



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik
der Technischen Universität Darmstadt

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Hauke Zachert

Experimentelle Untersuchungen zum Fließverhalten von
wassergesättigten, grobkörnigen Böden

Dr.-Ing. Christiane Bergmann

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christiane Bergmann

aus Mannheim-Neckarau

D17

Darmstadt 2020

Veröffentlichung: 2021

Referent: Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach
Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik
Technische Universität Darmstadt

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität Darmstadt

Tag der Einreichung: 30.06.2020

Tag der mündlichen Prüfung: 14.10.2020

Diese Veröffentlichung steht unter folgender Creative-Commons-Lizenz:
CC BY-NC-ND 4.0 International

Namensnennung - Nicht-kommerziell - Keine Bearbeitung 4.0 International

Impressum

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Hauke Zachert

Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik

der Technischen Universität Darmstadt

Franziska-Braun-Straße 7

D - 64287 Darmstadt

Telefon +49 (0) 6151/16-22810

Telefax +49 (0) 6151/16-22813

E-Mail: zachert@geotechnik.tu-darmstadt.de

ISBN 978-3-942068-32-1

ISSN 1436-6320

Die Herstellung dieses Heftes erfolgte dankenswerter Weise auch mit
Unterstützung des Fördervereins der Freunde des Institutes für
Geotechnik an der Technischen Universität Darmstadt e.V.

Vorwort des Doktorvaters

Mit dem Mitteilungsheft Nr. 112 publiziert das Institut für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt die wissenschaftliche Arbeit von Frau Dr.-Ing. Christiane Bergmann. Die vorliegende Arbeit stellt einen wissenschaftlichen Beitrag zur Grundlagenanalyse des Fließverhalten wassergesättigten, grobkörnigen Böden dar.

Frau Dr. Bergmann befasst sich in Ihrer Arbeit mit der Analyse des Fließverhaltens von wassergesättigten, grobkörnigen Böden auf Basis von Experimenten an einem neu entwickelten Großversuchsstandes. Unter Verwendung der optischen Messmethode Particle-Image-Velocimetry (PIV) konnten die Fließbewegung und die Geschwindigkeit des wassergesättigten Bodens erfasst und analysiert werden.

Durch die aus der experimentellen Analyse gewonnen Erkenntnisse können das Fließverhalten des Bodens im Vergleich zum Fließverhalten von Wasser unter Berücksichtigung von verschiedenen Einflussparametern beschrieben werden. Die Ergebnisse stellen eine wesentliche Grundlage für die Validierung und Kalibrierung von künftigen numerischen Modellen dar.

Ein Teil der hier veröffentlichten wissenschaftlichen Arbeit entstand im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsvorhabens in Kooperation mit dem Institut für Mechanik der Ruhr-Universität Bochum.

Darmstadt, im Oktober 2020

Rolf Katzenbach

Vorwort der Autorin

Die hier vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit bei Herrn Professor Dr.-Ing. Rolf Katzenbach am Institut für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Die Forschungsarbeit beschäftigt sich mit dem Fließverhalten von wassergesättigten, grobkörnigen Böden insbesondere im Vergleich zum Wasser. Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG geförderten Forschungsvorhabens gemeinsam mit dem Institut für Mechanik der Ruhr-Universität Bochum sind die Grundlagen der experimentellen Untersuchungen entstanden und die Modellversuche entwickelt worden.

Ich möchte mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Allen voran geht ein besonderer Dank an meinen Doktorvater Professor Dr.-Ing. Rolf Katzenbach, dem ich eine lehrreiche, spannende und sehr abwechslungsreiche Zeit am Institut für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt verdanke. Für das in mich gesetzte Vertrauen und die fachliche Betreuung möchte ich herzlich danken.

Herrn Professor Lehmann danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Korreferates.

Ein weiterer Dank geht an alle Kollegen am Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik, die stets für ein sehr angenehmes Arbeitsumfeld gesorgt haben. Ohne die konstruktive Zusammenarbeit mit den Kollegen aus Labor und Versuchsanstalt wären die zahlreichen Untersuchungen und Versuchsreihen nicht möglich gewesen. Ein besonderer Dank geht dabei an das Team der Werkstatt, durch deren Einsatz die Großversuche erst möglich geworden sind.

Ein Dank geht auch an die Studierenden Herrn Tobias Roskopf, M.Sc. und Marius Wagenpahl, B.Sc., die mich bei meinen Versuchen am Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik unterstützt haben.

Von ganzem Herzen möchte ich meinen Eltern Marianne und Jürgen Bergmann für ihre uneingeschränkte Unterstützung auf meinem gesamten Lebensweg danken.

Mein größter Dank geht an meine Familie – an meinen Mann Bernd Schmidt und meine beiden wundervollen Kinder Lena und Benjamin – für die Unterstützung, die Geduld und das Verständnis während der Erstellung dieser Arbeit. Bernd, danke ich insbesondere dafür, dass er mich immer wieder motiviert, unterstützt und an mich geglaubt hat. Meiner Tochter Lena danke ich für ihre wahnsinnige Geduld in der finalen Phase und ihr positives und fröhliches Wesen, das mich aus so manchem Tief geholt hat. Bei Ben möchte ich mich für sein Durchhalten und seine Verspätung bedanken – schön, dass Du trotz des Stresses so ein Sonnenschein geworden bist.

Darmstadt, im Oktober 2020

Christiane Bergmann

Inhaltsverzeichnis	Seite
Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung und Ziel der Arbeit	1
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Grundlegende Kenntnisse aus der Fluidmechanik	4
2.1.1 Eigenschaften zur Beschreibung von Fluiden	4
2.1.2 Strömungsmechanik	11
2.2 Ausflussformel nach Torricelli	18
2.3 Wasser im Boden	24
2.3.1 Grundwasserströmungen	24
2.3.2 Hydraulisch verursachtes Versagen	27
2.4 Theorie Poröser Medien	31
2.5 Particle Image Velocimetry Methode	33
3 Experimentelle Untersuchungen	39
3.1 Entwicklung des Versuchsstandes	39
3.2 Versuchsmaterial	46
3.3 Entwicklung einer geeigneten Einbautechnik	48
3.3.1 Einrieselungsmethode	48
3.3.2 Versuchsoptimierte Einrieselungsmethode	50
3.3.3 Einbaumethode mit einer versuchsoptimierten, neu entwickelten Einbautechnik	51
3.4 Messtechnik	53
3.4.1 Messtechnische Instrumentierung	53
3.4.2 Anwendung und Optimierung der Messtechnik	54
3.5 Vorversuche	62
3.5.1 Allgemeines	62
3.5.2 Versuchsablauf und erste Beurteilung des Fließvorganges	62
3.5.3 Variation der Auslasshöhe	64
3.5.4 Vergleich verschiedener Lagerungsdichten	65
3.6 Versuchsdurchführung	66
4 Auswertung und Versuchsergebnisse	68
4.1 Methodik der Auswertung	68
4.2 Geschwindigkeitsverteilung	72
4.2.1 Allgemeines	72
4.2.2 Geschwindigkeitsverteilung Versuchsreihe 1	72
4.2.3 Geschwindigkeitsverteilung Versuchsreihe 2	73
4.2.4 Geschwindigkeitsverteilung Versuchsreihe 3	76
4.2.5 Geschwindigkeitsverteilung Versuchsreihe 4	78

4.2.6	Geschwindigkeitsverteilung Versuchsreihe 5	80
4.2.7	Bewertung der Geschwindigkeitsverteilung	82
4.3	Vergleich der Geschwindigkeiten im Bereich des Auslasses	82
4.3.1	Allgemeines	82
4.3.2	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1	83
4.3.3	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2	83
4.3.4	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3	84
4.3.5	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4	85
4.3.6	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5	86
4.3.7	Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung	87
4.4	Vergleich der Geschwindigkeiten im Bereich des Auslasses	88
4.4.1	Allgemeines	88
4.4.2	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1	89
4.4.3	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2	89
4.4.4	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3	90
4.4.5	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4	91
4.4.6	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5	92
4.4.7	Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung	93
4.5	Vergleich der Geschwindigkeit neben dem Auslass	94
4.5.1	Allgemeines	94
4.5.2	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1	94
4.5.3	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2	95
4.5.4	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3	96
4.5.5	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4	97
4.5.6	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5	98
4.5.7	Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung	99
4.6	Vergleich der Geschwindigkeiten im Bereich des Auslasses und oberhalb des Auslasses	100
4.6.1	Allgemeines	100
4.6.2	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1	100
4.6.3	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2	101
4.6.4	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3	102
4.6.5	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4	102
4.6.6	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5	103
4.6.7	Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung	104
4.7	Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Spannungsänderung	105
4.7.1	Allgemeines	105
4.7.2	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1	105
4.7.3	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2	106
4.7.4	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3	107
4.7.5	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4	108
4.7.6	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5	109
4.7.7	Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung	110

4.8	Geschwindigkeit im Vergleich zum Wasser	111
4.8.1	Allgemeines	111
4.8.2	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1	113
4.8.3	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2	114
4.8.4	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3	115
4.8.5	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4	116
4.8.6	Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5	117
4.8.7	Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung im Vergleich zum Wasser	118
4.9	Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	120
5	Beschreibung der Geschwindigkeit von wassergesättigten, grobkörnigen Böden mit der erweiterten Ausflussformel nach Torricelli	122
6	Zusammenfassung und Ausblick	126
7	Literaturverzeichnis	131
	Bildverzeichnis	141
	Tabellenverzeichnis	152
	Anhang	153

Symbolverzeichnis

Das Verzeichnis umfasst die wichtigsten wiederkehrenden Symbole. Alle Symbole werden im Text näher definiert. Doppeldeutungen einzelner Symbole sind möglich. Das Symbolverzeichnis erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Lateinische Buchstaben

Symbol	Dimension	Bedeutung
A	[m ²]	Fläche allgemein
B, b	[m]	Breite allgemein
B _C	[-]	Ungleichförmigkeitsbeiwert
c	[kN/m ²]	Kohäsion allgemein
c	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
C _c	[-]	Krümmungszahl
C _u	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
D	[-]	Lagerungsdichte
D	[m]	Durchmesser
E	[N/m ²]	Elastizitätsmodul
F	[N]	Kraft
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H, h	[m]	Höhe allgemein
Δh	[m]	Potenzialunterschied
i	[-]	hydraulischer Gradient
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
K	[N/m ²]	Kompressibilität
L, l	[m]	Längen allgemein
Δl	[m]	durchströmte Länge
n	[-]	Porenanteil
p	[N/m ²]	Druck
Q	[m ³ /s]	Durchfluss
R	[J/kg·K]	Reibung
R ²	[-]	Bestimmtheitsmaß
Re	[-]	Reynoldszahl
S	[kN]	Strömungskraft
T	[K]	Temperatur
t	[m]	Tiefe
v	[m/s]	Betrag der Geschwindigkeit
v _f	[m/s]	Filtergeschwindigkeit
v _a	[m/s]	Abstandsgeschwindigkeit
V	[m ³]	Volumen
z	[m]	Ortshöhe

Griechische Buchstaben

Symbol	Dimension	Bedeutung
α	[-]	Kontraktionszahl
γ	[kN/m ³]	Wichte des Bodens allgemein
γ'	[kN/m ³]	Wichte des Bodens unter Auftrieb
γ_r	[kN/m ³]	Wichte des vollgesättigten Bodens
η	[Ns/m ²]	dynamische Viskosität
μ	[-]	Ausflusszahl
v	[m ³ /kg]	spezifisches Volumen
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität
ν_t	[m ² /s]	Turbulenzviskosität
ρ	[g/cm ³]	Dichte allgemein
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
σ	[kN/m ²]	Normalspannung allgemein
τ	[kN/m ²]	Schubspannung allgemein
ϕ	[m ² /Ns]	Fluidität
φ	[°]	Reibungswinkel allgemein
φ	[-]	Geschwindigkeitszahl
χ	[-]	Isotropenexponent

1 Einleitung und Ziel der Arbeit

Fließvorgänge von wassergesättigten, grobkörnigen Böden treten bei verschiedenen bodenmechanischen Ereignissen auf, wie beispielsweise bei Murgängen, beim Setzungsfließen oder auch an Schädstellen von Verbauwänden.

Es existieren bereits zahlreiche Untersuchungen zu trockenen granularen Massenströmen; beispielhaft sei an dieser Stelle auf Arason & Tsimring (2002), Chiou (2006), Domnik (2012), Greve & Hutter (1993), Hutter & Koch (1991), Iverson et al. (2004), Kroener (2012), Oda & Iwashita (1999), Pudasaini (2011, 2012), Pudasani & Hutter (2007), Tai (2000) und Volfson et al. (2003) verwiesen. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei diesen Untersuchungen um theoretische Betrachtungen und Beschreibungen handelt, die sich ausschließlich mit trockenem Boden beschäftigen, können diese für eine Beschreibung des Fließverhaltens von wassergesättigtem Boden nicht herangezogen werden. Durch das zusätzliche Zusammenspiel mit Wasser wird die Betrachtung des Fließvorgangs granularer Strömungen wesentlich komplexer.

Ein Fließvorgang von Boden-Wasser-Gemischen stellen beispielsweise Murgänge dar, bei denen ein Gemisch aus Boden und Wasser entlang einer schiefen Ebene zum Teil mit immensen Geschwindigkeiten einen Hang hinunterfließt und katastrophale Schäden verursachen kann (siehe Bild 1.1). Der Boden kann sich dabei aus den unterschiedlichsten Korngrößen und Kornformen zusammensetzen. Auch zu Murgängen wurden bereits zahlreiche Experimente und Untersuchungen durchgeführt, die sich mit der Entstehungsgeschichte, der Gefahrenanalyse, Gefahrenabwehr und dem Fließprozess beschäftigen (vgl. Arndt et al. (2013), Dietrich (2019), Fuchs et al. (2008), Scheid (2011), Tognacca (1999), Weber (2004), Wendeler (2008)).



Bild 1.1 Murgangkatastrophe 2005, Glyssibach Brienz (Wendeler (2008))

Auch für das Phänomen der Verflüssigung von locker gelagerten, wassergesättigten Sanden, bei dem es durch den Verlust der Korn-zu-Korn-Reibung zu einem Fließvorgang kommt, liegen bereits Beschreibungen vor. Hierbei steht jedoch der Verlust der Tragfähigkeit durch die Entfestigung des Bodens im Fokus und nicht der Fließvorgang an sich.

Ziel der Arbeit ist, das Fließverhalten von wassergesättigten, grobkörnigen Böden in Form einer Grundlagenforschung mit Hilfe großskaliger Experimente zu untersuchen und einen Vergleich mit dem Fließverhalten von Wasser zu ziehen. Aufbauend auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen soll das Fließverhalten beschrieben werden können und die Ergebnisse als Basis für die Validierung und Kalibrierung von numerischen Modellen dienen.

Für Wasser wurde bereits im Jahr 1644 vom Mathematiker Evangelista Torricelli die Geschwindigkeit von Wasser durch eine Öffnung aus einem Behälter (vgl. Bild 1.2) beschrieben (Torricelli (1644)).

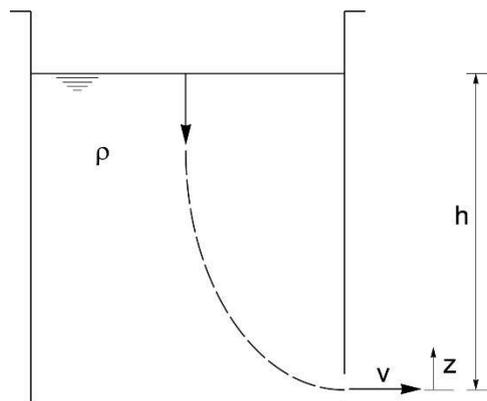


Bild 1.2 Ausfluss aus der Öffnung eines Behälters nach Hutter (2003)

Die Geschwindigkeit des Wassers wird in der Ausflussformel nach Torricelli (Gl. 1.1) in Abhängigkeit der Höhe h des Wasserstandes und der Erdbeschleunigung g mit der folgenden Gleichung angegeben:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Die Beschreibung des Fließverhaltens nach Torricelli mit der nach ihm benannten Ausflussformel diente im Rahmen dieser Arbeit als Grundlage für den Vergleich des Fließverhaltens von wassergesättigten Böden mit Wasser. Grundvoraussetzung für den Vergleich ist, dass es zum Zeitpunkt des Fließvorgangs bereits zum Verlust der Kornstruktur des Bodens gekommen ist, wodurch sich das Boden-Wasser-Gemisch

ähnlich wie eine zähe Flüssigkeit verhält. Um dieses Verhalten adäquat beschrieben zu können, besteht Forschungsbedarf.

Diese Grundlagenforschung zum Fließverhalten von wassergesättigten, grobkörnigen Böden wurde gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Mechanik der Ruhr-Universität Bochum im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten, Paketantrags „Untersuchungen zum Fließverhalten von Fluid-Granulat-Mischungen“ durchgeführt.

Zunächst war im Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung eines neuen großskaligen Versuchsstandes zur Untersuchung des Fließverhaltens und der Geschwindigkeit von wassergesättigten, grobkörnigen Böden notwendig.

Bei der Entwicklung des Versuchstandes sind folgende Randbedingungen für die Versuchsdurchführung zu berücksichtigen, um eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu gewährleisten:

- homogener, gleichmäßiger Einbau
- kontinuierliches Ausfließen des wassergesättigten Bodens
- vollständige Wassersättigung des Bodens während der Versuchsdurchführung
- reproduzierbare Randbedingungen

Nach der Konstruktion und Optimierung des entwickelten Versuchsstandes sind im Rahmen von Experimenten verschiedene Einflussfaktoren und geeignete Versuchsmaterialien zu untersuchen.

Auch die Findung einer geeigneten Messtechnik zur Aufzeichnung der Fließbewegung und der Geschwindigkeit des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens ist Teil dieser Arbeit.

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen und den Ergebnissen der durchgeführten Versuche am neu entwickelten Versuchsstand soll das Fließverhalten von wassergesättigten Böden beschrieben und die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der maßgebenden Einflussfaktoren im Vergleich zur bereits bekannten Geschwindigkeit von Wasser bestimmt werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Grundlegende Kenntnisse aus der Fluidmechanik

Die bereits vorhandenen Kenntnisse aus der Fluidmechanik, die Stand der Technik und in zahlreichen Veröffentlichungen zu finden sind (vgl. beispielsweise Durst (2006), Groß et al. (2009), Herwig (2008), Hutter (2003) Sigloch (2017), Spurk & Aksell (2010), Truckenbrodt (2008a, 2008b), Zierp & Bühler (2018)), bilden eine wesentliche Grundlage für die Beschreibung des Fließverhaltens von wassergesättigten, grobkörnigen Böden. Die wesentlichen Grundlagen werden in diesem Kapitel beschrieben. Dieses Kapitel beinhaltet neben den in den weiteren Ausführungen dieser Arbeit verwendeten Grundlagen auch weitere Informationen zur Fluidmechanik, die für das Verständnis und für die numerischen Untersuchungen des DFG-Projektpartners entscheidend sind.

In der Fluidmechanik wird grundsätzlich zwischen zwei Fluiden unterschieden:

- inkompressible Fluide
- kompressible Fluide

Inkompressible Fluide sind massebeständig und annähernd volumenbeständig; hierbei handelt es sich um Flüssigkeiten. Als kompressible Fluide werden Gase und Dämpfe bezeichnet, die zwar masse- aber nicht volumenbeständig sind.

Sowohl inkompressible als auch kompressible Fluide sind nicht formbeständig, was den wesentlichen Unterschied zu Festkörpern ausmacht.

Die Physik unterscheidet grundsätzlich die drei Aggregatzustände fest (solid), flüssig (liquid) und gasförmig, wobei sich die Fluidmechanik in der Regel nur mit den flüssigen und gasförmigen Zuständen beschäftigt, d.h. Böden werden nicht behandelt.

2.1.1 Eigenschaften zur Beschreibung von Fluiden

Wesentliche Eigenschaften zur Beschreibung eines Fluids sind:

- Kompressibilität
- Teilchenkräfte, Kapillarität
- Viskosität
- Schallgeschwindigkeit

Kompressibilität

Die Kompressibilität bzw. Zusammendrückbarkeit wird analog zum HOOKschen Gesetz (Hook (1678)) für Festkörper auch für Fluide definiert. Die relative Volumenänderung $\Delta V/V_0$ (Volumendilatation) ergibt sich demnach zu (Sigloch (2017)):

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{-\Delta p}{E} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

mit: ΔV Volumendifferenz [m³]
 V_0 Volumen vor der Kompression [m³]
 Δp Drucksteigerung [N/m²]
 E Elastizitätsmodul [N/m²]

Bei Flüssigkeiten ist die Kompressibilität so gering, dass sie in der Regel vernachlässigt werden kann. Wasser beispielsweise erfährt bei einer Druckerhöhung von 100 kN/m² eine Volumenänderung von lediglich 0,05 %. Erst bei höheren Drücken ab rd. 50 MN/m², muss bei Flüssigkeiten die Kompressibilität berücksichtigt werden.

Die Kompressibilität K wird nach Sigloch (2017) aus dem Kehrwert des Volumenelastizitätsmoduls wie folgt bestimmt:

$$K = \frac{1}{E} = -\frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V_0} \quad [\text{m}^2/\text{N}] \quad (\text{Gl. 2.2})$$

mit: ΔV Volumendifferenz [m³]
 V_0 Volumen vor der Kompression [m³]
 Δp Drucksteigerung [N/m²]
 E Elastizitätsmodul [N/m²]

Teilchenkräfte, Kapillarität

Teilchenkräfte sind Massenanziehungskräfte, die von den Teilchen der Stoffe aufeinander ausgeübt werden, die bei Fluiden allerdings deutlich geringer sind als bei Festkörpern. Bei Fluiden wird die Form der freien Oberfläche durch die Teilchenkräfte F bestimmt, wie es anschaulich in Bild 2.1 dargestellt ist. Diese sind zu unterscheiden in Kohäsionskräfte und Adhäsions- und Adsorptionskräfte. Kohäsionskräfte treten immer zwischen gleichen Teilchen und Adhäsions- und Adsorptionskräfte zwischen verschiedenartigen Teilchen auf.

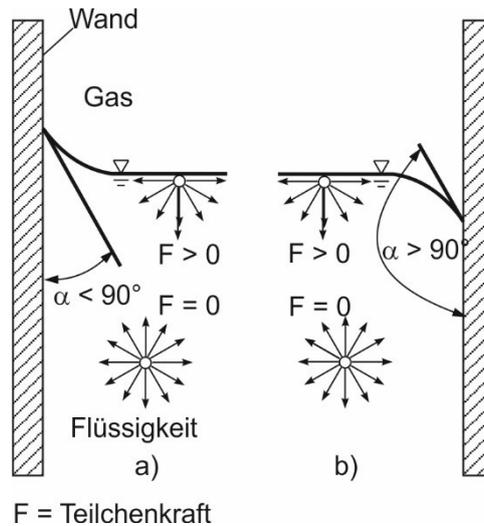


Bild 2.1 Formen der freien Oberfläche von Fluiden (gemäß Sigloch (2017))
a) Randwinkel $\alpha < 90^\circ$, z.B. Wasser/Glas (Adhäsion $>$ Kohäsion)
b) Randwinkel $\alpha > 90^\circ$, z.B. Quecksilber/Glas (Adhäsion $<$ Kohäsion)

Die Kapillarität wird hervorgerufen durch die Grenzflächenkräfte Kapillarspannung und Kapillarwirkung. Wobei die Kapillarspannung durch Kohäsion und die Kapillarwirkung durch Adhäsion verursacht wird.

Die Kapillarspannung ergibt sich aus der am Flüssigkeitsrand angreifenden Kraft F bezogen auf die Randlänge l (vgl. auch Bild 2.2) zu:

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad [\text{N/m}] \quad (\text{Gl. 2.3})$$

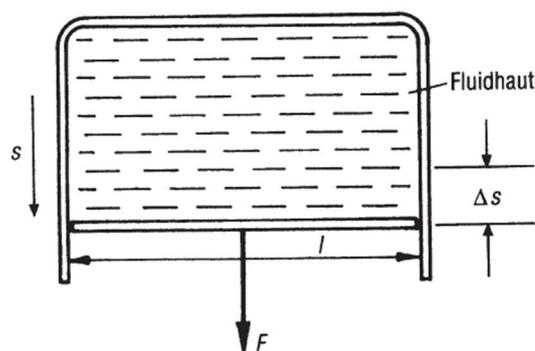


Bild 2.2 Bestimmung der Kapillarspannung an einem Modellversuch (nach Sigloch (2017))

Die Kapillarspannungen (Oberflächenspannungen) für verschiedene Fluide mit einer Temperatur von 20°C sind in Tabelle 2.1 angegeben.

Fluid-Kombination		σ [N/m]
Wasser	Luft	0,073
	Wasserdampf	0,059
Quecksilber	Luft	0,475
	Wasser	0,427
Alkohol	Luft	0,023
	Wasser	0,004
Öl	Luft	0,025 ... 0,035
	Wasser	0,023 ... 0,048

Tabelle 2.1 Oberflächenspannung verschiedener Fluide nach Truckenbrodt (2008a)

Die Kapillarwirkung beschreibt, wie eine Flüssigkeit in einem Rohr nach oben steigt (siehe Bild 2.3). Die Flüssigkeit steigt in einem Rohr so weit nach oben, bis sich zwischen der Kapillarkraft (Kapillarwirkung), die durch Adhäsion hervorgerufen wird und dem angehobenen Flüssigkeitsgewicht ein Gleichgewicht einstellt. Geht man davon aus, dass die freie Oberfläche eine Halbkugelform aufweist, bei der die Spannung überall gleich groß ist, dann kann die Oberflächenspannung der Kapillarwirkung gleichgesetzt werden (Sigloch (2017)):

$$\frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot \bar{z} \cdot \gamma_w = \sigma \cdot D \cdot \pi \cdot \cos \alpha \quad [\text{N}] \quad (\text{Gl. 2.4})$$

Die Steighöhe z ergibt sich somit zu:

$$\bar{z} = \frac{4 \cdot \sigma}{D \cdot \gamma_w} \cdot \cos \alpha \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 2.5})$$

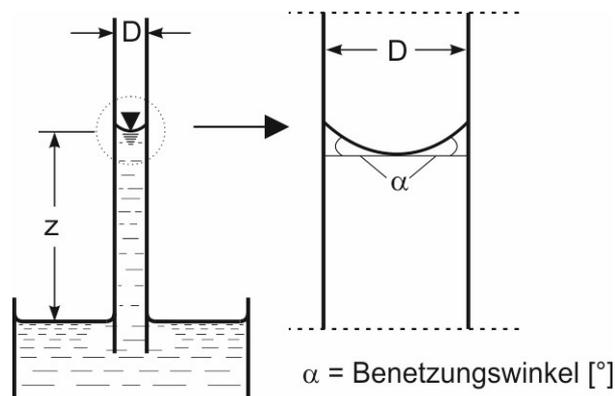


Bild 2.3 Kapillarwirkung

Viskosität

Die Viskosität beschreibt gemäß DIN 1342-1:2003-11 (DIN (2003)) die Eigenschaft eines fließfähigen Stoffsystems, beim Verformen eine Spannung aufzunehmen, die von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt. Die Spannung kann aber auch als Ursache angesehen werden, durch die eine Verformungsgeschwindigkeit hervorgerufen wird. Die Viskosität gibt demnach an, wie sich die Fluidteilchen gegeneinander verschieben. Diese Verschiebbarkeit der Fluidteilchen gegeneinander wird durch die innere Reibung bestimmt. Diese Form der Viskosität wird auch als dynamische Viskosität oder Scherviskosität bzw. absolute Viskosität bezeichnet.

Zur Beschreibung der Reibungskraft des Fluids entwickelte Newton das NEWTONsche Fluidreibungs-Gesetz:

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad [\text{N}] \quad (\text{Gl. 2.6})$$

mit: F Reibungskraft [N]
A Fläche, mit der der Körper auf dem Fluid aufliegt [m²]
 Δv Geschwindigkeitsdifferenz [m/s]
 Δy Abstand [m]
 η Proportionalitätsfaktor (dynamische Viskosität des Fluids) [Ns/m²]

Bezieht man die Reibungskraft F auf die Fläche A, erhält man die Tangentialspannung τ :

$$\tau = \eta \cdot \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad [\text{N/m}^2] \quad (\text{Gl. 2.7})$$

In Bild 2.4 ist die Scherströmung beispielhaft zwischen zwei parallelen Flächen dargestellt, wobei am oberen Körper mit einer Kraft F gezogen wird.

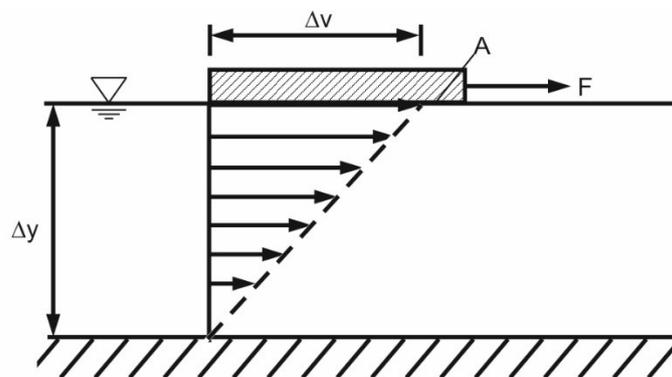


Bild 2.4 Scherströmung zwischen zwei parallelen Flächen

Die dynamische Viskosität ergibt sich wie folgt:

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{\Delta v}{\Delta y}} \quad [(\text{N}\cdot\text{s})/\text{m}^2] \quad (\text{Gl. 2.8})$$

Der Kehrwert der dynamischen Viskosität wird als Fluidität ϕ bezeichnet:

$$\phi = \frac{1}{\eta} \quad [\text{m}^2/(\text{N}\cdot\text{s})] \quad (\text{Gl. 2.9})$$

Als kinematische Viskosität wird das Verhältnis der dynamischen Viskosität zur Dichte des Fluids bezeichnet.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (\text{Gl. 2.10})$$

Viskose Fluide werden in NEWTONsche Fluide und nicht-NEWTONsche Fluide unterschieden.

NEWTONsche Fluide zeichnen sich durch ein linear viskoses Fließverhalten aus. Nicht-NEWTONsche Fluide werden in Abhängigkeit der folgenden Verhaltensweisen unterschieden:

- dilatantes Verhalten
- pseudoplastisches Verhalten (strukturviskoses Verhalten)
- plastisches Verhalten (BINGHAM-Fluide)
- OSTWALD-Verhalten

Die Fließkurven der verschiedenen Fluide sind beispielhaft in Bild 2.5 dargestellt.

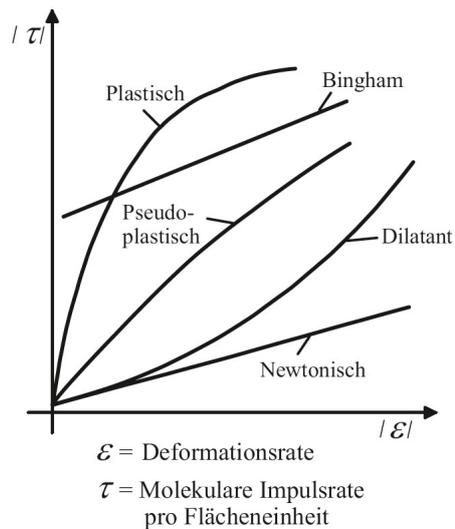


Bild 2.5 Eigenschaften Newtonscher und nichtnewtonscher Fluide (Durst (2006))

Schallgeschwindigkeit

Als Schallgeschwindigkeit c wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit bezeichnet, mit der sich der Schall (kleine Druckwellen) in einem Medium ausbreitet. Schallwellen sind kleine Verdichtungen und Verdünnungen in einem Fluid, die periodisch aufeinander folgen. Die Schallgeschwindigkeit c wird daher über das Verhältnis der Druckerhöhung zur Druckänderung wie folgt beschrieben (Durst (2006)):

$$c = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 2.11})$$

mit: Δp Druckerhöhung [N/m^2]
 $\Delta \rho$ Dichteänderung [kg/m^3]

Bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit sind quasi inkompressible Medien (Fluide und Feststoffe) und kompressible Fluide voneinander zu unterscheiden.

Quasi inkompressible Fluide sind dichtebeständig, d.h. $\rho = \text{konst.}$, was wiederum bedeutet $\Delta \rho = 0$; somit ist die Schallgeschwindigkeit $c = \infty$. Druckveränderungen sind daher in einem inkompressiblen Fluid sofort (ohne Zeitverlust) und überall im Strömungsgebiet feststellbar.

Bei kompressiblen Fluiden ist die Schallgeschwindigkeit stark temperaturabhängig und wird wie folgt bestimmt (Durst (2006)):

$$c = \sqrt{\chi \cdot p \cdot v} = \sqrt{\chi \cdot R \cdot T} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 2.12})$$

mit: χ	Isotropenexponent [-]
p	Druck [N/m^2]
v	spezifisches Volumen [m^3/kg]
R	Reibung [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
T	Temperatur [K]

2.1.2 Strömungsmechanik

In der Strömungsmechanik werden grundsätzlich stationäre und instationäre Strömungen unterschieden. Instationäre Strömungen sind abhängig von Ort und Zeit. Stationäre Strömungen hingegen sind Strömungen, deren Geschwindigkeit über die Zeit hinweg konstant bleibt.

Die REYNOLDS-Zahl charakterisiert die Strömungsform, bedingt durch die Einflüsse der Viskosität und der Beschleunigung des Fluids. Daher wird durch sie auch die Übertragbarkeit von Versuchswerten auf andere Verhältnisse maßgeblich bestimmt. Die Reynoldszahl geht auf Untersuchungen des britischen Physikers Oswald Reynold zu turbulenten und laminaren Strömungen im Jahr 1883 zurück (Reynold (1883)) und ergibt sich zu:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad [-] \quad (\text{Gl. 2.13})$$

mit: v	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
l	Länge [m]
ν	kinematische Viskosität [m^2/s]

Grundsätzlich wird differenziert, ob eine laminare oder eine turbulente Strömung vorhanden ist. Diese unterscheiden sich nicht nur in ihrem Erscheinungsbild, sondern auch in ihren physikalischen Bedingungen.

Bei laminaren Strömungen bewegen sich die Fluidteilchen in wohlgeordneten, nebeneinanderlaufenden Schichten. Diese Schichten vermischen sich nicht und können unterschiedliche Geschwindigkeiten haben.

Das Verhalten turbulenter Strömungen ist genau entgegengesetzt zum Verhalten laminarer Strömungen. Hierbei sind Wirbelbewegungen und somit eine Durchmischung der Schichten vorhanden.

Die kritische REYNOLDS-Zahl definiert den Übergang von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung. Diese muss experimentell ermittelt werden; für Rohr- und Gerinneströmungen gibt es Erfahrungswerte.

Bei Rohrströmungen gilt die folgende Reynoldszahl als kritisch:

$$Re_{kr} = \frac{v_{kr} \cdot D}{\nu} = 2.320 \approx 2.300 \quad [-] \quad (\text{Gl. 2.14})$$

mit: v_{kr} kritische Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
 D Rohrdurchmesser [m]
 ν kinematische Viskosität [m²/s]

$Re < Re_{kr}$ stabiles laminares Verhalten; unkritischer Fall.

$Re > Re_{kr}$ turbulentes Verhalten; überkritischer Fall

$Re = Re_{kr}$ kritischer Fall; Grenzfall, der meist als überkritischer Fall eingestuft wird

Bei Gerinneströmungen kann die Grenze nicht klar definiert werden; der Umschlag erfolgt hierbei in der Regel an der Stelle des Druckminimums am umströmten Körper. Meist liegt der Umschlagspunkt bei umströmten Widerstandskörpern der Länge l zwischen $3 \cdot 10^5$ bis $5 \cdot 10^5$, das bedeutet:

$$Re = v \cdot \frac{l}{\nu} < 3 \cdot 10^5 \text{ bis } 5 \cdot 10^5 \quad \text{laminar}$$

$$Re = v \cdot \frac{l}{\nu} \geq 3 \cdot 10^5 \text{ bis } 5 \cdot 10^5 \quad \text{turbulent}$$

Bei turbulenten Strömungen tritt neben der Viskosität durch Reibung zusätzlich die sog. Scheinviskosität (Turbulenzviskosität) ν_t auf. Diese ist keine physikalische Stoffgröße, sondern als Impulsaustauschgröße maßgeblich von der Turbulenzstärke abhängig und meist um ein vielfaches größer als die kinematische Viskosität ($\nu_t \gg \nu$). Durch Turbulenz wird also der Strömungswiderstand deutlich größer als durch Reibung.

$$\nu_t = \frac{\eta_t}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (\text{Gl. 2.15})$$

Die Gesamtscherspannung τ_{ges} einer turbulenten Strömung ergibt sich dementsprechend zu:

$$\tau_{\text{ges}} = (\eta + \eta_t) \cdot \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad [\text{N/m}^2] \quad (\text{Gl. 2.16})$$

Eine weitere Unterteilung erfolgt in Strömungsklassen; hierbei werden Potenzial- und Wirbelströmungen unterschieden. Potenzialströmungen sind reibungs- und drehungsfrei (wirbelfrei). Bei diesen besitzt die Potenzialgleichung Gültigkeit (Truckenbrodt (2008b)).

Wirbelströmungen werden in reibungsfreie und reibungsbehaftete Wirbelströmungen unterteilt. Bei reibungsfreien Wirbelströmungen findet die EULER-Gleichung und bei reibungsbehafteten Wirbelströmungen die NAVIER-STOKES- bzw. REYNOLDS-Gleichung Anwendung (Sigloch (2017)).

Für die Beschreibung von Strömungen wurden zwei verschiedene Modelle entwickelt, eines für ideale Fluide und eines für reale Fluide. Bei idealen Fluiden wird angenommen, dass diese keine Viskosität ($\eta = 0$) besitzen und somit reibungsfrei sind. Bei realen Fluiden geht man hingegen von einer Viskosität ($\eta > 0$) aus, d.h. das Fluid ist reibungsbehaftet.

Für die mathematische Beschreibung der Bewegungsvorgänge von Fluiden sind grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze vorhanden:

- LAGRANGEsche Methode
- EULER Methode

Bei der LAGRANGEschen Betrachtungsweise wird der Weg jedes Fluidteilchens bezogen auf ein Koordinatensystem der Punktmechanik entsprechend beschrieben. Die Geschwindigkeitsbeschreibung erfolgt also teilchengebunden. Dadurch ergeben sich bei der LAGRANGEschen Betrachtungsweise häufig sehr komplizierte Bewegungsgleichungen, deren Lösung mit großem mathematischen Aufwand verbunden ist.

Die EULER Methode hingegen beschreibt die Strömungsgrößen nur orts- und zeitabhängig, so dass bei einer entsprechenden Stelle im Koordinatensystem die Geschwindigkeit, die Beschleunigung, die Dichte und die Temperatur beschrieben werden. Somit ist die Geschwindigkeitsbeschreibung nach EULER ortsgebunden.

Die Stromfadentheorie beschreibt eindimensionale Strömungen entlang einer Stromlinie in einem Stromfaden (siehe Bild 2.6). Die Geschwindigkeit ist bei instationären Strömungen orts- und zeitabhängig und bei stationären Strömungen ausschließlich ortsabhängig. Die Geschwindigkeit v entlang des Stromfadens ergibt sich zu:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 2.17})$$

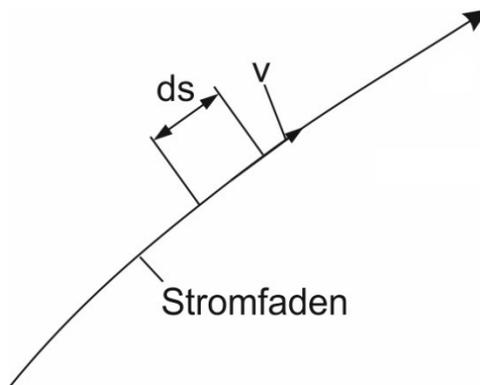


Bild 2.6 Bewegung eines Stromfadens

Der Durchfluss Q durch eine Stromröhre wird durch die Geschwindigkeit über den Querschnitt einer Stromröhre ermittelt. Daraus ergibt sich die allgemeine Durchflussgleichung der Stromfadentheorie, die sowohl für kompressible als auch inkompressible Fluide gilt und den Massenstrom \dot{m} wie folgt angibt:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q = \rho \cdot v \cdot A \quad [\text{kg/s}] \quad (\text{Gl. 2.18})$$

mit: Q Durchfluss [m^3/s]
 ρ Dichte [kg/m^3]
 v Geschwindigkeit [m/s]
 A Fläche [m^2]

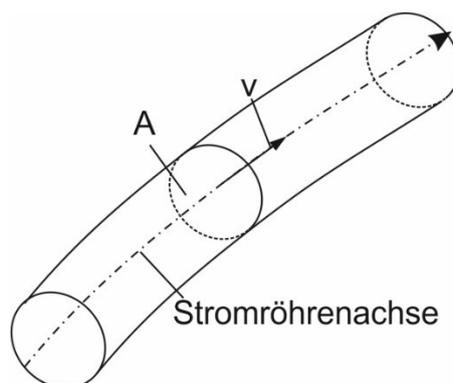


Bild 2.7 Durchfluss durch eine Stromröhre

Gemäß Massenerhaltungssatz gilt für jede Stromröhre

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

Für Flüssigkeiten ($\rho = \text{konst.}$) ergibt sich daraus die Kontinuitätsgleichung (Zierep & Bühler (2018)):

$$\dot{m} = Q \cdot \rho = v \cdot A \cdot \rho = \text{konst.} \quad [\text{kg/s}] \quad (\text{Gl. 2.19})$$

Für mehrdimensionale Strömungen setzt sich die Geschwindigkeit aus den drei Richtungskomponenten x , y und z zusammen, bei dem die Massenerhaltung ebenfalls Gültigkeit besitzt. In Bild 2.8 ist ein durchströmtes Raumelement beispielhaft dargestellt.

Die Kontinuitätsgleichung für inkompressible Fluide (Flüssigkeiten) ergibt sich unter der Voraussetzung der Gültigkeit des Axioms der Massenerhaltung zu:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{Gl. 2.20})$$

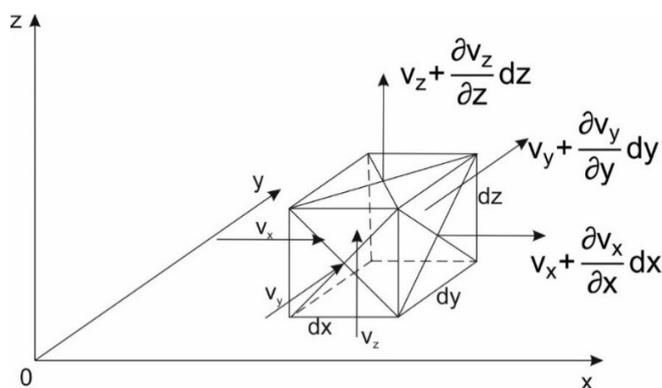


Bild 2.8 Durchströmtes Raumelement

Das prinzipielle Verhalten eindimensionaler Strömungen lässt sich an idealen Fluiden nach der Stromfadentheorie gut aufzeigen. Dabei gilt die EULERSche Bewegungsgleichung (Strömungsgleichung).

Bei der Krafteinwirkung in Bewegungsrichtung, wie es in Bild 2.9 dargestellt ist, ergibt sich die EULERSche Strömungsgleichung von eindimensionalen instationären Strömungen in Stromlinienrichtung zu

$$g \cdot \partial z + \frac{1}{\rho} \cdot \partial p + \partial \left(\frac{v^2}{2} \right) + \frac{\partial v}{\partial t} \cdot \partial s = 0 \quad (\text{Gl. 2.21})$$

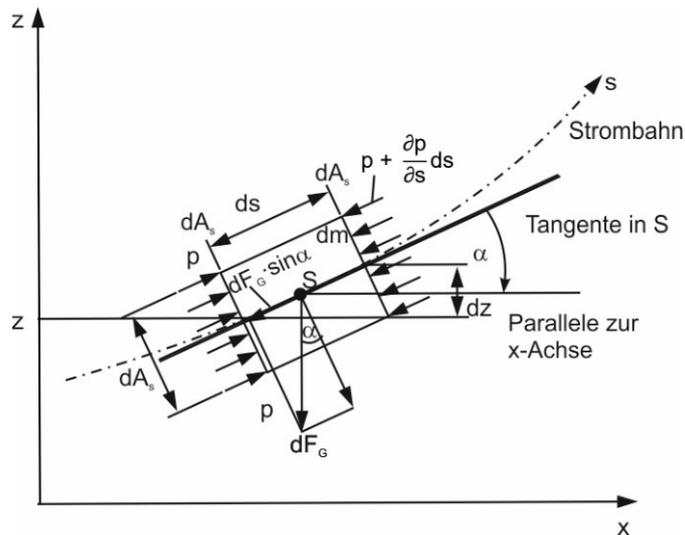


Bild 2.9 Kräfte auf ein Fluidteilchen in Bewegungsrichtung s

Bei Krafteinwirkung in Normalrichtung (Bild 2.10) lautet die EULERSche Strömungsgleichung wie folgt:

$$g \cdot \partial z + \frac{1}{\rho} \cdot \partial p + \left(\frac{v^2}{R} \right) \cdot \partial n = 0 \quad (\text{Gl. 2.22})$$

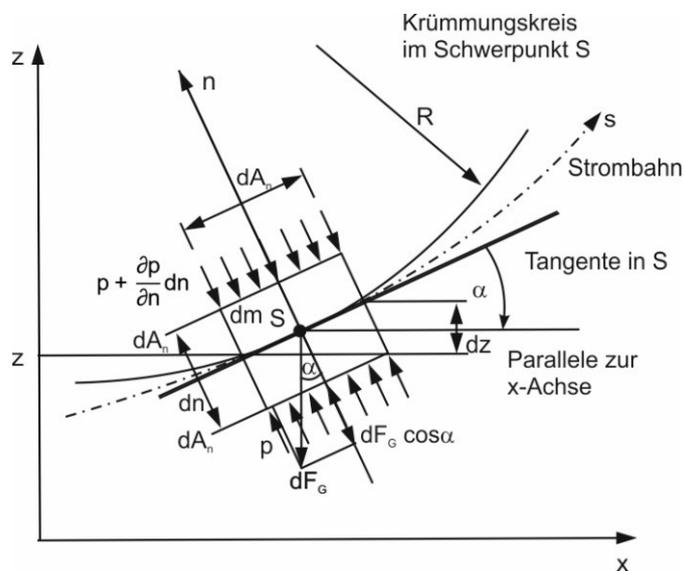


Bild 2.10 Kräfte auf ein Fluidteilchen in Normalrichtung n

Die Energiegleichungen ergeben sich durch Integration der EULERSchen Bewegungsgleichungen für instationäre Strömungen idealer Fluide zu

$$g \cdot z + \int_0^p \frac{1}{\rho} \cdot \partial p + \frac{v^2}{2} + \int_0^s \frac{\partial v}{\partial t} \cdot \partial s = \text{konst.} \quad (\text{Gl. 2.23})$$

Bei der Beschreibung der Energiegleichung instationärer Strömungen ist es notwendig, auch kurz auf den Druckstoß (JOUKOWSKY-Stoß) (Joukowsky (1900)) einzugehen, der beispielsweise bei der plötzlichen Unterbrechung von Flüssigkeitsströmungen in einem Rohr auftritt. Dabei findet durch die plötzliche Änderung der Strömungsgeschwindigkeit ein Drucksprung Δp statt, der von JOUKOWSKY wie folgt beschrieben wurde:

$$\Delta p = \rho \cdot c_c \cdot \Delta v \quad [\text{N/m}^2] \quad (\text{Gl. 2.24})$$

mit: ρ Dichte [kg/m^3]
 c_c charakteristische Schall-, d.h. Druckwellengeschwindigkeit
 Δv plötzliche Geschwindigkeitsänderung [m/s]

Die Energiegleichung von stationären, idealen, inkompressiblen Fluiden, die als BERNOULLI-Gleichung (Bernoulli (1738)) bekannt ist, lautet wie folgt:

$$g \cdot z + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{konst.} \quad (\text{Gl. 2.25})$$

bzw.

$$z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} = \text{konst.} \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 2.26})$$

mit: z Ortshöhe [m]
 $\frac{v^2}{2 \cdot g}$ Geschwindigkeitshöhe [m]
 $\frac{p}{\rho \cdot g}$ Druckhöhe [m]

Die BERNOULLI-Gleichung setzt sich demnach aus der Summe der Orts-, Druck- und Geschwindigkeitshöhe zusammen. In Bild 2.11 sind die Zusammenhänge der BERNOULLI-Gleichung bildlich dargestellt.

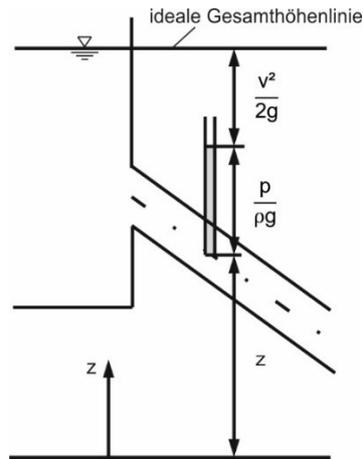


Bild 2.11 Orts-, Druck und Geschwindigkeitshöhe in der BERNOULLI-Gleichung

2.2 Ausflussformel nach Torricelli

Der Ausfluss eines inkompressiblen Fluids aus einer seitlichen Öffnung am unteren Rand eines Behälters ist ein in der elementaren Strömungsmechanik bekanntes Problem (Gross et al. (2009), Hutter (2003), Herwig (2006), Siekmann & Thamnsen (2009), Spurk (2010), Truckenbrodt (2008a)). Nach Torricelli (1608-1647) kann die stationäre Fluidgeschwindigkeit v in einem vergleichsweise kleinen Ausflussquerschnitt aus der Erdbeschleunigung g und der Höhe h des Fluidstandes über dem Ausflussquerschnitt zu

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 2.27})$$

mit: g Erdbeschleunigung [m/s^2]
 h Höhe [m]

ermittelt werden (Hutter (2003)) (vgl. Bild 2.12).

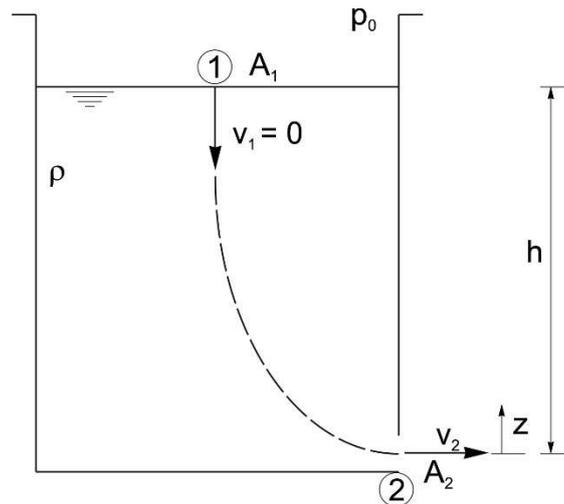


Bild 2.12 Ausfluss einer inkompressiblen Flüssigkeit aus einem Behälter nach Hutter (2003)

Die Ausflussformel nach Torricelli kann aus der Bernoulli-Gleichung (vgl. (Gl. 2.26) hergeleitet werden.

Für die Herleitung ist das in Bild 2.12 mit einem Fluid gefüllte Gefäß zu betrachten, bei dem das Fluid mit der Geschwindigkeit v_2 durch die Öffnung des Gefäßes ausfließt. Betrachtet man die Energiehöhen gemäß der Bernoulli-Gleichung für ein Fluid an den beiden Punkten 1 und 2, so ergeben sich diese zu:

$$H_1 = \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho_1 \cdot g} + z_1 \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 2.28})$$

$$H_2 = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho_2 \cdot g} + z_2 \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 2.29})$$

Unter der Annahme der Gültigkeit des Energieerhaltungssatzes und dass keine Verluste beispielsweise durch Reibung vorhanden sind, kann man die Energiehöhen H_1 und H_2 gleichsetzen:

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho_1 \cdot g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho_2 \cdot g} + z_2 \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 2.30})$$

Geht man davon aus, dass die Geschwindigkeit $v_1 = 0$, also quasi-stationäre Bedingungen vorliegen, der Druck unverändert ist und die Dichte des ausfließenden Fluids ebenfalls unverändert bleibt, so erhält man

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho_1 \cdot g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho_2 \cdot g} + z_2 \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 2.31})$$

$$z_1 = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 2.32})$$

setzt man für z_1 die Höhe h ein und formt nach $v_2^2 = v^2$ um, so erhält man:

$$v^2 = 2 \cdot g \cdot h \quad [\text{m}^2/\text{s}^2] \quad (\text{Gl. 2.33})$$

Die Geschwindigkeit v ergibt sich somit zu:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 2.34})$$

und entspricht der Ausflussformel nach Torricelli. Die notwendigen Annahmen für die Gültigkeit der Ausflussformel seien an dieser Stelle nochmal zusammenfassend dargestellt:

- Geschwindigkeit $v_1 = 0$
- Druck bleibt unverändert, d.h. $p_1 = p_2 = 0$
- Dichte bleibt unverändert, d.h. $\rho_1 = \rho_2$
- es treten keine Verluste durch Reibung auf

In Versuchen hat sich gezeigt, dass die tatsächliche Ausflussgeschwindigkeit etwas kleiner als die nach der Ausflussformel von Torricelli ermittelte, theoretische Geschwindigkeit ist (Weisbach (1855)).

Diese Reduktion der Geschwindigkeit einer Flüssigkeit durch eine Öffnung ist auf das Auftreten der folgenden beiden Phänomene zurückzuführen. Zum einen ist das die Strahlkontraktion (Strahleinschnürung) und zum anderen die Fluidreibung (Weisbach (1855), Truckenbrodt (2008a)).

In Bild 2.13 ist das Ausfließen aus einer abgerundetem (Bild 2.13a) und aus einer scharfkantigen (Bild 2.13b) Öffnung nach Truckenbrodt (2008a) dargestellt. Die Strahleinschnürung erfolgt durch eine starke Umlenkung der Strömung und ist umso größer, je scharfkantiger die Öffnung ausgebildet ist. Die Reduktion des

Strahlquerschnitts wird mit dem Beiwert, der so genannten Kontraktionszahl α ausgedrückt. Diese ist abhängig von der Form der Öffnung. Die Kontraktionszahl ist experimentell zu bestimmen. In Tabelle 2.2 sind beispielhaft Beiwerte für unterschiedliche Öffnungen angegeben.

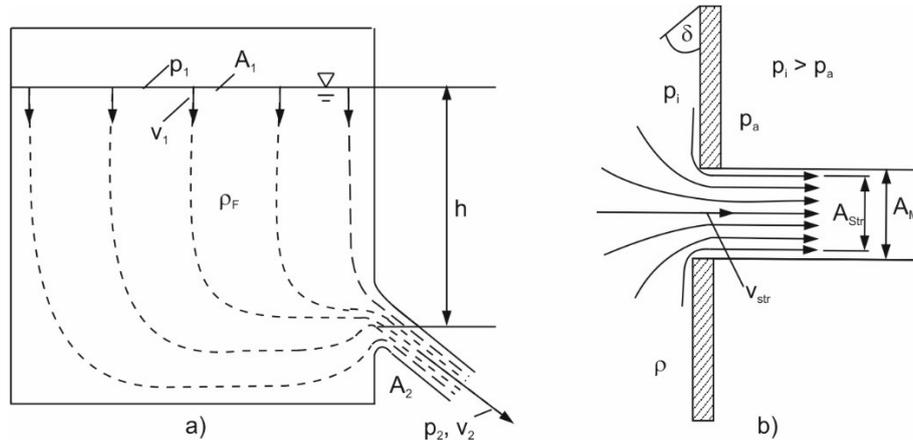


Bild 2.13 Ausfluss eines Fluids durch eine Öffnung aus einem Behälter
a) Zur Berechnung der Ausflussgeschwindigkeit und Strahlreaktion
b) Strahlkontraktion bei scharfkantigen Öffnungen

Durch die Verkleinerung des Querschnitts beim Austritt des Fluids aus einer Öffnung wird die Fluidreibung verstärkt, wodurch sich die Ausflussgeschwindigkeit verringert. Durch den Verlust kinetischer Energie ist die tatsächliche Strahlgeschwindigkeit immer geringer als die theoretische; diese Reduktion wird mit der Geschwindigkeitszahl ϕ angegeben, die ebenfalls experimentell zu bestimmen ist. Die Geschwindigkeitszahl ist wie die Kontraktionszahl von der Form der Öffnung abhängig. In Tabelle 2.2 sind hierzu ebenfalls beispielhaft Werte in Abhängigkeit von der vorhandenen Öffnung angegeben.

Bei der experimentellen Untersuchung ist es schwierig, die Kontraktionszahl α von der Geschwindigkeitszahl ϕ zu trennen, weshalb die beiden Beiwerte zur Ausflusszahl $\mu = \alpha \cdot \phi$ zusammengefasst werden (Sigloch (2017)). Die Ausflusszahl μ ist immer von den tatsächlich vorhandenen Randbedingungen abhängig und versuchstechnisch zu bestimmen. Orientierungswerte der Ausflusszahl für kleine und große Öffnungen sind in Tabelle 2.2 und Tabelle 2.3 angegeben.

Der Volumenstrom wird dementsprechend durch die Kontraktion und die Fluidreibung verkleinert; der tatsächliche Volumenstrom ist dementsprechend kleiner als der theoretisch mögliche Volumenstrom.

Der ausfließende (tatsächliche) Volumenstrom ergibt sich dementsprechend aus dem theoretischen Volumenstrom wie folgt:

$$\dot{V}_{th} = A_M \cdot v_{th} \quad [m^3/s] \quad (Gl. 2.35)$$

$$v_{th} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [m/s] \quad (Gl. 2.36)$$

$$\dot{V} = A_{str} \cdot v_{str} \quad [m^3/s] \quad (Gl. 2.37)$$

$$\dot{V} = \underbrace{\alpha \cdot \varphi}_{\mu} \cdot \underbrace{A_M \cdot v_{th}}_{\dot{V}_{th}} \quad [m^3/s] \quad (Gl. 2.38)$$

$$\dot{V} = \mu \cdot \dot{V}_{th} \quad [m^3/s] \quad (Gl. 2.39)$$

- mit:
- \dot{V}_{th} theoretischer Volumenstrom [m³/s]
 - A_M Mündungs- bzw. Öffnungsquerschnitt [m²]
 - v_{th} theoretische Geschwindigkeit [m/s]
 - \dot{V} ausfließender Volumenstrom [m³/s]
 - A_{str} Strahlquerschnitt [m²]
 - v_{str} tatsächliche Strahlgeschwindigkeit [m/s]
 - α Kontraktionszahl [-]
 - φ Geschwindigkeitszahl [-]
 - μ Ausflusszahl [-]

Für die Fließgeschwindigkeit von Fluiden aus kleinen Ausflussquerschnitten gilt, dass die Ausflussgeschwindigkeit über den Querschnitt betrachtet quasi konstant ist und somit der Zentrumswert, der in etwa dem Mittelwert entspricht, angesetzt werden kann.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Einflussfaktoren, die die Ausflussgeschwindigkeit des Fluids im Vergleich zur theoretisch möglichen Ausflussgeschwindigkeit reduzieren, gilt für die Ausflussformel nach Torricelli folgendes:

$$v = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [m/s] \quad (Gl. 2.40)$$

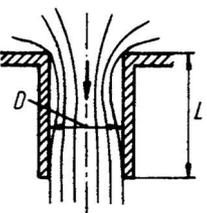
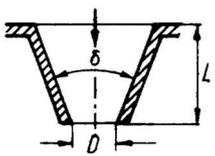
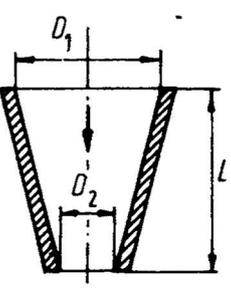
Öffnungsform	Kontraktionszahl α [-]	Geschwindigkeitszahl φ [-]	Ausflusszahl μ [-]														
<p>Mündung scharfkantig</p> 	0,61 - 0,64	0,87	0,53 - 0,56														
<p>Mündung gut gerundet</p> 	$\approx 1,0$	0,97 - 0,99	0,97 - 0,99														
<p>Zylindrisches Ansatzrohr mit $L/D = 2 - 3$</p> 	$\approx 1,0$	$\approx 0,82$	$\approx 0,82$														
<p>Konisches Ansatzrohr mit $L/D = 3$</p> 			<table border="1"> <thead> <tr> <th>δ</th> <th>μ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10°</td> <td>0,95</td> </tr> <tr> <td>20°</td> <td>0,94</td> </tr> <tr> <td>45°</td> <td>0,88</td> </tr> <tr> <td>60°</td> <td>0,74</td> </tr> </tbody> </table>	δ	μ	10°	0,95	20°	0,94	45°	0,88	60°	0,74				
δ	μ																
10°	0,95																
20°	0,94																
45°	0,88																
60°	0,74																
<p>Düse $m = (D_2/D_1)^2$</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>m</th> <th>α</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,1</td> <td>0,83</td> </tr> <tr> <td>0,2</td> <td>0,84</td> </tr> <tr> <td>0,4</td> <td>0,87</td> </tr> <tr> <td>0,6</td> <td>0,90</td> </tr> <tr> <td>0,8</td> <td>0,94</td> </tr> <tr> <td>1,0</td> <td>1,00</td> </tr> </tbody> </table>	m	α	0,1	0,83	0,2	0,84	0,4	0,87	0,6	0,90	0,8	0,94	1,0	1,00	<p>kurze Düse $\varphi = 0,97$</p> <p>lange Düse $\varphi = 0,95$</p>	
m	α																
0,1	0,83																
0,2	0,84																
0,4	0,87																
0,6	0,90																
0,8	0,94																
1,0	1,00																

Tabelle 2.2 Beiwerte α , φ und μ verschiedener kleiner Öffnungsformen nach Sigloch (2017)

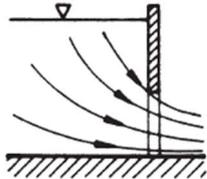
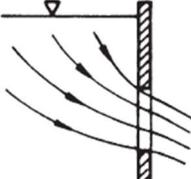
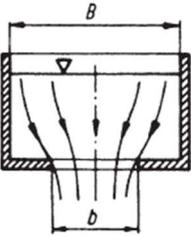
Bezeichnung	Öffnungsform	Ausflusszahl μ [-]														
Grundablass		0,60 - 0,62														
Seitenablass		scharfkantig: 0,62 - 0,64 abgerundet: 0,70 - 0,80														
Bodenablass		<table border="1"> <thead> <tr> <th>b/B</th> <th>μ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,0</td> <td>0,61</td> </tr> <tr> <td>0,1</td> <td>0,61</td> </tr> <tr> <td>0,2</td> <td>0,62</td> </tr> <tr> <td>0,3</td> <td>0,63</td> </tr> <tr> <td>0,4</td> <td>0,65</td> </tr> <tr> <td>0,5</td> <td>0,68</td> </tr> </tbody> </table>	b/B	μ	0,0	0,61	0,1	0,61	0,2	0,62	0,3	0,63	0,4	0,65	0,5	0,68
b/B	μ															
0,0	0,61															
0,1	0,61															
0,2	0,62															
0,3	0,63															
0,4	0,65															
0,5	0,68															

Tabelle 2.3 Ausflusszahl μ für verschiedene große Öffnungen nach Sigloch (2017)

2.3 Wasser im Boden

2.3.1 Grundwasserströmungen

Grundwasserströmungen haben grundsätzlich die gleiche Eigenschaft wie frei strömende Flüssigkeiten; die Strömung verläuft von Orten höherer Energie zu Orten niedrigerer Energie (Kolymbas (2019)). Die BERNOULLI-Gleichung hat dementsprechend auch hier Gültigkeit. Die Energiehöhe h ergibt sich demnach zu:

$$h = z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} = \text{konst.} \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 2.41})$$

Die Geschwindigkeitshöhe ($v^2/(2 \cdot g)$) kann aufgrund der kleinen Geschwindigkeiten im Grundwasser im Vergleich zur Ortshöhe z und der Druckhöhe ($p/(\rho \cdot g)$) vernachlässigt

werden (David (1998)). Somit ergibt sich die hydraulische Höhe h , die in der Geotechnik auch als Potenzial bezeichnet wird, zu

$$h = z + \frac{p}{\rho \cdot g} = z + \frac{p}{\gamma} = \text{konst. [m]} \quad (\text{Gl. 2.42})$$

Der Boden ist ein Mehrphasensystem, bei dem zwischen dem Korngerüst ein Porenraum vorhanden ist, der in der Regel mit Luft und Wasser bzw. bei vollgesättigten Böden mit Wasser gefüllt ist. Aufgrund dieser Tatsache ist eine hydraulische Kommunikation innerhalb des Bodens möglich, und das Grundwasser kann durch den Porenraum fließen.

Betrachtet man die Geschwindigkeit der Grundwasserströmung, ist eine Differenzierung, wie in Bild 2.14 dargestellt, erforderlich.

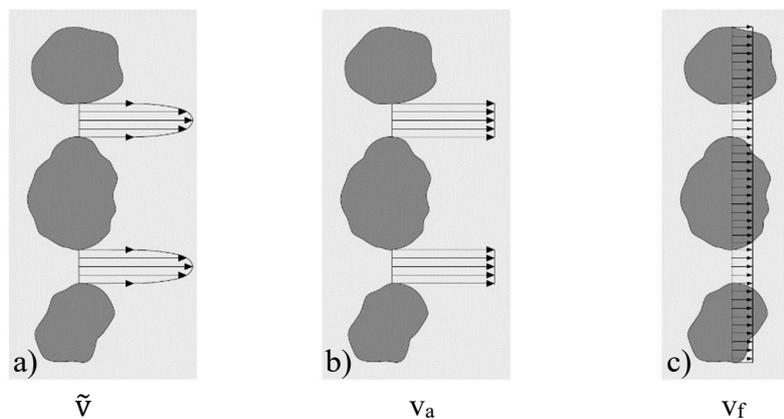


Bild 2.14 Fließgeschwindigkeiten von Grundwasserströmungen im Boden (Kolymbas (2019))

Bild 2.14 a) zeigt dabei die tatsächliche Verteilung der Geschwindigkeit \tilde{v} im Porenraum zwischen den Bodenkörner. In Bild 2.14 b) ist die über den Porenraum gemittelte Fließgeschwindigkeit, die Abstandsgeschwindigkeit v_a , dargestellt. In der Geotechnik findet jedoch primär die Filtergeschwindigkeit v bzw. v_f Anwendung, insbesondere deshalb, weil sich die tatsächliche und die Abstandsgeschwindigkeit schwer bestimmen lassen. Die Filtergeschwindigkeit stellt dabei den Mittelwert über den gesamten Querschnitt dar und bestimmt sich aus dem Porenanteil n und der Abstandsgeschwindigkeit wie folgt:

$$v = v_f = n \cdot v_a \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 2.43})$$

Nach Darcy (Darcy (1856)) wird das Verhältnis des Potenzialunterschieds Δh zur durchströmten Länge Δl als hydraulisches Gefälle i bezeichnet (vgl. Bild 2.15).

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [-] \quad (\text{Gl. 2.44})$$

mit: Δh Potenzialunterschied [m]
 Δl durchströmte Länge [m]

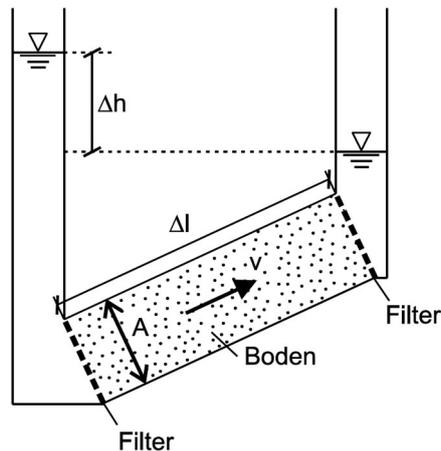


Bild 2.15 Durchströmung einer Bodenprobe (Aulbach (2013))

Das Gesetz von Darcy gibt unter Berücksichtigung des hydraulischen Gefälles i und dem Durchlässigkeitsbeiwert k die Filtergeschwindigkeit wie folgt an:

$$v = k \cdot i = k \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 2.45})$$

mit: k Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

Voraussetzung für die Gültigkeit des Gesetzes von Darcy ist das Vorliegen einer laminaren Strömung. Nach Ohde (1954) liegen unter folgender Voraussetzung laminare Verhältnisse vor:

$$i \leq \frac{0,1}{d_w^3} \quad [-] \quad (\text{Gl. 2.46})$$

mit: d_w wirksamer Korndurchmesser [mm]

Unter der Annahme der Inkompressibilität des Wassers besitzt für das in Bild 2.15 dargestellte System die Kontinuitätsgleichung Gültigkeit:

$$Q_{\text{ein}} = Q_{\text{aus}} = Q = v \cdot A = \text{konst.} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{Gl. 2.47})$$

Daraus ergibt sich, dass sich die Filtergeschwindigkeit bei einem kleineren Querschnitt erhöht bzw. bei einem größeren Querschnitt verringert.

2.3.2 Hydraulisch verursachtes Versagen

Nach DIN EN 1997-1: 2014-03 (DIN (2014)) werden vier verschiedene Versagensarten des Bodens infolge von Porenwasserdruck oder Sickerströmungen unterschieden:

- Hydraulischer Grundbruch
- Versagen durch Aufschwimmen
- Versagen durch innere Erosion
- Versagen durch Piping

Der hydraulischen Grundbruch ist ein bereits umfassend untersuchter Versagensvorgang (vgl. beispielsweise Aulbach (2013), Brinch-Hansen (1953), Davidenkoff (1970), Harza (1935), Katzenbach et al. (2011), Müller-Kirchenbauer (1964), Odenwald & Herten (2008), Terzaghi & Jelinek (1954)). Er ist definiert als das Versagen einer von unten nach oben durchströmten Bodensäule. Ein Versagen tritt ein, wenn die Strömungskraft der Kraft aus der Wichte des Bodens unter Auftrieb entspricht bzw. größer wird (Bild 2.16). Die Strömungskraft S ergibt sich aus dem hydraulischen Gradienten i und der Wichte des Wassers γ_w für das Volumen V zu:

$$S = i \cdot \gamma_w \cdot V \quad [\text{kN}] \quad (\text{Gl. 2.48})$$

Zum Zeitpunkt des Versagens verliert der Boden seine Korn-zu-Korn-Reibung. Durch die Strömung wird der Boden angehoben, und es kommt zu Auflockerungserscheinungen und zu einem schnellen Versagen. In Bild 2.17 ist das Versagen bei einem Versuch zur Analyse des Versagensmechanismus von Katzenbach et al. (2011) beispielhaft dargestellt. Bei dem Versuch wurde die Strömungskraft durch das Absenken des Wasserspiegels auf der Baugrubenseite erhöht. Der Ablauf des Versagens kann den Darstellungen in Bild 2.17 deutlich entnommen werden.

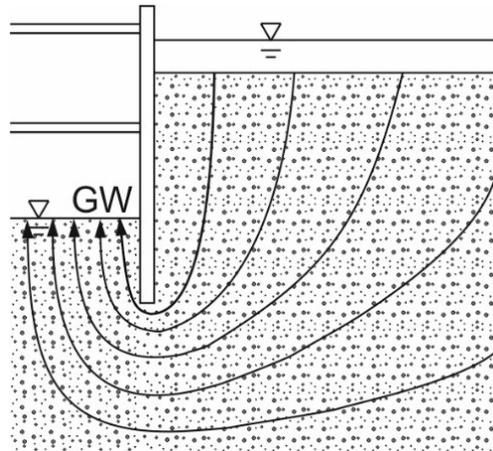


Bild 2.16 Nach oben gerichtete Strömung bei einer schmalen Baugrube nach EAB (DGGT (2012))

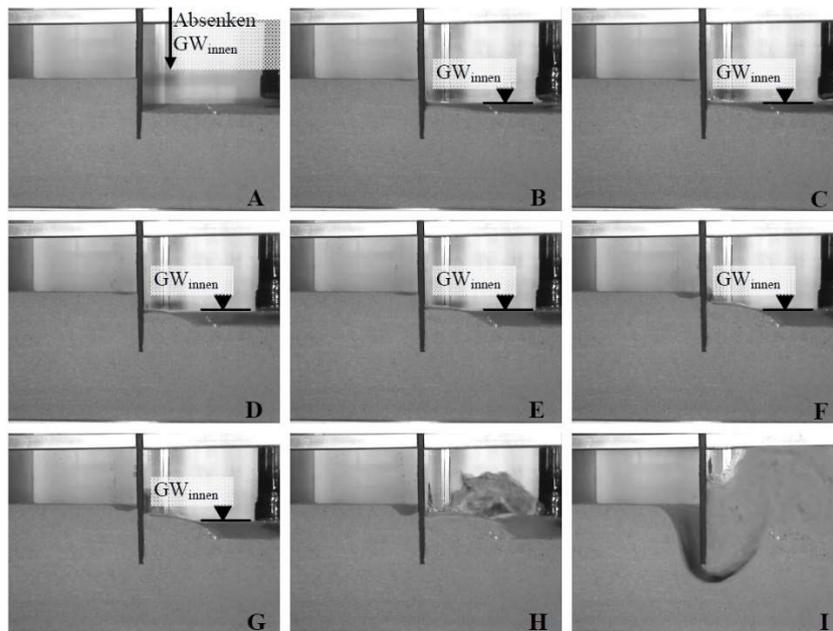


Bild 2.17 Versuch zum Versagen durch hydraulischen Grundbruch von Katzenbach et al. (2011)

Beim Versagen durch Aufschwimmen spielt im Gegensatz zum Versagen durch hydraulischen Grundbruch nicht die Grundwasserströmung und die daraus resultierende Strömungskraft selbst die maßgebliche Rolle, sondern der unter einem Bauwerk oder einer Dichtsohle in einer Baugrube wirkende Porenwasserdruck. Ein Versagen durch Aufschwimmen tritt ein, wenn die Auftriebskraft infolge Porenwasserdruck größer als die vorhandenen Gewichtskräfte aus dem Bauwerk oder einer Dichtsohle in einer Baugrube mit überlagernden Schichten wird (vgl. Bild 2.18).

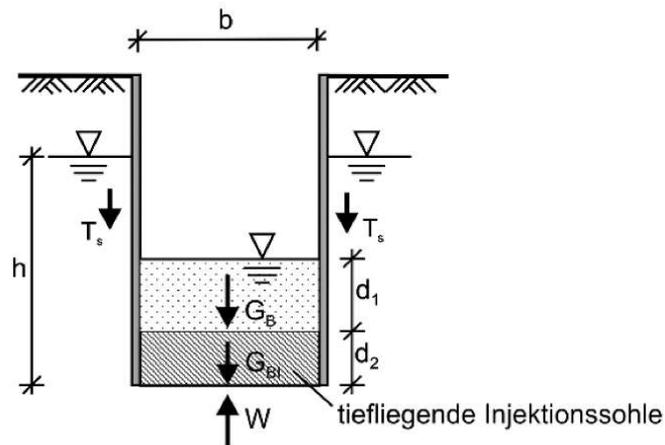


Bild 2.18 Aufschwimmen einer Baugrube nach Witt (2018)

Ein Versagen durch innere Erosion wird, wie beim hydraulischen Grundbruch, durch eine Grundwasserströmung hervorgerufen. Dabei kommt es zu einem Transport von Bodenteilchen innerhalb einer Bodenschicht (Bild 2.19 a)), an einer Schichtgrenze (Bild 2.19 b)) oder an der Kontaktfläche zwischen dem Boden und einem Bauwerk (Bild 2.19 c)). Dieser Transport von Bodenteilchen kann nach DIN 1997-1:2014-03 (DIN (2014)) schließlich zu einer rückschreitenden Erosion und damit zum Einsturz des Bauwerks führen (Aulbach (2013)).

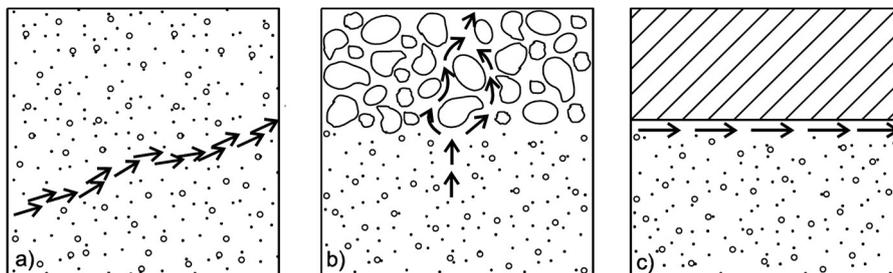


Bild 2.19 Innere Erosion a) in einer Bodenschicht, b) an einer Schichtgrenze und c) an einer Kontaktfläche zwischen Boden und Bauwerk nach Aulbach (2013)

Piping ist eine Sonderform des Versagens durch die an der Oberfläche beginnende innere Erosion (vgl. Bild 2.20). Gemäß EAU (DG GT (2012)) ist die Gefahr von Piping gegeben, wenn durch eine Wasserströmung Boden an einer Gewässer- oder Baugrubensohle ausgespült werden kann. Dabei werden Bodenteilchen nach oben aus dem Boden herausgelöst, ein Vorgang, der sich entgegen der Fließrichtung des Wassers in den Boden hinein fortsetzt, weshalb dieser Vorgang auch als rückschreitende Erosion bezeichnet wird.

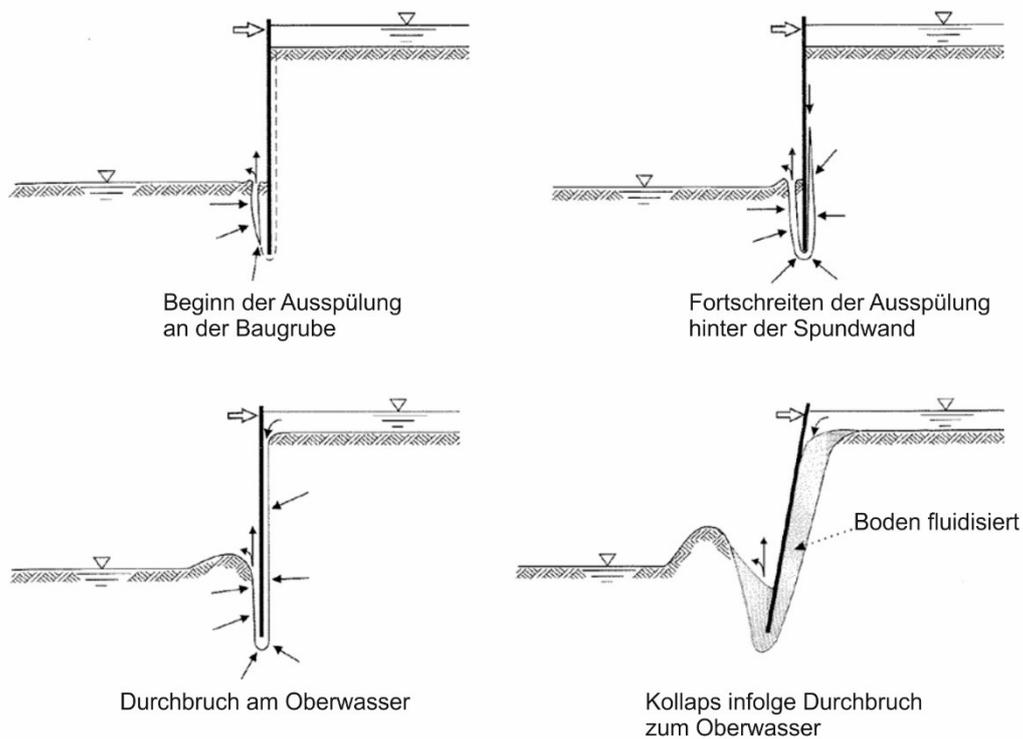


Bild 2.20 Entwicklung von Piping an Uferwänden nach EAU (DGGT (2012))

Ein weiteres hydraulisches Versagen stellt die spontane Verflüssigung des Bodens dar, das von Müller-Kirchenbauer (1964) als Übergang eines zunächst stabilen Kornhaufwerkes in einen flüssigkeitsähnlichen Zustand beschrieben wird (siehe auch Hakim (1991), Jennerich (1999), Leonhardt (1989), Raju (1994) und Zhou et al. (2010)). Dieser flüssigkeitsähnliche Zustand liegt vor, wenn kein Korn-zu-Korn Kontakt mehr besteht und Wasser sich stattdessen zwischen den Körnern befindet (siehe Bild 2.21). Dabei verliert der Boden seine Scherfestigkeit und verhält sich selbst wie eine Flüssigkeit.

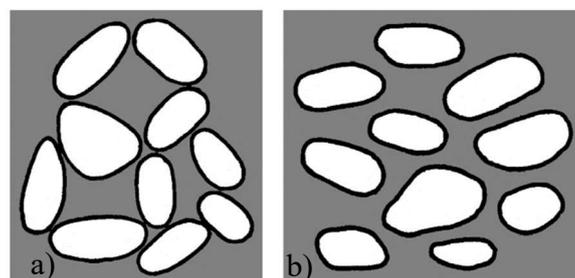


Bild 2.21 Bodenkörner eines wassergesättigten Bodens
a) stabiler Lagerungszustand
b) verflüssigter Zustand
gemäß Müller-Kirchenbauer (1964)

Das Auftreten des Phänomens der plötzlichen Verflüssigung setzt einen wassergesättigten locker gelagerten Sand mit einer entsprechend großen Porenzahl voraus. Raju (1994) beschreibt dieses anhand des Bernatzki-Versuchs (Bernatzki (1947)), der in Bild 2.22 dargestellt ist. Bei diesem Versuch wird ein Gewicht vorsichtig auf locker gelagerten, wassergesättigten Sand gestellt; das Gewicht sinkt infolge eines leichten Schlags auf den Boden des Gefäßes. Dabei kommt es zu einem kontraktanten Verhalten des Bodens, bei dem das Korngerüst von einer lockeren in eine dichtere Lagerung übergeht. Als Ergebnis ist ein Anstieg des Porenwasserdruckes zu beobachten. Dabei verringern sich die effektiven Spannungen oder verschwinden sogar. Der Sand verhält sich über einen gewissen Zeitraum wie eine zähe Flüssigkeit und verliert in Folge dessen seine Tragfähigkeit. Erst wenn der Porenwasserüberdruck wieder abgebaut ist, bekommt der Boden seine Festigkeit zurück.

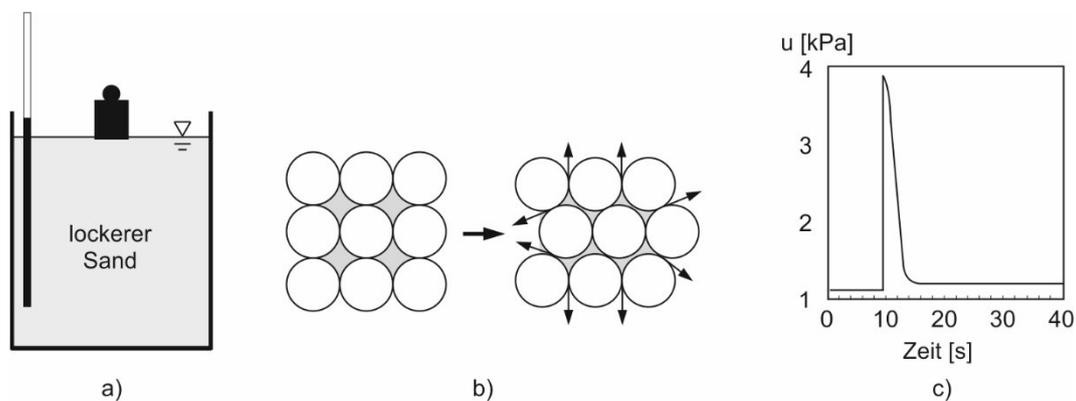


Bild 2.22 Bernatzki-Versuch gemäß (Raju (1994))
a) Systemskizze
b) kontraktantes Verhalten von locker gelagertem Sand
c) gemessener Porenwasserdruckanstieg während des Versuchs

2.4 Theorie Poröser Medien

Die Theorie Poröser Medien (Bowen (1976), Drew & Passmann (1999), Schneider & Hutter (2009), Truesdell (1966)) respektive die erweiterte Theorie Poröser Medien (Ehlers (1989), Ehlers (1996), Ehlers & Bluhm (2002)) ist ein generelles kontinuummmechanisches und thermodynamisches Konzept zur makroskopischen Beschreibung eines Multiphasenmediums. Das grundlegende Problem, das bei der Beschreibung von porösen Medien auftritt, ist die Unbekanntheit der inneren Geometrie. Die innere Porenstruktur ist sehr komplex in ihrem Aufbau, weshalb eine wirklichkeitsgetreue Abbildung nur schwer möglich ist.

In der Theorie Poröser Medien wird von einem idealisierten Ersatzmodell, in dem sich alle Bestandteile in einem Kontrollraum gleich verteilen, ausgegangen. Die Teilkörper

werden als ideal vermischt angesehen. Der poröse Körper wird als homogener Ersatzkörper idealisiert (vgl. Bild 2.23). Der Kontrollraum muss dabei aufgrund der Annahme, dass die Bestandteile gleichmäßig im Kontrollraum verteilt sind, gegenüber den einzelnen Bestandteilen des porösen Mediums ausreichend groß sein, um eine makroskopische Betrachtung zu rechtfertigen.

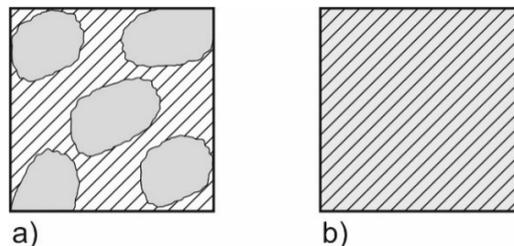


Bild 2.23 Poröses Medium a) geometrische Darstellung b) verschmiertes Modell

Bei der Modellbildung wird die innere Wechselwirkung der Bestandteile untereinander durch makroskopische Kopplungsgrößen berücksichtigt (Truesdell & Toupin (1960), Truesdell & Noll (1960)). Dadurch wird die innere Interaktion auch auf makroskopischer Ebene berücksichtigt.

Das Mehrphasenmedium φ ergibt sich dementsprechend aus der Summe seiner Konstituierenden φ^α , wobei α die jeweilige Konstituierende angibt:

$$\varphi = \sum_{\alpha=1}^k \varphi^\alpha \quad (\text{Gl. 2.49})$$

Nach Ehlers (1989) sind alle geometrischen und physikalischen Größen wie Geschwindigkeit, Verformungen und Spannungen aller Bestandteile des Gemisches durch die Modellbildung ebenfalls im Kontrollraum definiert und können als statistische Mittelwerte oder Effektivwerte der auf der mikroskopischen Ebene vorkommenden Werte angesehen werden.

Beim Konzept der Volumenanteile wird nach Benke (2003) auf eine genaue Beschreibung der Porenstruktur und auf eine exakte Lokalisierung der einzelnen Konstituierenden im Werkstoff verzichtet. Der Volumenanteil der einzelnen Gemischbestandteile n^α setzt sich dabei aus dem lokalen Verhältnis dv^α der Konstituierenden φ^α zum Gesamtvolumen dv wie folgt zusammen:

$$n^\alpha = \frac{dv^\alpha}{dv} \quad (\text{Gl. 2.50})$$

Unter der Annahme, dass das Festkörperskelett und die verschiedenen Fluide den Kontrollraum vollständig ausfüllen, gilt:

$$\sum_{\alpha=1}^k n^{\alpha} = 1 \quad (\text{Gl. 2.51})$$

Dies wird auch als Sättigungsbedingung bezeichnet.

Nach Ehlers (1989) lässt sich durch die Volumenanteile und die Sättigungsbedingung das Volumen des Körpers B auf die folgenden verschiedenen Arten darstellen:

$$V = \int_B dv = \sum_{\alpha=1}^k V^{\alpha} = \int_B \sum_{\alpha=1}^k dv^{\alpha} = \int_B \sum_{\alpha=1}^k n^{\alpha} dv \quad (\text{Gl. 2.52})$$

2.5 Particle Image Velocimetry Methode

Nachfolgend wird das Prinzip der Particle Image Velocimetry Methode beschrieben, die für die Messung der Geschwindigkeit und der Fließbewegung des wassergesättigten grobkörnigen Bodens im Rahmen dieser Arbeit verwendet worden ist.

Die Particle Image Velocimetry Methode, kurz PIV-Methode, hat ihren Ursprung in der Anwendung bei der Beschreibung von Geschwindigkeitsfeldern von Fluiden, also Flüssigkeiten und Gasen (vgl. beispielsweise Bröder (2003), Cierpka (2008), Kirschner (2006), Merzkirch et al. (1997), Pust (2011)).

Ein entscheidender Vorteil dieser Messtechnik ist die Tatsache, dass es sich um eine rein optische Messtechnik handelt und somit keine Beeinflussung der Fließbewegung durch die Messung stattfindet. Die PIV-Methode ist inzwischen auch eine bewährte Methode zur Erfassung von Bewegungen und Versagensmechanismen im Bereich der Bodenmechanik. Hierzu wurden bereits zu den unterschiedlichsten bodenmechanischen Fragestellungen die Geschwindigkeitsverteilung bzw. Verformungen von trockenem Boden als auch bei wassergesättigtem Boden analysiert, beispielhaft seien hier Bachmann (2009), Fischer (2019), Gutberlet (2008), Katzenbach et. al (2011a), Katzenbach et. al (2011b), Kirsch (2008), Kleine Vennekate (2012), Pudasaini et. al (2007), Pudasaini et al. (2008), Lücking (2010) und Schober (2014) genannt.

Das Prinzip der PIV-Messung basiert darauf, dass die Bewegung einzelner Partikel beobachtet und aufgezeichnet wird. Hierzu werden mit einer Kamera in einem definierten Bereich innerhalb eines kurzen Zeitabstandes zwei Bilder aufgenommen. Diese Bildpaare bestehen aus zwei Einzelbildern (Bild A und Bild B), denen die Zeitpunkte t_i bzw. $t_i + \Delta t$

zugeordnet sind. Die Verschiebungen werden in einem ausgewählten Bereich, innerhalb dessen für alle Pixel von einer gleichmäßigen Verschiebung ausgegangen werden kann (Interrogation Area), während des Zeitraumes Δt mit Hilfe einer Kreuzkorrelation ermittelt. Somit erhält man den Verschiebungsvektor zum Zeitpunkt $t_i + \Delta t/2$ (Raffel et al. (1998)) (vgl. Bild 2.24). Als Ergebnis der gesamten Verschiebungsvektoren aller Interrogation Areas erhält man ein Geschwindigkeitsfeld, in dem die Geschwindigkeiten einzelner Bereiche variieren können.

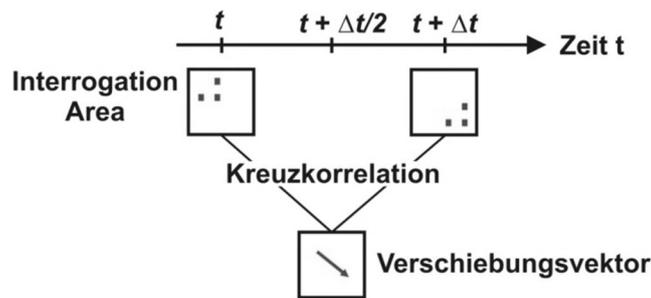


Bild 2.24 Bestimmung des Verschiebungsvektors mittels der PIV-Methode

Das grundsätzliche Prinzip baut darauf auf, dass Partikel durch einen Lichtschnitt angestrahlt werden und dann das von den Partikeln reflektierte Licht zwischen zwei kurz hintereinander folgenden Zeitpunkten mit der Zeitdifferenz Δt mit einer Kamera aufgezeichnet wird. Als Lichtquelle wird bei der ursprünglichen Nutzung der PIV-Methode, also bei Flüssigkeiten und Gasen, ein Laser verwendet, der die Partikel beleuchtet. Da in der Regel keine Partikel in dem Medium vorhanden sind, die die Beleuchtung durch den Laser reflektieren können, ist die Zugabe von sog. Tracern erforderlich. Der prinzipielle Aufbau der Messung der Geschwindigkeit mit der PIV-Methode ist in Bild 2.25 nach Raffel et al. (1998) dargestellt.

Im Gegensatz zu den Messungen von transparenten Medien ist beim Einsatz der Messmethode beim Boden die Zugabe von Tracern nicht erforderlich, da die einzelnen Bodenkörner eine individuelle Farbgebung besitzen. Bei den Messungen von Bodenkörnern ist im Gegensatz zu den Messungen bei den Fluiden der Einsatz einer konstanten Weißlichtquelle eine gängige Methode.

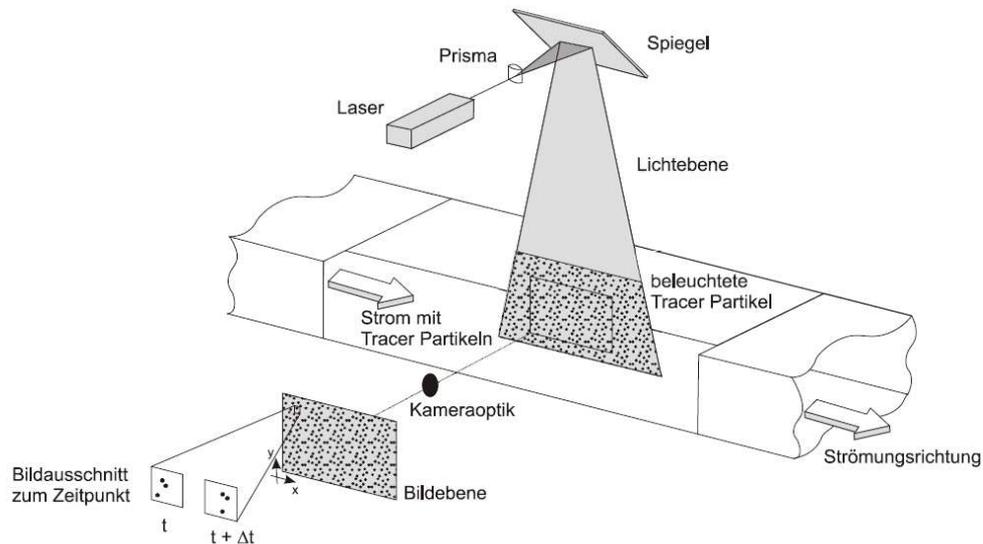


Bild 2.25 Messprinzip gemäß Raffel et al. (1998)

Hierfür wird das Bild in mehrere Teilbilder (Interrogation Areas) unterteilt. In dem zweiten Bild werden dann die Teilbilder gesucht, die die größte Übereinstimmung mit dem Teilbild aus dem ersten Bild haben. Dadurch ist es möglich, den Verschiebungsvektor zwischen den beiden Teilbildern zu bestimmen. Mit der bekannten Zeitdifferenz Δt kann daraus der Geschwindigkeitsvektor v für jedes Teilbild erzeugt werden. Die Unterteilung erfolgt meist in typische Größen wie 8×8 , 16×16 , 32×32 oder 64×64 Pixel. Die Größe hängt insbesondere von der Teilchengröße, der Geschwindigkeit und der Zeitdifferenz der beiden hintereinander aufgenommenen Bilder ab (Bachmann (2009)).

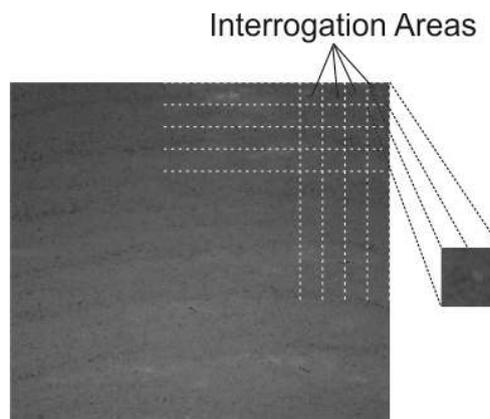


Bild 2.26 Unterteilung des Gesamtbildes in Interrogation Areas

Für die Auswertung der aufgenommenen Bilder ist im ersten Schritt die Anwendung des Image Intensity Field Function erforderlich. Mit Hilfe dieser Funktion wird die Lichtstärke resp. Lichtenergie der einzelnen Bildpunkte in einen Graustufenwert umgewandelt. Dabei sind für die Lichtintensität die Beleuchtung und die optischen Eigenschaften der Kamera entscheidend, diese können jedoch für eine Aufnahmeserie als konstant angesehen werden.

Der Graustufenwert kann dann als Zahlenwert mit zugehörigen Ortskoordinaten für das jeweilige Interrogation Area (Teilbild) gespeichert werden, und man erhält ein sog. Image Intensity Field (Zahlenfeldmuster), das mathematisch nach Raffel et al. (1998) wie folgt beschrieben wird:

$$I(x, \Gamma) = \sum_{i=1}^N V_0(X_i) \tau(x-x_i) \quad (\text{Gl. 2.53})$$

- mit: $\Gamma = X_i$ Position des i-ten Partikels im dreidimensionalen, physischen Raum
 x Position des Partikels in der zweidimensionalen Bildebene
 V_0 Transferfunktion
 τ Point Spread Funktion der Linse

Bildlich dargestellt sieht ein einzelnes Image Intensity Field wie in Bild 2.27 dargestellt aus.

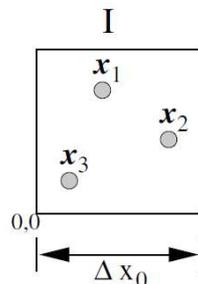


Bild 2.27 Image Intensity Field für eine einzelne Aufnahme nach Raffel et al. (1998)

Die mathematische Auswertung zur Bestimmung der Partikelverschiebung, die bei den gängigen kommerziellen Auswerteprogrammen, wie beispielsweise TSI Insight 4G (TSI Incorporated (2014)) oder FlowMaster (LaVision (2007)), angewendet wird, ist die Kreuzkorrelationsfunktion $R_{II'}(s, \Gamma, D)$. Diese ist nach Raffel et al. (1998) wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}
 R_{II'}(s, \Gamma, D) &:= \frac{1}{\alpha_I} \int_{\alpha_I} I(x, \Gamma) I'(x+s, \Gamma+D) dx \\
 &= \frac{1}{\alpha_I} \sum V_0(X_i) V_0'(X_j+D) \int_{\alpha_I} \tau(x-x_i) \tau(x-x_j+s-d) dx
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 2.54}$$

- mit: Γ Position des Partikels im dreidimensionalen Raum
 x Position des Partikels in der zweidimensionalen Bildebene
 V_0 Transferfunktion
 τ Point Spread Funktion der Linse
 α_i Interrogation Area
 s Separationsvektor in der Korrelationsebene
 D Verschiebung in der dreidimensionalen Bildebene
 d Verschiebung in der Bildebene

Ziel der Kreuzkorrelation ist die Erzeugung eines Vektors aus zwei aufeinanderfolgenden Image Intensity Fields. Hierzu wird überprüft, wo die maximale Übereinstimmung des Zahlenfeldmusters (Image Intensity Fields) innerhalb der Interrogation Area vom ersten Bild zum Folgebild vorhanden ist, und ein Verschiebungsvektor ermittelt. In Bild 2.28 ist das Schema der Kreuzkorrelation dargestellt (Raffel et al. (1998)).

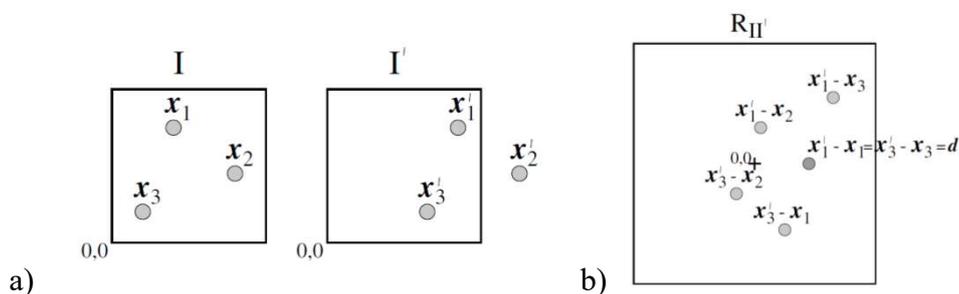


Bild 2.28 a) Image Intensity Field für zwei Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten
 b) Schematische Darstellung der Kreuzkorrelation der Intensity Fields I und I'
 nach Raffel et al. (1998)

Durch die vordefinierte Zeit Δt kann dann für jede Interrogation Area ein Geschwindigkeitsvektor erzeugt werden. Bild 2.29 zeigt nach Raffel et al. (1998) das Ergebnis der Auswertung zweier Zahlenfeldmuster mit der Kreuzkorrelation. Die maximale Übereinstimmung, die dort als höchster Peak (R_D) dargestellt ist, ist die Verschiebung, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit aufgetreten ist. Die weiteren kleinen Peaks ($R_C + R_F$), die ebenfalls als Ergebnis der Kreuzkorrelation erscheinen, sind das Ergebnis einer zufälligen Übereinstimmung und werden als Rauschen bezeichnet. Das Rauschen ist durch eine maximale Anzahl an unterschiedlichen Graustufen der

einzelnen Partikel und durch Vorversuch zur optimalen Abstimmung der Größe der Interrogation Areas, dem Zeitintervall Δt und der Verformungsgeschwindigkeit zu minimieren.

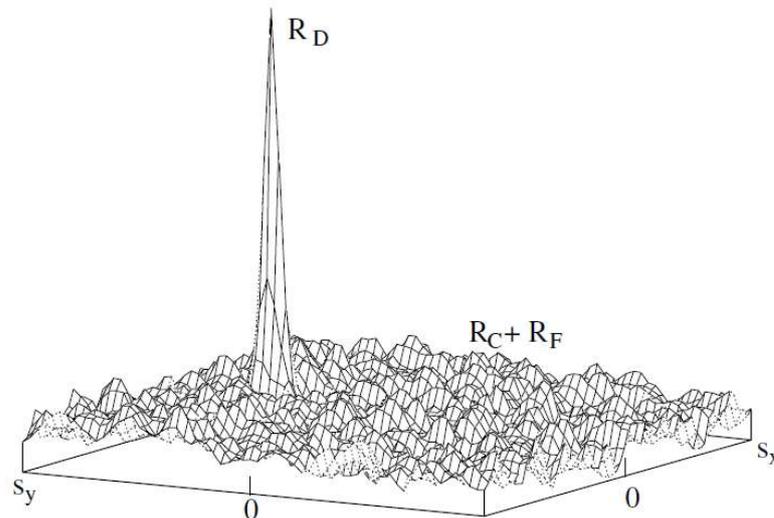


Bild 2.29 Verteilung der aufgetretenen Verschiebungen in der Kreuzkorrelation nach Raffel et al. (1998)

Bei der Auswertung der Image Intensity Fields kann es zum Verlust von Graustufenwerten innerhalb einer Interrogation Area durch den loss-of-pair Effekt kommen. Dieser Effekt wird nochmals unterteilt in den in-plane-loss-of-pair Effekt und den out-plane-loss-of-pair Effekt. Beim in-plane-loss-of-pair Effekt bewegen sich die Graustufenwerte aus der Interrogation Area hinaus. Der out-plane-loss-of-pair Effekt beschreibt das orthogonale Hinausbewegen von Graustufenwerten.

Folgende Eigenschaften der Kreuzkorrelation sind nach Bachmann (2009) bei der Anwendung zu beachten:

- Sie stellt nur eine Näherung der tatsächlichen Korrelation dar.
- Verschiebungen können sowohl in positive wie auch negative Richtung erfolgen.
- Es können nur Verschiebungen als Ergebnis geliefert werden, Dehnungen, Verzerrungen und Rotationen können nicht bestimmt werden.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Entwicklung des Versuchsstandes

Wie in Kapitel 2 bereits ausgeführt gibt es bereits zahlreiche Untersuchungen zur Beschreibung des Strömungsverhaltens von Fluiden und insbesondere von Wasser (Durst (2006), Groß et al. (2009), Herwig (2008), Hutter (2003), Sigloch (2017), Spurk & Aksell (2010), Truckenbrodt (2008a, 2008b)). Bei den Überlegungen zur Entwicklung eines eigenen, neuartigen Versuchsstandes zur Untersuchung des Strömungsverhaltens von wassergesättigten Böden lag es daher nahe, das Strömungsverhalten von Wasser zum Vergleich heran zu ziehen. Für die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit wurde als Basis die Beschreibung des Strömungsverhaltens aus einem Behälter durch eine Öffnung nach Torricelli (Torricelli (1644)) gewählt, da diese Versuche mit Wasser der grundsätzlichen Fragestellung, die im Rahmen der Grundlagenforschung zum Fließverhalten von wassergesättigten grobkörnigen Böden untersucht werden soll, entsprechen. Eine genaue Beschreibung der Ausflussformel nach Torricelli kann Kapitel 2.2 entnommen werden. In Bild 3.1 ist der Ansatz nach Torricelli (Torricelli (1644)) nochmals dargestellt. Danach ergibt sich die theoretische Geschwindigkeit v zu

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 3.1})$$

mit: g Erdbeschleunigung [m/s^2]
 h Höhe [m]

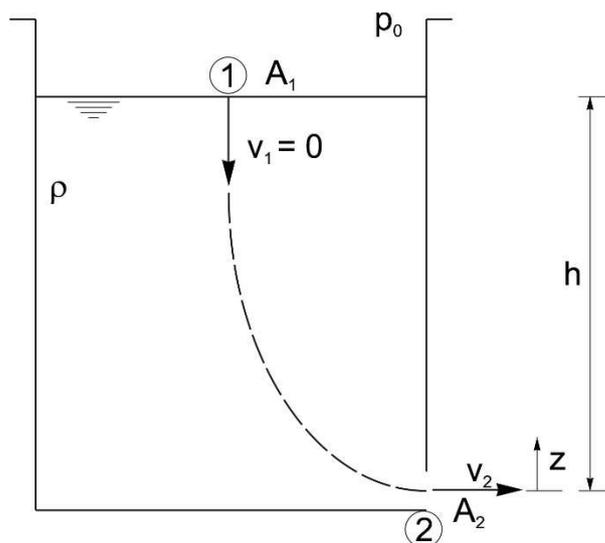


Bild 3.1 Fließverhalten nach Torricelli gemäß Hutter (2003)

Die Untersuchungen zum Fließverhalten von wassergesättigten, grobkörnigen Böden wurden gemeinsam in einem DFG-Projekt mit dem Institut für Mechanik der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Dabei lag bei der Ruhr-Universität Bochum der Schwerpunkt in der numerischen Analyse des Fließverhaltens (vgl. Reisner (2015)).

Im Rahmen der Entwicklung des neuartigen Versuchsstandes zur Durchführung der Versuche wurden, neben der grundsätzlichen Entscheidung des vergleichbaren Aufbaus des Versuchs nach Torricelli, die nachfolgenden benannten Parameter berücksichtigt:

- Reduktion eines Randeffektes
- Örtliche Gegebenheiten
- Stabile Konstruktion zur Vermeidung von versuchsbeeinflussenden Verformungen
- Wahl eines geeigneten Mechanismus zur Initialisierung des Versuchs
- Wahl geeigneter Versuchsmaterialien
- Gewährleistung einer vollständigen Wassersättigung während der Versuchsdurchführung
- Sicherstellung eines kontinuierlichen Fließprozesses
- Sicherstellung eines Fließprozesses ohne Rückstau
- Einhaltung des Verhältnisses der Fläche des Auslasses zur Fläche des Versuchsstandes von $A_2/A_1 \ll 1$ (vgl. Bild 3.1)
- Minimaler Reibungsverlust an den Wänden des Versuchsstandes
- Wahl geeigneter Messmethoden und entsprechende Berücksichtigung bei der Konstruktion

Die Abmessungen des Versuchsstands sollten so groß wie möglich gewählt werden, um negative Randeinflüsse möglichst gering zu halten. Das limitierende Kriterium war aus pragmatischen Gründen die in der Darmstädter Versuchsanstalt für Geotechnik vorhandene Krankkapazität, mit der eine maximale Höhe des Versuchsstandes von 300 cm erzielt werden konnte. Die Breite b wurde auf 100 cm und die Tiefe t auf 50 cm festgelegt. Das gewählte Verhältnis von Länge, Breite und Tiefe basiert auf Erfahrungswerten an der Versuchsanstalt aus bereits früher durchgeführten Experimenten.

Der neu entwickelte Versuchsstand besteht aus drei vertikal übereinander angeordneten Elementen von 100 cm Höhe; diese Elemente bestehen aus einem Stahlrahmen, in dem zur Beobachtung und Messung des Ausfließens, eine 5 cm dicke Spezialglasscheibe, die dem hohen Druck standhalten kann, eingebaut ist. Während der Versuchsdurchführung fließt der wassergesättigte grobkörnige Boden aus einer seitlich angeordneten Öffnung, die vor Versuchsstart durch eine Klappe verschlossen ist, heraus (Bild 3.2). Um eventuelle Bewegungen des Boden-Wasser-Gemisches unterhalb der Öffnung erfassen zu können und einen Randeffekt zu vermeiden, wurde die Unterkante der Öffnung mit einem Abstand von 20 cm zum Boden des Versuchsstandes angeordnet. Ein wesentlicher Punkt bei der Entwicklung des neuartigen großskaligen Versuchsstandes war die

Überlegung zur Öffnungsweite des Auslasses. Diese hat einen wesentlichen Einfluss auf den zu untersuchenden Fließprozess. Bei den ersten Untersuchungen wurden insgesamt drei unterschiedliche Auslasshöhen von 10 cm, 20 cm und 30 cm gewählt. Dabei waren zwei wesentliche Faktoren entscheidend. Zum einen musste gewährleistet sein, dass ein gleichmäßiges Ausfließen stattfinden kann und es zu keinem stockenden Ausfließen kommt, und zum anderen musste eine vollständige Wassersättigung des Bodens während des gesamten Versuchs sichergestellt werden, wobei eine möglichst lange Versuchsdauer verbleiben sollte, um einen maximalen Zeitraum zur Analyse des Fließverhaltens zu erhalten. Außerdem musste das Verhältnis der Fläche des Auslasses (A_2) zur Fläche des Versuchsstandes (A_1) deutlich unter 1 liegen ($A_1/A_2 \ll 1$), um einen Vergleich mit der Geschwindigkeit von Wasser nach der Ausflussformel von Torricelli vornehmen zu können.



Bild 3.2 Auslass mit Klappe zum Ausfließen des wassergesättigten Bodens

Die seitlichen Wände und die Rückwand des Versuchsstandes bestehen aus Stahl und damit aus einer, im Verhältnis zur inneren Reibung der Versuchsmaterialien, glatten Oberfläche. Insbesondere im Bereich der Glasfront, an der die Geschwindigkeit gemessen werden soll, spielt der Einfluss der Reibung zwischen der Oberfläche des Versuchsstandes und dem jeweiligen Versuchsmaterial bei der Untersuchung des Fließverhaltens nur eine untergeordnete Rolle.

Das Ergebnis der Entwicklung des Versuchsstandes ist in der Konstruktionsskizze in Bild 3.3 dargestellt.

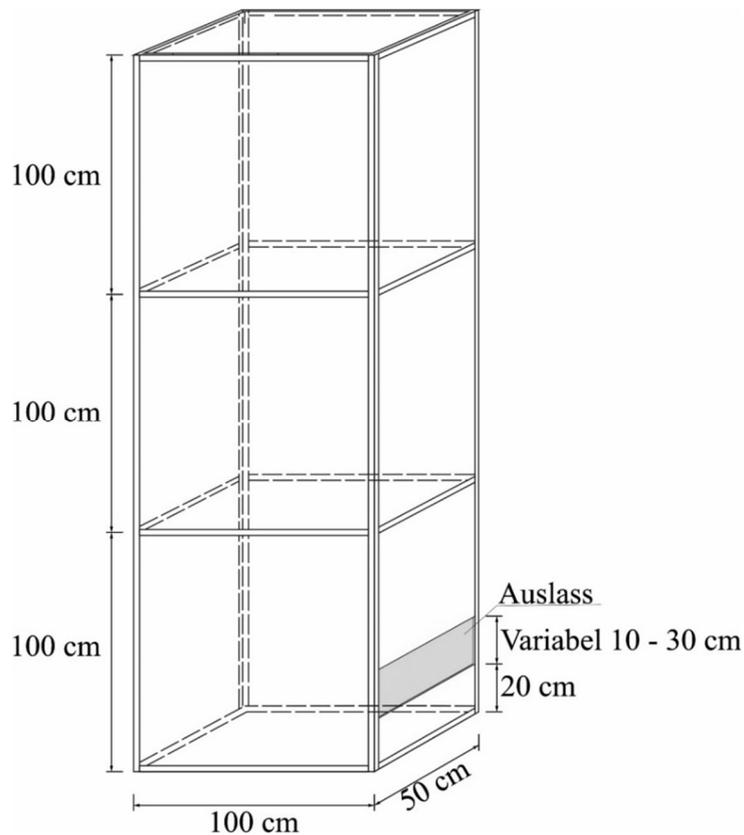


Bild 3.3 Konstruktionskizze Versuchsstand

Zur Initialisierung des Versuches wurde die vor der Öffnung des Versuchsstandes angeordnete Klappe mit Hilfe der drei vorhandenen Hebel geöffnet, und der wassergesättigte, grobkörnige Boden beginnt aus dem Versuchsstand auszufließen. Ein vor dem Versuchsstand angeordneter Behälter fängt die Mischung auf. Durch die Anordnung eines Auffangbehälters unterhalb des Versuchsstandes konnte sichergestellt werden, dass es zu keinem Rückstau während der Versuchsdurchführung kommt. Beim Versuch wurden folgende Bedingungen vorausgesetzt:

- homogener, gleichmäßiger Einbau
- kontinuierliches Ausfließen des wassergesättigten Bodens
- vollständige Wassersättigung des Bodens während der Versuchsdurchführung
- definierte, reproduzierte Bedingungen wie Einbauhöhe, Lagerungsdichte, Überstauungshöhe

Die Erfüllung der oben genannten Bedingungen ist wesentlich, um einen Vergleich mit den bereits existierenden Erkenntnissen zur Beschreibung des Fließverhaltens von Wasser und zu den unterschiedlichen untersuchten Versuchsmaterialien machen zu können.

Nach den ersten Vorversuchen wurde nachgewiesen, dass die Vermutung, dass das Wasser beim Ausfließen des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens aus dem Versuchsstand eine höhere Geschwindigkeit besitzt als der Boden, zutrifft und sich der Fließprozess mit Abnahme der Sättigung je nach Bodenart stark verlangsamte bzw. zum Erliegen kam. In Bild 3.4 ist einer der ersten Vorversuche mit Darmstädter Modellsand nach Versuchsende dargestellt, bei dem nur ein geringer Teil des Bodens ausgeflossen ist und sich kein kontinuierliches Ausfließen aus dem Versuchsstand eingestellt hat.



Bild 3.4 Vorversuch ohne zusätzliche Wasserzugabe

Daher wurde im nächsten Schritt zur Optimierung des Versuchsstandes versucht, einen modifizierten Versuchsaufbau zu finden, um eine vollständige Wassersättigung während der Versuchsdurchführung gewährleisten zu können. Zunächst wurde zur Nachbildung eines „unendlichen“ Grundwasserleiters eine 15 cm dicke Filterschicht, über die kontinuierlich Wasser zur Aufrechterhaltung einer konstanten Wassersättigung in den Versuchsstand nachgeführt wurde, eingebaut. Die Filterschicht diente dazu, dass über die gesamte Höhe des Versuchsstandes gleichmäßig Wasser in den Versuchsstand eingetragen werden konnte. Die Filterschicht, durch die das Wasser in den Boden fließen sollte, besteht aus Steinen und wurde über die gesamte Höhe des Versuchsstandes von 300 cm und mit einer Breite von 15 cm und einer Tiefe von 50 cm in 3 Gitterkästen eingebaut (siehe Bild 3.5).



Bild 3.5 Filterschicht

Um einen kontinuierlichen Nachfluss zu gewährleisten, wurde während der Versuchsdurchführung über einen Schlauch von oben in die Filterschicht permanent Wasser nachgefüllt. Durch diese Zugabe fand eine langsamere Abnahme der Sättigung des Bodens statt, aber das Wasser, das über die Filterschicht nachfloss, war zu wenig, um eine vollständige Wassersättigung während der gesamten Versuchsdauer gewährleisten zu können.

Nach vielen weiteren Versuchen mit Modifikationen beim Nachfüllen des Wassers hat sich gezeigt, dass die Methode „Wasser auf unterschiedliche Art und Weise nachzufüllen“ nicht den gewünschten Erfolg brachte, so dass ein neuer Weg eingeschlagen werden musste. Zur Gewährleistung einer vollständigen Wassersättigung während des gesamten Versuchsablaufs wurde daher die Einbauhöhe des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens reduziert und die Bodensäule mit Wasser überstaut. Somit konnte während des Versuchs Wasser permanent nachfließen, und eine Wassersättigung konnte während der gesamten Versuchsdauer sichergestellt werden.

Zur Bestimmung der notwendigen Einstauhöhe des Wassers wurden Vorversuche mit allen gewählten und in Kapitel 3.2 beschriebenen Versuchsmaterialien durchgeführt. Dabei wurde berücksichtigt, dass - aufgrund des unterschiedlichen Porenraums - das Wasser auch unterschiedlich schnell durch den Porenraum des Bodens ausfließt.

Aufgrund der zu geringen Wassermenge, die über die Filterschicht in den Boden, zur Sicherstellung einer vollständigen Wassersättigung über die gesamte Versuchsdauer, nachfloss und insbesondere im Verhältnis zur vorhandenen Wassermenge aus der Überstauung, wurde in Abstimmung mit dem DFG-Projektpartner, dem Institut für Mechanik der Ruhr-Universität Bochum (RUB), beschlossen, auf die Filterschicht zu verzichten, da diese offensichtlich keinen wesentlichen Einfluss hat. Um einen Vergleich der Versuche mit und ohne eingebaute Filterschicht und zu den numerischen Untersuchungen des Institutes für Mechanik der Ruhr-Universität Bochum zu erhalten, wurde die Breite des Versuchsstandes von ursprünglich 100 cm um die Breite der Filterschicht von 15 cm auf 85 cm reduziert. Der aus den Ergebnissen der ersten Vorversuche abgeleitete Aufbau des Versuchsstandes ist in Bild 3.6 dargestellt.

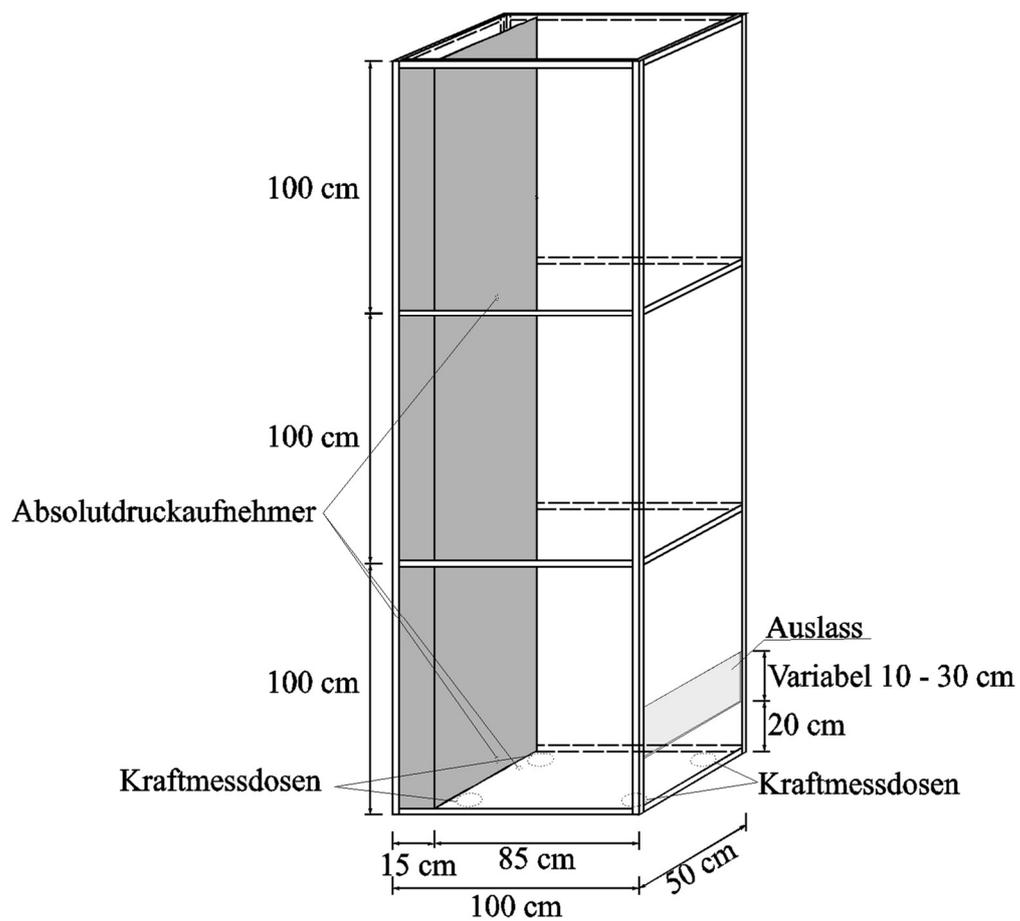


Bild 3.6 Experimenteller Versuchsstand zur Untersuchung des Fließverhaltens von wassergesättigten grobkörnigen Böden

3.2 Versuchsmaterial

Bei den Untersuchungen zur Bestimmung des Fließverhaltens von wassergesättigten Böden wurden verschiedene Versuchsmaterialien eingesetzt, um die unterschiedlichen Einflussfaktoren analysieren zu können. Als Versuchsmaterialien wurden ausschließlich grobkörnige Böden verwendet.

Zur Beurteilung des Einflusses der Korngröße und der Korngrößenverteilung auf das Fließverhalten wassergesättigter Böden wurde Darmstädter Modellsand mit einer Korngröße von 0,25-2,0 mm, drei gleichförmig gestufte Kiese (2,0-4,0 mm, 4,0-8,0 mm, 8,0-16,0 mm) sowie ein zusammengestellter, intermittierend gestufter, stark sandiger Kies untersucht (siehe Bild 3.7). Der stark sandige Kies ist mit zahlreichen quartären Böden, wie den Niederterrassensedimenten von Main und Rhein, vergleichbar. Ausgangsstoff der Versuchsmaterialien sind Rheinkiese, die eine runde Kornform aufweisen. Durch die Wahl einer runden Kornform wurde der Effekt von Verkantungen, wie er bei kantiger Kornform auftritt, ausgeschlossen.

Die Kornverteilungskurven sind Bild 3.8 und die bodenmechanischen Kennwerte der Versuchsmaterialien Tabelle 3.1 zu entnehmen.



Bild 3.7 Versuchsmaterialien

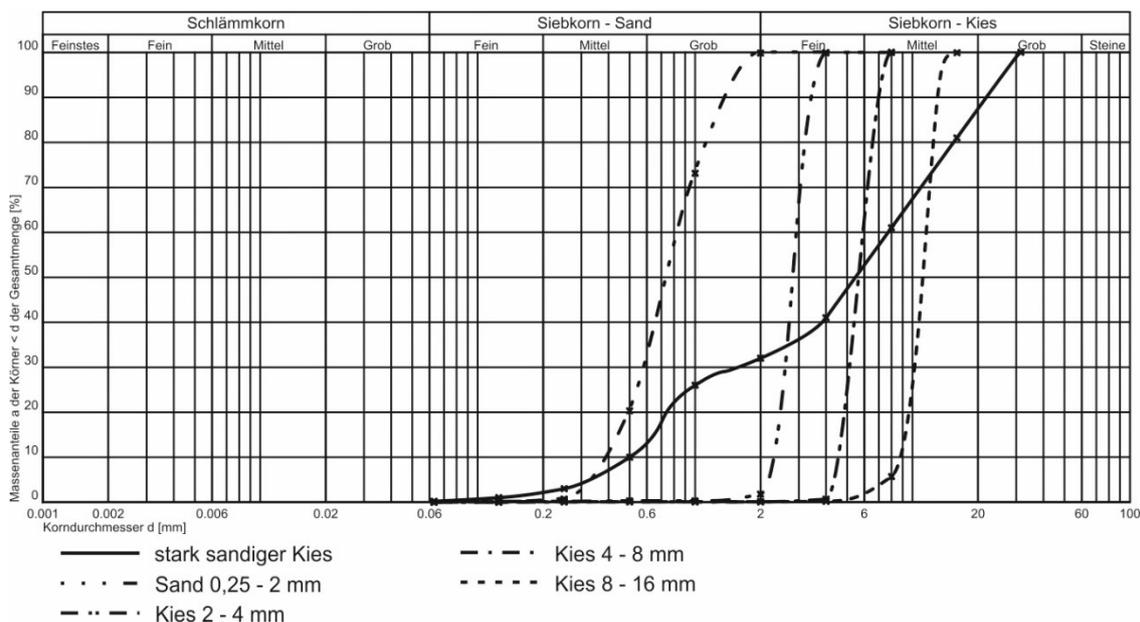


Bild 3.8 Kornverteilungskurven der Versuchsmaterialien

Größe	Symbol	Einheit	Sand 0,25-2,0 mm	Kies 2,0-4,0 mm	Kies 4,0-8,0 mm	Kies 8,0-16,0 mm	stark sandiger Kies
Ungleichförmigkeitszahl	C_U	[-]	2,11	1,27	1,30	1,32	15,45
Krümmungszahl	C_C	[-]	1,04	1,00	0,99	1,03	0,65
Korndichte	ρ_s	[g/cm ³]	2,640	2,619	2,655	2,635	2,628
Dichte bei lockerster Lagerung	min ρ_d	[g/cm ³]	1,468	1,428	1,490	1,430	1,814
Porenanteil bei lockerster Lagerung	max n	[-]	0,444	0,455	0,439	0,457	0,310
Dichte bei dichtester Lagerung	max ρ_d	[g/cm ³]	1,695	1,653	1,708	1,628	1,989
Reibungswinkel	φ	[°]	31,0	40,0	37,1	39,8	35,0
Durchlässigkeitsbeiwert	k	[m/s]	$8,01 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 3.1 Bodenmechanische Kennwerte

3.3 Entwicklung einer geeigneten Einbautechnik

3.3.1 Einrieselungsmethode

Eine an der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt gängige Einbaumethode für den Darmstädter Modellsand stellt die Einrieselungstechnik dar, vgl. hierzu auch Heineke (2001), Turek (2006) und Bachmann (2009). Diese wurde im Laufe der vergangenen Jahre an der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt optimiert und liefert für den Darmstädter Modellsand einen definierten, reproduzierbaren Einbau für experimentelle Untersuchungen. Daher wurde diese, im Nachfolgenden beschriebene Einbaumethode als Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen gewählt. Die Einbautechnik musste allerdings für den Einbau des Bodens in den neu entwickelten Versuchsstand aufgrund der Verwendung anderer Versuchsmaterialien und einer größeren Einbauhöhe weiterentwickelt werden.

Für den Einbau des Darmstädter Modellsandes wird bei der Einrieselungsmethode zur Erzeugung einer dichten Lagerung des Sandes ein Einfülltrichter verwendet, an dem ein elastischer Schlauch mit Fallrohr befestigt ist. Am Ende des Fallrohres ist ein Streukegel angeordnet (siehe Bild 3.9 links und Bild 3.10).

Für den Einbau mit einer lockeren Lagerung des Sandes wird bei der Einrieselungsmethode ebenfalls ein Fallrohr verwendet, allerdings wird dann auf den Streukegel beim Einbau verzichtet. Das Fallrohr wird direkt auf den Boden des Modellversuchssandes aufgesetzt und vollständig durch Öffnen der Drosselklappe mit Sand gefüllt. Danach kann man das Fallrohr soweit anheben, dass der Modellsand langsam und gleichmäßig ausfließt und eine lockere Lagerung erzielt werden kann (vgl. Bild 3.9 rechts und Bild 3.11).

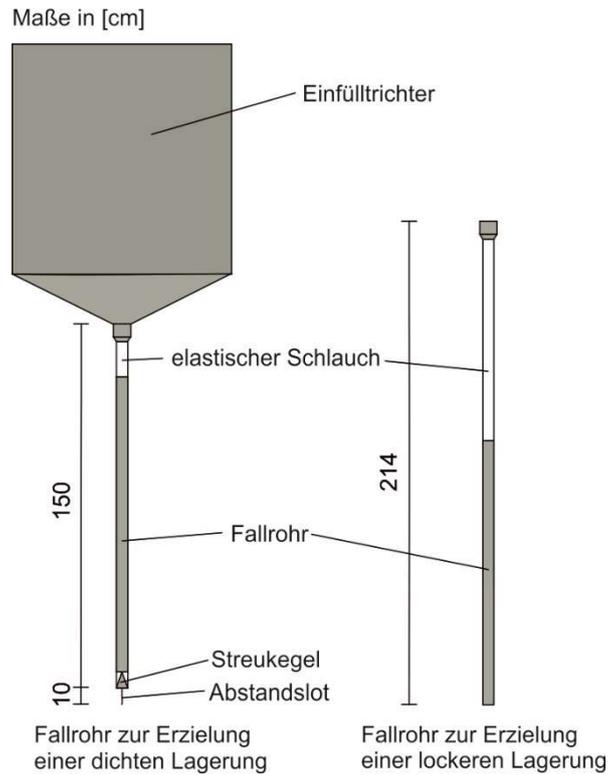
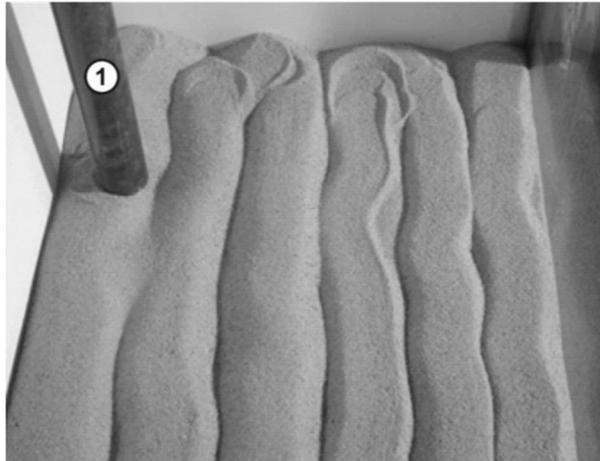


Bild 3.9 Einbauvorrichtung zum Einbau des Sandes in einer dichten (links) bzw. lockeren Lagerung (rechts) (Bachmann (2009))



- ① Fallrohr
- ② Streukegel

Bild 3.10 Einbau dichte Lagerung (Bachmann (2009))



① Fallrohr zum Einbau der lockeren Lagerung

Bild 3.11 Einbau lockere Lagerung (Bachmann (2009))

3.3.2 Versuchsoptimierte Einrieselungsmethode

Aufgrund der im Vergleich zum Darmstädter Modellsand größeren Korngröße der Kiese und des stark sandigen Kiese wurde das Prinzip der Einrieselungsmethode zwar beibehalten, der Durchmesser des Fallrohres jedoch auf 70 mm erhöht, um die Durchgängigkeit der Versuchsmaterialien durch das Fallrohr gewährleisten zu können. Außerdem ist die Länge des Fallrohres auf die Höhe des Versuchsstandes von 300 cm optimiert worden, damit das Fallrohr auf dem Boden des Versuchsstandes bzw. auf dem bereits eingebauten Boden zur Erzielung einer lockeren Lagerung abgesetzt werden kann. Dabei musste das Fallrohr aus mehreren Teilen zusammengesetzt werden, um bei zunehmender Einbauhöhe auch weiterhin mit dem Kran, der den Einfülltrichter oberhalb des Versuchsstandes gehalten hat und eine begrenzte Höhe aufweist, gearbeitet werden konnte. Aufgrund der sehr heterogenen Zusammensetzung des stark sandigen Kiese wurde dieses Versuchsmaterial für die Umsetzung der zu verwendenden Einbautechnik als maßgebend definiert und somit für die Durchführung der ersten Vorversuche gewählt.

Durchführung der Vorversuche zur versuchsoptimierten Einrieselungsmethode

Ziel dieser Vorversuche war es, für den neu entwickelten Versuchsstand eine optimale Einbaumethode zu finden, bei der ein reproduzierbarer, homogener Einbau des Bodens über die gesamte Höhe des Versuchsstandes für die unterschiedlichen Versuchsmaterialien gewährleistet werden konnte.

Bei der Durchführung der Vorversuche wurde der stark sandige Kies in einen Einbautrichter gefüllt. Dieser Bestand aus einem Betonierkübel, der mit dem

vorhandenen Portalkran über dem Versuchsstand gehalten wurde. An diesem Einbautrichter wurde ein beweglicher Schlauch angebracht, an dem, wie bei der bereits bewährten Einrieselungsmethode (vgl. Kapitel 3.3.1), das Fallrohr befestigt wurde. Für den Einbau wurde der Boden mit dem Fallrohr gleichmäßig im Versuchsstand verteilt. In Bild 3.12 ist der Einbau beispielhaft dargestellt.



Bild 3.12 Versuchsoptimierte Einbautechnik nach der Darmstädter Einrieselungsmethode

Aufgrund der großen Fallhöhe fand beim stark sandigen Kies eine starke Entmischung des Materials statt. Auch ein Einbau unter Wasser, wie er in Bild 3.12 (rechts) dargestellt ist, hat das Ergebnis hinsichtlich der Entmischung nicht verbessern können. Außerdem wiesen die einzelnen Lagen keine einheitlichen Einbaudichten auf und ein reproduzierbarer Einbauvorgang konnte mit der bestehenden Einbautechnik letztendlich nicht gewährleistet werden. Aufgrund der aufgetretenen Heterogenität des Bodens beim Einbau musste eine neue, nachfolgend in Kapitel 3.3.3 beschriebene Einbautechnik entwickelt werden.

3.3.3 Einbaumethode mit einer versuchsoptimierten, neu entwickelten Einbautechnik

Zur Vermeidung einer Entmischung beim Einbau und zur Gewährleistung eines gleichmäßigen Einbaus, der unabhängig von der Einbauhöhe ist, wurde eine Einbauvorrichtung entwickelt, die direkt auf den Boden des Versuchsstandes bzw. des bereits eingebauten Bodens aufgesetzt werden konnte. Als Vorbild diente der Greifer eines Baggers (vgl. Bild 3.13). Der Boden konnte mit der gewünschten Lagerungsdichte direkt in die Einbauvorrichtung eingebaut werden. Anschließend wurde die Einbauvorrichtung in den Versuchsstand herabgelassen und durch langsames Öffnen der Einbauvorrichtung konnte der Boden in den Versuchsstand eingebaut werden. Der Ablauf des Einbaus mit der neu entwickelten Einbautechnik ist in Bild 3.14 beispielhaft dargestellt.

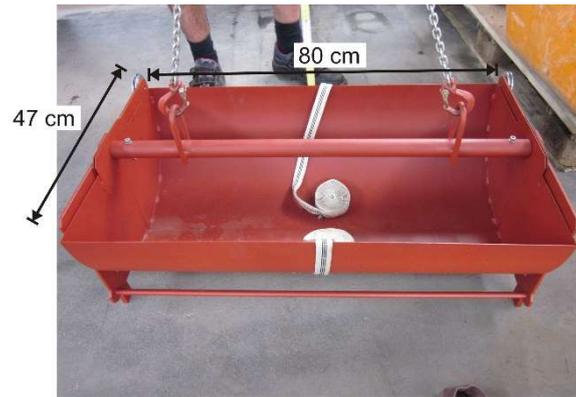


Bild 3.13 Einbauvorrichtung



Bild 3.14 Ablauf Versuchseinbau

Diese bisher zuvor noch nicht erprobte Methode wurde neu entwickelt, um eine möglichst präzise definierte und reproduzierbare Lagerungsdichte über die gesamte Höhe des Versuchsstandes trotz der vorhandenen Randbedingungen durch den hohen und relativ schmalen Versuchsstand und dem teilweisen sehr heterogenem Versuchsmaterial erzielen zu können.

Für die Versuche mit dichter Lagerung erfolgte der Einbau ebenfalls lagenweise mit der Einbauvorrichtung zunächst locker, wobei die jeweilige eingebaute Lage des Versuchsmaterials mittels eines Fallgewichts (18 kg) verdichtet wurde.

Im Zuge der Durchführung der Vorversuche zur Einbautechnik wurde festgestellt, dass zwischen den Bodenkörnern nach der Wassersättigung beim stark sandigen Kies und dem Sand weiterhin Luftbläschen vorhanden sind. Für diese beiden Bodenarten war daher eine weitere Optimierung erforderlich. Zur Vermeidung eines Lufteinschlusses im Porenraum wurden der stark sandige Kies und der Sand 0,25-2,0 mm vor dem Einbau mit einer vordefinierten Wassermenge vermischt, um einen Einbau ohne erkennbare Lufteinschlüsse zu gewährleisten. Für den stark sandigen Kies lag der optimale Einbauwassergehalt bei rd. 6,3 % und beim Sand bei rd. 11 %. Die Kiese wurden trocken unter Wasser eingebaut, wodurch bei dieser Bodenart ebenfalls ein gleichmäßiger Einbau ohne erkennbaren Lufteinschluss erzielt werden konnte.

3.4 Messtechnik

3.4.1 Messtechnische Instrumentierung

Zur Aufzeichnung der Veränderung des Wasserstandes im Versuchsstand und zur Aufzeichnung der Spannungsänderung während der Versuchsdurchführung wurden folgende messtechnischen Komponenten eingebaut:

- 3 Absolutdruckaufnehmer (HBM P11) (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH)
- 4 Kraftmessdosen (HBM U3, Nennkraft 20 kN) (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (2010))
- Messsystem SPIDER 8 inkl. Messsoftware Catman 3.0 zur digitalen Verarbeitung der erzeugten Messwerte (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (2013))

Zusätzlich wurden die Versuche mit Kameras aufgezeichnet. Eine Kamera wurde oberhalb des Versuchsstandes angeordnet. Dadurch konnte das Absinken des Wassers und des Bodens während des Versuchs aufgezeichnet werden.

Außerdem wurden die finalen Versuche mittels der High-Speed-Kamera Phantom Miro M110 Camera System im unteren Drittel des Versuchsstandes aufgenommen. Die Aufnahmen mit der High-Speed Kamera erfolgten mit einer Bildrate von 100 fps. Anhand der gewonnenen Aufnahmen konnte eine Auswertung mittel der PIV-Methode durchgeführt werden.

3.4.2 Anwendung und Optimierung der Messtechnik

Mit Hilfe der auf dem Versuchsstand angeordneten Kamera wurde der gesamte Versuch als Video aufgezeichnet (siehe Bild 3.15). Durch die vorhandenen Markierungen im Versuchsstand war es mit einer Videoanalyse möglich, die Zeitspanne, in der das Wasser im Versuchsstand um 10 cm absinkt, auszulesen. Somit konnte in einer ersten Analyse bei den Vorversuchen die Geschwindigkeit des Wassers zunächst überschlägig bestimmt werden. Durch das Auslesen der Zeitspanne, in der das Wasser im Versuchsstand um 10 cm absinkt, konnten außerdem die Aufzeichnungen mit den Absolutdruckaufnehmern, mit denen die Bestimmung der Druckhöhe über die Zeit durchgeführt werden sollte, überprüft werden.

Zur Überprüfung der Höhe des wassergesättigten Bodens wurden zwei Messstangen mit Markierungen im Abstand von 10 cm in der halben Tiefe des Versuchsstandes installiert. Die Messstangen standen auf dem Boden auf und bewegten sich beim Ausfließen mit dem Boden nach unten, was ebenfalls mit der Kamera aufgezeichnet worden ist. Dies ermöglichte die Bestimmung der Dauer für das Absinken des Bodens um 10 cm. Der Einfluss der Messstangen auf die Versuchsergebnisse kann als gering eingestuft werden.

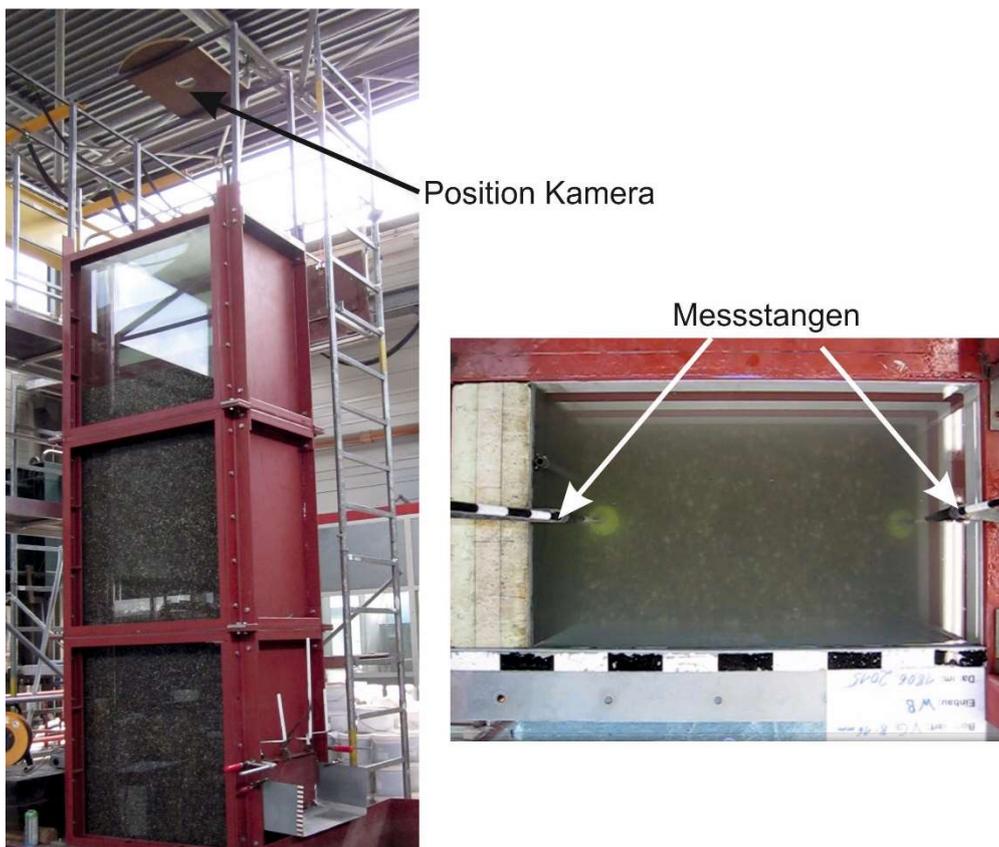


Bild 3.15 Optischen Messungen von oben mit einer Videokamera

Die Auswertung des Absinkens des Bodens und des Wassers über die Zeit ist im Diagramm in Bild 3.16 für einen Versuch mit Kies 2,0-4,0 mm beispielhaft dargestellt.

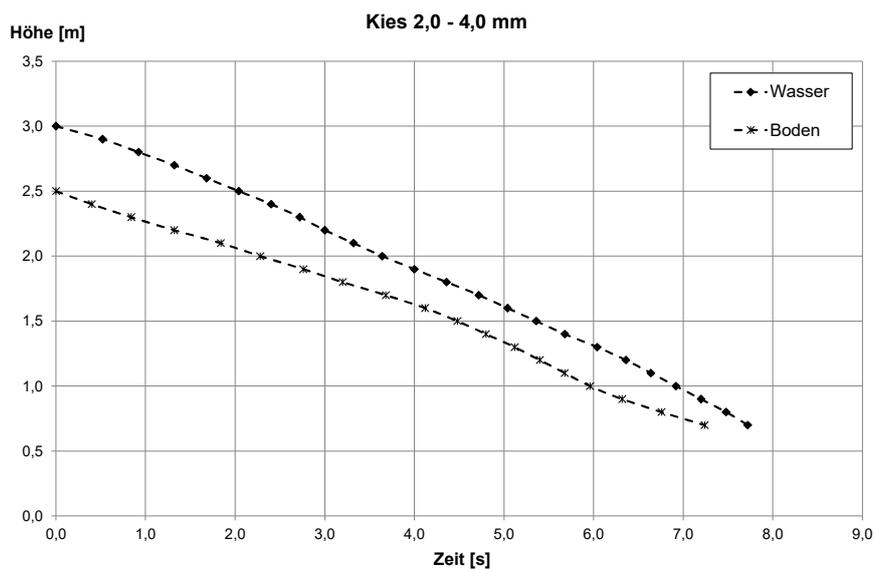


Bild 3.16 Auswertung der optischen Messungen für einen Versuch mit Kies 2,0-4,0 mm

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit des wassergesättigten Bodens wurde auf Basis der Auswertung der Videoaufzeichnungen zunächst die Dauer des Absinkens des Bodens für jeweils 10 cm ermittelt. Mit den Kenntnissen über das vorhandene Volumen innerhalb der gemessenen Zeit Δt konnte der Durchfluss Q wie folgt bestimmt werden:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{Gl. 3.2})$$

mit: V Volumen des ausfließenden Bodens [m^3]
 Δt Zeit, in der der Boden ausfließt [s]

Die Geschwindigkeit v des ausfließenden wassergesättigten Bodens ergab sich dann in Abhängigkeit der Fläche des Auslasses, wie folgt:

$$v = \frac{Q}{A} \quad [\text{m}/\text{s}] \quad (\text{Gl. 3.3})$$

mit: Q Durchfluss [m^3/s]
 A Fläche des Auslasses [m^2]

Bei der Installation der drei Absolutdruckaufnehmer, die für einen Maximaldruck von 0,5 bar ausgelegt sind, und die ausschließlich den Wasserdruck aufzeichnen, wurden verschiedene Anordnungen getestet. Zunächst wurden die Absolutdruckaufnehmer unterhalb der Bodenplatte angebracht (Bild 3.17, links) und die Funktion der Absolutdruckaufnehmer anhand von Experimenten mit reinem Wasser überprüft. Hierbei hat sich gezeigt, dass direkt nach dem Öffnen des Auslasses zunächst ein starker Rückgang und unmittelbar danach ein Wiederanstieg des Druckes festzustellen war.

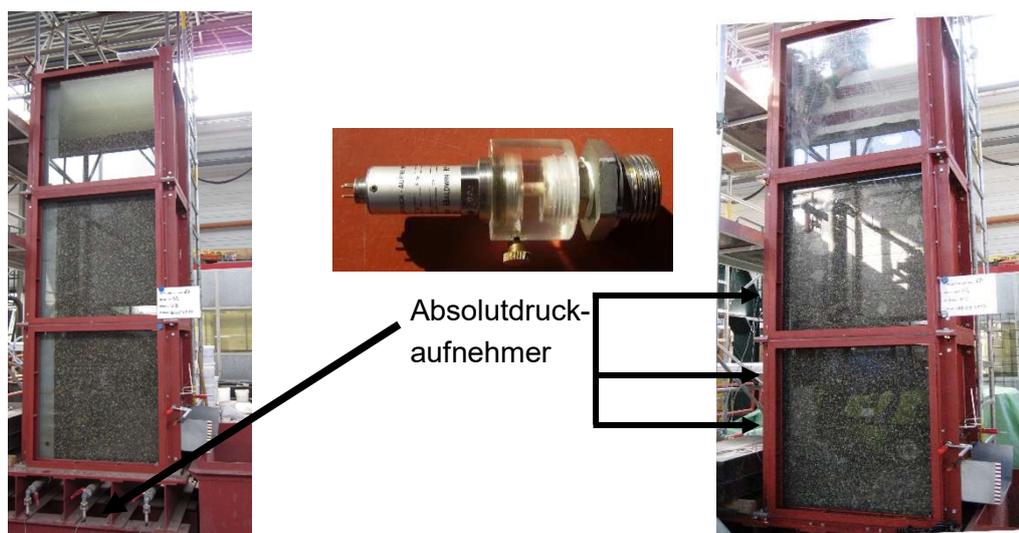


Bild 3.17 Anordnung Absolutdruckaufnehmer

Zur Detektion eines möglichen Fehlers bei den Messungen aufgrund der Position der Absolutdruckaufnehmer wurden weitere Experimente mit Wasser durchgeführt und dabei die zunächst unten angeordneten Absolutdruckaufnehmer seitlich neu positioniert (siehe Bild 3.17 rechts). Dabei wurden die Absolutdruckaufnehmer in den Höhen 0,863 m (Absolutdruckaufnehmer 3), 1,184 m (Absolutdruckaufnehmer 2), und 1,580 m (Absolutdruckaufnehmer 1) über dem Boden des Versuchsstandes angeordnet. Hierbei hat sich das gleiche Bild ergeben (Bild 3.18); d.h. zunächst wurde eine kurzfristige Druckreduktion nach dem Öffnen der Klappe (Versuchsstart) gefolgt von einem Wiederanstieg auf die vorhandenen Druck resp. Druckhöhe festgestellt. Dieses Phänomen kann auf das 3. Newton'schen Axiom zurückgeführt werden, das besagt: $actio = reactio$. Durch das plötzliche Öffnen entsteht ein Rückstoß, also eine Rückstoßkraft, was zur Reduktion des vorhandenen Druckes führt.

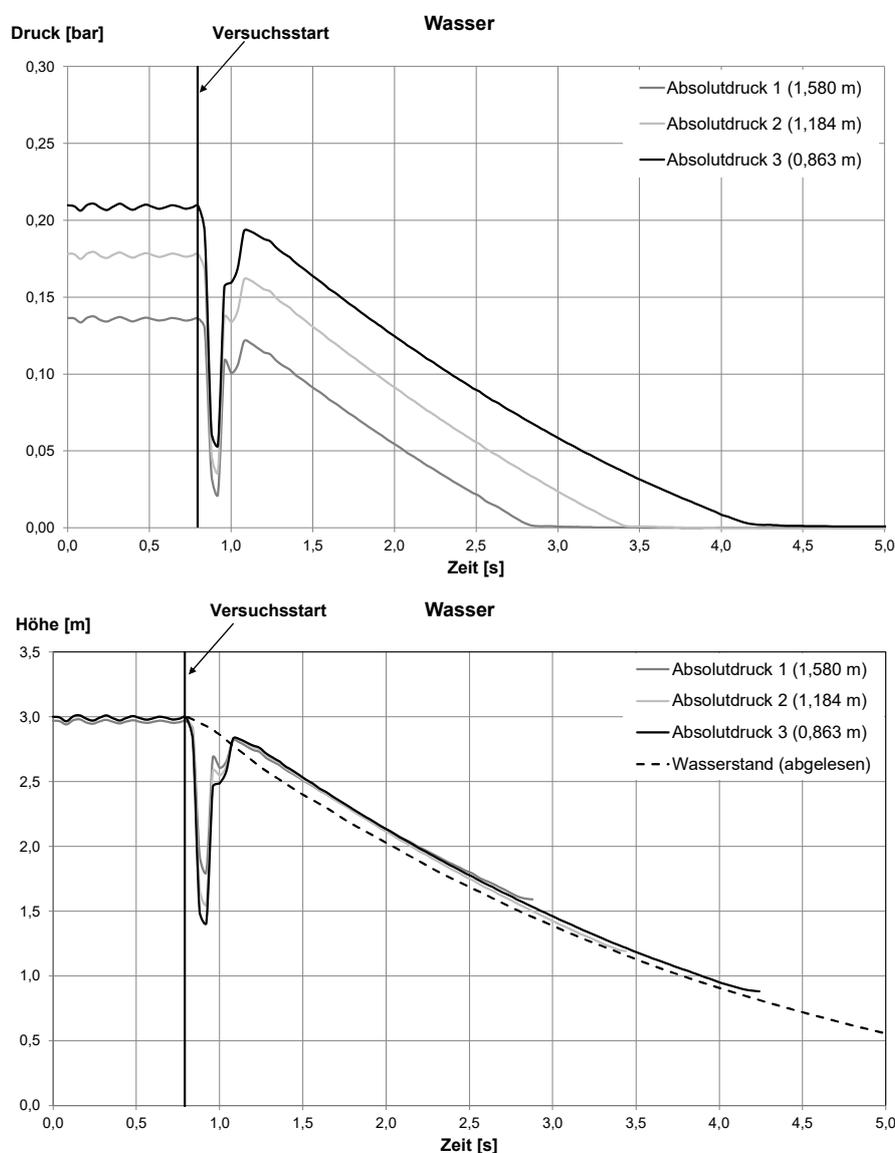


Bild 3.18 Messergebnisse der seitlich angeordneten Absolutdruckaufnehmer bei einem Versuch mit Wasser

Auch bei den Experimenten mit den wassergesättigten grobkörnigen Böden konnte bei den Aufzeichnungen des Wasserdrucks mit den Absolutdruckaufnehmern erwartungsgemäß der gleiche Effekt (Druckabnahme und Wiederanstieg) wie bei den Untersuchungen mit Wasser festgestellt werden. Die Messwerte bei diesen Versuchen zeigten jedoch, dass der Druck bzw. die Druckhöhe, die Höhe des optisch erkennbaren Wertes des Wasserspiegels kurzfristig übersteigt (vgl. Bild 3.20). Danach wurde erneut eine deutliche Druckabnahme gemessen, auf die ein langsamer Wiederanstieg des Druckes folgte (vgl. Bild 3.19 und Bild 3.20). Der Druck stieg dabei bis zum Erreichen der Druckhöhe, die dem vorhandenen Wasserspiegelstand entspricht, wieder an. Schließlich verlief die ermittelte Druckhöhe mit den Absolutdruckaufnehmern gegen Versuchsende parallel zu der optisch erkennbaren Wasserspiegelhöhe. Durch diese verzögerte Aufzeichnung der Druckhöhe resp. Wasserstandshöhe mit den Absolutdruckaufnehmern konnte das Ziel der kontinuierlichen Aufzeichnung des Wasserstandes nicht erreicht werden, weshalb eine weitere Variation der Anordnung der Absolutdruckaufnehmer erfolgte.

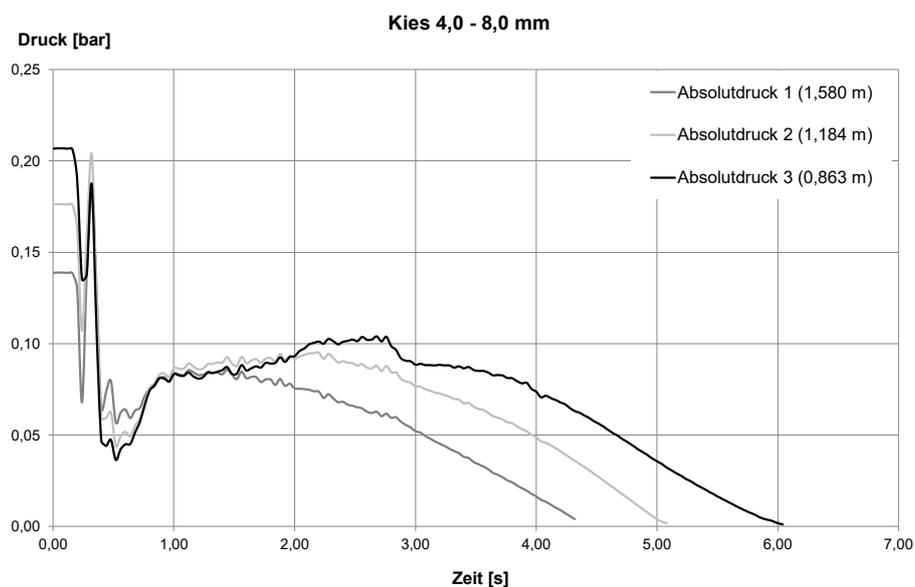


Bild 3.19 Druckmessung der seitlich angeordneten Absolutdruckaufnehmer bei einem Versuch mit wassergesättigtem Kies 4,0-8,0 mm

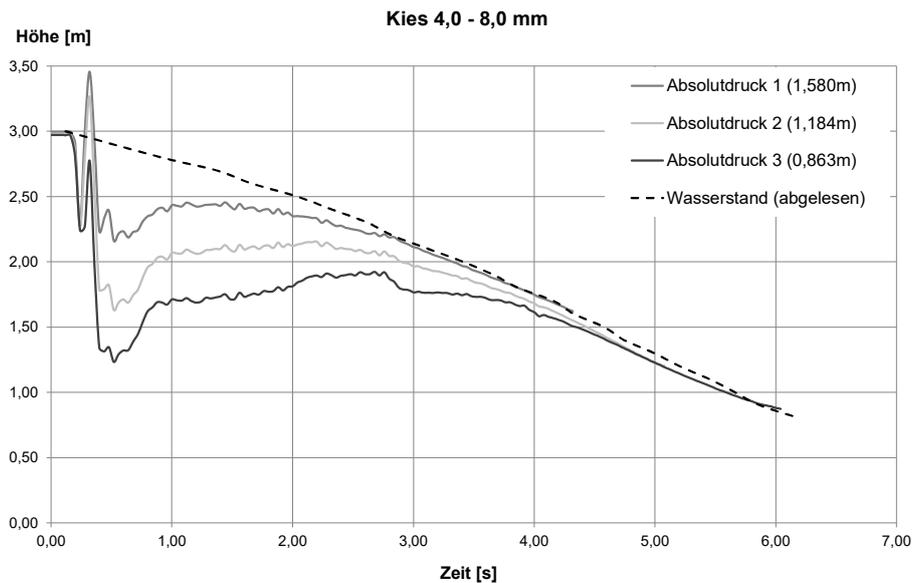


Bild 3.20 Aus der Druckmessung ermittelte Wasserspiegelhöhe (Druckhöhe) im Vergleich zum optisch gemessenen Wasserstand bei einem Versuch mit wassergesättigtem Kies 4,0-8,0 mm

Zur Vermeidung eines Einflusses des umgebenden Bodens bei der Aufzeichnung des Wasserdruckes wurden an der Bodenplatte ein perforiertes Rohr, an das ein Absolutdruckaufnehmer montiert wurde, eingebaut und zwei seitlich angeordnete Absolutdruckaufnehmer angebracht. Hierbei musste man bei den Messungen mit den Absolutdruckaufnehmern feststellen, dass durch Verwendung des perforierten Rohres kein anderes Ergebnis – in Bezug auf die Druckmessung – erzielt werden konnte (vgl. Bild 3.21) als bei der zuvor beschriebenen Anordnung der Absolutdruckaufnehmer.

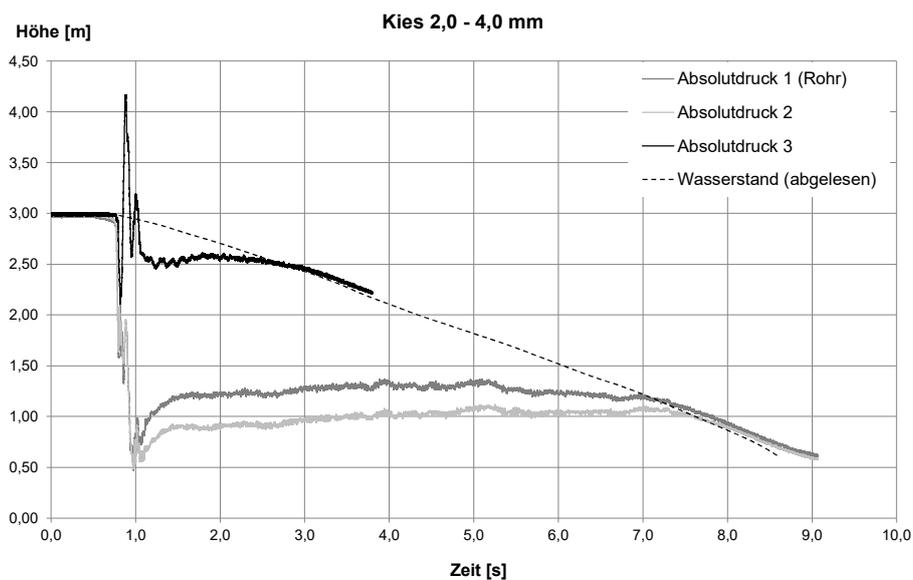


Bild 3.21 Messergebnisse der Absolutdruckaufnehmer bei einem Versuch mit wassergesättigtem Kies 2,0-4,0 mm

Zur Aufzeichnung der Änderung der vorhandenen Spannungen wurden unter dem Versuchsstand vier Kraftmessdosen angeordnet. Die Anordnung ist Bild 3.22 zu entnehmen. Die Aufzeichnung der gemessenen Kraft erfolgte kontinuierlich während des gesamten Einbaus und während der Versuchsdurchführung. Aus der Summe der mittels der Kraftmessdosen gemessenen Kräfte konnten die vorhandenen Spannungen ermittelt werden. In Bild 3.23 ist beispielhaft die Änderung der Spannungen infolge des Ausfließens des Bodens aus dem Versuchsstand in einem Diagramm für einen Versuch mit Kies 2,0-4,0 mm dargestellt. Auch bei den Messungen mit den vier Kraftmessdosen ist bei den Versuchen die bereits erwähnte Rückstoßkraft durch das plötzliche Öffnen, wodurch es kurzfristig zu einer Abnahme der Spannungen kommt, aufgezeichnet worden.

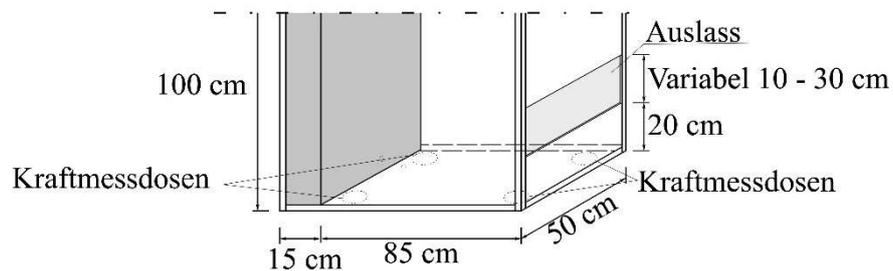


Bild 3.22 Anordnung Kraftmessdosen

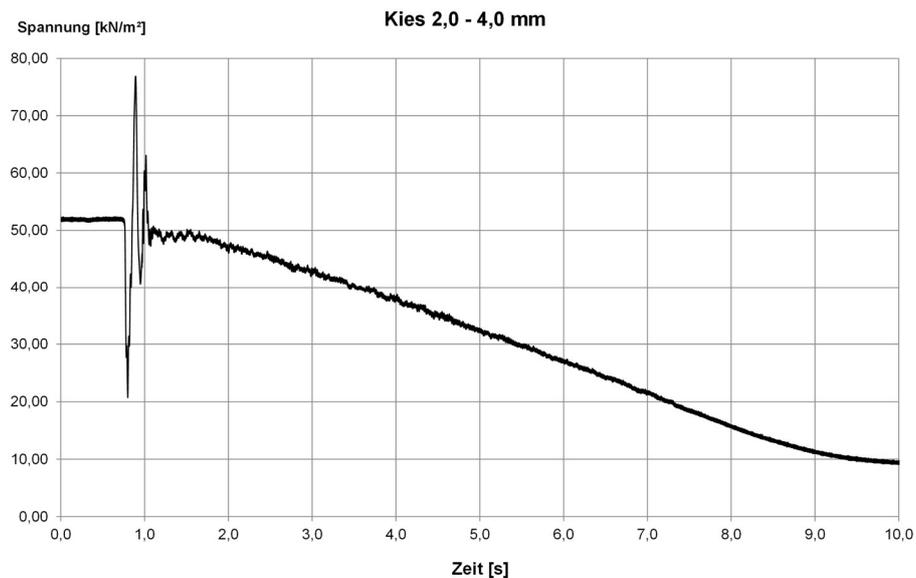


Bild 3.23 Messergebnisse der Kraftmessdosen bei einem Versuch mit wassergesättigtem Kies 2,0-4,0 mm

Bei der Anwendung der PIV-Messung am Großversuchsstand wurde zur Vermeidung von jeglichen ungewollten Lichteinflüssen ein Stahlrahmen konstruiert, der mit Folie abgehängt wurde. Nach erfolgtem Einbau des Versuchsmaterials wurde der Stahlrahmen mit dem Versuchsstand verbunden. Innerhalb dieses mit Folie abgedunkelten Stahlrahmens (Bild 3.24) wurden die High-Speed-Kamera (Phantom Miro M110 Camera System) zur Aufzeichnung des Geschwindigkeitsfeldes positioniert sowie konstante Weißlichtquellen installiert. Die Auswertung der aufgezeichneten Bilder mit einer Aufnahmezeit von 100 fps im unteren Drittel des Versuchsstandes erfolgte mit dem Programm Insight 4G der TSI GmbH (TSI Incorporate (2014)). Für die visuelle Darstellung der Messungen resp. Auswertung wurde das Programm Tecplot Focus 2013 (Tecplot (2013)) verwendet.



Bild 3.24 Versuchsstand mit abgedunkeltem Stahlgerüst

3.5 Vorversuche

3.5.1 Allgemeines

Im ersten Zug der experimentellen Untersuchungen wurden mehr als 100 Vorversuche durchgeführt. Nachdem bei den anfänglichen Vorversuchen der Einbau, die Messtechnik sowie die Voraussetzung zur Gewährleistung einer vollständigen Wassersättigung optimiert wurden, fanden noch zusätzlich Vorversuche zur weiteren Optimierung des neu entwickelten Versuchstandes in Hinblick auf die Versuchsdurchführung und eine erste Beurteilung verschiedener Einflussfaktoren vor der Durchführung der finalen Versuche, die mit Hilfe der PIV-Methode ausgewertet wurden, statt. Im Verlaufe der Untersuchungen wurde die Versuchsanordnung variiert und die folgenden Einflussparameter für die verschiedenen Versuchsmaterialien analysiert:

- Auslasshöhe
- Porenanteil/Lagerungsdichte

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse der Vorversuche basieren ausschließlich auf der optischen Auswertung des Absinkens des Wassers bzw. des wassergesättigten Bodens (vgl. Kapitel 3.4.1). Zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit ist zunächst auf Basis der optischen Messung der Dauer des Absinkens des Bodens der Durchflusses Q ermittelt worden. Die Geschwindigkeit v des ausfließenden wassergesättigten Bodens ist dann in Abhängigkeit der Auslassfläche nach Gleichung (Gl. 3.3) bestimmt worden.

3.5.2 Versuchsablauf und erste Beurteilung des Fließvorganges

Nach erfolgtem Einbau des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens mit der in Kapitel 3.3.3 beschriebene Einbautechnik und Überstauung mit Wasser wird der Versuch durch das Öffnen der vor dem Auslass installierten Klappe gestartet, und der wassergesättigte Boden fließt durch den Auslass aus dem Versuchstand in den dafür vorgesehenen Auffangbehälter (Bild 3.25).



Bild 3.25 Ausfließen des wassergesättigten Bodens aus dem Versuchstand

Während der Versuchsdurchführung hatte sich gezeigt, dass sich der Boden nicht gleichmäßig über die gesamte Breite des Versuchsstandes nach unten bewegt, sondern dass lediglich der in den Bildern 3.26 ff. rechts zu sehende, vordere Bereich des Bodens ausfließt und der Boden im hinteren Bereich des Versuchsstandes lediglich nachrutschte, wodurch es zu unterschiedlichen Höhenniveaus der Oberkante des Bodens kam (vgl. Bild 3.26).



Bild 3.26 Schiefstellung des wassergesättigten Bodens während des Fließprozesses

Das Ende des Versuchs wurde zu dem Zeitpunkt definiert, zu dem nicht nur der wassergesättigte, grobkörnige Boden, sondern auch das Wasser, das den wassergesättigten, grobkörnigen Boden überstaut hat, aus dem Auslass ausgeflossen ist (vgl. Bild 3.27).



Bild 3.27 Definiertes Versuchsende

Nachdem keine Fließbewegung des Versuchsmaterials aus dem Versuchsstand mehr stattfand, verblieb auch oberhalb des Auslasses noch ein Teil des Versuchsmaterials mit einer vom Boden abhängigen Neigung im Versuchsstand. In Bild 3.28 ist dies beispielhaft für einen Versuch mit Kies 2,0-4,0 mm dargestellt.

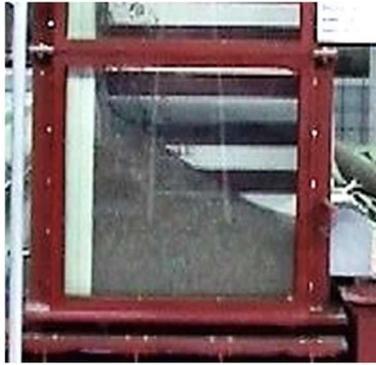


Bild 3.28 Im Versuchsstand verbliebenes Versuchsmaterial nach dem Ende der Fließbewegung

3.5.3 Variation der Auslasshöhe

Im Verlauf der Vorversuche zum Fließverhalten von wassergesättigten, grobkörnigen Böden ist der Einfluss der Auslasshöhe auf die Geschwindigkeit anhand der verschiedenen in Kapitel 3.2 beschriebenen Versuchsmaterialien untersucht worden. Hierbei wurden Versuche mit einer Höhe des Auslasses, der sich über die gesamte Breite des Versuchsstandes erstreckt, von 10 cm, 20 cm und 30 cm durchgeführt (vgl. Bild 3.29). Die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung bezogen auf die Höhe des wassergesättigten Bodens über dem Auslass für die drei unterschiedlichen Auslasshöhen sind im Diagramm in Bild 3.30 für einen Versuch mit Kies 4,0-8,0 mm mit lockerer Lagerung beispielhaft dargestellt. Anhand der erzielten Ergebnisse konnte man erkennen, dass die Geschwindigkeit bei einer Auslasshöhe von 10 cm deutlich geringer ist als bei dem Versuch mit einer Auslasshöhe von 20 cm. Die Geschwindigkeit des Kieses bei einer Auslasshöhe von 10 cm beträgt demnach lediglich rund 55-60 % von der Geschwindigkeit des Kieses bei einer Auslasshöhe von 20 cm. Bei einer weiteren Vergrößerung der Auslasshöhe auf 30 cm konnte nur ein unwesentlicher Anstieg der bei 1,0-1,5 m/s liegenden Geschwindigkeit beobachtet werden (vgl. Bild 3.30).

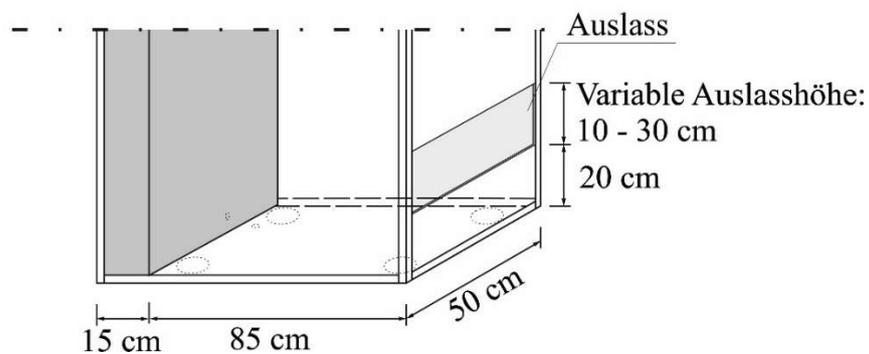


Bild 3.29 Variable Auslasshöhe des Versuchsstandes

Bei den Experimenten mit dem wassergesättigten stark sandigen Kies, dessen Porenanteil wesentlich geringer ist als bei den anderen Versuchsmaterialien, war bei einer Auslasshöhe von 10 cm kein gleichmäßiges Ausfließen des Versuchsmaterials zu beobachten. Die Ausflussgeschwindigkeit hat sich während der Versuchsdurchführung immer wieder reduziert und wieder erhöht (pulsierendes Ausfließen). Die durchschnittliche Geschwindigkeit lag dabei lediglich bei rund 0,15 m/s.

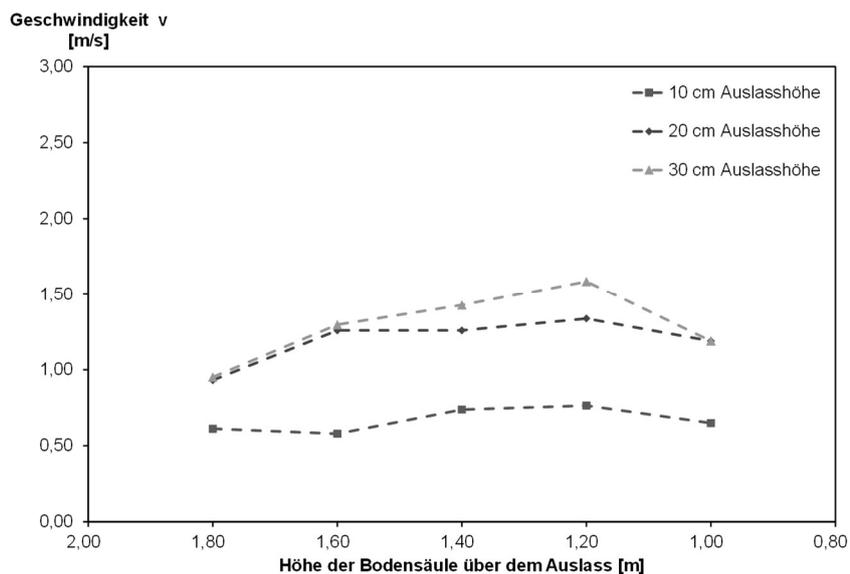


Bild 3.30 Versuchsergebnisse wassergesättigter Kies 4,0-8,0 mm mit unterschiedlichen Auslasshöhen

3.5.4 Vergleich verschiedener Lagerungsdichten

Bei weiteren Vorversuchen wurde der Einfluss der Lagerungsdichte für die Festlegung der Versuchsdurchführung der finalen Versuche analysiert. Der Verlauf der Geschwindigkeit bei den Versuchen mit wassergesättigtem Kies mit lockerer und mitteldichter Lagerung ist im Diagramm in Bild 3.31 beispielhaft anhand von Versuchsergebnissen mit Kies 4,0-8,0 mm dargestellt. Diese Versuche wurden mit einer Einbauhöhe von 200 cm, einer Überstauung von 100 cm und einer Auslasshöhe von 30 cm durchgeführt. Die Lagerungsdichte bei den dargestellten Versuchen lag bei lockerer Lagerung bei $D = 0,15$ und bei mitteldichter Lagerung bei $D = 0,51$. Wie man hier erkennen kann, ist der Einfluss der Lagerungsdichte auf die Geschwindigkeit für den hier dargestellten Fall relativ gering und war bei den Vorversuchen mit den anderen beiden gleichförmigen Kiesen vergleichbar. Dies ist sicherlich auch auf den relativ geringen Unterschied des Porenanteils zurückzuführen.

Bei Experimenten mit verdichtetem stark sandigem Kies wurde ein ähnliches Verhalten beim Ausfließen aus dem Versuchsstand wie bei den Versuchen mit einer Auslasshöhe von 10 cm festgestellt. Auch hier reduzierte sich die Geschwindigkeit während der

Versuchsdurchführung immer wieder und stieg dann wieder an (pulsierendes Ausfließen). Dies konnte sowohl bei den Experimenten mit einer Auslasshöhe von 20 cm als auch bei einer Auslasshöhe von 30 cm bei dichter Lagerung beobachtet werden.

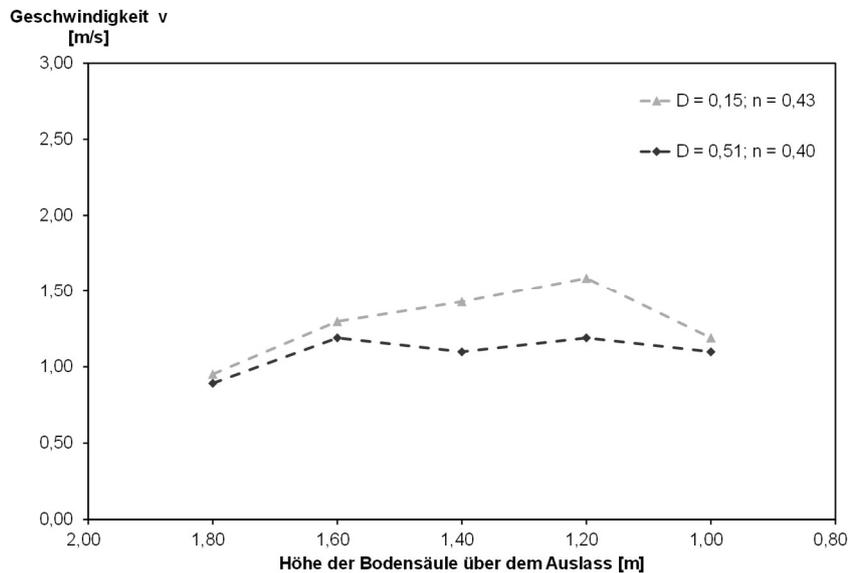


Bild 3.31 Vergleich der Versuchsergebnisse von wassergesättigtem Kies 4,0-8,0 mm bei lockerer und mitteldichter Lagerung

3.6 Versuchsdurchführung

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse zur Einbautechnik, Einbauhöhe, Lagerungsdichte, Kornzusammensetzung und Auslasshöhe der zahlreichen Vorversuche konnte die endgültige Versuchsdurchführung, bei denen die Messungen mit der High-Speed-Kamera durchgeführt wurden, festgelegt werden. Die Versuche wurden mit den in Kapitel 3.2 beschriebenen Böden in lockerer bis mitteldichter Lagerung in fünf Versuchsreihen durchgeführt. Jede Versuchsreihe bestand aus insgesamt drei vergleichbaren Versuchen. Der verwendete Boden ist entsprechend Kapitel 3.2 für die jeweilige Versuchsreihe wie folgt festgelegt worden:

- Versuchsreihe 1: Sand 0,25-2,0 mm
- Versuchsreihe 2: Kies 2,0-4,0 mm
- Versuchsreihe 3: Kies 4,0-8,0 mm
- Versuchsreihe 4: Kies 8,0-16,0 mm
- Versuchsreihe 5: stark sandiger Kies

Vor Versuchsbeginn fand eine vollständige Wassersättigung des Bodens statt. Der Einbau erfolgt mit dem dafür entwickelten Einbaubehälter, wobei der Sand 0,25-2,0 mm und der stark sandige Kies vorher mit einer vordefinierten Wassermenge vermischt wurde (vgl. Kapitel 3.3). Nach vollständigem Einbau des Bodens und der schrittweisen

Wassersättigung bis zur definierten Einbauhöhe von 250 cm wurden die restlichen 50 cm oberhalb des eingebauten wassergesättigten Bodens mit Wasser überstaut, um eine vollständige Wassersättigung während der gesamten Versuchsdurchführung gewährleisten zu können.

Die Vorversuche haben außerdem gezeigt, dass ein konstantes Ausfließen ausschließlich bei einer Auslasshöhe von 20 cm resp. 30 cm erzielt werden konnte. Aufgrund der längeren Versuchsdauer bei einer Auslasshöhe von 20 cm, fiel die Entscheidung auf diese Auslasshöhe.

Der Versuch wird gestartet, indem die Klappe durch die davor angeordneten Hebel geöffnet und der wassergesättigte Boden aus dem Versuchsstand ausfließen kann.

Während der Versuchsdurchführung werden die Änderung der Spannung durch die Messung mit den Kraftmessdosen, das Absinken des Bodens und des Wassers mittels optischer Messmethoden und die Geschwindigkeit der einzelnen Bodenpartikel mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Am Versuchsende wurde noch die Masse gemessen, welche die ausgeflossene Mischung im Vergleich zur Gesamtmasse hatte.

4 Auswertung und Versuchsergebnisse

4.1 Methodik der Auswertung

Im Rahmen der Auswertung und Beurteilung der Versuchsergebnisse wurde bei der in Kapitel 2.5 beschriebenen Analyse mit Hilfe der Particle Image Velocimetry-Methode die Fließbewegung im unmittelbaren Einflussbereich des Auslasses untersucht.

Die Aufnahmen erfolgten mit Hilfe der High-Speed-Kamera (100 fps) in dem in Bild 4.1 dargestellten Bereich.

Bei der Analyse wurde primär die Geschwindigkeit des ausfließenden Boden-Wasser-Gemisches ausgewertet. Dieser Fokus liegt darin begründet, dass dies der für die Ingenieurpraxis entscheidende Faktor ist und die Geschwindigkeit für den Vergleich mit Wasser und für die numerischen Analysen des DFG-Projektpartners ein maßgebender Faktor ist. Außerdem wurde auch die Reichweite der Fließbewegung und die Fließrichtung des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens analysiert.

In dem in Bild 4.1 dargestellten Ausschnitt fand die Analyse der Fließbewegung der fünf verschiedenen Versuchsmaterialien (vgl. Kapitel 3.2) über die Zeit statt. Zur Visualisierung der gemessenen Geschwindigkeiten wurden die mit dem Programm Insight 4G erzeugten Vektordaten mit dem Programm Tecplot Focus 2013 weiterverarbeitet. Die Ergebnisse der Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung, die Reichweite der Fließbewegung und die Richtung der Geschwindigkeitsvektoren innerhalb des aufgezeichneten Bereiches sind in Kapitel 4.2 wiedergegeben.

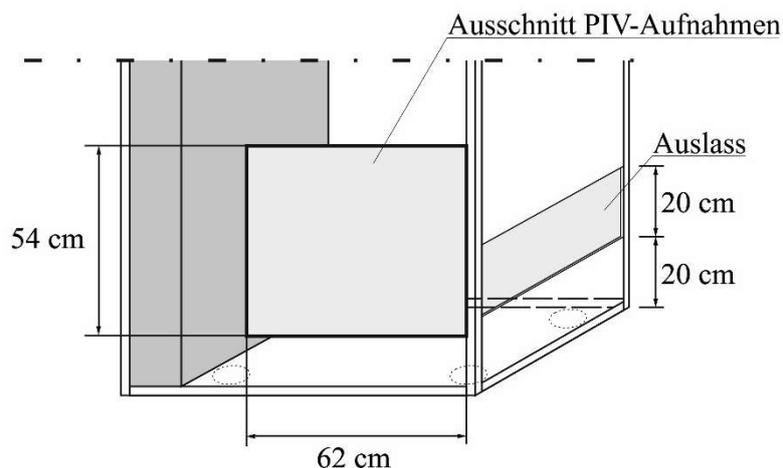


Bild 4.1 Aufzeichnungsbereich im unteren Drittel des Versuchsstandes mit der High-Speed-Kamera

Anhand der Analyse des gesamten mit der High-Speed-Kamera aufgezeichneten Bereiches wurde unter anderem festgestellt, dass die Geschwindigkeit zum Teil stark von dem verwendeten Versuchsmaterial abhängig ist und innerhalb des betrachteten Ausschnittes variiert. Daher erfolgte im nächsten Schritt innerhalb des betrachteten Ausschnittes eine Detailanalyse zur Ermittlung der gemessenen Geschwindigkeit in verschiedenen Bereichen. Hierzu wurden anhand der fünf verwendeten Versuchsmaterialien insgesamt neun einzelne Bereiche analysiert und miteinander verglichen. Die einzelnen Positionen sind Bild 4.2 zu entnehmen.

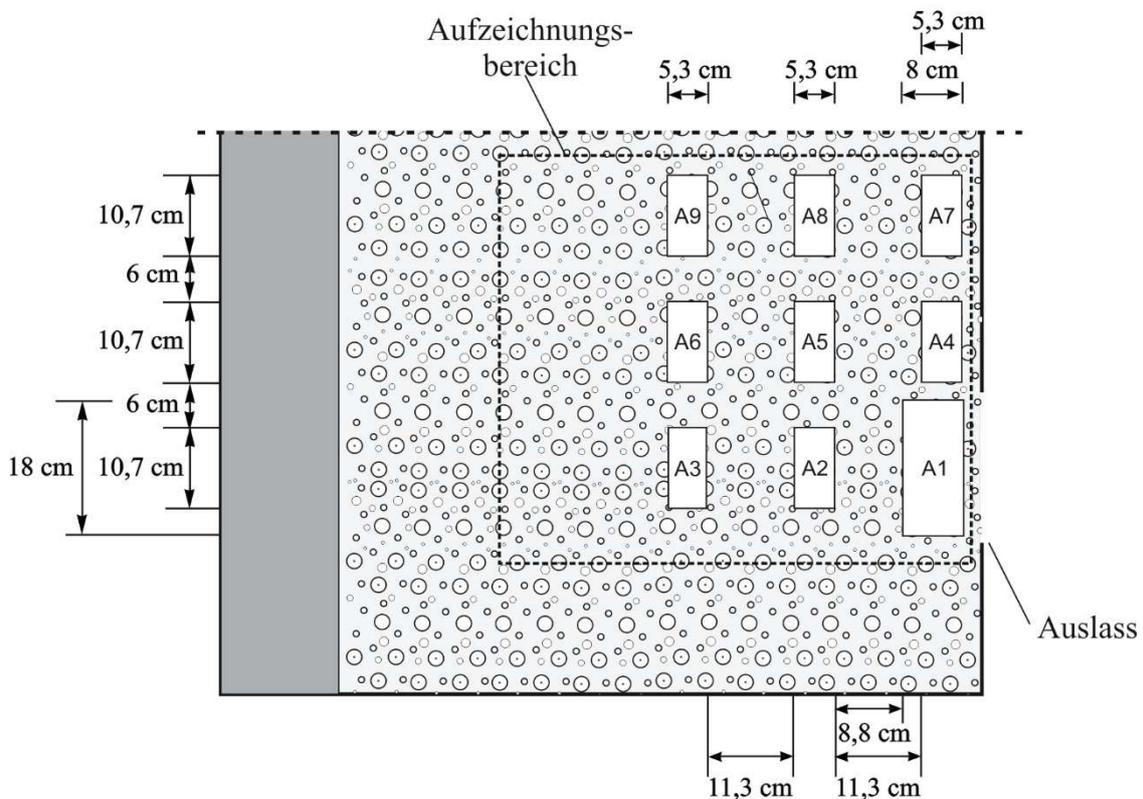


Bild 4.2 Ansicht des Versuchszustands mit den definierten Bereichen zur Analyse der Geschwindigkeiten mittels der PIV-Methode

Zur Analyse des Randeinflusses beim Ausfließen durch die Öffnung aus dem Versuchszustand im unmittelbaren Bereich des Auslasses (Bereich A1) wurde innerhalb dieses Bereiches direkt am Auslass die gemessene Geschwindigkeit in der Mitte mit den Geschwindigkeiten im oberen und unteren Randbereich verglichen (siehe Bild 4.3).

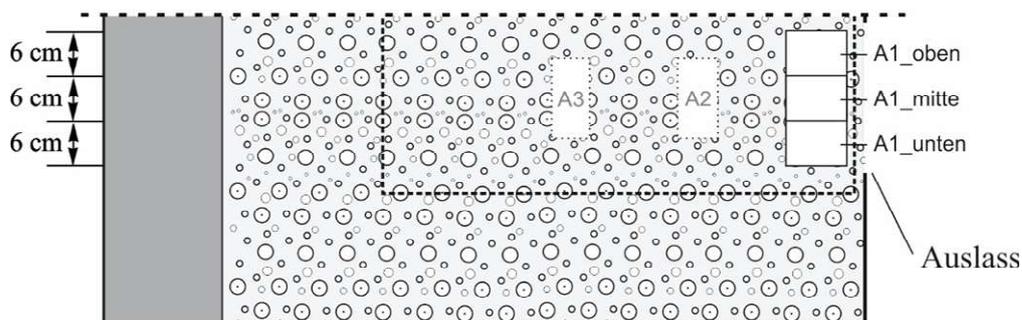


Bild 4.3 Analysebereiche unmittelbar am Auslass

Um eine Geschwindigkeit zu jedem mit einem Doppelbild erfassten Zeitpunkt bestimmen zu können, war es erforderlich, die Vektoren für jede Interrogation Area auszulesen und einen Mittelwert aus den gemessenen Geschwindigkeiten zu bilden. Aufgrund der immensen Datenmenge, die bei der verwendeten Aufnahmerate von 100 fps vorhanden war, wurde ein Visual Basics Tool entwickelt. Durch die Anwendung dieses Tools wurde es möglich, mit den gewonnenen Vektordaten durch die Auswertung der aufgezeichneten Bilder mit der PIV Methode eine Geschwindigkeitsentwicklung über die Zeit für die einzelnen Bereiche auszuwerten.

Die Vorversuche haben ergeben, dass beim Einbau mit unterschiedlicher Lagerungsdichte bei den gleichförmigen Kiesen kein Unterschied im Fließprozess vorhanden war. Bei den Versuchen mit dichter Lagerung mit Sand 0,25-2,0 mm und dem stark sandigen Kies hat sich, im Gegensatz zu den Vorversuchen mit lockerer und mitteldichter Lagerung, kein stetiges Ausfließen eingestellt. Die im Folgenden ausgewerteten Versuche, die mit der High-Speed Kamera aufgezeichnet wurden, sind daher ausschließlich mit lockerer und mitteldichter Lagerung durchgeführt worden.

Mit Hilfe der in Kapitel 2.5 beschriebenen Particle Image Velocimetry (PIV) Methode konnte somit die Geschwindigkeit in den unterschiedlichen Bereichen des Versuchsaufbaus, wie in Bild 4.2 und Bild 4.3 dargestellt, bestimmt und miteinander verglichen werden. In den nachfolgenden Kapiteln 4.3 bis 4.6 sind die Ergebnisse für die unterschiedlichen Bereiche, die für die Beschreibung des Fließverhaltens der wassergesättigten grobkörnigen Böden maßgeblich sind, dargestellt.

Für die Auswertung der experimentellen Untersuchungen wurden für die fünf Versuchsreihen der gewählten Böden drei vergleichbare Versuche herangezogen. Für die Auswertung der 9 unterschiedlichen Auswertebereiche (vgl. Bild 4.2) erfolgte die Bildung eines arithmetischen Mittelwertes aus diesen drei Versuchen. Die einzelnen gemessenen Geschwindigkeiten über die Zeit für jeden Versuch und die neun verschiedenen in Bild 4.2 dargestellten Bereiche können den Diagrammen in Bild A.1 bis Bild A.135 im Anhang entnommen werden.

Im Zuge der weiteren Analyse von Einflussfaktoren erfolgte eine Auswertung der Geschwindigkeitsentwicklung im Bereich des Auslasses in Abhängigkeit von der Spannungsänderung während der Versuchsdurchführung (siehe Kapitel 4.7).

Schließlich wurde die gemessene Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Füllhöhen des wassergesättigten Bodens im Versuchsstand analysiert und mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli verglichen.

In Tabelle 4.1 sind die Einbauparameter Trockendichte ρ_d und Porenanteil n für die untersuchten Versuchsmaterialien der Versuchsreihen angegeben.

Versuchsreihe	Material	Trockendichte ρ_d [g/cm³]	Porenanteil n [-]
1	Sa 0,25-2,0 mm	1,491	0,43
2	Gr 2-4 mm	1,467	0,44
3	Gr 4-8 mm	1,538	0,42
4	Gr 8-16 mm	1,508	0,43
5	saGr	1,893	0,28

Tabelle 4.1 Versuchsparmeter

4.2 Geschwindigkeitsverteilung

4.2.1 Allgemeines

Nachfolgend ist die Auswertung der Geschwindigkeitsentwicklung über den gesamten aufgezeichneten Ausschnitt (vgl. Bild 4.1) für alle untersuchten Versuchsmaterialien dargestellt. Hierfür wurde, im Gegensatz zu den weiteren Auswertungen, jeweils ein Versuch der Versuchsreihen, der das Verhalten beim Ausfließen vergleichbar zu den anderen Versuchen mit gleichem Versuchsmaterial widerspiegelt, auf Grund der Darstellbarkeit ausgewählt. Die x-Achse verläuft entlang der Breite und die y-Achse entlang der Höhe des Versuchsstandes. Die Geschwindigkeitsverteilung ist dabei in Abständen von 0,5 Sekunden dargestellt.

4.2.2 Geschwindigkeitsverteilung Versuchsreihe 1

Bei den Versuchen mit dem Sand 0,25-2,0 mm konnte festgestellt werden, dass die Fließbewegung annähernd über die gesamte Breite des Versuchsstandes stattfindet (siehe Bild 4.4). Auch eine Mitnahme des Bodens unterhalb des Auslasses konnte innerhalb der ersten Sekunde des Versuchs beobachtet werden. Anhand der in Bild 4.4 dargestellten Geschwindigkeitsvektoren des wassergesättigten Sandes ist die Fließbewegung hin zum Auslass deutlich erkennbar.

Die größten Geschwindigkeiten bei diesen Versuchen wurden in unmittelbarer Nähe des Auslasses gemessen. Der Bereich mit den maximalen Geschwindigkeiten in Höhe des Auslasses reichte bei den Versuchen in der Versuchsreihe 1 bis zu einer Entfernung von rund 15 cm zum Auslass. Im weiteren Bewegungsbereich wurden deutlich geringere Geschwindigkeiten gemessen. Im Randbereich der Fließbewegung verlangsamte sich die Geschwindigkeit nochmals deutlich. Unterhalb des Auslasses war nach einer Versuchsdauer von rund einer Sekunde keine Bewegung mehr feststellbar.

Nach dem Ende des Versuchs sind rd. 15 % des eingebauten Versuchsmaterials mit einer Neigung von $17,7^\circ$ gegen die Horizontale im Versuchsstand verblieben. Die Versuchsdauer bei der Versuchsreihe mit dem Sand 0,25-2,0 mm betrug lediglich zwei Sekunden.

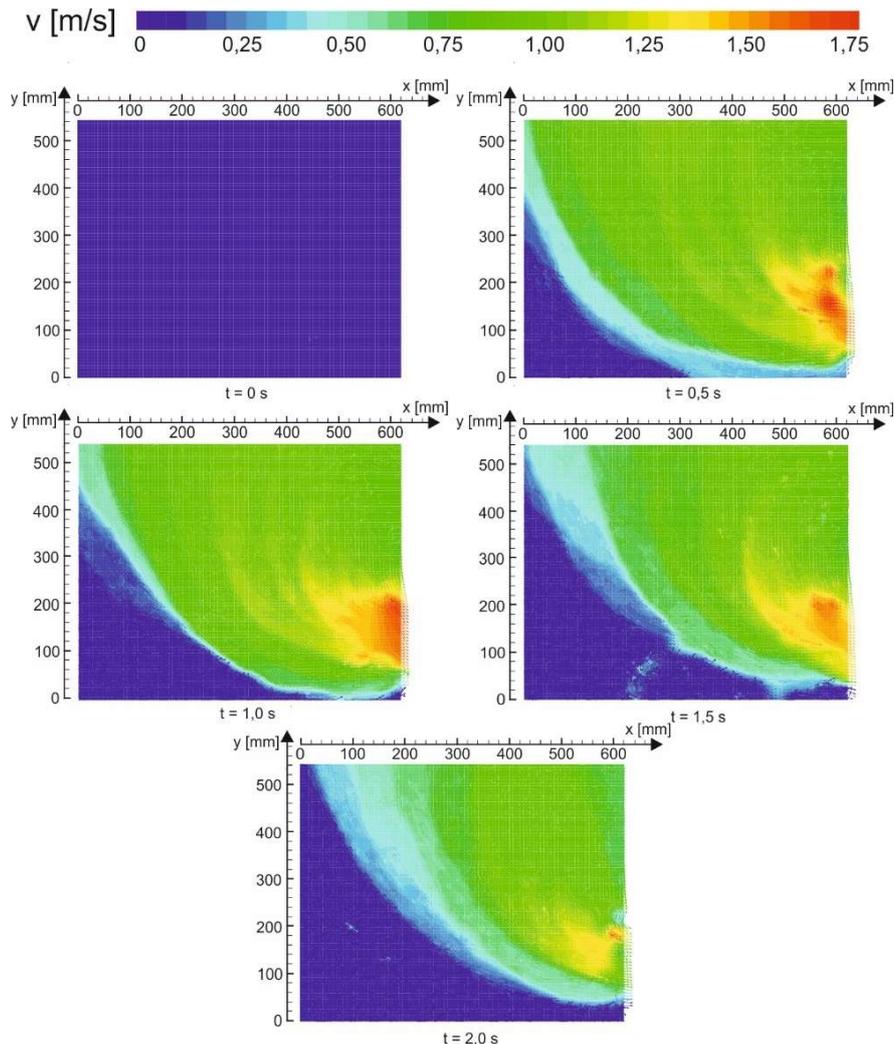


Bild 4.4 Geschwindigkeitsverteilung des Sandes 0,25-2,0 mm im Aufzeichnungsbereich zu verschiedenen Zeitpunkten

4.2.3 Geschwindigkeitsverteilung Versuchsreihe 2

Bei den Versuchen mit wassergesättigtem Kies 2,0-4,0 mm konnte ein sehr gleichmäßiges Ausfließen aus dem Versuchsstand beobachtet werden (siehe Bild 4.5).

Auch bei diesen Versuchen wurde die maximale Geschwindigkeit unmittelbar im Bereich des Auslasses gemessen. Mit zunehmender Entfernung vom Auslass, über die Breite des Versuchsstandes betrachtet, nahm die Geschwindigkeit deutlich ab. Es konnte keine Fließbewegung über die gesamte Breite des Versuchsstandes verzeichnet werden, wie es beim Sand 0,25-2,0 mm der Fall war, sondern lediglich innerhalb des ersten Drittels der Versuchsstandsbreite. Allerdings nahm die Breite des Bewegungsfeldes im Gegensatz zu den Versuchen der Versuchsreihe 1 im Verlauf des Versuchsablaufs zu, erst gegen Versuchsende (nach rund vier Sekunden) verringerte sich der Bereich der Fließbewegung wieder.

Insgesamt lagen die gemessenen Geschwindigkeiten deutlich unter den bei der Versuchsreihe 1 ermittelten Geschwindigkeiten.

Bei dieser Versuchsreihe bildete sich beim Fließvorgang ein relativ steiler Bereich aus, in dem die Fließbewegung stattfand. Nach dem Ende der Fließbewegung verblieb oberhalb des Auslasses auch ein dreiecksförmiger Anteil des Bodens mit einer mittleren Neigung von $34,4^\circ$ gegen die Horizontale im Versuchsstand. Insgesamt flossen rd. 84 % des eingebauten Bodens aus dem Versuchsstand aus.

Die Versuchsdauer der Versuchsreihe 2 mit Kies 2,0-4,0 mm lag mit rund fünf Sekunden deutlich höher als bei der Versuchsreihe 1.

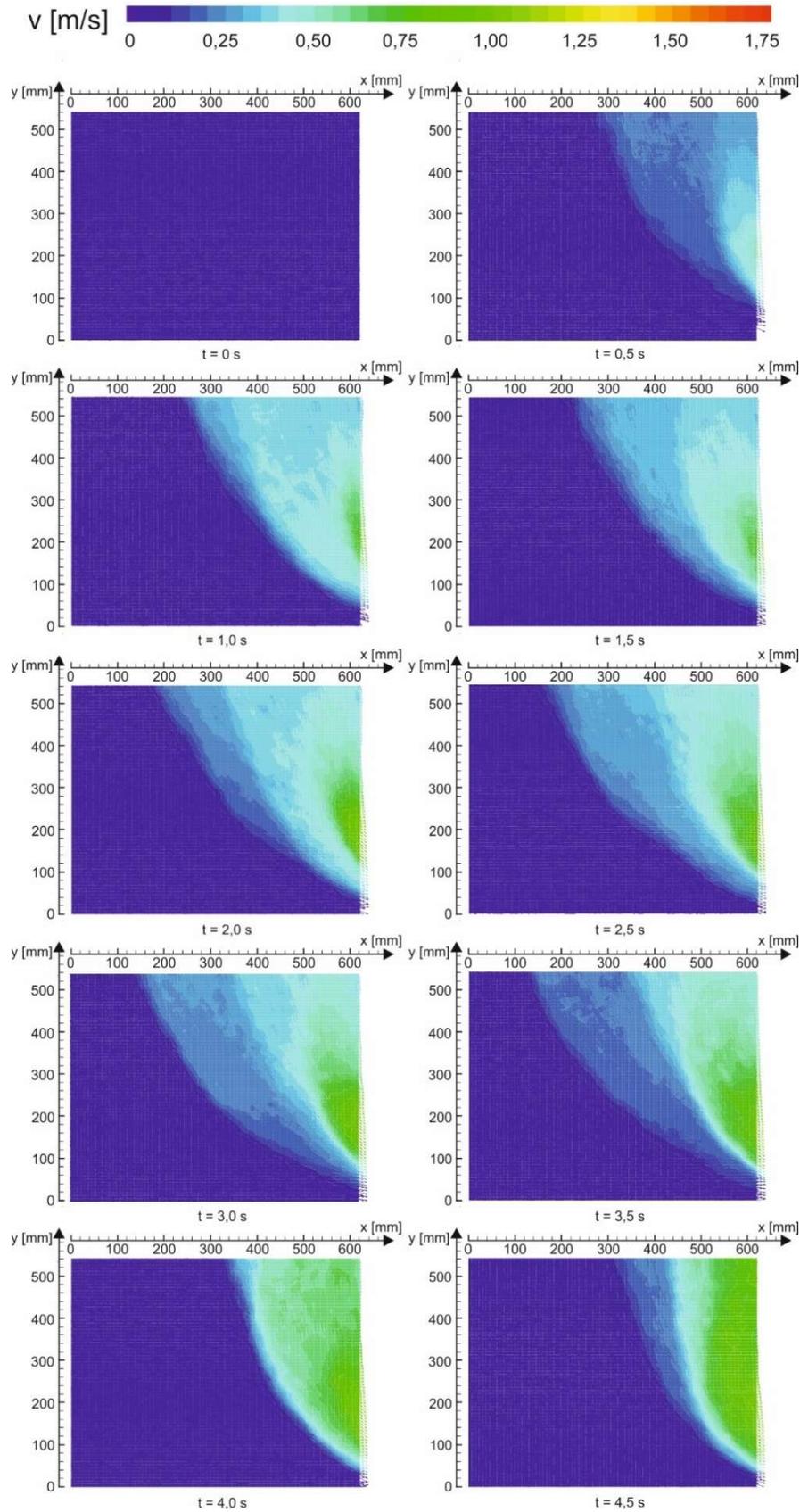


Bild 4.5 Geschwindigkeitsverteilung des Kiesel 2,0-4,0 mm im Aufzeichnungsbereich zu verschiedenen Zeitpunkten

4.2.4 Geschwindigkeitsverteilung Versuchsreihe 3

Die Messungen der Geschwindigkeit des Kieses 4,0-8,0 mm (Bild 4.6) zeigt ein ähnliches Verhalten beim Ausfließen aus dem Versuchsstand wie der Kies 2,0-4,0 mm. Auch hier konnte ein gleichmäßiges Herausfließen aufgezeichnet werden (siehe Bild 4.6).

Die größten Geschwindigkeiten wurden, wie zu erwarten war, im Bereich des Auslasses bestimmt. Mit zunehmender Entfernung vom Auslass, über die Breite des Versuchsstandes betrachtet, nahm die Geschwindigkeit auch hier deutlich ab. Es konnte ebenfalls keine Fließbewegung über die gesamte Breite des Versuchsstandes verzeichnet werden. Bei den Versuchen der Versuchsreihe 3 blieb der Bereich, in dem die Fließbewegung stattfand, während des Versuchsverlaufs annähernd konstant.

Insgesamt lagen die gemessenen Geschwindigkeiten etwas über den bei der Versuchsreihe 2 ermittelten Geschwindigkeiten.

Wie in Bild 4.6 deutlich zu erkennen ist, bildete sich ebenfalls hinter dem Auslass ein trichterförmiger Bereich, in dem die Fließbewegung stattfand, beim Ausfließen aus dem Versuchsstand aus. Nach dem Ende des Fließprozesses verblieben durchschnittlich 16,7 % des eingebauten Bodens mit einer Neigung von $32,5^\circ$ gegen die Horizontale im Versuchsstand.

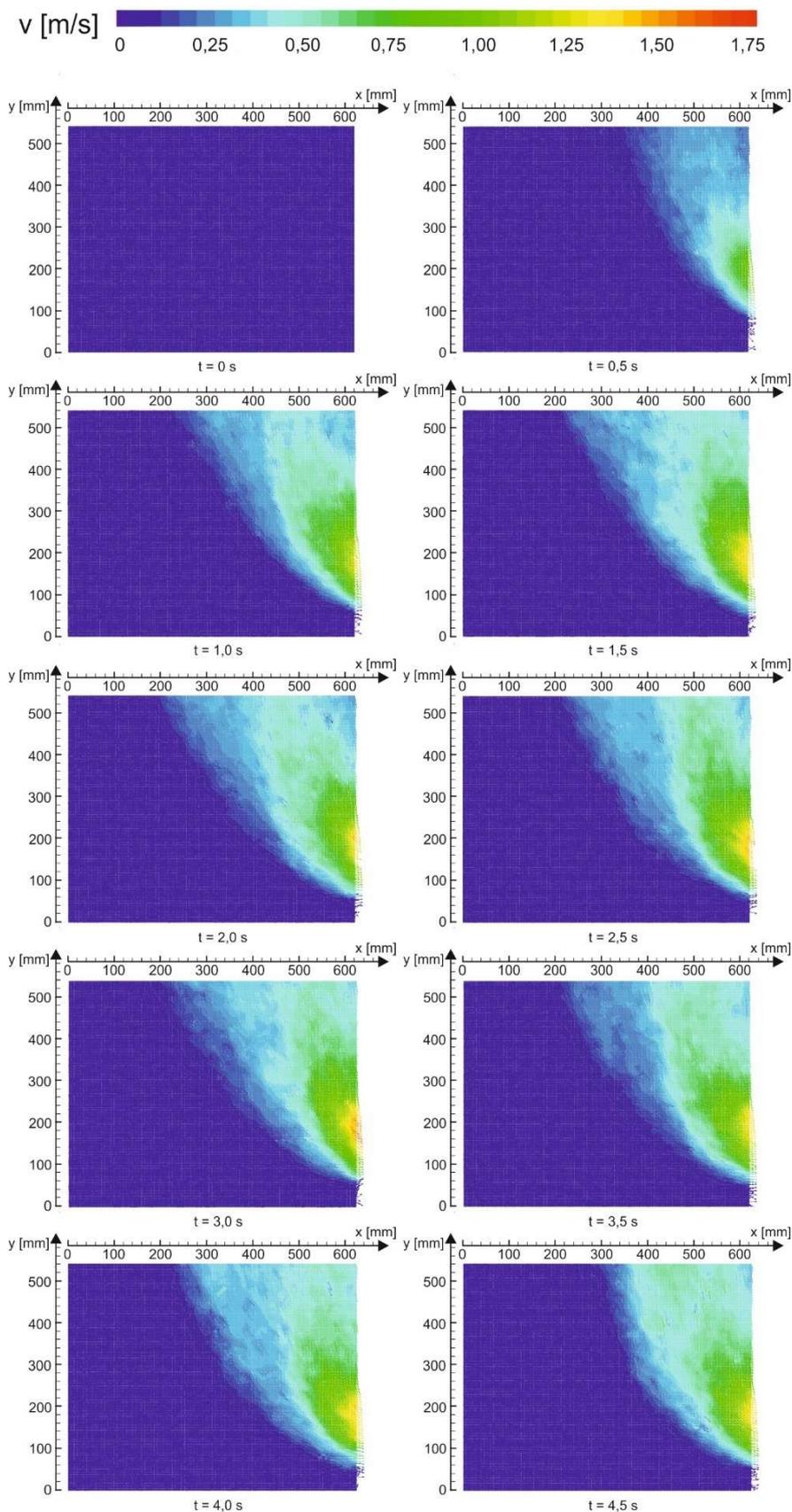


Bild 4.6 Geschwindigkeitsverteilung des Kiese 4,0-8,0 mm im Aufzeichnungsbereich zu verschiedenen Zeitpunkten

4.2.5 Geschwindigkeitsverteilung Versuchsreihe 4

Wie schon bei den Versuchen mit Kies 2,0-4,0 mm und Kies 4,0-8,0 mm zeigen auch die Versuche mit Kies 8,0-16,0 mm der Versuchsreihe 4 ein gleichförmiges Ausfließen aus dem Versuchsstand (Bild 4.7).

Die maximale Geschwindigkeit wurde ebenfalls unmittelbar am Auslass gemessen. Die Geschwindigkeit nahm mit zunehmender Entfernung vom Auslass, über die Breite des Versuchsstandes betrachtet, deutlich ab.

Die Reichweite der Fließbewegung bei den Versuchen der Versuchsreihe 4 mit Kies 8,0-16,0 mm war vergleichbar mit der bei den Versuchen mit Kies 4,0-8,0 mm aufgezeichneten Reichweite und blieb während des Versuchsverlaufs annähernd konstant. Es bildete sich also ebenfalls ein steiler, trichterförmiger Bereich, in dem die Fließbewegung stattfand, beim Ausfließen aus dem Versuchsstand, wie Bild 4.7 zu entnehmen ist, aus.

Insgesamt flossen rd. 82 % des eingebauten Versuchsmaterials aus dem Versuchsstand aus. Das im Versuchsstand verbliebene Material wies dabei eine durchschnittliche Neigung von $32,7^\circ$ gegen die Horizontale auf.

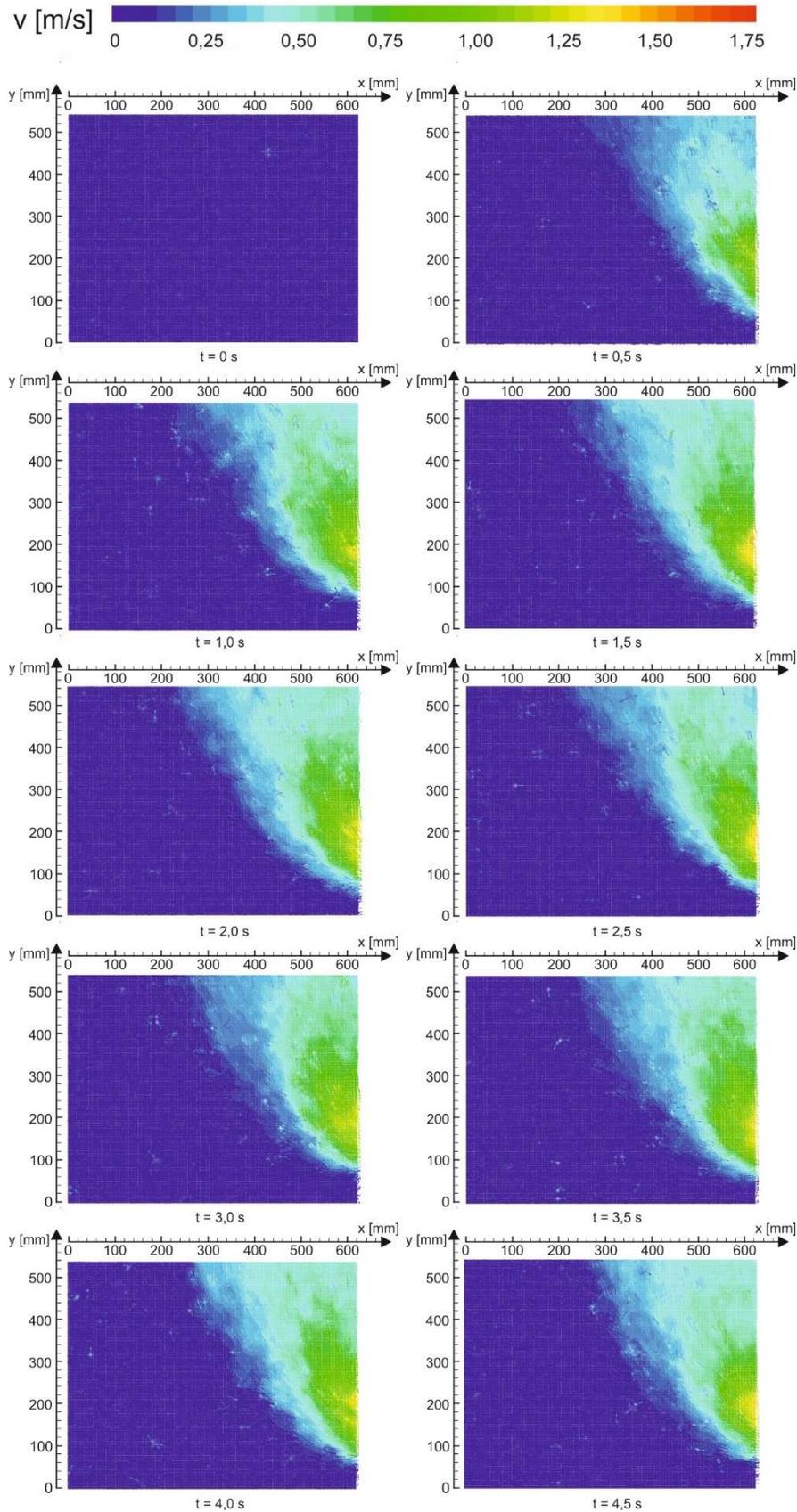


Bild 4.7 Geschwindigkeitsverteilung des Sandes 8,0-16,0 mm im Aufzeichnungsbereich zu verschiedenen Zeitpunkten

4.2.6 Geschwindigkeitsverteilung Versuchsreihe 5

Die Versuche mit dem wassergesättigten stark sandigen Kies zeigten ein etwas anderes Fließverhalten aus dem Versuchsstand, als die gleichförmigen Kiese und der gleichförmige Sand (vgl. Bild 4.8). So wurde zunächst ein Ausfließen annähernd über die gesamte Breite des Versuchsstandes beobachtet. Erst im weiteren Versuchsverlauf veränderte sich der Bereich, in dem eine Fließbewegung des wassergesättigten sandigen Kiesel stattfand. Die Neigung, die sich beim Ausfließen einstellte, war deutlich flacher als bei den Versuchen mit den gleichförmigen Kiesen. Nach rund zwei Sekunden Versuchsdauer konnte ein gleichmäßiges Ausfließen aus dem Versuchsstand beobachtet werden.

Wie auch bei den anderen Versuchen wurde die maximale Geschwindigkeit im unmittelbaren Bereich des Auslasses gemessen. Mit zunehmender Entfernung vom Auslass nahm die Geschwindigkeit auch hier merkbar ab. Auffällig ist bei den Versuchen der Versuchsreihe 5 die deutliche Abnahme der Geschwindigkeit über die Zeit, die bei den Versuchsreihen 2 - 4 mit den gleichförmigen Kiesen nicht gemessen wurde. So zeigte der stark sandige Kies zu Versuchsbeginn ein vergleichbares Verhalten zum Sand der Versuchsreihe 1 und veränderte im Versuchsverlauf sein Verhalten zu dem der gleichförmigen Kiese hin.

Nach Versuchsende verblieben rd. 17 % des eingebauten Materials mit einer durchschnittlichen Neigung von $23,4^\circ$ gegen die Horizontale im Versuchsstand.

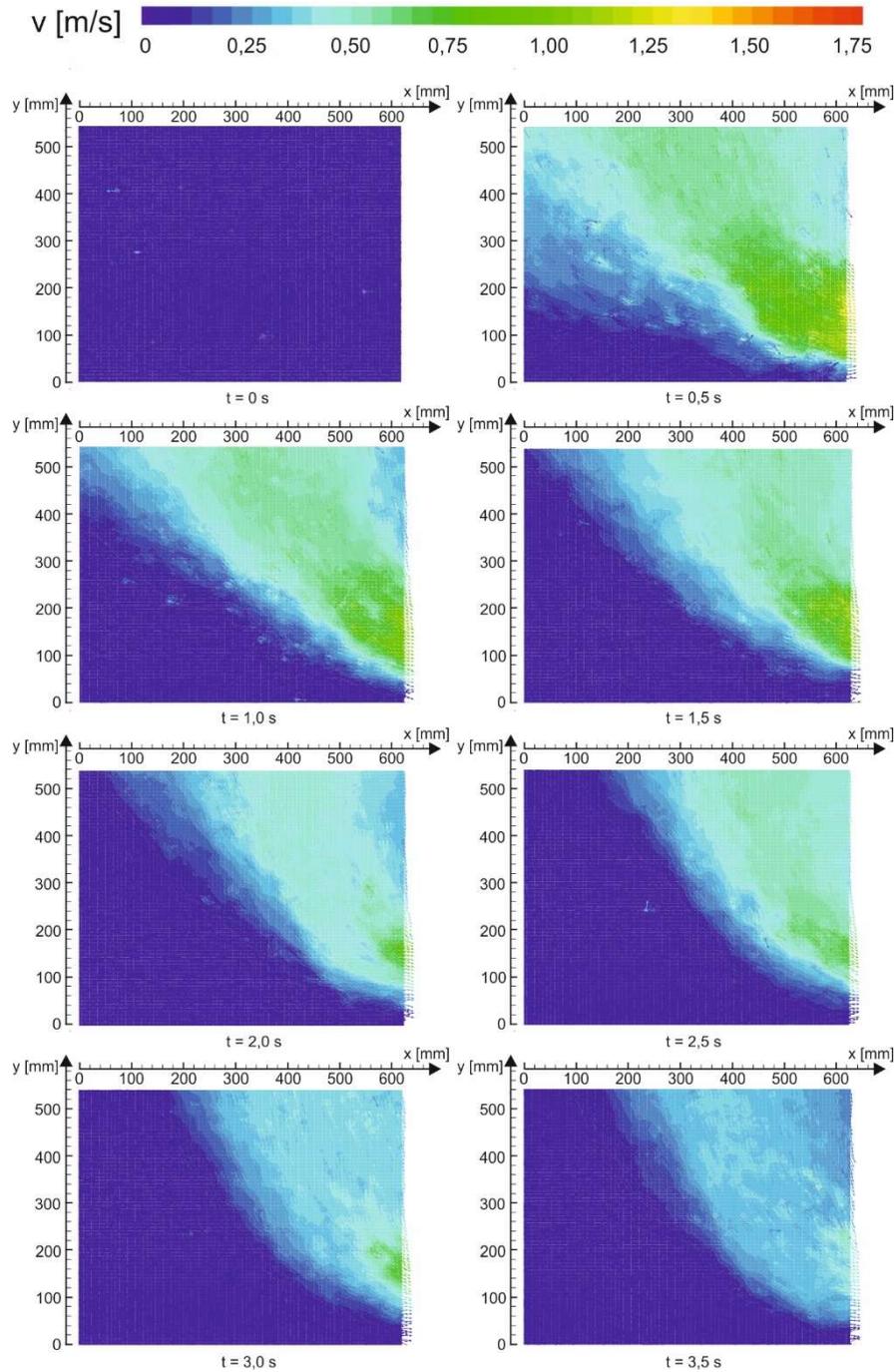


Bild 4.8 Geschwindigkeitsverteilung des stark sandigen Kieses im Aufzeichnungsbereich zu verschiedenen Zeitpunkten

4.2.7 Bewertung der Geschwindigkeitsverteilung

Wie man aus der in den vorangegangenen Kapiteln 4.2.2 bis 4.2.6 dargestellten Entwicklung der Geschwindigkeit erkennen kann, konnte für alle Materialien bestätigt werden, dass die maximale Geschwindigkeit im Bereich des Auslasses aufgetreten ist.

Bei allen Versuchsmaterialien konnte eine Abnahme der Geschwindigkeit mit zunehmender Entfernung zum Auslass festgestellt und ein Bereich detektiert werden, in dem keine Fließbewegung stattfand.

Der Bereich, in der die Fließbewegung stattfand, ist stark materialabhängig. So war die Reichweite der Fließbewegung bei den sandigen Böden der Versuchsreihe 1 und 5 deutlich größer als bei den Kiesen der Versuchsreihen 2 bis 4.

Die Dauer der Versuche bei den Versuchsreihen 2 bis 4 mit den gleichförmigen Kiesen war insbesondere im Vergleich zum Sand der Versuchsreihe 1 mit mehr als der doppelten Versuchsdauer wesentlich länger.

Bei den Versuchen mit dem stark sandigen Kies der Versuchsreihe 5 zeigte sich beim Ausfließen ein zweigeteiltes Verhalten. So glich dieses zu Beginn dem Verhalten des Sandes der Versuchsreihe 1 und veränderte sich im Versuchsverlauf zu dem der gleichförmigen Kiese hin. Dieses Verhalten kann darin begründet sein, dass der Sand nach einer gewissen Versuchsdauer bereits zu großen Teilen ausgespült worden ist und der Kies die bestimmenden Eigenschaften übernommen hat.

4.3 Vergleich der Geschwindigkeiten im Bereich des Auslasses

4.3.1 Allgemeines

Nachfolgend ist die Analyse der mittleren Geschwindigkeiten für die fünf Versuchsreihen unmittelbar am Auslass (A1) über die Zeit dargestellt. Die Lage des Bereiches A1 kann Bild 4.2 entnommen werden. Die ermittelten Geschwindigkeiten im Bereich A1 stellen einen Mittelwert der gemessenen Geschwindigkeiten im Bereich A1 dar. Bei der Auswertung der nachfolgend dargestellten Geschwindigkeitsentwicklung über die Zeit wurden außerdem die Ergebnisse aller drei Versuche je Versuchsreihe herangezogen und gemittelt.

4.3.2 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1

Im Diagramm in Bild 4.9 ist die mittlere Geschwindigkeit über die Zeit der Versuchsreihe 1 dem Sand 0,25-2,0 mm im Bereich A1 dargestellt. Nach dem Öffnen der Klappe (Versuchsstart) ist ein sprunghafter Anstieg der Geschwindigkeiten festzuhalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Fließvorgang durch den hinter der Klappe anstehenden Druck mit dem Öffnen der Klappe schlagartig gestartet wird. Die Geschwindigkeit steigt dabei auf rund 1,35 m/s an. Nach einer halben Sekunde konnte eine kontinuierliche langsame Abnahme auf 0,6 m/s festgestellt werden. Wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt, betrug die Versuchsdauer lediglich 2 Sekunden.

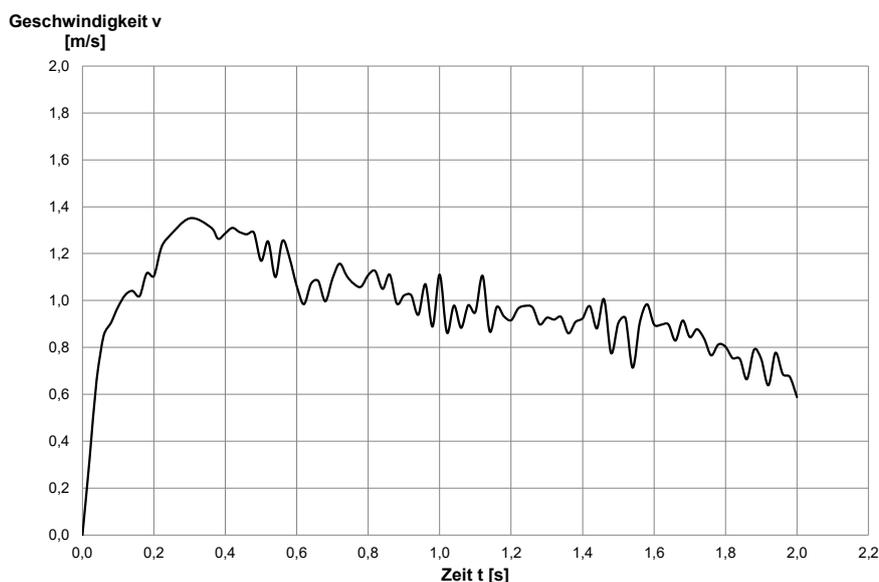


Bild 4.9 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm im Bereich des Auslasses

4.3.3 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2

Auch bei den Versuchen mit Kies 2,0-4,0 mm konnte ein sprunghafter Anstieg der Geschwindigkeit gemessen werden. Die Geschwindigkeit betrug dabei allerdings nur 0,8 m/s und war damit deutlich geringer als beim Sand. Diese reduzierte sich nach rund 0,3 Sekunden geringfügig auf 0,55 m/s und stieg danach innerhalb der nächsten Sekunden auf 1,0 m/s an. Nach 2,5 Sekunden Versuchsdauer wurde eine annähernd konstante Geschwindigkeit von 1,2 m/s bis zum Versuchsende erreicht. Die gemessene mittlere Geschwindigkeit für den wassergesättigten Kies 2,0-4,0 mm über die Zeit im Bereich A1 kann dem nachfolgenden Kurvenverlauf in Bild 4.10 entnommen werden.

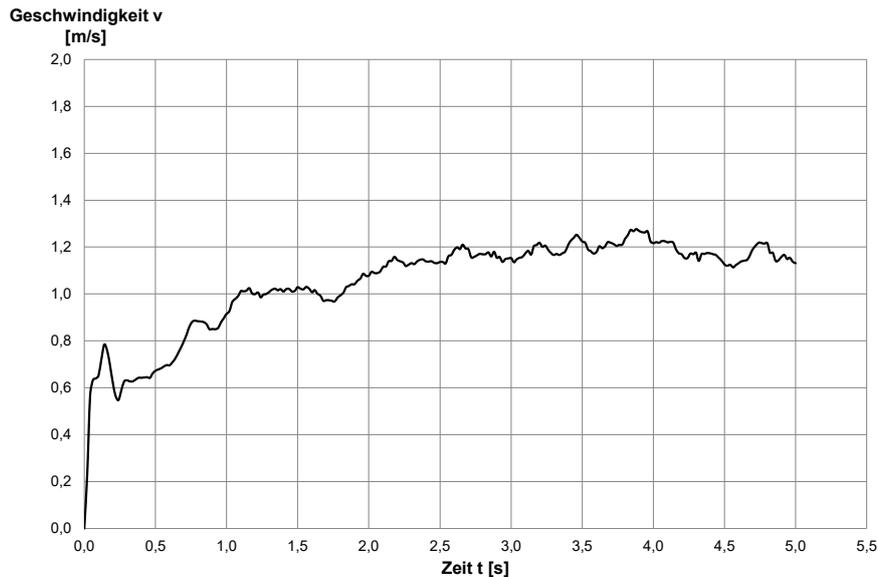


Bild 4.10 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm im Bereich des Auslasses

4.3.4 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3

Anhand der Auswertung der Geschwindigkeiten im Bereich des Auslasses (A1) des wassergesättigten Kieses 4,0-8,0 mm über die Zeit zeigte sich ein vergleichbares Bild wie beim wassergesättigten Kies 2,0-4,0 mm.

Die Geschwindigkeit über die Zeit für den Kies 4,0-8,0 mm ist im Diagramm in Bild 4.11 dargestellt.

Nach dem Versuchsstart ist ein sprunghafter Anstieg der Geschwindigkeit auf rund 0,7 m/s zu verzeichnen, was wiederum etwas weniger als beim Kies 2,0-4,0 mm ist. Nach rd. 0,2 Sekunden reduziert sich die Geschwindigkeit um 0,1 m/s, um auf bis zu 1,34 m/s nach 1,45 Sekunden Versuchsdauer anzusteigen. Bis zum Versuchsende blieb die Geschwindigkeit im Mittel mit 1,25 m/s annähernd konstant.

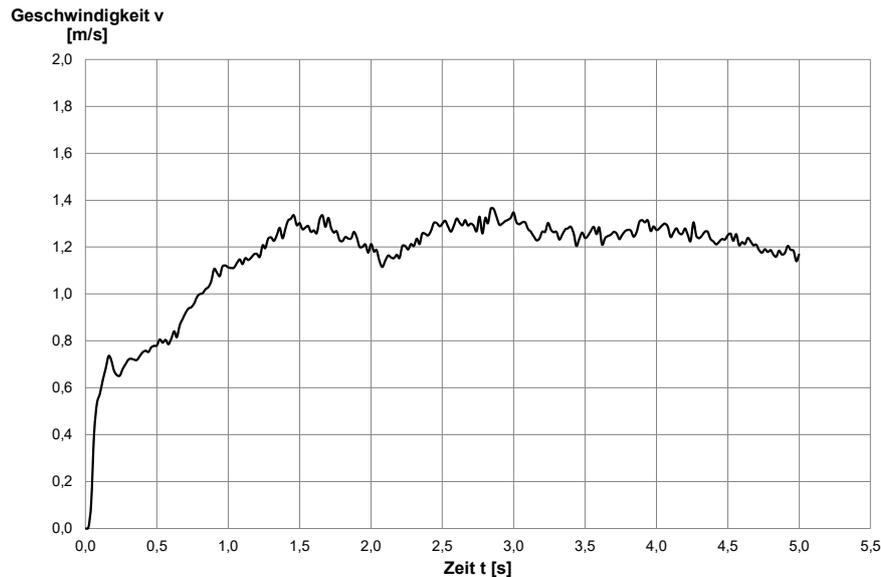


Bild 4.11 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm im Bereich des Auslasses

4.3.5 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4

In Bild 4.12 ist die mittlere Geschwindigkeit im Bereich A1 über die Zeit für den wassergesättigten Kies 8,0-16,0 mm dargestellt.

Nach der Initialisierung des Versuchs ist auch hier ein deutlicher Anstieg der Geschwindigkeit auf 0,96 m/s innerhalb von 0,1 Sekunden gemessen worden, die sich danach zunächst auf 0,84 m/s reduzierte. Nach rund 1,5 Sekunden Versuchsdauer pendelte sich die gemessene Geschwindigkeit bis zum Versuchsende bei 1,0 - 1,2 m/s ein; die mittlere Geschwindigkeit liegt bei rund 1,05 m/s.

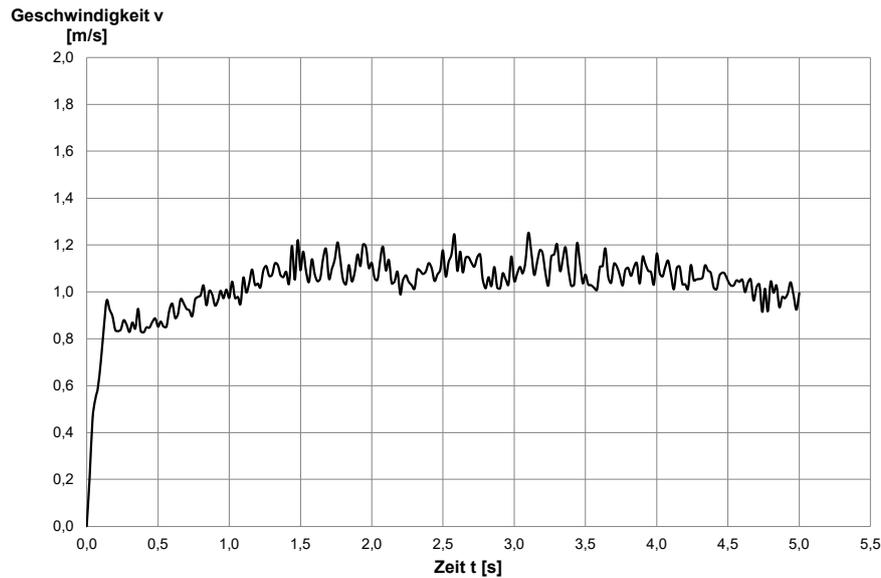


Bild 4.12 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm im Bereich des Auslasses

4.3.6 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5

Die gemessene Geschwindigkeit im Bereich des Auslasses (A1) über die Zeit zeigt für den intermittierend gestuften stark sandigen Kies ein etwas anderes Bild, als bei den zuvor beschriebenen homogenen Kiesen.

Zwar wurde auch bei diesen Versuchen durch die Initialisierung des Versuchs ein schlagartiger Anstieg der Geschwindigkeit gemessen, diese lag im Mittel bei 1,4 m/s, ein konstanter Ausfluss wurde jedoch erst nach rund 2 Sekunden aufgezeichnet.

Die gemessenen Geschwindigkeiten in diesem annähernd konstanten Bereich betragen im Mittel 0,44 m/s bis zum Versuchsende (vgl. Bild 4.13).

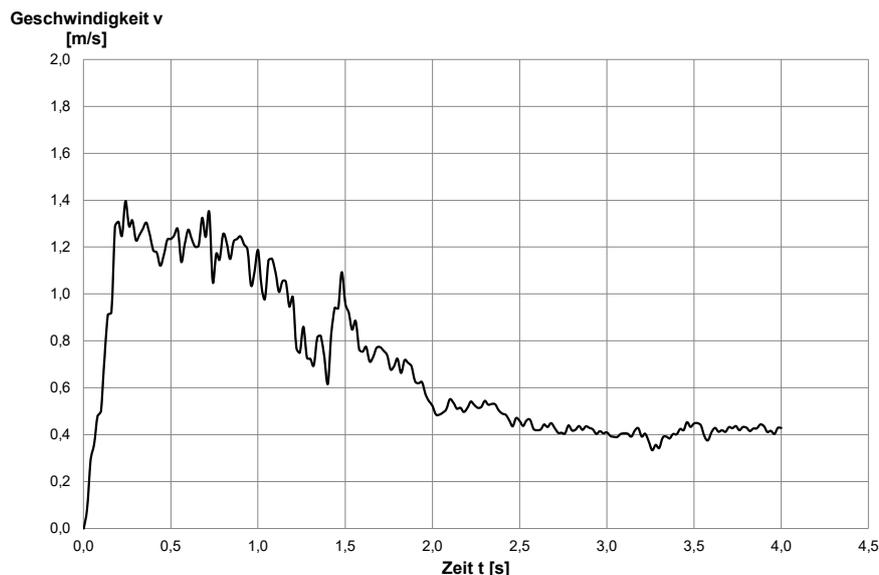


Bild 4.13 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies im Bereich des Auslasses

4.3.7 Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung

Im Diagramm in Bild 4.14 ist die Geschwindigkeit über die Zeit im Bereich A1 für alle Versuchsreihen zur vergleichenden Betrachtung dargestellt. Insbesondere der deutliche Geschwindigkeitsunterschied der gleichförmigen Böden zum intermittierend gestuften stark sandigen Kies wird dabei deutlich. Außerdem kann ein sehr unterschiedliches Verhalten bei der Geschwindigkeitsentwicklung zwischen den drei untersuchten gleichförmigen Kiesen und dem Sand 0,25-2,0 mm festgehalten werden. So wurde bei den Versuchen mit Kies eine kontinuierliche Zunahme der Geschwindigkeit festgestellt; die Kiese sind nach dem Erreichen der maximalen Geschwindigkeit annähernd mit konstanter Geschwindigkeit aus dem Versuchsstand ausgeflossen. Sowohl beim Sand als auch beim stark sandigen Kies stellte sich die Geschwindigkeitsentwicklung davon abweichend dar. Bei den beiden Versuchsreihen mit dem Sand 0,25-2,0 mm (Versuchsreihe 1) und dem stark sandigen Kies (Versuchsreihe 5) wurde zu Versuchsbeginn die maximale Geschwindigkeit gemessen, die im weiteren Versuchsverlauf kontinuierlich abnahm. Bei den Versuchen mit dem stark sandigen Kies stellte sich nach einer Versuchsdauer von zwei Sekunden, wie bei den gleichförmigen Kiesen, eine annähernd konstante Geschwindigkeit ein. Bei den Versuchen mit Sand 0,25-2,0 mm wurde im Gegensatz zu den anderen untersuchten Versuchsmaterialien kein Ausfließen mit annähernd konstanter Geschwindigkeit aus dem Versuchsstand beobachtet.

Hier zeigt sich eine eindeutige Materialabhängigkeit beim Fließvorgang. Es ist eine klare Trennung zwischen den gleichförmigen Kiesen und den sandigen Böden der Versuchsreihen 1 und 5 erkennbar.

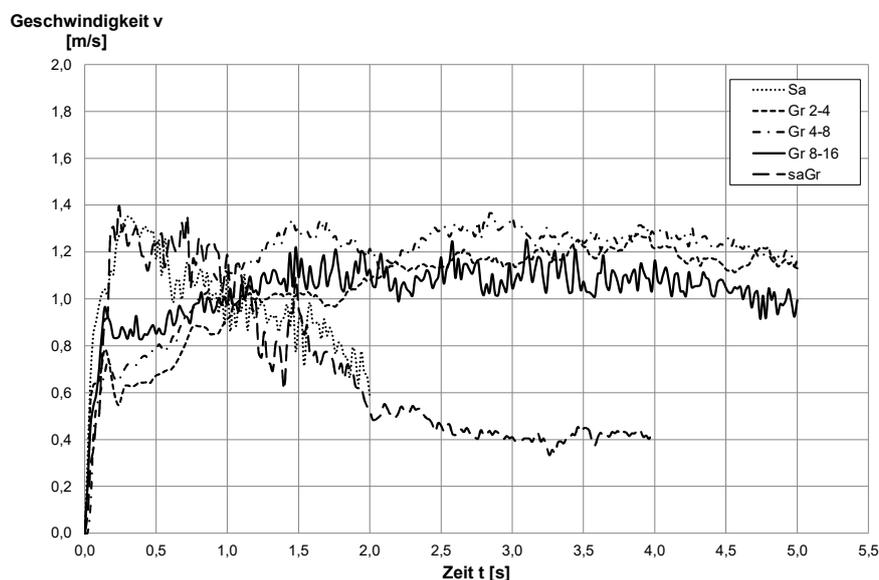


Bild 4.14 Vergleich der Geschwindigkeiten verschiedenen Böden im Auslassbereich

4.4 Vergleich der Geschwindigkeiten im Bereich des Auslasses

4.4.1 Allgemeines

Bei der Auswertung der gemessenen Geschwindigkeiten wurde festgestellt, dass auch innerhalb des Bereiches direkt am Auslass (A1) unterschiedliche Geschwindigkeiten bei den verschiedenen Versuchsmaterialien auftreten (Bild 4.4 bis Bild 4.8). Daher wurden die Geschwindigkeiten innerhalb des Bereiches direkt vor dem Auslass nochmals getrennt betrachtet. Hierbei wurde zum einen die Geschwindigkeit in der Mitte (A1_mitte) und zum anderen im oberen (A1_oben) und unteren Bereich (A1_unten) unabhängig voneinander ausgewertet. Hierfür sind nachfolgend die Ergebnisse aus den Versuchsreihen für die unterschiedlichen Versuchsmaterialien dargestellt.

Bei den Geschwindigkeiten handelt es sich um Mittelwerte für den jeweiligen Analysebereich. Die Auswertung der Geschwindigkeit je Versuchsreihe erfolgte anhand von jeweils drei Versuchen mit vergleichbarem Versuchsablauf ohne merkbare Ausreißer. Die Lage der drei verschiedenen Analysebereiche unmittelbar am Auslass sind Bild 4.3 zu entnehmen.

4.4.2 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1

Im Diagramm in Bild 4.15 sind aus der Versuchsreihe mit dem wassergesättigten Sand 0,25-2,0 mm die mittleren Geschwindigkeiten aus drei Versuchen in den drei Bereichen A1_mitte, A1_oben und A1_unten über die Zeit dargestellt. Die Auswertung der verschiedenen Bereiche am Auslass für den wassergesättigten Sand 0,25-2,0 mm hat ergeben, dass die Geschwindigkeit im unteren Bereich von den drei Analysebereichen am geringsten ist. Die mittlere Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses ist bei dieser Versuchsreihe am größten. Die Geschwindigkeiten im Randbereich des Auslasses liegen bei diesen Versuchen bei 84 % - 86 % von der Geschwindigkeit im Bereich in Auslassmitte (A1_mitte).

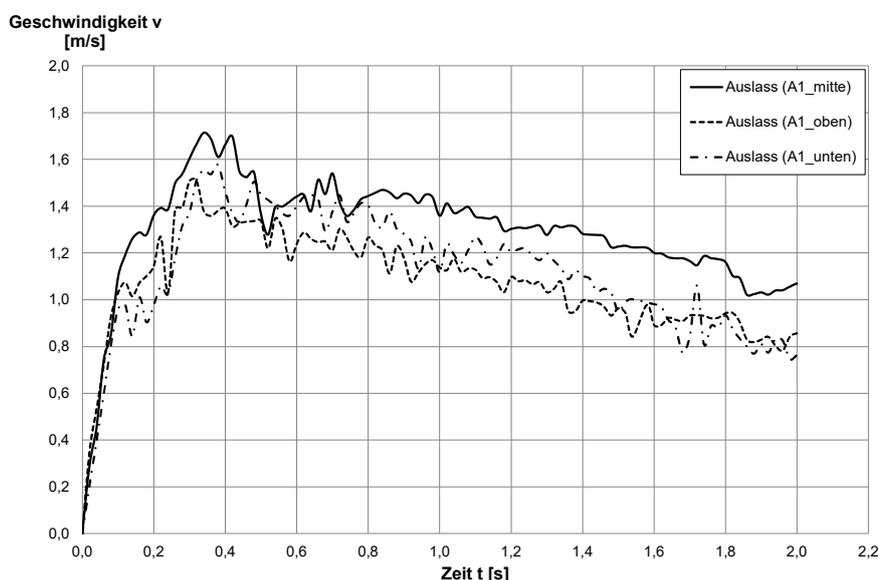


Bild 4.15 Vergleich der Geschwindigkeiten des Sandes 0,25-2,0 mm oben, mittig und unten im Bereich des Auslasses

4.4.3 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2

Bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 2,0-4,0 mm hat die Auswertung der unterschiedlichen Bereiche am Auslass ein anderes Bild ergeben. So wurden bei den Versuchen zwar ebenfalls die geringsten Geschwindigkeiten im unteren Bereich des Auslasses gemessen, die größten Geschwindigkeiten wurden hier allerdings nicht in der Mitte des Auslasses, sondern im oberen Bereich Auslasses festgestellt. Die Geschwindigkeiten im unteren Bereich lagen im Mittel bei lediglich 73 % von der Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses, die Geschwindigkeit im oberen Bereich war im Mittel 18 % größer als im Bereich A1_mitte.

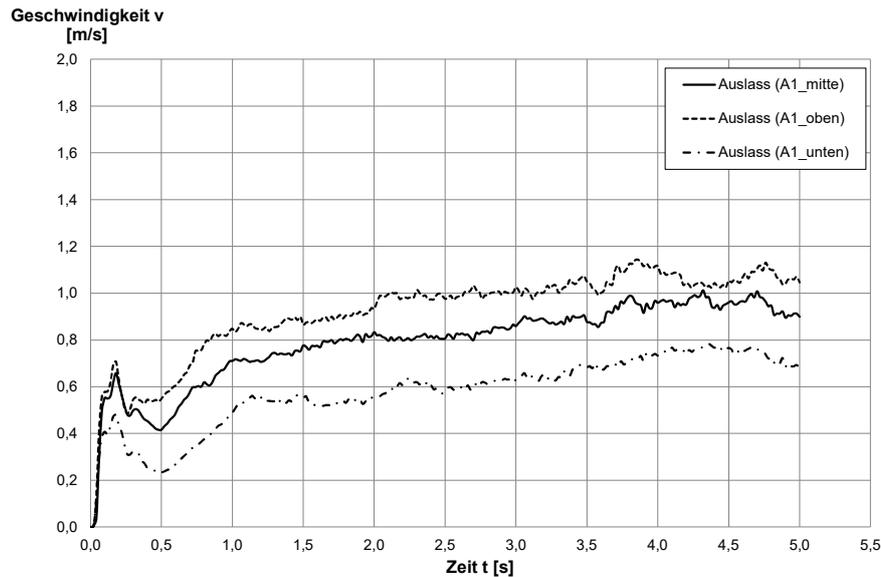


Bild 4.16 Vergleich der Geschwindigkeiten des Kiesel 2,0-4,0 mm oben, mittig und unten im Bereich des Auslasses

4.4.4 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3

Beim Vergleich der gemessenen mittleren Geschwindigkeiten in den drei definierten Bereichen (vgl. Bild 4.3) bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 4,0-8,0 mm hat sich ein noch deutlicherer Unterschied zwischen der Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses (A1_mitte) zum unteren Bereich (A1_unten) gezeigt; hier lag die Geschwindigkeit bei nur rund 46 % im Vergleich zur Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses (siehe Bild 4.17).

Die Geschwindigkeiten im oberen Bereich (A1_oben) waren im Gegensatz zu den gemessenen Geschwindigkeiten bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 2,0-4,0 mm im Mittel nur geringfügig kleiner als in der Mitte des Auslasses. Die Geschwindigkeit im oberen Bereich lag im Mittel bei 98 % der gemessenen Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses.

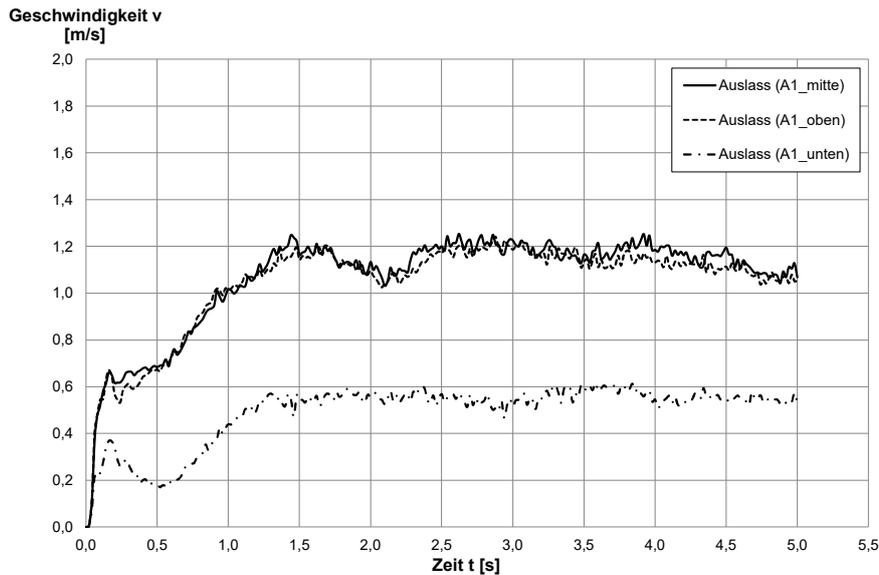


Bild 4.17 Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 4,0-8,0 mm oben, mittig und unten im Bereich des Auslasses

4.4.5 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4

Die Geschwindigkeitsunterschiede Bereiche des Auslasses war bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 8,0-16,0 mm im unteren Bereich – verglichen mit den Versuchen mit Kies 4,0-8,0 mm – deutlich geringer (vgl. Bild 4.18).

Die Geschwindigkeit im unteren Bereich des Auslasses (A1_unten) lag bei lediglich rund 51 % der Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses. Die Geschwindigkeit im Bereich A1_oben war mit durchschnittlich 104 % der Geschwindigkeit im Bereich A1_mitte nur wenig höher und kann somit als annähernd gleich bezeichnet werden.

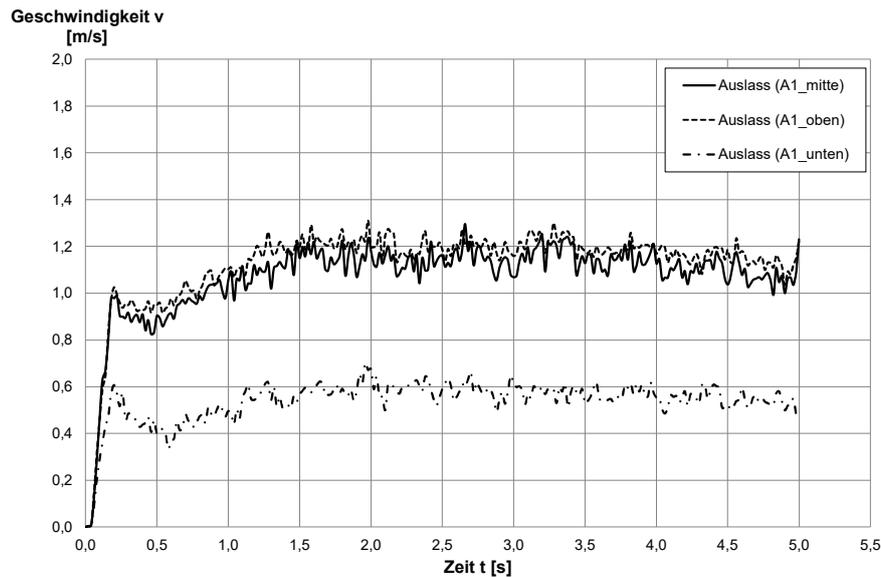


Bild 4.18 Vergleich der Geschwindigkeiten des Kiesel 8,0-16,0 mm oben, mittig und unten im Bereich des Auslasses

4.4.6 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5

Die Versuchsreihe mit den wassergesättigten stark sandigen Kiesen zeigt beim Vergleich der Geschwindigkeiten innerhalb des Bereiches des Auslasses ein ähnliches Bild wie bei den Versuchen mit dem Sand 0,25-2,0 mm.

Die maximalen Geschwindigkeiten wurden bei diesen Versuchen im Bereich A1_mitte des Auslasses gemessen. Im oberen Bereich des Auslasses wurden rund 78 % der Geschwindigkeit im Vergleich zum Bereich A1_mitte und im Bereich A1_unten rd. 68 % der Geschwindigkeit im Vergleich zum Bereich A1_mitte ermittelt.

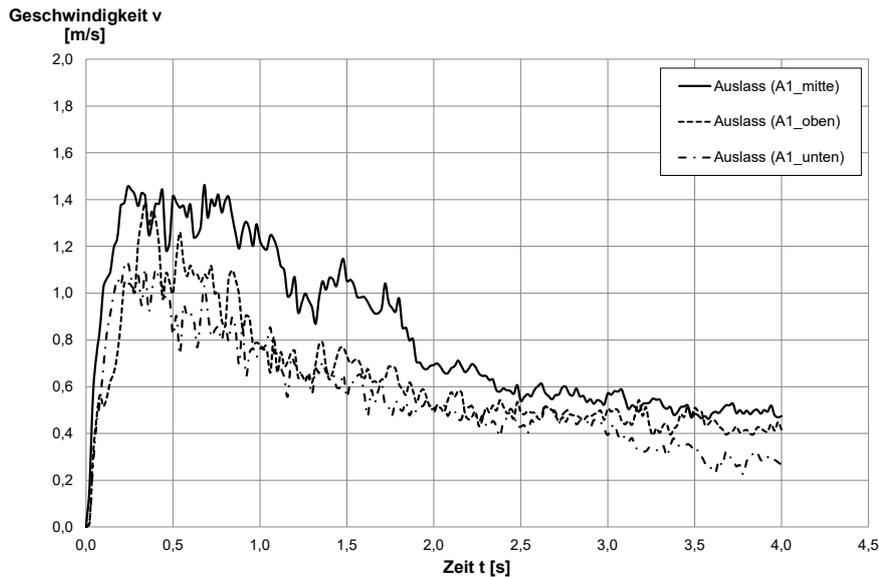


Bild 4.19 Vergleich der Geschwindigkeiten des stark sandigen Kieses oben, mittig und unten im Bereich des Auslasses

4.4.7 Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung

Bei allen fünf Versuchsreihen konnte bei der Geschwindigkeitsentwicklung über die Zeit für die drei Bereiche des Auslasses festgestellt werden, dass die Geschwindigkeiten in der Größenordnung variieren, der Verlauf der Geschwindigkeit aber annähernd parallel zueinander ist. Der Einfluss der Korngröße und Kornverteilung auf das Ausfließen aus dem Versuchsstand wird bereits bei der Betrachtung der unterschiedlichen Bereiche deutlich. Bei den Versuchen mit sandigen Bodenbestandteilen (Versuchsreihe 1 und 5) konnte grundsätzlich ein vergleichbarer Randeffect festgestellt werden; hierbei zeigte sich, dass die Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses ohne Randeinfluss während der gesamten Versuchsdurchführung am größten ist. Die Geschwindigkeit in dem oberen und unteren Bereich des Auslasses besitzt eine ähnliche Größenordnung.

Bei den Versuchen mit den gleichförmigen Kiesen zeigte sich ein anderes Bild. Hier ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Geschwindigkeit im unteren Bereich des Auslasses wesentlich geringer ist als die Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses. Ab einer Korngröße von 4,0 mm liegt die Geschwindigkeit im unteren Bereich des Auslasses lediglich bei rund der Hälfte der Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses. Hier scheint sich der bereits in Bild 4.4 bis Bild 4.8 zu erkennende Ausfließbereich des Bodens widerzuspiegeln. So werden bei der Fließbewegung kleinere und somit leichtere Bodenkörner mit einer größeren Reichweite aus dem Versuchsstand ausgetragen, als dies bei den Kiesen der Fall ist. Auffällig ist, dass beim wassergesättigten Kies 2,0-4,0 mm die größten Geschwindigkeiten im oberen Bereich des Auslasses gemessen wurden; hier ist kein Randeinfluss zu erkennen. Bei den Versuchsmaterialien mit einer größeren

Korngröße als 4,0 mm wurde zwischen dem oberen und mittleren Bereich nur ein marginaler Unterschied der Geschwindigkeit gemessen.

In Tabelle 4.2 ist das Verhältnis der gemessenen Geschwindigkeit im Bereich A1_oben und A1_unten zur Geschwindigkeit im Bereich A1_mitte für die fünf Versuchsreihen tabellarisch dargestellt.

Versuchsreihe	VA1_oben/VA1_mitte [%]	VA1_unten/VA1_mitte [%]
1 - Sand 0,25-2,0 mm	84	86
2 - Kies 2,0-4,0 mm	118	73
3 - Kies 4,0-8,0 mm	98	46
4 - Kies 8,0-16,0 mm	104	51
5 - stark sandiger Kies	78	68

Tabelle 4.2 Verhältnis der Geschwindigkeit in den Bereichen A1_oben und A1_unten zur Geschwindigkeit im Bereich A1_mitte

4.5 Vergleich der Geschwindigkeit neben dem Auslass

4.5.1 Allgemeines

Im nachfolgenden wird ein Vergleich der in den Bereichen A1, A2 und A3 (vgl. Bild 4.2) gemessenen Geschwindigkeit für jede Versuchsreihe vorgenommen.

Für die fünf unterschiedlichen Versuchsmaterialien ist zur Darstellung der unterschiedlichen Geschwindigkeiten jeweils der Mittelwert aus drei Versuchen dargestellt.

4.5.2 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1

Bei den Versuchen mit dem Sand 0,25-2,0 mm wurde festgestellt, dass zu Beginn des Versuches die Bodenkörner sehr schnell innerhalb weniger hundertstel Sekunden die maximale Geschwindigkeit erreichen und danach schnell langsamer werden und nach rd. 0,7 Sekunden weiter mit etwas reduzierter, kontinuierlich abnehmender Geschwindigkeit ausfließen. Zwischen den drei untersuchten Bereichen wurde zu Versuchsbeginn ein Geschwindigkeitsunterschied von 0,7 m/s zwischen dem Boden unmittelbar am Auslass im Vergleich zum Boden im Randbereich der Bewegung festgestellt. Dieser Unterschied hat sich bei den Versuchen mit dem Sand nach rund 0,6 Sekunden ausgeglichen. Im Randbereich A3 wurde festgestellt, dass die Geschwindigkeit des wassergesättigten

Sandes im Vergleich zu den anderen beiden Bereichen, deutlich abnimmt, d.h. der Bereich der aus dem Versuchsstand ausgeflossen ist, hat mit der Zeit mengenmäßig abgenommen. Die mittlere Geschwindigkeit aus den drei Versuchen ist über die Zeit für die drei Bereiche im Diagramm in Bild 4.20 dargestellt.

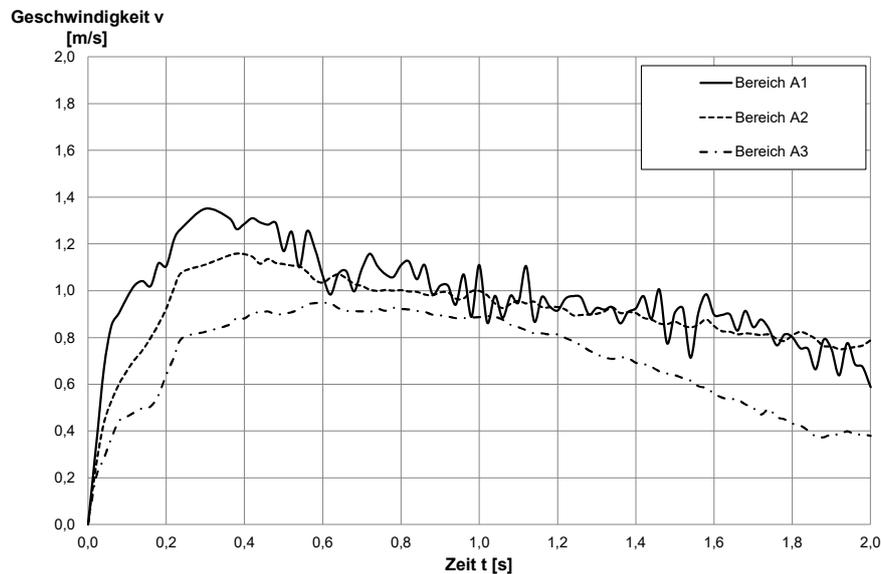


Bild 4.20 Vergleich der Geschwindigkeiten des Sandes 0,25-2,0 mm in den Bereichen A1, A2 und A3 gemäß Bild 4.2

4.5.3 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2

Der wassergesättigte Kies 2,0-4,0 mm zeigt für die drei unterschiedlichen Bereiche eine andere Geschwindigkeitsentwicklung über die Zeit als der Sand 0,25-2,0 mm. So nimmt die Geschwindigkeit, wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben, von 0 m/s auf maximal 0,8 m/s im Bereich A1 mit Öffnung der Klappe schlagartig zu. In den Bereichen A2 und A3 wurde ebenfalls ein plötzlicher Anstieg der Geschwindigkeit gemessen, allerdings lagen die gemessenen Geschwindigkeiten lediglich bei 0,20 m/s - 0,25 m/s (vgl. Bild 4.21). Danach wurde ein direkter Rückgang der Geschwindigkeit in allen drei Bereichen aufgezeichnet. Nach rd. einer halben Sekunde nimmt die Geschwindigkeit im Bereich A1 wieder kontinuierlich auf 1,2 m/s zu. Im Bereich A2 konnte nach rund einer Sekunde eine annähernd konstante Geschwindigkeit von durchschnittlich 0,3 m/s gemessen werden. Im Bereich A1 war die durchschnittliche Geschwindigkeit mit 1,13 m/s rund viermal so groß wie im Bereich A2. Im Bereich A3 ist hingegen bereits nach 0,2 Sekunden keine Fließbewegung mehr festzustellen.

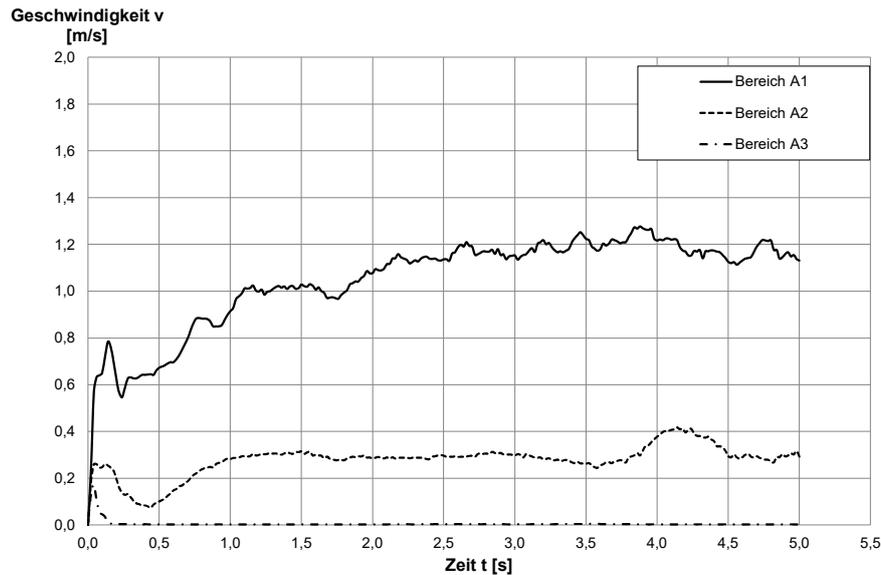


Bild 4.21 Vergleich der Geschwindigkeiten des Kiesel 2,0-4,0 mm in den Bereichen A1, A2 und A3 gemäß Bild 4.2

4.5.4 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3

Wie schon bei den Versuchen mit Kies 2,0-4,0 mm ist bei den Versuchen mit wassergesättigtem Kies 4,0-8,0 mm bei Versuchsbeginn ein rascher Geschwindigkeitsanstieg auf maximal 0,7 m/s im Bereich A1 und 0,2 m/s im Bereich A2 aufgezeichnet worden. Danach nahm die Geschwindigkeit ab, um dann in den Bereichen A1 und A2 wieder kontinuierlich zuzunehmen. Nach rund 1,5 Sekunden floss der wassergesättigte Kies 4,0-8,0 mm in den Bereichen A1 und A2 mit einer annähernd konstanten Geschwindigkeit aus. Im Bereich A1 liegt diese Geschwindigkeit bei durchschnittlich 1,25 m/s und im Bereich A2 mit 0,33 m/s bei nur 26 % der Geschwindigkeit im Bereich A1. Im Bereich A3 wurde lediglich innerhalb der ersten 0,2 Sekunden eine Bewegung aufgezeichnet; die Geschwindigkeit war dort im Vergleich zu den anderen beiden Bereichen minimal.

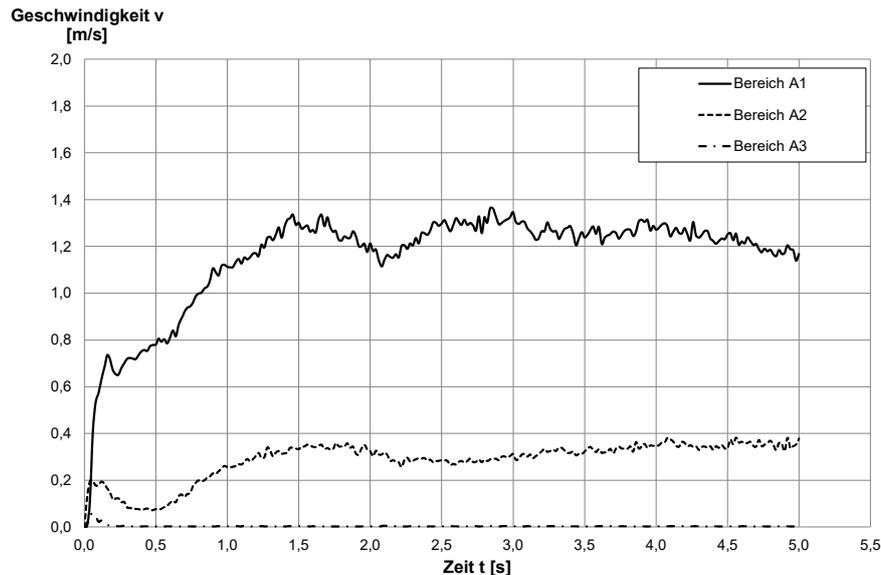


Bild 4.22 Vergleich der Geschwindigkeiten des Kiesel 4,0-8,0 mm in den Bereichen A1, A2 und A3 gemäß Bild 4.2

4.5.5 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4

Der wassergesättigte Kies 8,0-16,0 mm zeigte einen anderen Geschwindigkeitsverlauf im Vergleich zu den wassergesättigten Kiesel 2,0-4,0 mm und 4,0-8,0 mm. Zwar konnte ebenfalls ein sprunghafter Anstieg der Geschwindigkeit nach Versuchsstart auf 0,96 m/s im Bereich A1 und auf 0,1 m/s - 0,25 m/s in den Bereich A2 und A3 und danach eine kurzzeitige Abnahme der Geschwindigkeit aufgezeichnet werden, aber danach erfolgte lediglich ein Anstieg auf eine nur etwas höhere Geschwindigkeit von durchschnittlich 1,08 m/s im Bereich A1 und auf 0,31 m/s im Bereich A2. Hierbei wird deutlich, dass die Geschwindigkeit im konstanten Bereich letztendlich in einer vergleichbaren Größenordnung liegt wie bei den beiden anderen Kiesel. Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen den beiden Bereichen A1 und A2 lag somit während des Ausfließens konstant bei durchschnittlich 0,75 m/s. Im Bereich A3 wurde auch beim Kies 8,0-16,0 mm lediglich in den ersten 0,2 Sekunden eine Fließbewegung gemessen.

Die mittleren Geschwindigkeiten für die drei Bereich A1, A2 und A3 über die Zeit können dem Diagramm in Bild 4.23 entnommen werden.

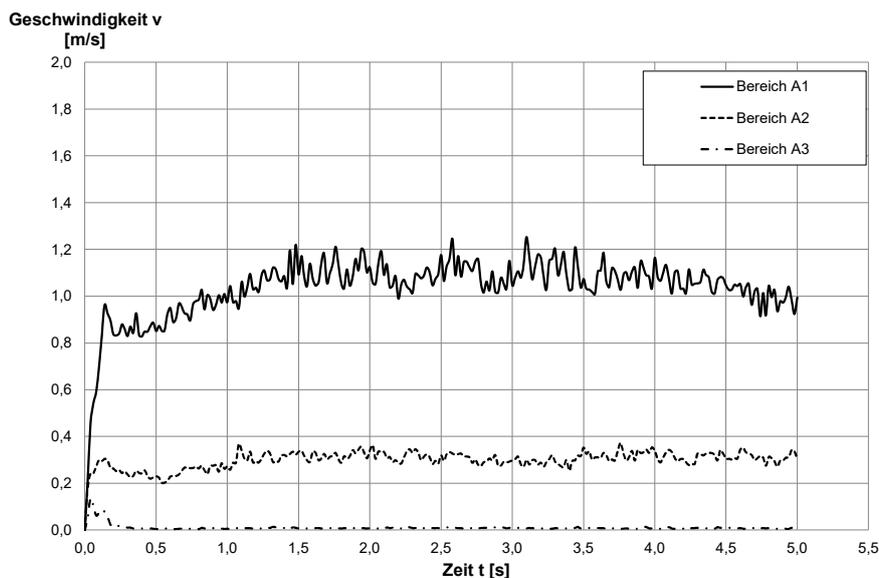


Bild 4.23 Vergleich der Geschwindigkeiten des Kiesel 8,0-16,0 mm in den Bereichen A1, A2 und A3 gemäß Bild 4.2

4.5.6 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5

Das Fließverhalten des stark sandigen Kiesel stellt sich mit dem des Sandes zunächst vergleichbar dar. Auch hier wurde zunächst ein Anstieg der Geschwindigkeit auf den jeweiligen Maximalwert in allen drei Bereichen festgestellt, anschließend verlangsamte sich die Geschwindigkeit wieder und kann nach rd. zwei Sekunden im Bereich A1 und A2 als konstant beschrieben werden. Im Bereich A3 konnte nach 2,0 Sekunden keine Fließbewegung festgestellt werden.

Die Geschwindigkeit über die Zeit für die drei Bereiche bei den Versuchen mit dem wassergesättigten stark sandigen Kiesel können dem Diagramm in Bild 4.24 entnommen werden.

Die durchschnittliche Geschwindigkeit nach zwei Sekunden liegt mit 0,29 m/s um rund 0,15 m/s niedriger als die durchschnittliche Geschwindigkeit im Bereich A1 von 0,44 m/s.

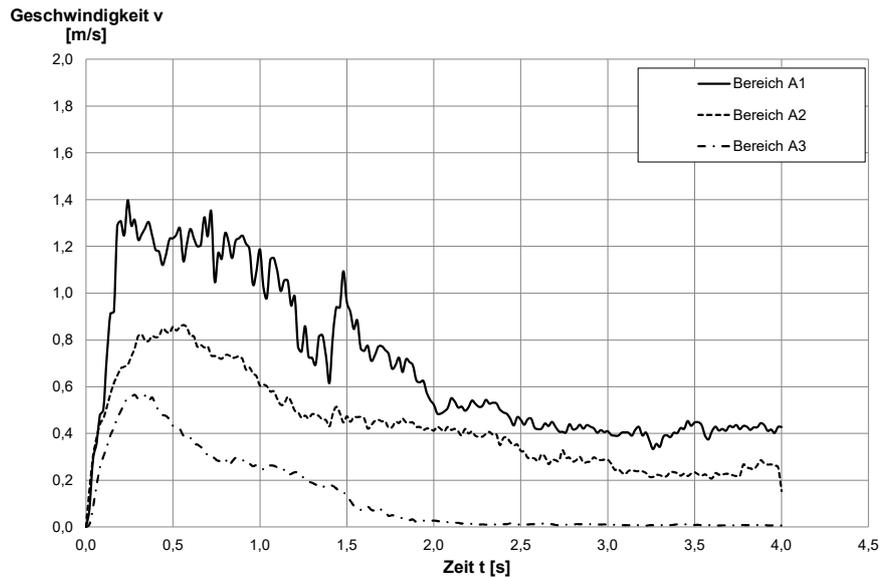


Bild 4.24 Vergleich der Geschwindigkeiten des stark sandigen Kieses in den Bereichen A1, A2 und A3 gemäß Bild 4.2

4.5.7 Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung

Bei der Auswertung der Geschwindigkeitsentwicklung der Versuchsreihen in den verschiedenen Bereichen in Höhe des Auslasses kann die bereits in Kapitel 4.2 beschriebene Reichweite der Fließbewegung nochmals genauer untersucht werden. Hier zeigt sich erneut, dass das Fließverhalten stark von dem untersuchten Bodenmaterial abhängt. So ist bei den Kiesen in dem Randbereich A3 keine Bewegung, abgesehen von der minimalen Bewegung innerhalb der ersten 0,2 Sekunden, festzustellen, wohingegen für den Sand und den stark sandigen Kies Bewegungen ausgemacht werden konnten. Die Geschwindigkeit nahm bei allen fünf Versuchsreihen mit zunehmender Entfernung vom Auslass ab, wobei ein annähernd paralleler Geschwindigkeitsverlauf in den verschiedenen Bereichen festgehalten werden kann.

In Tabelle 4.3 sind die mittleren gemessenen, annähernd konstanten Geschwindigkeiten und das Verhältnis der gemessenen Geschwindigkeit im Bereich A2 (v_{A2}) und Bereich A3 (v_{A3}) zur Geschwindigkeit im Bereich A1 (v_{A1}) am Auslass noch einmal tabellarisch dargestellt.

Wie bereits in den Darstellungen der Auswertungen der Geschwindigkeit der 5 Versuchsreihen in Bild 4.4 bis Bild 4.8 zu erkennen ist, unterscheiden sich die Bereiche, in denen eine Fließbewegung stattfindet, deutlich. Auch hier findet eine erneute Trennung bei der Beschreibung der Fließbewegung zwischen den Kiesen und dem Sand statt. Bei dem stark sandigen Kies der Versuchsreihe 5 wurden aufgrund der unterschiedlichen Kornzusammensetzung verschiedene Reichweiten der Bewegung beobachtet; so war zu

Versuchsbeginn auch im Bereich A3 noch eine Bewegung feststellbar, die jedoch im Versuchsverlauf zum Erliegen kam.

Versuchsreihe	v_{A1} [m/s]	v_{A2} [m/s]	v_{A2}/v_{A1} [%]	v_{A3} [m/s]	v_{A3}/v_{A1} [%]
1 - Sand 0,25-2,0 mm	0,96	0,93	97	0,73	76
2 - Kies 2,0-4,0 mm	1,13	0,30	27	*	*
3 - Kies 4,0-8,0 mm	1,25	0,33	26	*	*
4 - Kies 8,0-16,0 mm	1,05	0,30	29	*	*
5 - stark sandiger Kies	0,44	0,29	66	*	*

*keine Fließbewegung feststellbar

Tabelle 4.3 Verhältnis der Geschwindigkeit in den Bereichen A2 und A3 zur Geschwindigkeit im Bereich A1

4.6 Vergleich der Geschwindigkeiten im Bereich des Auslasses und oberhalb des Auslasses

4.6.1 Allgemeines

In einer weiteren Analyse wurde die Geschwindigkeit im Bereich des Auslasses (A1) und in zwei Bereichen (A4, A7) oberhalb des Auslasses direkt an der Wand des Versuchsstandes miteinander verglichen (vgl. Bild 4.2).

Für die fünf unterschiedlichen Böden ist zur Darstellung und dem Vergleich der Geschwindigkeiten die mittlere Geschwindigkeit von je drei Versuchen für jede Versuchsreihe bestimmt worden.

4.6.2 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1

Beim Vergleich der Geschwindigkeiten der Bereich A1, A4 und A7 der Versuchsreihe mit dem wassergesättigten Sand 0,25-2,0 mm zeigt sich deutlich, dass die Geschwindigkeit im Bereich des Auslasses (A1) höher liegt als in den Bereichen A4 und A7 oberhalb des Auslasses. Die Geschwindigkeit im Bereich A4 liegt bei lediglich 68 % und im Bereich A7 bei 57 % der Geschwindigkeit im Bereich A1. Wie dem Diagramm in Bild 4.25, in dem die Geschwindigkeit über die Zeit für die drei Bereiche dargestellt ist, zu entnehmen ist, zeigen alle drei Bereiche einen vergleichbaren Geschwindigkeitsverlauf.

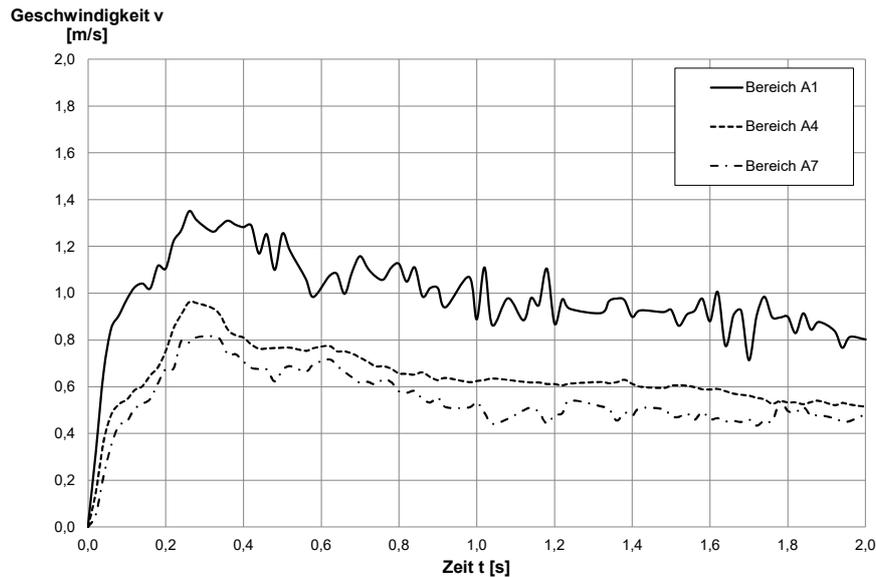


Bild 4.25 Vergleich der Geschwindigkeiten des Sandes in den Bereichen A1, A4 und A7 gemäß Bild 4.2

4.6.3 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2

Bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 2,0-4,0 mm konnte ebenfalls eine deutliche Geschwindigkeitsdifferenz von dem Bereich am Auslass zu den beiden Bereichen A4 und A7 oberhalb des Auslasses festgestellt werden (vgl. Bild 4.26). Die gemessene Geschwindigkeit liegt im Bereich A4 sogar nur bei 48 % und bei 39 % im Bereich A7, jeweils in Bezug auf die Geschwindigkeit im Bereich A1.

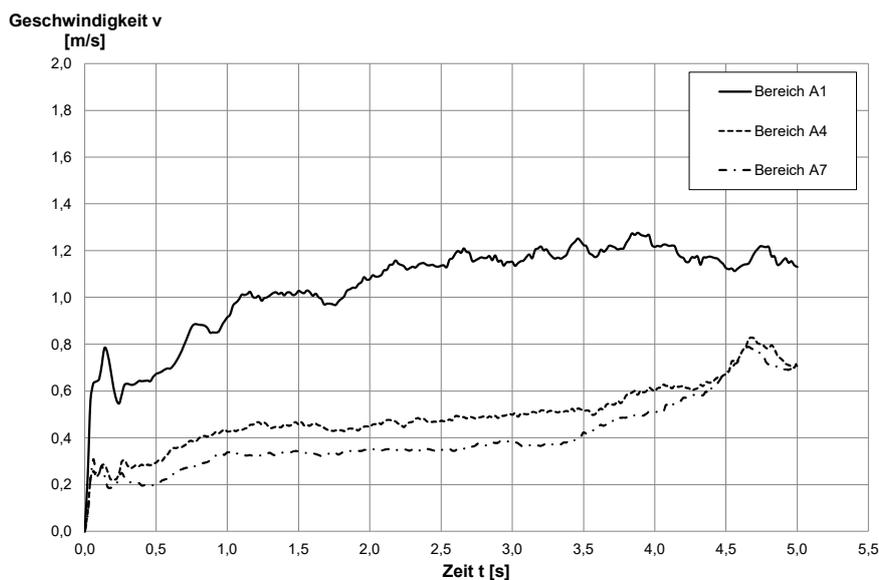


Bild 4.26 Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 2,0-4,0 mm in den Bereichen A1, A4 und A7 gemäß Bild 4.2

4.6.4 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3

Bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 4,0-8,0 mm stellte sich in den Bereichen A4 und A7 oberhalb des Auslasses im Vergleich zur Geschwindigkeit im Bereich A1 ein paralleler Verlauf mit stark reduzierter Geschwindigkeit ein. Im Bereich mit annähernd konstanter Geschwindigkeit (1,5 - 5,0 Sekunden) lag die Geschwindigkeit im Bereich A4 bei 46 % und im Bereich A7 bei nur 34 % von der Geschwindigkeit im Bereich A1.

Die mittlere Geschwindigkeit über die Zeit für die drei Bereiche aus der Versuchsreihe mit dem wassergesättigten Kies 4,0-8,0 mm ist in Bild 4.27 dargestellt.

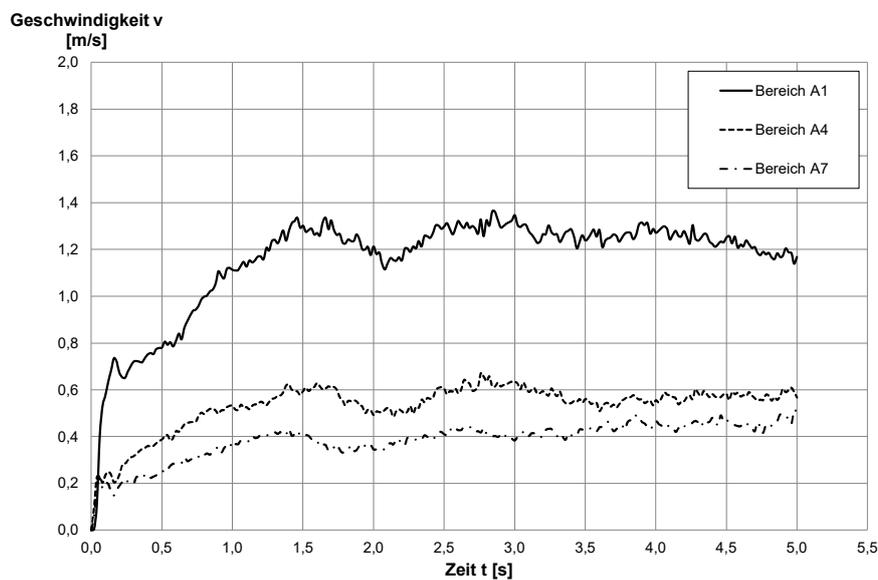


Bild 4.27 Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 4,0-8,0 mm in den Bereichen A1, A4 und A7 gemäß Bild 4.2

4.6.5 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4

Bei der Versuchsreihe mit dem wassergesättigten Kies 8,0-16,0 mm wurde ebenfalls eine deutlich geringere Geschwindigkeit oberhalb des Auslasses im Vergleich zum Bereich A1 gemessen. So betrug die Geschwindigkeit im Bereich A4 durchschnittlich 60 % und im Bereich A7 durchschnittlich 44 % der Geschwindigkeit im Bereich am Auslass (A1).

Das Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm für die Versuchsreihe der wassergesättigten Kiese 8,0-16,0 mm ist in Bild 4.28 dargestellt.

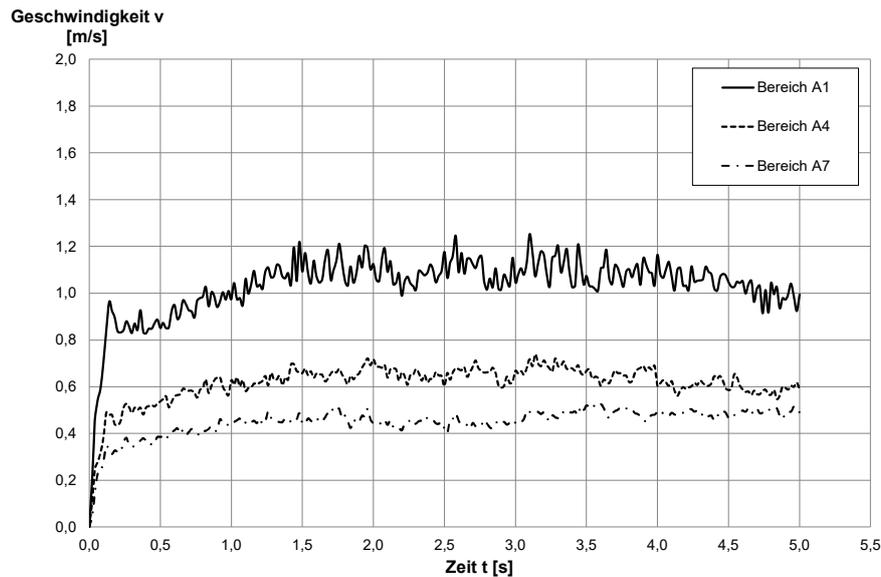


Bild 4.28 Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 8,0-16,0 mm in den Bereichen A1, A4 und A7 gemäß Bild 4.2

4.6.6 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5

Bei den Versuchen mit dem wassergesättigten stark sandigen Kies ist, anders als bei den vorgenannten Versuchen, nur ein minimaler Geschwindigkeitsunterschied zwischen den beiden Bereichen A4 und A7 oberhalb des Auslasses feststellbar. Jedoch liegen die Geschwindigkeiten in den beiden Bereichen A4 und A7 deutlich unterhalb der Geschwindigkeit im Bereich des Auslasses (A1). Im Bereich mit annähernd konstanter Geschwindigkeit betrug die Geschwindigkeit im Bereich A4 64 % und im Bereich A7 66 % der Geschwindigkeit im Bereich A1.

Die Geschwindigkeitsentwicklung über die Zeit für den stark sandigen Kies in den drei Bereichen ist in Bild 4.29 dargestellt.

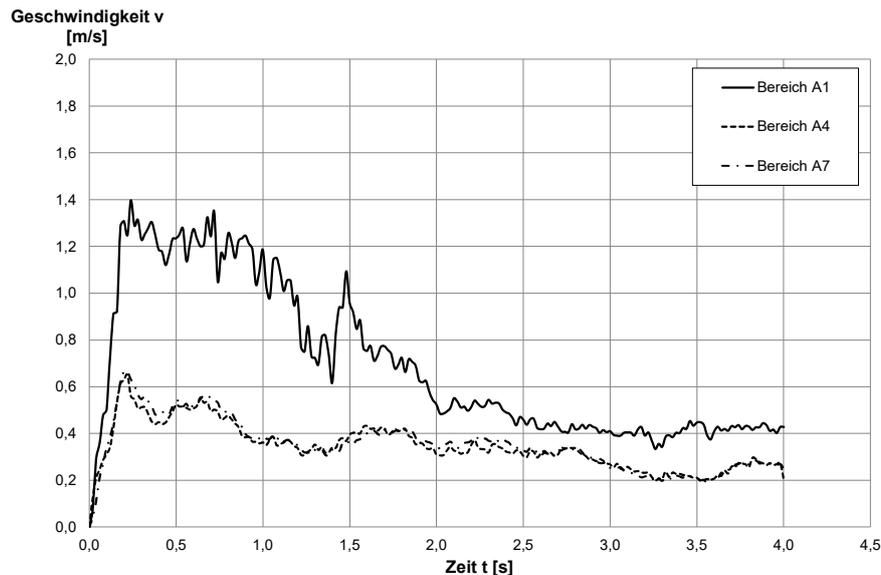


Bild 4.29 Vergleich der Geschwindigkeiten des stark sandigen Kieses in den Bereichen A1, A4 und A7 gemäß Bild 4.2

4.6.7 Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung

Bei der Analyse der drei verschiedenen Bereiche entlang der Wand des Versuchsstandes zeigt sich, dass die Geschwindigkeit im Bereich des Auslasses (A1) bei allen fünf Versuchsreihen maximal ist. Die Geschwindigkeiten oberhalb des Auslasses (A4, A7) liegen lediglich bei 34 % bis 68 % im Vergleich zur Geschwindigkeit im Auslass (A1). Bei den Versuchsreihen mit dem Sand und den gleichförmigen Kiesen konnte auch ein Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten oberhalb des Auslasses gemessen werden. Bei den Versuchen mit dem stark sandigen Kies konnte kein wesentlicher Geschwindigkeitsunterschied zwischen den beiden Bereichen festgestellt werden.

Das Verhältnis der gemessenen Geschwindigkeit im Bereich A4 (v_{A4}) und Bereich A7 (v_{A7}) zur Geschwindigkeit im Bereich A1 (v_{A1}) am Auslass und die mittleren Geschwindigkeiten im Bereich mit annähernd konstanter Geschwindigkeit sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Hier zeigte sich für alle Materialien weitestgehend das gleiche Fließverhalten, bei dem die maximalen Geschwindigkeiten im Bereich des Auslasses auftraten. Eine deutliche Trennung zwischen den gleichförmigen Kiesen und den sandigen Böden der Versuchsreihen 1 und 5 kann bei der Fließbewegung entlang der Wand nicht festgestellt werden, der Einfluss der Wandreibung ist bei allen verwendeten Böden deutlich erkennbar.

Versuchsreihe	v_{A1} [m/s]	v_{A4} [m/s]	v_{A4}/v_{A1} [%]	v_{A7} [m/s]	v_{A7}/v_{A1} [%]
1 - Sand 0,25-2,0 mm	0,96	0,65	68	0,55	57
2 - Kies 2,0-4,0 mm	1,13	0,54	48	0,44	39
3 - Kies 4,0-8,0 mm	1,25	0,57	46	0,42	34
4 - Kies 8,0-16,0 mm	1,05	0,63	60	0,46	44
5 - stark sandiger Kies	0,44	0,28	64	0,29	66

Tabelle 4.4 Verhältnis der Geschwindigkeit in den Bereichen A4 und A7 zur Geschwindigkeit im Bereich A1

4.7 Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Spannungsänderung

4.7.1 Allgemeines

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung im Bereich des Auslasses A1 (vgl. Bild 4.2) für die fünf verschiedenen Versuchsreihen in Abhängigkeit von der vorhandenen Spannung über die Zeit dargestellt. Die Spannungsänderung wurde dabei mit Hilfe der in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Aufzeichnung der Kraftänderung mittels Kraftmessdosen während der Versuchsdurchführung ermittelt. Hierzu wurde die Summe der aufgezeichneten Kräfte auf die vorhandene Grundfläche bezogen. Die nachfolgend widergegebene Spannung und Geschwindigkeit im Bereich A1 sind, wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln 4.2 bis 4.6, die Mittelwerte aus drei Versuchen je Versuchsmaterial.

4.7.2 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1

In Bild 4.30 sind die Spannungsänderung und die Geschwindigkeit im Bereich A1 für die Versuchsreihe mit wassergesättigtem Sand 0,25-2,0 mm dargestellt. Bei der Aufzeichnung der Spannungsänderung ist eine Reduktion der Spannung unmittelbar nach dem Öffnen der Klappe aufgrund des auftretenden Rückstoßes deutlich zu erkennen. Nachdem die ermittelte Spannung wieder auf das Ursprungsniveau nach rd. 0,25 Sekunden zurückgekehrt war, konnte eine kontinuierliche Abnahme der Spannung aufgezeichnet werden. Infolge der Spannungsabnahme, die durch das Ausfließen des wassergesättigten Sandes begründet ist, konnte während der Versuche eine Abnahme der Geschwindigkeit nach rund 0,3 Sekunden Versuchsdauer festgestellt werden. Während die Spannung auf 52 % des maximalen Werte abnahm, reduzierte sich die Geschwindigkeit um 56 %, bezogen auf den maximalen Wert von 1,35 m/s.

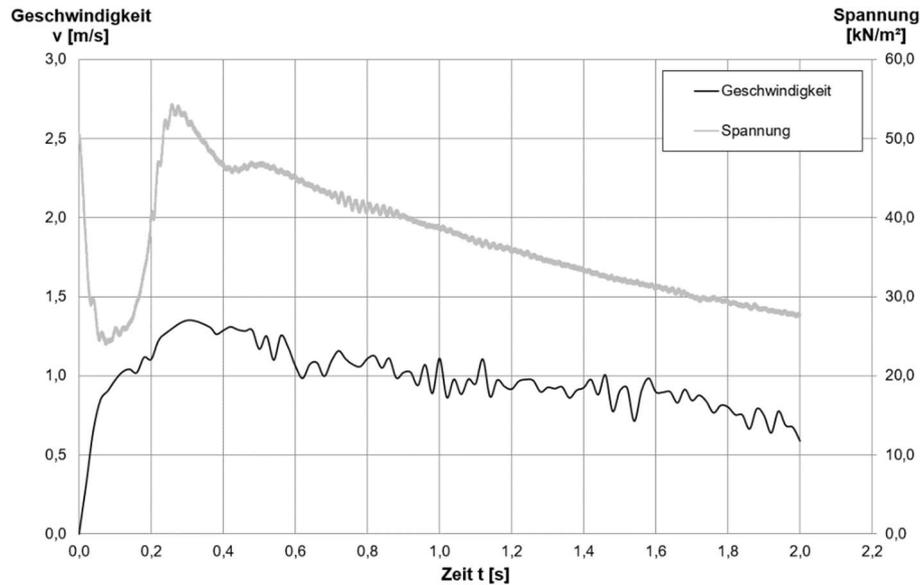


Bild 4.30 Geschwindigkeit des Sandes direkt am Auslass (A1) und Spannungsänderung über die Zeit

4.7.3 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2

Bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 2,0-4,0 mm zeigte sich, im Gegensatz zu der Versuchsreihe mit wassergesättigtem Sand 0,25-2,0 mm, keine Abhängigkeit der Geschwindigkeit infolge der Spannungsänderung während des Versuchsverlaufs.

Dem Diagramm in Bild 4.31 kann die Abnahme der Spannung sowie die Geschwindigkeitsentwicklung im Bereich A1 über die Zeit entnommen werden. Auch hier konnte eine Reduktion der Spannung unmittelbar nach dem Öffnen der Klappe aufgrund des auftretenden Rückstoßes aufgezeichnet werden.

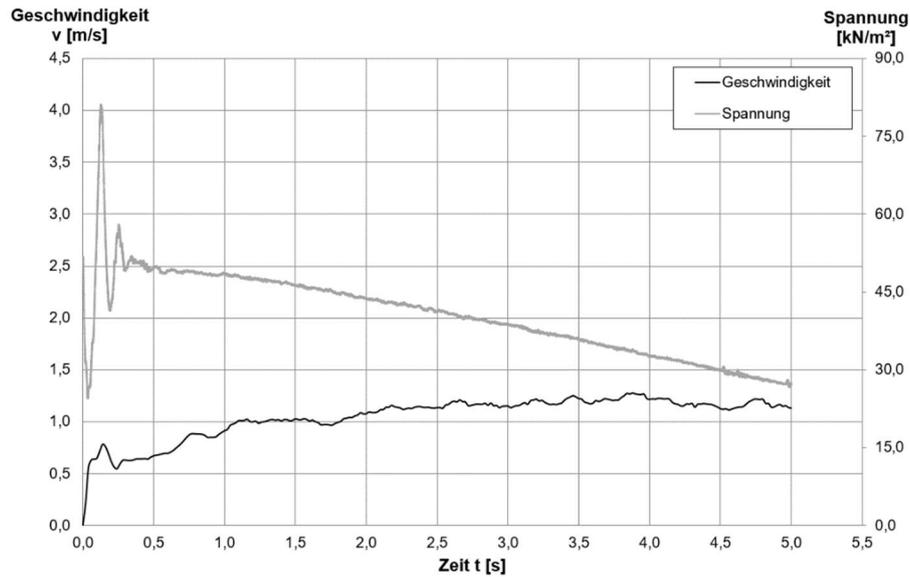


Bild 4.31 Geschwindigkeit des Kiesel 2,0-4,0 mm direkt am Auslass (A1) und Spannungsänderung über die Zeit

4.7.4 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3

Das gleiche Verhalten wie in Versuchsreihe 2 zeigt sich auch bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 4,0-8,0 mm. Eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit durch die vorhandene Spannungsabnahme konnte aufgrund des Ausfließens mit einer annähernd konstanten Geschwindigkeit nicht ermittelt werden. Dies geht auch aus dem in Bild 4.32 dargestellten Diagramm mit der aufgetragenen Spannungsänderung und der Geschwindigkeit im Bereich A1 über die Zeit hervor.

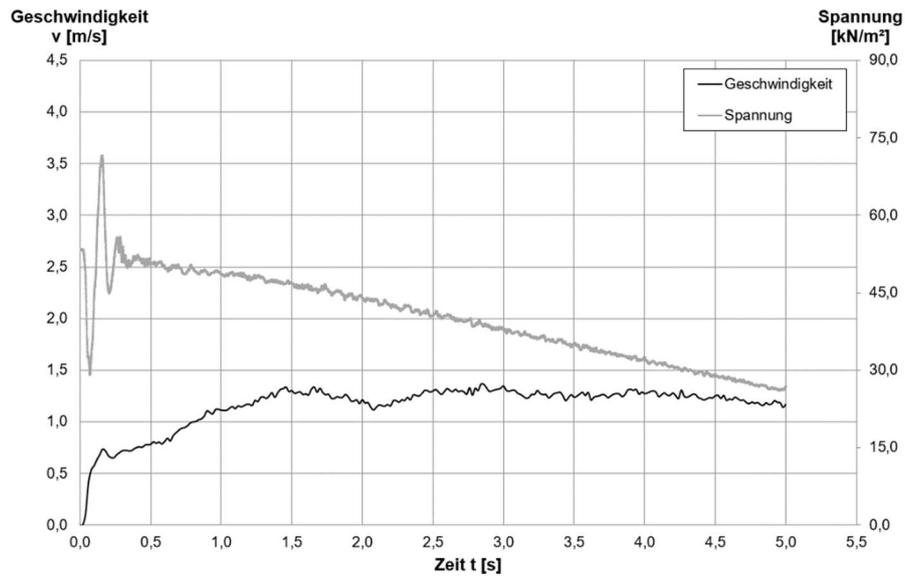


Bild 4.32 Geschwindigkeit des Kiesel 4,0-8,0 mm direkt am Auslass (A1) und Spannungsänderung über die Zeit

4.7.5 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4

Auch bei der Versuchsreihe 4 mit dem wassergesättigten Kies 8,0-16,0 mm wurde eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit durch die vorhandene Spannungsänderung nicht ermittelt. Wie bei den anderen beiden gleichförmigen Kiesen war die Geschwindigkeit während des gesamten Versuchsverlaufs annähernd konstant. Somit fand keine Abnahme der Geschwindigkeit mit Abnahme der vorhandenen Spannungen statt.

Im Diagramm in Bild 4.33 ist die Geschwindigkeitsentwicklung im Bereich A1 und die Spannungsänderung über die Zeit grafisch dargestellt.

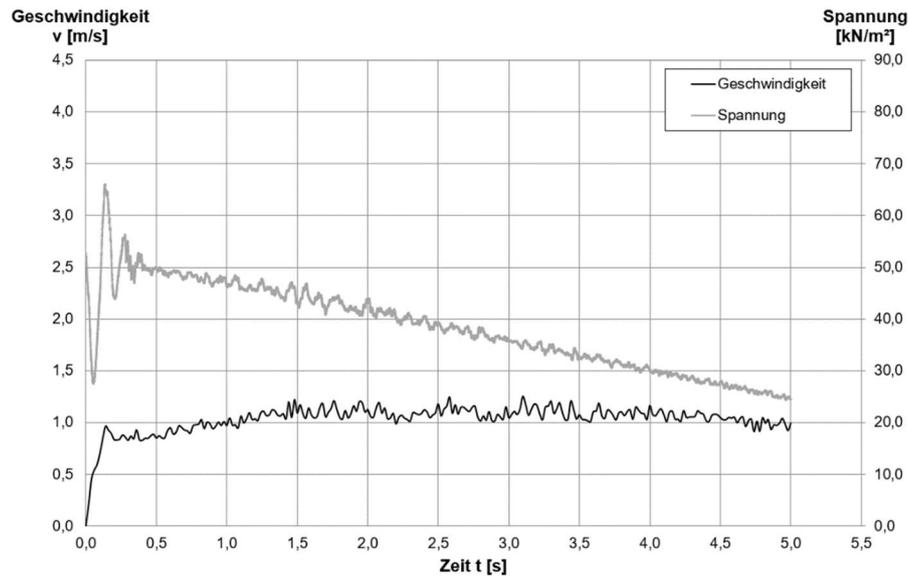


Bild 4.33 Geschwindigkeit des Kieses 8,0-16,0 mm direkt am Auslass (A1) und Spannungsänderung über die Zeit

4.7.6 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5

Einen Zusammenhang zwischen der vorhandenen Spannungsänderung infolge des Ausfließens des Versuchsmaterials aus dem Versuchstand und der Geschwindigkeit beim Ausfließen konnte, wie auch bei den Versuchen mit Sand 0,25-2,0 mm, beim wassergesättigten stark sandigen Kies ebenfalls ausgemacht werden.

Die Spannung hat im betrachteten Versuchszeitraum auf rund 50 % der maximalen Spannung und die Geschwindigkeit des wassergesättigten stark sandigen Kieses auf 31 % der maximalen Geschwindigkeit abgenommen. Hier ist jedoch, im Gegensatz zu den Versuchsreihen mit den gleichförmigen Kiesen wie auch in der Versuchsreihe 1 eine Abnahme der Geschwindigkeit über die Zeit aufgetreten (vgl. Bild 4.34).

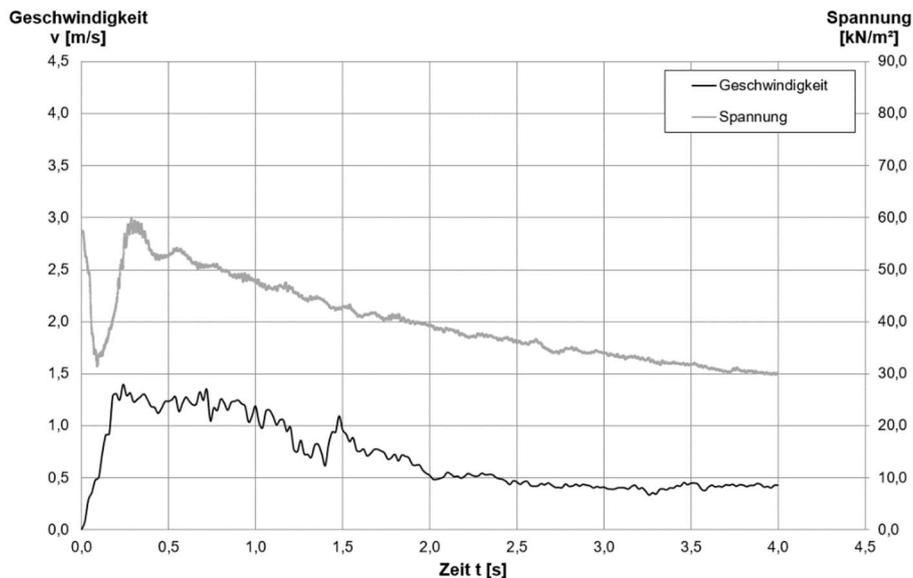


Bild 4.34 Geschwindigkeit des stark sandigen Kiesel direkt am Auslass (A1) und Spannungsänderung über die Zeit

4.7.7 Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung

Betrachtet man das Verhalten der Versuchsreihen mit den fünf verschiedenen Versuchsmaterialien in Abhängigkeit von der Spannungsänderung, wird deutlich, dass die Kornzusammensetzung und die Korngröße einen entscheidenden Einfluss auf das Fließverhalten besitzen.

So wurde bei den Versuchsreihen 1 und 5 mit Sand 0,25-2,0 mm und mit stark sandigem Kies ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Spannungsänderung deutlich. Bei den gleichförmigen Kiesen (Versuchsreihe 2 bis 4) spielt die vorhandene Spannungsänderung hingegen nur eine untergeordnete Rolle. Dieses spannungsunabhängige Verhalten der wassergesättigten Kiese war nicht zu erwarten. Es liegt ein deutlicher Unterschied zur Geschwindigkeitsentwicklung von Wasser und den wassergesättigten sandigen Böden vor, bei denen eine Abnahme der Geschwindigkeit mit abnehmender Spannung auftreten.

4.8 Geschwindigkeit im Vergleich zum Wasser

4.8.1 Allgemeines

Zum Vergleich der Geschwindigkeit der unterschiedlichen wassergesättigten, grobkörnigen Böden zur Geschwindigkeit von Wasser wird an dieser Stelle nochmal kurz auf die bereits in Kapitel 2.2 beschriebenen Untersuchungen von Torricelli eingegangen. Die von Torricelli angegebene Geschwindigkeit von $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ wurde seit der Aufstellung im Jahr 1644 immer wieder überprüft, weiterentwickelt und neu beschrieben (Gross et al. (2009), Hutter (2003), Herwig (2006), Siekmann & Thamnsen (2009), Sigloch (2017), Spurk (2010), Truckenbrodt (2008a)). Daraus hat sich ergeben, dass die Geschwindigkeit bei den Versuchen in Abhängigkeit des Versuchsaufbaus um den Faktor μ , die so genannte Ausflusszahl, zu reduzieren ist (vgl. Kapitel 2.2). Somit ergibt sich die reale Geschwindigkeit von Wasser zu:

$$v = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

Auf Basis eigener durchgeführter Experimente mit Wasser wurde die Ausflusszahl μ für den neu entwickelten Versuchsstand ebenfalls ermittelt. Hierzu wurden 3 Versuche mit reinem Wasser verwendet, anhand derer die Ausflusszahl μ bestimmt wurde. In dem in Bild 4.35 dargestellten Diagramm ist die theoretische Geschwindigkeit von Wasser gemäß der Ausflussformel nach Torricelli, die Versuchsergebnisse der 3 Versuche mit Wasser und die reale Geschwindigkeit gemäß Gleichung Gl. 4.1 dargestellt. Anhand der Versuchsergebnisse konnte die Ausflusszahl zu

$$\mu = 0,7$$

bestimmt werden.

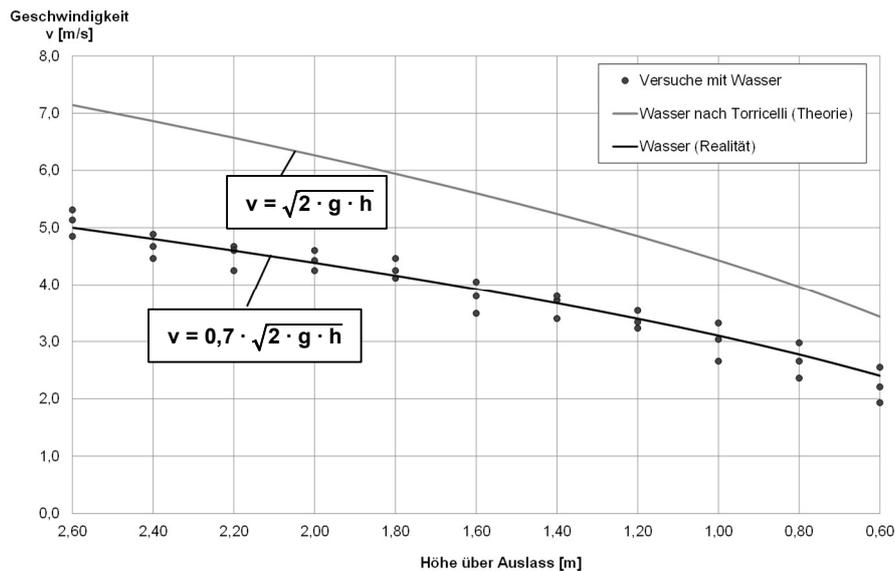


Bild 4.35 Bestimmung der Ausflusszahl μ anhand experimenteller Untersuchungen für den Großversuchsstand

In den nachfolgenden Vergleichen der Geschwindigkeiten der Versuchsreihen mit den wassergesättigten, grobkörnigen Böden mit der Geschwindigkeit von Wasser wurde mit der reduzierten Geschwindigkeit nach Torricelli mit

$$v = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

gerechnet, wobei die experimentell ermittelte Ausflusszahl $\mu = 0,7$ angesetzt wurde.

Für die Geschwindigkeit des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens werden die Geschwindigkeiten im Bereich A1, also der Mittelwert über die gesamte Auslassfläche, herangezogen.

Für den Vergleich der gemessenen Geschwindigkeiten der wassergesättigten Böden mit der Geschwindigkeit von Wasser nach der Formel von Torricelli ist es notwendig, die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe über dem Auslass aufzutragen. Hierzu wurde für jeden Versuch die Zeit nach Versuchsbeginn für das Absinken von 10 cm des wassergesättigten Bodens anhand der Videoaufzeichnungen (vgl. Kapitel 3.4.2) für jeden Versuch bestimmt. Danach wurde die gemessene Geschwindigkeit zu den jeweiligen Zeitpunkten im Auslass (A1) ermittelt und aus den drei Versuchen je Versuchsreihe der Mittelwert gebildet.

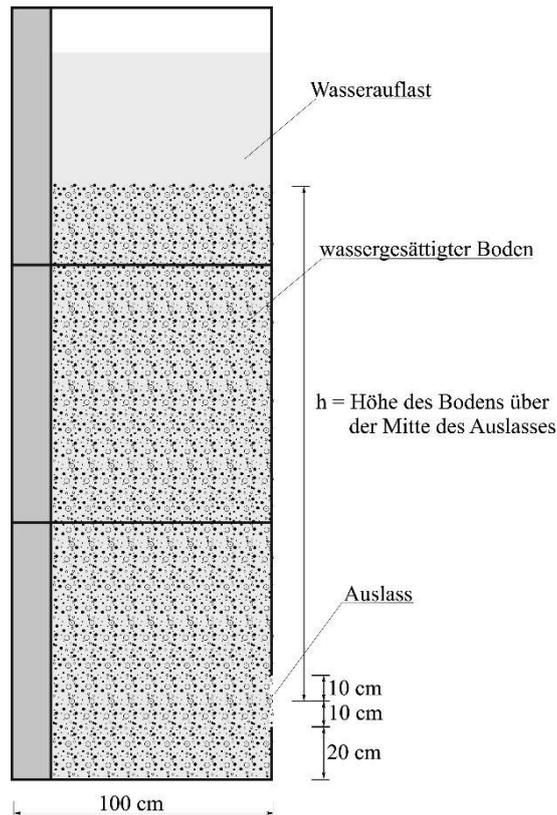


Bild 4.36 Definition der Höhe h im Versuchsstand zum Vergleich der Geschwindigkeiten mit Wasser nach Torricelli

4.8.2 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 1

Bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Sand 0,25-2,0 mm zeigte sich eine mittlere Geschwindigkeit von rund 1,0 m/s während des Ausfließens. Die Geschwindigkeit des wassergesättigten Sandes 0,25-2,0 mm lag bei 25 % bis 31 % im Vergleich zur Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli unter Berücksichtigung des Ausflussbeiwertes μ (siehe Bild 4.37).

Wie auch in den vorangegangenen Kapiteln bereits festgehalten wurde, fand bei den Versuchen der Versuchsreihe 1 eine Abnahme der Geschwindigkeit über die Zeit und die Abnahme der Spannungen statt. Somit reduzierte sich die Geschwindigkeit des wassergesättigten Sandes vergleichbar mit der Geschwindigkeit des Wassers nach Torricelli mit abnehmender Füllstandshöhe h .

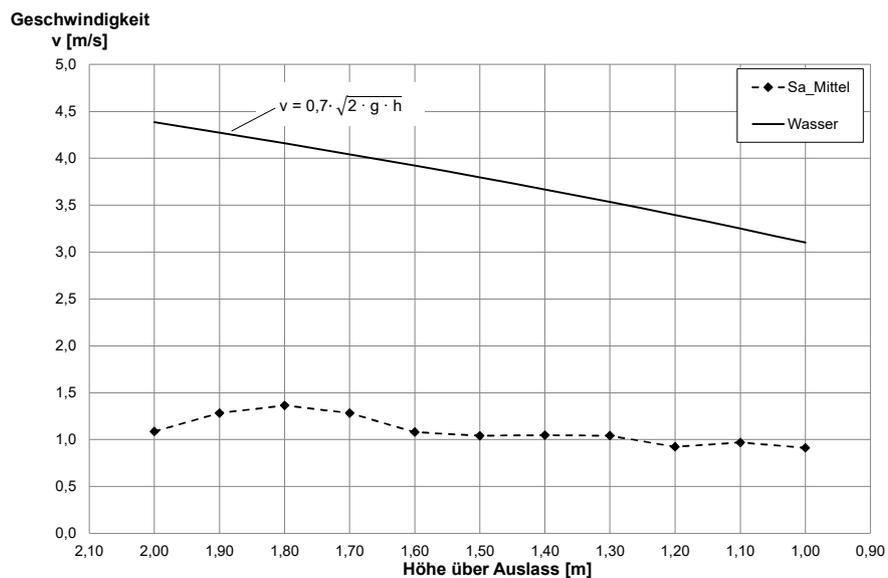


Bild 4.37 Vergleich der Geschwindigkeit des Sandes 0,25-2,0 mm mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli

4.8.3 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 2

Die mittlere Geschwindigkeit am Auslass des wassergesättigten Kieses 2,0-4,0 mm lag mit rund 1,1 m/s in einer vergleichbaren Größenordnung wie die des Sandes 0,25-2,0 mm. Bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 2,0-4,0 mm war allerdings ein leichter Anstieg der Geschwindigkeit im Versuchsverlauf zu verzeichnen. Die Geschwindigkeit des wassergesättigten Kieses 2,0-4,0 mm wurde mit 20 - 37 % im Vergleich zur Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli bestimmt, im Mittel betrug die Geschwindigkeit des wassergesättigten Kieses 2,0-4,0 mm 29 % der Geschwindigkeit von Wasser beim Ausfließen von einer Höhe von 2,0 m bis 1,0 m des wassergesättigten Kieses über der Mitte des Auslasses.

Die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe der Bodensäule über der Mitte des Auslasses des wassergesättigten Kies 2,0-4,0 mm im Vergleich zur Geschwindigkeit des Wassers nach Torricelli ist in Bild 4.38 dargestellt.

Hier sieht man einen gegenläufigen Trend, d.h. die Höhe hat nicht den vom Wasser bekannten Einfluss.

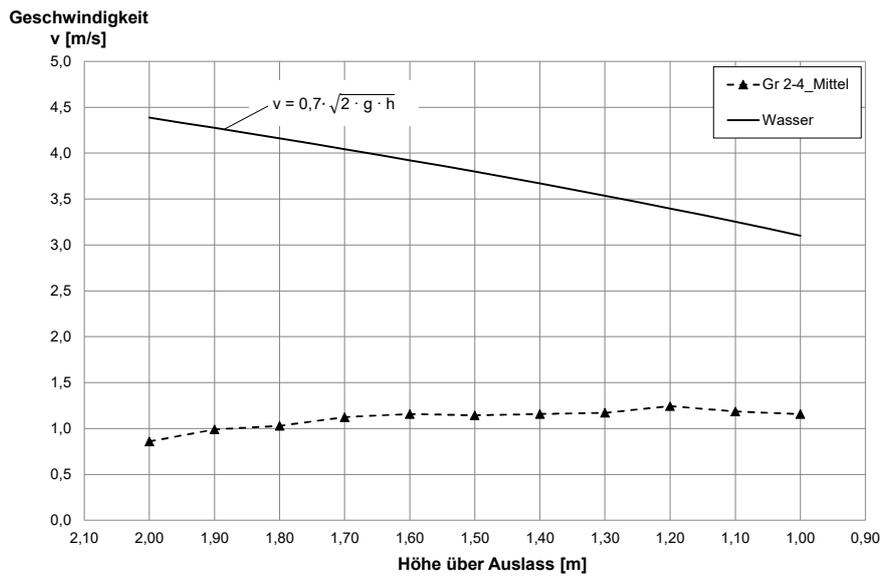


Bild 4.38 Vergleich der Geschwindigkeit des Kiese 2,0-4,0 mm mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli

4.8.4 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 3

Bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 4,0-8,0 mm lag die mittlere Geschwindigkeit mit 1,25 m/s etwas höher als bei den Versuchen mit dem wassergesättigten Kies 2,0-4,0 mm. Auch hier nahm die Geschwindigkeit im Versuchsverlauf leicht zu bzw. war annähernd konstant (vgl. Bild 4.39).

Im Vergleich zur Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli betrug die mittlere Geschwindigkeit des wassergesättigten Kieses 4,0-8,0 mm 24 % bis 41 % und im Durchschnitt 33 % der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli.

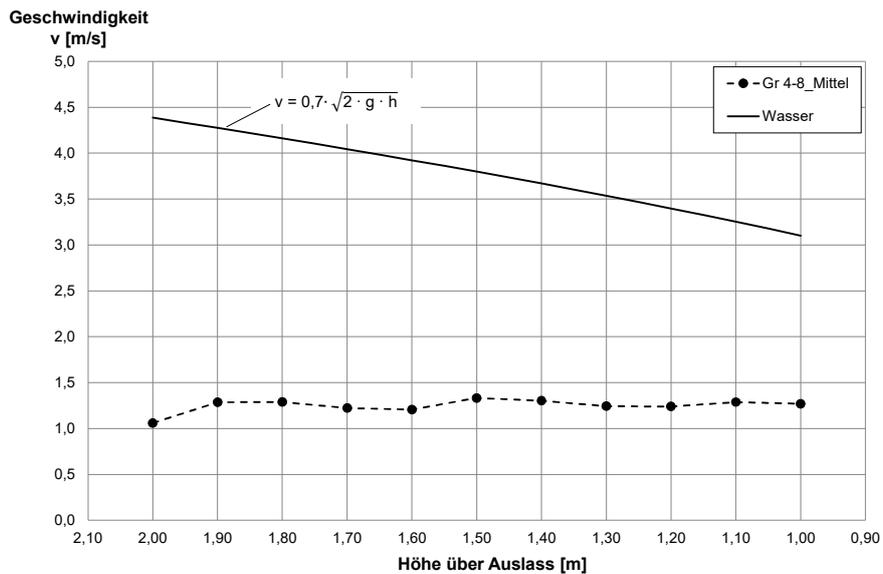


Bild 4.39 Vergleich der Geschwindigkeit des Kiese 4,0-8,0 mm mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli

4.8.5 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 4

Bei den Versuchen mit wassergesättigten Kies 8,0-16,0 mm konnte beim Ausfließen aus dem Versuchsstand eine konstante Geschwindigkeit gemessen werden; diese lag im Mittel für den im Diagramm in Bild 4.40 dargestellten Bereich von 2,0 m bis 1,0 m Höhe des Bodens über der Mitte des Auslasses bei 1,05 m/s und somit in der gleichen Größenordnung wie beim Sand und Kies 2,0-4,0 mm. Im Mittel konnte eine Geschwindigkeit des wassergesättigten Kies 8,0-16,0 mm für den oben benannten Bereich von rund 31 % der Geschwindigkeit vom Wasser nach Torricelli ermittelt werden.

Eine Abnahme der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe h über dem Auslass wie beim Wasser konnte auch hier nicht ermittelt werden.

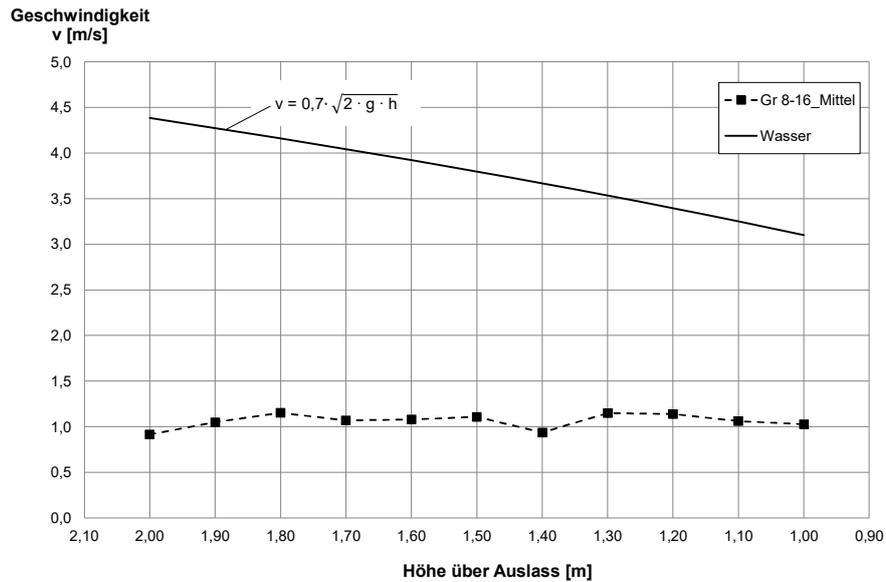


Bild 4.40 Vergleich der Geschwindigkeit des Kiese 8,0-16,0 mm mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli

4.8.6 Geschwindigkeitsentwicklung Versuchsreihe 5

Bei den Versuchen mit dem wassergesättigten stark sandigen Kies zeigt sich ein vergleichbarer Geschwindigkeitsverlauf zum Wasser nach Torricelli, wie dem Diagramm in Bild 4.41 zu entnehmen ist. D.h. die Geschwindigkeit des wassergesättigten, stark sandigen Kieses nahm mit Abnahme der Höhe der Bodensäule über dem Auslass ebenfalls ab, somit kann die Geschwindigkeit direkt mit der Geschwindigkeit von Wasser verglichen werden. Die durchschnittliche Geschwindigkeit bei den Versuchen mit dem stark sandigen Kies betrug 0,9 m/s im Betrachtungsbereich des Ausfließens von 2,0 m bis 1,0 m des Bodens über der Mitte des Auslasses.

Im Vergleich der Geschwindigkeit des wassergesättigten, stark sandigen Kieses zur Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli lag diese im Mittel bei 23 %.

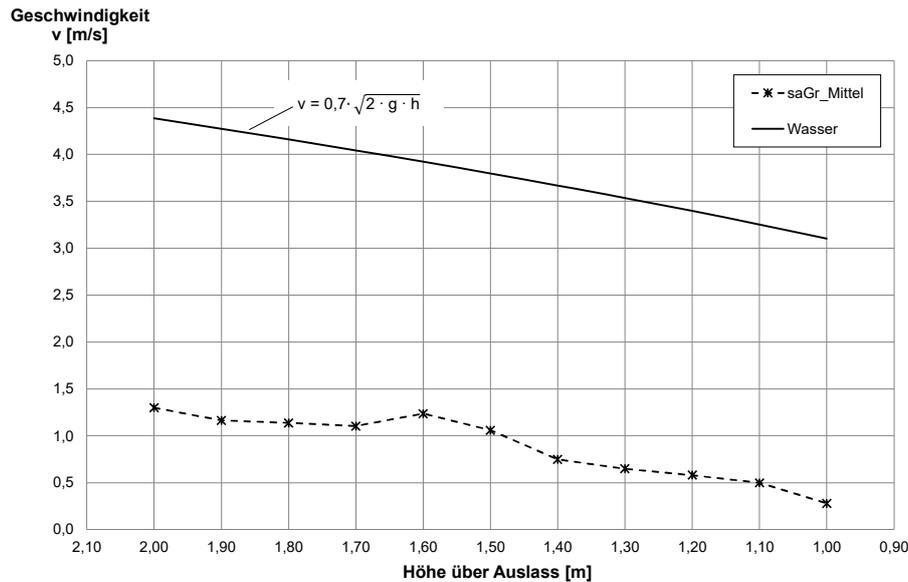


Bild 4.41 Vergleich der Geschwindigkeit des stark sandigen Kiesel mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli

4.8.7 Bewertung der Geschwindigkeitsentwicklung im Vergleich zum Wasser

Stellt man die Geschwindigkeit im Bereich A1 der fünf Versuchsreihen der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli, wie im Diagramm in Bild 4.42, einander gegenüber, so wird deutlich, dass die Geschwindigkeit zwar vom vorhandenen Boden und dessen Eigenschaften abhängig ist, die gemessenen Geschwindigkeiten der fünf Versuchsreihen mit 23 - 33 % der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli aber deutlich niedriger sind. Einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Abnahme der Höhe der Bodensäule über dem Auslass des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens und der Geschwindigkeit, wie es bei der Geschwindigkeitsbeschreibung von Wasser nach der Ausflussformel von Torricelli der Fall ist, konnte lediglich bei den Versuchen der Versuchsreihe 1 und der Versuchsreihe 5 ermittelt werden. Bei den gleichförmigen Kiesen konnte aufgrund des Ausfließens mit annähernd konstanter Geschwindigkeit keine Reduktion der Geschwindigkeit mit Abnahme der Höhe der Bodensäule über dem Auslass beobachtet werden.

Es ist eine klare Trennung zwischen den Versuchen mit den gleichförmigen Kiesen der Versuchsreihen 2 bis 4 und den sandigen Böden der Versuchsreihen 1 und 5 für den Vergleich mit Wasser erforderlich. Die für den Vergleich der wassergesättigten, grobkörnigen Böden mit Wasser erforderliche Grundvoraussetzung, dass das Boden-Wasser-Gemisch wie ein homogenes Gemisch fließt, kann nur für die Versuche mit Sand und stark sandigem Kies anhand der durchgeführten Experimente bestätigt werden, für die Kiese der Versuchsreihen 2 bis 4 konnte dies nicht bestätigt werden.

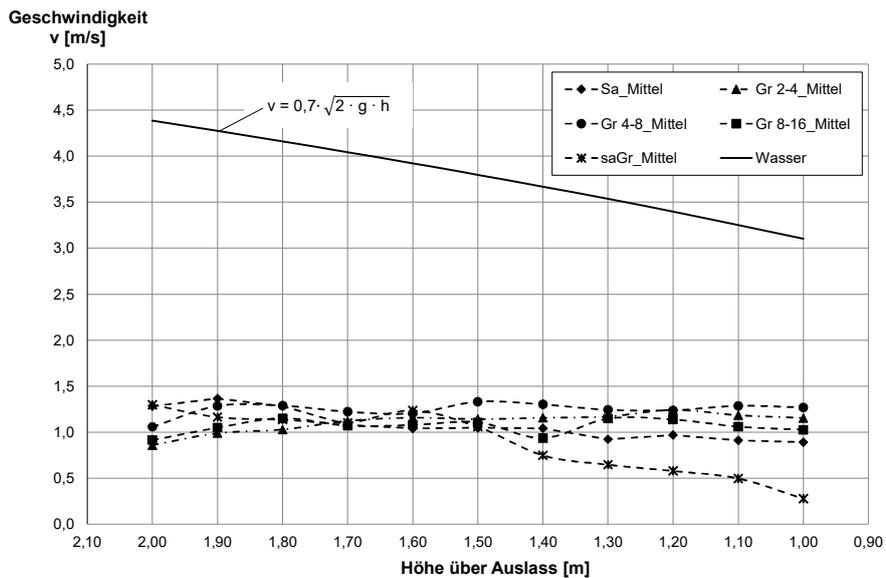


Bild 4.42 Vergleich der Geschwindigkeiten aller Versuchsmaterialien mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli

In Tabelle 4.5 ist die durchschnittliche Geschwindigkeit des Bodens im Bereich A1 (v_{Boden}) am Auslass sowie das Verhältnis zur Geschwindigkeit des Wassers nach Torricelli (v_{Wasser}) dargestellt. Hierbei erfolgte eine Betrachtung der Geschwindigkeiten zu den Zeitpunkten, an denen sich die Oberfläche des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens zwischen 1,0 m und 2,0 m über dem Auslass befand.

Versuchsreihe	v_{Boden}	$v_{\text{Boden}}/v_{\text{Wasser}}$ [%]
1 - Sand 0,25-2,0 mm	1,04	28
2 - Kies 2,0-4,0 mm	1,11	29
3 - Kies 4,0-8,0 mm	1,25	33
4 - Kies 8,0-16,0 mm	1,06	31
5 - stark sandiger Kies	0,89	23

Tabelle 4.5 Verhältnis der Geschwindigkeit im Bereich A1 des Bodens zur Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli

4.9 Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Durch die experimentellen Untersuchungen zum Fließverhalten von wassergesättigten, grobkörnigen Böden durch die Öffnung eines Behälters konnten umfangreiche Kenntnisse über die Fließbewegung und die Geschwindigkeitsverteilung bei verschiedenen Versuchsmaterialien gewonnen werden.

Mit Hilfe der Particle Image Velocimetry Methode war es möglich, die Geschwindigkeit der Bodenpartikel im Bereich des Auslasses aufzuzeichnen und eine detaillierte Analyse durchzuführen. Außerdem konnten die Fließrichtung und die Ausbreitung der Fließbewegung erfasst werden. Wie in Kapitel 4.2 den Bildern 4.4 bis 4.8 entnommen werden kann, unterscheiden sich die Fließbewegung und die Reichweite innerhalb des Versuchsstandes maßgeblich in Abhängigkeit des verwendeten Versuchsmaterials. So konnte festgestellt werden, dass mit zunehmender innerer Reibung, die über den Reibungswinkel φ definiert ist, die Reichweite der Fließbewegung deutlich abnimmt. So wurden bei den gleichförmigen Kiesen (Versuchsreihe 2 bis 4), die einen Reibungswinkel φ zwischen $37,1^\circ$ und $40,0^\circ$ besitzen, lediglich im ersten Drittel der Breite des Versuchsstandes Fließbewegungen aufgezeichnet. Beim Sand 0,25-2,0 mm, der mit $\varphi = 31,0^\circ$ den kleinsten Reibungswinkel aufweist, wurde eine Fließbewegung annähernd über die gesamte Breite des Versuchsstandes gemessen.

Die maximalen gemessenen Geschwindigkeiten bei allen fünf Versuchsreihen liegen im Bereich unmittelbar vor dem Auslass. Mit zunehmender Entfernung zum Auslass nimmt auch die Geschwindigkeit des Bodens ab, wobei die Größenordnung der Abnahme der Geschwindigkeit im Wesentlichen von der Reichweite der Fließbewegung und somit von dem Reibungswinkel des Versuchsmaterials abhängt.

Oberhalb des Auslasses wurden ebenfalls geringere Geschwindigkeiten als im unmittelbaren Bereich vor dem Auslass gemessen. Hier war der Unterschied bei den verwendeten Versuchsmaterialien jedoch wesentlich geringer. Die Geschwindigkeit direkt über dem Auslass nahm bei den gleichförmigen Böden (Versuchsreihe 1 bis 4) mit zunehmender Entfernung ab. Beim stark sandigen Kies war ebenfalls eine wesentlich geringere Geschwindigkeit oberhalb des Auslasses feststellbar, diese blieb jedoch mit zunehmender Entfernung vom Auslass konstant.

Die Detailanalyse der Geschwindigkeit im unmittelbaren Bereich vor dem Auslass in Kapitel 4.4 hat ergeben, dass im unteren Bereich des Auslasses die Geschwindigkeiten deutlich geringer als in der Mitte des Auslasses sind. Bei den gleichförmigen Kiesen (Versuchsreihe 2 bis 4) stellte sich ein besonders großer Geschwindigkeitsunterschied ein. Der Randeffect ist daran deutlich erkennbar, wobei auch hier die vorhandene Korngröße einen maßgeblichen Einfluss aufweist.

Die Analyse des Einflusses der vorhandenen Spannungsänderung im Verlauf des Ausfließens des Bodens aus dem Versuchsstand hat gezeigt, dass lediglich bei den Versuchen mit dem Sand 0,25-2,0 mm und dem stark sandigen Kies ein Zusammenhang erkennbar ist. Bei den Versuchen mit den gleichförmigen Kiesen konnte kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden.

Beim Vergleich der gemessenen Geschwindigkeiten im Bereich des Auslasses der fünf Versuchsreihen mit der Geschwindigkeit des Wassers nach der Ausflussformel von Torricelli unter Berücksichtigung der Ausflusszahl μ konnte ein deutlicher Unterschied bestimmt werden. Die Geschwindigkeiten der wassergesättigten Böden der fünf Versuchsreihen liegen bei 23 % bis 33 % der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli. Dabei hat sich gezeigt, dass die Porenzahl einen entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeit des Bodens hat. So wies der stark sandige Kies eine wesentlich geringere Geschwindigkeit auf, dieser besitzt eine Porenzahl von lediglich 0,28. Die gleichförmigen Böden weisen hingegen eine deutlich höhere Porenzahl von durchschnittlich $n = 0,43$ auf. Einen Zusammenhang zwischen der Abnahme der Höhe der Bodensäule über dem Auslass und der Geschwindigkeit des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens, vergleichbar mit der Ausflussformel nach Torricelli für Wasser, konnte lediglich für den Sand und den stark sandigen Kies ermittelt werden, bei den wassergesättigten gleichförmigen Kiesen wurde diese Abhängigkeit nicht festgestellt, somit ist eine klare Trennung notwendig.

In Tabelle 4.6 sind das Verhältnis der Geschwindigkeit des Bodens zur Geschwindigkeit des Wassers nach Torricelli für jede Versuchsreihe und die zugehörigen Bodenparameter Reibungswinkel φ , Porenzahl n beim Einbau, Trockendichte ρ_d beim Einbau und die Ungleichförmigkeitszahl C_U zusammenfassend dargestellt.

	Sand 0,25-2,0 mm	Kies 2,0-4,0 mm	Kies 4,0-8,0 mm	Kies 8,0-16,0 mm	stark sandiger Kies
v_{Boden} [m/s]	1,04	1,11	1,25	1,06	0,89
$v_{\text{Boden}}/v_{\text{Wasser}}$ [%]	27	29	33	31	23
Reibungswinkel φ [°]	31,0	40,0	37,1	39,8	35,0
Porenzahl n beim Einbau [-]	0,43	0,44	0,42	0,43	0,28
Trockendichte ρ_d beim Einbau [g/cm ³]	1,491	1,467	1,538	1,508	1,893
Ungleichförmig- keitszahl C_U [-]	2,11	1,27	1,30	1,32	15,45

Tabelle 4.6 Verhältnis der Geschwindigkeit des Bodens zur Geschwindigkeit des Wassers in Verbindung mit ausgewählten Bodenparametern

5 Beschreibung der Geschwindigkeit von wassergesättigten, grobkörnigen Böden mit der erweiterten Ausflussformel nach Torricelli

Für die allgemeine Beschreibung der Geschwindigkeit von wassergesättigten, grobkörnigen Böden kann auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den Großversuchen eine Erweiterung der Ausflussformel nach Torricelli erfolgen. Grundvoraussetzung hierfür ist die Annahme, dass der wassergesättigte, grobkörnige Boden wie ein homogenes Gemisch ausfließt. Aufgrund der Ergebnisse der Experimente musste festgestellt werden, dass die Erweiterung nicht für alle Bodenarten, die untersucht wurden, erfolgen kann. So konnte beim Fließen der wassergesättigten Kiese (Versuchsreihe 2 bis 4) kein vergleichbares Fließverhalten zum Wasser bei der Geschwindigkeitsentwicklung festgestellt werden, weshalb diese im Weiteren auch nicht mehr betrachtet werden.

Anhand der experimentellen Untersuchungen konnten verschiedene Einflussfaktoren auf das Fließverhalten von wassergesättigten Böden bestimmt werden. Für den Vergleich der Geschwindigkeit der unterschiedlichen wassergesättigten Böden zur Geschwindigkeit für Wasser gemäß der Ausflussformel nach Torricelli hat sich gezeigt, dass insbesondere der Porenanteil n eine bestimmende Rolle auf die Geschwindigkeit des wassergesättigten grobkörnigen Bodens hat. Aufgrund wesentlicher Unterschiede in der Größenordnung des Porenanteils von gleichförmigen zu ungleichförmigen Böden, ist die Ungleichförmigkeitszahl C_U ebenfalls ein maßgebender Faktor. Diese beiden Parameter sind in der nachfolgenden Tabelle 5.1 gemeinsam mit dem Verhältnis der Geschwindigkeit des Bodens zur Geschwindigkeit von Wasser für die beiden maßgeblichen Versuchsmaterialien angegeben.

Versuchsreihe		$v_{\text{Boden}}/v_{\text{Wasser}}$ [%]	Porenzahl n beim Einbau [-]	Ungleichförmigkeitszahl C_U
Nr.	Boden			
1	Sand 0,25-2,0 mm	28	0,43	2,11
5	stark sandiger Kies	23	0,28	15,45

Tabelle 5.1 Verhältnis der Geschwindigkeit des Bodens zur Geschwindigkeit des Wassers in Verbindung mit der Porenzahl n und der Ungleichförmigkeitszahl C_U

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde die Ausflussformel nach Torricelli für die Beschreibung der Geschwindigkeit von wassergesättigten, grobkörnigen Böden erweitert. Dabei wurde der wassergesättigte, grobkörnige Boden nach dem Prinzip der Mischungstheorie als ein Gesamtmedium, das sich wie eine zähe Flüssigkeit verhält, betrachtet.

Bei der Erweiterung der Ausflussformel nach Torricelli wird u.a. der anhand der experimentellen Untersuchungen ermittelte Einfluss des Porenanteils n berücksichtigt.

Die Ausflussformel nach Torricelli beschreibt die Geschwindigkeit des Wassers aus der Öffnung eines Behälters wie folgt:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Durch die Ergänzung der Torricelli'schen Ausflussformel um die sog. Ausflusszahl μ finden versuchsbedingte Einflussfaktoren bei der Beschreibung der Geschwindigkeit von Wasser Berücksichtigung (vgl. auch Kapitel 4.8.1):

$$v = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Für die Versuchsreihen 1 und 5, dem Sand und dem stark sandigen Kies, wurde mit Hilfe einer nicht-linearen Regressionsanalyse ein Beiwert empirisch bestimmt, der nachfolgend als Ungleichförmigkeitsbeiwert B_C bezeichnet wird. Dieser Ungleichförmigkeitsbeiwert fließt als Korrekturfaktor in die Gleichung von Torricelli ein. Die Regressionsanalyse erfolgt dabei mit der Statistik- und Analysesoftware SPSS Statistics von IBM.

Für die Beschreibung des Fließverhaltens von wassergesättigten, grobkörnigen Böden aus der Öffnung eines Behälters erfolgt dementsprechend eine Erweiterung der Gleichung Gl. 5.2 um den Porenanteil n und den empirisch ermittelten Ungleichförmigkeitsbeiwert B_C :

$$v = B_C \cdot n \cdot \mu \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Gl. 5.3})$$

Die Einführung des Ungleichförmigkeitsbeiwertes B_C erfolgt analog zu der für Wasser vorhandenen Ausflusszahl μ . Der Ungleichförmigkeitsbeiwert B_C gibt die im Versuchsverlauf auftretenden Effekte, wie bspw. Randeinflüsse und die Interaktionen der Bodenkörner sowie die Reduktion der vorhandenen Geschwindigkeit durch den Boden im Vergleich zum Wasser wieder und bildet eine entscheidende Grundlage für numerische Simulationen.

Für die Regressionsanalyse zur Bestimmung des empirischen Ungleichförmigkeitsbeiwertes B_C wurden die Versuchsreihen in eng gestufte, gleichförmige Böden ($C_U < 6$), Versuchsreihe 1 (Sand 0,25-2,0 mm), und ungleichförmige Böden ($C_U \geq 6$), Versuchsreihe 5 (stark sandiger Kies), unterteilt. Für das Modell für die Regressionsanalyse wurde die Gleichung (Gl. 5.3) angesetzt.

Der empirisch bestimmte Ungleichförmigkeitsbeiwert B_C ergab sich in Abhängigkeit von der Ungleichförmigkeitszahl C_U des Versuchsmaterials wie folgt:

Gleichförmige Böden, $C_U < 6$: $B_C = 0,64$
Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,78$
Standardfehler: 0,014

Ungleichförmige Böden, $C_U \geq 6$: $B_C = 0,86$
Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,47$
Standardfehler: 0,071

Die Punkteschar, die Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli und die ermittelte Regression für den gleichförmigen Sand 0,25-2,0 mm sind im Diagramm in Bild 5.1 dargestellt. Das Ergebnis der Regressionsanalyse für den ungleichförmigen, stark sandiger Kies kann dem Diagramm in Bild 5.2 entnommen werden.

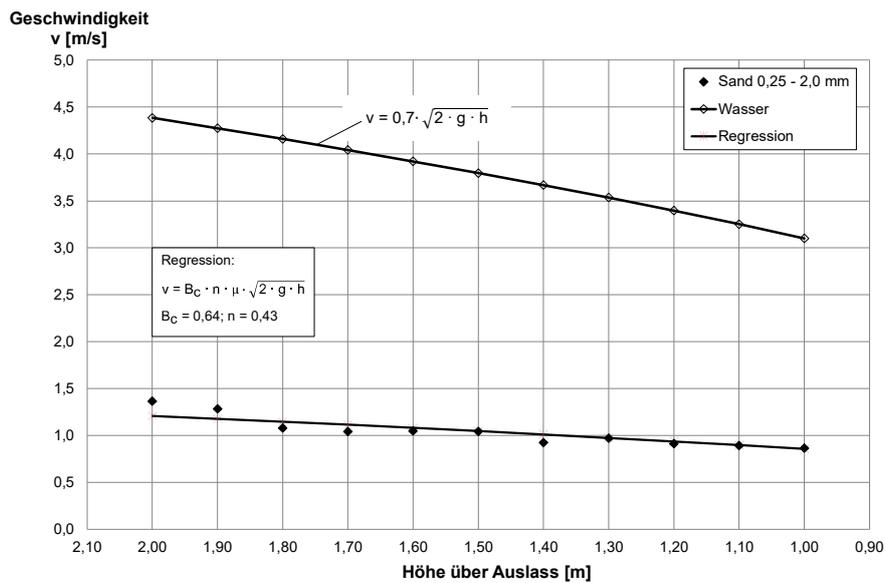


Bild 5.1 Regressionsanalyse für gleichförmige Böden

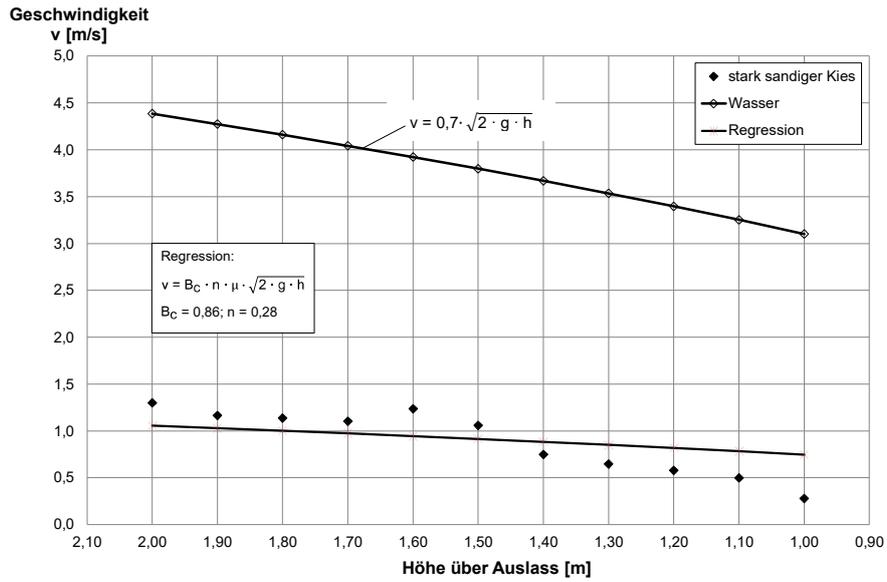


Bild 5.2 Regressionsanalyse für ungleichförmige Böden

Eine Aussage über das Fließverhalten bzw. die Geschwindigkeit von Böden mit kohäsiven Anteilen wird in diesem bestimmten Fall nicht getroffen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war, im Rahmen der bodenmechanischen Grundlagenforschung das Fließverhalten und insbesondere auch die Geschwindigkeitsentwicklung von wassergesättigten, grobkörnigen Böden zu untersuchen. Basis hierfür stellen, wie im Bereich der Bodenmechanik üblich, experimentelle Untersuchungen dar, anhand derer das Materialverhalten analysiert werden kann.

In der Fluidmechanik existieren umfangreiche Kenntnisse über die verschiedenen Fluide und ihr Verhalten. Auch das Fließverhalten und die Geschwindigkeit von Wasser durch eine Öffnung in einem Behälter wurde schon 1644 vom Mathematiker Evangelista Torricelli beschrieben. Aufgrund des Zusammenspiels von Wasser und Boden wird die Beurteilung und Beschreibung des Fließverhaltens ungleich komplexer und von unterschiedlichen Einflussfaktoren bestimmt.

Als Grundlage für die Untersuchungen zum Fließverhalten von wassergesättigten grobkörnigen Böden wurden die vorhandenen Kenntnisse aus dem Bereich der Fluidmechanik unter der Annahme, dass ein Boden-Wasser-Gemisch ein ähnliches Fließverhalten aufweist, herangezogen.

Diese Grundlagenforschung zum Fließverhalten von wassergesättigten, grobkörnigen Böden erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Mechanik der Ruhr-Universität Bochum im Rahmen des DFG-Paketantrages „Untersuchungen zum Fließverhalten von Fluid-Granulat-Mischungen“.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst das Strömungsverhalten von Fluiden und insbesondere von Wasser studiert. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Beschreibung der Ausflussformel nach Torricelli und die im Verlauf der letzten Jahrhunderte gewonnenen Kenntnisse und Weiterentwicklungen der Ausflussformel gelegt. Auch die bereits vorhandenen Kenntnisse über das Verhalten von Wasser im Boden und hydraulisch verursachte Versagensformen wurden analysiert. Zur Findung einer geeigneten Methode, um die Geschwindigkeit und das Fließverhalten des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens beschreiben zu können, wurde die Particle Image Velocimetry Methode gewählt.

Für die Durchführung experimenteller Untersuchungen war ein zentraler Punkt die Entwicklung eines eigenen neuartigen Versuchsstandes. Eine wesentliche Maßgabe bei der Entwicklung des Versuchsstandes war, dass dieser möglichst groß sein sollte, um negative Randeinflüsse gering zu halten.

Bei der Entwicklung des Versuchsstandes wurde der Aufbau aus der Beschreibung der Geschwindigkeit von Wasser nach der Ausflussformel von Torricelli zu Grunde gelegt, um im Rahmen der Analyse auch einen Vergleich zwischen den Geschwindigkeiten von Wasser und wassergesättigtem, grobkörnigen Boden führen zu können.

Der entwickelte neuartige Versuchsstand weist eine Höhe von 300 cm, eine Breite von 100 cm und eine Tiefe von 50 cm auf. An der rechten Seitenwand befindet sich 20 cm oberhalb des Bodens ein Auslass mit einer variablen Höhe von 10 cm bis 30 cm, der durch eine Klappe verschlossen ist und zur Initialisierung des Versuchs geöffnet wird. Eine Seite des Versuchsstandes besteht über die gesamte Breite und Höhe aus Glas, um während des Ausfließens des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens aus dem Versuchsstand das Fließverhalten des Bodens analysieren zu können. Außerdem war die Verwendung einer Glasscheibe zur Bestimmung der Geschwindigkeit und der Fließbewegung mit der Partikel Image Velocimetry Methode, bei der eine Aufzeichnung mittels einer High-Speed-Kamera im unteren Drittel des Versuchsstandes erfolgte, erforderlich.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden fünf grobkörnige Böden mit unterschiedlicher Korngröße und Kornzusammensetzung gewählt; alle wiesen eine runde Kornform auf.

Aufgrund der vorhandenen Dimensionen und des teilweise sehr heterogenen Versuchsmaterials war es erforderlich, eine eigene neuartige Einbaumethode zu entwickeln, da sich im Laufe der durchgeführten Vorversuche gezeigt hatte, dass bekannte und bewährte Einbaumethoden für den neuartigen Versuchsstand kein reproduzierbares Ergebnis in Bezug auf den Einbau des grobkörnigen Bodens lieferten.

Nach mehr als 100 durchgeführten Vorversuchen, bei denen der Versuchsstand hinsichtlich der verschiedensten Randbedingung optimiert wurde, konnten die vorgegeben Voraussetzungen eines homogenen, gleichmäßigen Einbaus, eines kontinuierlichen Ausfließens des wassergesättigten grobkörnigen Bodens, eine vollständige Wassersättigung des Bodens während der Versuchsdurchführung und reproduzierbare Bedingungen für eine Analyse für die finalen Versuche, die mit der High-Speed-Kamera aufgezeichnet und nach dem Prinzip der Particle Image Velocimetry Methode ausgewertet wurden, als erfüllt angesehen werden.

Für die Auswertung zur Beschreibung der Geschwindigkeit von wassergesättigten, grobkörnigen Böden wurden fünf Versuchsreihen mit unterschiedlichen Böden mit jeweils drei Versuchen gewählt, d.h. es wurden 15 weitere Versuche durchgeführt.

Im Rahmen der Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung und der Bestimmung der Geschwindigkeit im Auslass wurde zum Teil eine starke Abhängigkeit vom verwendeten Versuchsmaterial festgestellt.

Anhand der Analyse des Ausfließens des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens durch eine Öffnung aus dem Versuchsstand und der Auswertung mit der Particle Image Velocimetry Methode konnte bestätigt werden, dass, wie zu erwarten war, die größten Geschwindigkeiten im Bereich unmittelbar vor dem Auslass gemessen wurden.

Durch die Visualisierung war es außerdem möglich, die Fließrichtung und die Ausbreitung der Fließbewegung zu bestimmen.

Für eine Detailanalyse und eine genaue Bestimmung der Geschwindigkeit in den unterschiedlichen Bereichen war es notwendig, die gewonnenen Daten aus den PIV-Messungen adäquat auszuwerten. Hierfür mussten die Geschwindigkeitsvektoren zu den unterschiedlichen Zeitpunkten einzeln ausgelesen und gemittelt werden. Dies erforderte das Programmieren eines Visual Basics Tools zur Verbesserung der Handhabung der sehr großen Datenmengen.

Durch die Auswertung der mittleren Geschwindigkeit in den verschiedenen Bereichen konnte festgestellt werden, dass der Reibungswinkel des verwendeten Versuchsmaterials auf die Reichweite beim Ausfließen aus dem Versuchsstand einen entscheidenden Einfluss hat. Je größer der vorhandene Reibungswinkel des Versuchsmaterials ist, desto steiler bildet sich der Bereich des Bodens beim Ausfließen aus dem Versuchsstand aus, bei dem eine Fließbewegung stattfand.

Die Geschwindigkeit entlang der Wand über dem Auslass war wesentlich geringer, als im Bereich direkt am Auslass und nahm mit zunehmender Entfernung zum Auslass ab. Dieses Verhalten beim Ausfließen des Bodens konnte bei allen gleichförmigen Böden (Versuchsreihe 1 bis 4) detektiert werden. Beim stark sandigen Kies war oberhalb des Auslasses zwar ebenfalls eine deutlich geringere Geschwindigkeit zu beobachten, eine zusätzliche Abnahme mit zunehmender Entfernung vom Auslass wurde jedoch nicht gemessen.

Wie auch beim Wasser konnte festgestellt werden, dass unterschiedliche Geschwindigkeiten innerhalb des Auslasses aufgetreten sind. Dieser Randeffekt wurde bei den verschiedenen Versuchsmaterialien in unterschiedlicher Ausprägung beobachtet. Einheitlich war dabei die deutlich geringere gemessene Geschwindigkeit im unteren Bereich des Auslasses. Der gemessene Geschwindigkeitsunterschied zwischen der Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses (A1_mitte) und dem oberen Bereich des Auslasses ist stark von der Korngröße abhängig. So konnte bei den Versuchen mit Versuchsmaterial mit sandigen Bestandteilen (Versuchsreihe 1 und 5) eine wesentlich höhere Geschwindigkeit in der Mitte des Auslasses festgestellt werden. Bei den Kiesen war der gemessene Geschwindigkeitsunterschied gering bis überhaupt nicht vorhanden.

Anhand der Geschwindigkeitsbestimmung mittels der experimentellen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass der vorhandene Porenanteil des Bodens und die

Kornzusammensetzung einen maßgeblichen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Bodens hat. Je größer der vorhandene Porenanteil war, desto höher lag auch die Fließgeschwindigkeit.

Einen Einfluss der auftretenden Spannungsänderung auf die Geschwindigkeit konnte lediglich bei dem Sand und dem stark sandigen Kiesen bestimmt werden. Bei den Versuchen mit den drei unterschiedlichen gleichförmigen Kiesen konnte keine Änderung der Geschwindigkeit infolge der Abnahme der vorhandenen Spannungen identifiziert werden.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse konnte ein Vergleich mit der bekannten Geschwindigkeit von Wasser, die mit der Ausflussformel nach Torricelli beschrieben wird, gezogen werden. Die aufgetretenen Geschwindigkeiten des wassergesättigten Bodens lagen dabei deutlich niedriger als beim Wasser. Abhängig vom verwendeten Material und dem vorhandenen Porenanteil, betrug die Geschwindigkeit des wassergesättigten grobkörnigen Bodens 0,89 m/s bis 1,25 m/s und im Durchschnitt somit 23 % bis 33 % von der Geschwindigkeit von Wasser.

Bei den verwendeten Versuchsmaterialien mit sandigen Bestandteilen, also dem Sand und dem stark sandigen Kies, war ein vergleichbarer Verlauf der Geschwindigkeit beim Ausfließen durch eine Öffnung wie beim Wasser erkennbar. Bei den Versuchen mit den gleichförmigen Kiesen war keine Abhängigkeit von der Höhe der Bodensäule über dem Auslass auf die Geschwindigkeit ausfindig zu machen. Diese Tatsache hatte sich bereits bei der Beurteilung der Geschwindigkeit in Zusammenhang mit der Abnahme der vorhandenen Spannungen gezeigt. Die grundlegende und für den Vergleich mit Wasser notwendige Annahme, dass der wassergesättigte, grobkörnige Boden wie ein homogenes Gemisch aus dem Versuchsstand ausfließt, konnte anhand der Versuche lediglich für den Sand und den stark sandigen Kies bestätigt werden, für die Kiese trifft dies nicht zu.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen und Ergebnisse der Analyse mittels der Particle Image Velocimetry Methode konnte die Ausflussformel nach Torricelli, die für Wasser Gültigkeit besitzt, für den wassergesättigten, grobkörnigen Boden weiterentwickelt werden. Die Ausflussformel wurde um den empirischen Ungleichförmigkeitsbeiwert B_c , der mit Hilfe einer Regressionsanalyse mit dem Statistik- und Analyseprogramm SPSS Statistics für den Sand und den stark sandigen Kies bestimmt wurde und von der Ungleichförmigkeitszahl C_u des Bodens abhängig ist, sowie um den Porenanteil n des Bodens erweitert. Für den gleichförmigen Kies konnte anhand der Auswertung der Versuchsergebnisse ein direkter Zusammenhang der Geschwindigkeit zwischen der Ausflussformel nach Torricelli für Wasser nicht nachgewiesen werden, so dass hier die erweiterte Ausflussformel nicht angesetzt werden kann.

Die Bestimmung der Geschwindigkeit des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit von Wasser ermöglicht die Implementierung in bereits vorhandene numerische Modelle, die für Wasser Gültigkeit besitzen. Hierdurch ist es nun möglich, Parameter wie beispielsweise die Zähigkeit des wassergesättigten, grobkörnigen Bodens anhand geeigneter numerischer Modelle zu bestimmen.

Zur Verifizierung der erweiterten Ausflussformel nach Torricelli sind weitere experimentelle Untersuchungen erforderlich. Anhand weiterer experimenteller Untersuchungen wäre die Analyse weiterer Einflussfaktoren wie beispielsweise die Kantigkeit des verwendeten Bodens ein grundlegender, relevanter Aspekt. Außerdem sind weitergehende Untersuchungen hinsichtlich der Abgrenzung der Gültigkeit der erweiterten Ausflussformel nach Torricelli, die aktuell nicht für Kiese nachgewiesen werden konnte, erforderlich.

7 Literaturverzeichnis

- Arndt, M., di Pietro, P., Tinti, M. (2013)
Schutzmaßnahmen gegen Flut- und Murgangschäden am Beispiel des Aosta Tals, Italien. 19. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen, München, 245-252
- Arason, I.S., Tsimring, L.S. (2001)
Continuum description of avalanches in granular media. *Physical Review*, Vol. 64, The American Physical Society, 1-4
- Arason, I.S., Tsimring, L.S. (2002)
Continuum theory of partially fluidized granular flows. *Physical Review*, Vol. 65, The American Physical Society, 1-20
- Aulbach, B. (2013)
Hydraulischer Grundbruch - Zur erforderlichen Einbindetiefe bei Baugruben in nichtbindigem Baugrund. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
- Bachmann, G. (2009)
Entwicklung von Grund- und Böschungsbruch - Experimente und Numerik. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 84
- Benke, S. (2004)
Modellierung thermomechanischer Prozesse in porösen Medien. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
- Bernatzki, W. (1947)
Baugrund und Physik. Schweizer Druck- u. Verlagsh., Zürich, 151-155
- Bernoulli, D. (1738)
Hydrodynamica, sive De viribus et motibus fluidorum commentarii. Opus academicum ab auctore, dum Petropoli ageret, congestum
- Besthorn, M. (2006)
Hydrodynamik und Strukturbildung. Springer-Verlag, Berlin
- Bowen, R. (1976)
Theory of Mixtures. In: A. Eringen (Ed.) *Continuum Physics III*, pp. 2-127, Academic Press

- Brinch-Hansen, J. (1953)
Earth Pressure Calculation. The Danish Technical Press, Copenhagen.
- Bröder, D. (2003)
Anwendung optischer Messtechniken zur Untersuchung disperser Gas-Flüssigkeits-Strömungen. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- Cierpka, C. (2008)
Zeitaufgelöste PIV-Untersuchungen zur Strömungskontrolle mittels elektromagnetischer Kräfte in schwach leitfähigen Fluiden. Dissertation, Technische Universität Dresden
- Darcy, H (1856)
Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Libraire des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines. Victor Dalmont, Paris
- David, I. (1998)
Grundwasserhydraulik - Strömungs- und Transportvorgänge. Vieweg-Verlag, Braunschweig, Wiesbaden
- Davidenkoff, R. (1970)
Unterläufigkeit von Stauwerken. Werner-Verlag, Düsseldorf
- de Boer, R. (2004)
Von Leonardos Weinstock zu Hightechanwendungen - Historische Entwicklung der Theorie Poröser Medien einschließlich des Wiener Skandals. Essener Unikate, Heft 23, 10-21
- de Boer, R., Bluhm, J. (2004)
Eine Theorie fürs Grobe und Feine - Die Theorie poröser Medien. Essener Unikate, Heft 23, 22-35
- DGGT (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik) (2012)
Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Baugruben" (EAB). 5. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- DGGT (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik) (2012)
Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" (EAU). 11. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin

- Dietrich, A. (2019)
Debris Flows in the Northern Alps - Activity, Erosivity and Anticipated Volumes.
Dissertation, Technische Universität München
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (2003)
DIN 1342-1:2003-11- Viskosität - Teil 1: Rheologische Begriffe. Beuth, Berlin
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (2014)
DIN EN 1997-1 Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der
Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln. Beuth, Berlin
- Domnik, B. (2012):
Three-dimensional modelling, simulations with MAC, and experimental validation
of rapid granular flows. Dissertation, Universität Bonn
- Drew, D. & Passman, S. (1999)
Theory of Multicomponent Fluids. Springer Verlag, Berlin
- Durst, F. (2006)
Grundlagen der Strömungsmechanik - Eine Einführung in die Theorie der
Strömungen von Fluiden. Springer Verlag, Berlin
- Ehlers, W. (1989)
Poröser Medien - ein kontinuumsmechanisches Modell auf der Basis der
Mischungstheorie. Universität- Gesamthochschule-Essen, Forschungsberichte aus
dem Fachbereich Bauwesen 47
- Ehlers, W. (1996)
Grundlegende Konzepte in der Theorie Poröser Medien. Technische Mechanik, 16,
63-76.
- Ehlers, W. & Bluhm, J. (2002)
Porous Media. Springer Verlag, Berlin
- Ehlers, W. (2009)
Challenges of Porous Media Models in Geo- and Biomechanical Engineering
including Electro-Chemically Active Polymers and Gels. Stuttgart Research Centre
for Simulation Technology, Issue No. 2009-8
- Fischer, S. (2019)
Ein Beitrag zur Klärung der Kinematik beim Aufbruch der Baugrubensohle.
Mittellungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen
Universität Darmstadt, Heft 108

- Fuchs, S., Kaitna, R., Scheidl, C., Hübl, J. (2008)
Application of the Risk Concept to Debris Flow Hazards. Geomechanik und Tunnelbau 1, Heft 2
- Graf, T., Ehlers, W. (2005)
Modelling of multiphasic flow phenomena in deformable porous materials under consideration of the thermal effects. PAMM – Proceedings Applied Mathematic Mechanic, Vol 5, S. 395-396, Wiley-VCH Verlag
- Greve, R. and Hutter, K. (1993)
Motion of a granular avalanche in a convex and concave curved chute: experiments and theoretical predictions. Phil. Trans. R. Soc. A342, 573-600.
- Gross, D., Hauger, W., Wriggers, P. (2009)
Technische Mechanik, Band 4: Hydromechanik, Elemente der höheren Mechanik, Numerische Methoden. 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- Gutberlet, Ch. (2008)
Erdwiderstand in homogenem und geschichtetem Baugrund - Experimente und Numerik. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 78
- Harza, L. F. (1935)
Uplift and seepage under dams on sand. Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE), Volume 100, New York
- Hakim, A. N. (1991)
Zum Einfluss von Kornverteilung und Kornform auf das Verflüssigungsverhalten von Lockergesteinen. Dissertation, Bergakademie Freiberg
- Heineke, S.A. (2001)
Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Gleisstabilität. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik, Technische Universität Darmstadt, Heft 57
- Herwig, H. (2016)
Strömungsmechanik, Eine Einführung in die Physik von technischen Strömungen. 2. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Berlin
- Hook, R. (1678)
Lectures de potentia restitutiva, or, Of spring. John Martyn, London

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (2010)
Produktdatenblatt U3, Kraftaufnehmer

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
Bedienungsanleitung, Überdruckaufnehmer mit induktivem Meßsystem, 5 kHz,
P11

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (2013)
Datenerfassungssoftware Catman 3

Hutter, K. (2003)
Fluid- und Thermodynamik - Eine Einführung. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin

Joukowsky, N.E. (1900)
Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungsröhren. Mémoires de l'Académie
Impériale des Sciences de St.-Petersbourg

Katzenbach R., Bachmann G., Weidle A. (2011)
Neue Erkenntnisse zum hydraulischen Grundbruch. Mitteilungen des Institutes und
der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt,
Heft 88

Katzenbach, R., Bergmann, C., Ruppert, T., Bachmann, G., Gutberlet, C., Hutter, K.
(2011)
Particle Image Velocimetry Measuring Methods for Soil Movements in
Geotechnics. Darmstadt Geotechnics, 21

Kirsch, A. (2008)
On the face stability of shallow tunnels in sand. Dissertation, Rheinisch-
Westfälische Technische Hochschule

Kirschner, O. (2006)
PIV Geschwindigkeitsmessung im geraden Saugrohr einer Modell-Pumpturbine.
Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 5.-7.09.2006,
Braunschweig, 1-8

Kleine Vennekate, G. (2012)
Scherfugenbildung in Sand-Ton-Wechselfolgen. 32. Baugrundtagung, Beiträge der
Spezialsitzung „Forum für junge Geotechnik-Ingenieure“

Kolymbas, D. (2019)
Geotechnik, Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau. 5. Auflage, Springer
Vieweg Verlag, Berlin

- Kolymbas, D. (1988)
Eine konstitutive Theorie für Böden und andere körnige Stoffe. Veröffentlichung am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 109
- Kroener, C. (2012)
Full two- and three-dimensional rapid granular flows: numerical simulations with VOF and experimental validation. Dissertation, Universität Bonn
- Jennerich, C. (1999)
Dynamik von Setzungsfließbrüchen und Bildung von Schwallwellen. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 99-3
- LaVision (2007)
FlowMaster, Advanced PIV/PTV Systems for Quantitative Flow Field Analysis
- Leonhardt, A. (1989)
Das Verflüssigungsverhalten von Sand unter Einwirkung dynamischer Lasten. Dissertation, Bergakademie Freiberg
- Lücking, J. (2010)
Tragverhalten von offenen Verdrängungspfählen unter Berücksichtigung der Pfropfenbildung in nichtbindigen Böden. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 23
- Merzkirch, W. et al. (1997)
PIV in multiphase Flow. Proceedings of The Second International Workshop on PIV'97-Fukui, July 8-11, Japan, 1-7
- Müller-Kirchenbauer, H. (1964)
Zur Mechanik der Fließsandbildung und des hydraulischen Grundbruches. Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Hochschule Fridericiana in Karlsruhe, Heft 17
- Odenwald, B., Herten, M. (2008)
Hydraulischer Grundbruch: neue Erkenntnisse. In: Bautechnik, 85. Jahrgang, Heft 9
- Ohde, J. (1956)
Grundbaumechanik – Eigenschaften der Böden. In: Hütte, Band 3, Ernst & Sohn, Berlin

- Pudasaini, S. P. and Hutter., K (2007)
Avalanche Dynamics, Dynamics of Rapid Flows of Dense Granular Avalanches.
Springer Verlag, Berlin
- Pudasaini, S.P. (2011)
Some Exact Solutions for Debris and Avalanche Flows. *Physics of Fluids*, 23(4)
- Pudasaini, S.P. (2012)
A general two-phase debris flow model. *J. Geophys. Res.*, 117, F03010
- Pudasaini, S. P., Hutter, K., Hsiau, S.-S, Tai, C.-H., Wang, Y.: Katzenbach, R. (2007)
Rapid Flow of Dry Granular Materials down Inclined Chutes Impinging on Rigid Walls, *Physics of Fluids*, 19(5)
- Pudasaini, S. P., Wang, Y., Sheng, L.-T., Hsiau, S.-S., Hutter, K., Katzenbach, R. (2008)
Avalanching granular flows down curved and twisted channels: Theoretical and experimental results. *Physics of Fluids*, 20(7)
- Pust, O. (2001)
Quantitative Visualisierung komplexer verfahrenstechnischer Strömungsvorgänge mit der digitalen Particle Image Velocimetry. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg
- Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J. (1998)
Particle Image Velocimetry. Springer Verlag, Berlin
- Raju, V. R. (1994)
Spontane Verflüssigung, lockerer granularer Körper - Phänomene, Ursachen, Vermeidung, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 134
- Reisner, T. T. (2015)
Fluid compressibility in a solid-fluid mixture flow: Experiments, modelling and numerical application to batch sedimentation. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum
- Reynold, O. (1883)
An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. *Proc. Roy. Soc.*, Band 174, 1883, 935-982

- Scheid, T. M. (2011)
Untersuchung der naturräumlichen Rahmenbedingungen der Entstehung von Talmurren. Dissertation, Ludwig-Maximilian-Universität München
- Schneider, L. & Hutter, K. (2009)
Solid-Fluid Mixtures of Frictional Materials in geophysical and Geotechnical Context. Springer Verlag, Berlin
- Schober, P. (2014)
Zum hydraulischen Grundbruch an Baugrubenumschließungen bei luftseitiger Sicherung durch einen Auflastfilter in nichtbindigen Böden. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
- Siekmann, H.E., Thamnsen, P.U. (2009)
Strömungslehre für den Maschinenbau. Technik und Beispiele, Springer-Verlag, 2. Auflage
- Sigloch, H. (2017)
Technische Fluidmechanik. 10. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- Spurk, J. H., Aksel, N. (2010)
Strömungslehre - Einführung in die Theorie der Strömungen, 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- Tai, Yih-Chin (2000)
Dynamics of Granular Avalanches and their Simulation with Shock-Capturing and Front-Tracking Numerical Schemes. Dissertation, Technische Universität Darmstadt
- Tecplot., Inc. (2013)
Tecplot Focus 2013, User's Manual
- Terzaghi, K., Jelinek, R. (1954)
Theoretische Bodenmechanik. Springer Verlag, Berlin
- Tognacca, C. (1999)
Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. Dissertation, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich
- Toricelli, E. (1644)
Opera Geometrica, Masse & de Landis, Florence

- Truckenbrodt, E. (2008a)
Fluidmechanik, Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- Truckenbrodt, E. (2008b)
Fluidmechanik, Band 2: Elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide sowie Potenzial- und Grenzschichtströmungen, 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- Truesdell, C. (1966)
Sulle basi della termomeccanica I & II. Atti Accad Naz. Lincei. Rend. Cl. Sci. Fis. Mat. Nat. 22 (1957), pp. 33-38 und pp. 158-166. Engl. Übersetzung in: C. Truesdell (Editor), Continuum Mechanics II-IV, Gordon & Breach, New York
- Truesdell, C; Toupin, R. (1960)
The Classical Field Theories. In: Handbuch der Physik, Band III/1, Flügge, S. (Hrsg.). Springer-Verlag, Berlin
- Truesdell, C; Noll, W. (1960)
The Non-Linear Field Theories of Mechanics. In: Handbuch der Physik, Band III/3, Flügge, S. (Hrsg.). Springer-Verlag, Berlin
- Turek, J. (2006)
Beitrag zur Klärung des Trag- und Verformungsverhaltens horizontal belasteter Kombinerter Pfahl-Plattengründungen. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 72
- TSI Incorporated (2014)
Insight 4G, Software Manual
- von Bröckh, Peter
Fluidmechanik. Springer-Verlag, Berlin
- Weber, D. (2004)
Untersuchungen zum Fließ- und Erosionsverhalten granularer Murgänge. Dissertation, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich
- Weisbach, J. (1855)
Die Experimental-Hydraulik. Verlag von J.G. Engelhardt
- Wendeler, C. (2008)
Murgangrückhalt in Wildbächen - Grundlagen zu Planung und Berechnung von flexiblen Barrieren. Dissertation, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

- Witt, Karl Josef (2018)
Grundbau Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren, 8. Auflage, Ernst & Sohn Verlag
- Oda, M.; Iwashita, K. (1999)
Mechanics of Granular Materials - An introduction. Balkema, Rotterdam
- Oertek, H., Böhle, M., Reviol, T. (2015)
Strömungsmechanik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer-Vieweg Verlag, Berlin
- Vision Research (2013)
Phantom Miro M & LC Series, Manual
- Volfson, D., Tsimring, L.S., Arason, I.S. (2003)
Partially fluidized shear granular flow: Continuum theory and molecular dynamics
- Zhou, Y.-G., Chen Y.-M., Shamoto, Y. (2010)
Verification of the Soil-Type Specific Correlation between Liquefaction Resistance and Shear-Wave Velocity of Sand by Dynamic Centrifuge Test. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 165-177
- Zierep, J., Bühler, K. (2018)
Grundzüge der Strömungslehre - Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide. 11. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Berlin

Bildverzeichnis

Bild 1.1	Murgangkatastrophe 2005, Glyssibach Brienz (Wendeler (2008))	1
Bild 1.2	Ausfluss aus der Öffnung eines Behälters nach Hutter (2003)	2
Bild 2.1	Formen der freien Oberfläche von Fluiden (gemäß Sigloch (2017)) a) Randwinkel $\alpha < 90^\circ$, z.B. Wasser/Glas (Adhäsion $>$ Kohäsion) b) Randwinkel $\alpha > 90^\circ$, z.B. Quecksilber/Glas (Adhäsion $<$ Kohäsion)	6
Bild 2.2	Bestimmung der Kapillarspannung an einem Modellversuch (nach Sigloch (2017))	6
Bild 2.3	Kapillarwirkung	7
Bild 2.4	Scherströmung zwischen zwei parallelen Flächen	8
Bild 2.5	Eigenschaften Newtonscher und nichtnewtonscher Fluide (Durst (2006))	10
Bild 2.6	Bewegung eines Stromfadens	14
Bild 2.7	Durchfluss durch eine Stromröhre	14
Bild 2.8	Durchströmtes Raumelement	15
Bild 2.9	Kräfte auf ein Fluidteilchen in Bewegungsrichtung s	16
Bild 2.10	Kräfte auf ein Fluidteilchen in Normalrichtung n	16
Bild 2.11	Orts-, Druck und Geschwindigkeitshöhe in der BERNOULLI-Gleichung	18
Bild 2.12	Ausfluss einer inkompressiblen Flüssigkeit aus einem Behälter nach Hutter (2003)	19
Bild 2.13	Ausfluss eines Fluids durch eine Öffnung aus einem Behälter a) Zur Berechnung der Ausflussgeschwindigkeit und Strahlreaktion b) Strahlkontraktion bei scharfkantigen Öffnungen	21
Bild 2.14	Fließgeschwindigkeiten von Grundwasserströmungen im Boden (Kolymbas (2019))	25
Bild 2.15	Durchströmung einer Bodenprobe (Aulbach (2013))	26
Bild 2.16	Nach oben gerichtete Strömung bei einer schmalen Baugrube nach EAB (DGGT (2012))	28
Bild 2.17	Versuch zum Versagen durch hydraulischen Grundbruch von Katzenbach et al. (2011)	28
Bild 2.18	Aufschwimmen einer Baugrube nach Witt (2018)	29
Bild 2.19	Innere Erosion a) in einer Bodenschicht, b) an einer Schichtgrenze und c) an einer Kontaktfläche zwischen Boden und Bauwerk nach Aulbach (2013)	29
Bild 2.20	Entwicklung von Piping an Uferwänden nach EAU (DGGT (2012))	30
Bild 2.21	Bodenkörner eines wassergesättigten Bodens a) stabiler Lagerungszustand b) verflüssigter Zustand gemäß Müller-Kirchenbauer (1964)	30

Bild 2.22	Bernatzki-Versuch gemäß (Raju (1994)) a) Systemskizze b) kontraktantes Verhalten von locker gelagertem Sand c) gemessener Porenwasserdruckanstieg während des Versuchs	31
Bild 2.23	Poröses Medium a) geometrische Darstellung b) verschmiertes Modell	32
Bild 2.24	Bestimmung des Verschiebungsvektors mittels der PIV-Methode	34
Bild 2.25	Messprinzip gemäß Raffel et al. (1998)	35
Bild 2.26	Unterteilung des Gesamtbildes in Interrogation Areas	35
Bild 2.27	Image Intensity Field für eine einzelne Aufnahme nach Raffel et al. (1998)	36
Bild 2.28	a) Image Intensity Field für zwei Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten	37
Bild 2.29	Verteilung der aufgetretenen Verschiebungen in der Kreuzkorrelation nach Raffel et al. (1998)	38
Bild 3.1	Fließverhalten nach Torricelli gemäß Hutter (2003)	39
Bild 3.2	Auslass mit Klappe zum Ausfließen des wassergesättigten Bodens	41
Bild 3.3	Konstruktionsskizze Versuchsstand	42
Bild 3.4	Vorversuch ohne zusätzliche Wasserzugabe	43
Bild 3.5	Filterschicht	43
Bild 3.6	Experimenteller Versuchsstand zur Untersuchung des Fließverhaltens von wassergesättigten grobkörnigen Böden	45
Bild 3.7	Versuchsmaterialien	46
Bild 3.8	Kornverteilungskurven der Versuchsmaterialien	47
Bild 3.9	Einbauvorrichtung zum Einbau des Sandes in einer dichten (links) bzw. lockeren Lagerung (rechts) (Bachmann (2009))	49
Bild 3.10	Einbau dichte Lagerung (Bachmann (2009))	49
Bild 3.11	Einbau lockere Lagerung (Bachmann (2009))	50
Bild 3.12	Versuchsoptimierte Einbautechnik nach der Darmstädter Einrieselungsmethode	51
Bild 3.13	Einbauvorrichtung	52
Bild 3.14	Ablauf Versuchseinbau	52
Bild 3.15	Optischen Messungen von oben mit einer Videokamera	55
Bild 3.16	Auswertung der optischen Messungen für einen Versuch mit Kies 2,0-4,0 mm	55
Bild 3.17	Anordnung Absolutdruckaufnehmer	56
Bild 3.18	Messergebnisse der seitlich angeordneten Absolutdruckaufnehmer bei einem Versuch mit Wasser	57
Bild 3.19	Druckmessung der seitlich angeordneten Absolutdruckaufnehmer bei einem Versuch mit wassergesättigtem Kies 4,0-8,0 mm	58
Bild 3.20	Aus der Druckmessung ermittelte Wasserspiegelhöhe (Druckhöhe) im Vergleich zum optisch gemessenen Wasserstand bei einem Versuch mit wassergesättigtem Kies 4,0-8,0 mm	59

Bild 3.21	Messergebnisse der Absolutdruckaufnehmer bei einem Versuch mit wassergesättigtem Kies 2,0-4,0 mm	59
Bild 3.22	Anordnung Kraftmessdosen	60
Bild 3.23	Messergebnisse der Kraftmessdosen bei einem Versuch mit wassergesättigtem Kies 2,0-4,0 mm	61
Bild 3.24	Versuchsstand mit abgedunkeltem Stahlgerüst	61
Bild 3.25	Ausfließen des wassergesättigten Bodens aus dem Versuchsstand	62
Bild 3.26	Schiefstellung des wassergesättigten Bodens während des Fließprozesses	63
Bild 3.27	Definiertes Versuchsende	63
Bild 3.28	Im Versuchsstand verbliebenes Versuchsmaterial nach dem Ende der Fließbewegung	64
Bild 3.29	Variable Auslasshöhe des Versuchsstandes	64
Bild 3.30	Versuchsergebnisse wassergesättigter Kies 4,0-8,0 mm mit unterschiedlichen Auslasshöhen	65
Bild 3.31	Vergleich der Versuchsergebnisse von wassergesättigtem Kies 4,0-8,0 mm bei lockerer und mitteldichter Lagerung	66
Bild 4.1	Aufzeichnungsbereich im unteren Drittel des Versuchsstandes mit der High-Speed-Kamera	68
Bild 4.2	Ansicht des Versuchsstands mit den definierten Bereichen zur Analyse der Geschwindigkeiten mittels der PIV-Methode	69
Bild 4.3	Analysebereiche unmittelbar am Auslass	70
Bild 4.4	Geschwindigkeitsverteilung des Sandes 0,25-2,0 mm im Aufzeichnungsbereich zu verschiedenen Zeitpunkten	73
Bild 4.5	Geschwindigkeitsverteilung des Kieses 2,0-4,0 mm im Aufzeichnungsbereich zu verschiedenen Zeitpunkten	75
Bild 4.6	Geschwindigkeitsverteilung des Kiese 4,0-8,0 mm im Aufzeichnungsbereich zu verschiedenen Zeitpunkten	77
Bild 4.7	Geschwindigkeitsverteilung des Sandes 8,0-16,0 mm im Aufzeichnungsbereich zu verschiedenen Zeitpunkten	79
Bild 4.8	Geschwindigkeitsverteilung des stark sandigen Kieses im Aufzeichnungsbereich zu verschiedenen Zeitpunkten	81
Bild 4.9	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm im Bereich des Auslasses	83
Bild 4.10	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm im Bereich des Auslasses	84
Bild 4.11	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm im Bereich des Auslasses	85
Bild 4.12	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm im Bereich des Auslasses	86
Bild 4.13	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies im Bereich des Auslasses	87

Bild 4.14	Vergleich der Geschwindigkeiten verschiedenen Böden im Auslassbereich	88
Bild 4.15	Vergleich der Geschwindigkeiten des Sandes 0,25-2,0 mm oben, mittig und unten im Bereich des Auslasses	89
Bild 4.16	Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 2,0-4,0 mm oben, mittig und unten im Bereich des Auslasses	90
Bild 4.17	Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 4,0-8,0 mm oben, mittig und unten im Bereich des Auslasses	91
Bild 4.18	Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 8,0-16,0 mm oben, mittig und unten im Bereich des Auslasses	92
Bild 4.19	Vergleich der Geschwindigkeiten des stark sandigen Kieses oben, mittig und unten im Bereich des Auslasses	93
Bild 4.20	Vergleich der Geschwindigkeiten des Sandes 0,25-2,0 mm in den Bereichen A1, A2 und A3 gemäß Bild 4.2	95
Bild 4.21	Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 2,0-4,0 mm in den Bereichen A1, A2 und A3 gemäß Bild 4.2	96
Bild 4.22	Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 4,0-8,0 mm in den Bereichen A1, A2 und A3 gemäß Bild 4.2	97
Bild 4.23	Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 8,0-16,0 mm in den Bereichen A1, A2 und A3 gemäß Bild 4.2	98
Bild 4.24	Vergleich der Geschwindigkeiten des stark sandigen Kieses in den Bereichen A1, A2 und A3 gemäß Bild 4.2	99
Bild 4.25	Vergleich der Geschwindigkeiten des Sandes in den Bereichen A1, A4 und A7 gemäß Bild 4.2	101
Bild 4.26	Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 2,0-4,0 mm in den Bereichen A1, A4 und A7 gemäß Bild 4.2	101
Bild 4.27	Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 4,0-8,0 mm in den Bereichen A1, A4 und A7 gemäß Bild 4.2	102
Bild 4.28	Vergleich der Geschwindigkeiten des Kieses 8,0-16,0 mm in den Bereichen A1, A4 und A7 gemäß Bild 4.2	103
Bild 4.29	Vergleich der Geschwindigkeiten des stark sandigen Kieses in den Bereichen A1, A4 und A7 gemäß Bild 4.2	104
Bild 4.30	Geschwindigkeit des Sandes direkt am Auslass (A1) und Spannungsänderung über die Zeit	106
Bild 4.31	Geschwindigkeit des Kieses 2,0-4,0 mm direkt am Auslass (A1) und Spannungsänderung über die Zeit	107
Bild 4.32	Geschwindigkeit des Kieses 4,0-8,0 mm direkt am Auslass (A1) und Spannungsänderung über die Zeit	108
Bild 4.33	Geschwindigkeit des Kieses 8,0-16,0 mm direkt am Auslass (A1) und Spannungsänderung über die Zeit	109
Bild 4.34	Geschwindigkeit des stark sandigen Kieses direkt am Auslass (A1) und Spannungsänderung über die Zeit	110

Bild 4.35	Bestimmung der Ausflusszahl μ anhand experimenteller Untersuchungen für den Großversuchsstand	112
Bild 4.36	Definition der Höhe h im Versuchsstand zum Vergleich der Geschwindigkeiten mit Wasser nach Torricelli	113
Bild 4.37	Vergleich der Geschwindigkeit des Sandes 0,25-2,0 mm mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli	114
Bild 4.38	Vergleich der Geschwindigkeit des Kiese 2,0-4,0 mm mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli	115
Bild 4.39	Vergleich der Geschwindigkeit des Kiese 4,0-8,0 mm mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli	116
Bild 4.40	Vergleich der Geschwindigkeit des Kiese 8,0-16,0 mm mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli	117
Bild 4.41	Vergleich der Geschwindigkeit des stark sandigen Kiese mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli	118
Bild 4.42	Vergleich der Geschwindigkeiten aller Versuchsmaterialien mit der Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli	119
Bild 5.1	Regressionsanalyse für gleichförmige Böden	124
Bild 5.2	Regressionsanalyse für ungleichförmige Böden	125
Bild A.1	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich des Auslasses (A1)	153
Bild A.2	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich des Auslasses (A1)	153
Bild A.3	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich des Auslasses (A1)	154
Bild A.4	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich des Auslasses (A1)	154
Bild A.5	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich des Auslasses (A1)	154
Bild A.6	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich des Auslasses (A1)	155
Bild A.7	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich des Auslasses (A1)	155
Bild A.8	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich des Auslasses (A1)	155
Bild A.9	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich des Auslasses (A1)	156
Bild A.10	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich des Auslasses (A1)	156
Bild A.11	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich des Auslasses (A1)	156
Bild A.12	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich des Auslasses (A1)	157

Bild A.13	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich des Auslasses (A1)	157
Bild A.14	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich des Auslasses (A1)	157
Bild A.15	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich des Auslasses (A1)	158
Bild A.16	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	158
Bild A.17	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	159
Bild A.18	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	159
Bild A.19	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	159
Bild A.20	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	160
Bild A.21	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	160
Bild A.22	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	160
Bild A.23	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	161
Bild A.24	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	161
Bild A.25	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	161
Bild A.26	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	162
Bild A.27	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	162
Bild A.28	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	162
Bild A.29	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	163
Bild A.30	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2	163
Bild A.31	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	164
Bild A.32	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	164
Bild A.33	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	165

Bild A.34	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	165
Bild A.35	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	165
Bild A.36	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	166
Bild A.37	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	166
Bild A.38	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	166
Bild A.39	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	167
Bild A.40	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	167
Bild A.41	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	167
Bild A.42	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	168
Bild A.43	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	168
Bild A.44	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	168
Bild A.45	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2	169
Bild A.46	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	169
Bild A.47	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	170
Bild A.48	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	170
Bild A.49	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	170
Bild A.50	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	171
Bild A.51	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	171
Bild A.52	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	171
Bild A.53	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	172
Bild A.54	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	172

Bild A.55	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	172
Bild A.56	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	173
Bild A.57	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	173
Bild A.58	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	173
Bild A.59	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	174
Bild A.60	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2	174
Bild A.61	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	175
Bild A.62	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	175
Bild A.63	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	176
Bild A.64	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	176
Bild A.65	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	176
Bild A.66	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	177
Bild A.67	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	177
Bild A.68	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	177
Bild A.69	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	178
Bild A.70	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	178
Bild A.71	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	178
Bild A.72	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	179
Bild A.73	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	179
Bild A.74	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	179
Bild A.75	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2	180

Bild A.76	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	180
Bild A.77	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	181
Bild A.78	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	181
Bild A.79	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	181
Bild A.80	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	182
Bild A.81	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	182
Bild A.82	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	182
Bild A.83	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	183
Bild A.84	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	183
Bild A.85	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	183
Bild A.86	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	184
Bild A.87	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	184
Bild A.88	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	184
Bild A.89	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	185
Bild A.90	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2	185
Bild A.91	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	186
Bild A.92	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	186
Bild A.93	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	187
Bild A.94	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	187
Bild A.95	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	187
Bild A.96	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	188

Bild A.97	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	188
Bild A.98	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	188
Bild A.99	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	189
Bild A.100	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	189
Bild A.101	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	189
Bild A.102	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	190
Bild A.103	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	190
Bild A.104	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	190
Bild A.105	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2	191
Bild A.106	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	191
Bild A.107	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	192
Bild A.108	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	192
Bild A.109	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	192
Bild A.110	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	193
Bild A.111	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	193
Bild A.112	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	193
Bild A.113	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	194
Bild A.114	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	194
Bild A.115	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	194
Bild A.116	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	195
Bild A.117	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	195

Bild A.118	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	195
Bild A.119	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	196
Bild A.120	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2	196
Bild A.121	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	197
Bild A.122	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	197
Bild A.123	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	198
Bild A.124	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	198
Bild A.125	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	198
Bild A.126	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	199
Bild A.127	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	199
Bild A.128	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	199
Bild A.129	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	200
Bild A.130	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	200
Bild A.131	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	200
Bild A.132	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	201
Bild A.133	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	201
Bild A.134	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	201
Bild A.135	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2	202

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Oberflächenspannung verschiedener Fluide nach Truckenbrodt (2008a)	7
Tabelle 2.2	Beiwerte α , φ und μ verschiedener kleiner Öffnungsformen nach Sigloch (2017)	23
Tabelle 2.3	Ausflusszahl μ für verschiedene große Öffnungen nach Sigloch (2017)	24
Tabelle 3.1	Bodenmechanische Kennwerte	47
Tabelle 4.1	Versuchsparameter	71
Tabelle 4.2	Verhältnis der Geschwindigkeit in den Bereichen A1_oben und A1_unten zur Geschwindigkeit im Bereich A1_mitte	94
Tabelle 4.3	Verhältnis der Geschwindigkeit in den Bereichen A2 und A3 zur Geschwindigkeit im Bereich A1	100
Tabelle 4.4	Verhältnis der Geschwindigkeit in den Bereichen A4 und A7 zur Geschwindigkeit im Bereich A1	105
Tabelle 4.5	Verhältnis der Geschwindigkeit im Bereich A1 des Bodens zur Geschwindigkeit von Wasser nach Torricelli	119
Tabelle 4.6	Verhältnis der Geschwindigkeit des Bodens zur Geschwindigkeit des Wassers in Verbindung mit ausgewählten Bodenparametern	121
Tabelle 5.1	Verhältnis der Geschwindigkeit des Bodens zur Geschwindigkeit des Wassers in Verbindung mit der Porenzahl n und der Ungleichförmigkeitszahl C_U	122

Anhang

Geschwindigkeitsentwicklung im Bereich des Auslasses (A1)

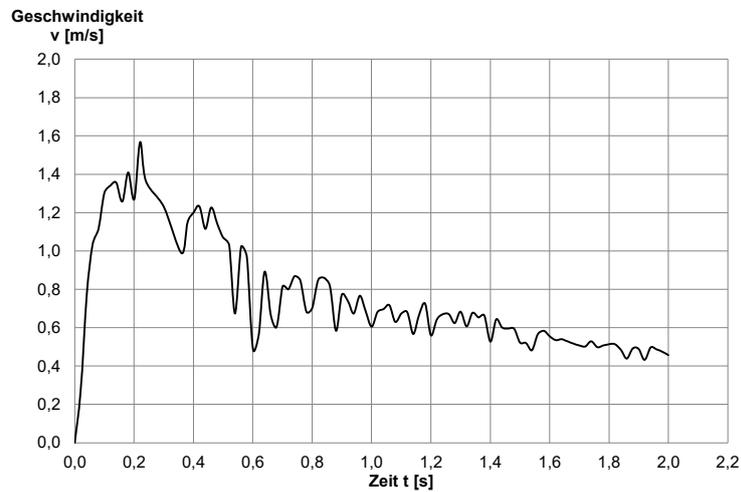


Bild A.1 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich des Auslasses (A1)

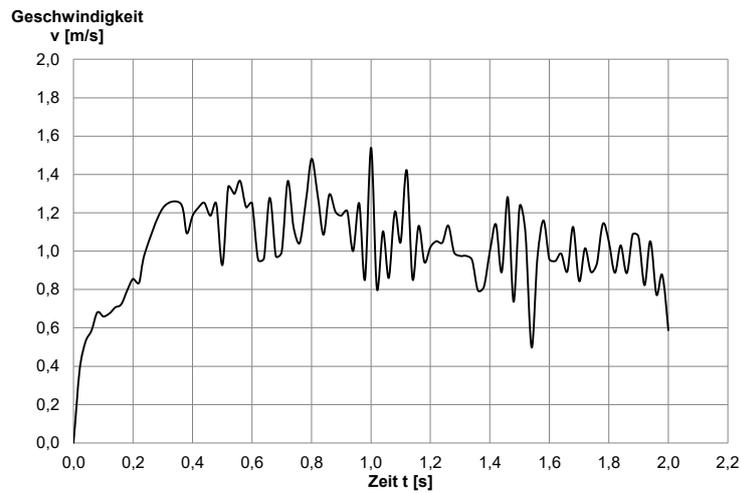


Bild A.2 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich des Auslasses (A1)

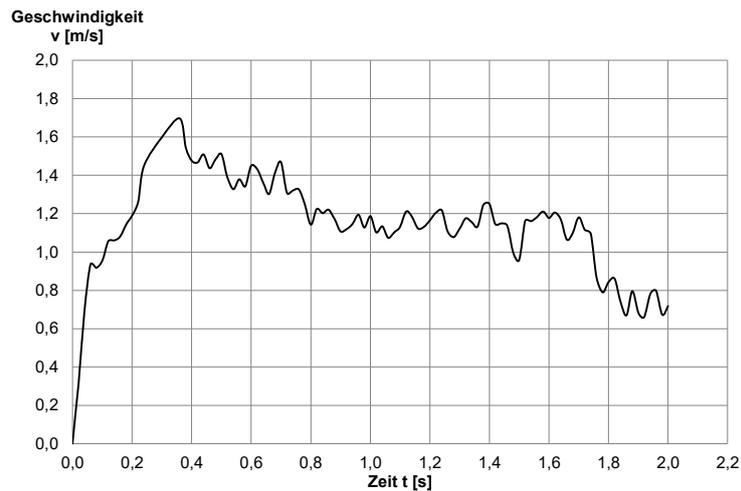


Bild A.3 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich des Auslasses (A1)

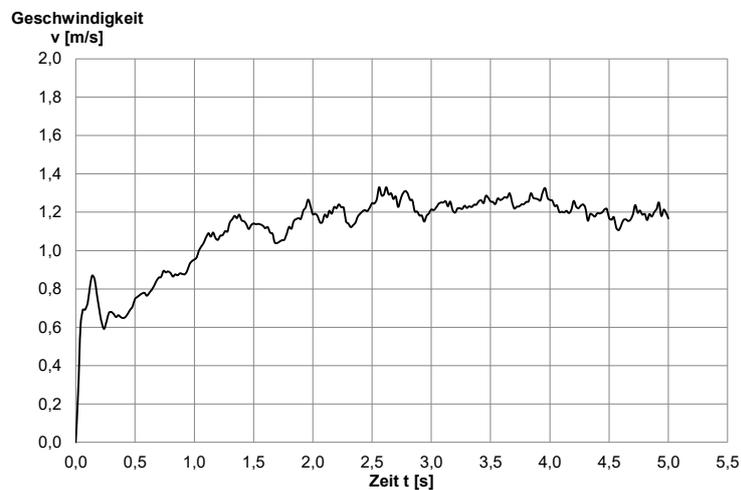


Bild A.4 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich des Auslasses (A1)

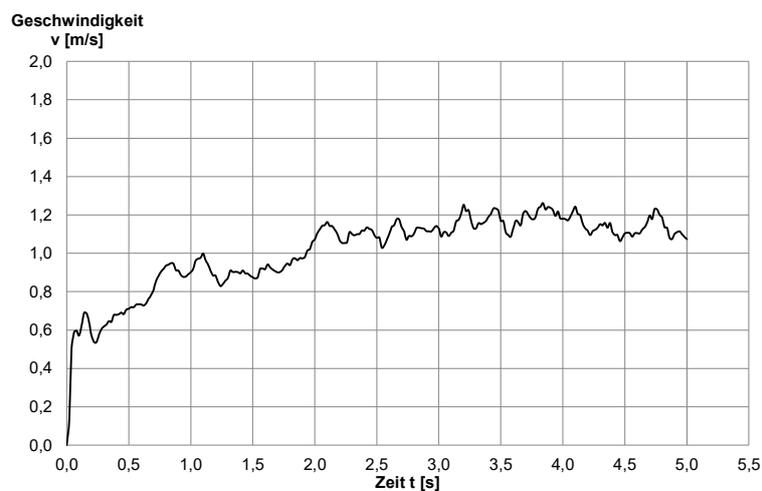


Bild A.5 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich des Auslasses (A1)

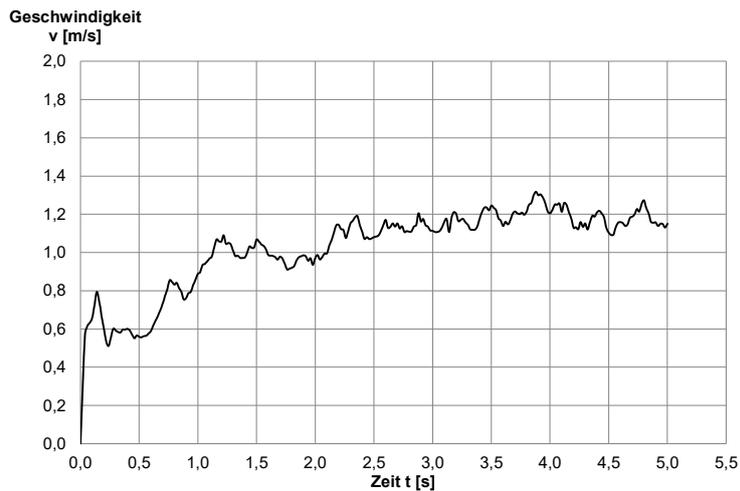


Bild A.6 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich des Auslasses (A1)

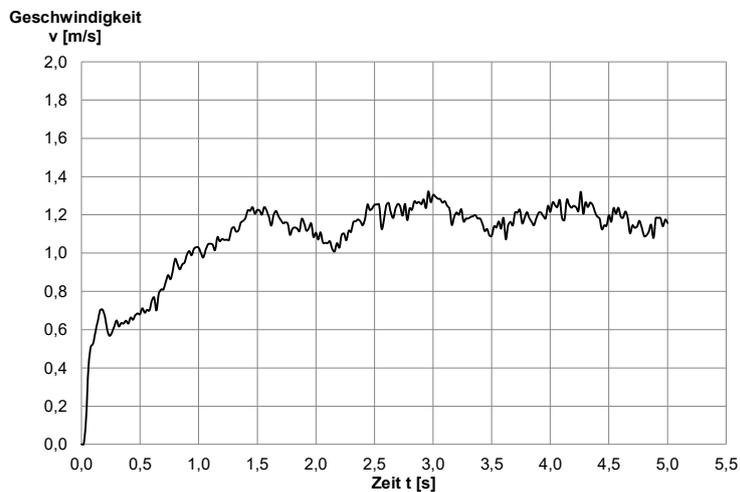


Bild A.7 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich des Auslasses (A1)

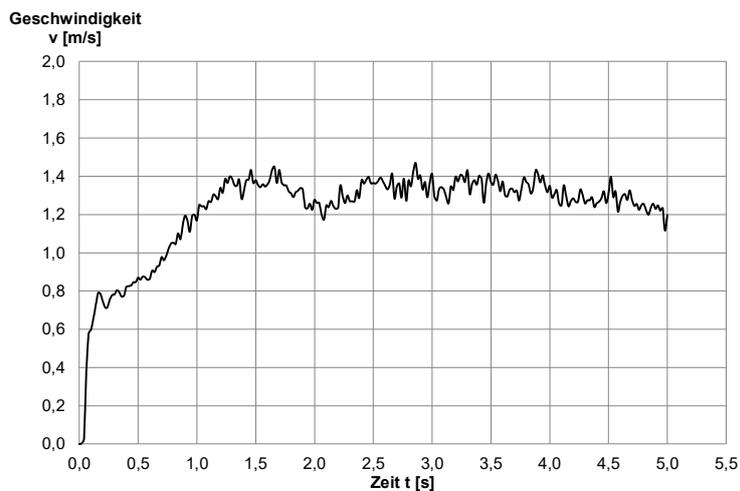


Bild A.8 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich des Auslasses (A1)

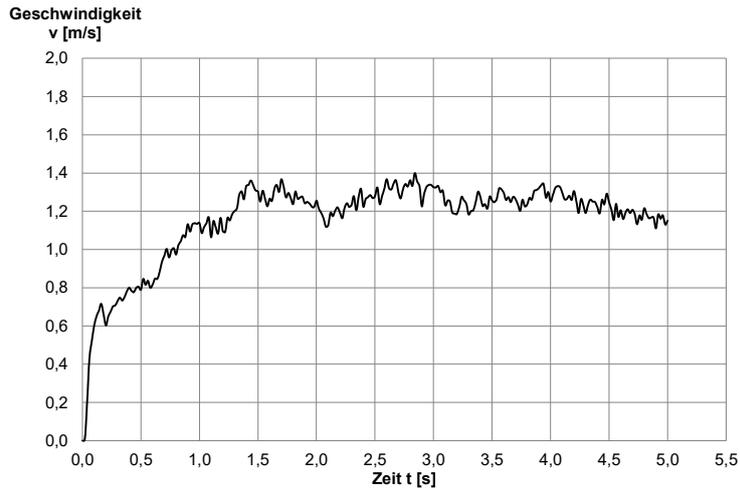


Bild A.9 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich des Auslasses (A1)

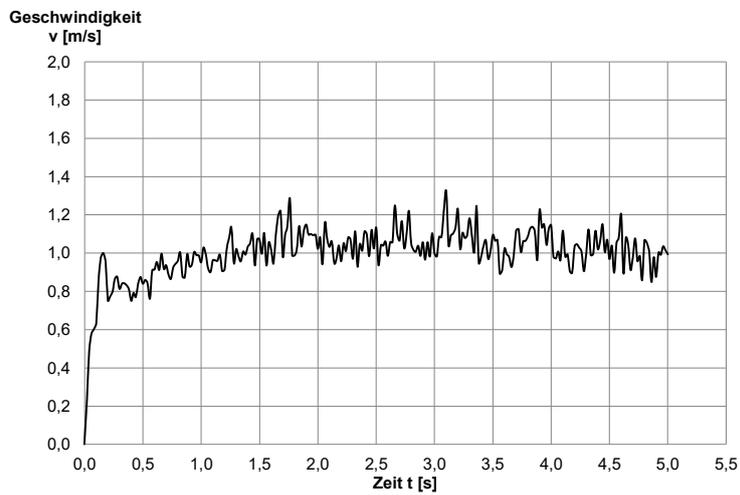


Bild A.10 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich des Auslasses (A1)

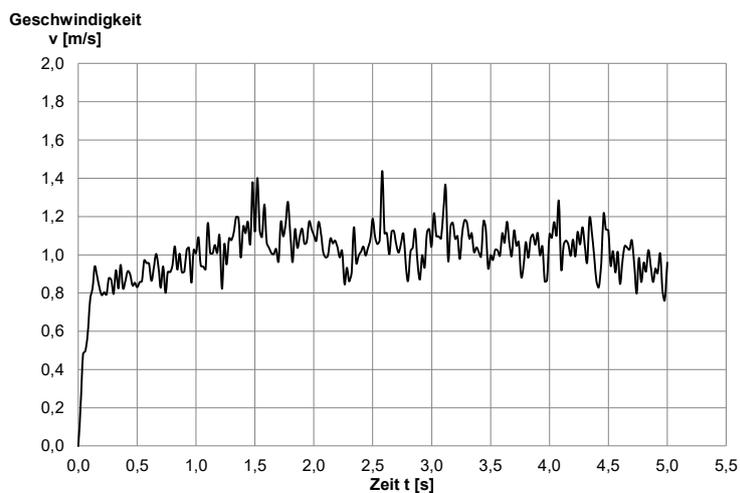


Bild A.11 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich des Auslasses (A1)

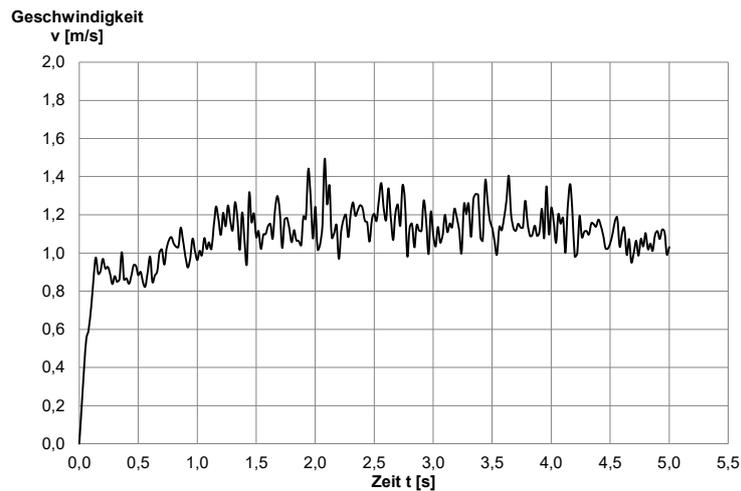


Bild A.12 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich des Auslasses (A1)

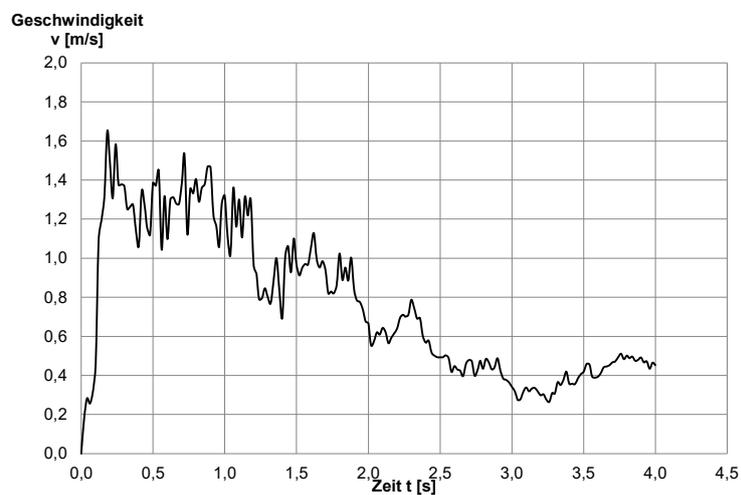


Bild A.13 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich des Auslasses (A1)

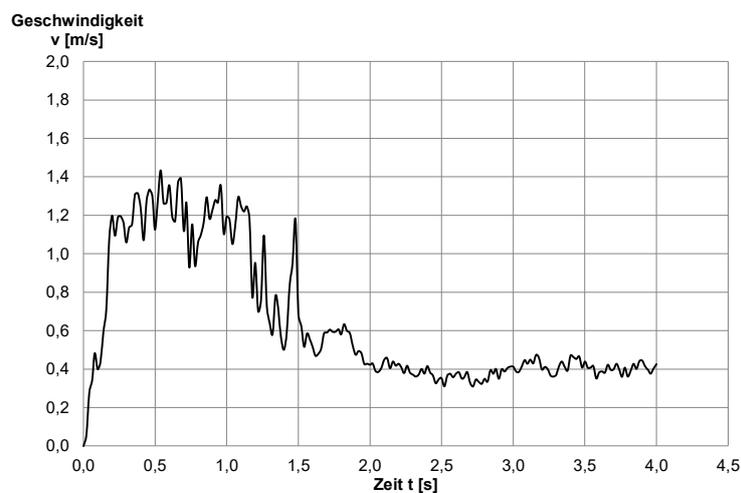


Bild A.14 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich des Auslasses (A1)

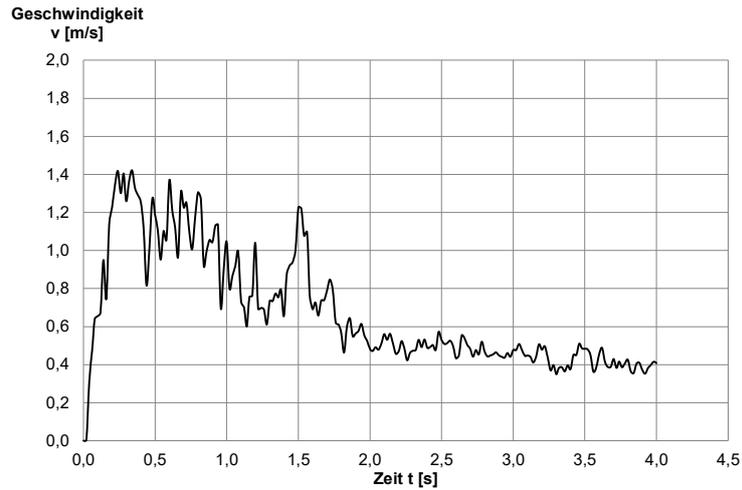


Bild A.15 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich des Auslasses (A1)

Geschwindigkeitsentwicklung neben dem Auslass, Bereich A2

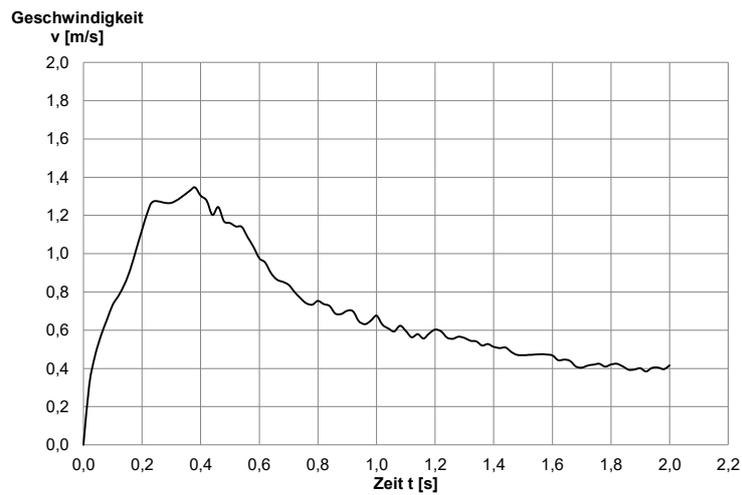


Bild A.16 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

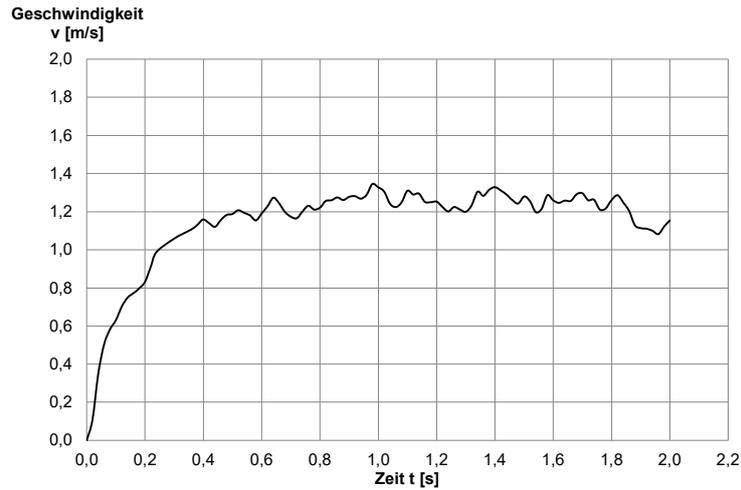


Bild A.17 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

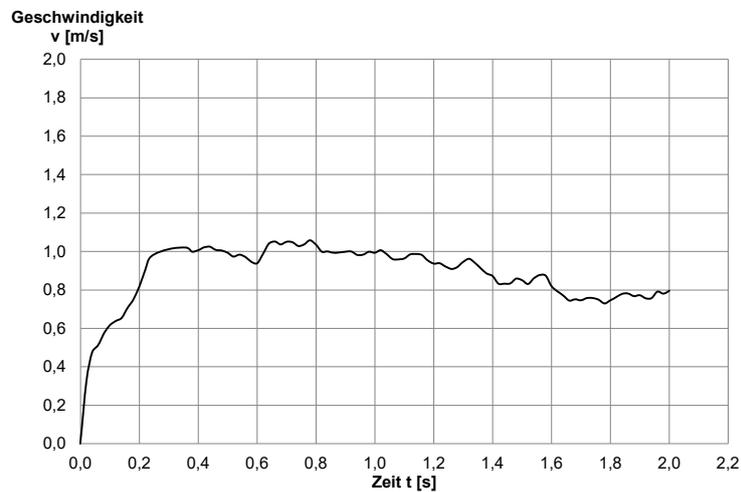


Bild A.18 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

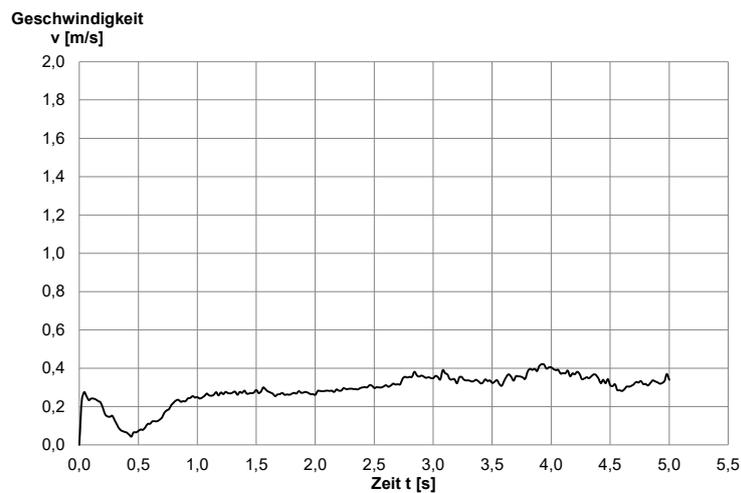


Bild A.19 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

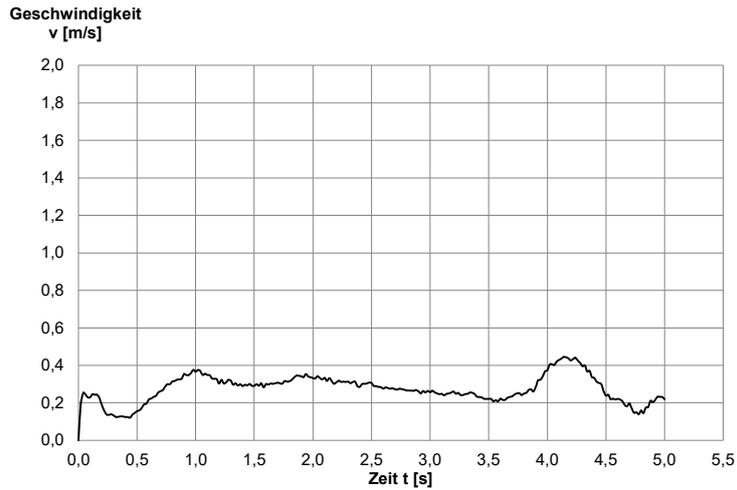


Bild A.20 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

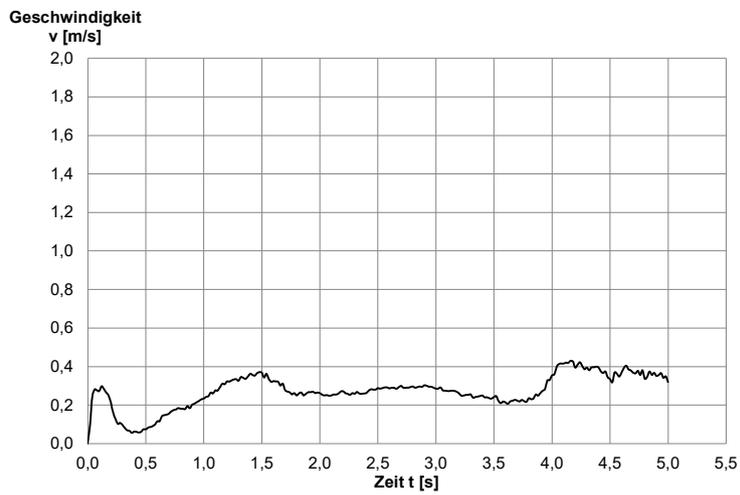


Bild A.21 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2



Bild A.22 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

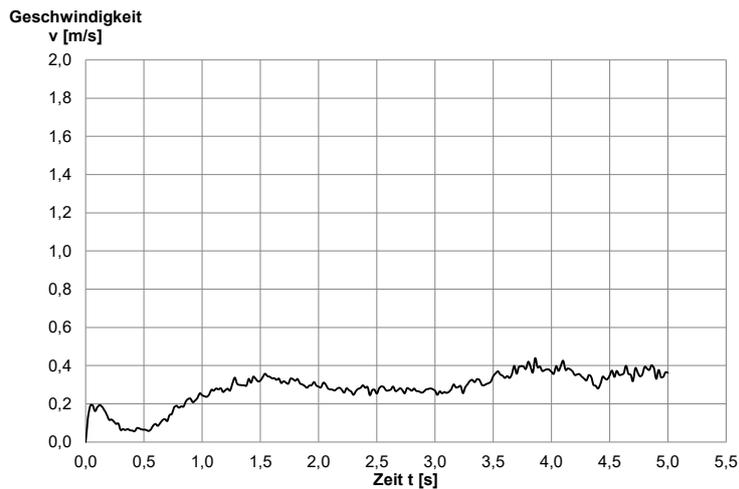


Bild A.23 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

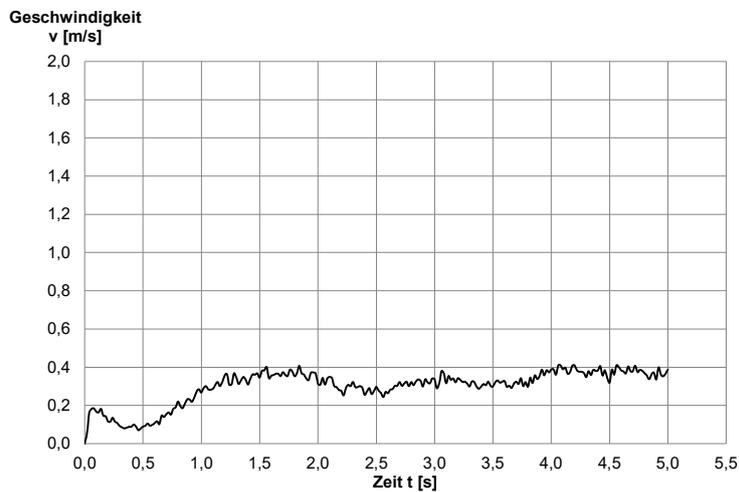


Bild A.24 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

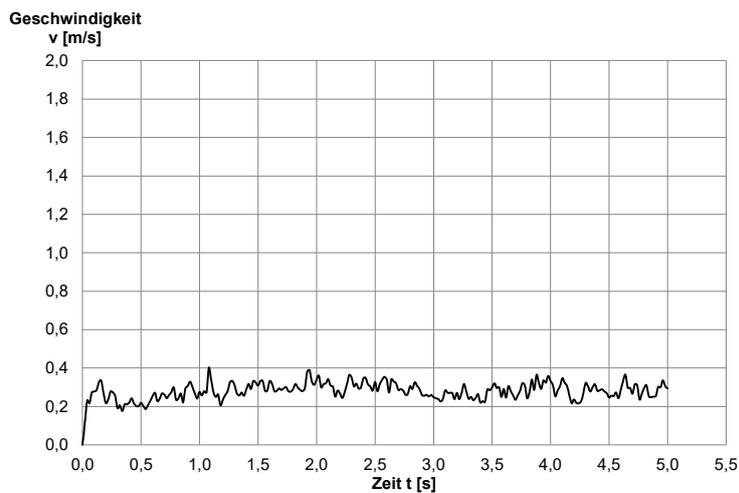


Bild A.25 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

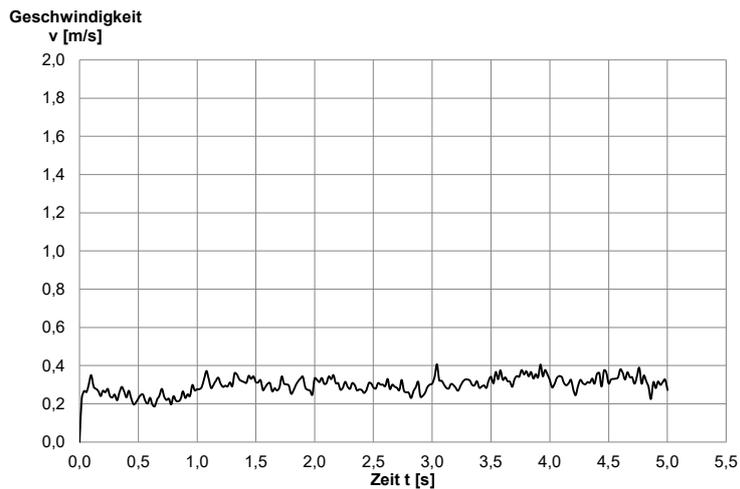


Bild A.26 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

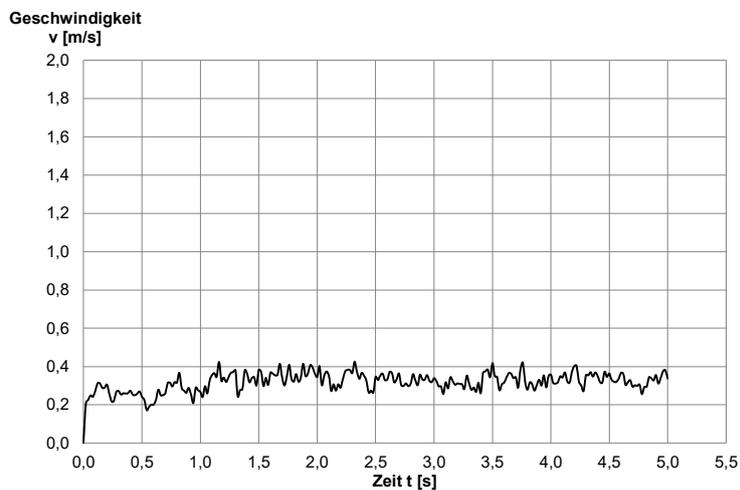


Bild A.27 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

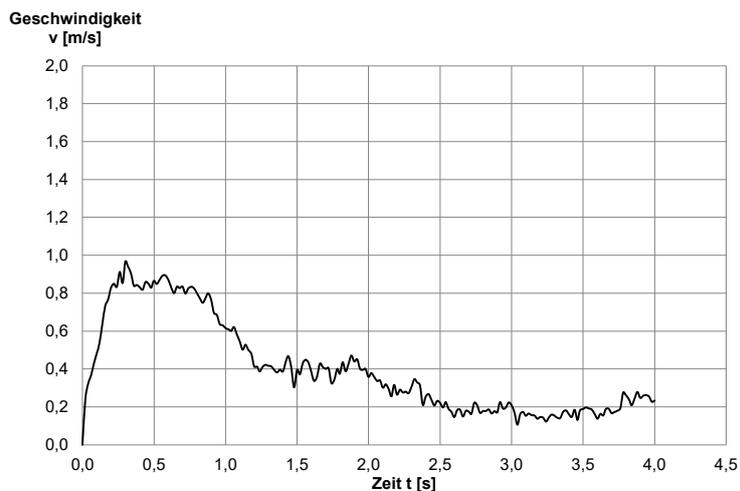


Bild A.28 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

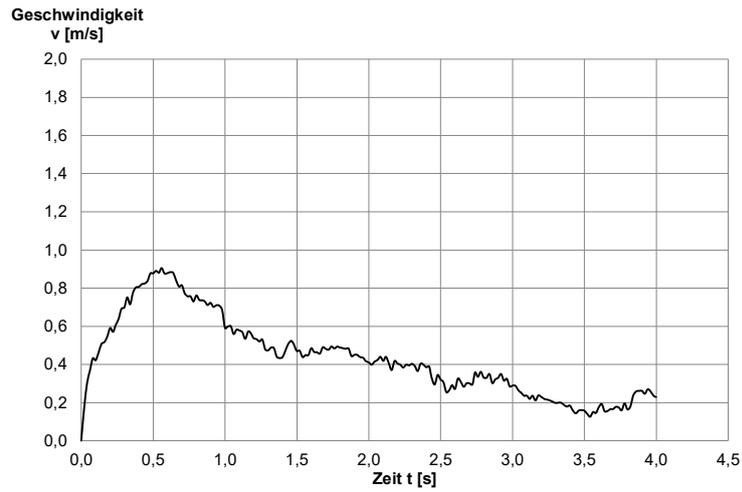


Bild A.29 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

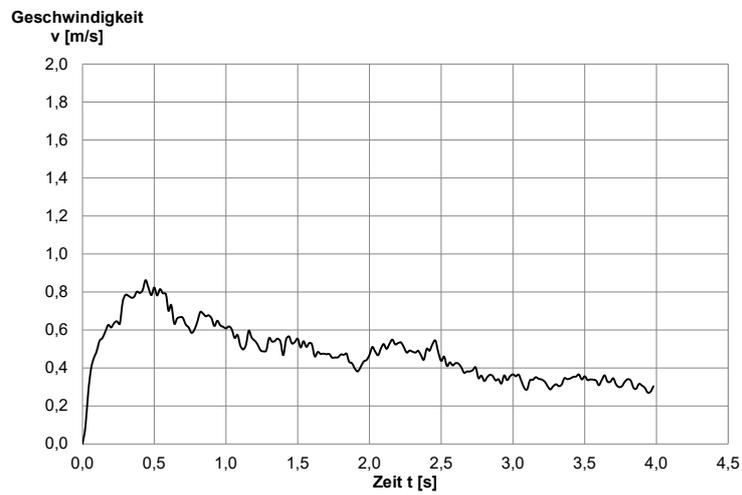


Bild A.30 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A2 gemäß Bild 4.2

Geschwindigkeitsentwicklung neben dem Auslass, Bereich A3

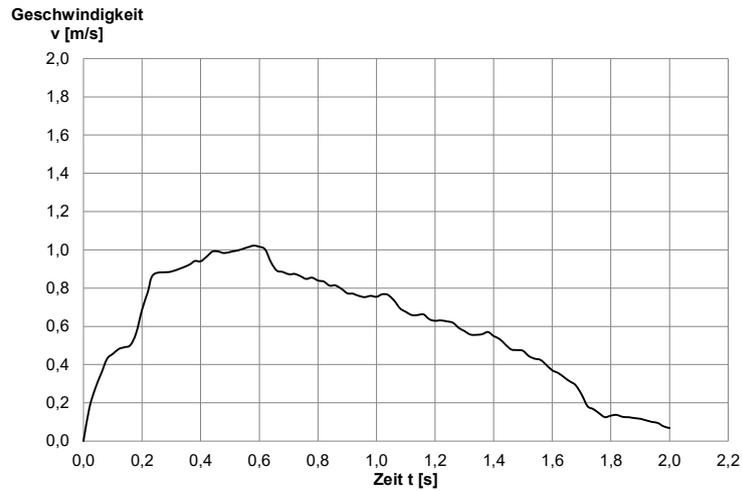


Bild A.31 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

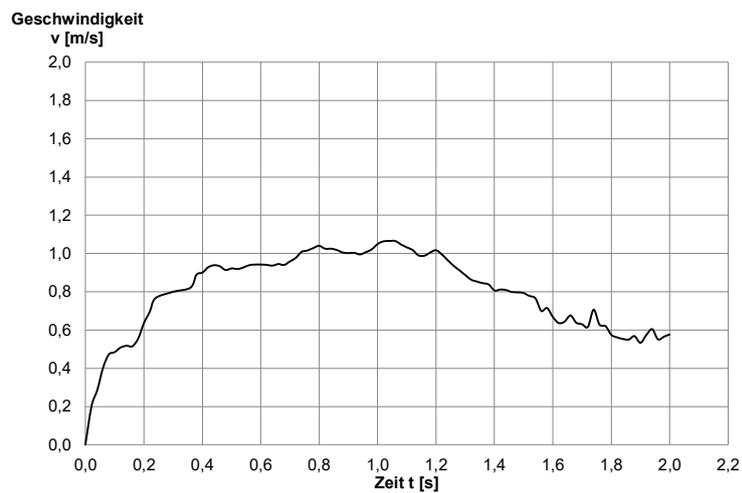


Bild A.32 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

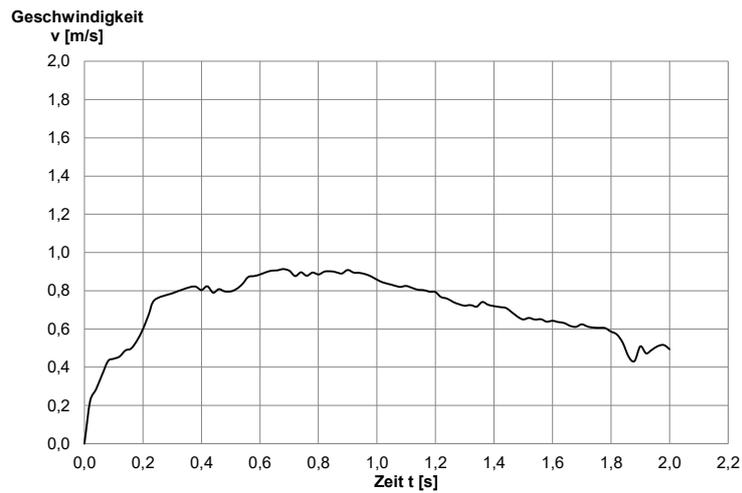


Bild A.33 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

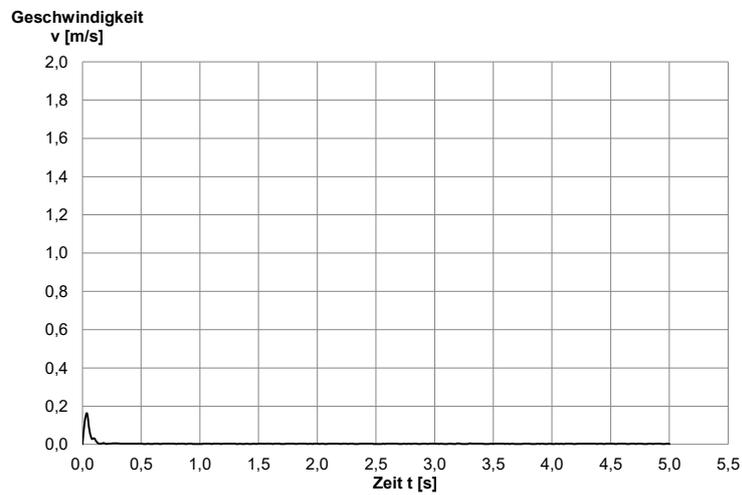


Bild A.34 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

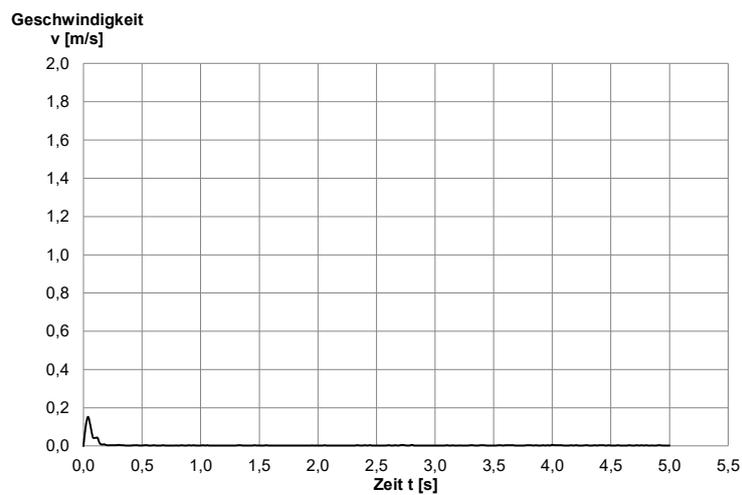


Bild A.35 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

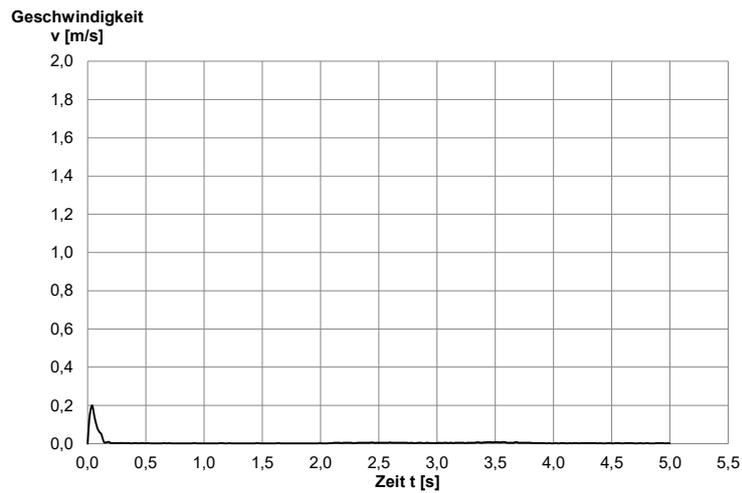


Bild A.36 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

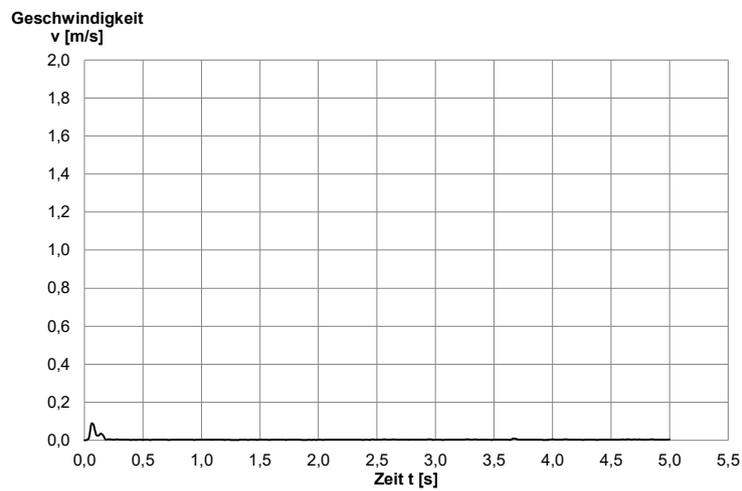


Bild A.37 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

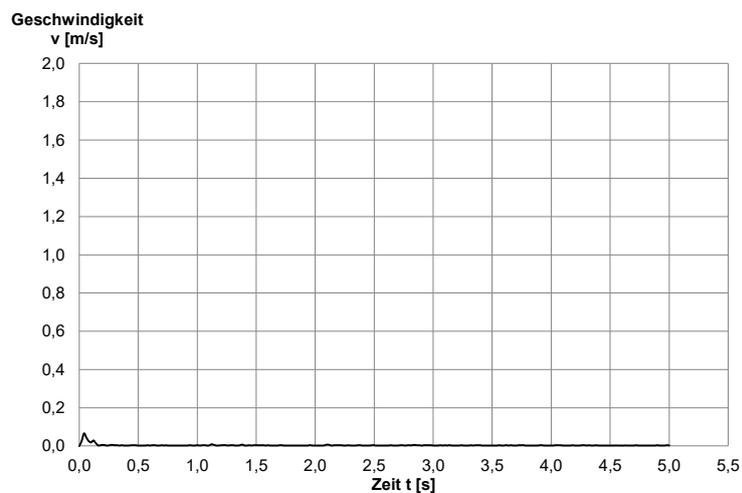


Bild A.38 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

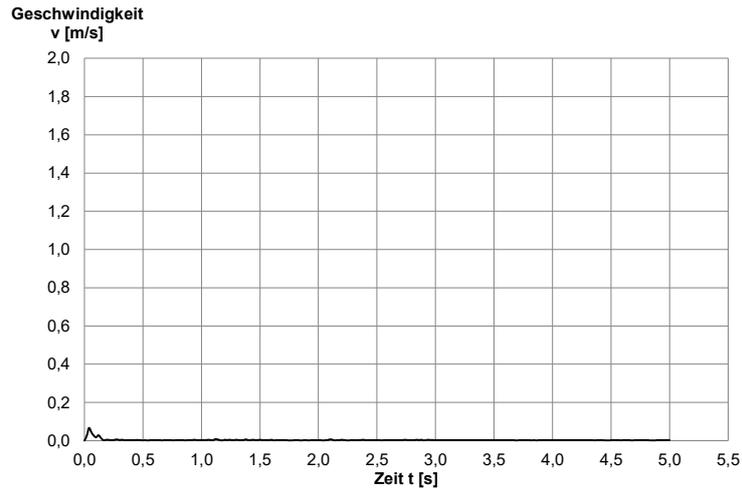


Bild A.39 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

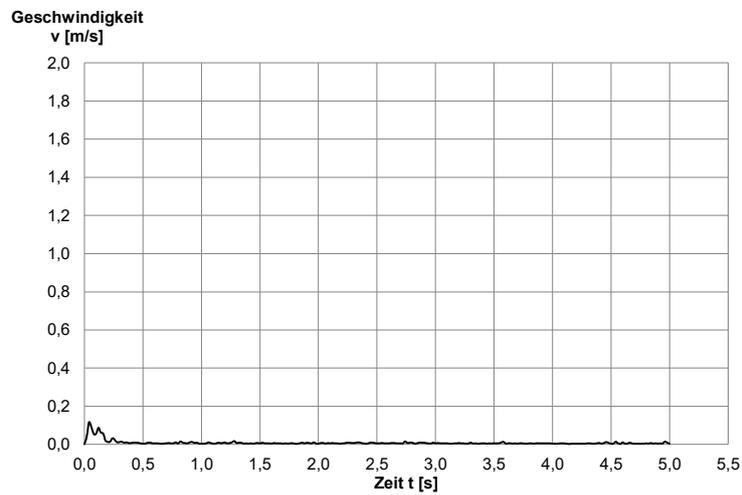


Bild A.40 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

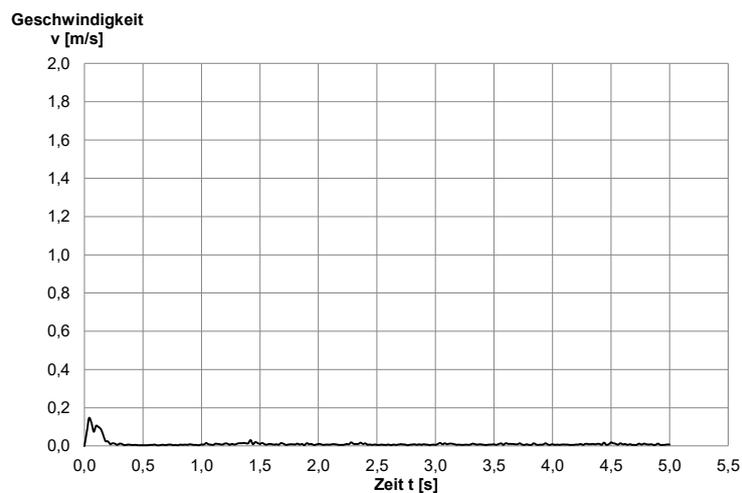


Bild A.41 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

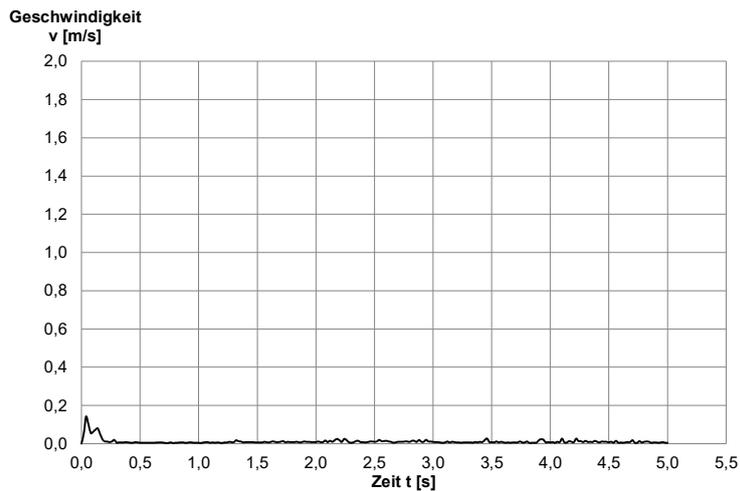


Bild A.42 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

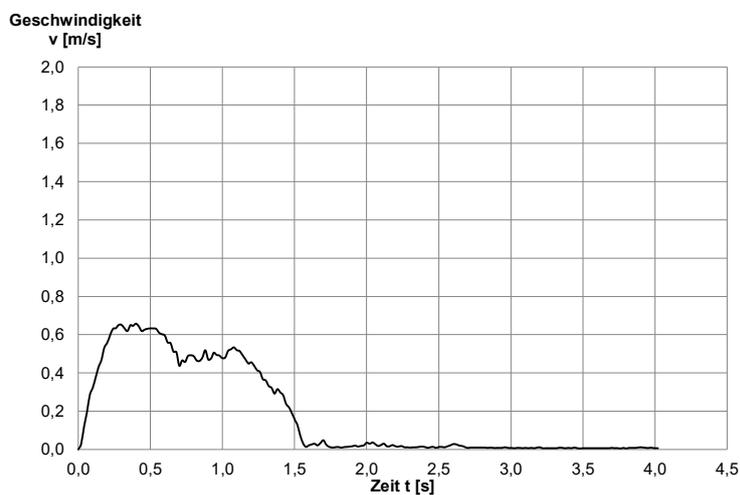


Bild A.43 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

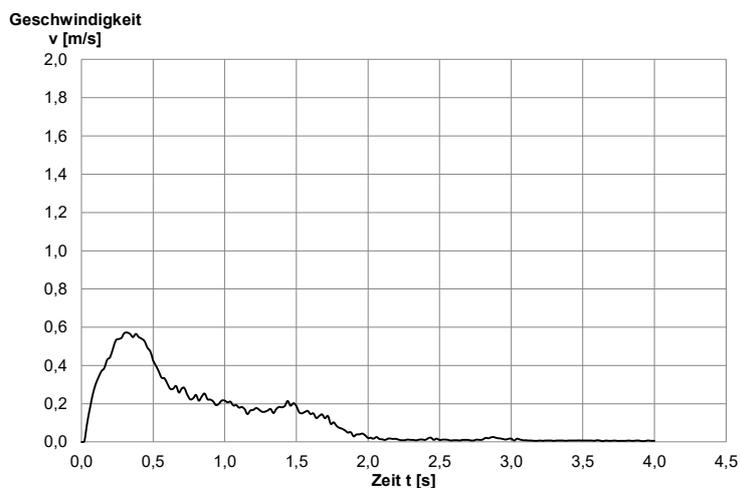


Bild A.44 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

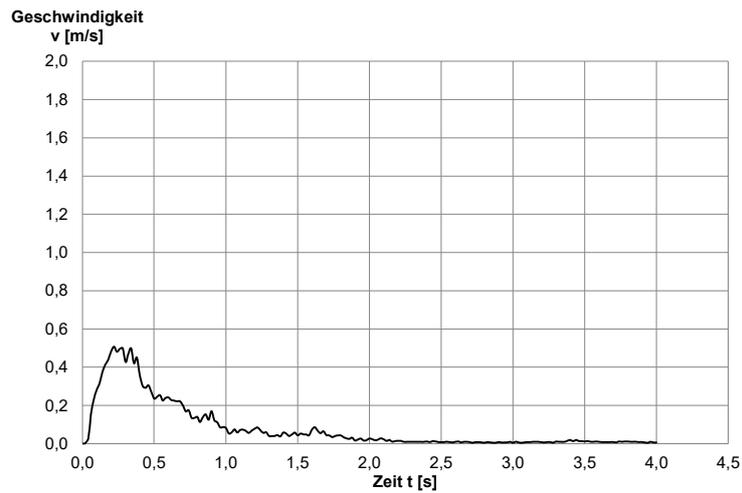


Bild A.45 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A3 gemäß Bild 4.2

Geschwindigkeitsentwicklung oberhalb des Auslasses, Bereich A4

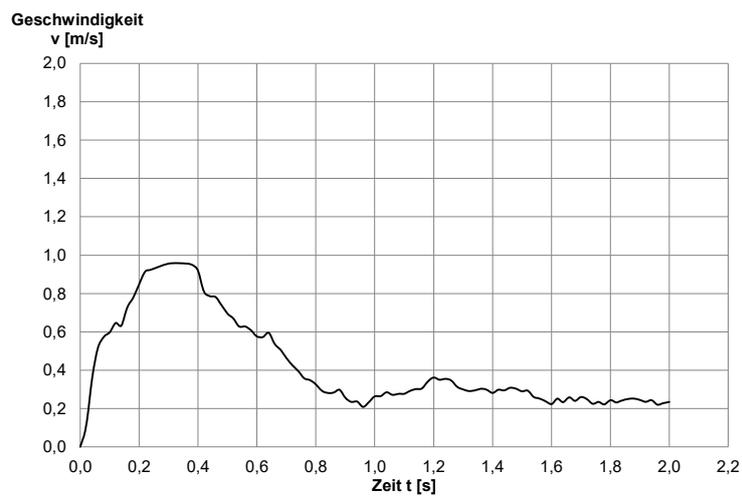


Bild A.46 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

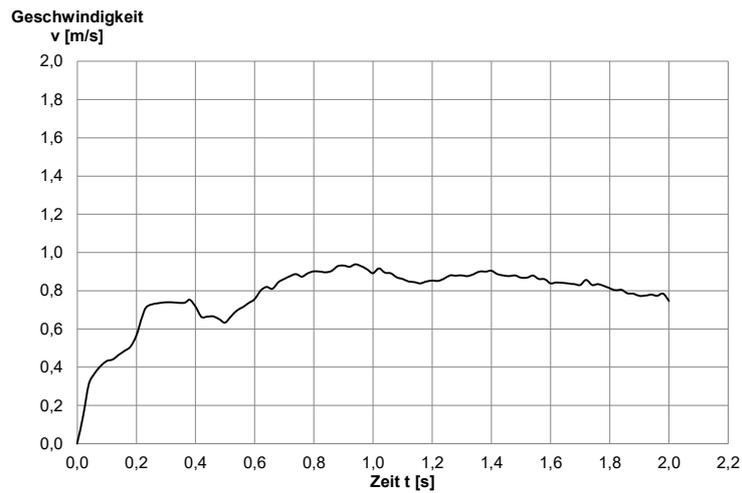


Bild A.47 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

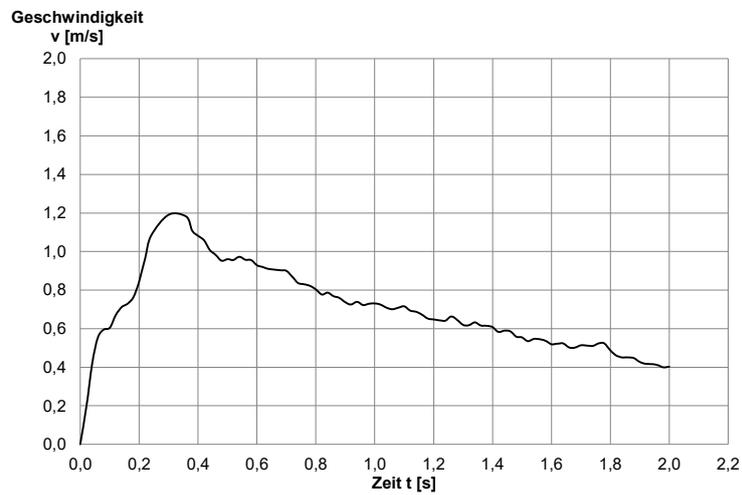


Bild A.48 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2



Bild A.49 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

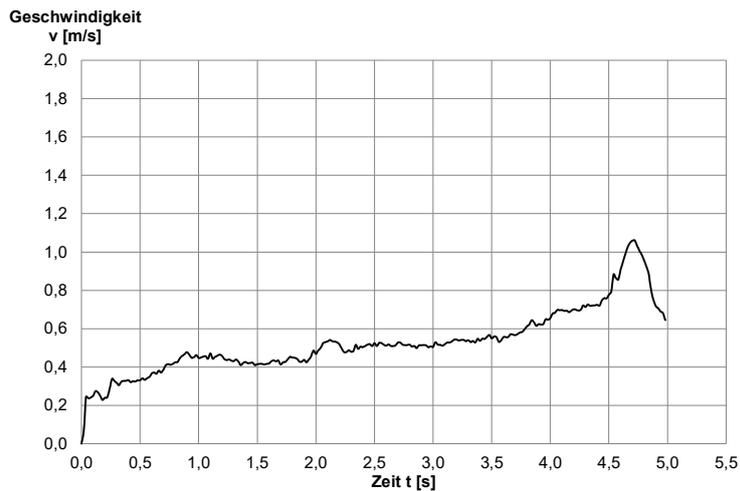


Bild A.50 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

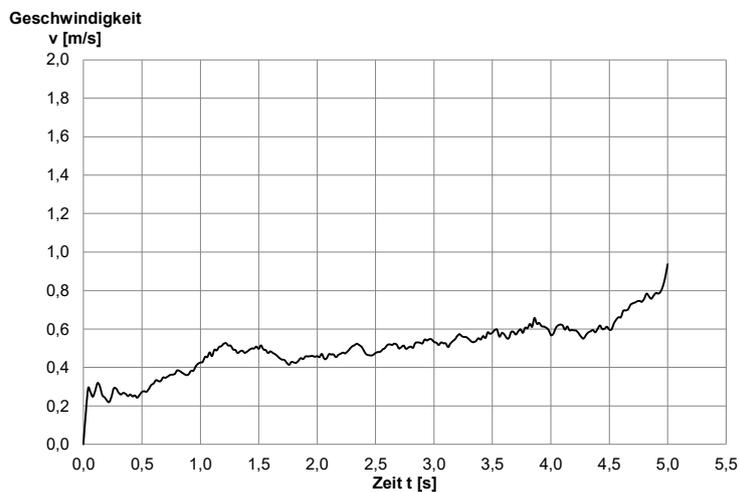


Bild A.51 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

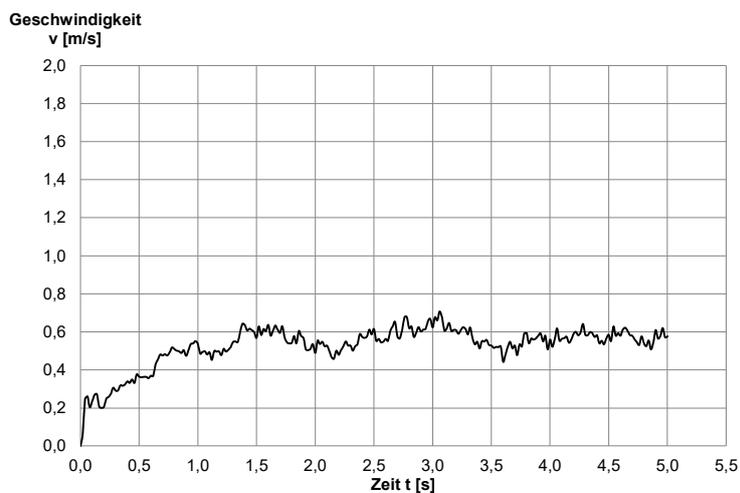


Bild A.52 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

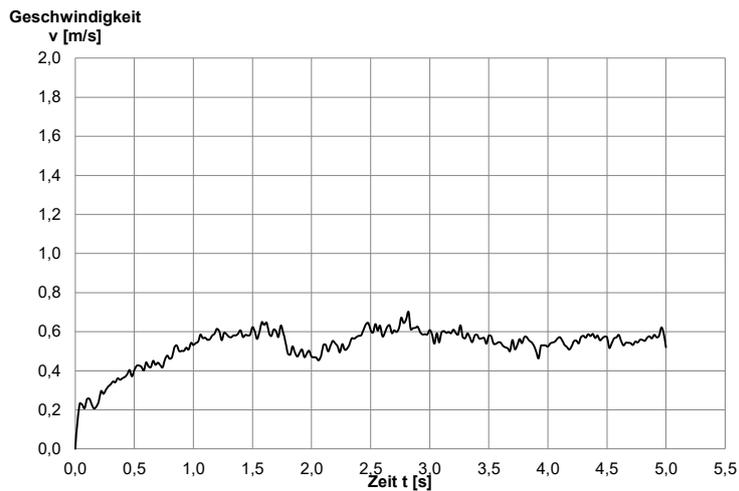


Bild A.53 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

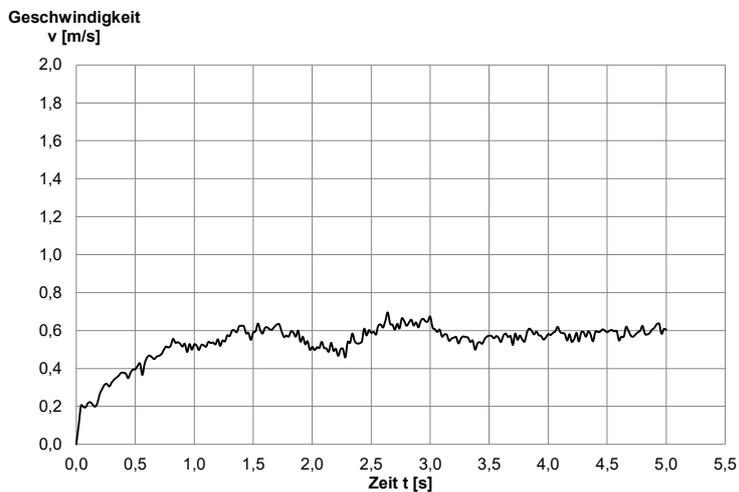


Bild A.54 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

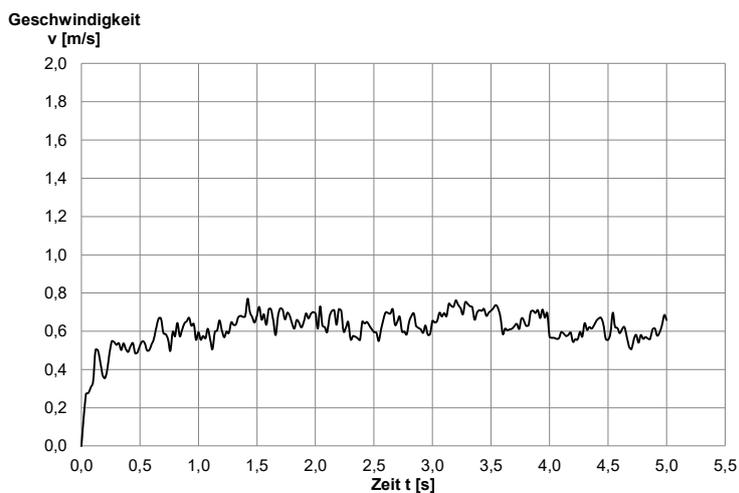


Bild A.55 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

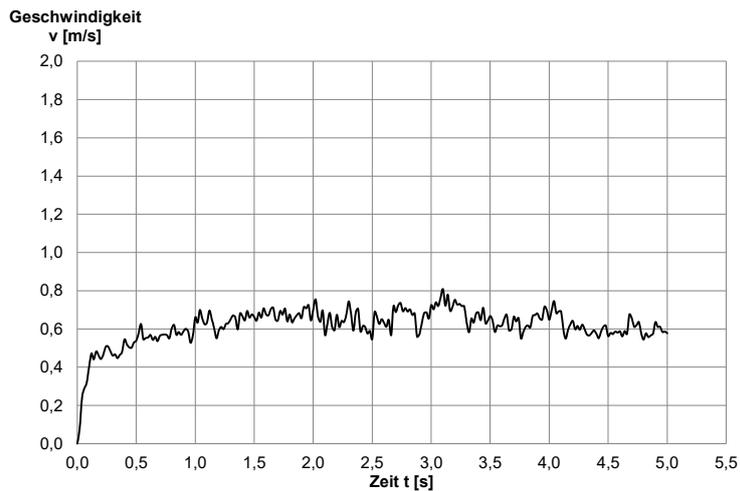


Bild A.56 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

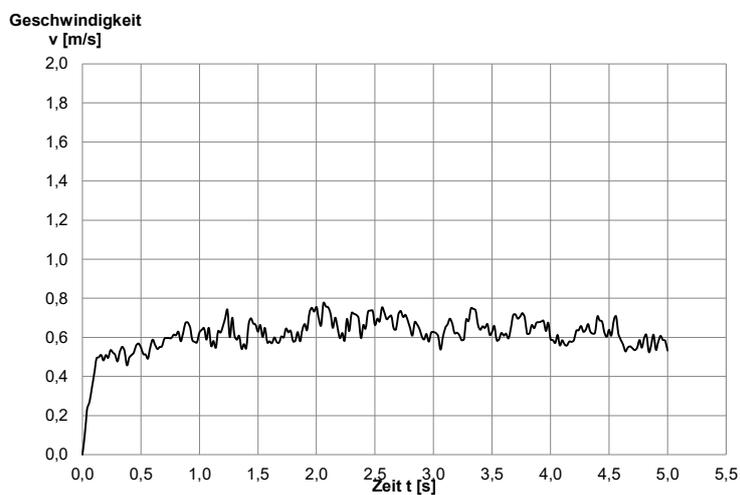


Bild A.57 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

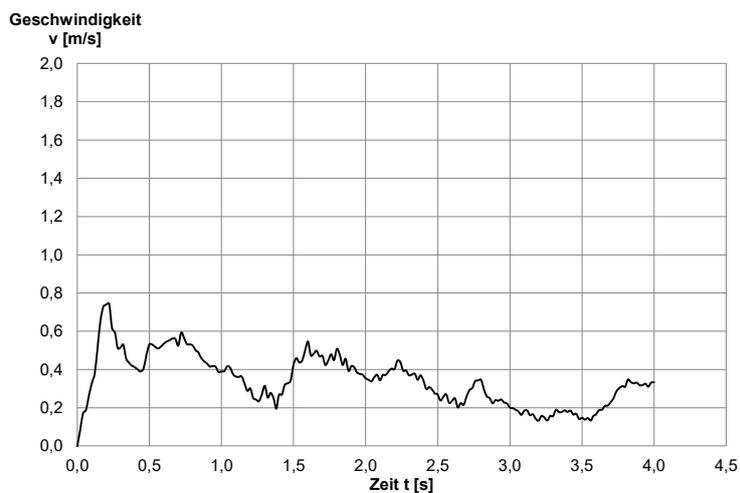


Bild A.58 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

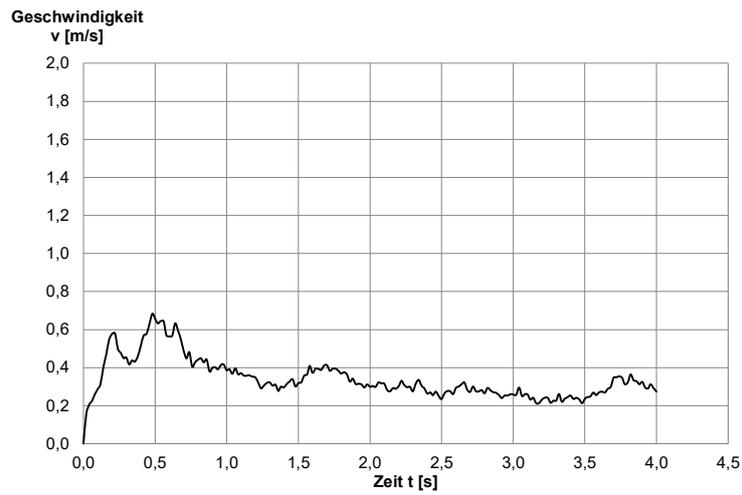


Bild A.59 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

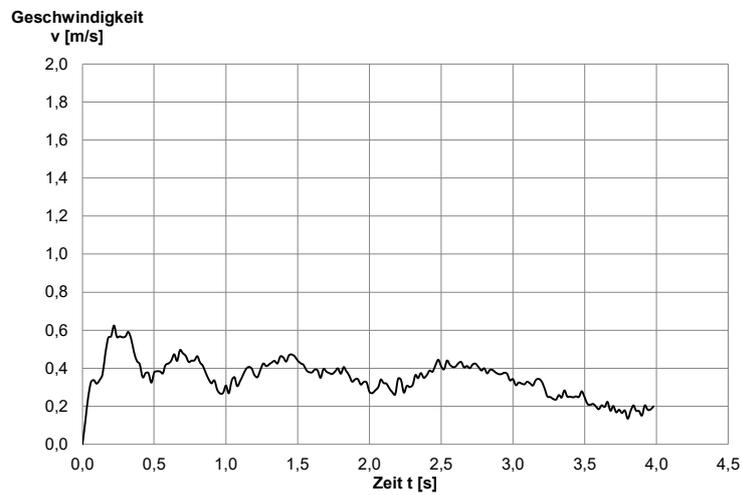


Bild A.60 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A4 gemäß Bild 4.2

Geschwindigkeitsentwicklung oberhalb des Auslasses, Bereich A5

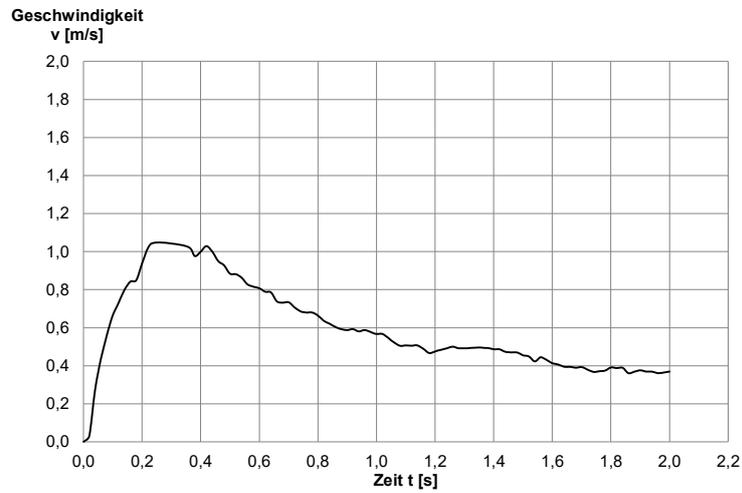


Bild A.61 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

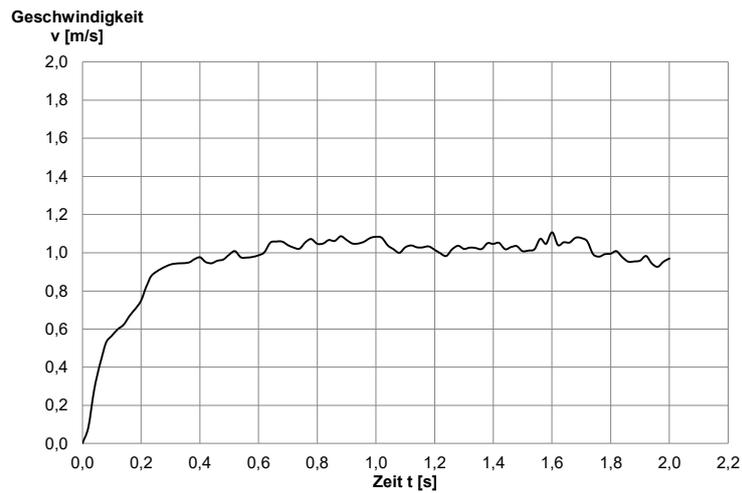


Bild A.62 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

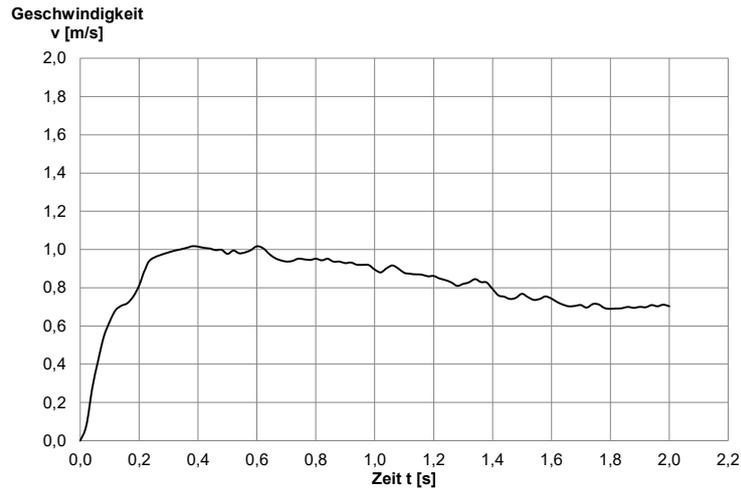


Bild A.63 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

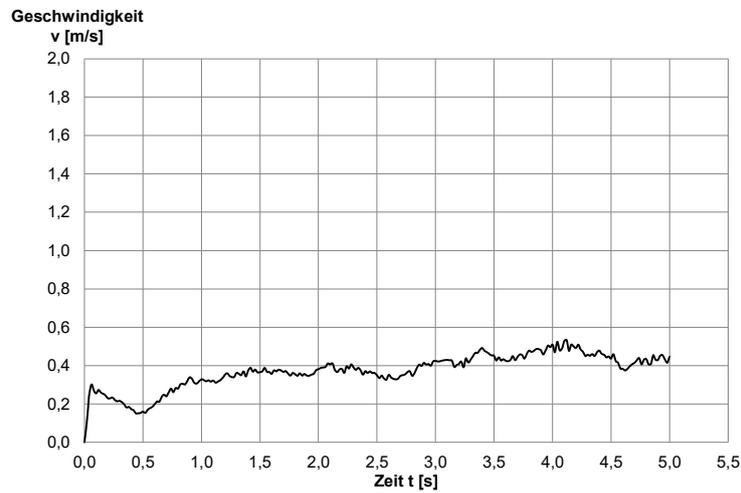


Bild A.64 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

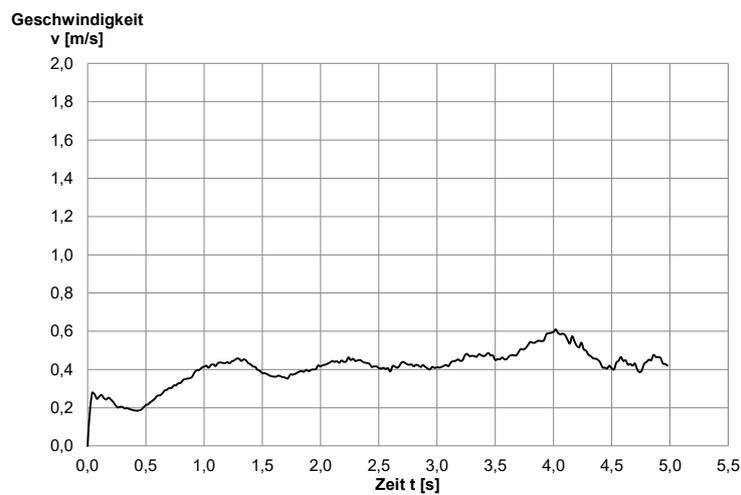


Bild A.65 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

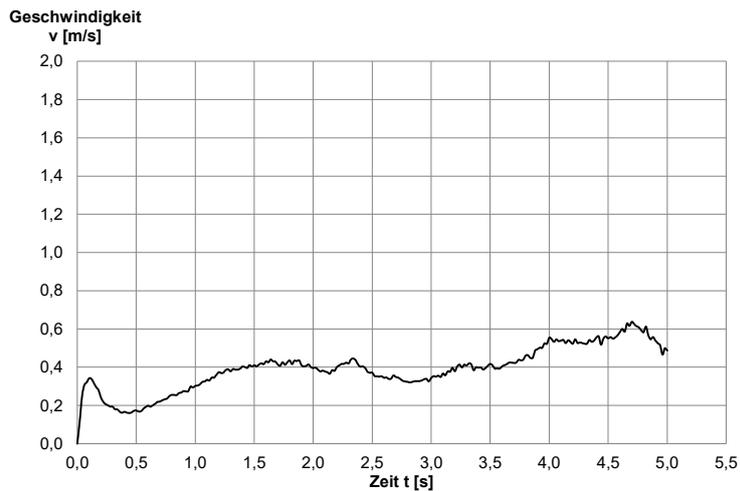


Bild A.66 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

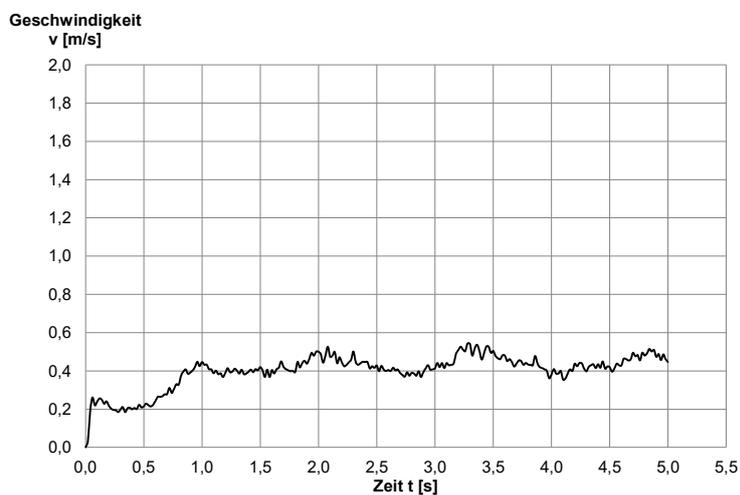


Bild A.67 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

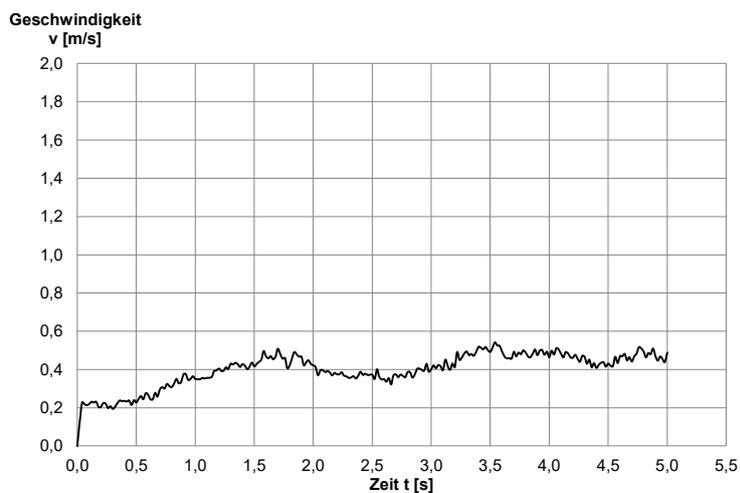


Bild A.68 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

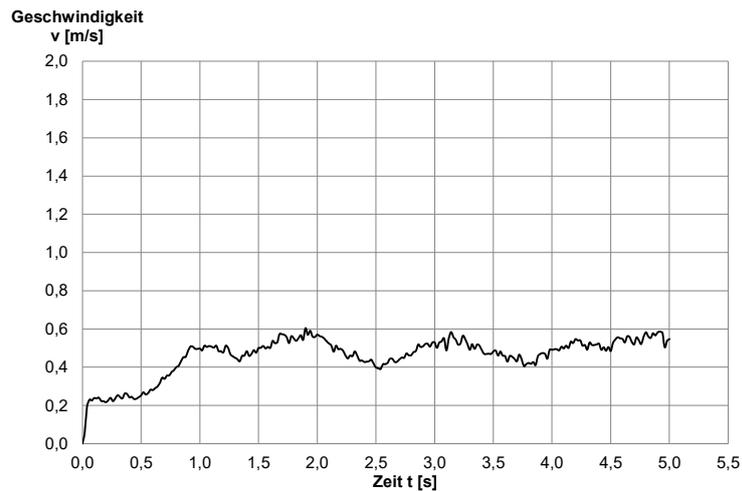


Bild A.69 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

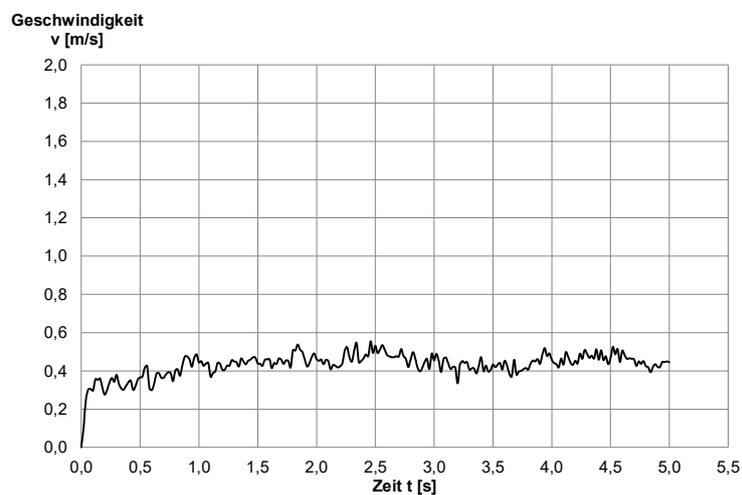


Bild A.70 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

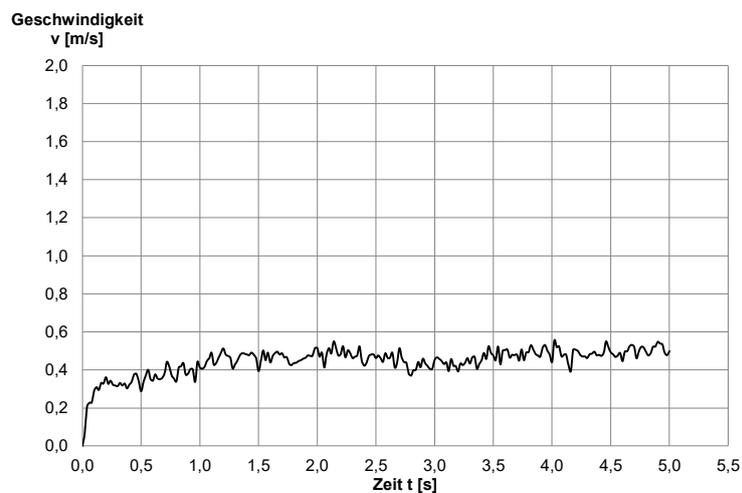


Bild A.71 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

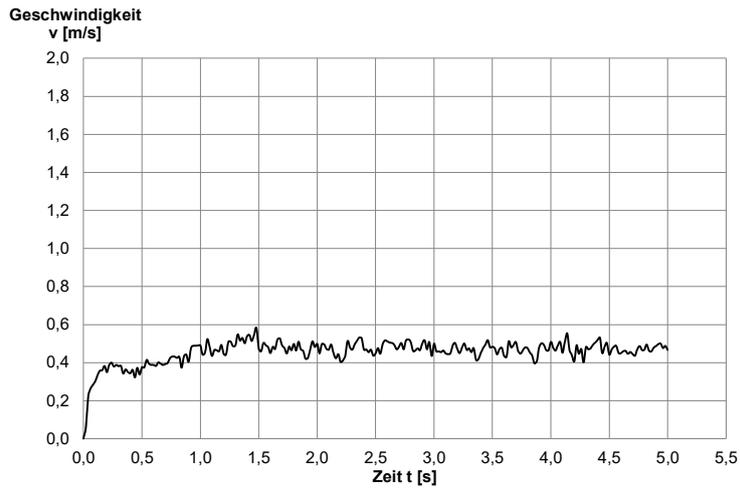


Bild A.72 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

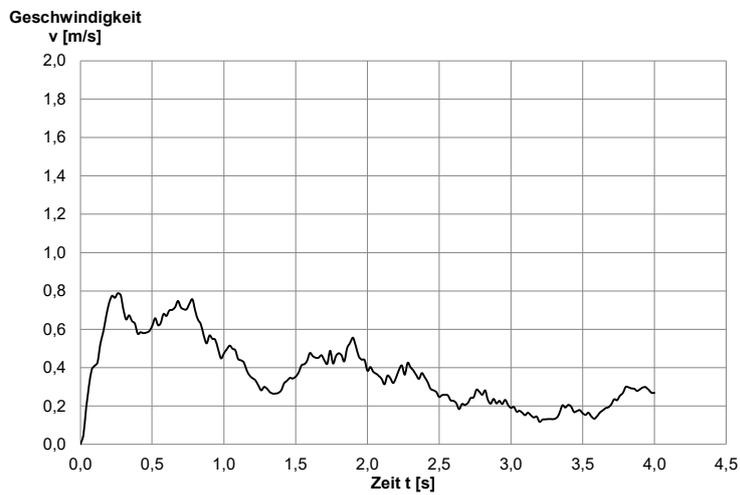


Bild A.73 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

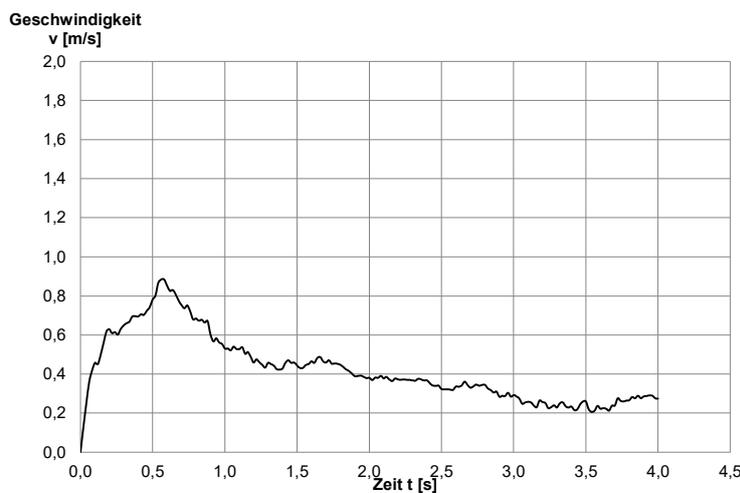


Bild A.74 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

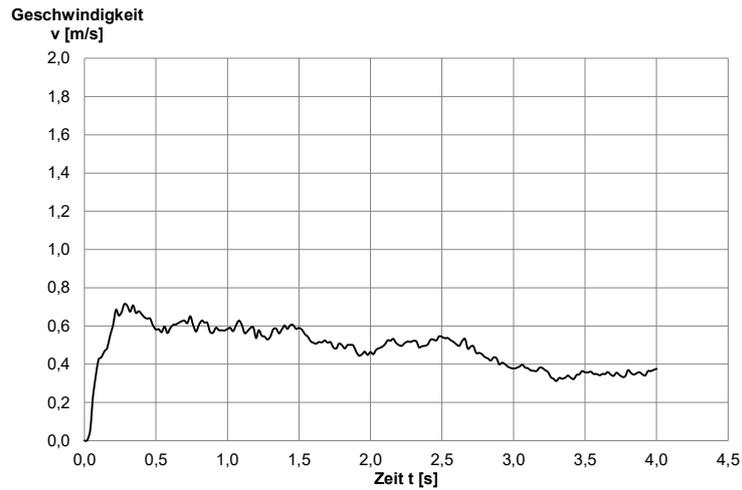


Bild A.75 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A5 gemäß Bild 4.2

Geschwindigkeitsentwicklung oberhalb des Auslasses, Bereich A6

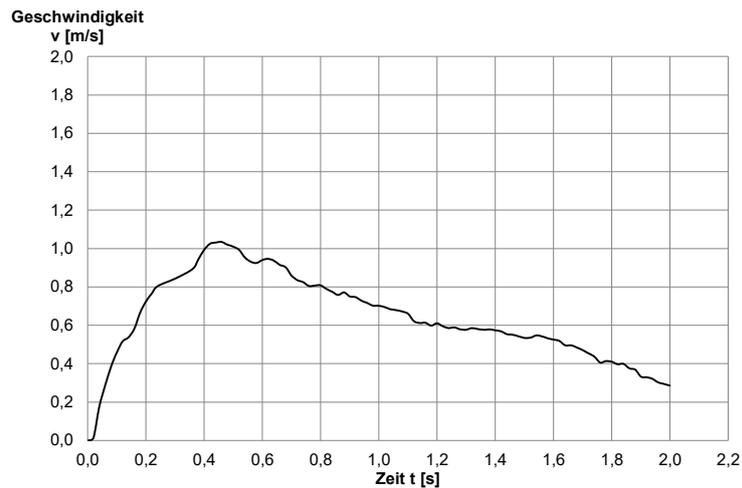


Bild A.76 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

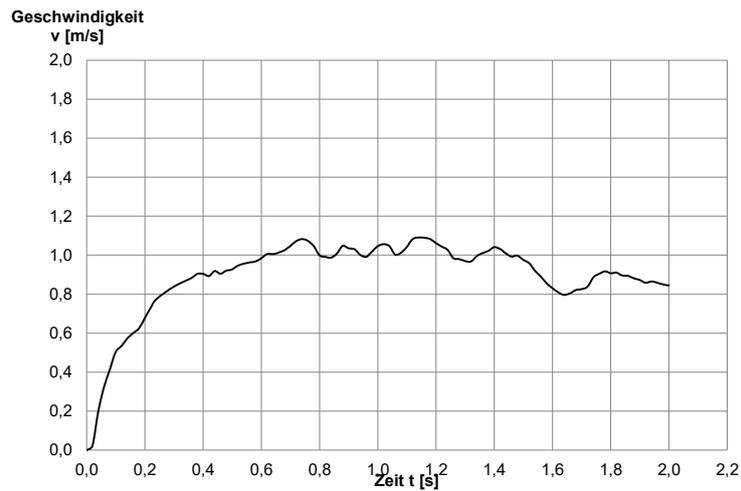


Bild A.77 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

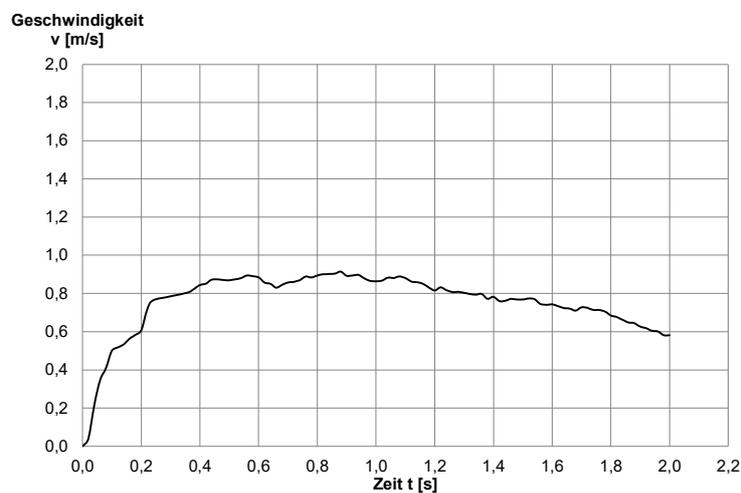


Bild A.78 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

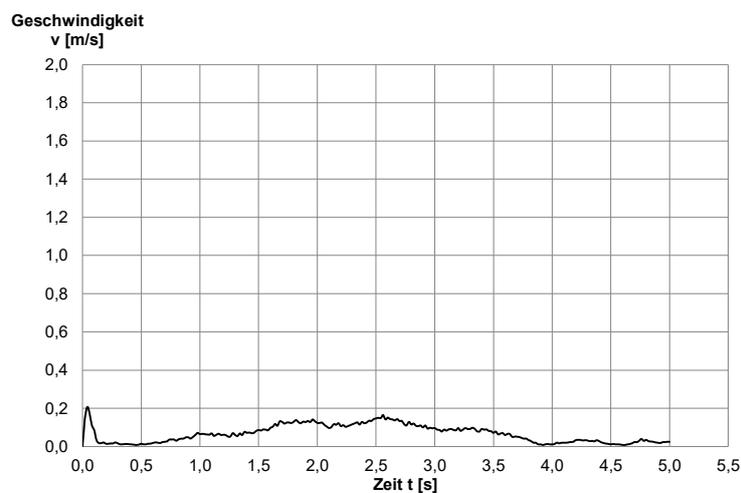


Bild A.79 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

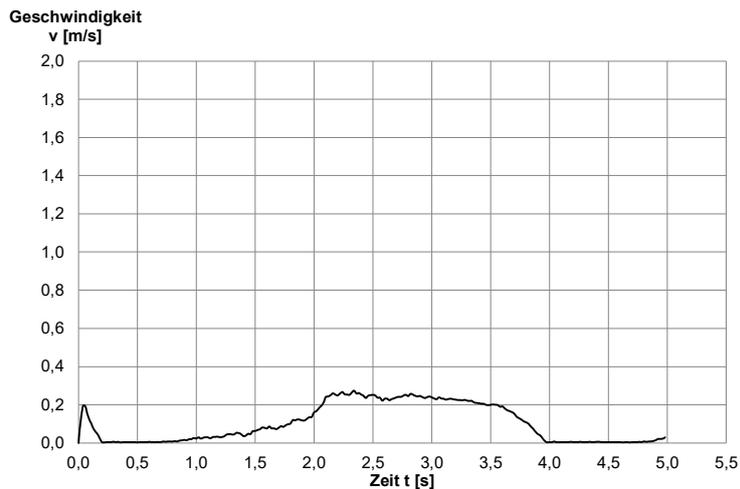


Bild A.80 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

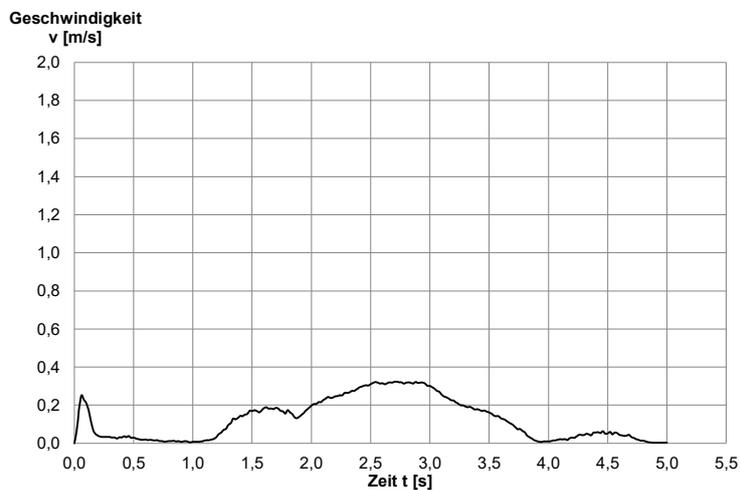


Bild A.81 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

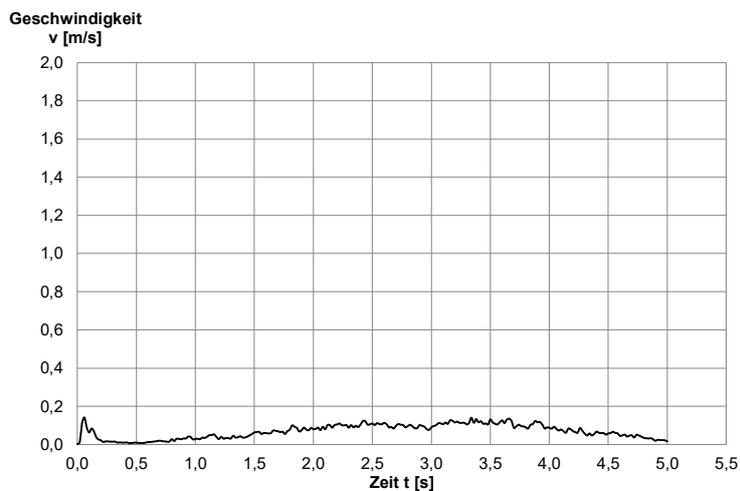


Bild A.82 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

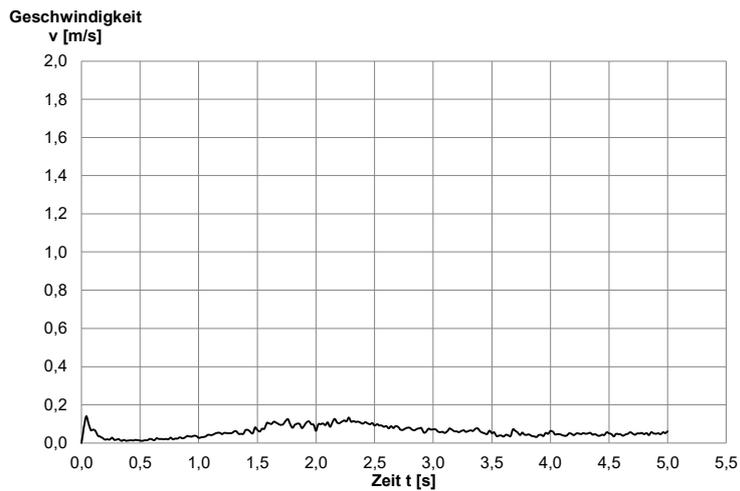


Bild A.83 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

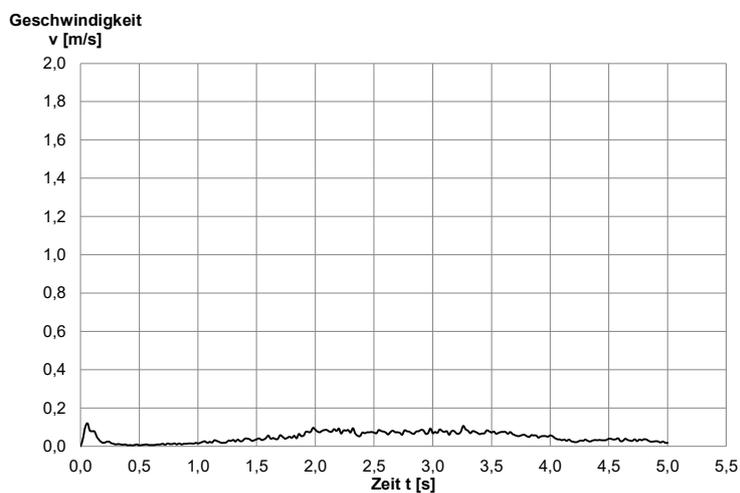


Bild A.84 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

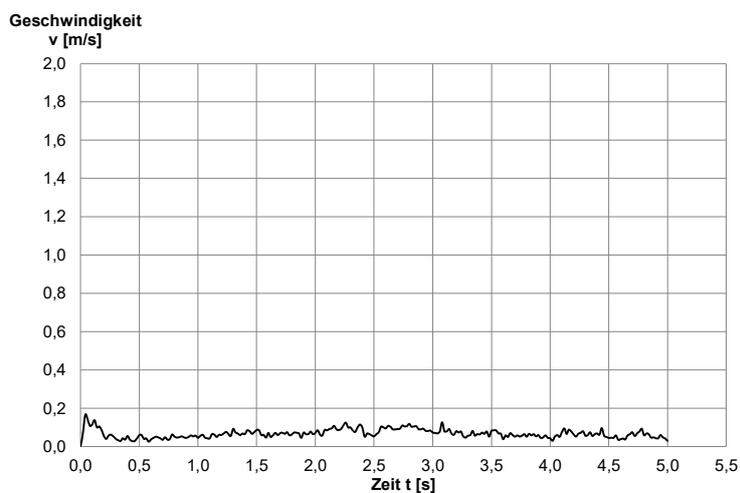


Bild A.85 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

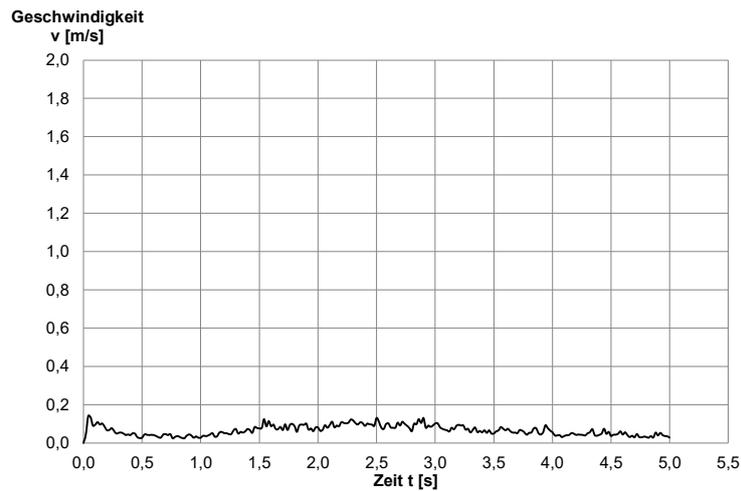


Bild A.86 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

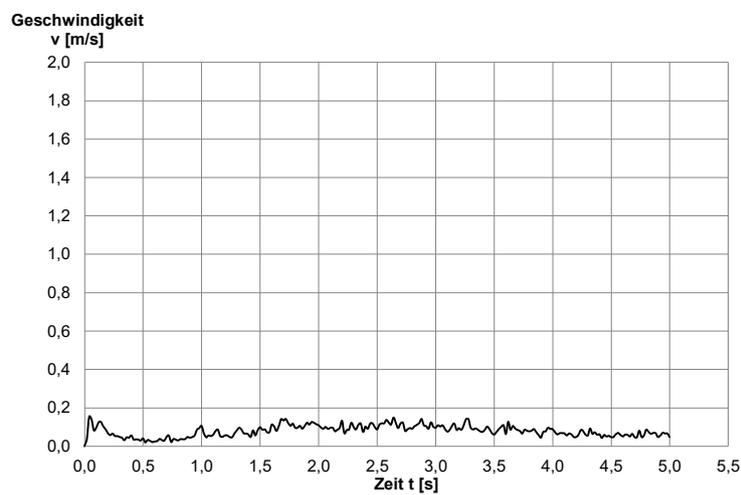


Bild A.87 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

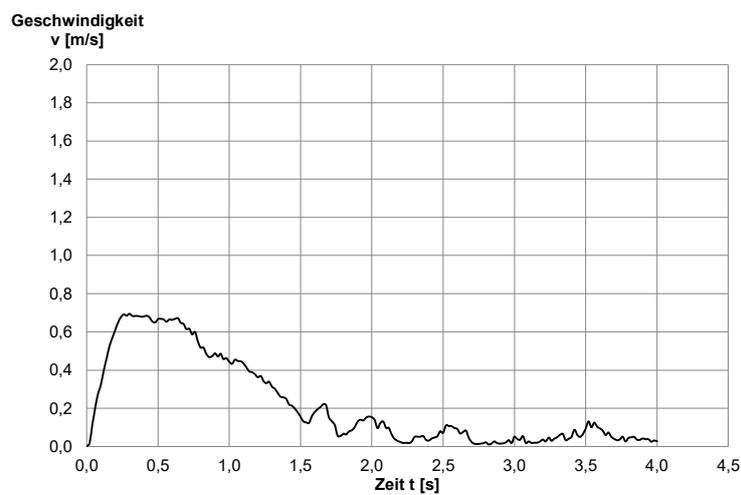


Bild A.88 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

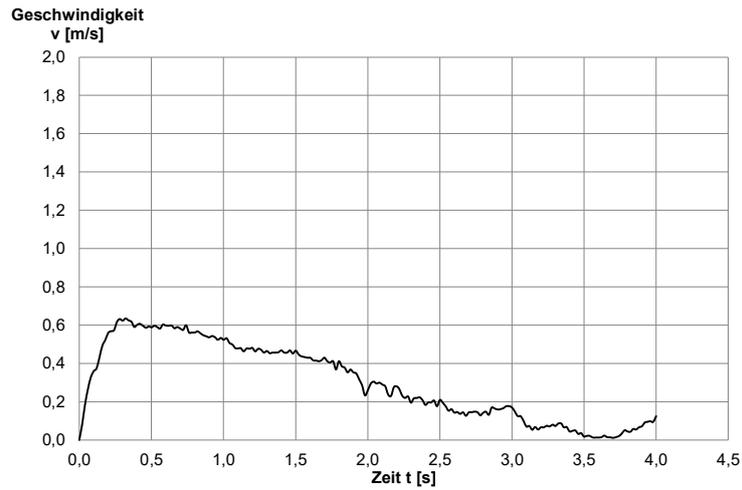


Bild A.89 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

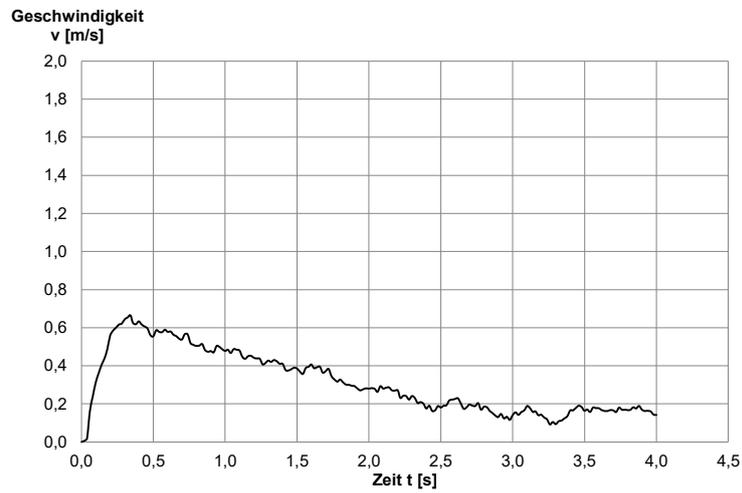


Bild A.90 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A6 gemäß Bild 4.2

Geschwindigkeitsentwicklung oberhalb des Auslasses, Bereich A7

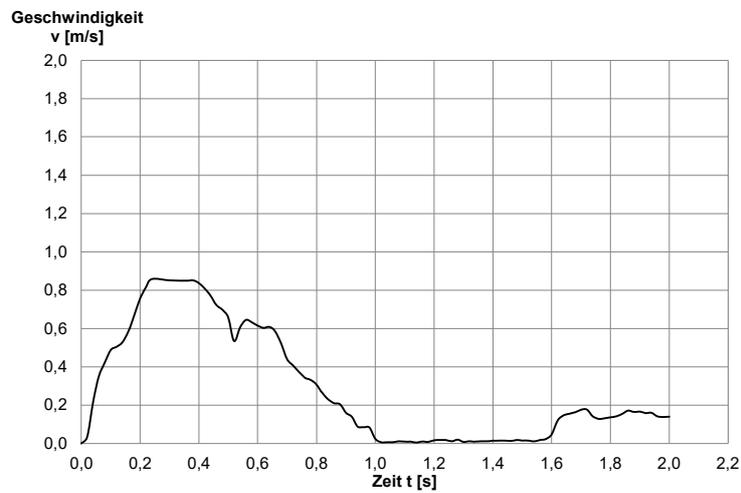


Bild A.91 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

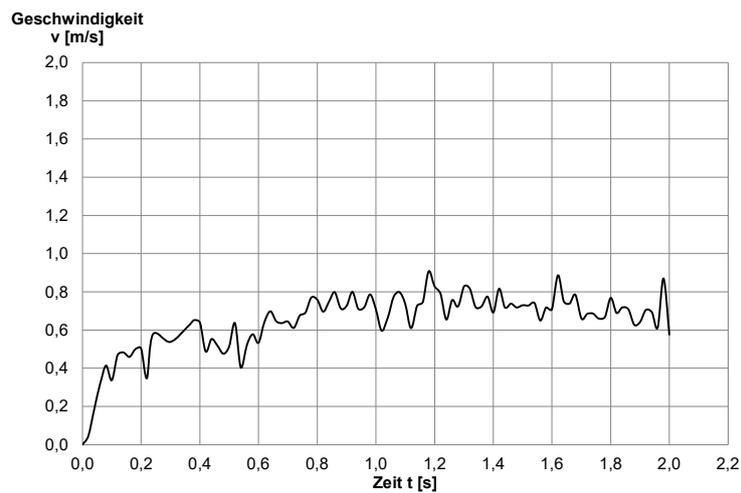


Bild A.92 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

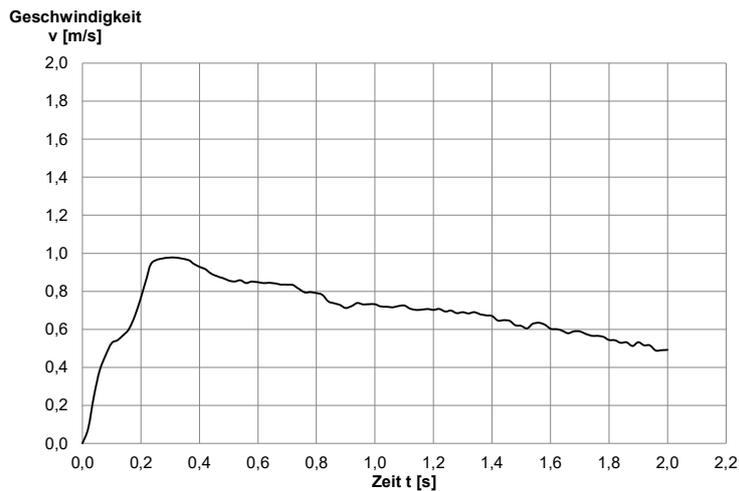


Bild A.93 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

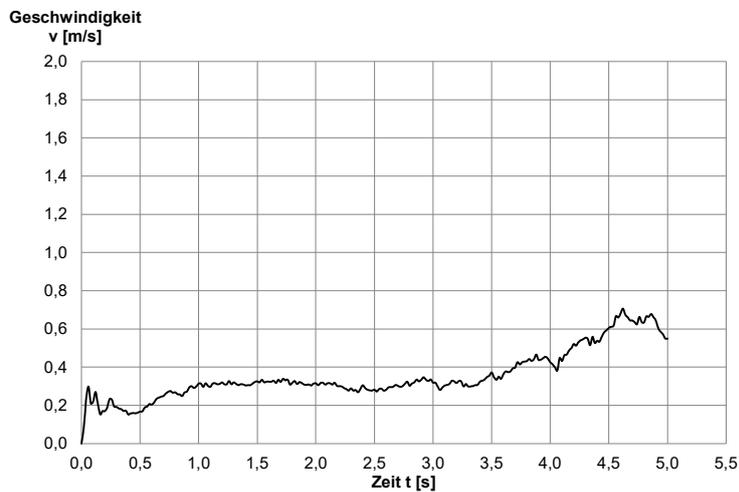


Bild A.94 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

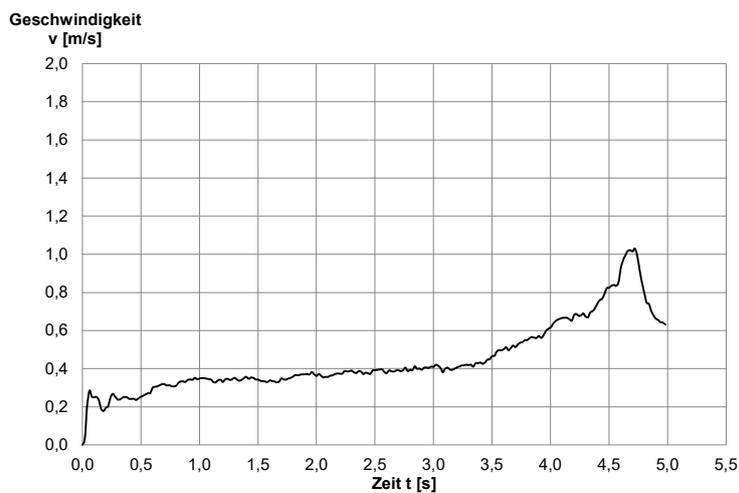


Bild A.95 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

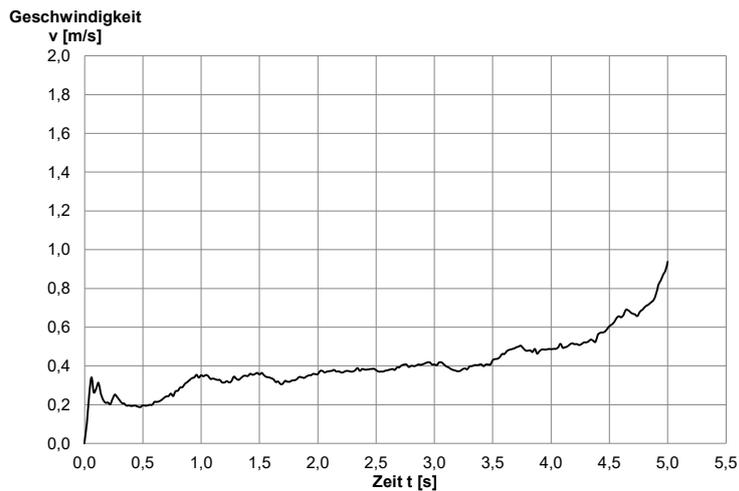


Bild A.96 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

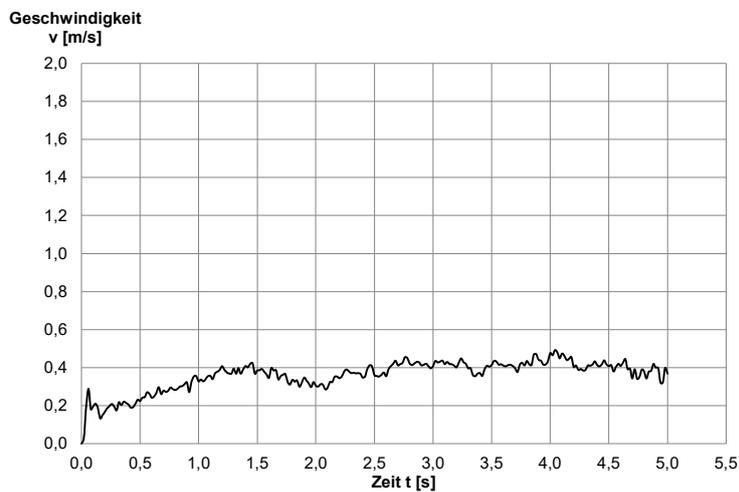


Bild A.97 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

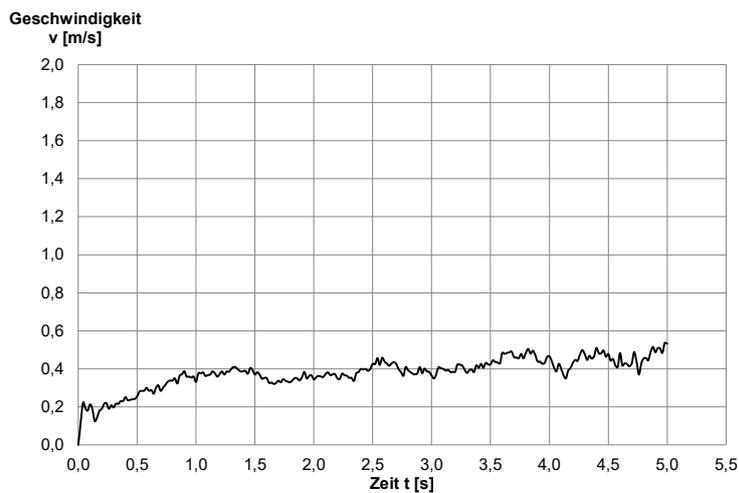


Bild A.98 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

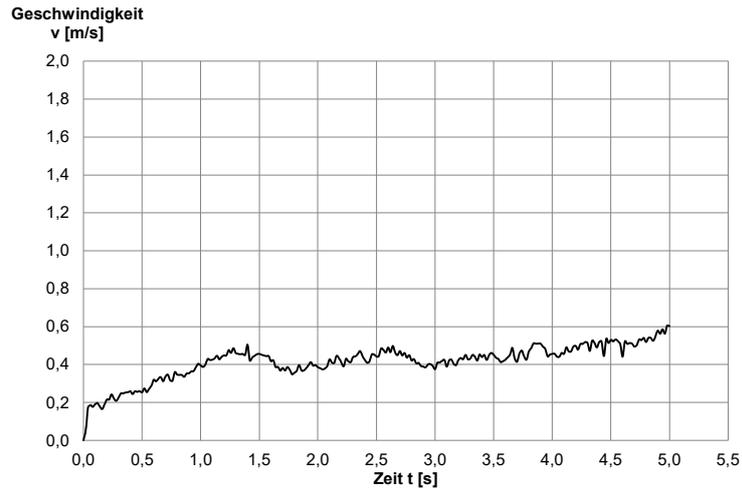


Bild A.99 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

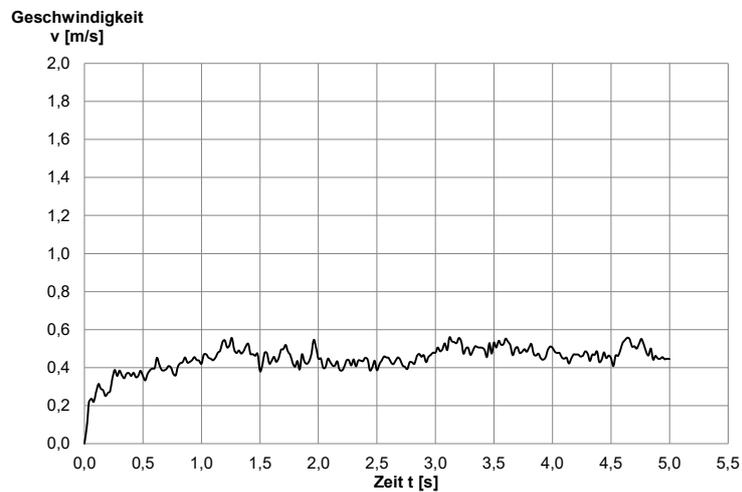


Bild A.100 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

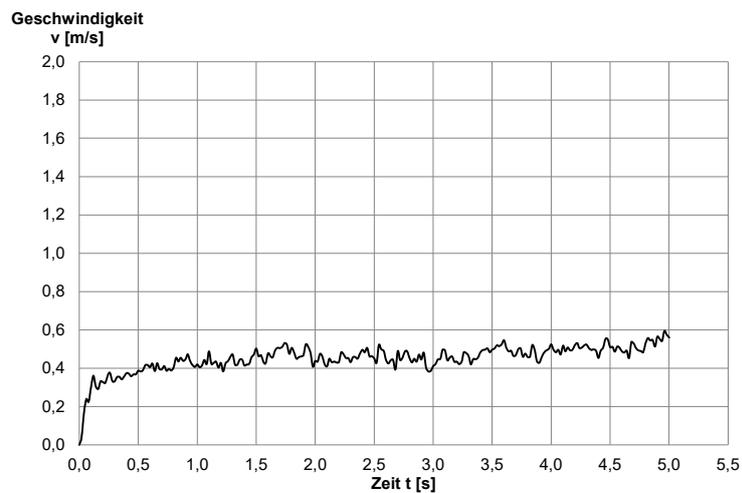


Bild A.101 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

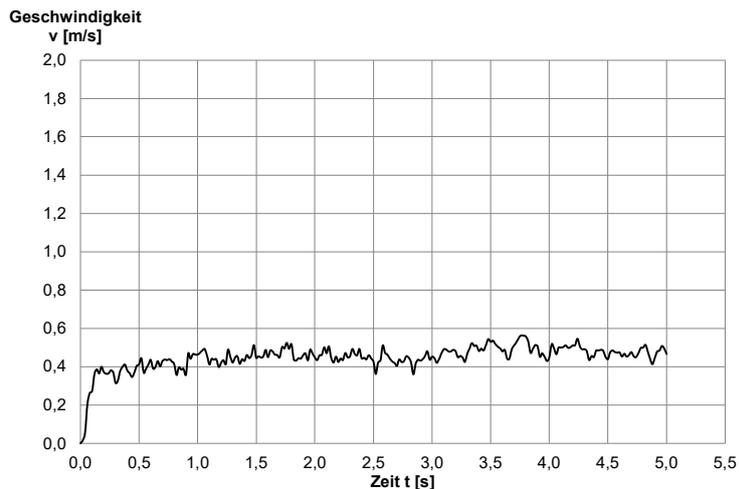


Bild A.102 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

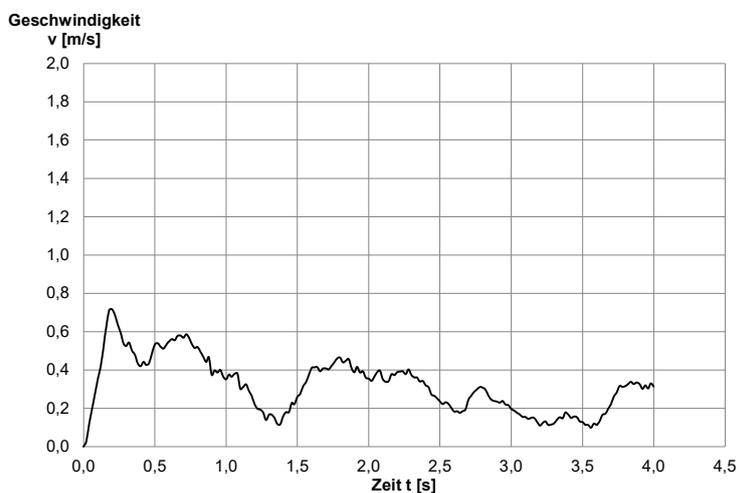


Bild A.103 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

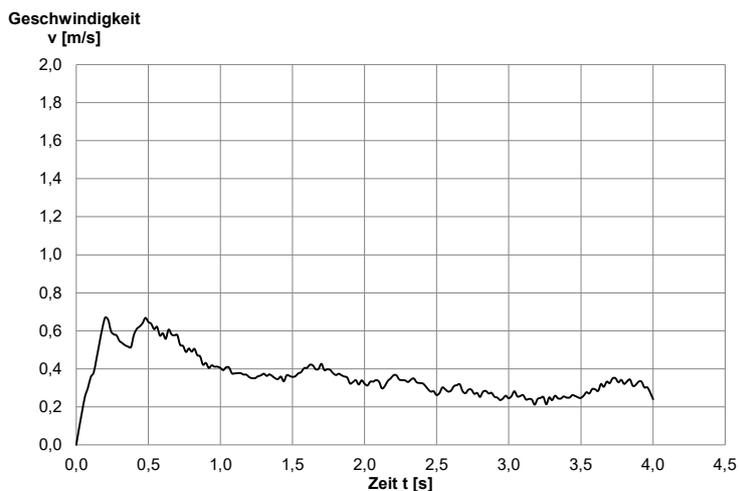


Bild A.104 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch aGr_V2 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

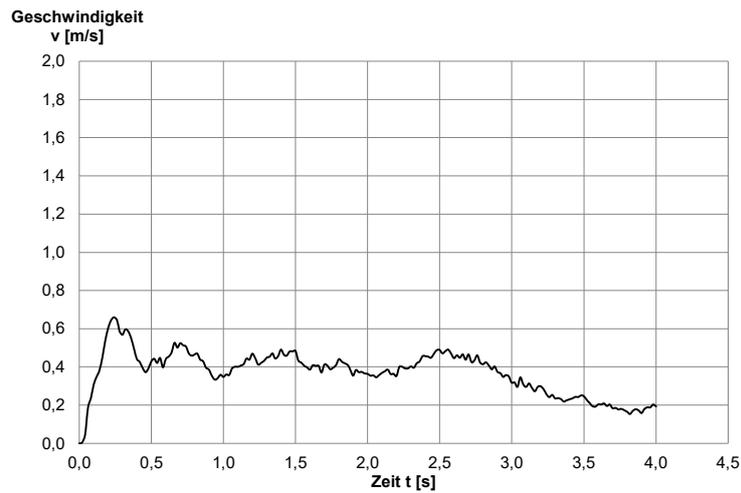


Bild A.105 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A7 gemäß Bild 4.2

Geschwindigkeitsentwicklung oberhalb des Auslasses, Bereich A8

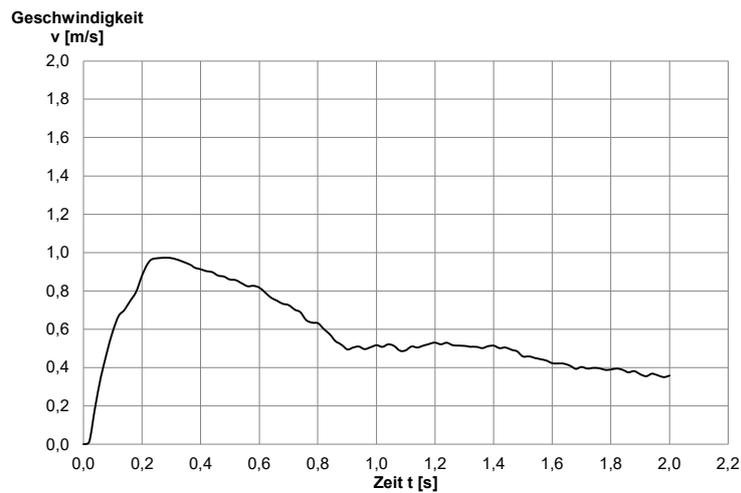


Bild A.106 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

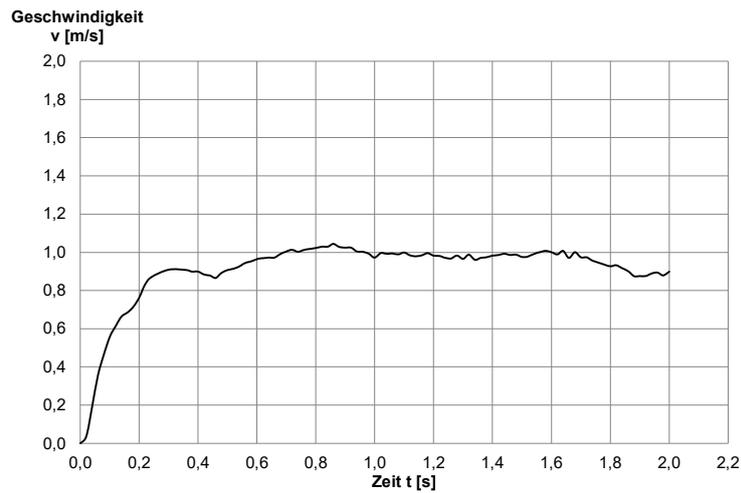


Bild A.107 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

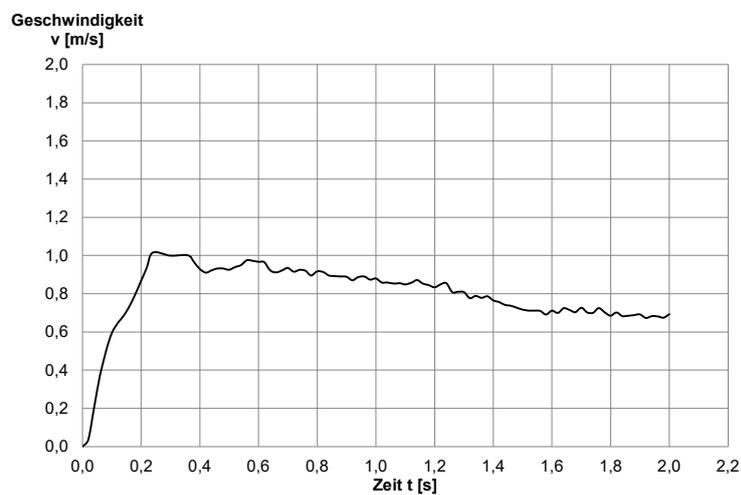


Bild A.108 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

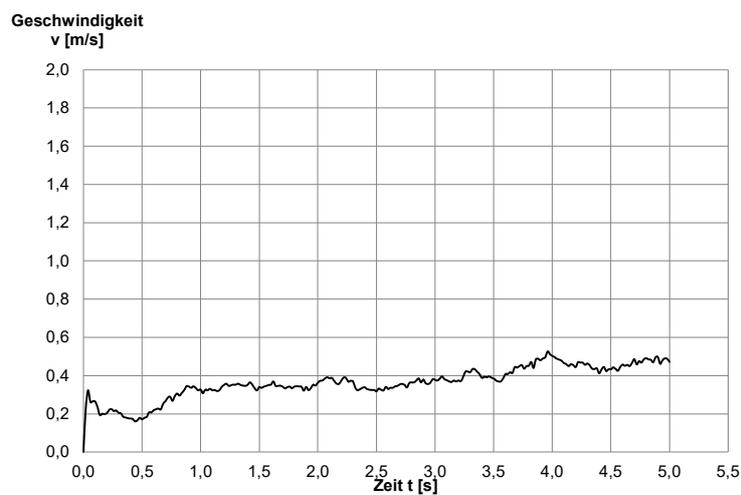


Bild A.109 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

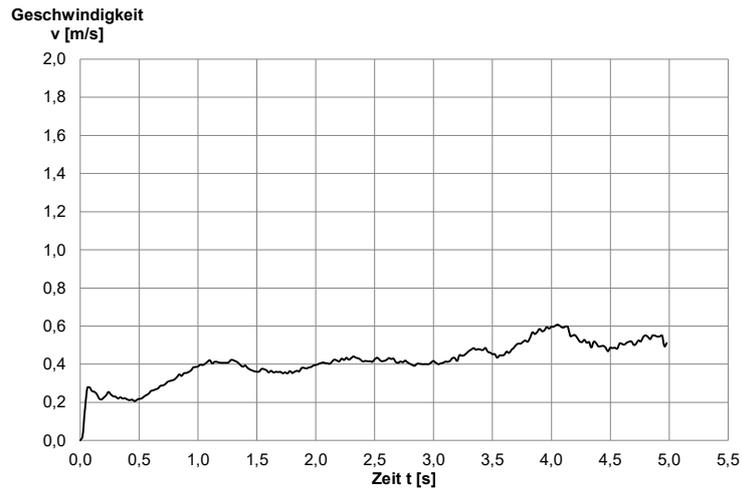


Bild A.110 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

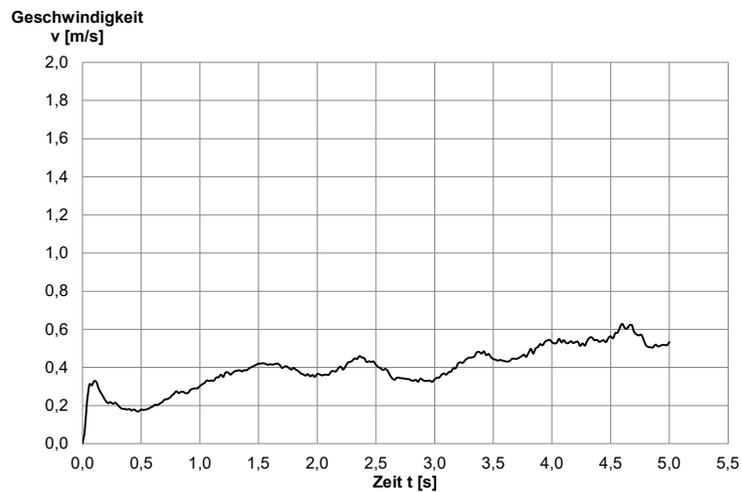


Bild A.111 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

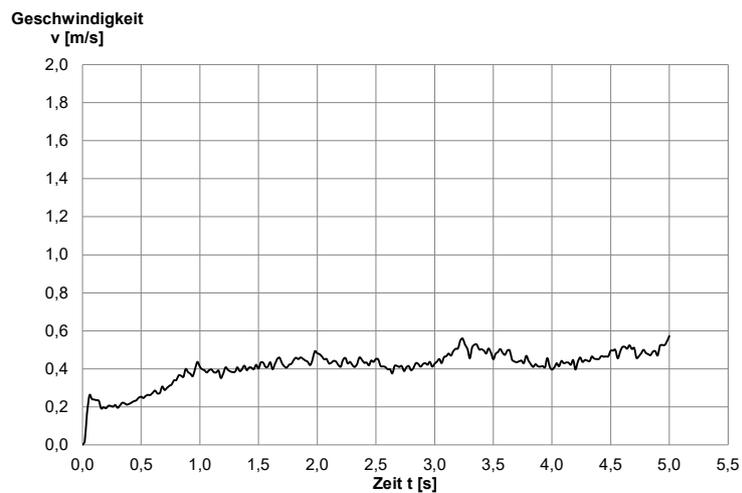


Bild A.112 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

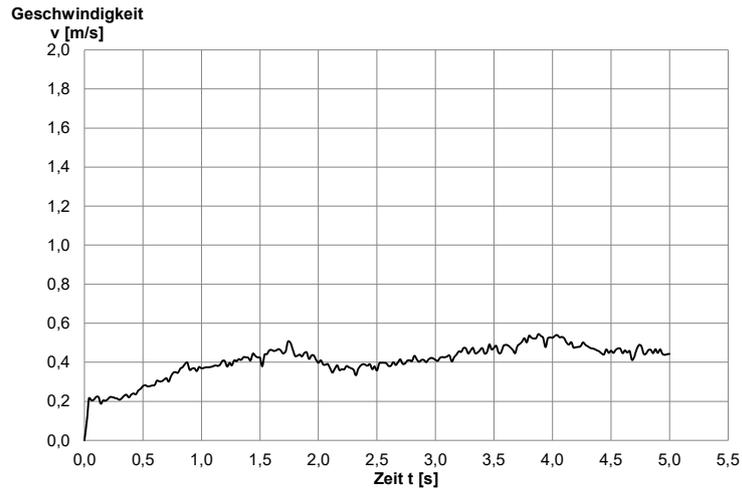


Bild A.113 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

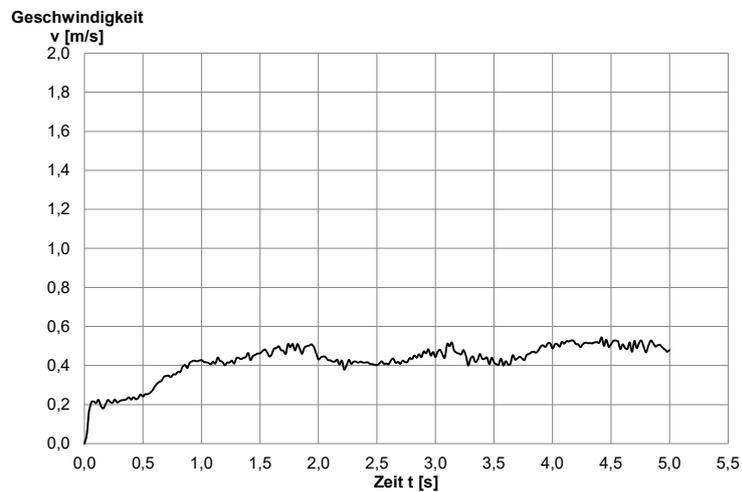


Bild A.114 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

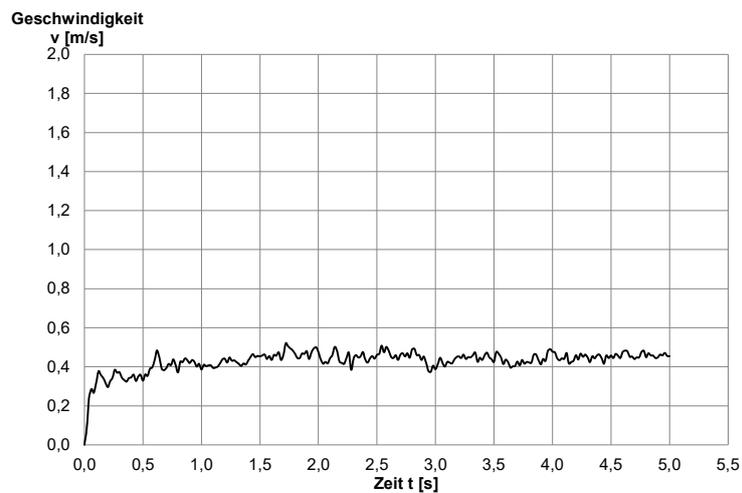


Bild A.115 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

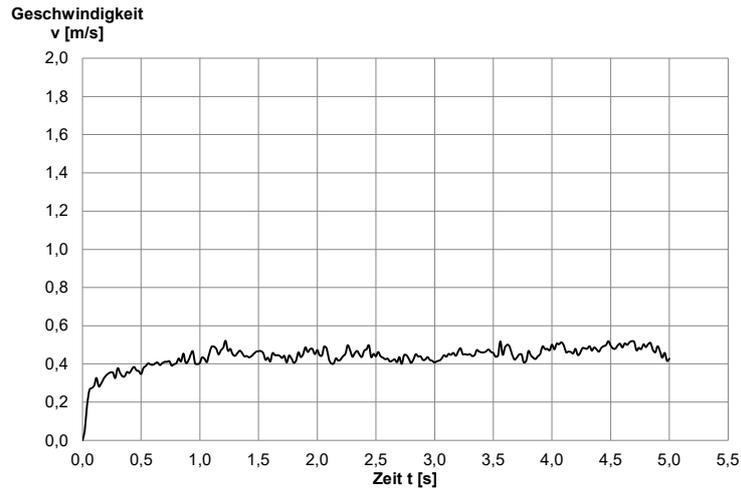


Bild A.116 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

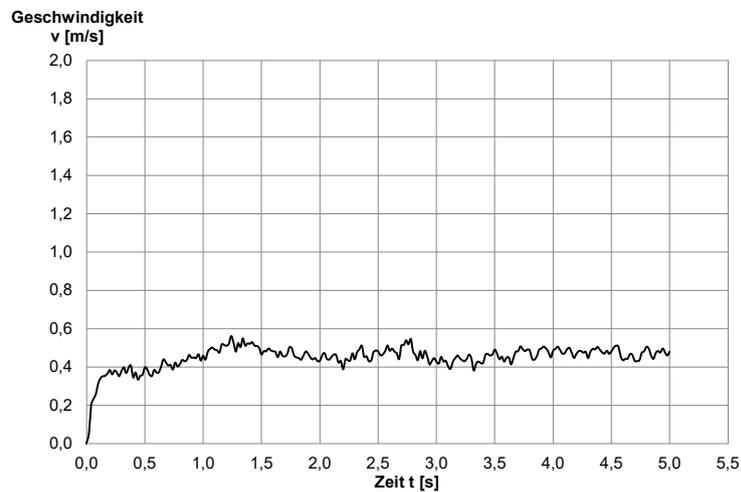


Bild A.117 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

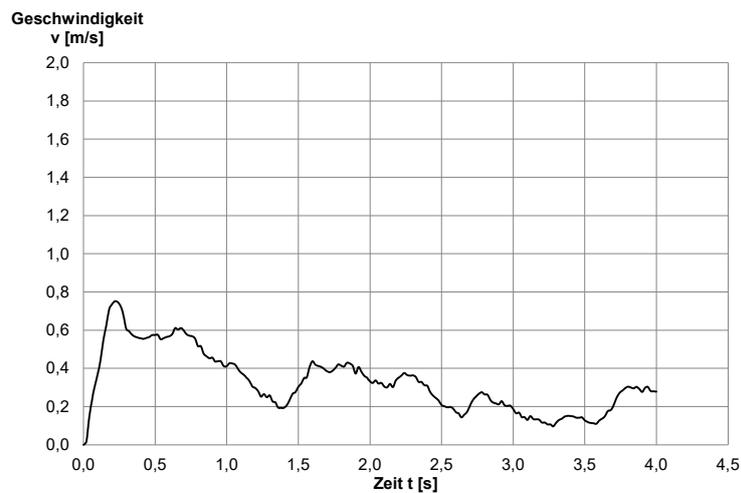


Bild A.118 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

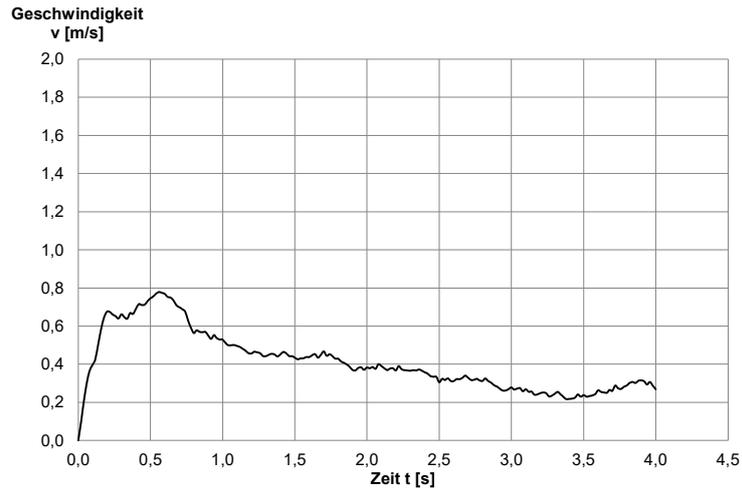


Bild A.119 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

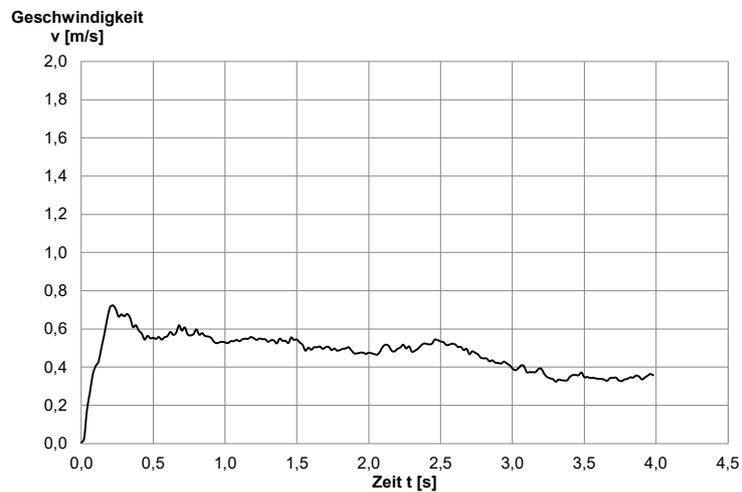


Bild A.120 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A8 gemäß Bild 4.2

Geschwindigkeitsentwicklung oberhalb des Auslasses Bereich A9

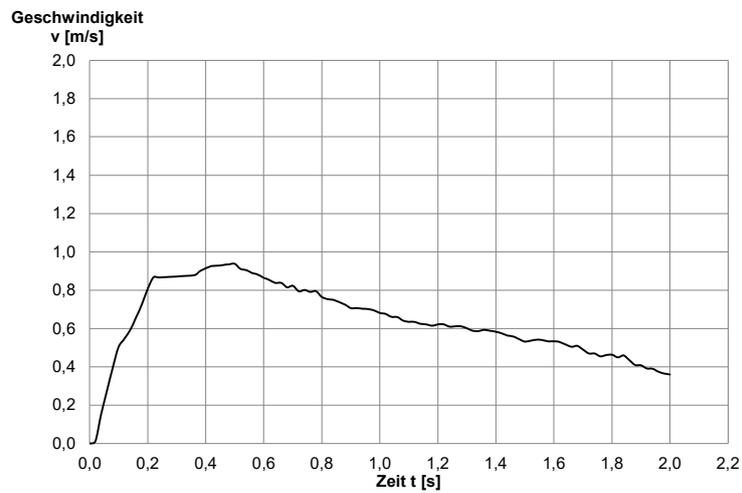


Bild A.121 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V1 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

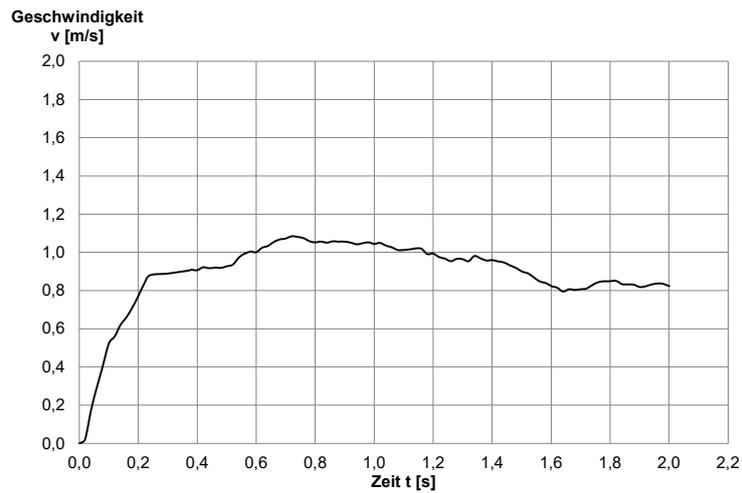


Bild A.122 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V2 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

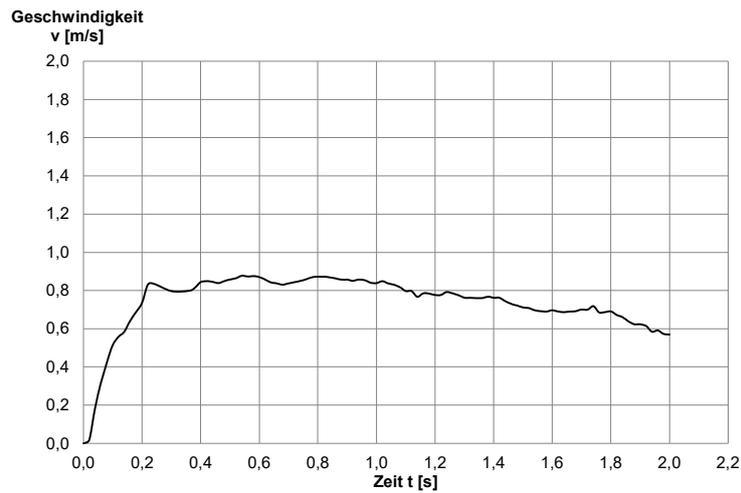


Bild A.123 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Sand 0,25-2,0 mm Versuch Sa_V3 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

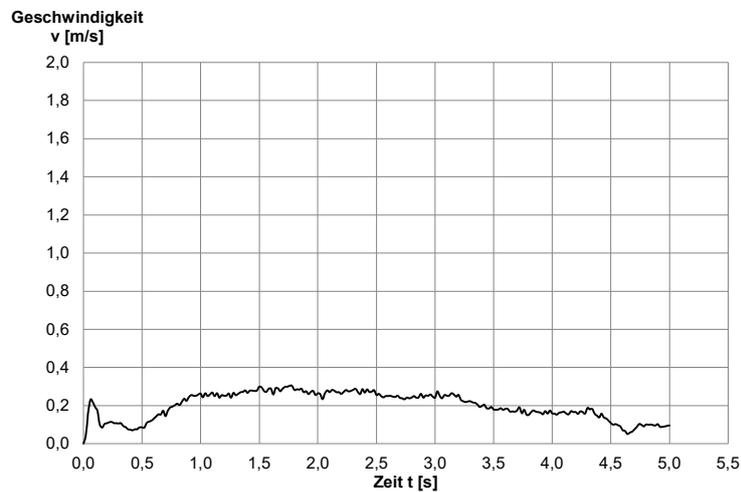


Bild A.124 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V1 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

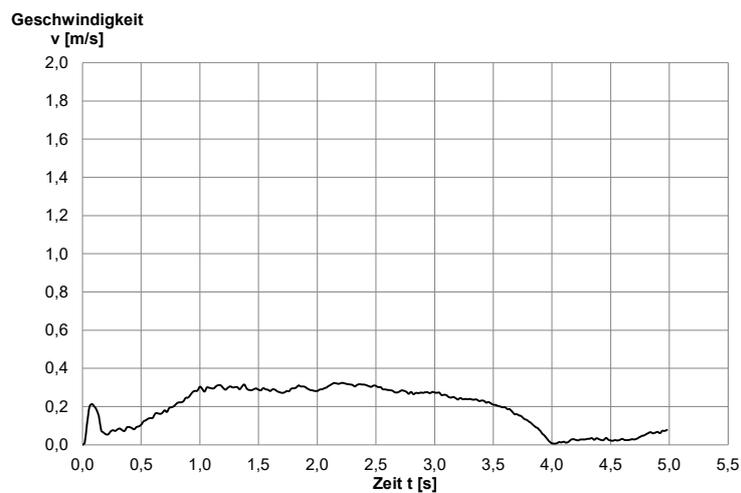


Bild A.125 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V2 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

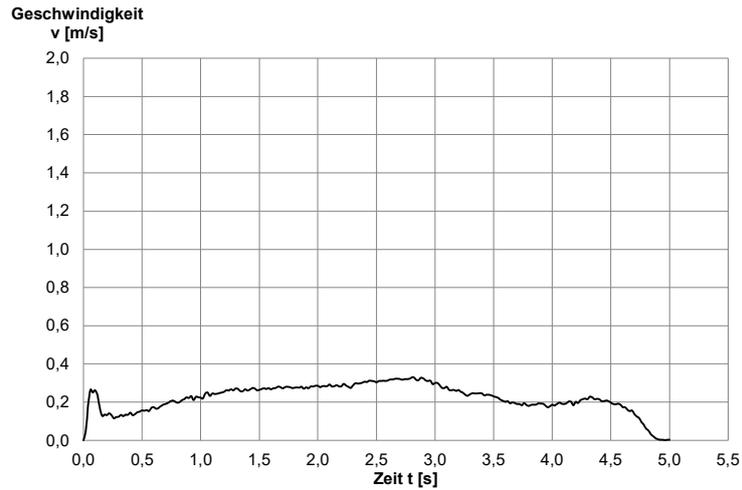


Bild A.126 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 2,0-4,0 mm Versuch Gr 2-4_V3 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

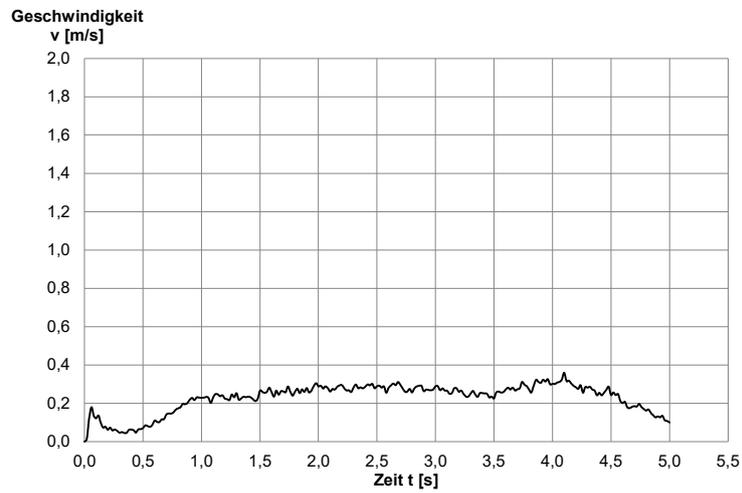


Bild A.127 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V1 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

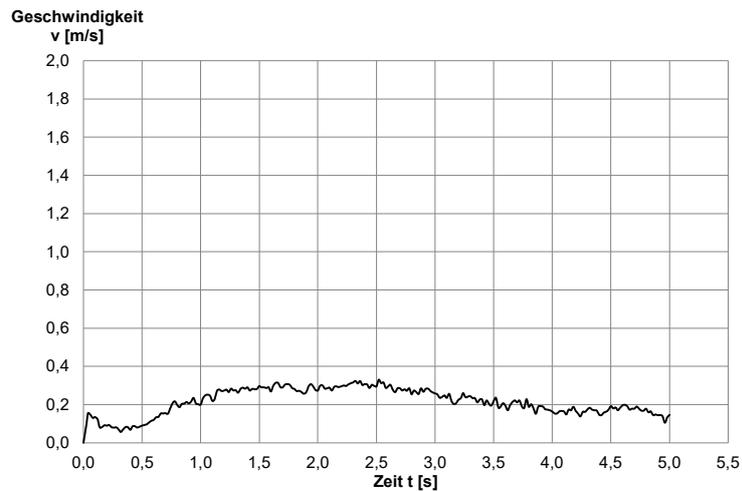


Bild A.128 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V2 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

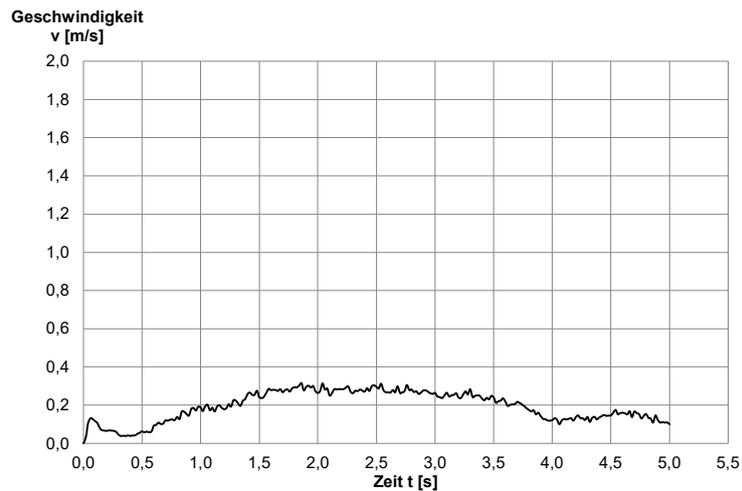


Bild A.129 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 4,0-8,0 mm Versuch Gr 4-8_V3 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

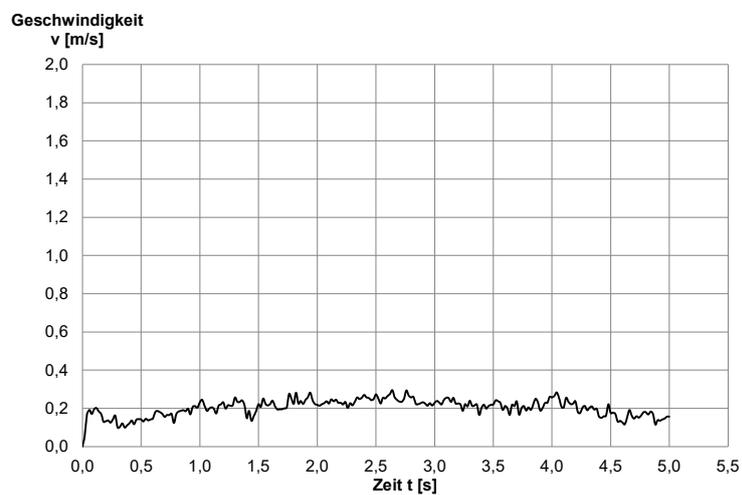


Bild A.130 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V1 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

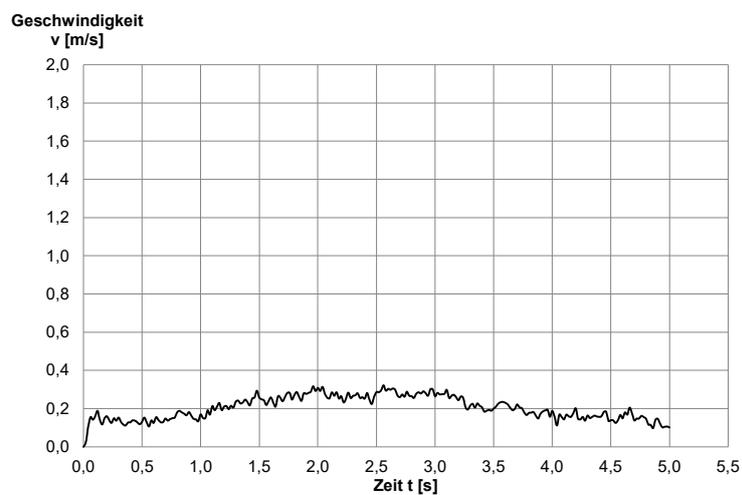


Bild A.131 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V2 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

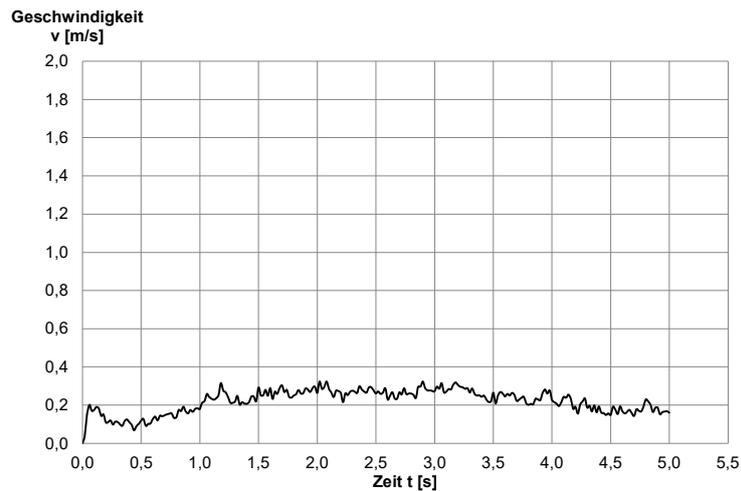


Bild A.132 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Kies 8,0-16,0 mm Versuch Gr 8-16_V3 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

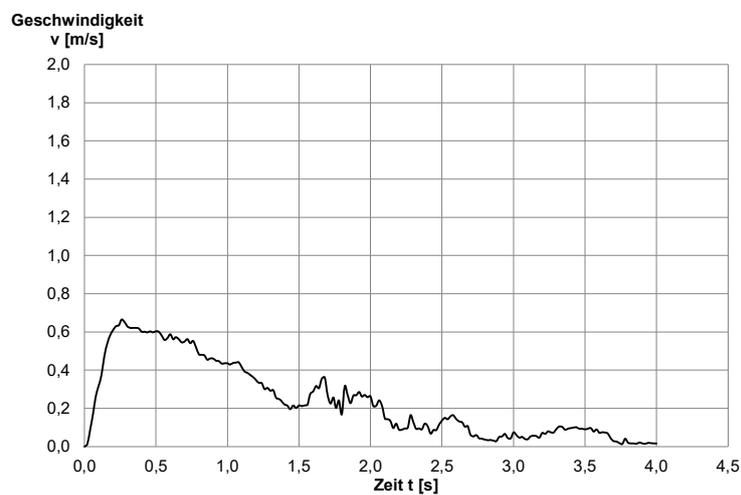


Bild A.133 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V1 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

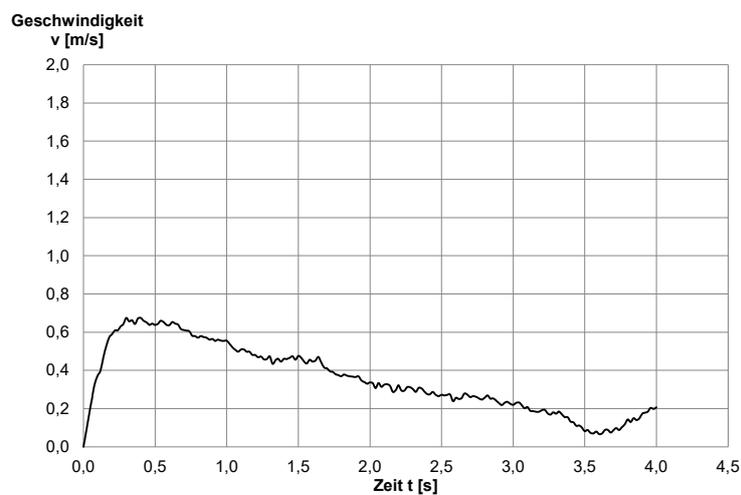


Bild A.134 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V2 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2

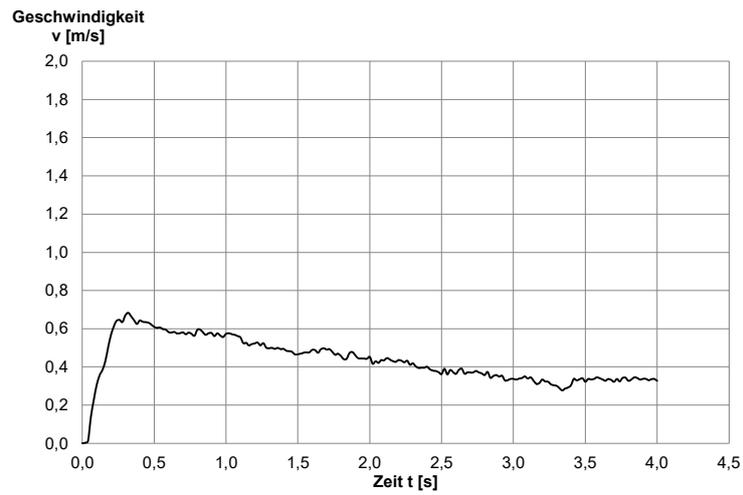


Bild A.135 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm stark sandiger Kies Versuch saGr_V3 im Bereich A9 gemäß Bild 4.2