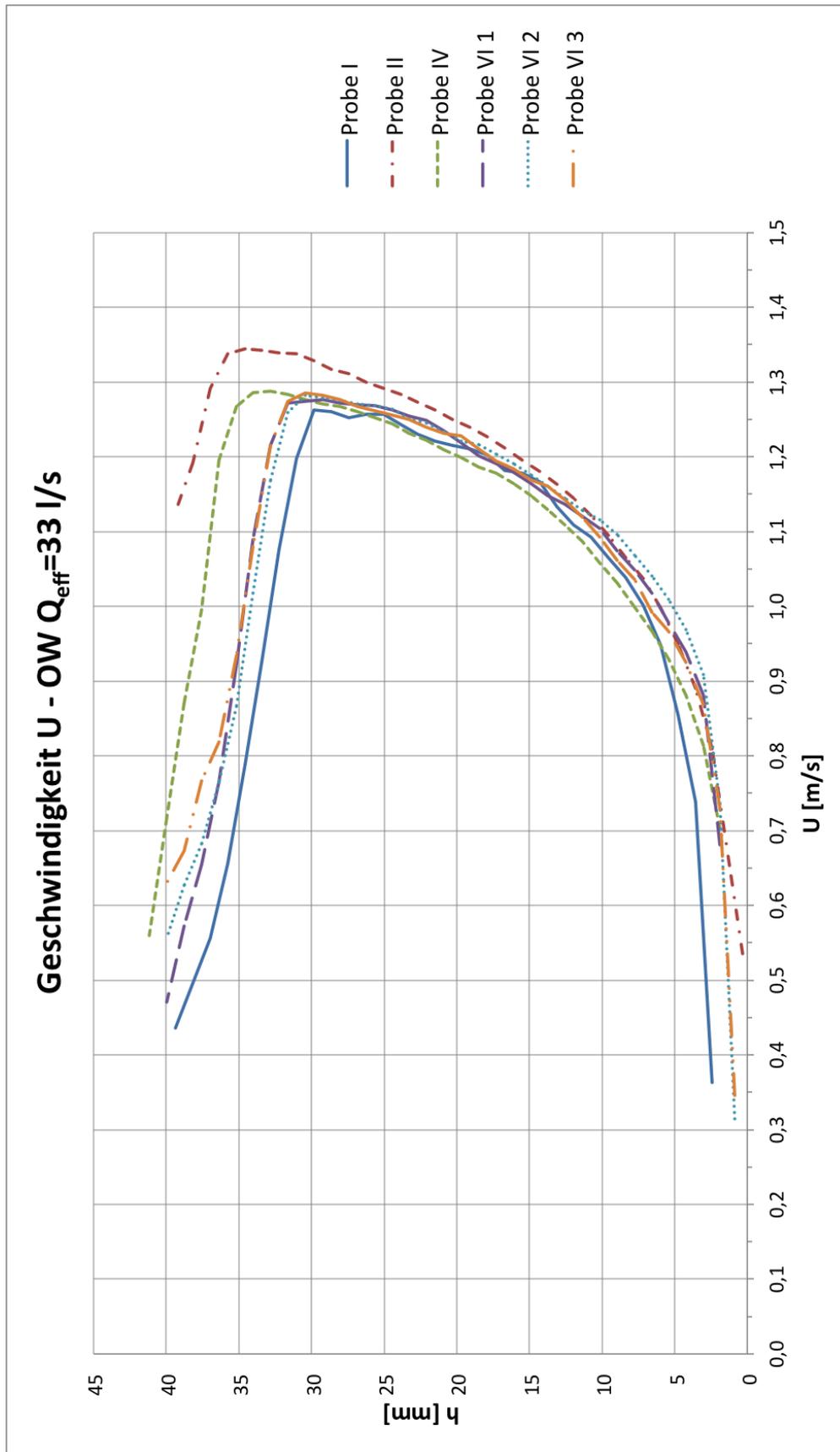


Abbildung A.1: Geschwindigkeit U - OW $Q=33 \text{ l/s}$

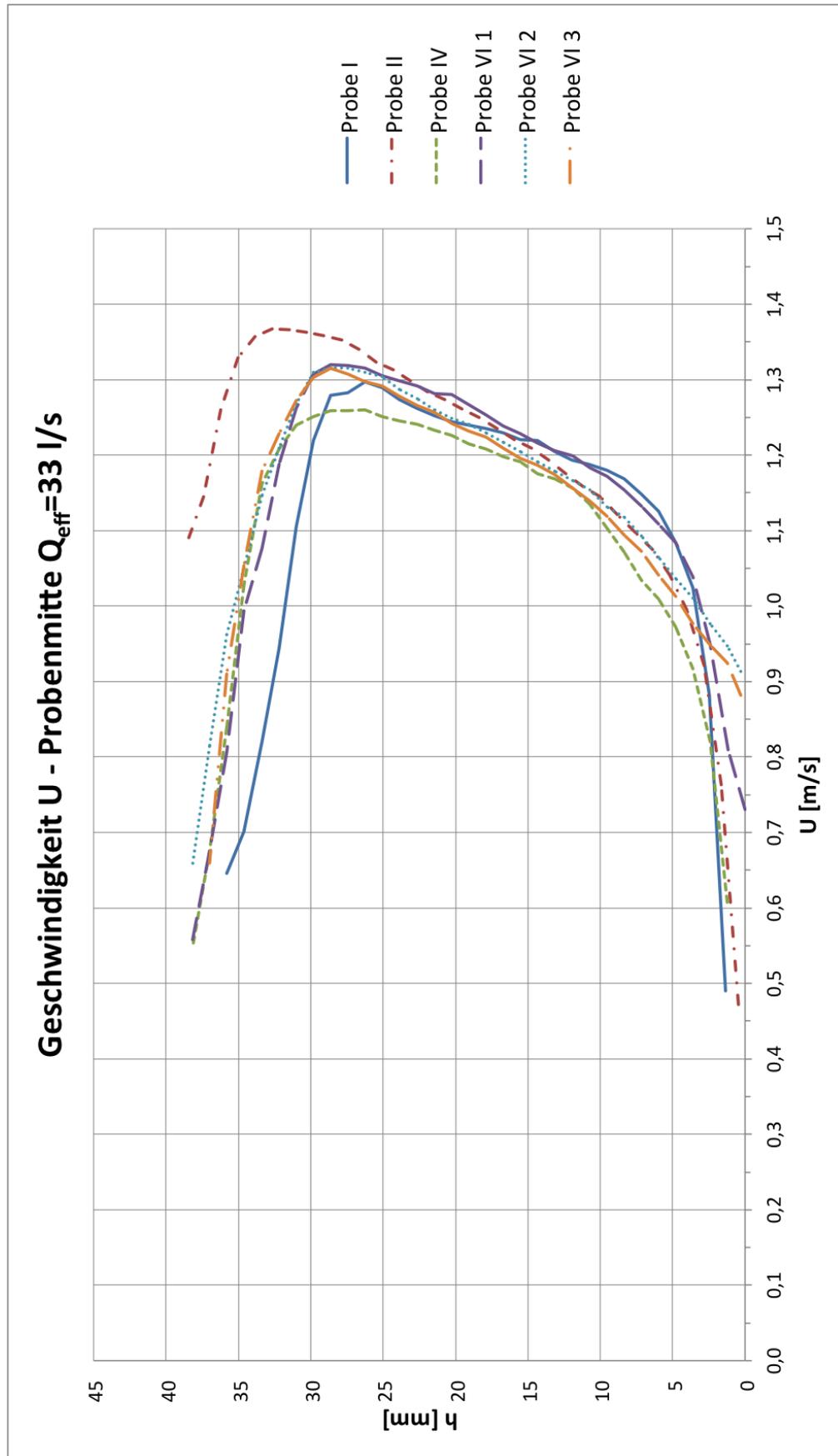


Abbildung A.2: Geschwindigkeit U - Probenmitte $Q=33$ l/s

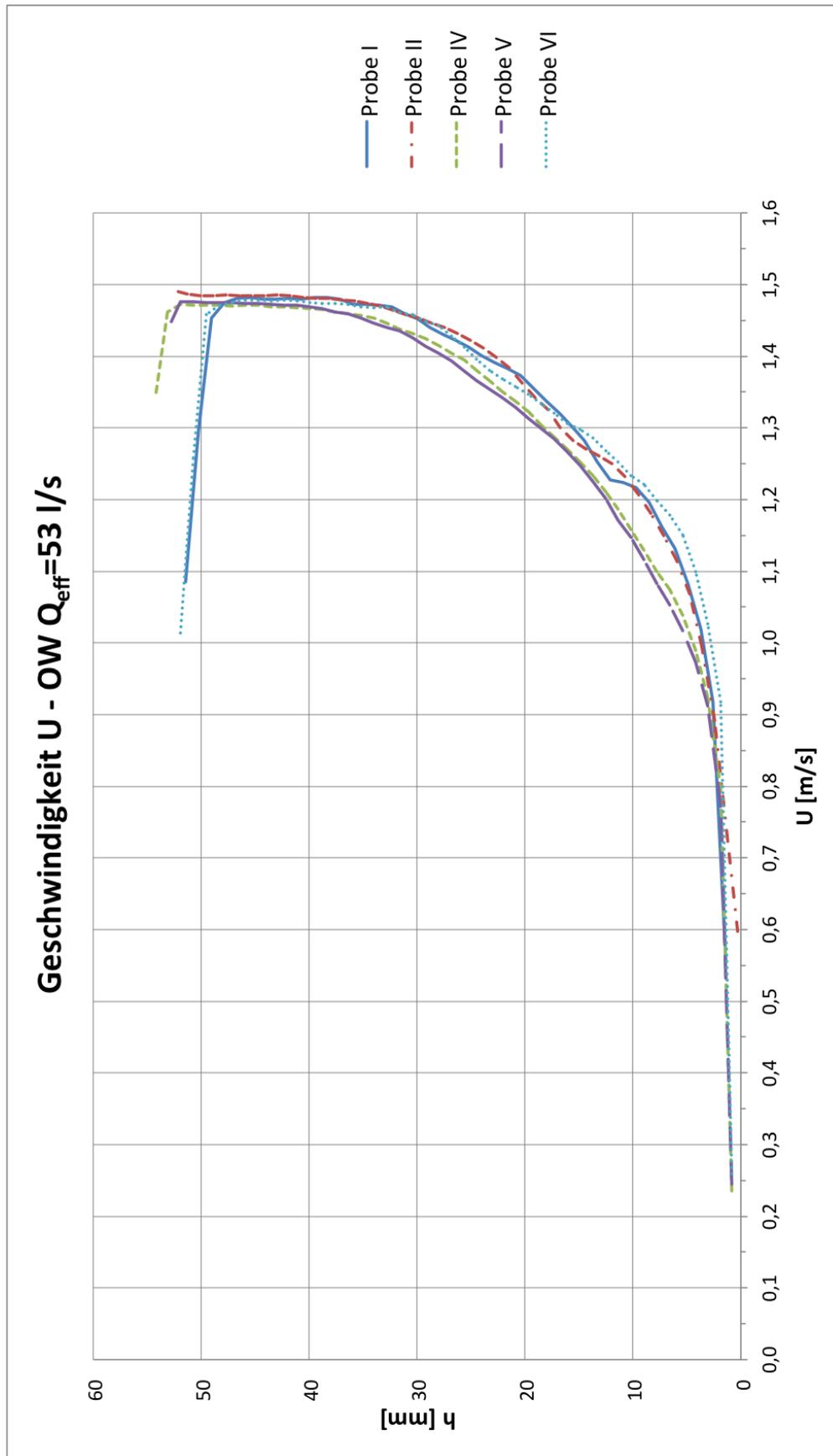


Abbildung A.3: Geschwindigkeit U - OW $Q=53$ l/s

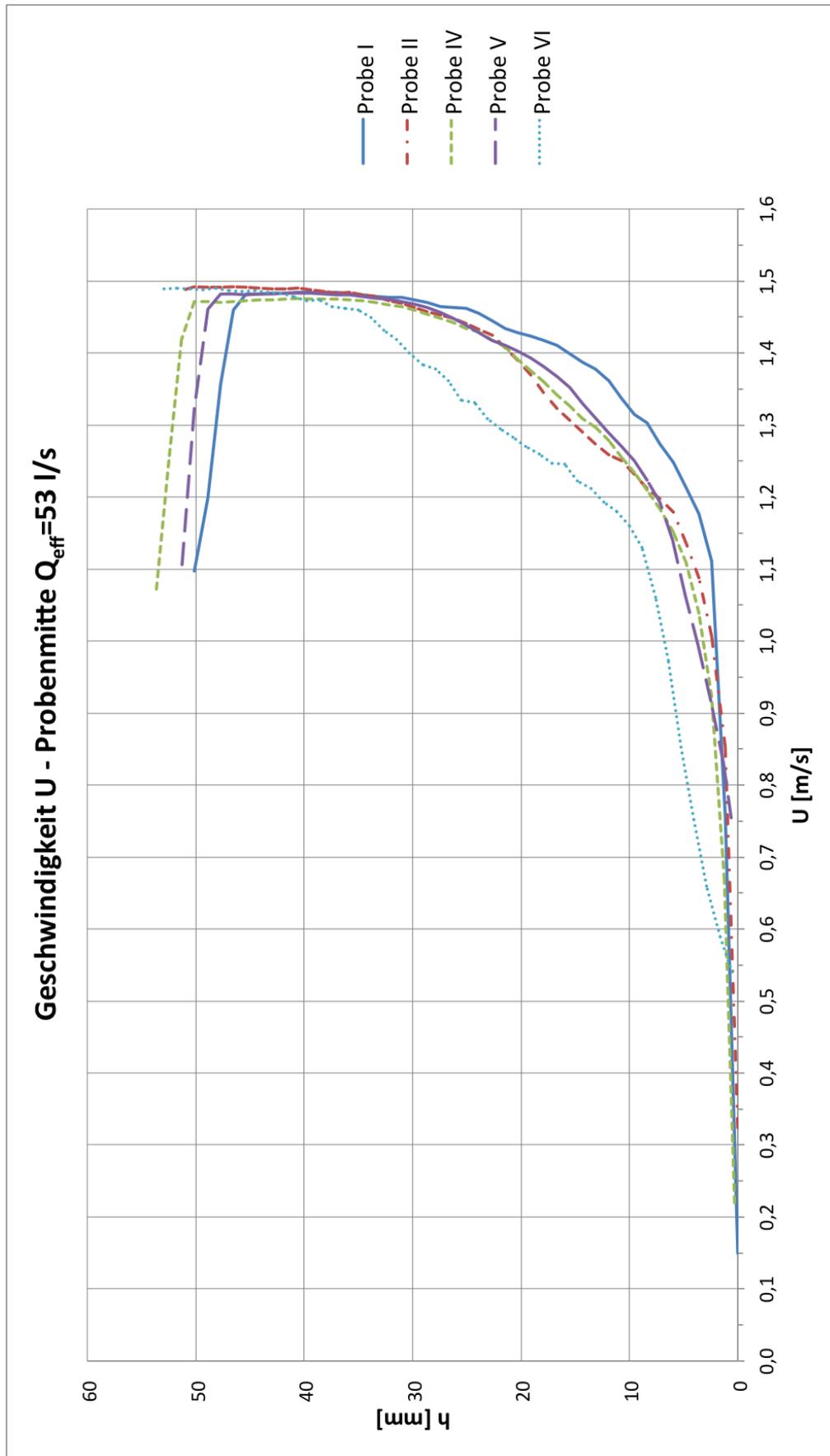


Abbildung A.4: Geschwindigkeit U - Probenmitte $Q=53$ l/s

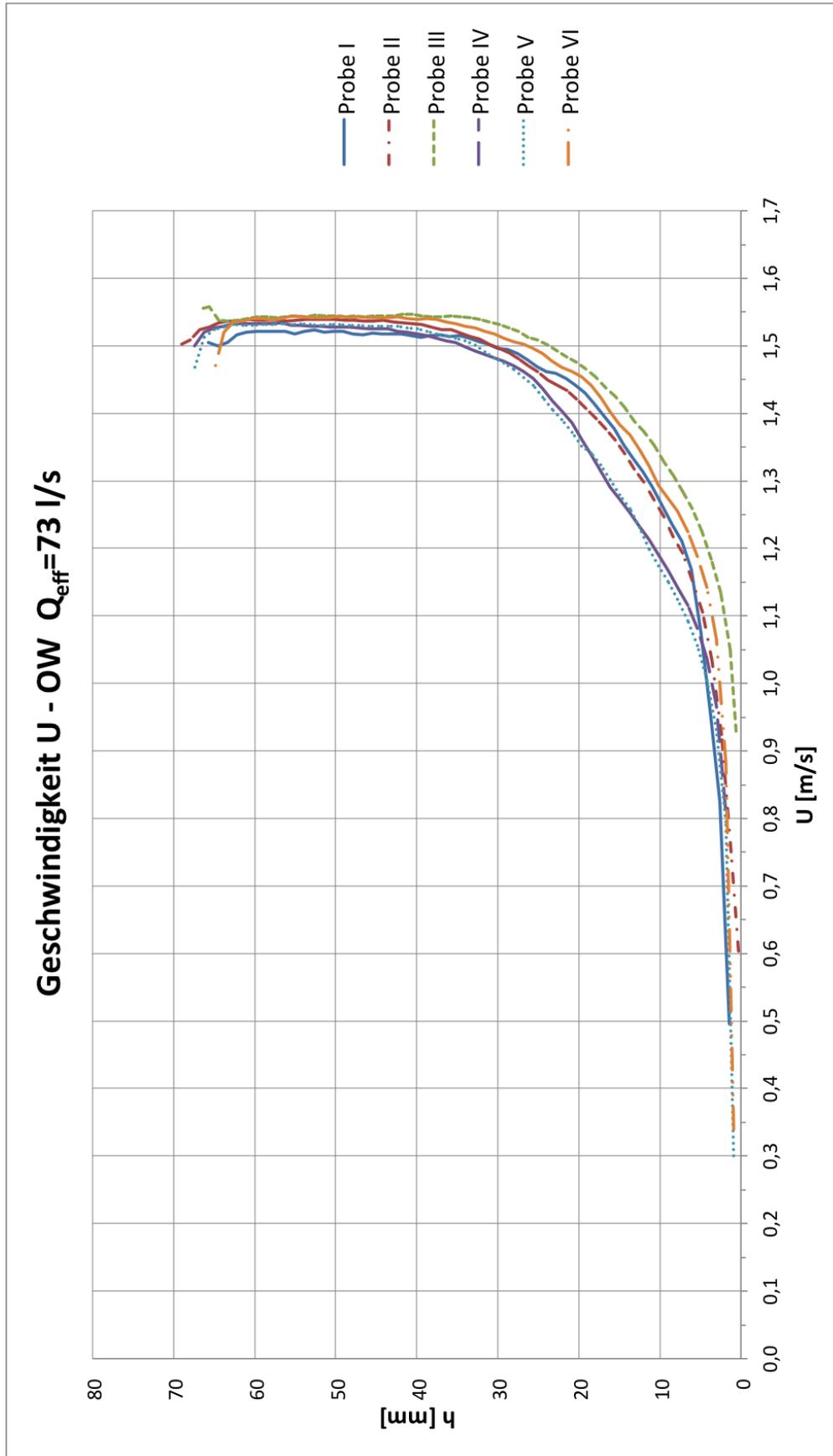


Abbildung A.5: Geschwindigkeit U - OW $Q=73 \text{ l/s}$

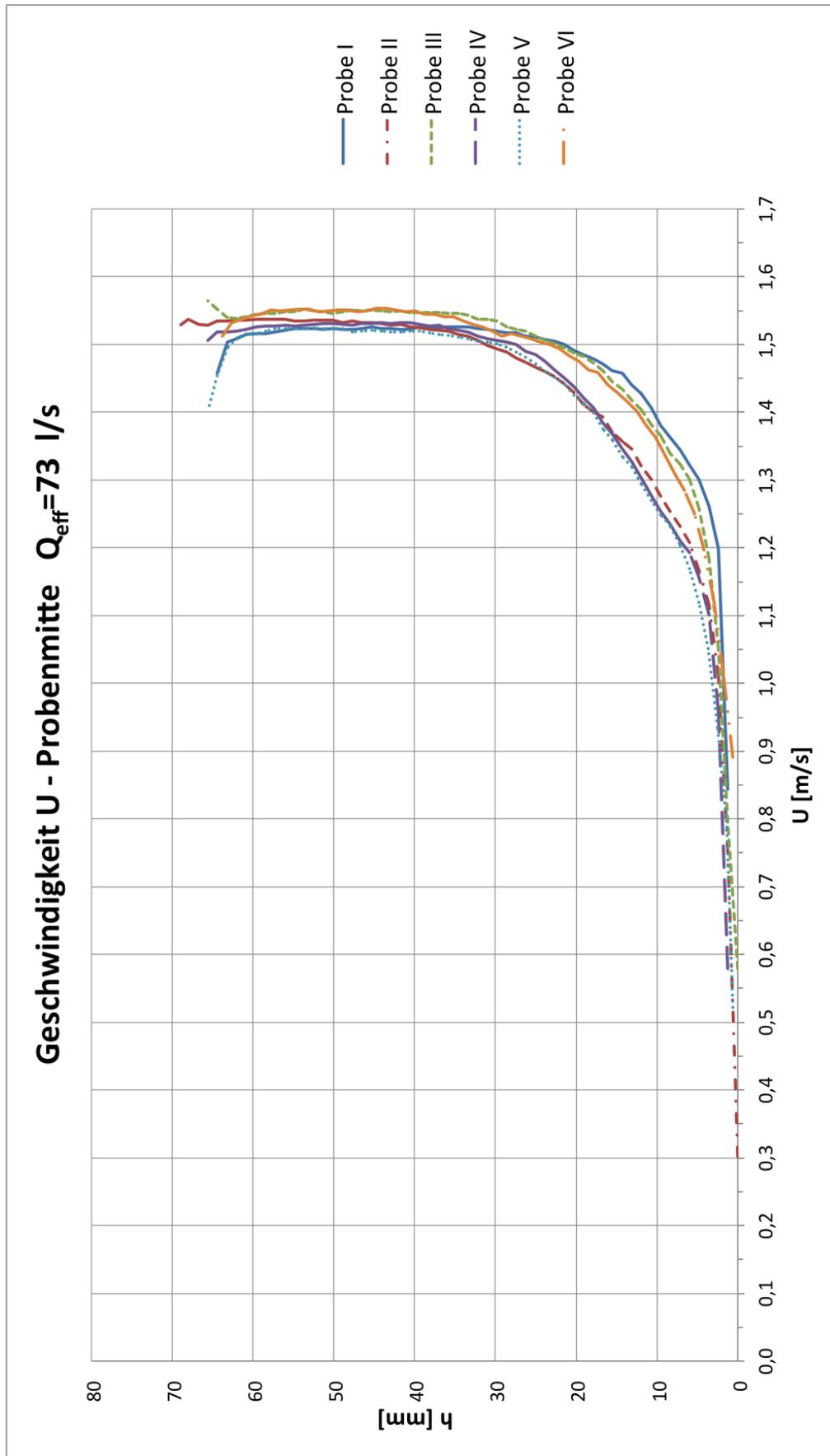
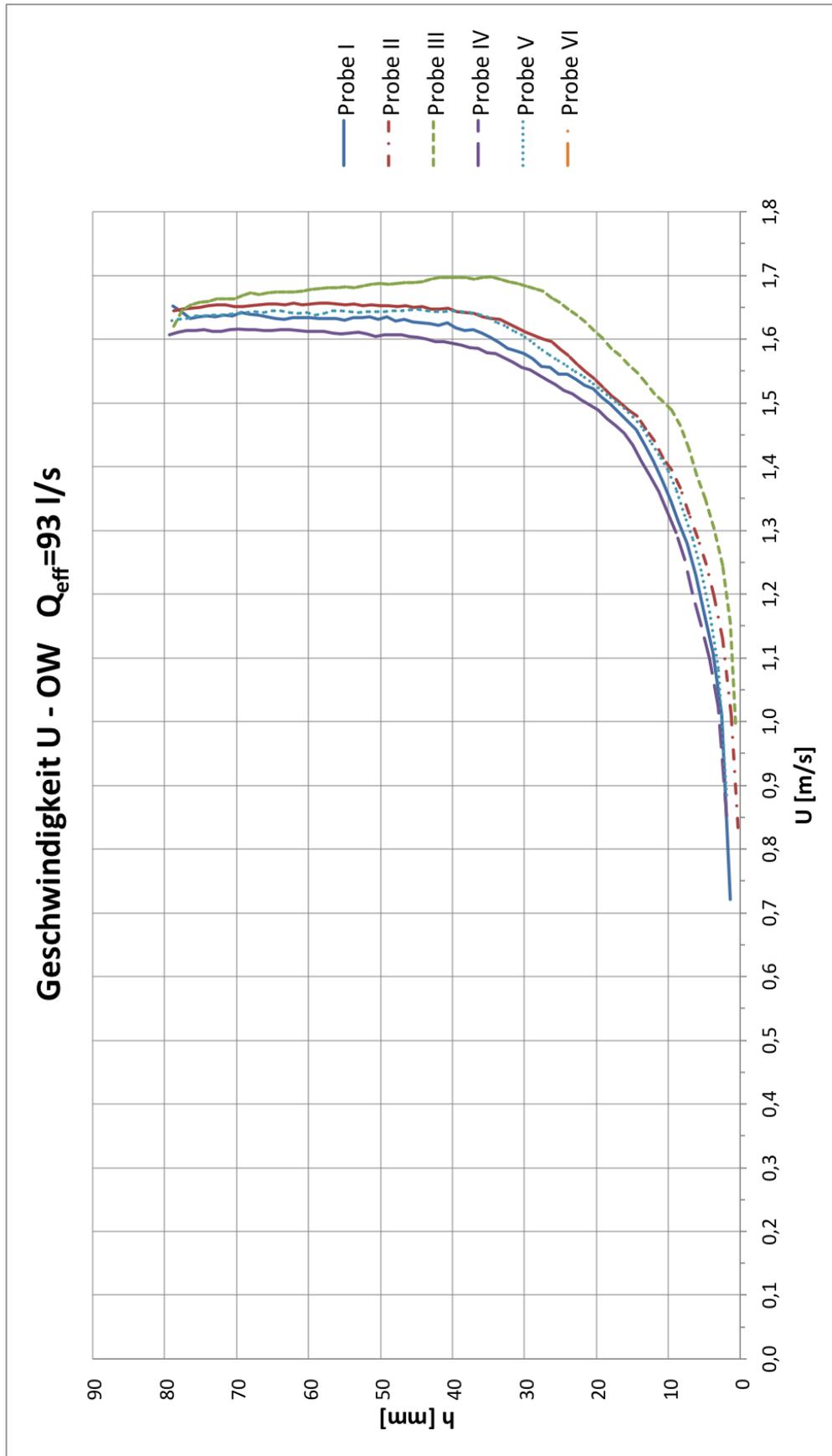


Abbildung A.6: Geschwindigkeit U - Probenmitte $Q=73$ l/s

Abbildung A.7: Geschwindigkeit U - OW $Q=93 \text{ l/s}$

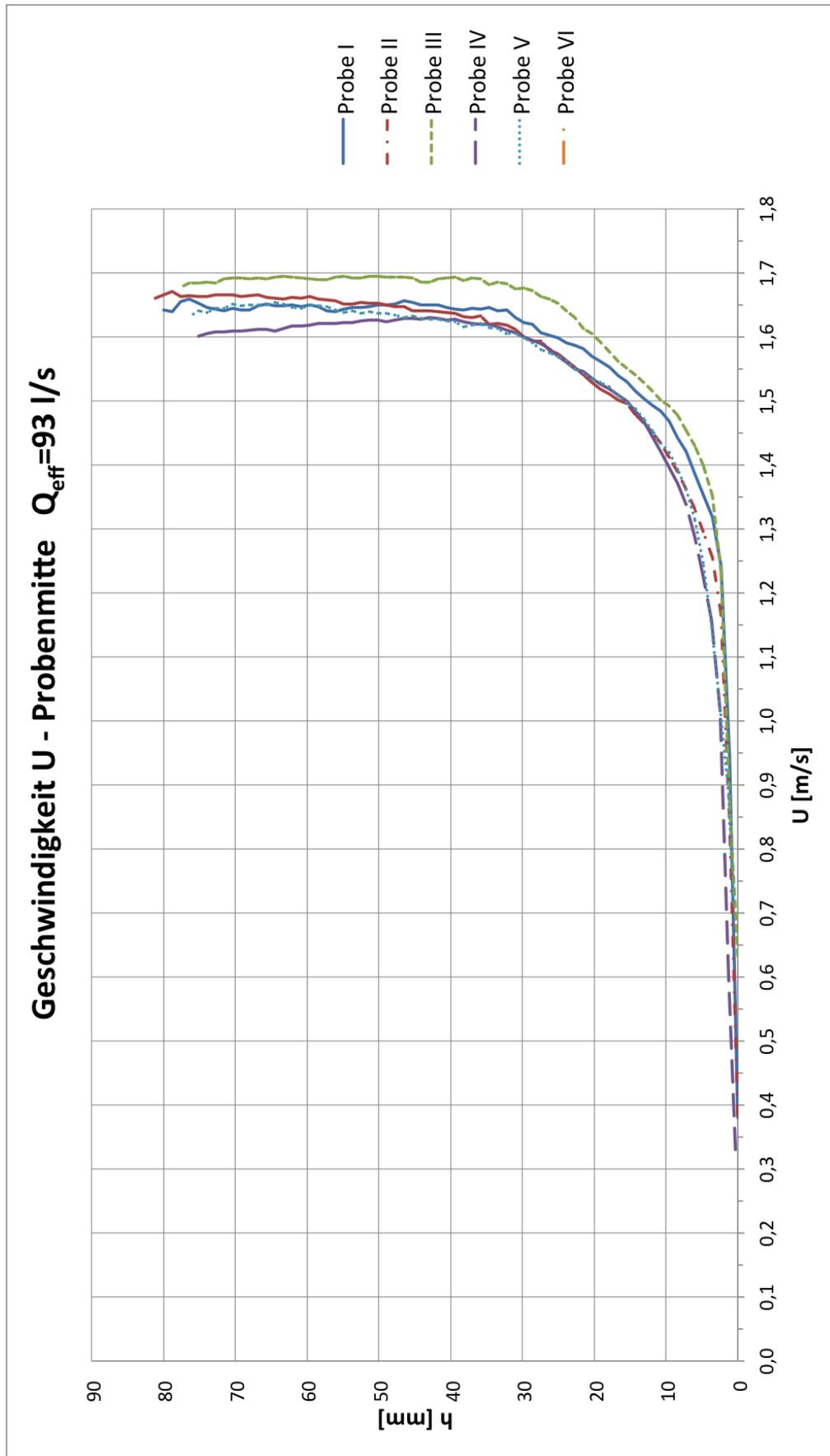


Abbildung A.8: Geschwindigkeit U - Probenmitte $Q=93$ l/s

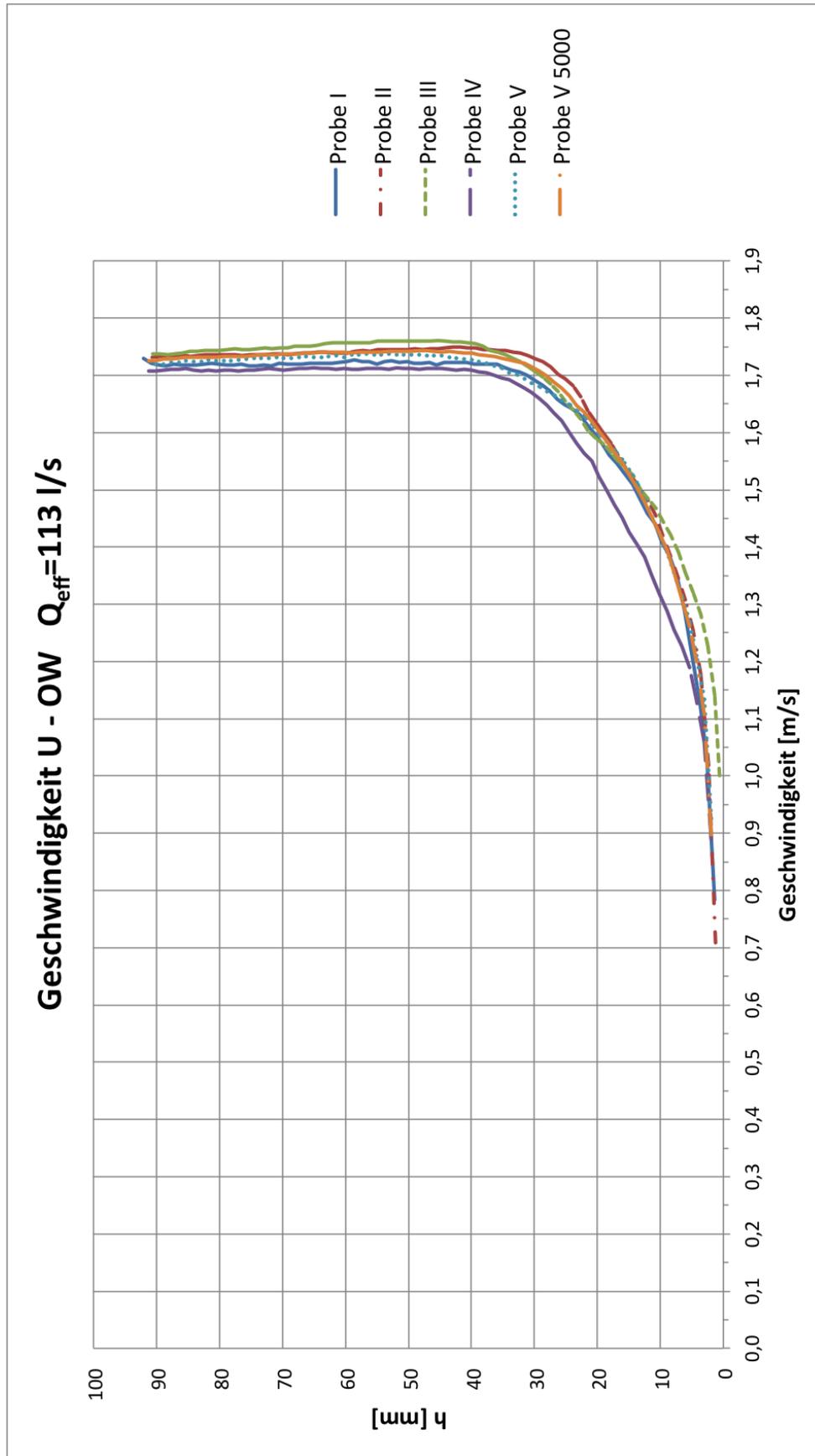


Abbildung A.9: Geschwindigkeit U - OW $Q=113 \text{ l/s}$

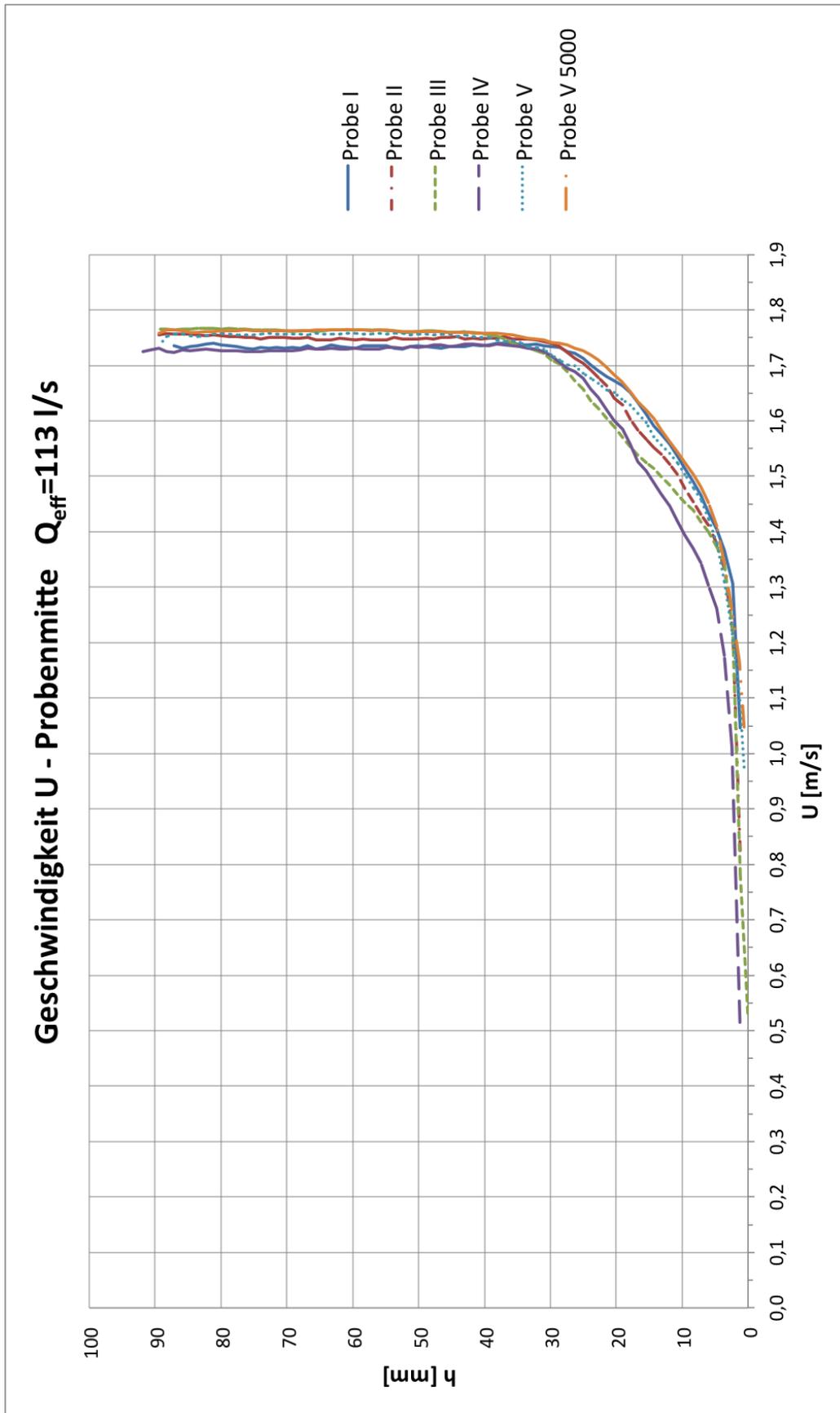


Abbildung A.10: Geschwindigkeit U - Probenmitte $Q=113$ l/s

B Anhang

Stauraum Zlatten Schluff

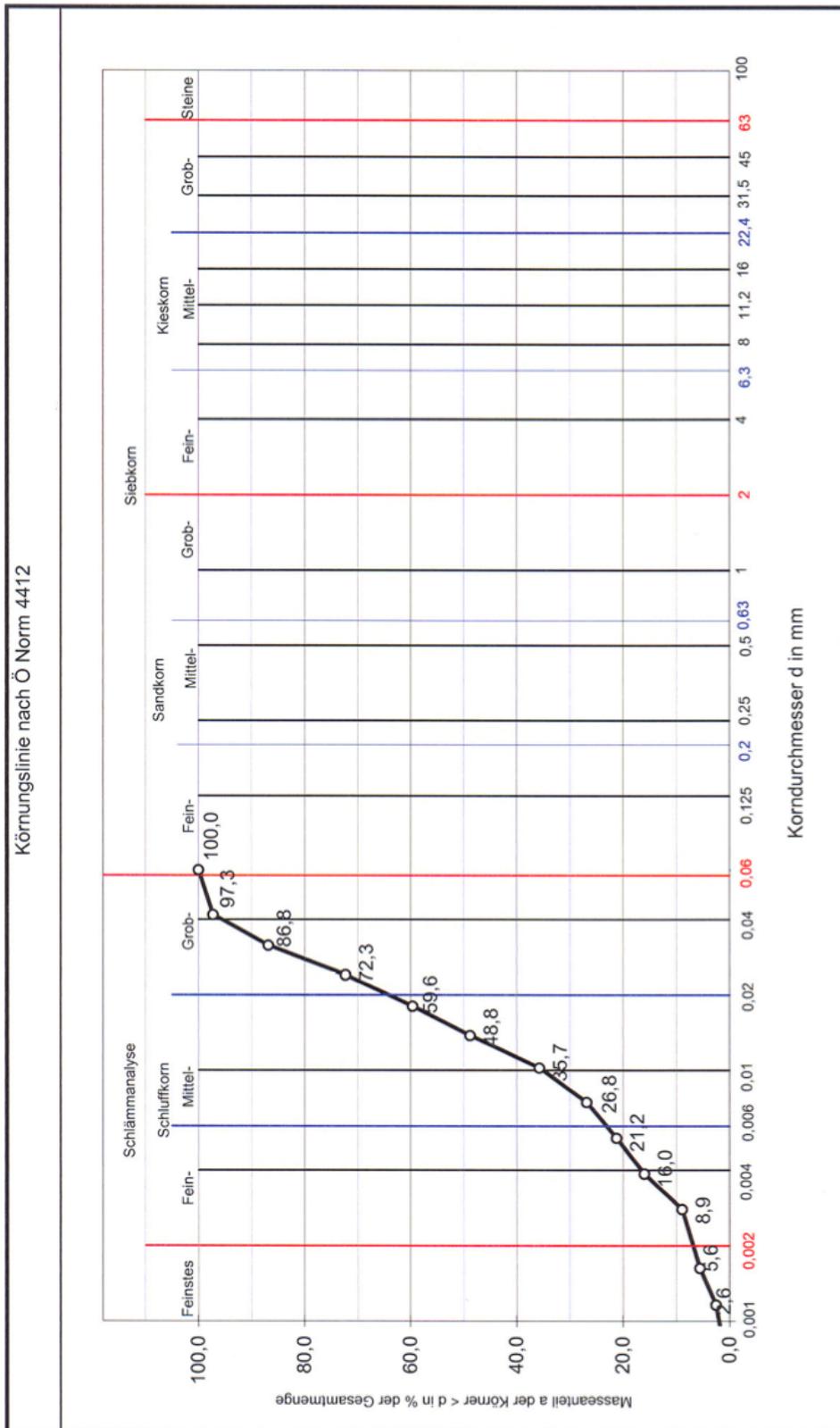


Abbildung B.1: Sedimentuntersuchung Stauraum Zlatten - Schluff (VERBUND 2011, S.10)

Abbildungsverzeichnis

1.1	Stauraum Zlatten	2
2.1	Beginn der Geschiebebewegung	7
2.2	Herleitung der Fließformel	9
2.3	Beiwerte nach Strickler	11
2.4	Verteilung der Schubspannungen	12
3.1	Drehflügelsonde H60	17
3.2	Scherspannungs - Weg - Diagramm	18
3.3	Messpunkte vom 19.4.2011	19
3.4	Praktischer Messvorgang	20
4.1	Probenentnahme	24
4.2	Herleitung des Randeffekts	26
4.3	Abschätzung der Schubspannung	27
4.4	Abschätzung der mittleren Geschwindigkeit	28
4.5	Prinzipskizze Glasgerinne	29
4.6	Einbau der Probe	31
4.7	Skizze Messsystem	32
4.8	Erosion an gestörter Probe	33
4.9	Kolksicherung	34
4.10	Beispiel eines kalibrierten Bildes	35
4.11	Auswirkung der Bildermenge	37
4.12	Versuchsreihe 3	38
4.13	Versuchsreihe 4	39
4.14	Versuchsreihe 5	39
4.15	Versuchsreihe 6	40
5.1	Ausschnitt Dynamic Studio	42
5.2	Graphik Geschwindigkeit U	44
5.3	Profile Plot Geschwindigkeit U	45
5.4	Profile Plot Standardabweichung U & V	46
5.5	Schubspannung über die Höhe	47

5.6	Grafischer Vergleich der Höhen	49
5.7	Einbaufehler der Kamera	49
5.8	Rasterfeld	52
5.9	Schubspannungsverteilung Probe 2	53
5.10	Schubspannungsverteilung Probe 4	54
5.11	Schubspannungsverteilung Probe 2 modifiziert	55
5.12	Einhaltung der Randbedingungen	56
A.1	Geschwindigkeit U - OW Q=33 l/s	62
A.2	Geschwindigkeit U - Probenmitte Q=33 l/s	63
A.3	Geschwindigkeit U - OW Q=53 l/s	64
A.4	Geschwindigkeit U - Probenmitte Q=53 l/s	65
A.5	Geschwindigkeit U - OW Q=73 l/s	66
A.6	Geschwindigkeit U - Probenmitte Q=73 l/s	67
A.7	Geschwindigkeit U - OW Q=93 l/s	68
A.8	Geschwindigkeit U - Probenmitte Q=93 l/s	69
A.9	Geschwindigkeit U - OW Q=113 l/s	70
A.10	Geschwindigkeit U - Probenmitte Q=113 l/s	71
B.1	Sedimentuntersuchung Zlatten	73

Tabellenverzeichnis

3.1	Faktoren Drehflügelsonde	18
3.2	Auswertung der ersten Messreihe	21
3.3	Auswertung der zweiten Messreihe	22
4.1	Zeitlicher Versuchsablauf	37
5.1	Übersicht Messergebnisse	47
5.2	Vergleich der Höhen	48
5.3	Mittlere Geschwindigkeiten	51
5.4	Schubspannung für $Q=113$ l/s	52
5.5	Schubspannungen für $Q=73$ l/s und 93 l/s	57

Literaturverzeichnis

- [1] Gerhard Bollrich. *Technische Hydromechanik , Band 1.* VEB Verlag fuer Bauwesen Berlin ISBN 3-345-00518-2, 1992.
- [2] Dynamics Dantec. *Users & Installation Guide Dynamic Studio.* Dantec Dynamics A/S, Denmark, 2008.
- [3] Wilhelm Gehrig. *Über die Frage der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen.* Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau an der Technischen Hochschule Hannover, Heft 29, 1967.
- [4] Günther Heigerth. *Hydromechanik und Hydraulik.* Skriptum, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, WS 2006/07, 1974.
- [5] F. Hjulström. *Studies of the Morphological Activity of Rivers as illustrated by the River Fyris.* Institute of the University of Upsala, 1935.
- [6] Rajesh Jain and Umesh Kothiyari. Influence of cohesion on suspended load transport of non-uniform sediments. *Journal of Hydraulic Research Vol. 48, No1 pp33-43*, 2010.
- [7] O. Kirschmer. *Tabellen zur Berechnung von Entwässerungsleitungen n. Prandtl-Colebrook.* Dr.Lüdecke Verlagsgesellschaft m.b.H. Hamburg ISBN 3-88001-004-8, 1974.
- [8] Umesh Kothiyari and Rajesh Jain. Erosion characteristics of cohesive sediment mixtures. *River Flow 2010 - Dittrich, Koll, Aberle u. Geisenhainer (eds)*, 2010.
- [9] Joachim Mangelsdorff and Karl Scheurmann. *Flussmorphologie - Ein Leitfaden für Naturwissenschaftler und Ingenieure.* Oldenbourg Verlag München ISBN 3-486-23311-4, 1980.
- [10] Robert Rössert. *Hydraulik im Wasserbau.* Oldenbourg Verlag ISBN 3-486-26218-1, 1994.
- [11] Hans-Henning Schmidt. *Grundlagen der Geotechnik.* B.G Teubner Stuttgart, 2. Auflage ISBN 3-519-15019-0, 2001.

- [12] Ralph Schröder. *Technische Hydraulik - Kompendium für den Wasserbau*. Springer Verlag ISBN 3-540-00060-7, Institut für Wasserbau - Technische Hochschule Darmstadt, 2004.
- [13] W.E Schulze and Konrad Simmer. *Grundbau Teil1 - Bodenmechanik und erdstatische Berechnung*. B.G Teubner Stuttgart, 15. Auflage ISBN 3-519-05231-8, 1974.
- [14] Ulrich Smoltczyk. *Grundbau Taschenbuch*. Ernst und Sohn, 2. Auflage ISBN 978-3-433-01845-3, 2009.
- [15] Verbund GmbH. *Sedimentanalysen - Stauraum Zlatten*. VERBUND-Umwelttechnik GmbH, 2011.
- [16] Ulrich Zanke. *Grundlagen der Sedimentbewegung*. Springer Verlag ISBN 0-387-11672-9, 1982.