

Diploma Thesis

Flume study of the hydraulic load on bridge piers due to debris jamming

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Laborversuche zur Strömungskraft auf Brückenpfeiler mit Verklausungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Anna Stifter, BSc

Matr.Nr.: 01209563

unter der Anleitung von

Hauptbetreuer: Univ.-Prof. ir. PhD **Koen Blanckaert**

Co-Betreuer: Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Ingo Schnauder**

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Forschungsbereich Wasserbau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/E222-1, A-1040 Wien

Wien, Juni 2023



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während des Studiums unterstützt haben und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

In erster Linie möchte ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr.techn. Ingo Schnauder bedanken, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist und immer eine gute Idee parat hat.

Danke auch an die Mitarbeiter des Wasserbaulabors für die Unterstützung bei der Umsetzung der Versuche im Labor und die geselligen Mittagspausen. Mein Dank gilt auch allen anderen Mitarbeiter des Institutes für Wasserbau und Ingenieurhydrologie - Forschungsbereich Wasserbau, die mich freundlich aufgenommen haben.

Außerdem bedanke ich mich besonders bei Bernhard, bei meiner Familie, bei meinen Freunden und Studienkollegen, die die Studienzeit im und auch abseits vom Hörsaal zu einer unvergesslichen Zeit gemacht haben.

Danke.

Kurzfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurden Laborversuche im Wasserbaulabor der Technischen Universität Wien durchgeführt, um das Verhalten des Strömungswiderstandes von Verklausungen an Brückenpfeilern zu untersuchen.

Dafür wurden Verklausungskörper mit unterschiedlicher Oberflächenrauheit, Porosität und 3D-Form untersucht und anschließend der Widerstandsbeiwert bestimmt. Nach dem Vergleich mit bestehenden Studien wurde der Ansatz gewählt, dass der Widerstandsbeiwert C_w über den blockierten Querschnitt bestimmt wird und der Anteil des Strömungswiderstands vom Brückenpfeiler selbst abgezogen wird, um den Strömungswiderstand rein auf die Verklausung beziehen zu können.

Bei den Versuchen wurde im Vorhinein die Geschwindigkeit gemessen, um die Anströmgeschwindigkeit zu ermitteln. Anschließend erfolgten für alle Verklausungskörper Kraftmessungen mittels Wägezelle und Dehnmessstreifen am Brückenpfeiler. Bei den Kraftmessungen wurden jeweils die Eintauchtiefe sowie die Anströmgeschwindigkeit variiert.

Durch die Ermittlung des Widerstandsbeiwerts auf Basis der Kraftmessungen zeigte sich, dass Körper mit einer rauen Oberfläche größere C_w -Werte aufweisen als Körper mit glatter Oberfläche. Durch die raue Oberfläche befindet sich der Ablösepunkt näher beim Staupunkt und führt zu einer Vergrößerung der Nachlaufzone und damit zu einem größeren Widerstandsbeiwert.

Hinsichtlich der Porosität zeigte sich, dass mit Abnahme der Porosität der C_w -Wert steigt. Bei geringerer Porosität, also mit steigender Dichte, nimmt die Stärke des *bleeding flows* ab und führt somit zu höheren Geschwindigkeitsverlusten, einhergehend mit einem höheren Strömungswiderstand. Besonders interessant und entgegen den Erwartungen zeigte sich hier, dass die undurchlässigen Verklausungskörper einen geringeren Widerstandsbeiwert aufweisen als die durchströmten Körper. Durch den *bleeding flow* erfolgt die Strömungsablösung früher stromaufwärts und führt dadurch zu einer Verbreiterung des Nachlaufs in horizontaler und vertikaler Richtung. Es entstehen größere Geschwindigkeitsverluste und der Widerstandsbeiwert ist dadurch größer.

Betreffend der 3D-Form des Verklausungskörpers weist der zylinderförmige Körper einen höheren Widerstandsbeiwert auf als der kegelförmige Verklausungskörper. Durch seine strömungsgünstigere Form (weniger scharfe Kanten) kommt es später zur Strömungsablösung der Grenzschicht und der Strömungswiderstand ist dadurch geringer.

Abstract

In the course of this work, laboratory tests were performed in the laboratory for hydraulic engineering of the Technical University of Vienna to determine the behaviour of drag due to log jams on bridge piers.

For this purpose, we investigated log jams with different surface roughness, porosity and 3D shape and determined the drag coefficient. After comparisons with existing studies, the approach chosen to determine the drag coefficient C_d was by using the blocked cross section. The drag caused by the bridge pier itself was subtracted to be able to relate the drag purely to the log jam.

Initially the flume velocity was measured to determine the approach velocity. Afterwards, force measurements were taken for all types of log jams using a load cell and strain gauges on the bridge pier. The depth of immersion and the approach velocity were varied for each type as well.

By determining the drag coefficient based on the force measurements, it was shown that log jams with a rough surface have larger C_d values than bodies with a smoother surface. Due to the rough surface, the break-off point is closer to the stagnation point and leads to an enlargement of the wake zone and thus to a larger drag coefficient.

Regarding the porosity, it was found that the C_d value increases with a decrease in porosity. With lower porosity, therefore with increasing density, the strength of the bleeding flow decreases and leads to higher velocity losses resulting in higher drag. It is particularly interesting and contrary to initial expectations that the solid log jams have a lower drag coefficient than the porous bodies. Due to the bleeding flow, the flow separation occurs earlier upstream and thus leads to a widening of the wake in horizontal and vertical direction. This leads to bigger velocity losses and a higher drag coefficient.

In terms of the 3D shape of the log jam, the cylindrical body has a higher drag coefficient than the conical body. Due to its more flow-favourable shape (less sharp edges), the flow separation of the boundary layer occurs later and thus generates a lower drag.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	8
2 Theoretische Grundlagen	10
2.1 Widerstandsgesetz / Widerstandsbeiwert.....	10
2.2 Verklausungen.....	11
3 Laborversuche	14
3.1 Flussbaurinne	14
3.2 Versuchsparameter	19
3.2.1 Hydraulische Parameter	19
3.2.2 Verklausungskörper	21
3.3 Messtechnik.....	25
3.3.1 ADV (Acoustic Doppler Velocimeter).....	25
3.3.2 Wägezelle und Messverstärker	25
3.4 Versuchsdurchführung	26
4 Ergebnisse der Laborversuche	28
4.1 Anströmgeschwindigkeit und Turbulenz.....	28
4.1.1 Querschnittsgemittelte Anströmgeschwindigkeit	28
4.1.2 Lokale Anströmgeschwindigkeit.....	28
4.1.3 Turbulenz.....	31
4.2 Ergebnisse der Kraftmessung	33
4.2.1 Zeitliche Mittelwerte der Kraftmessung	34
4.2.2 Mittelwert, Standardabweichung, sowie Minimal- und Maximalwert der gemessenen Kraft.....	36
4.2.3 Widerstandsbeiwert des Pfeilers	37
4.2.4 Frequenzanalyse der Kraftmessungen	37
4.3 Fehlerabschätzung der Messgrößen	38
5 Berechnungsansätze - Kräfte durch Verklausungen	39
5.1 Anwendung der Berechnungsverfahren.....	39
5.1.1 Methode 1: Berücksichtigung der Anströmgeschwindigkeit als Referenzgeschwindigkeit	40
5.1.2 Methode 2: Berücksichtigung der durchschnittlichen, verengten Strömung als Referenzgeschwindigkeit	42
5.2 Ableitung eines eigenen Berechnungsverfahrens	43
5.2.1 Oberflächenrauheit	48
5.2.2 Porosität.....	50
5.2.3 3D-Form.....	54
6 Zusammenfassung	55
7 Literaturverzeichnis	58
Tabellenverzeichnis	59
Abbildungsverzeichnis	59



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einleitung

Brückenpfeiler stellen eine Verengung des Fließquerschnittes eines Flusses dar und besonders bei Hochwasserereignissen wird vermehrt Totholz angeschwemmt. Dieses kann sich an den Brückenpfeilern ansammeln und den Fließquerschnitt zusätzlich verringern. Solche Verklausungen erhöhen nicht nur das Risiko für Überflutungen, sondern können auch dazu führen, dass die Stabilität der Brückenpfeiler, an denen sich das Schwemmgut ansammelt, gefährdet ist. Durch die Verklausung vergrößert sich die angeströmte Fläche des Brückenpfeilers und führt zu einer erhöhten Strömungskraft auf den Pfeiler, sowie zu einer verstärkten Kolkbildung (Lagasse et al., 2010).



Abbildung 1: Teileinsturz des Mittelpfeiler an dem Lower Ashenbottom Viaduct, Lancashire, UK nach dem Hochwasser im Juni 2002 (Lamb et al., 2017)

In dieser Arbeit wird die Strömungskraft, welche auf Brückenpfeiler mit Verklausungen wirkt, im Rahmen von Laborversuchen untersucht. Dabei werden verschiedene Verklausungskörper mit unterschiedlicher Oberflächenrauheit, Porosität und 3D-Form herangezogen und die Widerstandskraft mittels Wägezelle bestimmt. Im Zuge der Arbeit sollen die Ergebnisse der Kraftmessungen mit bestehenden Berechnungsmethoden verglichen werden, sowie eine neue Berechnungsmethode entwickelt werden. Um eine Abschätzung der Strömungskraft auch auf andere Fälle anwenden zu können, erfolgt eine Standardisierung über den Widerstandsbeiwert C_w .

Wie Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen, können Verklausungskörper sich in Form und Struktur je nach Einzugsgebiet und der dort vorherrschenden Vegetation sehr unterscheiden. Für die Versuche wurden daher Vereinfachungen herangezogen. Die 3D-Form des Verklausungskörper war entweder ein halber zylinderförmiger Körper oder ein halber kegelförmiger Körper. Als Materialien kamen undurchlässiger Dämmstoff, poröse Filtermatten und Kunststoffstäbe zum Einsatz (Kapitel 3.2.2).

Als weitere Vereinfachung wurden alle Versuche mit fester Sohle durchgeführt, um eine Kolkbildung zu vermeiden und sich auf die zuvor genannten Parameter fokussieren zu können.



Abbildung 2: Verklauung am Hammerersteg in Bergheim (AT) (fischachbergheim, 22.05.2019)



Abbildung 3: Verklauung an einer Brücke in Borgo a Mozzano (IT), 2014 (De Cicco et al., 2015)

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Widerstandsgesetz / Widerstandsbeiwert

„Die Strömung eines realen Fluids um einen Körper, [...] erzeugt eine Kraft auf den Körper, den sogenannten Strömungswiderstand.“ (Jirka, 2007). Dieser Widerstand beinhaltet den Reibungswiderstand zufolge der Schubspannungen entlang eines Körpers und den Formwiderstand zufolge der Druckspannungen, welche normal auf den Körper wirken. Die Widerstandskraft F_w ist wie folgt definiert:

$$F_w = C_w \cdot \rho \cdot \frac{V_0^2}{2} \cdot A_p \quad (1)$$

F_w ... Widerstandskraft [N]

C_w ... Widerstandsbeiwert [-]

ρ ... Dichte Wasser [kg/m^3]

V_0 ... Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

A_p ... projizierte, angeströmte Querschnittsfläche [m^2]

C_w ist der dimensionslose Widerstandsbeiwert und hängt von der Körperform, der Reynoldszahl, der Rauheit und der Machzahl ab. Letztere ist jedoch nur für kompressible Medien wie Luft von Bedeutung (Jirka, 2007).

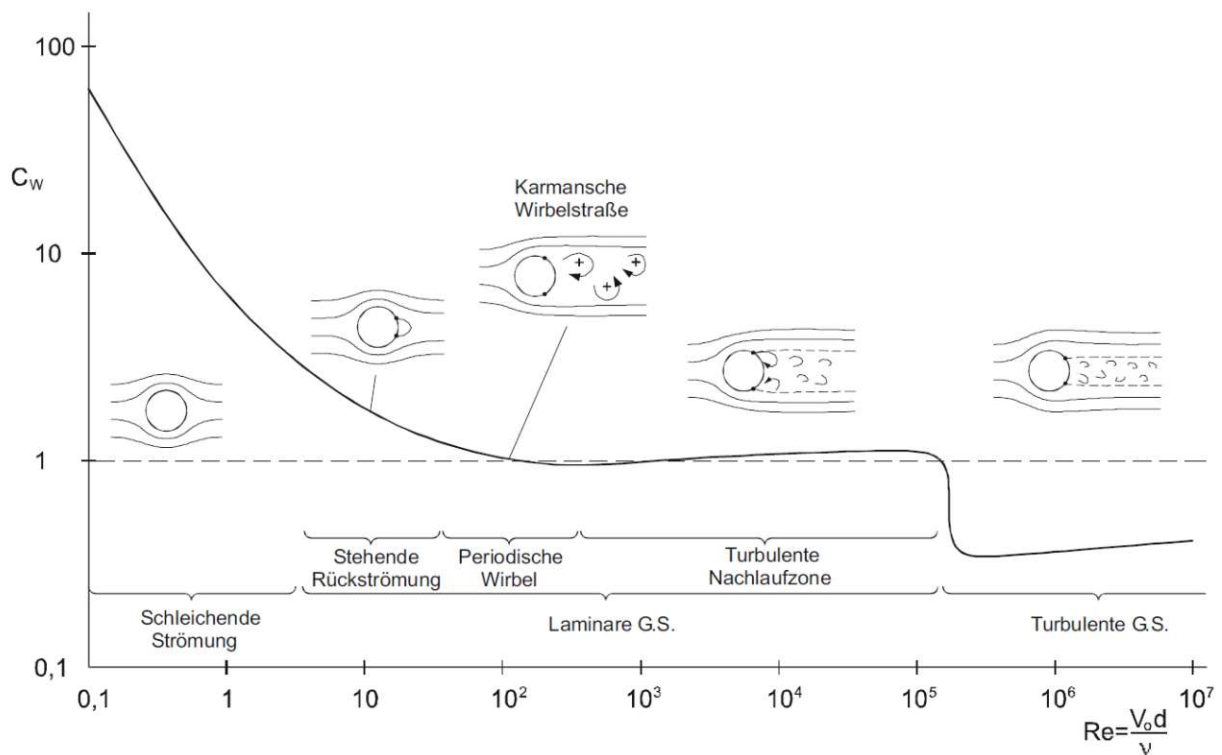


Abbildung 4: Widerstandsbeiwert C_w in Abhängigkeit der Reynoldszahl eines umströmten, glatten Kreiszylinders. (Jirka, 2007)

In Abbildung 4 ist der Verlauf des Widerstandsbeiwerts C_w in Abhängigkeit der Reynoldszahl für den Fall „umströmter Kreiszyylinder“ dargestellt. Für die durchgeführten Versuche befinden wir uns hinsichtlich der Reynoldszahl im Bereich von $10^3 < Re < 10^5$, also im Bereich mit turbulenter Nachlaufzone. „Die laminare G.S. [Grenzschicht] löst sich nahe den Zylinderscheitelpunkten ab. Die Wirbel, die sich in der Nachlaufzone bilden, sind [...] nicht länger stabil und geordnet, [...] [und] zerfallen rapide in eine turbulente Nachlaufströmung [...].“ (Jirka, 2007).

2.2 Verklausungen

Wie bereits eingänglich erwähnt, können Ansammlungen von Totholz an Brückenpfeilern, im Folgenden als Verklausungen bezeichnet, eine Gefahr für die Stabilität einer Brücke darstellen, sowie zu einem erhöhten Risiko von Überflutungen führen (Cantero-Chinchilla, 2018). *Cantero-Chinchilla et al.* stellen in ihrer Arbeit die Form einer Verklausung vereinfacht, in Übereinstimmung mit Feldexperimenten sowie Laborversuchen anderer Forscher zuvor, wie folgt dar:

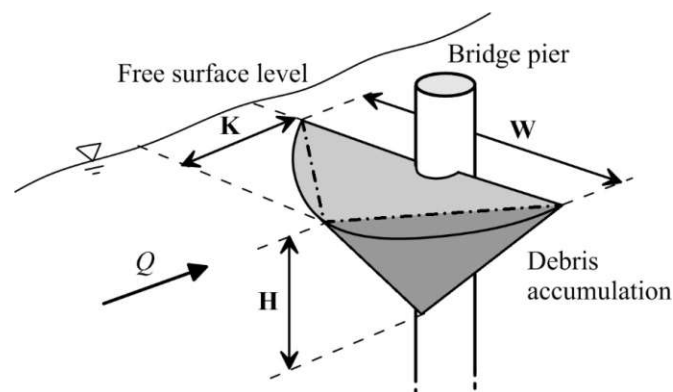


Abbildung 5: Idealisierter, umgedrehter, halbkegelförmiger Modellkörper einer Verklausung an einem einzelnen Brückenpfeiler (Cantero-Chinchilla, 2018)

Idealisiert dargestellt handelt es sich um einen umgedrehten, halbkegelförmigen Modellkörper mit den Abmessungen Breite W , Höhe H und Länge K die wesentlich davon abhängig sind, wie groß die einzelnen Bestandteile der Verklausung sind, welche angeschwemmt werden. Gemäß Formel (1) kann sich die einwirkende Kraft auf die Verklausung und in weiterer Folge auf den Brückenpfeiler, je nach projizierter, angeströmter Querschnittsfläche A_p der Verklausung, deutlich erhöhen (Cantero-Chinchilla, 2018).

Für umströmte Körper mit klarer Geometrie, wie beispielsweise zylinderförmige oder rechteckige Brückenpfeiler, gab es in der Vergangenheit bereits zahlreiche Versuche und der Widerstandsbeiwert lässt sich relativ genau abschätzen. Wie Abbildung 4 nach *Jirka, 2007* zeigt, ist für einen umströmten Zylinder im Reynoldsbereich $10^3 < Re < 10^5$ ein Widerstandsbeiwert von etwa 1,2 zu erwarten.

Verklausungen hingegen können sehr unterschiedliche Geometrien aufweisen und sind in sich inhomogen also haben eine unterschiedliche Oberflächenrauheit, Porosität und 3D-Form. In den Laborversuchen, die im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden, wird der Fokus vor allem auf diesen drei Einflussfaktoren liegen. Besonderes Augenmerk gilt hier dem Einfluss der Porosität.

In vorangegangenen Studien zur Ermittlung des Widerstandsbeiwertes von Totholzverklausungen, zusammengefasst von de Almeida et al., 2018 gemäß Tabelle 1, wurden sehr unterschiedliche Modelle für Verklausungskörper untersucht, sowie zum Teil auch große Bandbreiten für den Widerstandsbeiwert ermittelt.

Parola et al., 2000 haben Versuche mit vertikalen Platten mit verschiedenen Breiten, rauen Kegeln und rauen Keilen an Pfeilern zur Modellierung von Verklausungen betrachtet. Die Bandbreite der Widerstandsbeiwerte ist hier sehr groß mit 0,16 bis 1,9. Interessant ist hier vor allem der Ansatz des blockierten Querschnitts („blockage ratio“), der in Kapitel 5.2 bei der Ableitung eines eigenen Berechnungsverfahrens herangezogen wird.

Ein Paper, in dem auf den Parameter Porosität eingegangen wird, wurde von *Taddei et al., 2016* verfasst. Hier wurden im Windkanal Platten mit einer unterschiedlichen Anzahl von Zylinderstehern aus Kunststoff in einer turbulenten Strömung untersucht, um die Zusammenhänge zwischen dem Widerstandsbeiwert und der Porosität zu verstehen. Mit zunehmender Dichte, also einer Abnahme der Porosität, steigt der Widerstandsbeiwert. Interessant war hier jedoch, dass für den Fall undurchlässiger Körper (Zylinderdichte = 100%) der Wert für den Widerstandsbeiwert nur etwa halb so groß ist, wie der Wert des Körpers mit der maximalen untersuchten Zylinderdichte von rund 24%. Es wurden Widerstandsbeiwerte von 0,29 bis 1,08 ermittelt.

Tabelle 1: Zusammenfassung aus vorangegangenen Studien bezüglich des Widerstandsbeiwerts von Totholzverklausungen (de Almeida et al., 2018)

Reference	Type of study	C_d values	Observations
Apelt (1986) (from Parola et al. 2000)	Experiments with idealised (rectangular perforated prism) models of debris accumulations	1.0~2.0	Results in absence of bridge piers or superstructure models
Wellwood and Fenwick (1990)		1.04	Approach flow velocity defined at mid-height of the debris accumulation
Parola et al. (2000)	Experiments with idealised (vertical plates, roughened cones on piers, roughened wedges) models of debris accumulations, as well as model debris	0.16~1.9	'Contracted' flow velocity used. Values of C_d have been observed to decrease with the blockage ratio (i.e. ratio between obstructed area and the total cross-sectional area)
Panici and de Almeida (2018) University of Southampton	Experiments with model debris (twigs and branches)	0.75~3.0	Most of the results within the narrower band of 1.0~2.5
AASHTO (1998) (from Parola et al. 2000)		0.1~1.8	Defined as a function of the blockage ratio and the Froude number
Shields and Gippel (1995)	Experiments using debris models of polyvinyl chloride (PVC) pipes and wooden dowels	1~2.5	Defined as a function of the blockage ratio and the drag coefficient of a cylinder of infinite length
Ontario Highway Bridge Design Code (1991) from AASHTO (2007)		1.4	Debris lodged against the pier
Draft of the New Zealand Highway Bridge Design Specification, from AASHTO (2007)		0.5	Defined as the drag coefficient of a floating debris accumulation of dimensions (triangular shape): - H = half of the water depth with 3 m maximum, and - W = half the sum of adjacent span lengths with 14 m maximum

3 Laborversuche

Die Versuche wurden in der neuen Versuchshalle des Wasserbaulabors der TU Wien durchgeführt. Für die Modellversuche wurde ein vereinfachter Brückenpfeiler in einer Flussbaurinne installiert und verschiedenen Verklausungen untersucht. In diesem Kapitel wird auf den Versuchsaufbau sowie Versuchsablauf eingegangen, Randbedingungen erläutert und wichtige Versuchsparameter erklärt.

3.1 Flussbaurinne

Die Versuche wurden in einer Flussbaurinne mit einer Länge von etwa 20,0 m und einer Breite von 1,73 m durchgeführt. Die gesamte Rinne steht auf einer hydraulisch angetriebenen Hebebühne und ist dadurch kippbar. Eine Übersicht über die Versuchsrinne zeigt Abbildung 6.



Abbildung 6: Übersicht Versuchsrinne (Aufnahme: Wiesinger L.)

Der Zufluss erfolgte über ein vertikales Rohr von oben in den Oberwasserbehälter der Rinne, wobei das Wasser anhand von zwei Pumpen aus dem Wassertank unterhalb der Laborhalle nach oben gepumpt wird. Der Durchfluss konnte über einen Schieber geregelt werden.



Abbildung 7: Zulaufbedingungen

Um die Strömung im Bereich des Zulaufs zu beruhigen und um gleichmäßige Strömungsverhältnisse zu erhalten, wurden drei Reihen liegende Hochlochziegel über die gesamte Breite der Rinne angeordnet. Zusätzlich wurde eine aufschwimmende Schalttafel aufgehängt, um die Wasseroberfläche zu glätten. Im Anschluss wurde ein etwa 1 m langer Kiesabschnitt (Kies $d \approx 3$ cm, einlagig) an der Sohle eingebaut, welcher zusätzlich zur Ausbildung einer gleichmäßigen Strömung beitrug.

Im gesamten übrigen Bereich der Rinne war eine feste Sohle verbaut, die bereits für vorangehende Experimente von *Fernandez* genutzt wurde (T. Fernandez, 2019). Für die feste Sohle, die auch in den hier durchgeführten Versuchen verwendet wurde und aus einem Zement-Sand-Gemisch bestand, wurde in der Arbeit von *Fernandez* eine Rauheit k von etwa 1,1 mm angegeben.

Zur Regulierung des Wasserstandes befand sich am Ende der Rinne ein überströmbares Wehr, dessen Höhe sich manuell einstellen ließ. Anhand der Längsneigung der Rinne (Versuche mit Sohlgefälle I_s zwischen 0‰ und 3‰) und dem beweglichen Wehr im Auslaufbereich, konnte für den jeweiligen Durchfluss ein Normalabfluss mit einer Wassertiefe h_w von 0,20 m eingestellt werden. Die Höheneinstellungen des beweglichen Wehrs und die Längsneigung der Rinne wurden iterativ ermittelt und sind nachfolgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 2: Höheneinstellung des beweglichen Wehrs und Rinnenneigung

Durchfluss Q	Sohlgefälle I_s	h...Position Wehr
40 l/s	0 ‰	44,0 cm
100 l/s	2 ‰	47,5 cm
160 l/s	3 ‰	51,0 cm



Die Versuche wurden in der Mitte der Flussbaurinne durchgeführt, um eine Beeinflussung durch den Zu- und Auslaufbereich zu vermeiden. Bei dem untersuchten Brückenpfeiler handelte es sich um einen Plexiglaszylinder mit einem Durchmesser D von 4,4 cm. Der vereinfachte Pfeiler war unten frei gelagert und wurde oben an einer Metallkonstruktion fixiert. Als Verbindungsstück diente eine Wägezelle mit Dehnmessstreifen, welche als Kraftaufnehmer diente. Je nach Versuchsdurchlauf wurde der entsprechende Verkläunungskörper an dem Modellpfeiler befestigt und die Widerstandskraft wurde gemessen. Der detaillierte Versuchsablauf ist dem Kapitel 3.3 zu entnehmen.

Neben den Kraftmessungen wurden auch punktuelle Geschwindigkeitsmessungen mittels ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) durchgeführt. Das Messgerät wurde dazu an einem Messwagen mit automatisierter Steuerung befestigt und konnte durch die Angabe von x-, y- und z-Koordinate über die Software LabVIEW die gewünschte Position angesteuert werden. Abbildung 8 (rechts) zeigt den motorisierten Messwagen und die Halterung für das ADV.

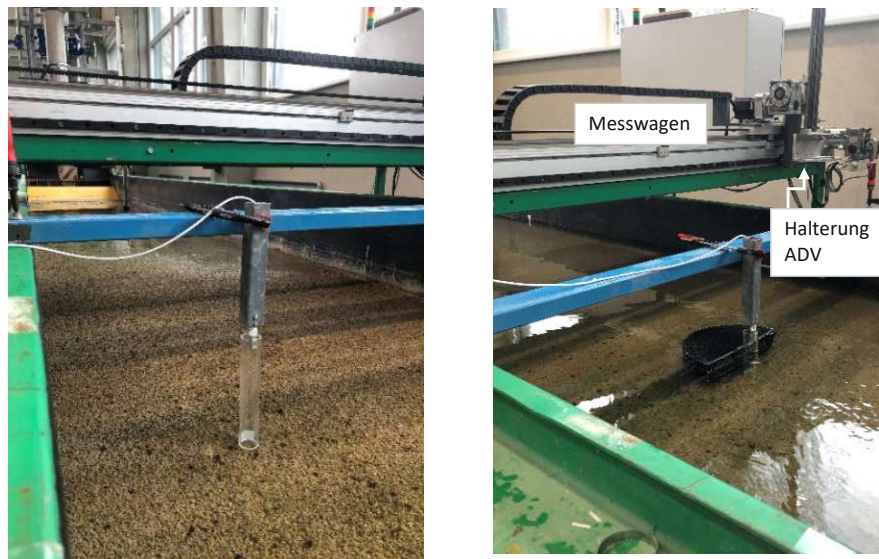


Abbildung 8: Brückenpfeiler (links) und Pfeiler mit Verkläunung und Messwagen (rechts)

Es folgt eine Übersicht über den gesamten Rinnenaufbau im Längsschnitt und Grundriss (Abbildung 9).

Tabelle 3: Aufbau Versuchsrinne

①	Zulauf	Rohr DN 400
②	Beruhigungszone	drei Reihen Lochziegel; Schalttafel, um Wasseroberfläche zu glätten
③	Beruhigungszone	Kies einlagig eingebaut $h = 3 \text{ cm}$
④	Modellbereich	Feste Sohle aus Zement-Sand-Gemisch $h = 3 \text{ cm}$
⑤	Messquerschnitt	Brückenpfeiler mit Verkläunungskörper
⑥	Modellbereich	Feste Sohle aus Zement-Sand-Gemisch $h = 3 \text{ cm}$
⑦	Auslauf	höhenverstellbares Wehr

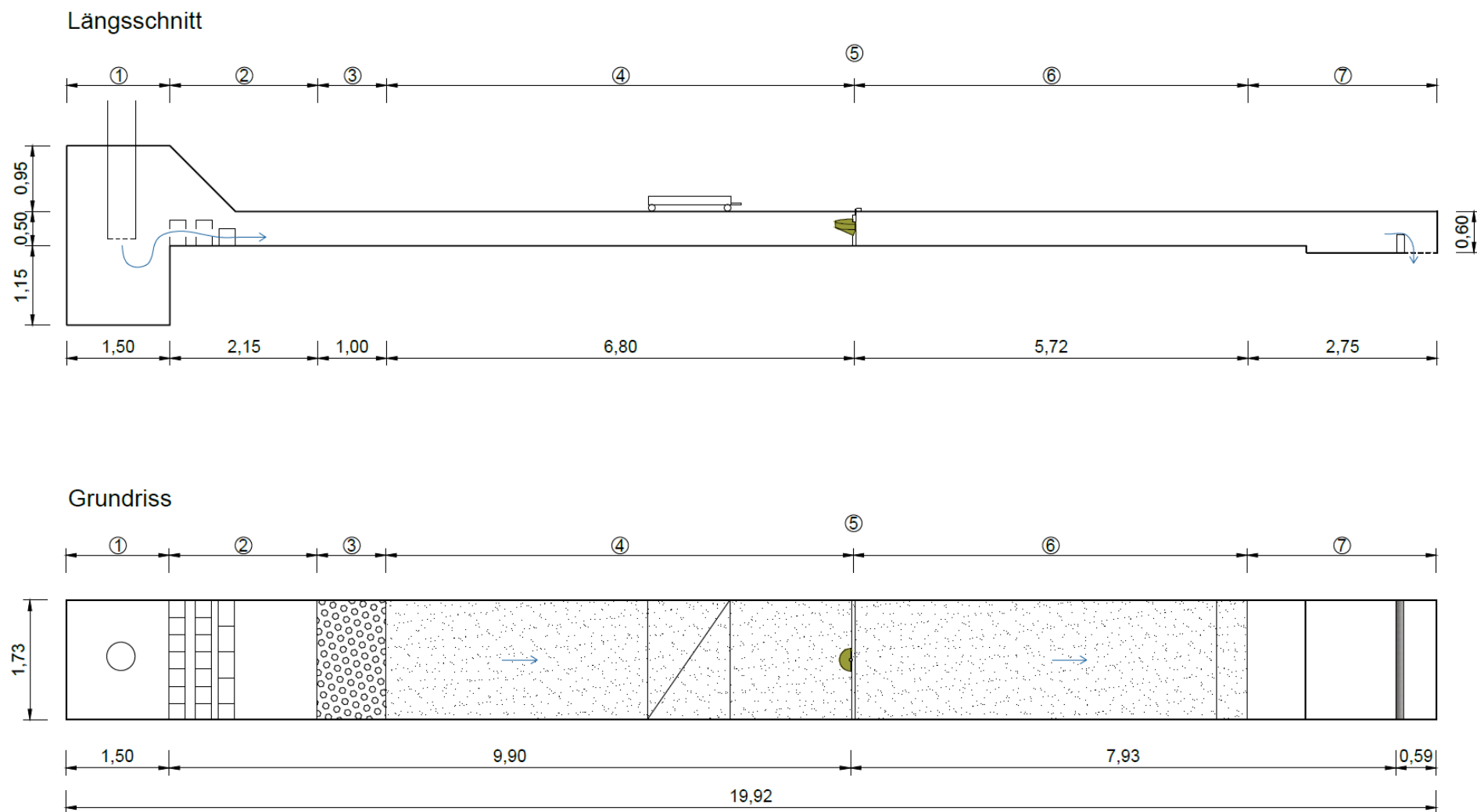


Abbildung 9: Längsschnitt und Grundriss der Versuchsrinne

3.2 Versuchsparemeter

3.2.1 Hydraulische Parameter

In diesem Kapitel wird auf die Versuchsparemeter eingegangen, welche für die Ergebnisse relevant sind bzw. möglicherweise einen Einfluss darauf haben. Dazu gehören vor allem die hydraulischen Verhältnisse in der Rinne und die hydraulischen Eigenschaften der Verklausungskörper.

Um eine Grundlage für den Vergleich zwischen der Situation Brückenpfeiler mit - und ohne Verklausung zu schaffen wurden die Versuche in der Flussbaurinne zunächst nur mit dem eingebauten Pfeiler ohne Verklausung durchgeführt. Anschließend kamen die verschiedenen Verklausungskörpern zum Einsatz.

Es wurden drei Durchflüsse Q mit jeweils einer Wassertiefe h_w von 0,20 m untersucht. Die Fließgeschwindigkeit U wurde mittels ADV gemessen und anschließend über die Tiefe gemittelt.

Die Wassertemperatur bei den durchgeführten Versuchen betrug 20°C. Daraus ergibt sich für das Wasser eine kinematische Viskosität ν von $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

$$Re_{Rinne} = \frac{U \cdot h_w}{\nu} \quad (2)$$

Re_{Rinne} ... Reynoldszahl [-]
 U ... tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit [m/s]
 h_w ... Wassertiefe [m]
 ν ... dynamische Viskosität [m²/s]

$$Re_{Pfeiler} = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (3)$$

$Re_{Pfeiler}$... Reynoldszahl [-]
 U ... tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit [m/s]
 D ... Durchmesser Pfeiler = 0,044 [m]
 ν ... dynamische Viskosität [m²/s]

$$Fr_{Rinne} = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h_w}} \quad (4)$$

Fr_{Rinne} ... Froudzahl [-]
 U ... tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit [m/s]
 g ... Erdbeschleunigung = 9,81 [m/s²]
 h_w ... Wassertiefe [m]

Die nachfolgende Tabelle beinhaltet einige wichtige hydraulischen Kennwerte der durchgeführten Versuche in der Flussbaurinne.

Tabelle 4: Hydraulische Kennwerte

	Q	h_w	I_s	U	Re_{Rinne}	$Re_{Pfeiler}$	Fr_{Rinne}	
Versuch	[l/s]	[m]	[-]	[m/s]	[-]	[-]	[-]	
ohne VK	Pfeiler ohne VK	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	4 735	0,08
	Pfeiler ohne VK	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	12 665	0,21
	Pfeiler ohne VK	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	20 374	0,33
kegelförmiger VK; durchströmt	1por_40_3	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	37 884	0,08
	1por_40_7	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	37 884	0,08
	1por_40_11	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	37 884	0,08
	1por_100_1	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	101 317	0,21
	1por_100_5	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	101 317	0,21
	1por_100_9	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	101 317	0,21
	1por_160_1	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	162 989	0,33
	1por_160_5	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	162 989	0,33
	1por_160_9	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	162 989	0,33
kegelförmiger VK; undurchlässig	1sol_40_3	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	37 884	0,08
	1sol_40_7	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	37 884	0,08
	1sol_40_11	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	37 884	0,08
	1sol_100_3	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	101 317	0,21
	1sol_100_7	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	101 317	0,21
	1sol_100_11	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	101 317	0,21
	1sol_160_3	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	162 989	0,33
	1sol_160_7	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	162 989	0,33
	1sol_160_11	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	162 989	0,33
zylinderförmiger VK; durchströmt	2por_40_5	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	37 884	0,08
	2por_40_9	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	37 884	0,08
	2por_40_14,5	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	37 884	0,08
	2por_100_5	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	101 317	0,21
	2por_100_9	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	101 317	0,21
	2por_100_14,5	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	101 317	0,21
	2por_160_5	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	162 989	0,33
	2por_160_9	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	162 989	0,33
	2por_160_14,5	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	162 989	0,33
zylinderförmiger VK; undurchlässig	2sol_40_4,8	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	38 314	0,08
	2sol_40_8,8	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	38 314	0,08
	2sol_40_14,3	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	38 314	0,08
	2sol_100_4,8	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	102 469	0,21
	2sol_100_8,8	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	102 469	0,21
	2sol_100_14,3	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	102 469	0,21
	2sol_160_4,8	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	164 841	0,33
	2sol_160_8,8	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	164 841	0,33
	2sol_160_14,3	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	164 841	0,33
zylinderförmiger VK; undurchlässig; rau	2rough_40_4,8	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	38 745	0,08
	2rough_40_8,8	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	38 745	0,08
	2rough_40_14,3	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	38 745	0,08
	2rough_100_4,8	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	103 620	0,21
	2rough_100_8,8	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	103 620	0,21
	2rough_100_14,3	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	103 620	0,21
	2rough_160_4,8	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	166 693	0,33
	2rough_160_8,8	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	166 693	0,33
	2rough_160_14,3	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	166 693	0,33
VK aus Kunststoffstäben (cyl); durchströmt	2cyl_40_10	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	38 207	0,08
	2cyl_40_14,2	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	38 207	0,08
	2cyl_40_18	40	0,20	0 ‰	0,108	21 525	38 207	0,08
	2cyl_100_10	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	102 181	0,21
	2cyl_100_14	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	102 181	0,21
	2cyl_100_18	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	102 181	0,21
	2cyl_160_10	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	164 378	0,33
	2cyl_160_14,2	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	164 378	0,33
	2cyl_160_18	160	0,20	3 ‰	0,463	92 607	164 378	0,33
cyl; undurchlässig/rau	2sol_100_10	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	103 332	0,21
	2sol_100_14	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	103 332	0,21
	2sol_100_18	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	103 332	0,21
	2rough_100_10	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	104 483	0,21
	2rough_100_14	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	104 483	0,21
	2rough_100_18	100	0,20	2 ‰	0,288	57 567	104 483	0,21

3.2.2 Verklausungskörper

Die Form und Struktur von Verklausungen an vorhandenen Brückenpfeilern sehen teilweise sehr unterschiedlich aus. Die Ursache hierfür liegt an verschiedenen Faktoren, wie die Pfeileranordnung, die Art des angeschwemmten Materials (viele/wenig Äste, Anteil an Feinmaterial, etc.) und Fließquerschnitt bzw. Fließgeschwindigkeit.

Um grundlegende Eigenschaften einer Verklausung und dessen Einfluss auf die Widerstandskraft am Brückenpfeiler zu untersuchen, wurde der Verklausungskörper in vereinfachter Form nachgebildet. Für die ersten Versuche wurden kegelförmige Verklausungskörper untersucht, anschließend zylinderförmiger Verklausungskörper. Abgesehen von der Form wurde auch das Material des Versuchskörpers variiert, sowie verschiedene Oberflächenrauheiten untersucht.

In den folgenden Abbildungen sind die verschiedenen Verklausungskörper einschließlich vereinfachtem Brückenpfeiler zu sehen:

Kegelförmige Verklausungskörper:

→ durchströmt (porous)

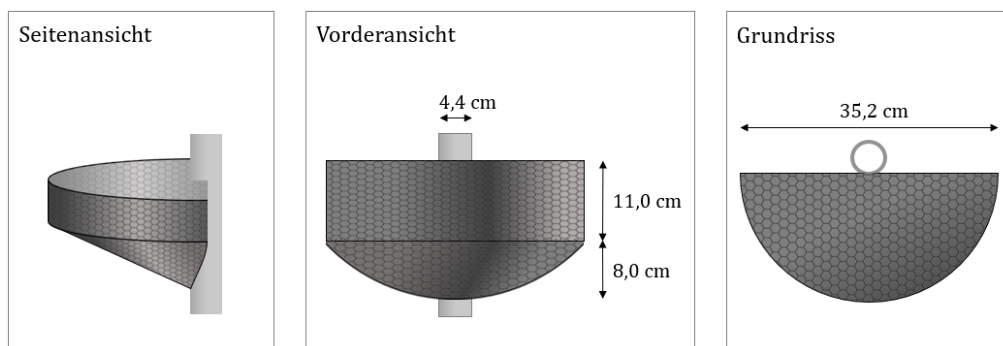


Abbildung 10: Kegelförmiger Verklausungskörper aus Filtermaterial ppi 10 – durchströmt

→ undurchlässig (solid)

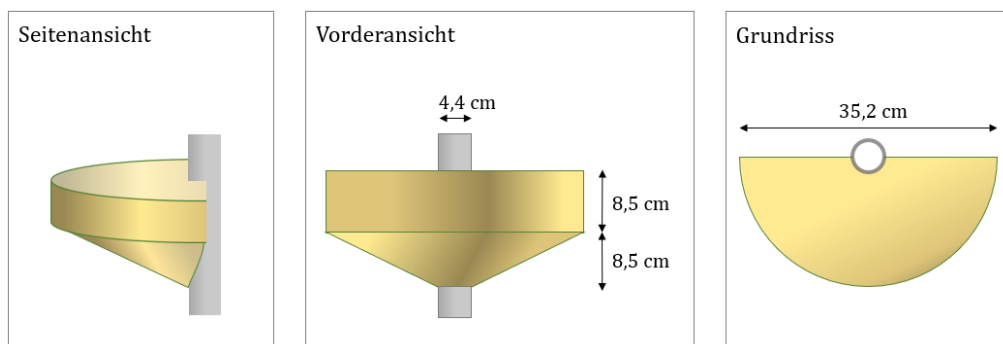


Abbildung 11: Kegelförmiger Verklausungskörper aus Dämmstoff – undurchlässig

Zylinderförmige Verkläunungskörper

→ durchströmt (porous)

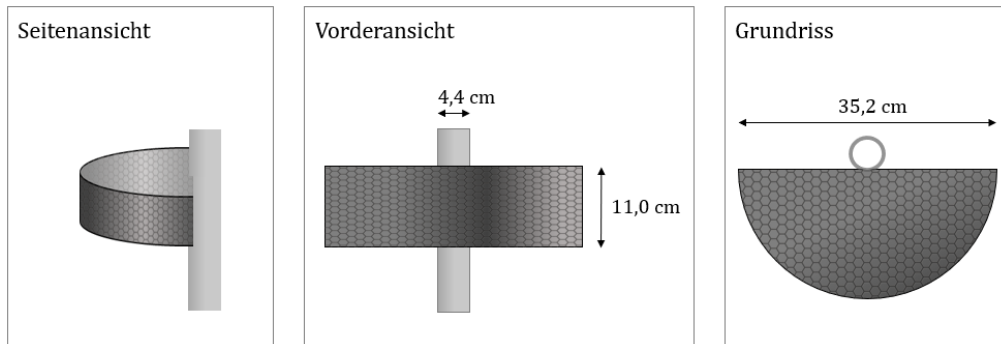


Abbildung 12: Zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Filtermaterial ppi 10 – durchströmt

→ undurchlässig (solid)

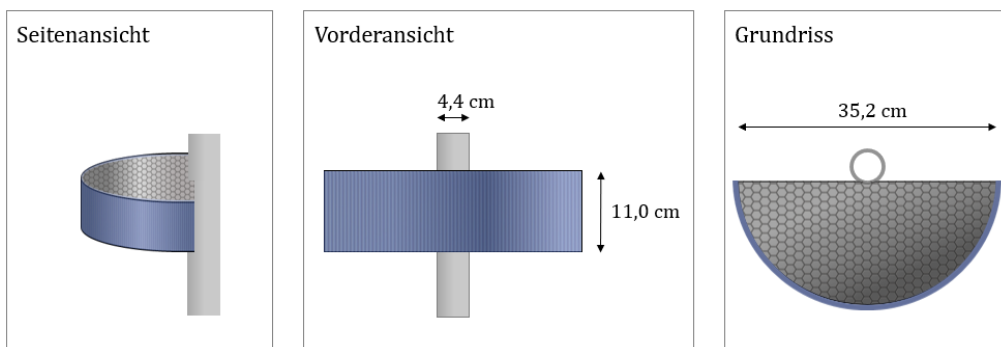


Abbildung 13: Zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Filtermaterial; seitlich und unten umhüllt mit dichter Kunststoffpappe (t=2 mm) - undurchlässig

→ raue Oberfläche, undurchlässig (rough)

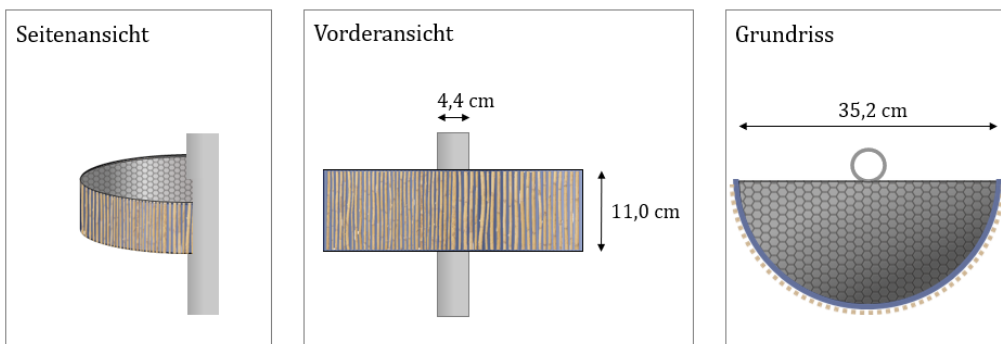


Abbildung 14: Zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Filtermaterial; seitlich und unten umhüllt mit dichter Kunststoffolie (t=2 mm) und darüber eine Schaschlikmatte - undurchlässig mit rauher Oberfläche

→ durchströmte Zylinder (cylinder)

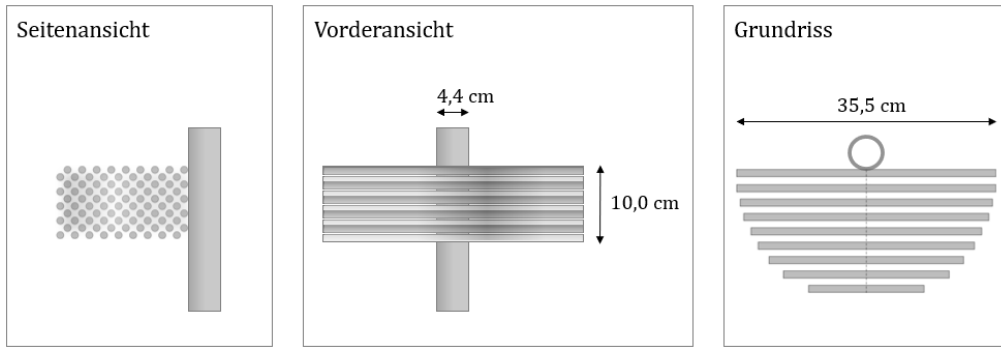


Abbildung 15: Zylinderförmiger Verkläuerungskörper aus Kunststoffzylindern - durchströmt

Die Versuchsbezeichnung wurde gemäß Tabelle 5 gewählt:

Tabelle 5: Versuchsbezeichnung Kraftmessungen

<i>pier</i>	Kraftmessung am Versuchspfeiler ohne Verkläuerungskörper
<i>1</i>	kegelförmiger Verkläuerungskörper
<i>2</i>	zylindrischer Verkläuerungskörper
<i>por</i>	porous; durchströmter Verkläuerungskörper
<i>sol</i>	solid; undurchlässiger Verkläuerungskörper
<i>rough</i>	rough; Verkläuerungskörper mit rauer Oberfläche
<i>cyl</i>	cylinder; durchströmter Verkläuerungskörper aus Kunststoffzylindern
<i>_###_</i>	Zufluss in l/s
<i>_#</i>	die Zahl gibt den Abstand zwischen Sohle und Unterkante des Verkläuerungskörpers an

Folgende Abbildungen zeigen alle beschriebenen Verkläuerungskörper, wie sie für die Versuche verwendet wurden:



Abbildung 16: Kegelförmige Verkläuerungskörper undurchlässig (links und Mitte) und durchströmt (rechts)

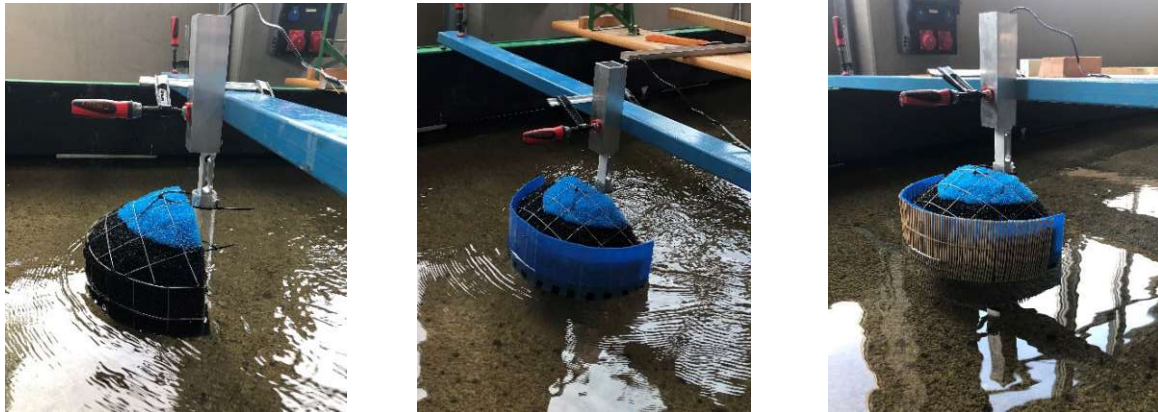


Abbildung 17: Zylinderförmiger Verkläuerkörper aus Filtermaterial ppi 10: durchströmt (links), undurchlässig (Mitte) und rau (rechts)



Abbildung 18: Zylinderförmiger Verkläuerkörper aus Kunststoffstäben

Porosität Verkläuerkörper

Um den Faktor Porosität zu untersuchen, wurden drei verschieden-durchlässige Materialien für die Verkläuerkörper verwendet: undurchlässiger Dämmstoff (XPS), durchströmtes Filtermaterial, und durchströmte Kunststoffzylinder.

Da für die Filtermatten seitens des Herstellers keine Porosität für das Material angegeben wird war zunächst die Idee, die Porosität volumetrisch mittels Wasser und Überlaufbehälter zu bestimmen. Es stellte sich allerdings heraus, dass die Filtermatte einen sehr hohen Porenanteil hat und der Wasserspiegel im Überlaufbehälter beim Eintauchen des Körpers unverändert bleibt.

Cocci hat in seiner Arbeit (A. Cocci, 2021) mit denselben Polyurethan-Filtermatten ppi10 (ppi = Anzahl der Poren pro Zoll) gearbeitet und hat die Porosität als Verhältnis zwischen Porenvolumen und Gesamtvolumen über die Masse und die Dichte bestimmt und mit 97,9% angegeben.

Für den Verkläunungskörper aus Kunststoffstäben wurde eine Porosität von 58,0% ermittelt (A. Cocci, 2021), welche anhand der einheitlichen Form und Anordnung der Stäbe geometrisch bestimmt wurde.



Abbildung 19: Filtermaterial ppi10 (links) und zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Kunststoffstäben (rechts)

3.3 Messtechnik

3.3.1 ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)

Um die Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzen zu erfassen, wurde ein Vectrino (ADV) der Firma Nortek verwendet. Diese akustischen Strömungsmessgeräte nutzen den Doppler-Effekt um die drei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors zu messen. Es wurde eine „side-looking“ Sonde (seitwärts-schauend) mit einem Sender und vier Empfängern verwendet. Für die Messungen wurde eine Abtastrate von 25 Hz und einer NVR (Nominal Velocity Range) von 0,3 m/s in Sohlennähe und 1,0 m/s über die restliche Höhe gewählt. Die Rohdaten sollten gemäß BAW Empfehlung „grundsätzlich nicht ohne Fehlerfilterung ausgewertet werden“ (Sokoray-Varga & Höger, 2014), das heißt es müssen vor allem die „Spikes“ (Ausreißer) aus den Messreihen entfernt werden. Dieses soeben beschriebene Postprocessing erfolgte mit Hilfe des Programms *Explore ADV* nach dem Ablauf, der BAW Empfehlung in dem Kapitel Fehlerfilterung beschrieben wird (Sokoray-Varga & Höger, 2014).

3.3.2 Wägezelle und Messverstärker

Um die Belastung auf den Pfeiler durch die Strömung zu messen, wurde eine Doppelbiegebalken-Wägezelle verwendet. Diese wurde unten und oben starr mit dem Pfeiler verbunden bzw. an der Haltekonstruktion befestigt. Der hohle Plexiglaszylinder reichte bis 1 mm über die Rinnensohle und war dadurch unten frei gelagert.

Durch die Belastung aus der Strömungskraft verformt sich die Wägezelle und die Dehnungen können mittels angebrachten Dehnmessstreifen (DMS) aufgezeichnet

werden. Um das Signal aufzubereiten (Signalkonditionierung), wurde ein Messverstärker des Typs *Spider 8* der Firma HBM verwendet. Die Aufgabe von Messverstärkern, auch Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler), ist es das analoge Signal des Sensors (DMS) aufzubereiten und in ein Digitales umzuwandeln, damit es von der Software am PC verarbeitet werden kann (Smith G. M., 03.03.2020).

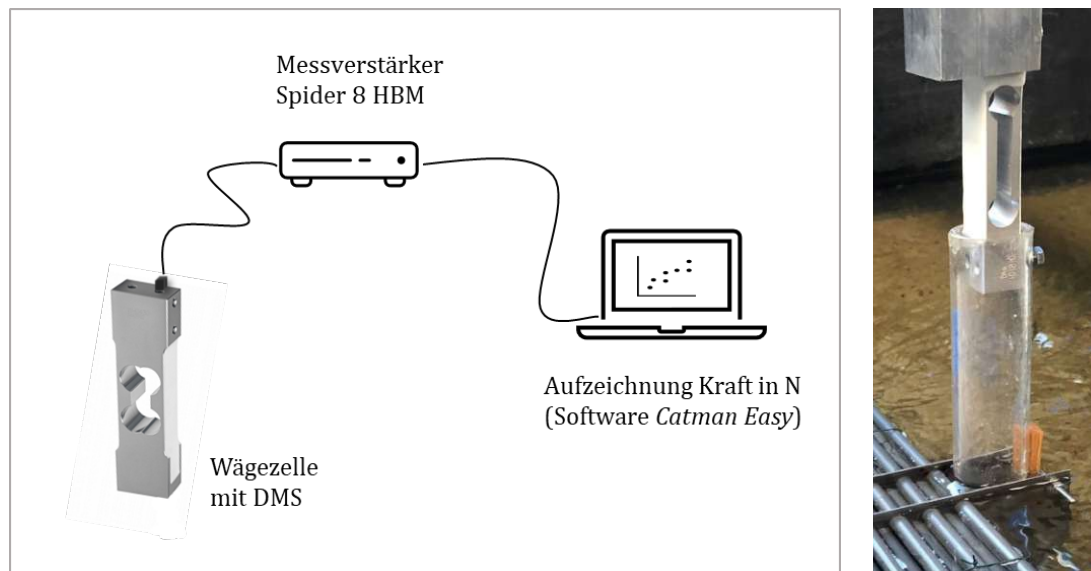


Abbildung 20: Prinzipskizze Kraftmessungen mit Wägezelle (links) und eingebaute Wägezelle für die Versuche (rechts)

3.4 Versuchsdurchführung

Bei jedem Versuchsdurchlauf wurde zunächst der gewählte Durchfluss an den Pumpen eingestellt und über die Klappe am Ende der Rinne und die Rinnenneigung so geregelt, dass im Modellbereich ein Normalabfluss mit einer Wasserspiegelhöhe von 20 cm herrschte. Der Verklauungskörper wurde an dem Pfeiler befestigt und an der ersten der drei untersuchten Höhestufen positioniert. Die vertikale Position der Verklauung wurde durch den Parameter freie Höhe h_{frei} gekennzeichnet, also der Abstand in Zentimeter zwischen Sohle und Unterkante der Verklauung, und ist in der jeweiligen Versuchsbezeichnung enthalten (Tabelle 5). Für die richtige Positionierung des Körpers, wurde an der Unterkante eine Platte angelegt und mit einem Zollstock seitlich die Höhe abgelesen und angepasst.

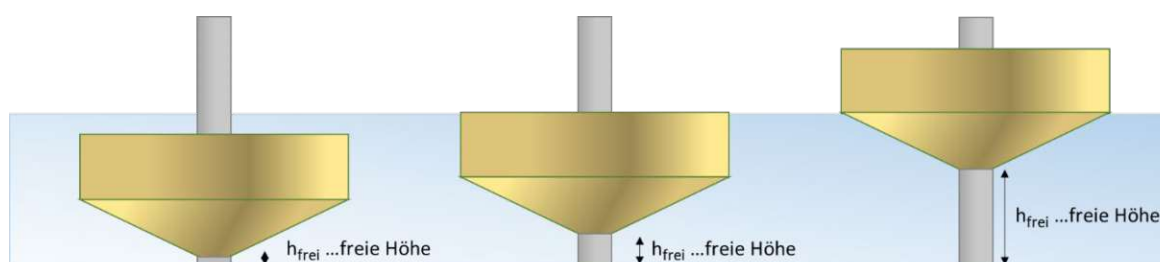


Abbildung 21: Parameter freie Höhe h_{frei} – drei Höhenstufen

Die Messung der Kraft erfolgte über die eingebaute Wägezelle am Pfeilerkopf in Kombination mit einem Messverstärker und der Software *Catman Easy* (Abbildung 20). Die Aufzeichnung lief über einen Zeitraum von jeweils fünf Minuten, da der Wert nicht konstant blieb. Die Kraft wurde daher in der Auswertung über die Messdauer gemittelt.

Da es keinen entkoppelten Zulaufbehälter am Anfang der Rinne gibt, strömt das Wasser über das Zulaufrohr von oben mit etwa 4 m Fallhöhe nach unten und trifft dort auf den Rinnenboden des Einlaufbeckens. Das führte dazu, dass die gesamte Rinne leicht zu schwingen begann und diese Vibrationen wiederum schlugen sich in den Kraftmessungen nieder. Als Lösung wurde eine sogenannte „Nullmessung“ durchgeführt, um diesen Einfluss im Zuge der Auswertung korrigieren zu können.

Die Nullmessung sah aus wie folgt: ein Metallring wurde um den Pfeiler auf die Sohle gestellt und beschwert, so dass der Bereich um den Pfeiler herum unbeeinflusst von der Strömung blieb (Abbildung 22). Anschließend wurde die Kraft über den Zeitraum von einer Minute aufgezeichnet und in der Auswertung über die Messdauer gemittelt.

Durch die vorangehende Nullmessung vor jeder Kraftmessung mit Pfeiler und Verkläunung konnte der Anteil der gemessenen Kraft, der durch die Schwingungen der Rinne verursacht wurde, in der Auswertung abgezogen werden.



Abbildung 22: Nullmessung

4 Ergebnisse der Laborversuche

4.1 Anströmgeschwindigkeit und Turbulenz

Die Anströmgeschwindigkeit und der Turbulenzgrad sind hydraulische Parameter, die sich direkt auf die Schleppkraft und den Widerstandsbeiwert auswirken. Die Geschwindigkeit geht quadratisch in die Formel zur Berechnung der Widerstandskraft ein (Formel 1) und hat daher einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis.

4.1.1 Querschnittsgemittelte Anströmgeschwindigkeit

Eine Möglichkeit, um die Fließgeschwindigkeit zu ermitteln, ist die Mittelung über den Querschnitt. Anhand der folgenden Formel (5)(1) wurde jeweils die querschnittsgemittelte Anströmgeschwindigkeit U_Q für die drei untersuchten Durchflüsse berechnet. Das Ergebnis ist in Tabelle 6 ersichtlich.

$$U_Q = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

U_Q ... querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeit [cm/s]
 Q ... Zufluss Pumpe [l/s]
 A ... Fließquerschnitt [m²]

Tabelle 6: Querschnittsgemittelte Anströmgeschwindigkeit U_Q

Versuch	Q [l/s]	b_{Rinne} [m]	h_w [m]	A_{Rinne} [m ²]	U_Q [cm/s]
UQ_40	40	1,73	0,20	0,346	11,6
UQ_100	100	1,73	0,20	0,346	28,9
UQ_160	160	1,73	0,20	0,346	46,2

Da die Fließgeschwindigkeit aufgrund von Imperfektionen der Rinne und der rauen Sohle nicht über den gesamten Querschnitt konstant sein muss, wurden zusätzlich Geschwindigkeitsmessungen mittels ADV durchgeführt.

4.1.2 Lokale Anströmgeschwindigkeit

Um die lokale Geschwindigkeit in der Mitte des Rinnenquerschnitts zu ermitteln, wurde mittels ADV in einem Abstand von 85 cm vor dem Pfeiler punktuell gemessen. Ausgehend von 10 mm über der Sohle wurden über die Höhe neun Punkte in Abständen von je 20 mm untersucht. Die Messdauer betrug je Punkt 60 Sekunden und wurde für jeden der drei Durchflüsse durchgeführt. In Abbildung 23 sind die, in Fließrichtung gemessenen, neun lokalen Geschwindigkeiten dargestellt sowie das angepasste

logarithmische Geschwindigkeitsprofil nach der Formel (6) aus *Dittrich (1998)* mit einer äquivalenten Sandrauheit k_s von 15 mm.

$$U = U^* \cdot 2,5 \cdot \ln \frac{z}{k_s} + 8,5 \quad (6)$$

U ... Fließgeschwindigkeit [m/s]

U^* ... Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]

z ... Höhe ab Rinnensohle [m]

k_s ... äquivalente Sandrauheit = 15 mm

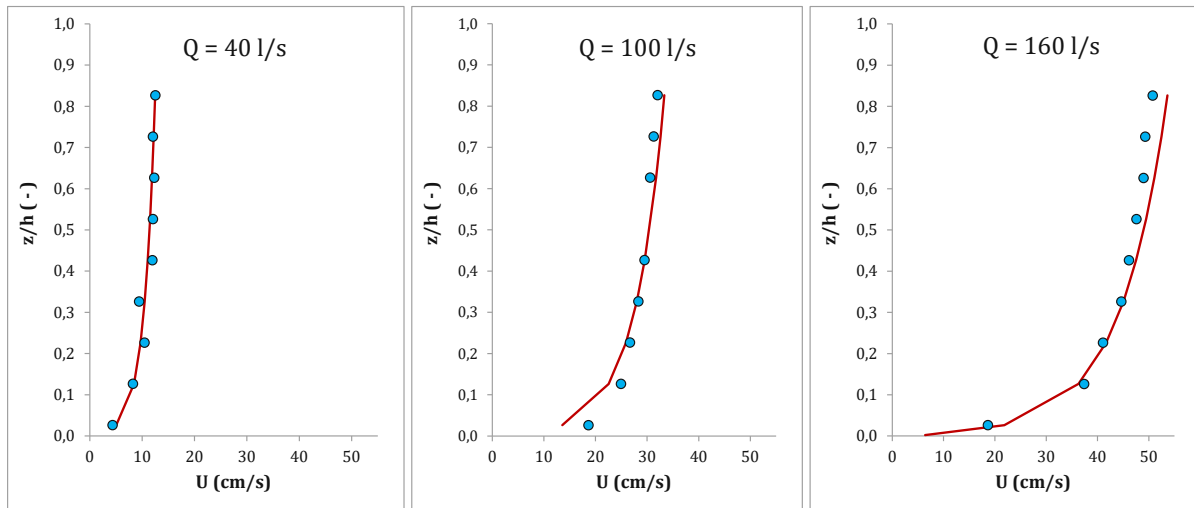


Abbildung 23: Vertikale Geschwindigkeitsprofile der Hauptströmungskomponente U für $Q = 40$ l/s, $Q = 100$ l/s und $Q = 160$ l/s (Grafik Schnauder I., 2021)

Für den Durchfluss $Q = 100$ l/s waren die Daten für den Punkt 110 mm über der Sohle ($z/h = 0,55$) nicht auswertbar, weshalb dieser in der obenstehenden Grafik fehlt. Da sich der Punkt nicht unmittelbar in Sohlennähe befindet, wird das logarithmische Geschwindigkeitsprofil dadurch kaum beeinflusst.

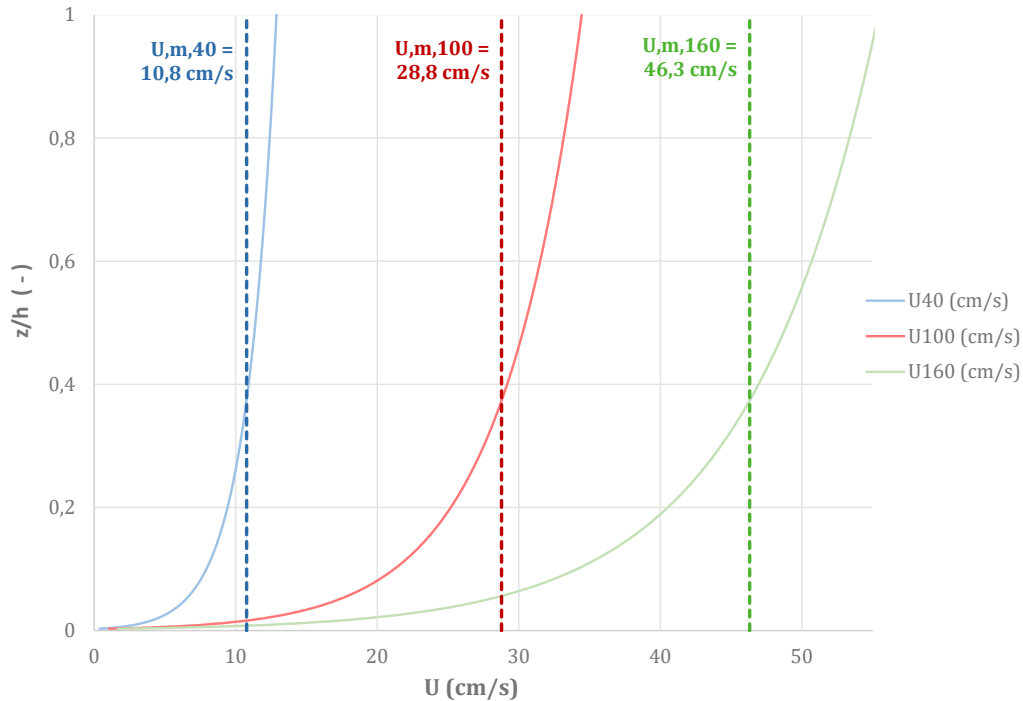


Abbildung 24: Berechnete logarithmische Geschwindigkeitsprofile und gemittelte Geschwindigkeit $U_{m,x}$ über die Tiefe für den Durchfluss x in l/s

Abbildung 24 zeigt die berechneten Geschwindigkeitsprofile nach der Formel (6) über die Höhe. Bildet man den Mittelwert von allen Geschwindigkeiten über die Wasserspiegelhöhe, erhält man die gemittelte Geschwindigkeit $U_{m,x}$ in Rinnenmitte für den Durchfluss x .

Vergleicht man nun die querschnittsgemittelte Anströmgeschwindigkeit U_Q aus Kapitel 4.1.1 mit der lokalen Anströmgeschwindigkeit U_m beträgt der Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten bei dem Durchfluss $Q = 40$ l/s etwa 7% (Tabelle 7). Für die Durchflüsse $Q = 100$ l/s und $Q = 160$ l/s ist die Geschwindigkeitsdifferenz geringer als 1%.

Tabelle 7: Vergleich zwischen querschnittsgemittelter Anströmgeschwindigkeit U_Q und lokaler Anströmgeschwindigkeit U_m

Q [l/s]	U_Q [cm/s]	U_m [cm/s]	ΔU [cm/s]	ΔU [-]
40	11,56	10,80	0,76	6,6%
100	28,90	28,80	0,10	0,4%
160	46,24	46,30	0,06	0,1%

Eine mögliche Ursache für die Differenz bei 40 l/s von ca. 7% könnte darin liegen, dass bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten weniger Partikel aufgewirbelt werden, die das Signal reflektieren und somit die ADV-Messung beeinträchtigen. Um diese These zu überprüfen, wurde feinsandiges Material (Partikel) mit Wasser vermischt und am Zulauf

zugegeben. In Abbildung 25 ist deutlich zu erkennen, dass anfangs noch viele „Spikes“ gemessen werden. Ab Sekunde 35 bis etwa Sekunde 105 zeigt das Geschwindigkeitsdiagramm nur noch geringe Schwankungen. Hier wird der Einfluss der Partikelzugabe deutlich aber sobald keine Zugabe mehr erfolgt verschlechtert sich die Geschwindigkeitsmessung wieder. Für die Auswertung bei 40 l/s wurden daher nur jene Messzeiträume berücksichtigt, in denen „Spikes“ nur vereinzelt oder gar nicht vorkommen. Die übrigen Bereiche wurden entfernt.

Die kürzere zur Verfügung stehenden Datenreihe (1 Minute statt 3 Minuten Messdauer) ist möglicherweise der Grund für die Abweichung von der querschnittsgemittelte Anströmgeschwindigkeit U_Q und der lokalen Anströmgeschwindigkeit U_m .

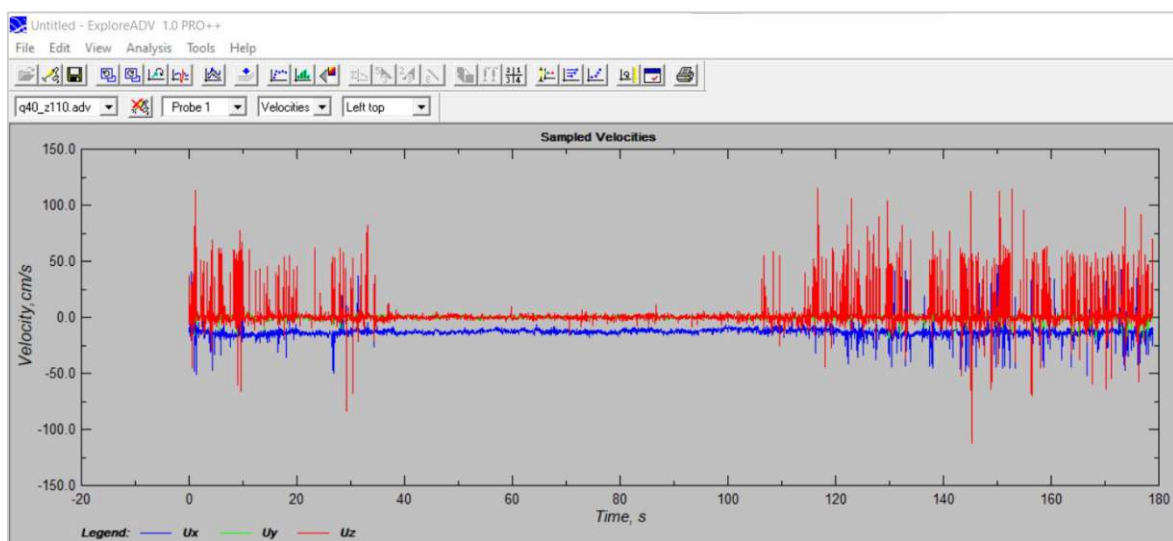


Abbildung 25: Geschwindigkeitsmessung ADV ($Q=40$ l/s, 11 cm über Sohle); „ExploreADV“-Software

Für die Berechnungen wurde die gemittelte lokale Geschwindigkeit U_m verwendet, da sie jener Geschwindigkeit entspricht, die in der Mitte des Rinnenquerschnitts gemessen wurde. Sie ist also jene Geschwindigkeit, die der Verkläunungskörper auch tatsächlich erfährt.

4.1.3 Turbulenz

Aufgrund der rauen Sohle ist in Sohlennähe ein starker Gradient im Geschwindigkeitsprofil ersichtlich (Abbildung 23). Dies verdeutlichen die Graphen der turbulenten kinetischen Energie TKE (Abbildung 26), da die TKE mit der Tiefe zunimmt und besonders im Sohlenbereich deutlich erhöht ist.

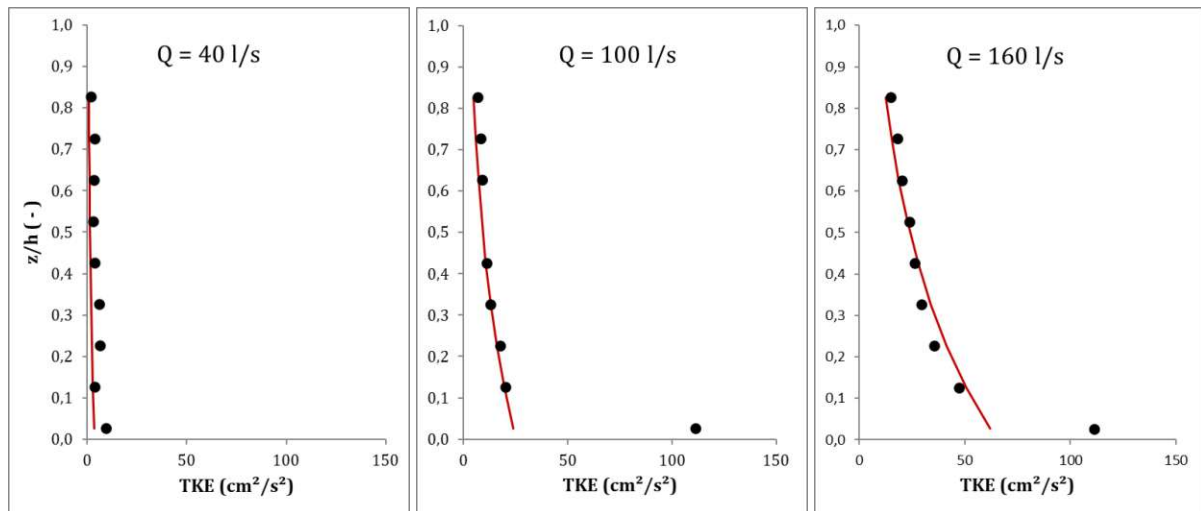


Abbildung 26: Turbulente kinetische Energie TKE für die Durchflüsse $Q = 40 \text{ l/s}$, $Q = 100 \text{ l/s}$ und $Q = 160 \text{ l/s}$ (Grafik Schnauder I, 2021)

Die turbulente kinetische Energie TKE setzt sich zusammen aus dem zeitlichen Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit und dem Turbulenzgrad T_u (C. Müller, 2007).

$$TKE = \frac{3}{2} (U_0 \cdot T_u)^2 \quad (7)$$

$$= \frac{1}{2} (u_u'^2 + u_v'^2 + u_w'^2)$$

TKE ... Turbulente kinetische Energie [cm^2/s^2]

U_0 ... mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

T_u ... Turbulenzgrad [-]

u'_x ... instationäre Anteile der Geschwindigkeit [m/s]

Abbildung 27 verdeutlicht den Zusammenhang des Turbulenzgrads mit dem Widerstandsbeiwert und der Reynoldszahl in Abhängigkeit der Reynoldszahl und des Turbulenzgrads T_u (hier als I_u bezeichnet) (Grafik Cheung & Melbourne, 1983). Im Bereich von $Re = 10^5$ bewirkt ein niedriger Turbulenzgrad einen hohen C_w -Wert und im Bereich von $Re = 10^6$ verhält es sich genau umgekehrt.

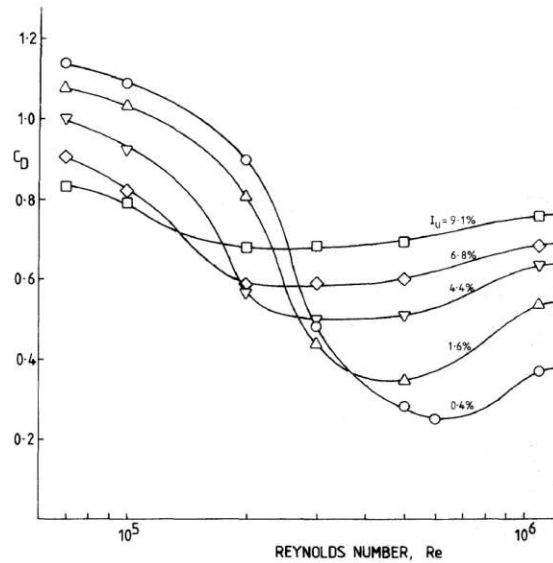


Abbildung 27: Widerstandsbeiwert C_w (englisch: C_d) in Abhängigkeit der Reynoldszahl und des Turbulenzgrads Tu (hier als I_u bezeichnet) (Grafik Cheung & Melbourne, 1983)

4.2 Ergebnisse der Kraftmessung

Die Aufzeichnung der Kräfte erfolgte über einen Zeitraum von jeweils 300 Sekunden (fünf Minuten) für die eigentliche Kraftmessung und dauerte 60 Sekunden lang für die jeweils zuvor durchgeführte Nullmessung. Da die gemessene Kraft kein konstanter Wert war, wurde der Mittelwert der Messperiode für die weiteren Berechnungen herangezogen.

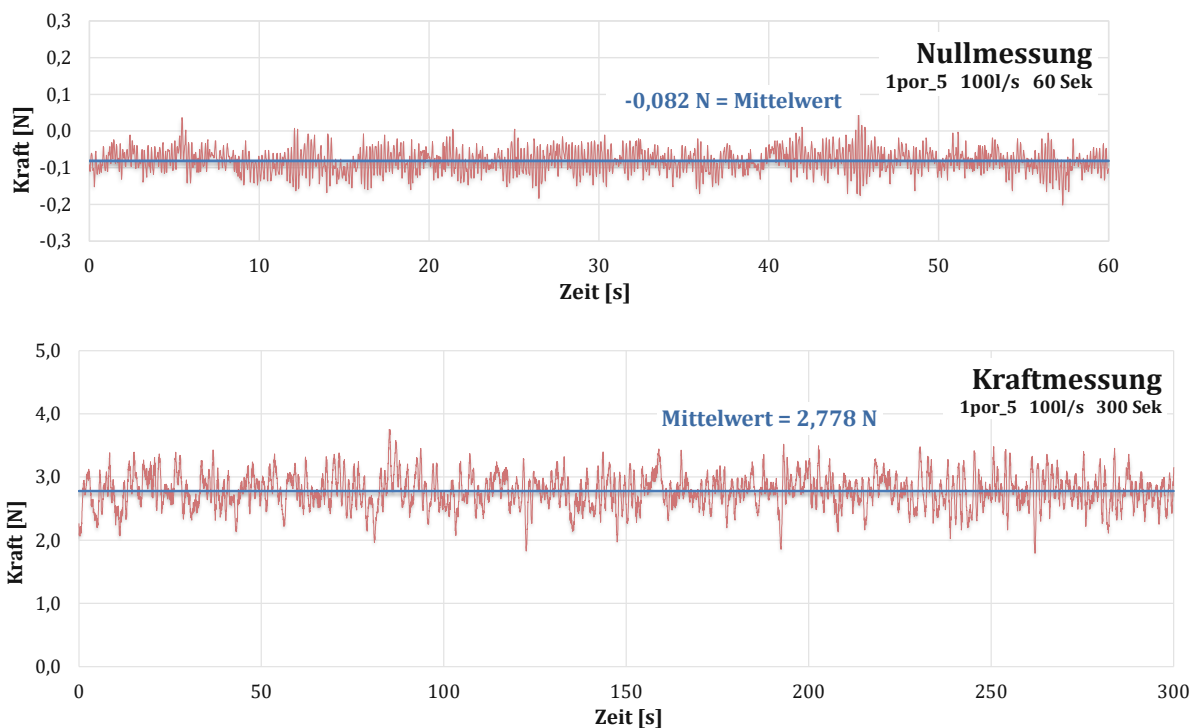


Abbildung 28: Messreihen der Kraftmessung und der zugehörigen Nullmessung für den Versuch 1por_5 bei einem Durchfluss von 100 l/s (zu beachten: unterschiedliche Skalierung der Achsen)

4.2.1 Zeitliche Mittelwerte der Kraftmessung

Um den Fehler zu berücksichtigen, der durch die Schwingungen der Rinne verursacht wurde, wurde der Mittelwert der Nullmessung von dem Mittelwert der Kraftmessung abgezogen (Formel 8). Das arithmetische Mittel bietet den Vorteil, dass es robust gegenüber Einflüssen wie Torsion und anderen Messungenauigkeiten ist.

$$F_w = F_{w,gem} - F_{w,ref} \quad (8)$$

F_w ... Widerstandskraft [N]
 $F_{w,gem}$... gemessene Widerstandskraft [N]
 $F_{w,ref}$... gemessener Referenzwert (Nullmessung) [N]

In nachfolgender Abbildung (Abbildung 29) ist die Widerstandskraft F_w je Versuch dargestellt. Je größer der Durchfluss war, umso größer war auch die Widerstandskraft entsprechend der Erwartung. Auch wurde bestätigt, dass die Widerstandskraft umso größer war, je mehr der Verkläunungskörper eingetaucht war, also je kleiner die freie Höhe h_{frei} (Abstand zwischen Sohle und Unterkante des Verkläunungskörpers) betrug, weil daher eine größere Fläche angeströmt wird. Das liegt daran, dass die Widerstandskraft direkt proportional mit der Fließgeschwindigkeit, dem Durchfluss, und der angeströmten Fläche zusammenhängt.

Bei den durchströmten Verkläunungskörpern ließ sich außerdem feststellen, dass die Widerstandskraft größer war als bei den entsprechenden undurchlässigen Körpern.

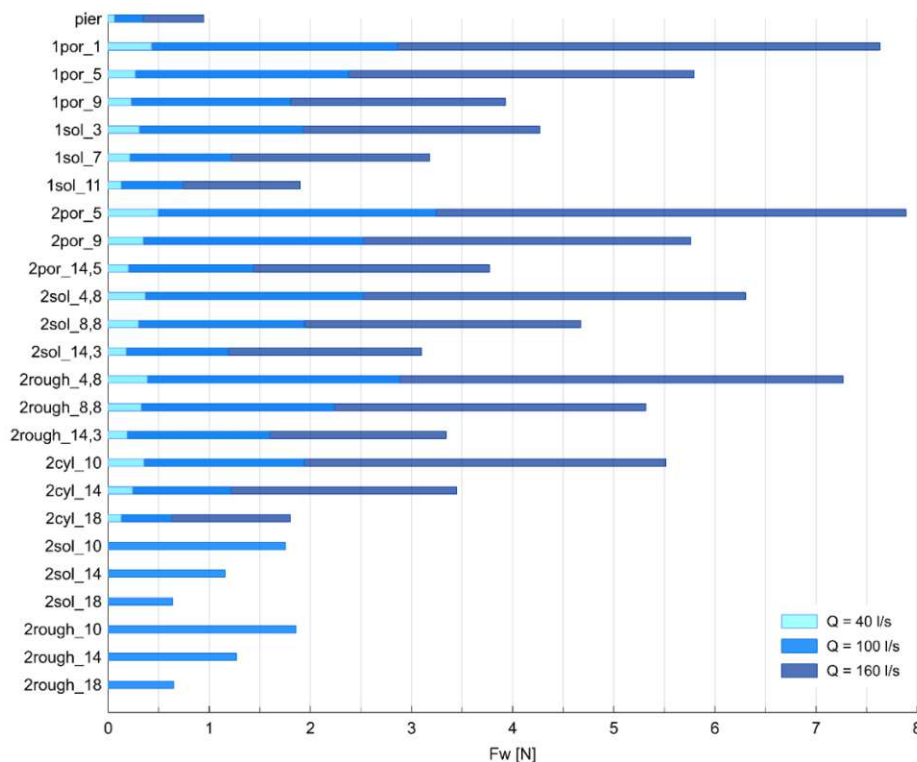


Abbildung 29: Widerstandskraft F_w je Versuch

Tabelle 8: Gemessene Kräfte F_w am Pfeiler

	Q	U	Re _D	h _{frei}	F _{w,ref}	F _{w,gem}	F _w	
Versuch	[l/s]	[m/s]	[-]	[cm]	[N]	[N]	[N]	
kegelförmiger VK; durchströmt	1por_40_3	40	0,108	37884	3,0	-0,01	-0,440	0,429
	1por_40_7	40	0,108	37884	7,0	-0,053	-0,321	0,268
	1por_40_11	40	0,108	37884	11,0	-0,060	-0,285	0,225
	1por_100_1	100	0,288	101317	1,0	-0,082	2,778	2,860
	1por_100_5	100	0,288	101317	5,0	-0,082	2,298	2,380
	1por_100_9	100	0,288	101317	9,0	-0,082	1,720	1,802
	1por_160_1	160	0,463	162989	1,0	-0,157	7,474	7,631
	1por_160_5	160	0,463	162989	5,0	-0,123	5,673	5,796
	1por_160_9	160	0,463	162989	9,0	-0,126	3,802	3,927
kegelförmiger VK; undurchlässig	1sol_40_3	40	0,108	37884	3,0	0,111	-0,195	0,306
	1sol_40_7	40	0,108	37884	7,0	-0,282	-0,494	0,213
	1sol_40_11	40	0,108	37884	11,0	0,030	-0,095	0,126
	1sol_100_3	100	0,288	101317	3,0	0,163	-1,762	1,925
	1sol_100_7	100	0,288	101317	7,0	0,062	-1,216	1,278
	1sol_100_11	100	0,288	101317	11,0	0,010	-0,736	0,746
	1sol_160_3	160	0,463	162989	3,0	0,058	4,325	4,267
	1sol_160_7	160	0,463	162989	7,0	0,097	3,278	3,181
	1sol_160_11	160	0,463	162989	11,0	0,081	1,980	1,900
zylinderförmiger VK; durchströmt	2por_40_5	40	0,108	37884	5,0	-0,057	0,436	0,493
	2por_40_9	40	0,108	37884	9,0	-0,029	0,315	0,344
	2por_40_14,5	40	0,108	37884	14,5	0,006	0,205	0,198
	2por_100_5	100	0,288	101317	5,0	0,021	3,264	3,243
	2por_100_9	100	0,288	101317	9,0	0,082	2,606	2,523
	2por_100_14,5	100	0,288	101317	14,5	0,009	1,443	1,433
	2por_160_5	160	0,463	162989	5,0	0,000	7,888	7,888
	2por_160_9	160	0,463	162989	9,0	0,077	5,839	5,761
	2por_160_14,5	160	0,463	162989	14,5	-0,004	3,768	3,772
zylinderförmiger VK; undurchlässig	2sol_40_4,8	40	0,108	38314	4,8	0,000	0,364	0,364
	2sol_40_8,8	40	0,108	38314	8,8	-0,033	0,264	0,297
	2sol_40_14,3	40	0,108	38314	14,3	0,003	0,180	0,177
	2sol_100_4,8	100	0,288	102469	4,8	-0,043	2,479	2,522
	2sol_100_8,8	100	0,288	102469	8,8	-0,041	1,900	1,942
	2sol_100_14,3	100	0,288	102469	14,3	0,060	1,248	1,188
	2sol_160_4,8	160	0,463	164841	4,8	0,000	6,302	6,302
	2sol_160_8,8	160	0,463	164841	8,8	0,032	4,707	4,675
	2sol_160_14,3	160	0,463	164841	14,3	-0,026	3,071	3,097
zylinderförmiger VK; undurchlässig; rau	2rough_40_4,8	40	0,108	38745	4,8	0,000	0,388	0,388
	2rough_40_8,8	40	0,108	38745	8,8	-0,036	0,291	0,326
	2rough_40_14,3	40	0,108	38745	14,3	0,003	0,189	0,186
	2rough_100_4,8	100	0,288	103620	4,8	-0,200	2,681	2,881
	2rough_100_8,8	100	0,288	103620	8,8	0,050	2,286	2,236
	2rough_100_14,3	100	0,288	103620	14,3	0,050	1,652	1,602
	2rough_160_4,8	160	0,463	166693	4,8	0,000	7,269	7,269
	2rough_160_8,8	160	0,463	166693	8,8	0,016	5,334	5,318
	2rough_160_14,3	160	0,463	166693	14,3	0,019	3,361	3,342
VK aus Kunststoffstäben (cyl); durchströmt	2cyl_40_10	40	0,108	38207	10,0	0,060	0,415	0,355
	2cyl_40_14,2	40	0,108	38207	14,2	0,129	0,371	0,242
	2cyl_40_18	40	0,108	38207	18,0	0,178	0,304	0,126
	2cyl_100_10	100	0,288	102181	10,0	0,089	2,029	1,940
	2cyl_100_14	100	0,288	102181	14,0	0,160	1,374	1,213
	2cyl_100_18	100	0,288	102181	18,0	0,252	0,877	0,625
	2cyl_160_10	160	0,463	164378	10,0	0,058	5,573	5,514
	2cyl_160_14,2	160	0,463	164378	14,2	0,177	3,624	3,447
	2cyl_160_18	160	0,463	164378	18,0	0,297	2,097	1,801
cyl; undurch- lässig/rau	2sol_100_10	100	0,288	103332	10,0	0,076	1,830	1,754
	2sol_100_14	100	0,288	103332	14,0	0,151	1,306	1,155
	2sol_100_18	100	0,288	103332	18,0	0,251	0,887	0,636
	2rough_100_10	100	0,288	104483	10,0	0,069	1,925	1,856
	2rough_100_14	100	0,288	104483	14,0	0,151	1,417	1,266
	2rough_100_18	100	0,288	104483	18,0	0,251	0,898	0,648

4.2.2 Mittelwert, Standardabweichung, sowie Minimal- und Maximalwert der gemessenen Kraft

Tabelle 9: Mittelwert, Standardabweichung, Minimal- und Maximalwert der gemessenen Kraft $F_{w, \text{gem}}$

Versuch	Mittelwert	Standardabw.	Minimum	Maximum	
	[N]	[N]	[N]	[N]	
kegelförmiger VK; durchströmt	1por_40_3	-0,440	0,151	-1,065	0,097
	1por_40_7	-0,321	0,090	-0,609	-0,010
	1por_40_11	-0,256	0,069	-0,498	-0,039
	1por_100_1	2,778	0,262	1,794	3,753
	1por_100_5	2,298	0,240	1,495	3,181
	1por_100_9	1,720	0,188	1,057	2,524
	1por_160_1	7,474	0,431	6,131	8,959
	1por_160_5	5,672	0,370	4,360	7,063
	1por_160_9	3,801	0,257	2,852	4,643
kegelförmiger VK; undurchlässig	1sol_40_3	-0,195	0,302	-1,340	0,999
	1sol_40_7	-0,494	0,173	-1,193	0,150
	1sol_40_11	-0,095	0,068	-0,404	0,199
	1sol_100_3	-1,762	0,452	-3,565	-0,052
	1sol_100_7	-1,216	0,240	-2,211	-0,349
	1sol_100_11	-0,736	0,121	-1,172	-0,362
	1sol_160_3	4,325	0,409	2,794	5,883
	1sol_160_7	3,278	0,263	2,395	4,328
	1sol_160_11	1,980	0,177	1,377	2,624
zylinderförmiger VK; durchströmt	2por_40_5	0,436	0,146	-0,100	0,940
	2por_40_9	0,328	0,123	-0,076	0,818
	2por_40_14,5	0,205	0,068	-0,039	0,509
	2por_100_5	3,264	0,317	2,164	4,537
	2por_100_9	2,606	0,260	1,622	3,568
	2por_100_14,5	1,443	0,148	0,955	1,940
	2por_160_5	7,888	0,440	6,273	9,430
	2por_160_9	5,839	0,391	4,343	7,124
	2por_160_14,5	3,768	0,288	2,899	4,785
zylinderförmiger VK; undurchlässig	2sol_40_4,8	0,364	0,229	-0,333	1,115
	2sol_40_8,8	0,264	0,228	-0,512	1,158
	2sol_40_14,3	0,180	0,107	-0,221	0,494
	2sol_100_4,8	2,479	0,382	1,064	3,971
	2sol_100_8,8	1,900	0,338	0,633	3,017
	2sol_100_14,3	1,248	0,175	0,636	2,028
	2sol_160_4,8	6,302	0,446	4,691	7,793
	2sol_160_8,8	4,707	0,428	3,117	6,286
	2sol_160_14,3	3,071	0,277	2,058	4,082
zylinderförmiger VK; undurchlässig; rau	2rough_40_4,8	0,388	0,239	-0,394	1,206
	2rough_40_8,8	0,291	0,246	-0,564	1,146
	2rough_40_14,3	0,189	0,118	-0,179	0,630
	2rough_100_4,8	2,681	0,424	1,070	4,331
	2rough_100_8,8	2,286	0,341	1,076	3,378
	2rough_100_14,3	1,652	0,217	0,900	2,494
	2rough_160_4,8	7,269	0,442	5,692	8,731
	2rough_160_8,8	5,334	0,412	3,859	6,933
	2rough_160_14,3	3,361	0,279	2,448	4,409
VK aus Kunststoffstäben (cyl); durchströmt	2cyl_40_10	0,415	0,209	-0,655	1,231
	2cyl_40_14,2	0,371	0,336	-0,940	1,573
	2cyl_40_18	0,304	0,114	-0,182	0,818
	2cyl_100_10	2,034	0,237	1,046	3,154
	2cyl_100_14	1,374	0,165	0,646	2,173
	2cyl_100_18	0,877	0,153	0,103	1,631
	2cyl_160_10	5,573	0,244	4,636	6,425
	2cyl_160_14,2	3,624	0,209	2,751	4,418
	2cyl_160_18	2,097	0,175	1,397	2,730
cyl; undurch- lässig/rau	2sol_100_10	1,830	0,279	0,882	3,026
	2sol_100_14	1,306	0,206	0,497	2,279
	2sol_100_18	0,887	0,143	0,342	1,503
	2rough_100_10	1,925	0,292	1,012	3,508
	2rough_100_14	1,417	0,193	0,643	2,297
	2rough_100_18	0,898	0,136	0,170	1,473

4.2.3 Widerstandsbeiwert des Pfeilers

Um den Widerstandsbeiwert des Pfeilers ohne Verkläunung zu bestimmen, wurden drei Versuche mit den verschiedenen Durchflüssen am Pfeiler durchgeführt. Abgesehen von dem fehlenden Verkläunungskörper erfolgte der Versuchsablauf analog zu der Versuchsdurchführung, die in Kapitel 3.4 beschrieben ist. Durch die Umformung der Formel (1) auf C_w lässt sich nun der Widerstandsbeiwert gemäß Formel (2) berechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt.

$$C_w = 2 \cdot \frac{F_w}{\rho \cdot V_0^2 \cdot A_p} \quad (2)$$

F_w ... Widerstandskraft [N]

C_w ... Widerstandsbeiwert [-]

ρ ... Dichte Wasser [kg/m^3]

V_0 ... Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

A_p ... projizierte, angeströmte Querschnittsfläche [m^2]

Tabelle 10: Widerstandsbeiwert C_w für den Brückenpfeiler ohne Verkläunung

Versuch	Q [l/s]	U [m/s]	A_{Pfeiler} [m^2]	$F_{w,\text{ref}}$ [N]	$F_{w,\text{gem}}$ [N]	F_w [N]	C_w [-]
Pfeiler ohne VK	40	0,108	0,0088	0,056	-0,003	0,059	1,16
Pfeiler ohne VK	100	0,288	0,0088	0,007	0,350	0,344	0,94
Pfeiler ohne VK	160	0,463	0,0088	-0,054	0,889	0,943	1,00

4.2.4 Frequenzanalyse der Kraftmessungen

Aufgrund der Schwingungen der Rinne wurde eine Spektralanalyse der Kraftmessungen durchgeführt, um gegebenenfalls dominanten Frequenzen zu erkennen.

In Abbildung 30 ist das Spektrum für einen Pfeiler ohne Verkläunung bei einem Durchfluss von $Q = 160$ l/s dargestellt. Berechnet man die Ablösefrequenz $f = St \cdot v / d$ (Jirka, 2007) mit einer Strouhal-Zahl $St = 0,2$, so kommt man zu dem Ergebnis, dass die Ablösefrequenz bei etwa 2,1 Hz liegt.

Höhere Ausschläge sind zwar in höheren Frequenzbereichen erkennbar z.B. bei etwa 6 Hz, im Bereich um die 2,1 Hz (rote Markierung) sind jedoch keine dominanten Frequenzen zu sehen. Ansonsten wäre es möglich die dominanten Frequenzen, die nicht aufgrund der Pumpe oder der Wellen verursacht werden, zu extrahieren, und daraus eine Kraft zu berechnen, die dann subtrahiert beziehungsweise addiert werden kann.

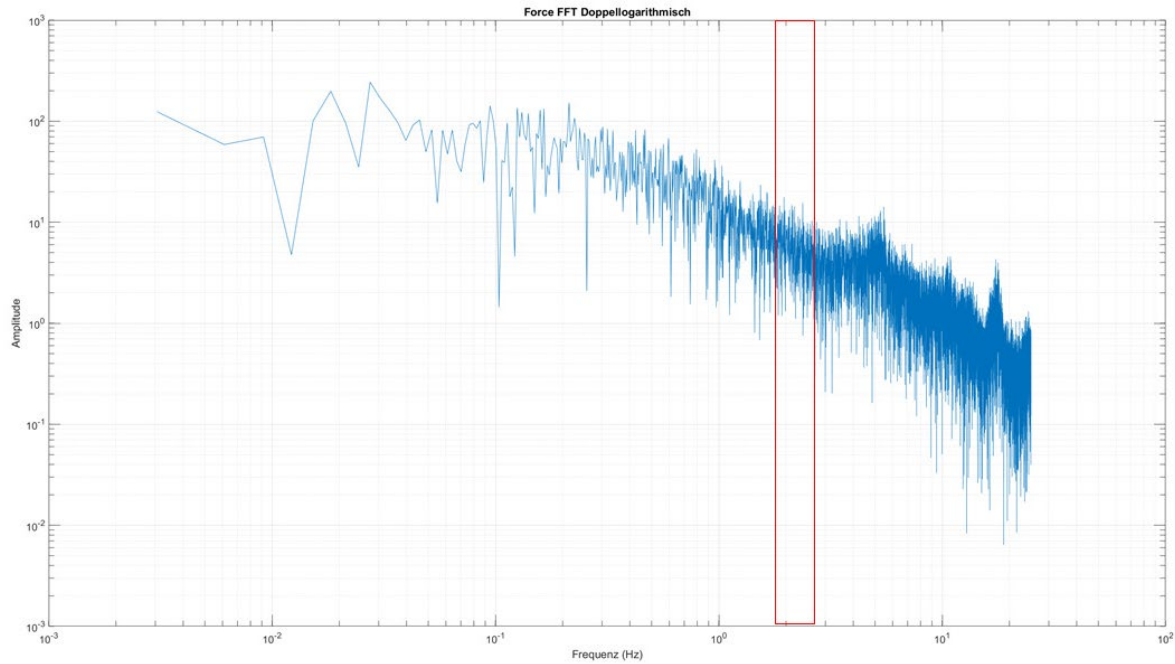


Abbildung 30: Spektralanalyse bei $Q = 160 \text{ l/s}$ mit Pfeiler. (Grafik Wolff M., 2021)

4.3 Fehlerabschätzung der Messgrößen

Zum einen bringen experimentelle Daten zwangsläufig eine Messungenauigkeit mit sich, wobei auch der Faktor Mensch eine Rolle spielt, zum anderen weisen Messwerte, wie etwa die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der Turbulenz der Rinne und der Asymmetrie im Zulauf, eine gewisse Streuung auf.

Die Ungenauigkeiten der Messgrößen können mit folgenden Größenordnungen angegeben werden:

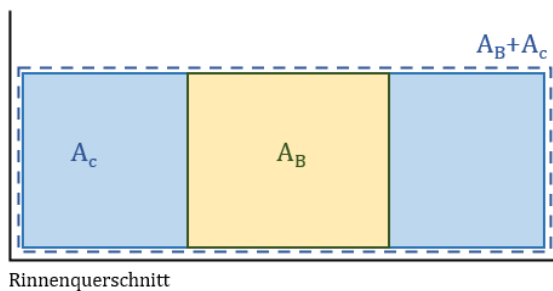
- | | |
|--|-----------------------------|
| • Wassertiefe | Ungenauigkeit ca. $\pm 2\%$ |
| • Freie Höhe | Ungenauigkeit ca. $\pm 2\%$ |
| • Flächenbestimmung | Ungenauigkeit ca. $\pm 5\%$ |
| • Geschwindigkeitsmessung für U_0 | Ungenauigkeit ca. $\pm 1\%$ |
| • Durchfluss Q
(Magnetisch-induktiver Durchflussmesser MID) | Ungenauigkeit ca. $\pm 2\%$ |
| • Kraftmessung F_w | Ungenauigkeit ca. $\pm 4\%$ |

5 Berechnungsansätze - Kräfte durch Verklausungen

In diesem Kapitel werden bestehende Berechnungsansätze zur Bestimmung des Widerstandsbeiwerts C_w untersucht und mit den gemessenen Werten aus den durchgeführten Versuchen gegenübergestellt. Im zweiten Schritt erfolgt die Ableitung eines eigenen Berechnungsverfahrens.

5.1 Anwendung der Berechnungsverfahren

Eine Möglichkeit, um die Widerstandskraft an Brückenpfeilern zufolge Verklausungen zu bestimmen, bietet der Bericht des *National Cooperative Highway Research Program* (Parola et al., 2000). Als wichtiger Parameter für die Ermittlung des Widerstands wurde darin der Verbaugrad (B) herangezogen. Also das Verhältnis von dem Querschnitt, der von der Verklausung versperrt wird, zu dem Querschnitt im Bereich der Verklausung, der frei durchströmt wird (Abbildung 31). In den Versuchen an der *University of Louisville*, die maßgeblich für den Bericht herangezogen wurden, beinhaltete der Versuchsaufbau eine vertikal ausgerichtete, undurchlässige Platte, die an einem horizontalem Kraftaufnehmer befestigt war. Durch unterschiedlich breite Platten wurde der Verbaugrad variiert. Die Platte reichte über die gesamte Wasserspiegelhöhe, wodurch keine Unterströmung der Verklausung möglich war.



$$B = \frac{A_B}{A_B + A_C} \quad (9)$$

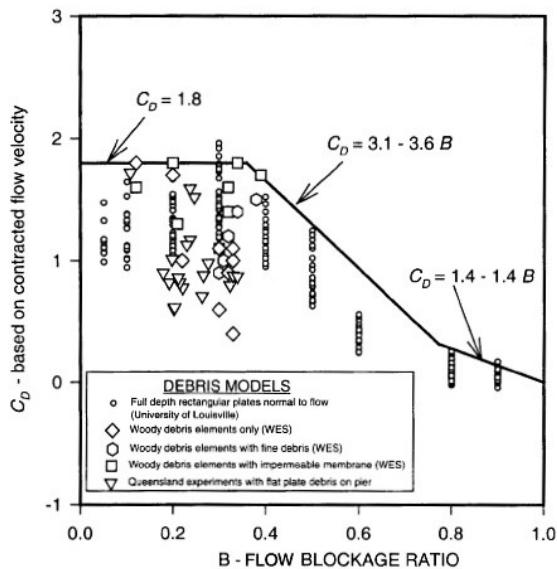
B ... Verhältnis Querschnitt blockiert zu Gesamtquerschnitt [-]

A_B ... blockierter Querschnitt durch die Verklausung [m^2]

A_C ... unbehinderter, durchströmter Querschnitt [m^2]

Abbildung 31: Verbaugrad B ; Definition der Flächen im Rinnenquerschnitt;

Der Bericht (Parola et al., 2000) bietet vier Ansätze, um den Widerstandsbeiwert zu ermitteln und gibt am Ende eine umhüllende Linie für den C_w -Wert auf der sicheren Seite an (Abbildung 32). Im Folgenden werden nun diese Ansätze auf die, im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuche, angewendet und miteinander verglichen.



B - Range	Fr - Range	$C_D \triangleq C_w$
$B < 0.36$	$Fr < 0.4$	$C_D = 1.8$
$B < 0.36$	$0.4 < Fr < 0.8$	$C_D = 2.6 - 2.0 Fr$
$0.36 < B < 0.77$	$Fr < 1$	$C_D = 3.1 - 3.6 B$
$B > 0.77$	$Fr < 1$	$C_D = 1.4 - 1.4 B$

Tabelle 11: Widerstandsbeiwert C_w als Funktion des Verbaugrades B und der Froudzahl für Verkläunungen an Brückenpfeilern (bearbeitet; Parola et al., 2000)

Abbildung 32: Widerstandsbeiwert C_w als Funktion des Verbaugrades B für Verkläunungen an Brückenpfeilern (Parola et al., 2000)

5.1.1 Methode 1: Berücksichtigung der Anströmgeschwindigkeit als Referenzgeschwindigkeit

Für die Berechnung der Widerstandskraft (Formel 10) wird der Widerstandsbeiwert C_w nach Tabelle 11 (aus Parola et al., 2000) in Abhängigkeit des Verbaugrades und der Froudzahl bestimmt. Als Referenzgeschwindigkeit wird bei Methode 1 die Anströmgeschwindigkeit V_a berücksichtigt. Diese wurde, wie zuvor beschrieben, mittels ADV gemessen und anschließend über die Tiefe gemittelt (Kapitel 4.1.2). Zur Bestimmung der angeströmten Querschnittsfläche A_{ou} und somit auch der Verbaugrad B wird im Bericht ausschließlich die senkrechte, projizierte Fläche des Verkläunungskörpers herangezogen. Die blockierte Fläche durch den unteren Teil des Pfeilers, an dem sich die Verkläunung befindet, wird hier nicht betrachtet.

$$F_w = C_w \rho \frac{V_a^2}{2} A_{ou} \quad (10)$$

F_w ... Widerstandskraft [N]

C_w ... Widerstandsbeiwert [-]

ρ ... Dichte [kg/m^3]

V_a ... Anströmgeschwindigkeit [m/s]

A_{ou} ... projizierte, angeströmte Querschnittsfläche
= A_{vk} [m^2]

Trägt man nun die berechnete Widerstandskraft $F_{w,\text{berechnet}}$ und die gemessene Kraft $F_{w,\text{gemessen}}$ aus den durchgeführten Versuchen im Labor der TU Wien in einem Diagramm gegeneinander auf, zeigt sich folgendes Bild:

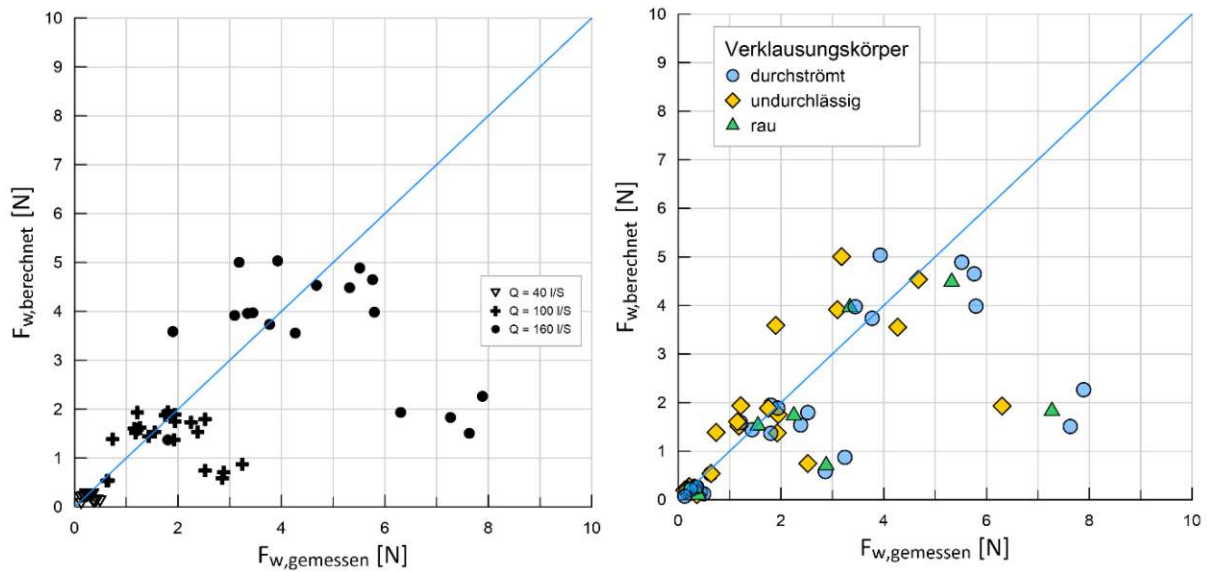


Abbildung 33: Methode 1 - Kraft F_w berechnet versus Kraft F_w gemessen im Labor; links: in Abhängigkeit vom Durchfluss Q dargestellt; rechts: durchströmt, undurchlässig und rau

Einige Datenpunkte befinden sich durchaus im Bereich der 45°-Linie, was bedeutet, dass die tatsächlich gemessene Kraft der berechneten Kraft entspricht. Viele Punkte liegen jedoch unterhalb der Linie, die gemessene Widerstandskraft wird also unterschätzt. Für die Punkte oberhalb der Linie wird die gemessene Kraft überschätzt, jedoch liegen diese Punkte zumindest auf der sicheren Seite.

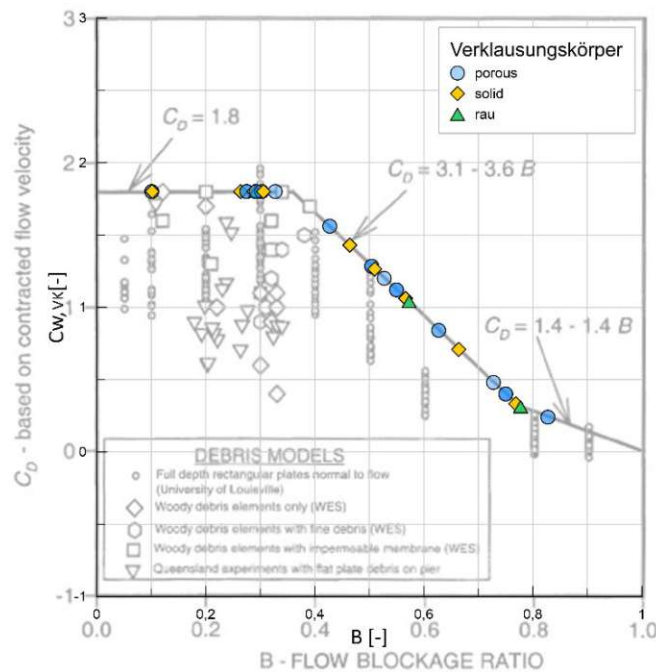


Abbildung 34: Methode 1 – Gegenüberstellung des Widerstandsbeiwert C_w und dem Verbaugrad B

Formt man Formel 10 auf C_w um, so kann man den Widerstandsbeiwert für die durchgeführten Versuche in Abhängigkeit des Verbaugrades im Diagramm von Parola et al. darstellen (Abbildung 34).

5.1.2 Methode 2: Berücksichtigung der durchschnittlichen, verengten Strömung als Referenzgeschwindigkeit

Die Berechnung der Widerstandskraft erfolgt analog zu Methode 1 mit dem Unterschied, dass anstatt der Anströmgeschwindigkeit nun die verengte Strömungsgeschwindigkeit V_c als Referenzgeschwindigkeit verwendet wird.

$$F_W = C_W \rho \frac{V_c^2}{2} A_{ou} \quad (11)$$

F_W ... Widerstandskraft [N]

C_W ... Widerstandsbeiwert [-]

ρ ... Dichte [kg/m^3]

V_c ... verengte Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

A_{ou} ... projizierte, angeströmte Querschnittsfläche
= A_{VK} [m^2]

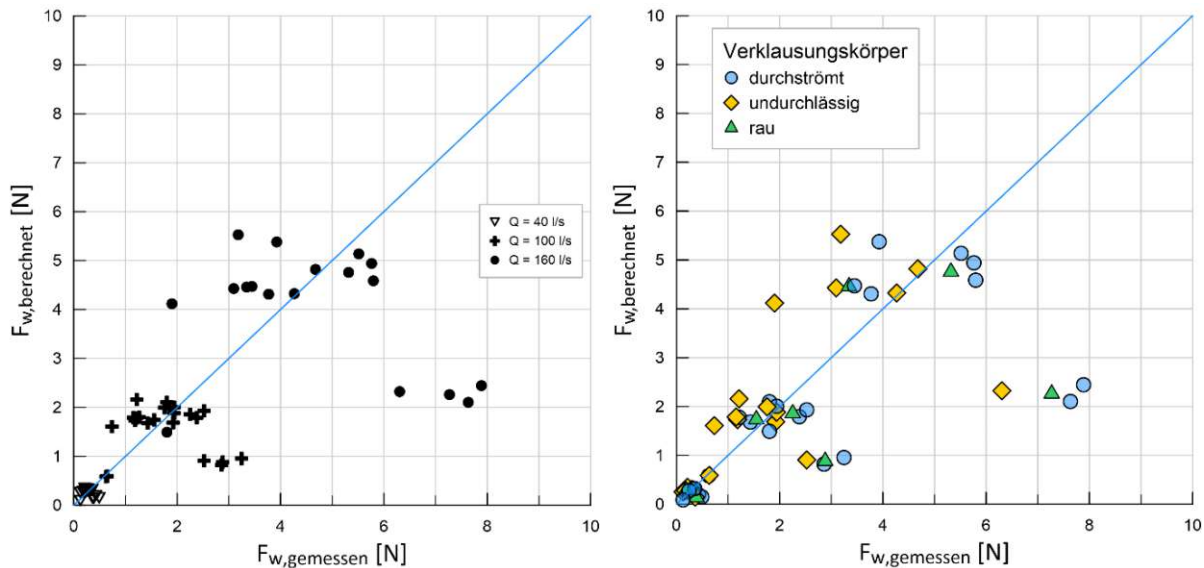


Abbildung 35: Methode 2 - Kraft F_W berechnet versus Kraft F_W gemessen im Labor; links: in Abhängigkeit vom Durchfluss Q dargestellt; rechts: durchströmt, undurchlässig und rau

Ganz ähnlich wie bei Methode 1 gestaltet sich hier das Bild für den Vergleich zwischen gemessener und berechneter Kraft: die Datenpunkte weichen teilweise stark von der 45°-Linie ab (Abbildung 35). Die gemessene Widerstandskraft wird durch die Berechnung teilweise sowohl unterschätzt als auch überschätzt. Somit kann dieses Berechnungsverfahren nicht als ausreichend genau angesehen werden, um die Widerstandskraft abzuschätzen.

Bei den Methoden 3 und 4 wird die Widerstandskraft in eine hydrostatische Kraft und in eine Strömungskraft aufgeteilt. Um den hydrostatischen Anteil zu bestimmen, wurde in den Versuchen an der *University of Louisville* (Parola et al., 2000) der Wasserstand

oberhalb und unterhalb der Platte mit je einem Stechpegel gemessen und anschließend der Druckunterschied bestimmt.

Bei den durchgeführten Versuchen im Zuge dieser Arbeit wurden die Wasserstände vor- und nach der Verklausung dafür allerdings nicht ausreichen genau gemessen. Daher werden diese beiden Methoden hier nicht genauer beleuchtet.

5.2 Ableitung eines eigenen Berechnungsverfahrens

Nun soll ein eigenes Berechnungsverfahren entwickelt werden, das eine genauere Abschätzung der Widerstandskraft liefert. Dabei wird der Ansatz der Standardisierung über den Parameter „Verbaugrad“ aus dem *Highway Report* (Parola et al., 2000) aufgegriffen und präzisiert.

In der modifizierten Berechnung wird nun auch der Brückenpfeiler berücksichtigt. Der Verbaugrad ergibt sich also wie zuvor aus dem Verhältnis der blockierten Querschnittsfläche zur Referenzquerschnittsfläche A . Der blockierte Querschnitt setzt sich nun jedoch aus der vertikalen, projizierten Fläche des Verklausungskörpers unter dem Wasserspiegel A_{VK} , und der blockierten Querschnittsfläche durch den Brückenpfeiler $A_{Pfeiler}$ zusammen. Die Flächen sind in Abbildung 36 dargestellt.

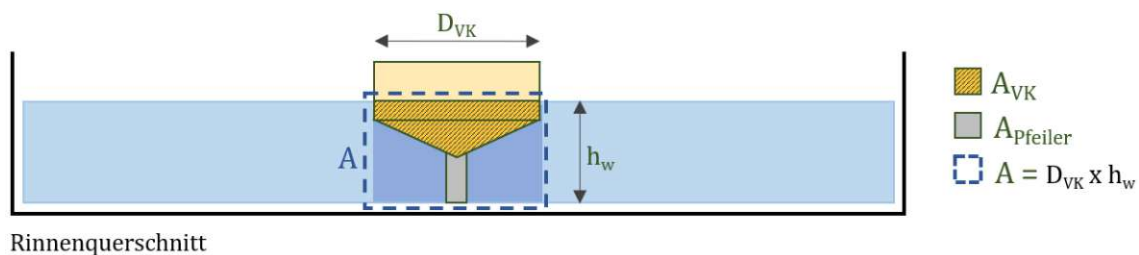


Abbildung 36: Verbaugrad B; Definition der Flächen im Rinnenquerschnitt;

$$B = \frac{A_{VK} + A_{Pfeiler}}{A} \quad (12)$$

B ... Verhältnis blockierte Querschnittsfläche zur Referenzquerschnittsfläche $A = D_{VK} \cdot h_w$ [-]

A_{VK} ... vertikale, projizierte Fläche des Verklausungskörpers unter dem Wasserspiegel [m^2]

$A_{Pfeiler}$... blockierter Querschnittsfläche durch den Brückenpfeiler [m^2]

D_{VK} ... Durchmesser Verklausungskörper [m]

h_w ... Wassertiefe [m]

Um die reine Kraft, die von der Verklausung aufgenommen wird, zu erhalten kann die gesamte gemessene Kraft F_w in einen Anteil Verklausungskörper und einen Anteil Pfeiler

aufgeteilt werden. Die Kraft $F_{w,Pfeiler}$ die der Brückenpfeiler aufnimmt, lässt sich mit Hilfe der Formel (1) berechnen, da der C_w -Wert aus den anfänglichen Versuchen an dem Brückenpfeiler ohne Verkläunung bereits bestimmt wurde (Tabelle 10). Für die Fläche wird nun jene angeströmte Fläche $A_{Pfeiler}$ eingesetzt, welche nicht von der Verkläunung verdeckt wird (Abbildung 36). Durch Abziehen von $F_{w,Pfeiler}$ von der gesamten, gemessenen Kraft F_w erhält man schließlich die Kraft $F_{w,VK}$, die auf den Verkläunungskörper wirkt.

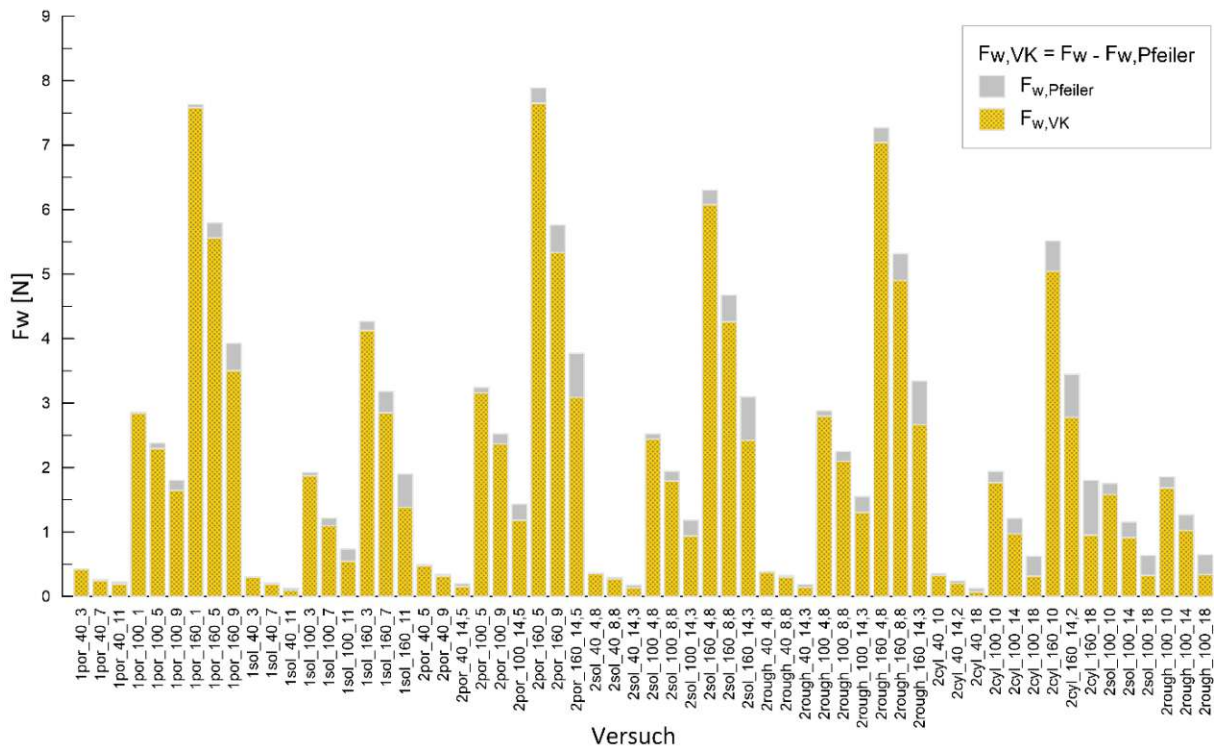


Abbildung 37: Verteilung der Widerstandskraft F_w zwischen Verkläunungskörper $F_{w,VK}$ und Pfeiler $F_{w,Pfeiler}$

Nachdem die Widerstandskraft zufolge der Verkläunung bestimmt wurde, ist es nun möglich die Formel (1) umzuformen und den Widerstandsbeiwert $C_{w,VK}$ zu berechnen:

$$C_w = \frac{F_w}{\rho \frac{V_a^2}{2} A_{VK}} \quad (13)$$

C_w ... Widerstandsbeiwert [-]

F_w ... Widerstandskraft [N]

ρ ... Dichte [kg/m^3]

V_a ... Anströmgeschwindigkeit [m/s]

A_{VK} ... projizierte, angeströmte Querschnittsfläche der Verkläunung [m^2]

Die Ergebnisse dazu finden sich in Tabelle 12, sowie die Reynoldszahl, die gemäß der Formel (14) unter Einbezug des Verbaugrades ermittelt wurde.

$$Re_{vK} = \frac{U \cdot B \cdot h_w}{\nu} \quad (14)$$

Re_{vK} ... Reynoldszahl [-]

U ... tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit [m/s]

B ... Verbaugrad [-]

h_w ... Wassertiefe [m]

ν ... dynamische Viskosität [m²/s]

Tabelle 12: Wichtige Kenngrößen gemäß der neuen Berechnungsmethode

	Q	A_{VK}	B	$F_{w,Pfeiler}$	$F_{w,VK}$	$C_{w,VK}$	Re_{VK}	
Versuch	[l/s]	[m ²]	[-]	[N]	[N]	[-]	[-]	
kegelförmiger VK; durchströmt	1por_40_3	40	0,0512	0,75	0,009	0,420	1,42	16061
	1por_40_7	40	0,0371	0,57	0,021	0,247	1,15	12294
	1por_40_11	40	0,0231	0,40	0,032	0,192	1,44	8527
	1por_100_1	100	0,0583	0,83	0,017	2,843	1,18	47991
	1por_100_5	100	0,0442	0,66	0,086	2,294	1,25	37917
	1por_100_9	100	0,0301	0,48	0,155	1,647	1,32	27843
	1por_160_1	160	0,0583	0,83	0,047	7,583	1,21	77203
	1por_160_5	160	0,0442	0,66	0,236	5,560	1,17	60997
	1por_160_9	160	0,0301	0,48	0,424	3,503	1,09	44791
kegelförmiger VK; undurchlässig	1sol_40_3	40	0,0468	0,68	0,009	0,297	1,10	14697
	1sol_40_7	40	0,0327	0,51	0,021	0,192	1,01	10931
	1sol_40_11	40	0,0186	0,33	0,032	0,093	0,86	7164
	1sol_100_3	100	0,0468	0,68	0,052	1,872	0,97	39307
	1sol_100_7	100	0,0327	0,51	0,120	1,096	0,81	29233
	1sol_100_11	100	0,0186	0,33	0,189	0,547	0,71	19159
	1sol_160_3	160	0,0468	0,68	0,141	4,126	0,82	63233
	1sol_160_7	160	0,0327	0,51	0,330	2,850	0,81	47027
	1sol_160_11	160	0,0186	0,33	0,519	1,381	0,69	30821
zylinderförmiger VK; durchströmt	2por_40_5	40	0,0528	0,78	0,015	0,478	1,56	16816
	2por_40_9	40	0,0387	0,61	0,027	0,317	1,41	13049
	2por_40_14,5	40	0,0194	0,37	0,043	0,155	1,39	7870
	2por_100_5	100	0,0528	0,78	0,086	3,157	1,44	44974
	2por_100_9	100	0,0387	0,61	0,155	2,369	1,48	34900
	2por_100_14,5	100	0,0194	0,37	0,249	1,184	1,48	21048
	2por_160_5	160	0,0528	0,78	0,236	7,653	1,35	72349
	2por_160_9	160	0,0387	0,61	0,424	5,337	1,29	56143
	2por_160_14,5	160	0,0194	0,37	0,684	3,088	1,49	33859
zylinderförmiger VK; undurchlässig	2sol_40_4,8	40	0,0541	0,79	0,014	0,350	1,12	16997
	2sol_40_8,8	40	0,0399	0,61	0,026	0,271	1,17	13225
	2sol_40_14,3	40	0,0203	0,37	0,042	0,135	1,15	8037
	2sol_100_4,8	100	0,0541	0,79	0,082	2,439	1,09	45458
	2sol_100_8,8	100	0,0399	0,61	0,151	1,791	1,08	35368
	2sol_100_14,3	100	0,0203	0,37	0,246	0,938	1,12	21494
	2sol_160_4,8	160	0,0541	0,79	0,226	6,076	1,05	73128
	2sol_160_8,8	160	0,0399	0,61	0,415	4,260	1,00	56896
	2sol_160_14,3	160	0,0203	0,37	0,674	2,423	1,11	34577
zylinderförmiger VK; undurchlässig; rau	2rough_40_4,8	40	0,0547	0,79	0,014	0,374	1,18	16990
	2rough_40_8,8	40	0,0403	0,61	0,026	0,300	1,29	13212
	2rough_40_14,3	40	0,0205	0,37	0,042	0,144	1,21	8016
	2rough_100_4,8	100	0,0547	0,79	0,082	2,798	1,23	45439
	2rough_100_8,8	100	0,0403	0,61	0,151	2,099	1,26	35333
	2rough_100_14,3	100	0,0205	0,37	0,246	1,304	1,53	21437
	2rough_160_4,8	160	0,0547	0,79	0,226	7,043	1,20	73098
	2rough_160_8,8	160	0,0403	0,61	0,415	4,903	1,13	56840
	2rough_160_14,3	160	0,0205	0,37	0,674	2,668	1,21	34486
VK aus Kunststoffstäben (cyl); durchströmt	2cyl_40_10	40	0,0355	0,56	0,030	0,325	1,58	12096
	2cyl_40_14,2	40	0,0206	0,38	0,042	0,200	1,68	8136
	2cyl_40_18	40	0,0071	0,21	0,053	0,073	1,77	4554
	2cyl_100_10	100	0,0355	0,56	0,172	1,768	1,20	32351
	2cyl_100_14	100	0,0213	0,39	0,240	0,973	1,10	22265
	2cyl_100_18	100	0,0071	0,21	0,309	0,316	1,07	12178
	2cyl_160_10	160	0,0355	0,56	0,471	5,043	1,33	52043
	2cyl_160_14,2	160	0,0206	0,38	0,669	2,778	1,26	35006
	2cyl_160_18	160	0,0071	0,21	0,849	0,952	1,25	19591
cyl; undurch- lässig/rau	2sol_100_10	100	0,0359	0,56	0,172	1,583	1,06	32311
	2sol_100_14	100	0,0215	0,39	0,240	0,914	1,02	22209
	2sol_100_18	100	0,0072	0,21	0,309	0,327	1,10	12107
	2rough_100_10	100	0,0363	0,56	0,172	1,684	1,12	32272
	2rough_100_14	100	0,0218	0,38	0,240	1,026	1,14	22154
	2rough_100_18	100	0,0073	0,21	0,309	0,338	1,13	12037

Für einen umströmten, glatten Kreiszyylinder entspricht der Widerstandsbeiwert C_w gemäß dem Diagramm in *Jirka, 2007* für den Reynoldszahl-Bereich um 10^4 bis 10^5 , in dem die Versuche durchgeführt wurden, etwa einem Wert von 1,1. Auch in den hier durchgeführten Versuchen mit Kreiszyylinder und diversen Verkläunungskörpern bewegt sich der Widerstandsbeiwert um den Wert von 1,1.

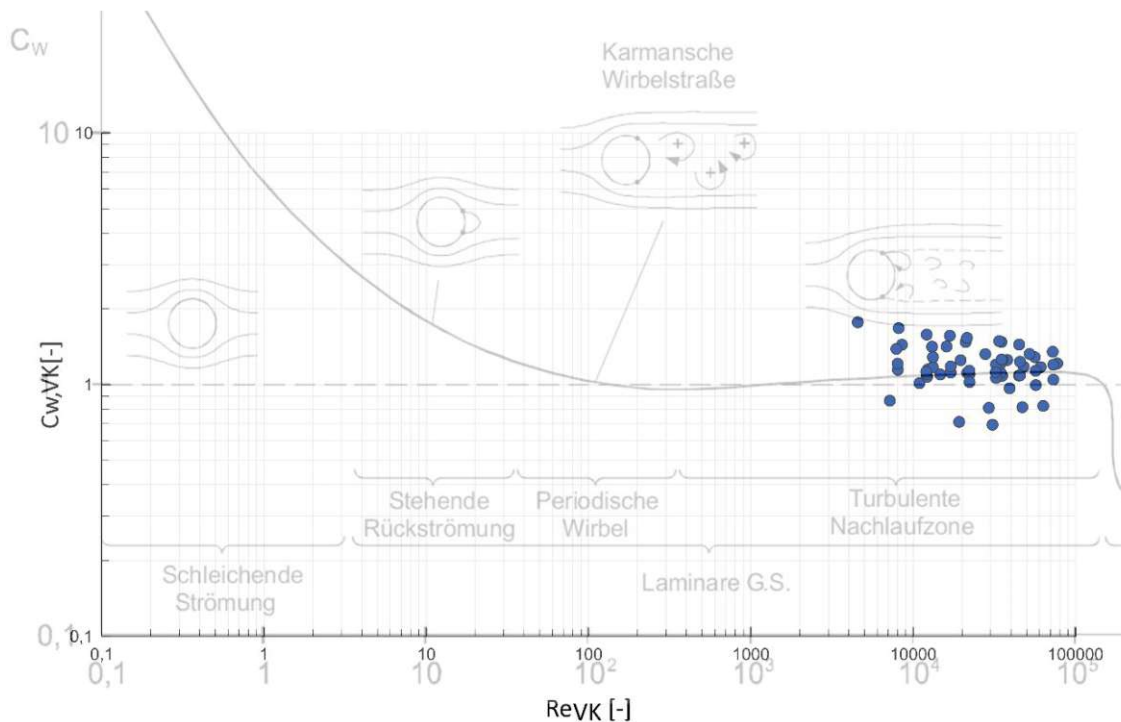


Abbildung 38: Widerstandsbeiwert C_w in Abhängigkeit der Reynoldszahl eines umströmten, glatten Kreiszyinders einschließlich der Versuchsergebnisse (bearbeitet; Jirka, 2007)

Stellt man den Widerstandsbeiwert des Verkläunungskörpers $C_{w,VK}$ dem Verbaugrad B gegenüber und vergleicht das Ergebnis mit dem Diagramm aus dem *Highway Report*, zeigt sich das Bild in Abbildung 39. Der Widerstandsbeiwert befindet sich vor allem im Bereich ab einem Verbaugrad von etwa 50% oberhalb der einhüllenden Linie, was bedeutet, dass die tatsächliche Kraft größer ist, als jene die im *Highway Report* abgeschätzt wurde.

Was man aus den Ergebnissen auch ableiten kann, dass der Widerstandsbeiwert und somit auch die Widerstandskraft für den undurchlässigen Verkläunungskörper am geringsten ist, gefolgt von dem durchströmten Verkläunungskörper. Die höchste Widerstandskraft weist der raue Verkläunungskörper auf.

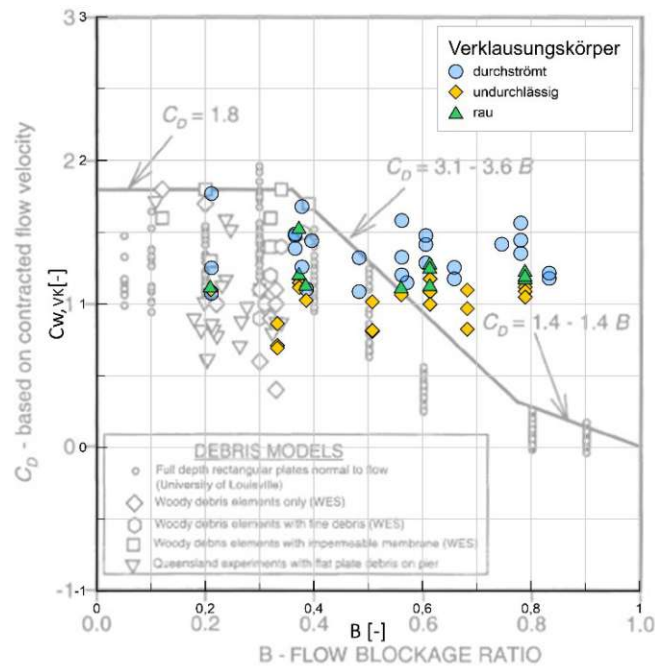


Abbildung 39: Neue Berechnungsmethode – Gegenüberstellung des Widerstandsbeiwerts C_w und dem Verbaugrad B

Die Widerstandskraft verhält sich also unterschiedlich, je nach Randbedingung. Im Folgenden wird der Einfluss auf die Widerstandskraft durch die Parameter Oberflächenrauheit, Porosität und 3D-Form des Verklausungskörpern genauer untersucht.

5.2.1 Oberflächenrauheit

Sieht man sich die Berechnungsergebnisse für die Widerstandskraft hinsichtlich der verschiedenen Oberflächenrauheiten an, zeigt sich, dass die Verklausungskörper mit glatter Oberfläche (aus XPS bzw. Folie) die geringsten Werte aufweisen, gefolgt von jenen mit rauher Oberfläche. Die höchsten Werte weisen die Körper mit unregelmäßiger Oberflächenbeschaffenheit auf, welche aus Filtermaterial und Kunststoffzylindern bestehen. In Tabelle 13 sind die Verklausungskörper nach Oberflächenrauheit und der Größe des mittleren C_w -Wertes aufsteigend aufgelistet. Der Mittelwert liegt hier zwischen 0,9 für den glatten Körper aus XPS und 1,4 für den Körper aus Kunststoffzylindern. Außerdem sind die Standardabweichung sowie die Minimal- und Maximalwerte des C_w -Wertes angegeben.

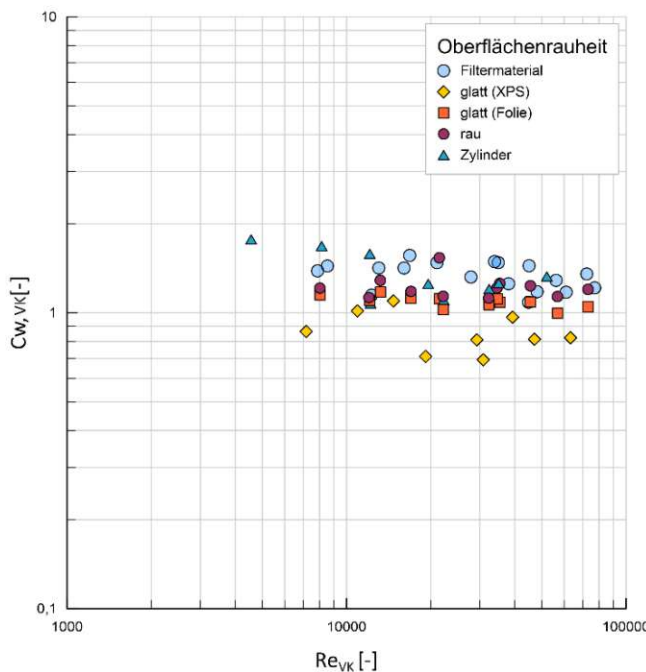


Tabelle 13: Widerstandsbeiwert C_w in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit

Oberflächenrauheit	$C_w [-]$			
	Mittelwert	STABW	Min	Max
glatt (XPS)	0,9	0,14	0,7	1,1
glatt (Folie)	1,1	0,05	1,0	1,2
rau	1,2	0,11	1,1	1,5
Filtermaterial	1,3	0,14	1,1	1,6
Zylinder	1,4	0,25	1,1	1,8

Abbildung 40: Oberflächenrauheit: Gegenüberstellung des Widerstandsbeiwerts C_w und der Reynoldszahl Re_{vk}

Zwei mögliche Erklärungen für den größeren Widerstandsbeiwert von dem Fall „rau“ gegenüber „glatt“ zeigt *Hofmann* in seiner Arbeit auf (Hofmann, 2021):

Auf Basis eines TU-Projektes wurden im Wasserbaulabor Versuche mit einem glatten und einem rauen Zylinder durchgeführt und aufgrund der Verteilung der gemessenen Schubspannungen kann man darauf schließen, dass die Nachlaufzone bei dem rauen Zylinder größer war. Eine größere Nachlaufzone bedeutet auch ein höherer C_w -Wert. Hinsichtlich der zweiten Erklärung wird eine Parallele zwischen einem zylinderförmigen Querschnitt mit rauer Oberfläche und einem quaderförmigen Querschnitt mit glatter Oberfläche gezogen. Bei einem eckigen Querschnitt befindet sich der Ablösepunkt in der Nähe des Staupunktes was dazu führt, dass die Nachlaufzone größer wird und damit auch der C_w -Wert größer ist. Ähnlich verhält es sich bei dem Zylinder mit rauer Oberfläche (Abbildung 41).

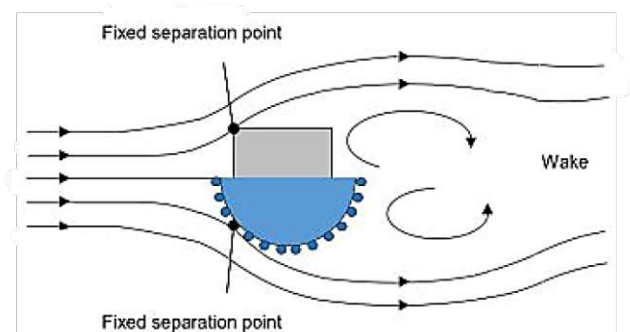


Abbildung 41: Ablösepunkte (engl. fixed separation point) an einem glatten quaderförmigen - und einem zylinderförmigen Körper mit rauer Oberfläche (Grafik Schnauder I., 2021)

Die Verkläunungskörper mit den Oberflächen Filtermaterial und Jenem, bestehend aus Kunststoffzylindern, weisen die größten Widerstandsbeiwerte auf. Diese beiden Fälle stellen außerdem die durchströmten Fälle dar, was darauf schließen lässt, dass die Porosität hier einen Einfluss hat. Eine genauere Betrachtung hierzu folgt im nächsten Kapitel.

5.2.2 Porosität

Teilt man die Berechnungsergebnisse in durchströmte Versuche (Filtermaterial und Kunststoffzylinder) und undurchlässige Versuche, zeigen sich folgende Ergebnisse gemäß Abbildung 42. Der Widerstandsbeiwert für alle undurchlässigen Versuche war am niedrigsten und lag im Mittel bei 1,1. Für die durchströmten Verkläunungskörper aus Filtermaterial lag der Mittelwert etwas höher bei 1,3. Der höchste mittlere Widerstandsbeiwert ließ sich bei den durchströmten Kunststoffzylindern beobachten. In

Tabelle 14 sind die Standardabweichung, sowie die Minimal- und Maximalwerte aufgelistet.

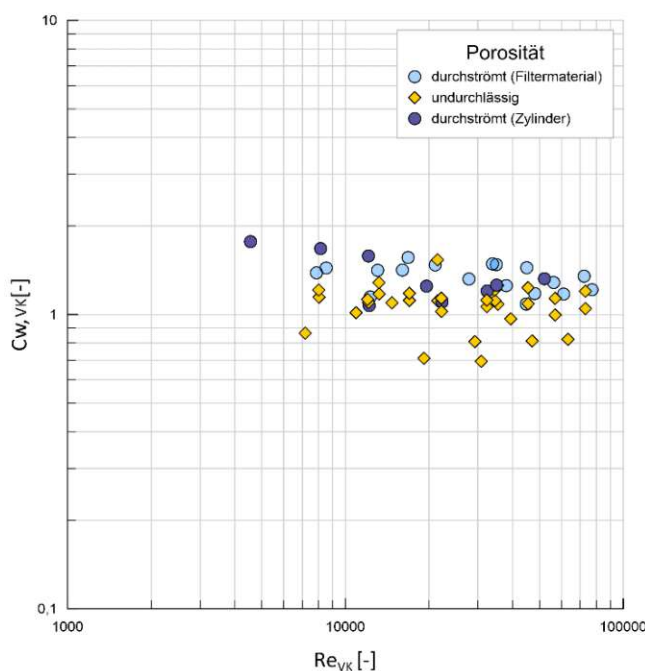


Tabelle 14: Widerstandsbeiwert C_w in Abhängigkeit der Porosität

Porosität	C_w [-]			
	Mittelwert	STABW	Min	Max
undurchlässig (0%)	1,1	0,17	0,7	1,5
durchström (~98%) (Filtermaterial)	1,3	0,14	1,1	1,6
durchström (~58%) (Zylinder)	1,4	0,25	1,1	1,8

Abbildung 42: Porosität: Gegenüberstellung des Widerstandsbeiwerts C_w und der Reynoldszahl Re_{vk}

Hier lässt sich beobachten, dass die durchströmten Verkläunungskörper einen höheren C_w -Wert aufweisen, als die undurchlässigen Körper.

Stellt man die beiden durchströmten Fälle gegenüber, haben wir zum einen den Verklausungskörper aus Kunststoffzylindern mit einer Porosität von etwa 58% und einer Permeabilität von etwa $284,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ und zum anderen den Verklausungskörper aus Filtermaterial mit einer sehr hohen Porosität von etwa 98% und einer Permeabilität von etwa $45,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$. Letztere ist also deutlich niedriger (Cocci, 2021). Den etwas höheren mittleren C_w -Wert weist der Verklausungskörper aus den Kunststoffzylindern auf.

Demnach ist hier der Porosität, also der Hohlraumgehalt eine bedeutendere Rolle zuzuschreiben als der Permeabilität. Denn trotz größerer Durchgängigkeit (= Permeabilität) bei den Kunststoffzylindern ist der mittlere Widerstandsbeiwert C_w etwas höher als bei dem Verklausungskörper aus Filtermaterial mit geringerer Durchgängigkeit aber höherer Porosität.

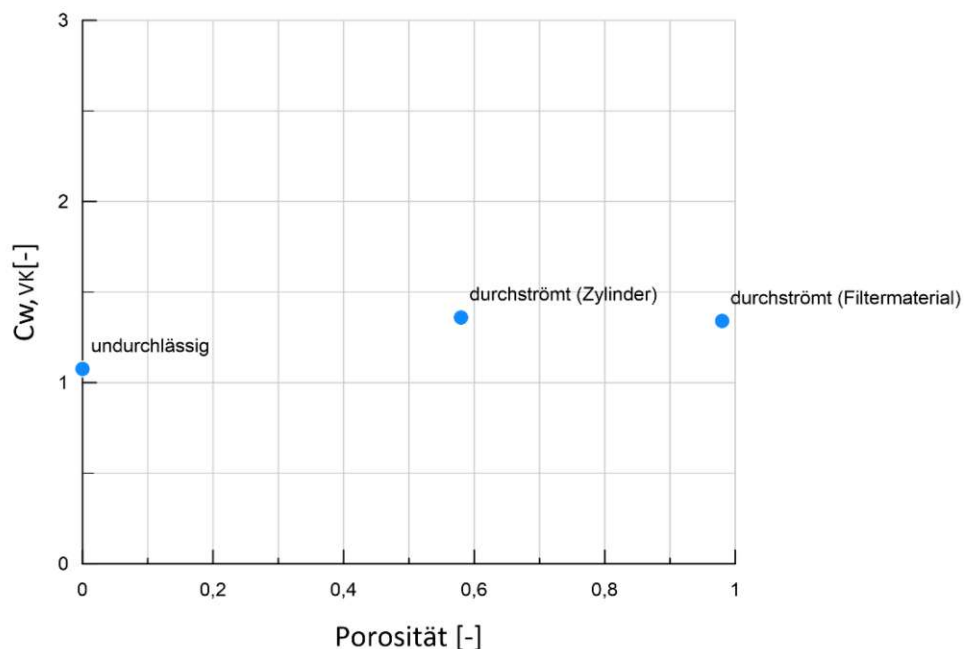


Abbildung 43: Gegenüberstellung des mittleren Widerstandsbeiwerts C_w und der Porosität

Diese Ergebnisse decken sich mit jenen aus der experimentellen Studie von *Taddei et al., 2016*. Auch sie stellten fest, wie auch *Nicolle & Eames, 2011* und *Chang & Constantinescu, 2015*, dass mit zunehmender Dichte eines durchströmten Körpers, also mit abnehmender Porosität, der Widerstandsbeiwert steigt. Prinzipiell hängt der Widerstandsbeiwert hauptsächlich von der Ausdehnung des Nachlaufs und dem Geschwindigkeitsverlust ab. Bei durchströmten Körpern gibt es einen *bleeding flow*, also eine Strömung, die den Verklausungskörper durchströmt und seitlich, in vertikaler Richtung, und an der Rückseite wieder austritt. Bei geringerer Porosität, also mit steigender Dichte, nimmt der *bleeding flow* an der Leeseite der Verklausung ab führt zu höheren Geschwindigkeitsverlusten. Zum einen sorgt der seitliche *bleeding flow* dafür, dass der Stromfaden um den Körper früher abreißt und sich der Nachlauf verbreitert, zum anderen sorgt der vertikale *bleeding flow* dafür, dass sich der Nachlauf in vertikale

Richtung vergrößert und bewirkt eine Verlagerung desselben stromabwärts (Taddei et al., 2016). Eine Vergrößerung des Nachlaufs führt zu einem höheren Strömungswiderstand also einem höheren Widerstandsbeiwert.

Nun wollen wir aber noch genauer auf die äußerst interessante Tatsache eingehen, dass die durchströmten Verkläunungskörper einen höheren C_w -Wert aufweisen, als die undurchlässigen Körper.

Im Zuge der Laborversuche wurden ein undurchlässiger und ein durchströmter Körper in der Strömung platziert und die Strömung vor dem Verkläunungskörper eingefärbt, um den Nachlauf sichtbar zu machen. Wie Abbildung 44 zeigt, ist in einer Entfernung von etwa $10 \times D$ (D = Durchmesser Verkläunungskörper) die Breite des Nachlaufs, entgegen den anfänglichen Erwartungen, für den durchströmten Körper beinahe doppelt so groß, wie jene des undurchlässigen Körpers.

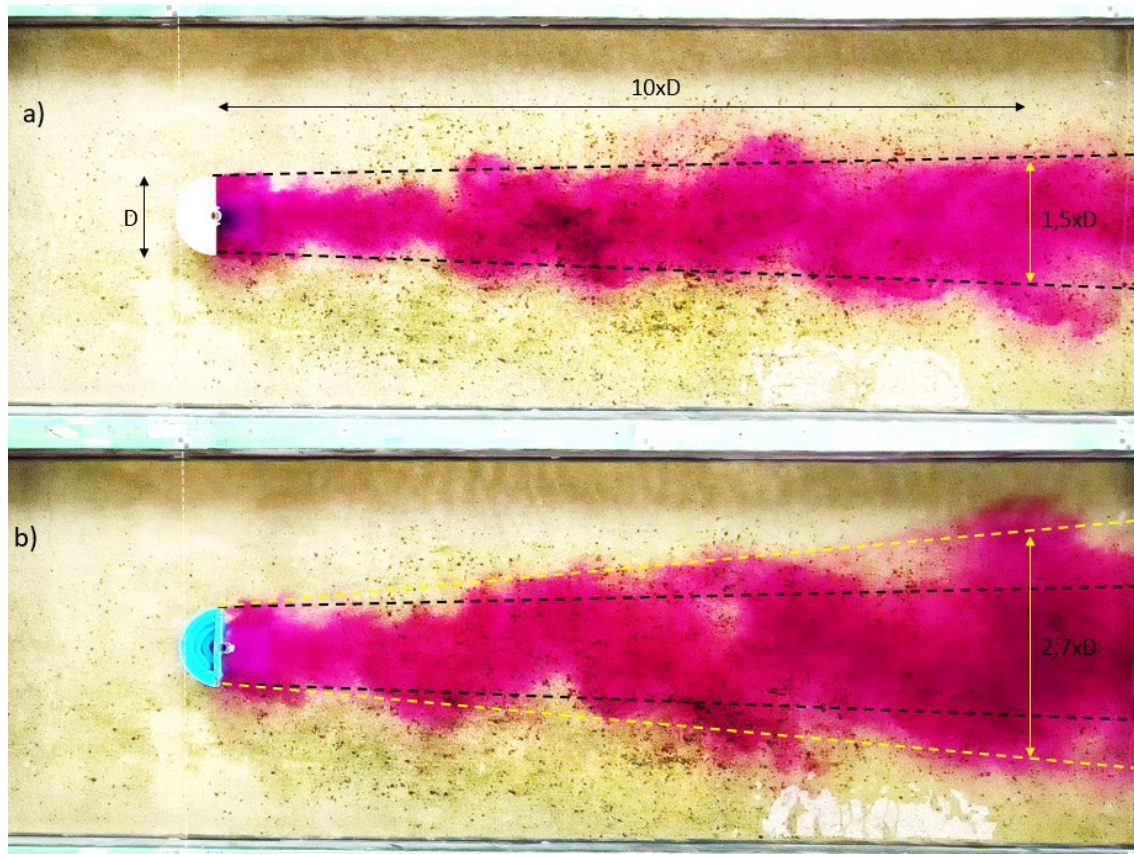


Abbildung 44: Nachlauf eines undurchlässigen Körpers (a) und eines durchströmten Körpers (b)
(Grafik Schnauder I., 2023; adaptiert von Stifter A.)

Taddei et al., 2016 erklären den Unterschied zwischen den beiden Fällen so, dass für den undurchlässigen Verkläunungskörper die stärkeren Scherschichten entlang der Körperoberfläche dafür sorgen, dass sich der Nachlauf stromabwärts verlagert und zu einer geringeren Ausdehnung des Nachlaufs in horizontaler und vertikaler Richtung führt. Im Fall der durchströmten Körper sorgt der *bleeding flow* dafür, dass die

Strömungsablösung früher stromaufwärts erfolgt und sich der Nachlauf in horizontaler und vertikaler Richtung verbreitert. Es entstehen größere Geschwindigkeitsverluste und der Widerstandsbeiwert erhöht sich (Abbildung 45).

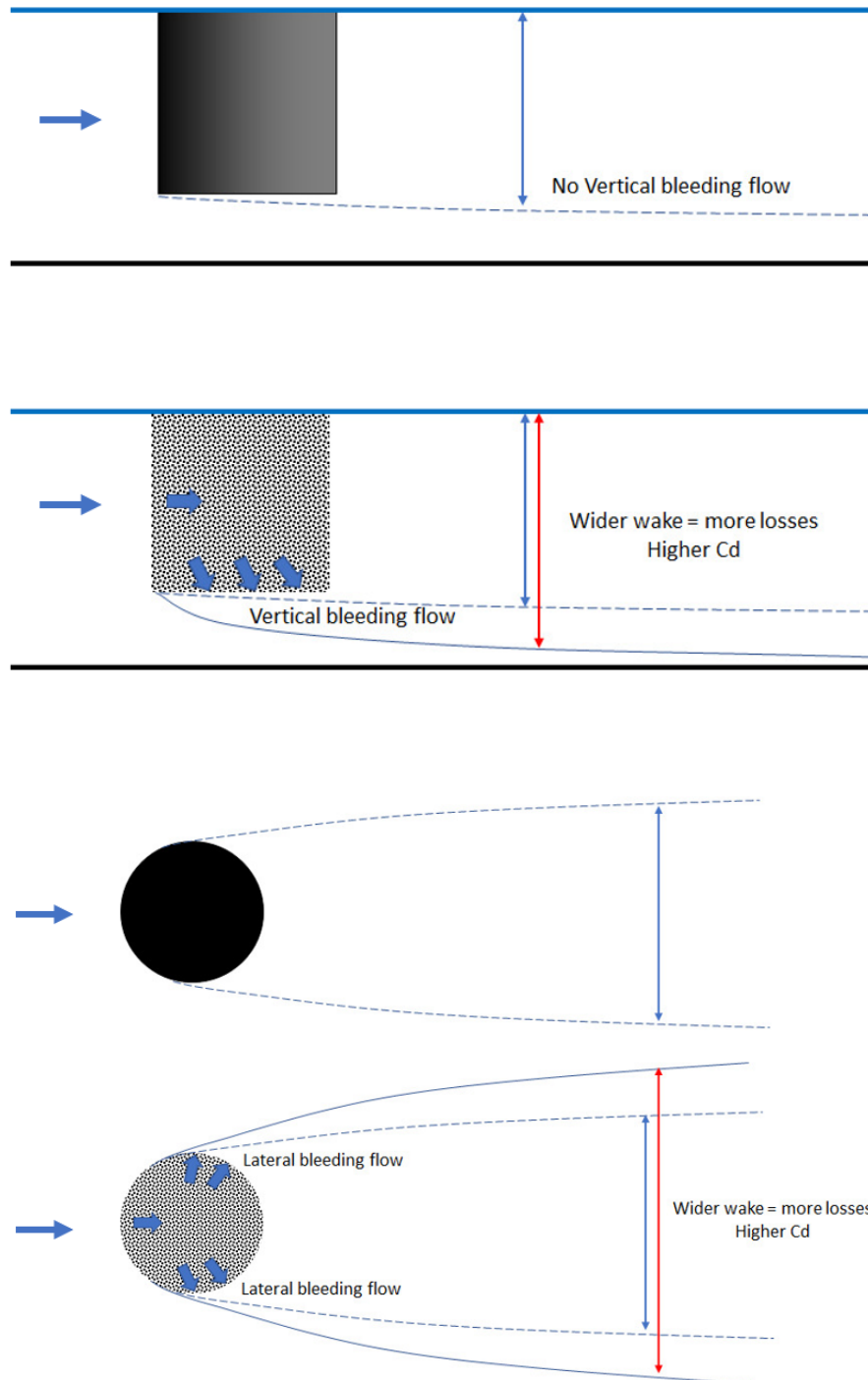


Abbildung 45: Schematische Skizze - Effekte zufolge des *bleeding flows* in der Ansicht (oben) und im Grundriss (unten) für einen undurchlässigen Körper versus einen durchströmten Körper (Grafik Schnauder I., 2023)

In den hier durchgeführten Versuchen und in den Versuchen von *Taddei et al., 2016* wurden Porositäten zwischen 58% und 98% untersucht. Gegenüber steht der Fall des undurchlässigen Verkläunungskörpers mit einer Porosität von 0%. Für weitere

Untersuchungen wäre es daher sehr interessant, auch den Bereich zwischen 0% und 58% Porosität zu untersuchen, da es hier ab einem gewissen Punkt einen Abfall des Widerstandsbeiwerts C_w geben muss.

5.2.3 3D-Form

Betrachtet man nun als letzten Punkt die Berechnungsergebnisse für den Widerstandsbeiwert hinsichtlich der dreidimensionalen Form der Verkläunungskörper stellt man fest, dass der C_w -Wert für die zylinderförmigen Verkläunungskörper etwas höher liegt, als der für die kegelförmigen Körper (Abbildung 46). Wie in Tabelle 15 ersichtlich, liegt der C_w -Wert für die Versuche mit kegelförmigen Verkläunungskörper im Mittel bei 1,1 und für die zylinderförmigen Körper etwas höher bei 1,3.

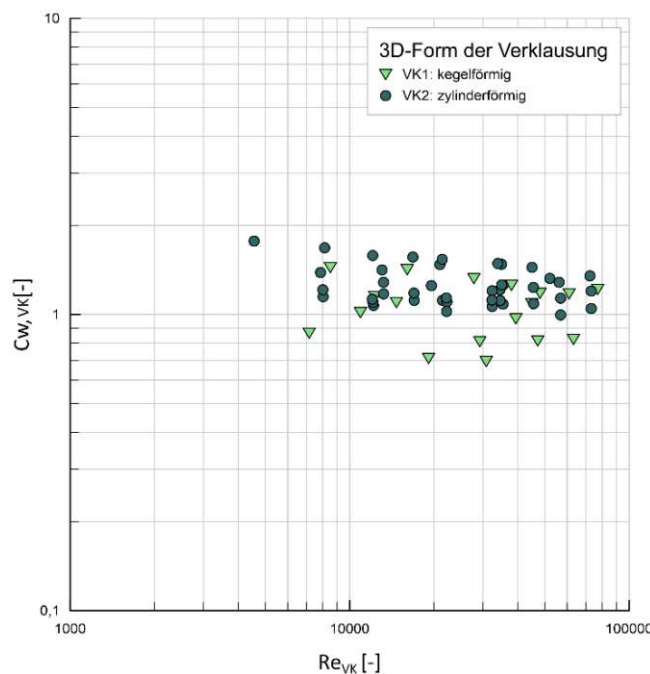


Tabelle 15: Widerstandsbeiwert C_w in Abhängigkeit der 3D-Form der Verkläunung

3D-Form	C_w [-]			
	Mittelwert	STABW	Min	Max
kegelförmig	1,1	0,23	0,7	1,4
zylinderförmig	1,3	0,19	1,0	1,8

Abbildung 46: 3D-Form: Gegenüberstellung des Widerstandsbeiwerts C_w und der Reynoldszahl Re_{VK}

Der Unterschied lässt sich darin erklären, dass der kegelförmige Verkläunungskörper durch seine Form strömungsgünstiger ist. Der zylinderförmige Körper ist strömungsungünstiger, da er schärfere Kanten aufweist. An den Kanten eines Körpers kommt es zu der Strömungsablösung der Grenzschicht, welche einen Reibungswiderstand sowie einen Druckwiderstand verursacht (Surek, 2007). Dies zeigt sich am höheren Widerstandsbeiwert.

6 Zusammenfassung

Spielt die Oberflächenrauheit des Verklausungskörpers eine Rolle?

Anhand der Versuche wurden je nach Oberflächenrauheit unterschiedliche Widerstandsbeiwerte C_w ermittelt. Es wurde festgestellt, dass Verklausungskörper mit rauer Oberfläche für diesen Versuchsaufbau (feste, raue Sohle) gegenüber glatten Körpern den Strömungswiderstand erhöhen. Vergangene Versuche deuten darauf hin, dass durch die raue Oberfläche eine größere Nachlaufzone entsteht, was wiederum zu einem höheren Widerstandsbeiwert führt.

Spielt die Porosität „keine Rolle“?

Nach Auswertung der Kraftmessungen je nach Porosität der verschiedenen Verklausungskörper kam man zu dem Ergebnis, dass die durchströmten Versuche einen höheren Widerstandsbeiwert aufweisen als die undurchlässigen Körper. Den größten Strömungswiderstand zeigte der Verklausungskörper aus Kunststoffzylindern (Porosität = 58%) mit der kleineren Porosität im Gegensatz zu dem Verklausungskörper aus Filtermaterial (Porosität = 98%), obwohl er eine etwa sechs Mal so große Permeabilität aufweist. Die Porosität ist daher ein Faktor, der durchaus für die Ermittlung des Strömungswiderstandes in Betracht zu ziehen ist. Mit Abnahme der Porosität erhöht sich der Widerstandsbeiwert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass je geringer die Porosität ist, desto mehr nimmt der *bleeding flow* ab und es kommt zu höheren Geschwindigkeitsverlusten.

Entgegen den Erwartungen wurde im Zuge der Versuche festgestellt, dass die durchströmten Verklausungskörper einen höheren C_w -Wert aufweisen als die undurchlässigen Körper. *Taddei et al., 2016* stellten in ihren Versuchen denselben Sachverhalt fest. Der höhere Widerstandsbeiwert für durchströmten Verklausungskörper ist darauf zurückzuführen, dass es hier einen *bleeding flow* in horizontaler und vertikaler Richtung gibt. Dieser sorgt dafür, dass sich der Stromfaden weiter Flussaufwärts von dem umströmten Körper löst und sich der Nachlauf vergrößert. Dies führt zu höheren Geschwindigkeitsverlusten und somit zu einem höheren C_w -Wert. Bei undurchlässigen Verklausungskörpern gibt es diesen *bleeding flow* nicht. Die stärkeren Scherschichten entlang der Körperoberfläche haben zur Folge, dass sich der Nachlauf stromabwärts verlagert und die Ausdehnung des Nachlaufs in horizontaler und vertikaler Richtung geringeren ist. Der Strömungswiderstand ist geringer und damit auch der C_w -Wert.

Ist die 3D-Form des Verklausungskörpers wichtig?

Die Ergebnisse hinsichtlich der 3D-Form des Verklausungskörpers zeigen einen höheren Widerstandsbeiwert des zylinderförmigen Körpers. Der kegelförmige

Verklausungskörper weist weniger Kanten auf und stellt somit die strömungsgünstigere Form dar. Wie die Versuche bestätigten, resultiert daraus auch ein geringerer Widerstandsbeiwert.

Sind die Berechnungsverfahren sinnvoll und verlässlich für durchströmte (poröse) und raue Körper?

In Kapitel 5.1 wurden zwei Berechnungsmethoden, gemäß dem Bericht des *National Cooperative Highway Research Program* (Parola et al., 2000), zur Bestimmung der Widerstandskraft an Brückenpfeilern zufolge Verklausungen untersucht und mit den gemessenen Ergebnissen aus den hier durchgeführten Laborversuchen verglichen. Dabei wurde die Widerstandskraft teilweise über- als auch unterschätzt und stellte sich als unzureichend genau heraus (Abbildung 33 und Abbildung 35). Dies gilt sowohl für poröse als auch raue Körper. Der Ansatz aus dem Bericht mit Einbezug des Verbaugrades wurde allerdings aufgegriffen, um eine neue Berechnungsmethode zu entwickeln. Hierbei wurde die Strömungskraft über das Verhältnis der projizierten Flächen in eine Kraft, die der Brückenpfeiler aufnimmt und eine Kraft, die der Verklausungskörper aufnimmt, aufgeteilt. Anhand von Formel (13) konnte also der Widerstandsbeiwert ermittelt werden. Dieser ist abhängig von der Widerstandskraft, die der Verklausungskörper aufnimmt, der Dichte des Wassers, der gemittelten lokalen Geschwindigkeit und der projizierten, angeströmten Querschnittsfläche der Verklausung. Die Standardisierung erfolgt über die Reynoldszahl, wobei der Verbaugrad bei der Berechnung ebenfalls miteingeht (Formel 14). Was die rauen Verklausungskörper betrifft zeigte sich, dass diese einen höheren Widerstand aufweisen als die glatten Körper. Der Widerstandsbeiwert für raue Körper bewegte sich für Reynoldszahlen in der Größenordnung $10^4 - 10^5$ im Bereich um 1,2 und jener für glatte Körper bei 0,9 bis 1,1.

Bei der Betrachtung zwischen durchströmten und undurchlässigen Verklausungskörpern wurden ebenfalls Unterschiede an den Widerstandsbeiwerten festgestellt. Der C_w -Wert für durchströmte Körper (Reynoldszahl $10^4 - 10^5$) bewegte sich im Bereich um 1,3 bis 1,4 und jener für undurchlässige Körper um 1,1.

Betrachtet man alle durchgeführten Versuche, unabhängig von porösen oder rauen Verklausungskörpern, so liegt der Mittelwert für den Widerstandsbeiwert bei 1,2 und die Standardabweichung mit 0,22 bei rund 18%. Die Standardabweichung ist allerdings mit Vorsicht zu betrachten, da die Messergebnisse stark von den Vibrationen der Rinne beeinflusst wurden.

Eine Möglichkeit, um den Einfluss der Vibrationen für zukünftige Versuche zu vermeiden wäre, den Zulauf anders zu gestalten; beispielsweise die Anordnung eines Überlaufbeckens. Um die Verlässlichkeit der neuen Berechnungsmethode zu prüfen

wäre es wichtig die Vibrationen auszuschalten, um nicht nur eine Abschätzung des mittleren Widerstandsbeiwertes je nach Porosität oder Oberflächenrauheit machen, sondern anhand der Standardabweichung auch eine Aussage über die Genauigkeit der Methode treffen zu können.

Nicht berücksichtigte Größen

Aufgrund der Komplexität wurden im Zuge der Versuche einige Vereinfachungen getroffen:

Alle hier durchgeführten Versuche erfolgten in einer Flussbaurinne mit fester Sohle. Auch wenn dieser Fall in der Natur so gut wie nicht vorkommt, besteht der Vorteil, dass sich kein Kolk ausbildet und der Fokus auf den anderen Parametern liegt. Durch die Kolkbildung verändert sich nämlich der Querschnitt kontinuierlich mit der Zeit und damit auch der Verbaugrad. In einem zweiten Schritt wäre es jedoch sehr interessant, die Versuche auch mit beweglicher Sohle durchzuführen, um die Realität besser abzubilden.

In dieser Arbeit wurden hinsichtlich Porosität lediglich zwei durchströmte Verklausungskörper und ein undurchlässiger Verklausungskörper (Porosität = 0%) untersucht. Die Versuche zeigen, dass dieser Parameter durchaus einen Einfluss hat. Interessant wäre es daher, ein breiteres Spektrum an verschiedenen Porositäten zu untersuchen, da Verklausungen in der Natur, je nach Vegetation im Einzugsgebiet, sehr unterschiedliche Zusammensetzungen haben können. Je mehr Feinmaterial, desto geringer ist die Porosität.

Eine weitere Vereinfachung stellte der Brückenpfeiler dar. Hier wurde für alle Versuche ein runder Plexiglaszylinder mit einem Durchmesser von 4,4 cm verwendet. In Realität gibt es jedoch sehr unterschiedliche Pfeilerformen. Anhand von einigen repräsentativen Pfeilerformen könnte man weitere Versuche durchführen sowie auch eine Beeinflussung von mehreren Pfeilern nebeneinander untersuchen.

Ausblick

Besonders interessant für weitere Versuche wäre die Ermittlung des Widerstandsbeiwertes von Verklausungskörpern mit Porositäten zwischen 0% und 58%. Dieser Bereich wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

Für weitere Versuche wird empfohlen, die Zulaufbedingungen zu optimieren, um die Vibrationen der Rinne zu minimieren. Dies kann beispielsweise durch das Vorschalten eines Überlaufbeckens erfolgen.

Da in der Natur der Fall mit fester Sohle nur selten vorkommt, empfiehlt es sich auch Versuche mit beweglicher Sohle durchzuführen.

7 Literaturverzeichnis

Cantero-Chinchilla F.N., de Almeida G.A.M. & Escarameia M. (2018). Assessing the effects of debris accumulations at river bridges. University of Southampton, UK.

Chang K. & Constantinescu G. (2015). Numerical investigation of flow and turbulence structure through and around a circular array of rigid cylinders. Journal of Fluid Mechanics. Cambridge University Press.

Cheung J.C.K & Melbourne W.H. (1983). Turbulence effects on some aerodynamic parameters of a circular cylinder at supercritical Reynolds numbers. Department of Mechanical Engineering, Monash University, Australia.

Cocci A. (2021). Durchströmung von verschiedenartig porösen Medien. Bachelorarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie.

De Cicco P.N., Solari L. & Paris E. (2015). Bridge clogging caused by woody debris: Experimental analysis on the effect of pier shape. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, Italy. *Abbildung*

Dittrich A. (1998). Wechselwirkung Morphologie/ Strömung naturnaher Fließgewässer. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik.

Fernandez T. (2019). Hydrodynamics and vortex shedding behind spanwise cylinders in open channels. Master Thesis. Technical University of Vienna, Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources Management.

Hofmann A. (2021). Laborversuche zur Widerstandskraft von Flussholz in Gewässern. Technische Universität Wien. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie.

Jirka G. (2007). Einführung in die Hydromechanik. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Hydromechanik.

Lagasse, P., Colopper, P., Zevenbergen, L., Spitz, W., & Girard, L. (2010). Effects of Debris on Bridge Pier Scour. National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board.

Lamb R., Aspinall W., Odbert H., Wagener T. & Hill L. (2017). Vulnerability of bridges to scour risk: an international expert elicitation workshop. University of Bristol.

Müller C. (2007). Numerische und experimentelle Optimierung eines Gasturbinenansaugsystems. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau.

Nicolle A. & Eames I. (2011). Numerical study of flow through and around a circular array of cylinders. Journal of Fluid Mechanics. Cambridge University Press.

Parola A.C., Apelt C.J. & Jempson M.A. (2000). National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 445: Debris Forces on Highway Bridges. Transportation Research Board – National Research Council.

Sokoray-Varga B. & Höger V. (2014). BAW-Empfehlung - Messungen mit dem Vectrino. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).

Surek D. & Stempin S. (2007). Angewandte Strömungsmechanik für Praxis und Studium. 1. Auflage. B.G. Teubner Verlag. Merseburg, Deutschland.

Taddei S., Manes C. & Ganapathisubramani B. (2016). Characterisation of drag and wake properties of canopy patches immersed in turbulent boundary layers. Journal of Fluid Mechanics. Cambridge University Press.

Onlinequellen

Smith G. M., 03.03.2020 Wie funktioniert ein Messverstärker? Aufgerufen am 30.03.2022 URL: <https://dewesoft.com/de/daq/was-ist-signalkonditionierung#what-do-signal-conditioners-do>

fischachbergheim, 22.05.2019 Verkläunungen am Hammerersteg. Aufgerufen am 19.02.2023 URL: <https://fischachbergheim.wordpress.com/2019/05/22/verkläunungen-hammerersteg/>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung aus vorangegangenen Studien bezüglich des Widerstandsbeiwerts von Totholzverkläunungen (de Almeida et al., 2018)	13
Tabelle 2: Höheneinstellung des beweglichen Wehrs und Rinnenneigung.....	16
Tabelle 3: Aufbau Versuchsrinne.....	17
Tabelle 4: Hydraulische Kennwerte	20
Tabelle 5: Versuchsbezeichnung Kraftmessungen	23
Tabelle 6: Querschnittsgemittelte Anströmgeschwindigkeit U_Q	28
Tabelle 7: Vergleich zwischen querschnittsgemittelter Anströmgeschwindigkeit U_Q und lokaler Anströmgeschwindigkeit U_m	30
Tabelle 8: Gemessene Kräfte F_w am Pfeiler.....	35
Tabelle 9: Mittelwert, Standardabweichung, Minimal- und Maximalwert der gemessenen Kraft $F_{w,gem}$	36
Tabelle 10: Widerstandsbeiwert C_w für den Brückenpfeiler ohne Verkläunung.....	37
Tabelle 11: Widerstandsbeiwert C_w als Funktion des Verbaugrades B und der Froudzahl für Verkläunungen an Brückenpfeilern (bearbeitet; Parola et al., 2000).....	40
Tabelle 12: Wichtige Kenngrößen gemäß der neuen Berechnungsmethode	46
Tabelle 13: Widerstandsbeiwert C_w in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit	49
Tabelle 14: Widerstandsbeiwert C_w in Abhängigkeit der Porosität	50
Tabelle 15: Widerstandsbeiwert C_w in Abhängigkeit der 3D-Form der Verkläunung.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Teileinsturz des Mittelpfeiler an dem Lower Ashenbottom Viaduct, Lancashire, UK nach dem Hochwasser im Juni 2002 (Lamb et al.,2017)	8
Abbildung 2: Verkläunung am Hammerersteg in Bergheim (AT) (fischachbergheim, 22.05.2019)	9
Abbildung 3: Verkläunung an einer Brücke in Borgo a Mozzano (IT), 2014 (De Cicco et al.,2015).....	9
Abbildung 4: Widerstandsbeiwert C_w in Abhängigkeit der Reynoldszahl eines umströmten, glatten Kreiszyinders. (Jirka, 2007).....	10
Abbildung 5: Idealisierter, umgedrehter, halbkegelförmiger Modellkörper einer Verkläunung an einem einzelnen Brückenpfeiler (Cantero-Chinchilla, 2018)	11
Abbildung 6: Übersicht Versuchsrinne (Aufnahme: L. Wiesinger).....	14

Abbildung 7: Zulaufbedingungen	15
Abbildung 8: Brückenpfeiler (links) und Pfeiler mit Verkläunung und Messwagen (rechts).....	17
Abbildung 9: Längsschnitt und Grundriss der Versuchsrinne.....	18
Abbildung 10: Kegelförmiger Verkläunungskörper aus Filtermaterial ppi 10 – durchströmt	21
Abbildung 11: Kegelförmiger Verkläunungskörper aus Dämmstoff – undurchlässig.....	21
Abbildung 12: Zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Filtermaterial ppi 10 – durchströmt	22
Abbildung 13: Zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Filtermaterial; seitlich und unten umhüllt mit dichter Kunststoffpappe (t=2 mm) - undurchlässig	22
Abbildung 14: Zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Filtermaterial; seitlich und unten umhüllt mit dichter Kunststofffolie (t=2 mm) und darüber eine Schaschlikmatte - undurchlässig mit rauher Oberfläche	22
Abbildung 15: Zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Kunststoffzylindern - durchströmt.....	23
Abbildung 16: Kegelförmige Verkläunungskörper undurchlässig (links und Mitte) und durchströmt (rechts).....	23
Abbildung 17: Zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Filtermaterial ppi 10: durchströmt (links), undurchlässig (Mitte), rau (rechts)	24
Abbildung 18: Zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Kunststoffstäben	24
Abbildung 19: Filtermaterial ppi10 (links) und zylinderförmiger Verkläunungskörper aus Kunststoffstäben (rechts)	25
Abbildung 20: Prinzipskizze Kraftmessungen mit Wägezelle (links) und eingebaute Wägezelle für die Versuche (rechts).....	26
Abbildung 21: Parameter freie Höhe h_{frei} – drei Höhenstufen.....	26
Abbildung 22: Nullmessung.....	27
Abbildung 23: Vertikale Geschwindigkeitsprofile der Hauptströmungskomponente U für $Q = 40 \text{ l/s}$, $Q = 100 \text{ l/s}$ und $Q = 160 \text{ l/s}$ (Grafik Schnauder I., 2021).....	29
Abbildung 24: Berechnete logarithmische Geschwindigkeitsprofile und gemittelte Geschwindigkeit $U_{m,x}$ über die Tiefe für den Durchfluss x in l/s	30
Abbildung 25: Geschwindigkeitsmessung ADV ($Q=40 \text{ l/s}$, 11 cm über Sohle); „ExploreADV“-Software	31
Abbildung 26: Turbulente kinetische Energie TKE für die Durchflüsse $Q = 40 \text{ l/s}$, $Q = 100 \text{ l/s}$ und $Q = 160 \text{ l/s}$ (Grafik Schnauder I., 2021).....	32
Abbildung 27: Widerstandsbeiwert C_w (englisch: Cd) in Abhängigkeit der Reynoldszahl und des Turbulenzgrads Tu (hier als I_u bezeichnet) (Grafik Cheung & Melbourne, 1983)	33
Abbildung 28: Messreihen der Kraftmessung und der zugehörigen Nullmessung für den Versuch 1por_5 bei einem Durchfluss von 100 l/s (zu beachten: unterschiedliche Skalierung der y-Achse)	33
Abbildung 29: Widerstandskraft F_w je Versuch	34
Abbildung 30: Spektralanalyse bei $Q = 160 \text{ l/s}$ mit Pfeiler. (Grafik Wolff M., 2021).....	38
Abbildung 31: Verbaugrad B; Definition der Flächen im Rinnenquerschnitt;	39
Abbildung 32: Widerstandsbeiwert C_w als Funktion des Verbaugrades B für Verkläunungen an Brücken-pfeilern (Parola et al., 2000).....	40
Abbildung 33: Methode 1 - Kraft F_w berechnet versus Kraft F_w gemessen im Labor; links: in Abhängigkeit vom Durchfluss Q dargestellt; rechts: durchströmt, undurchlässig und rau	41
Abbildung 34: Methode 1 – Gegenüberstellung des Widerstandsbeiwert C_w und dem Verbaugrad B	41
Abbildung 35: Methode 2 - Kraft F_w berechnet versus Kraft F_w gemessen im Labor; links: in Abhängigkeit vom Durchfluss Q dargestellt; rechts: durchströmt, undurchlässig und rau	42

Abbildung 36: Verbaugrad B; Definition der Flächen im Rinnenquerschnitt;	43
Abbildung 37: Verteilung der Widerstandskraft F_w zwischen Verklausungskörper $F_{w,VK}$ und Pfeiler $F_{w,Pfeiler}$	44
Abbildung 38: Widerstandsbeiwert C_w in Abhängigkeit der Reynoldszahl eines umströmten, glatten Kreiszylinders einschließlich der Versuchsergebnisse (bearbeitet; Jirka, 2007).....	47
Abbildung 39: Neue Berechnungsmethode – Gegenüberstellung des Widerstandsbeiwerts C_w und dem Verbaugrad B.....	48
Abbildung 40: Oberflächenrauheit: Gegenüberstellung des Widerstandsbeiwerts C_w und der Reynoldszahl Re_{VK}	49
Abbildung 41: Ablösepunkte (engl. fixed separation point) an einem glatten quaderförmigen - und einem zylinderförmigen Körper mit rauer Oberfläche (Grafik Schnauder I., 2021)	49
Abbildung 42: Porosität: Gegenüberstellung des Widerstandsbeiwerts C_w und der Reynoldszahl Re_{VK}	50
Abbildung 43: Gegenüberstellung des mittleren Widerstandsbeiwerts C_w und der Porosität	51
Abbildung 44: Nachlauf eines undurchlässigen Körpers (a) und eines durchströmten Körpers (b) (Grafik Schnauder I., 2023; adaptiert von Stifter A.).....	52
Abbildung 45: Schematische Skizze - Effekte zufolge des <i>bleeding flows</i> in der Ansicht (oben) und im Grundriss (unten) für einen undurchlässigen Körper versus einen durchströmten Körper (Grafik Schnauder I., 2023).....	53
Abbildung 46: 3D-Form: Gegenüberstellung des Widerstandsbeiwerts C_w und der Reynoldszahl Re_{VK}	54