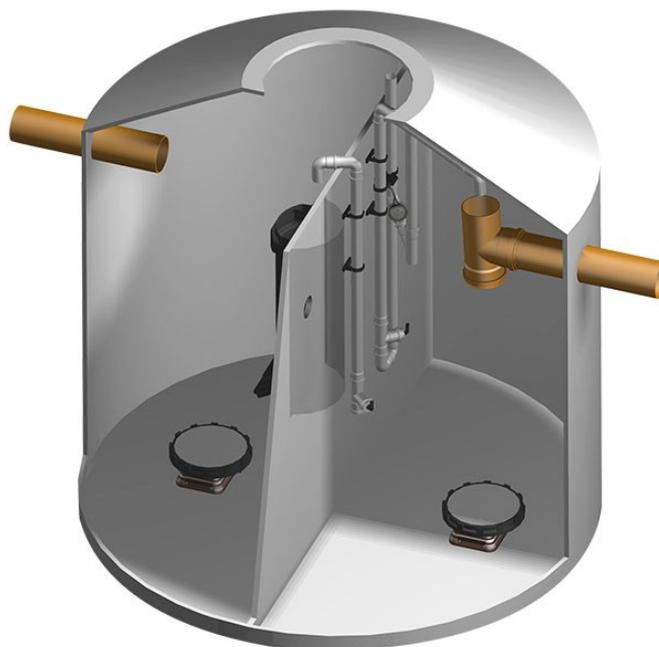


Abschlussbericht zum DBU-Projekt:

AZ 34847/01 „Numerische Modellierung und experimentelle Validierung der mechanischen Abscheidung von Helmintheneiern zur Abwasserreinigung und die diesbezügliche Optimierung einer kleinen Kläranlage“



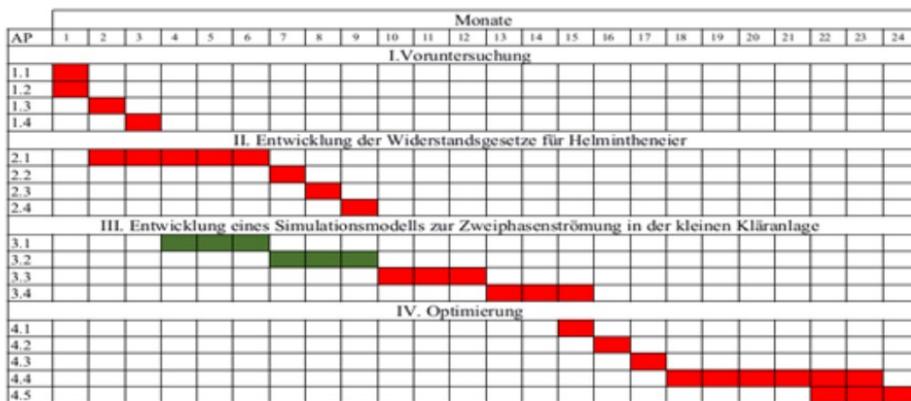
Projektkonsortium:

Waldemar Merdian
Betriebsleiter
MENK Beton GmbH
Am Monbagsee 6
40789 Monheim am Rhein
Telefon: 02173/8531419
Telefax:02173/32145
Mobil: 0163/7363662
mailto: w.merdian@menk-
umwelttechnik.de
Internet: www.menkbeton.de

Prof. Dr.-Ing. habil. A. C. Benim
Center of Flow Simulation (CFS)
Faculty of Mechanical and Process
Engineering
Duesseldorf University of Applied
Sciences
+49 (0) 211 43 51 3504
alicemal@prof-benim.com
www.prof-benim.com

Während der Bearbeitung des Projektes haben sich einige Änderungen im Projekttablauf ergeben. In den folgenden Abbildungen gegenübergestellt ist der anfangs geplante Projektverlauf (Abb. 01) und der mit Ihnen abgestimmte veränderte Projekttablauf, wie im genehmigten Antrag auf kostenneutrale Verlängerung vom 02.06.2021 kommuniziert (Abb. 02).

Tabelle I. Zeitplan



Bedeutung der Farben in Tabelle I:

- Die Arbeiten, die von der Hochschule Düsseldorf durchzuführen sind
- Die Arbeiten, die von der Firma Menk'schen GmbH & Co. KG

Abb. 1: Original Ablaufplan

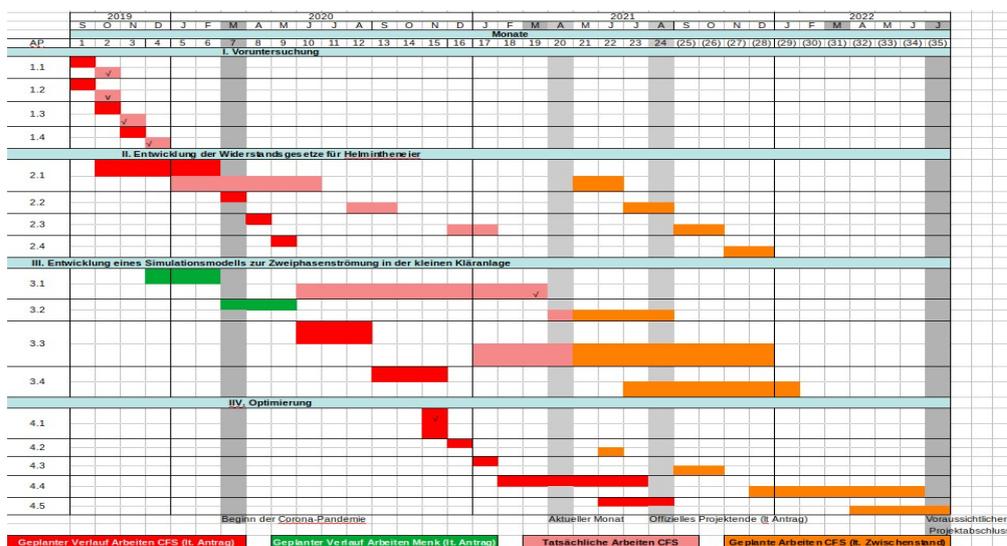


Abb. 2: Angepasster Ablaufplan

I. Voruntersuchung

- AP 1.1: Studie der aktuellen Literatur. Einbringung der aktuellen Erkenntnisse in den Projektplan. (1 M)

Die Studie ist Abgeschlossen.

- AP 1.2: Revision der experimentellen Rahmenbedingungen und Ergebnisse von Sengupta et al. [20]. (1 M)

Die Revision ist erfolgt.

- AP 1.3: Recherche, Vergleich und Auswahl eines geeigneten Ersatzstoffes (Helmintheneier-Surrogat) für die eigene experimentelle Untersuchung. (1 M)

Für den Ersatzstoff wurde sich für rot gefärbte Microkugeln aus PE der Firma“ Cospheric“ entschieden, da diese voraussichtlich gleichzeitig im Sinkverhalten relativ ähnlich zu Helmintheneiern sind, gleichzeitig aber aufgrund ihrer Formgenauigkeit auch numerisch relativ klar definiert werden können. Außerdem ist bei dem gewählten Durchmesser von 100 Mikrometer auch eine messtechnische Erfassung gegeben (durch wägen können Partikelscharen, die größer als 20.000 Partikel sind erfasst werden, darunter sind die Partikel durch geeignete Probenseparierung ggf. auch optisch unter einem Mikroskop zählbar). Auch hinsichtlich der Verarbeitung der Messergebnisse bei der späteren Entscheidung, nicht nur klares Wasser, sondern tatsächliche Abwässer zu verwenden, sind die gewählten Surrogate aufgrund ihrer Rotfärbung nach wie vor optisch gut erkennbar.



Abb. 3: Mikroskopische Aufnahme der Testpartikel

(Quelle: https://www.cospheric.com/REDPMS_polymer_red_spheres_density098.htm)

- AP 1.4: Bestimmung des Typs und Größe der zu untersuchenden und zu optimierenden kleinen Kläranlage. (1 M)

Wie schon in der Antragsphase mit dem DBU kommuniziert, scheint eine SBR-Kleinkläranlage in einer Größenordnung zwischen 20 EW bis 50 EW besonders gut geeignet für die experimentelle Untersuchung und Optimierung, da einerseits in Deutschland dies die gängige Anlagengröße ist, die den größten Absatz findet, andererseits für die Situation in Uganda aber auch sehr geeignet scheint, da hier in abgelegenen Ortschaften, in denen diese Anlage voraussichtlich den größten Effekt hat, eine entsprechende Bevölkerungsdichte und diesen Anlagentypus favorisieren lässt.

Darum wurde sich für die Testanlage für eine SBR-Anlage mit 20 EW entschieden, die traditionell in zwei Behältern verbaut wird, wobei die Vorklärung in einem Dreikammerbehälter und die biologische Reinigung in einem Einkammerbehälter stattfindet, wie Abbildung 13 gezeigt.

II. Entwicklung von validierten Widerstandsgesetzen für die Eier von Helminthen von drei unterschiedlichen Gattungen

In dieser Phase waren folgende Arbeitspakete enthalten. Im Bericht soll nicht auf die jeweiligen Arbeitspakete einzeln eingegangen werden, sondern die gesammelten Ergebnisse ganzheitlich dargestellt werden. Darum folgt eine zusammengefasste Darstellung in diesem Kapitel.

AP 2.1: Berechnung der Sinkgeschwindigkeit der einzelnen Helmintheneier unter genauer Berücksichtigung von deren Form und Oberflächenstruktur, für die drei von Sengupta et al. [20] untersuchten Gattungen. (5 M)

AP 2.2: Entwicklung von Widerstandsgesetzen zur Berücksichtigung der Form und Oberflächenstruktur von Helmintheneiern. (1M)

AP 2.3. Implementierung des entwickelten Widerstandsgesetzes in einer Euler-Lagrange'schen Zweiphasenformulierung. (1 M)

AP 2.4. Modelloptimierung durch Vergleiche mit den Experimenten von Sengupta et al. [20]. (1 M)

Zunächst wurden Simulationen einzelner Partikel mit ähnlichen geometrischen Charakteristika wie den in Abb. 08 und Tabelle 01 gezeigten Helmintheneiern in einer voll aufgelösten dreidimensionalen CFD Simulation untersucht. Hierfür haben sich teilweise sehr ähnliche Sinkgeschwindigkeiten ergeben, wie die in Abbildung 07 gezeigten Ergebnissen von den experimentellen Untersuchungen von Sengupta et al.

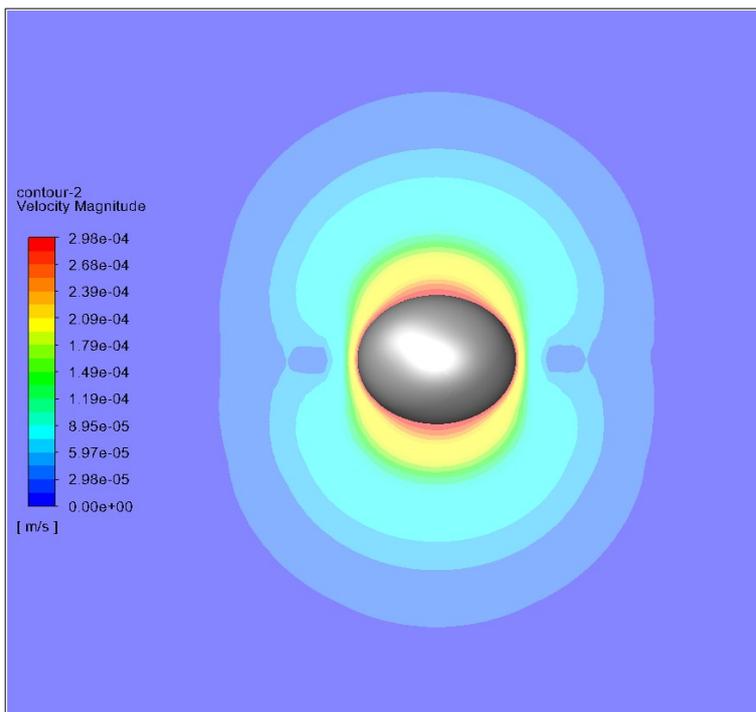


Abb. 04: Geschwindigkeitsfeld um ein Helminthenei der Gattung Oes

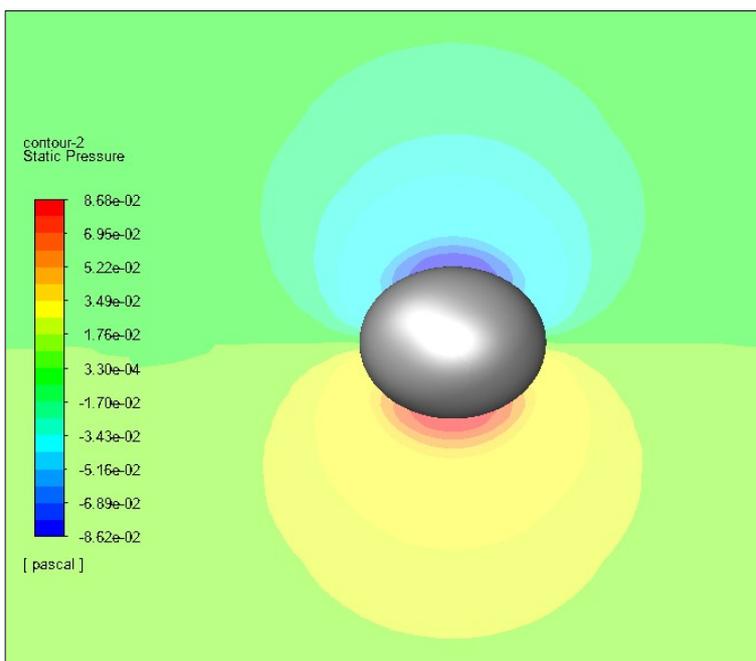


Abb. 05: Druckfeld um ein Helminthenei der Gattung Oes

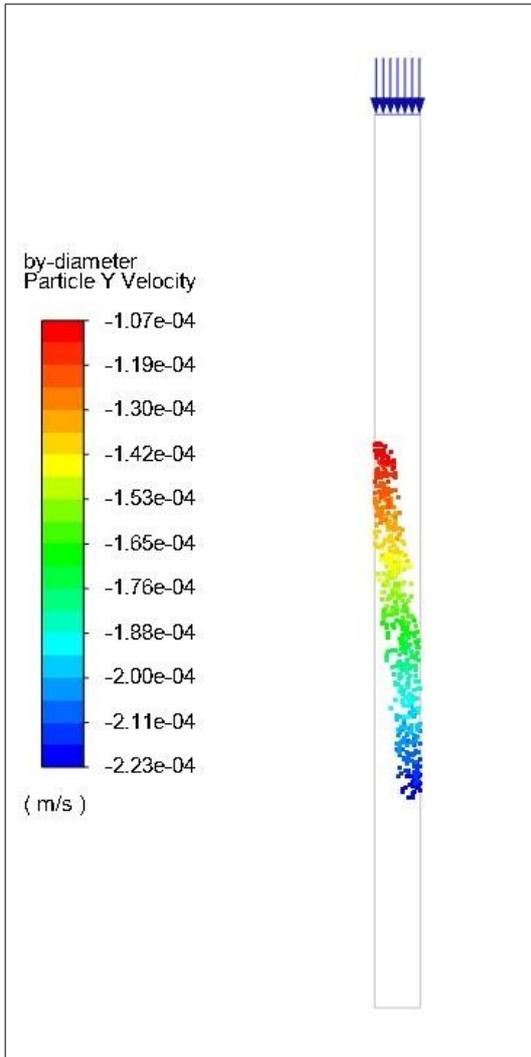


Abb. 06: Verteilung der Sinkgeschwindigkeiten einer Partikelschar der Helmintheneier Oes

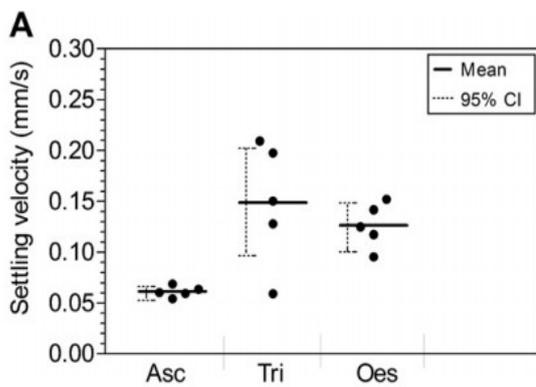


Abb. 07: Experimentelle Ergebnisse der Untersuchungen von Sengupta et al. [1]

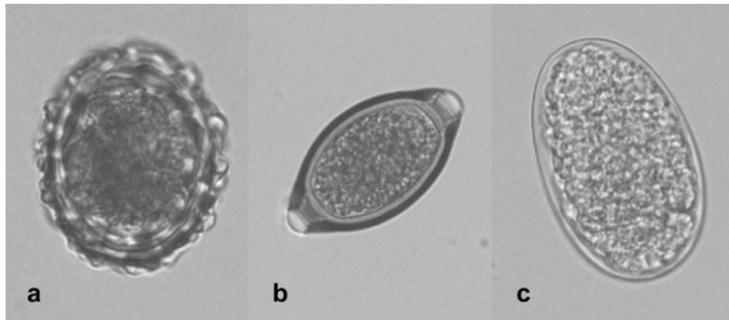


Abb. 08: Fotografische Abbildungen der einzelnen Helmintheneier (a: *Ascaris suum*; b: *Trichuris suis*; c: *Oesophagostomum*) [1]

Tabelle 1: Überblick über geometrische Eigenschaften einzelner Eierarten [1]

Table 1 – Measured sizes of helminth eggs used in the experiments.			
Parameter	Egg size (μm)		
	Mean ($\pm\text{SD}$)	Min	Max
Ascaris			
Length	67.20 (5.33)	52.16	84.07
Width	55.41 (3.91)	46.80	64.64
Eccentricity	1.22 (0.12)	1.00	1.80
Trichuris			
Length	62.16 (2.60)	54.25	68.02
Width	30.78 (2.72)	26.67	38.29
Eccentricity	2.03 (0.16)	1.56	2.38
Oesophagostomum			
Length	76.17 (5.52)	62.74	85.67
Width	50.33 (6.63)	38.35	60.23
Eccentricity	1.53 (0.15)	1.24	1.99

Es zeigt sich, dass die Sinkgeschwindigkeit der Helmintheneier in den bisherigen Simulationen noch teilweise zu hoch vorhergesagt wird. Es wird darum versucht, die entsprechenden Modellparameter entsprechend anzupassen.

Außerdem sind die bisherigen Simulationen mit einem glatten, ovalen Partikel durchgeführt, was morphologisch dem Ei des Oesophagostonum zeigt (c) entspricht.

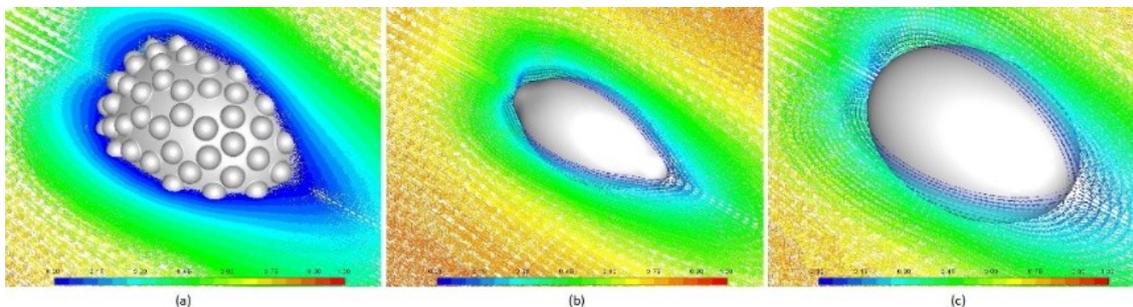


Abb. 09: Stromlinien, gefärbt nach lokaler Geschwindigkeit um die jeweiligen Helmintheneier

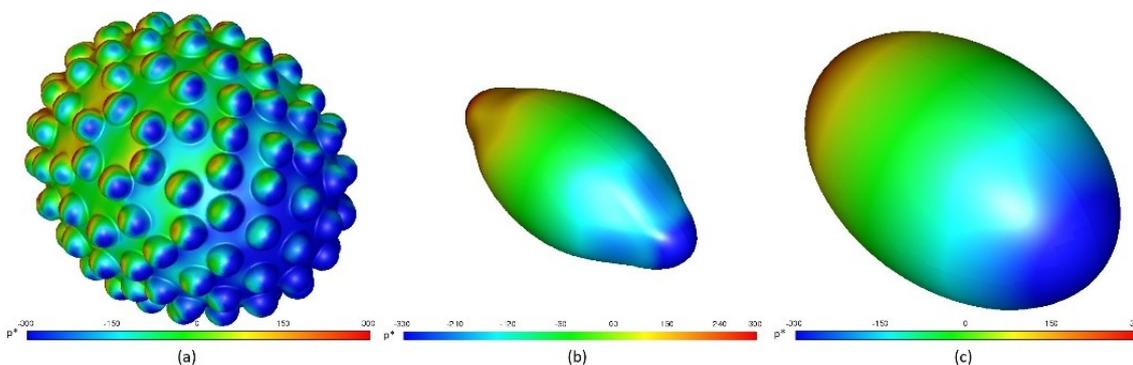


Abb. 10: Druckverläufe auf den einzelnen Helmintheneiern

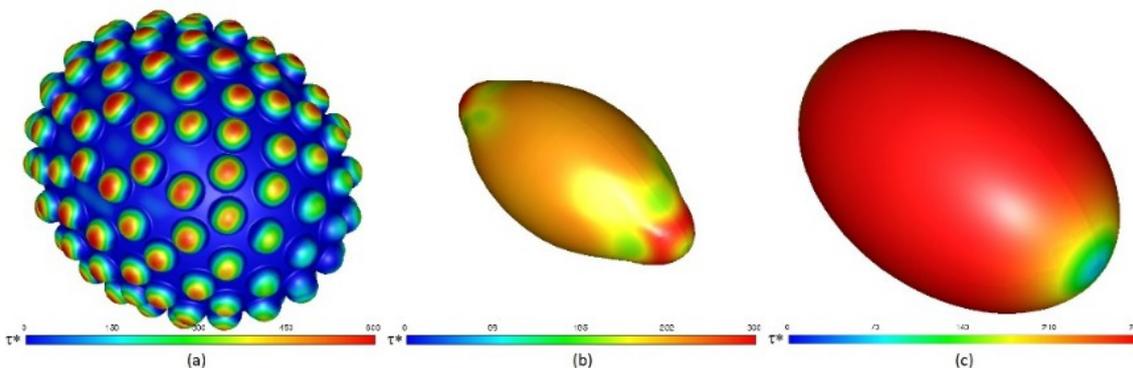


Abb. 11: Subspannungen auf der Oberfläche der Helmintheneier

Ausgehend von den hier gewonnenen Erkenntnissen, wurden auch für die weiteren Arten von Helmintheneiern voll aufgelöste numerische Untersuchungen getroffen. Hierbei war ein Hauptproblem die geometrische Abbildung der Oberfläche der *Ascaris Suum*, da dieses Ei eine raue Oberfläche mit ungleichmäßig angeordneten Ausstülpungen aufweist.

Zur Erzeugung einer entsprechenden Oberfläche ist ein Programm entwickelt worden, dass Kugelhalbschalen in randomisier Anordnung auf der Außenfläche einer größeren Kugel erzeugt.

Für die drei unterschiedlichen Helmintheneier-Typen ergeben sich in Abb. 09-11 gezeigten Druck- und Scherkraftverläufe, wie auch Geschwindigkeitsfelder.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich eine Widerstandskraft ableiten, die dann über folgende Formeln in die entsprechende Sinkgeschwindigkeit umgerechnet werden können:

$$V = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C} \frac{\Delta\rho}{\rho} g d}$$

$$C = \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687})$$

Damit ergeben sich in Tabelle 02 gezeigte Sinkgeschwindigkeiten. In der ersten Spalte stehen die experimentellen Sinkgeschwindigkeiten die sich aus den Untersuchungen von *Sengupta et al* ergeben haben. Die zweite Spalte enthält die Sinkgeschwindigkeiten, die sich ergeben, wenn für die Helmintheneier eine Kugelform mit den geometrischen Charakteristika der jeweiligen Eiertypen angenommen wird. Die dritte Spalte (Prediction) enthält die Werte, die sich aus dem Widerstandskoeffizienten ergeben, der aus den voll aufgelösten dreidimensionalen Strömungssimulationen ergibt.

Es zeigt sich, dass dieser Ansatz im Vergleich zum Experiment teilweise relativ gute Übereinstimmungen aufweist, wie z.B. im Falle der tri-Eier. Andererseits aber eine große Abweichung bei der Vorhersage der asc-Eier bekommt. Die scheint mit der komplexen Form der Eier zusammen zu hängen.

Tabelle 2: Vergleich der experimentellen Sinkgeschwindigkeiten, der Vorhersage nach Stokes Sinkgesetz für Kugelförmige Partikel und der Ergebnisse aus der dreidimensionalen Strömungssimulation

Egg type	V [mm/s]		
	EXP	Stokes	Prediction
asc	0.06	0.27	0.24
tri	0.15	0.13	0.15
oes	0.13	0.17	0.17

Dieser Erkenntnis folgend, wurde für die jeweiligen Sinkgeschwindigkeiten jeweils ein Korrekturfaktor ermittelt, der die numerischen Werte für die Sinkgeschwindigkeiten den zuvor experimentell ermittelten Werten angleicht und das Stoke'sche Sinkgesetz um diesen Term erweitert, wie in folgender Formel gezeigt.

$$C = f \times \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right)$$

Somit ergeben sich für die unterschiedlichen Eier jeweils in Leitungswasser und in Abwasser die in Tabelle 03 dargestellten Korrekturfaktoren:

Tabelle 3: Korrekturfaktoren für die einzelnen Eiertypen in reinem und in Abwasser als Ergebnisse der Strömungssimulation

Egg type	Correction factor, f	
	Tap water	Wastewater
asc	4.3477	1.6610
tri	0.8593	1.4206
oes	1.3249	1.5203

Mit diesen Faktoren zeigen die folgenden Versuche die jeweiligen präzisen Vorhersagen, wie in Tabelle 04 gezeigt.

Tabelle 4: Vergleich der Vorhersage und der experimentellen Daten nach einsetzen der ermittelten Korrekturfaktoren

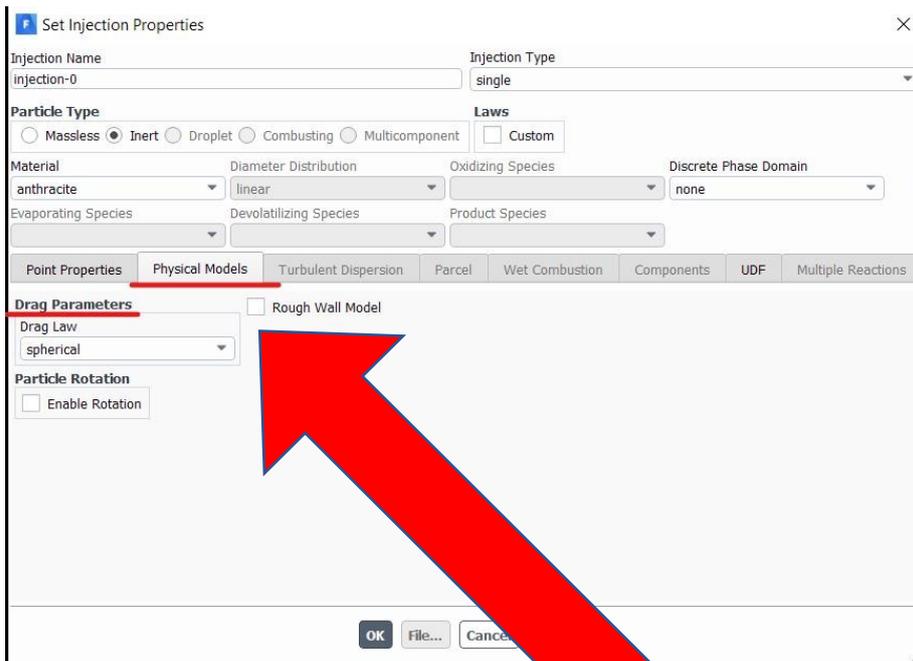
Egg type	V [mm/s]			
	Tap water		Wastewater	
	EXP	Lagrangian prediction by corrected drag law	EXP	Lagrangian prediction by corrected drag law
asc	0.06	0.06	0.16	0.16
Tri	0.15	0.15	0.09	0.09
oes	0.13	0.13	0.11	0.11

Ergebnis:

Validierte Widerstandsgesetze für das Sinkverhalten von unterschiedlichen Helmintheneiern.

Durch die Erweiterung des Stoke'schen Sinkgesetzes um einen Korrekturterm, ist es möglich, das Verhalten der einzelnen Eier numerisch zu modellieren, da die Partikel in der Simulation auch über diese Sinkgesetze definiert sind. Die Implementierung in der Simulationssoftware ANSYS Fluent erfolgte über eine hierfür entwickelte Funktion (User Defined Function) die an der entsprechenden Stelle in der Software positioniert werden kann, wie in Bild 12 gezeigt.

Mithilfe dieses Widerstandsgesetzes können im Folgenden Simulationen der Durchströmung der Anlage vorgenommen werden und die Simulationen abschließend mit Experimentellen Daten verglichen werden.



```

/*****
 UDF for computing particle drag coefficient (18 Cd Re/24)
 curve as suggested by R. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber
 "Bubbles, Drops, and Particles" (1978)
 *****/
#include "udf.h"
DEFINE_DPM_DRAG(particle_drag_force,Re,tp)
{
/*****EGG DATA*****/
  real factor_oes, factor_tri, factor_asc;
  factor_oes = 1.7616;
  factor_tri = 0.7410;
  factor_asc = 18.9339;
/*****SPECIFY EGG*****/
  real corr_f;
  corr_f = factor_asc;
/*****
  real drag_stokes, drag_oseen;
  real drag_force;

```

Abb. 12: Implementierung des Sourcecodes für das entwickelte Sinkgesetz als UDF in ANSYS Fluent

III. Entwicklung eines validierten Simulationsmodells für die Vorhersage von Abscheideraten von Ersatz-Helmintheneiern im dynamischen Strömungsfeld einer realen kleinen Kläranlage

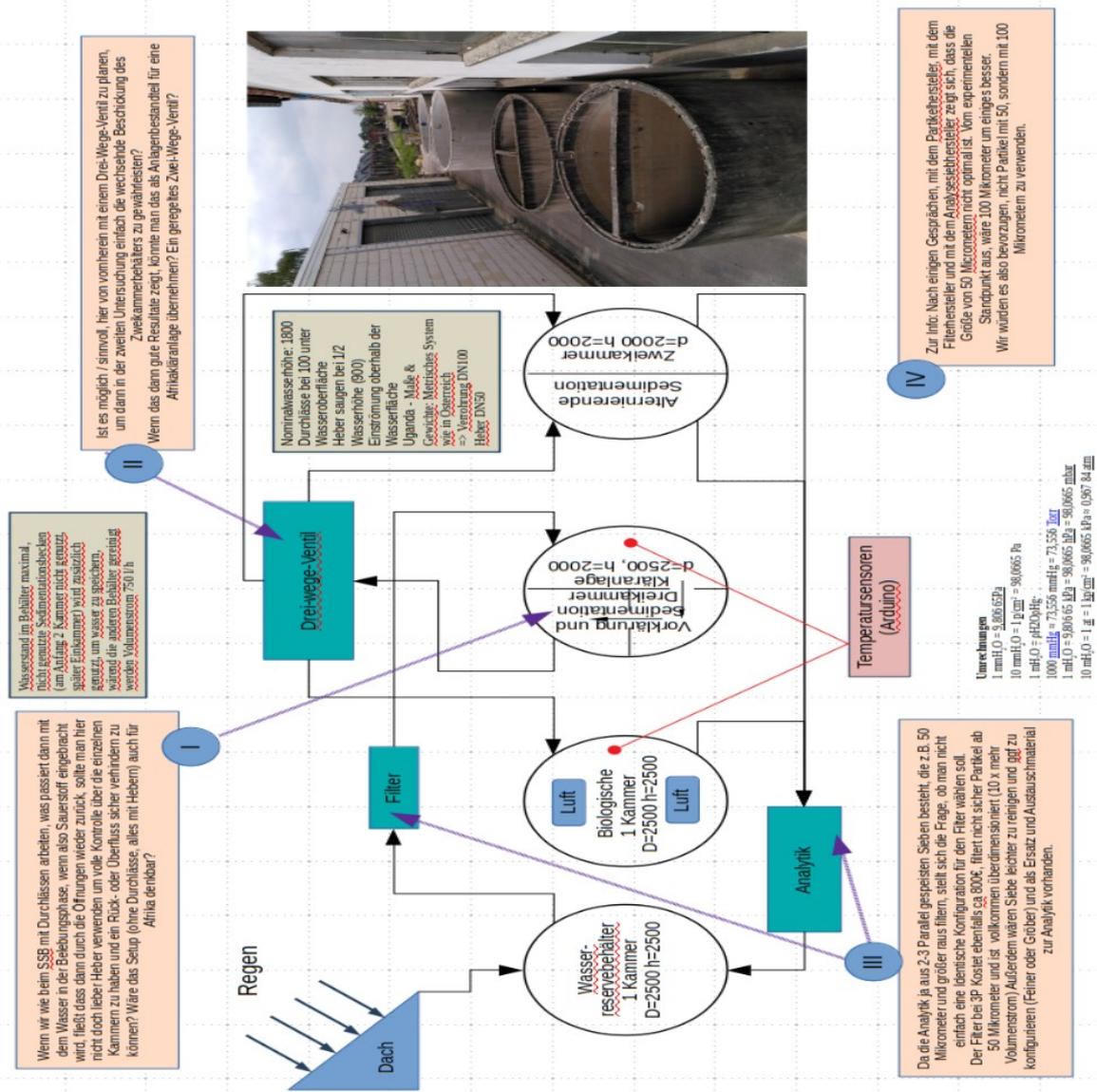


Abb. 13: Aufbau einer Testanlage (AP 1.4) zur experimentellen Untersuchung des Abscheideverhaltens an einem Versuchsstand bei der Menk'schen GmbH & Co. KG und entsprechende messtechnische Ausrüstung der Anlage. (3 M)

In wechselseitiger Absprache wurde sich für in Abb. 13 dargestellten experimentellen Aufbau entschieden. Unten gezeigt, ein paar Fotos von der Entwicklung der Testanlage.



Abb. 14: Foto von den Aufgestellten Behältern



Abb. 15: Aufnahme von dem Dachaufbau über den Behältern



Abb. 16: Innenaufnahme von den Behältern, zu sehen die Erreichbarkeit der einzelnen Becken



Abb. 17: Foto von den vollkommen abgedeckten Behältern

Eine sehr große zeitliche Verzögerung hat sich aufgrund der Problematiken beim Aufbau der Versuchsanlage ergeben:

1. Der Aufbau der Testanlage auf dem Firmengelände der Firma Menk hat sich aufgrund der Corona-Pandemie deutlich verlängert, da teilweise Lieferprobleme, teilweise aber auch die Arbeit mit und bei Menk durch Corona erschwert worden sind.
2. Die Behälter, die erst nach Projektbeginn für die Versuchszwecke bereitgestellt worden sind, waren in einem sehr schlechten Ausgangszustand und mussten vor der Nutzung zunächst von Grund auf gereinigt und saniert werden. Das hat sehr viel Zeit in Anspruch genommen, insbesondere auch die Dichtigkeitsprüfung, die von einem der Behälter nicht bestanden worden ist, weshalb wir hierfür dann auch einen neuen brauchten.
3. Die Abdeckung der Behälter zur Verhinderung eines Schmutzeintrags in die Behälter war nicht vorhanden und eine entsprechende Konstruktion hat sehr lange gedauert und einige Iterationen durchlaufen, da sie gleichzeitig dicht und stabil, aber auch günstig sein musste und die Zugänglichkeit der Behälter weiterhin erhalten bleiben muss. Nach vielen Versuchen wurde letztendlich für den Aufbau eines Zeltes über den Behältern entschieden und es scheint nach aktuellem Stand eine sehr gute Lösung zu sein.
4. Uns war natürlich von vornherein klar, dass die Qualität des Probewassers tadellos sein muss, jedoch ist das Algenwachstum und der Eintrag von Verschmutzung durch Insekten und Wasserlebewesen von uns zuvor deutlich unterschätzt worden. So ist dies nur schwer zu verhindern ohne den Einsatz von sehr aggressiven chemischen Substanzen. Da wir hoffen, nach der Untersuchung das Wasser aber wieder in einen Vorfluter entlassen und der Natur wieder zuführen zu können, suchen wir nach Möglichkeiten, die Qualität des Wassers zu gewährleisten, gleichzeitig aber auch biologisch möglichst verträglich zu arbeiten. Hierzu haben wir derzeit eine Lösung gefunden, die das Algenwachstum reduziert (Tetra Pond AlgoFin), indem bestimmte Bakterien den Bewuchs verhindern. Dieses Mittel stammt aus der Teichbewirtschaftung und scheint bisher sehr gut zu funktionieren und später ohne große Bedenken in die Natur entlassen werden zu können.

An dieser Stelle soll nochmal zum Verständnis der Arbeitsweise einer SBR-Kleinkläranlage mit entsprechenden Zeiten dargestellt werden.

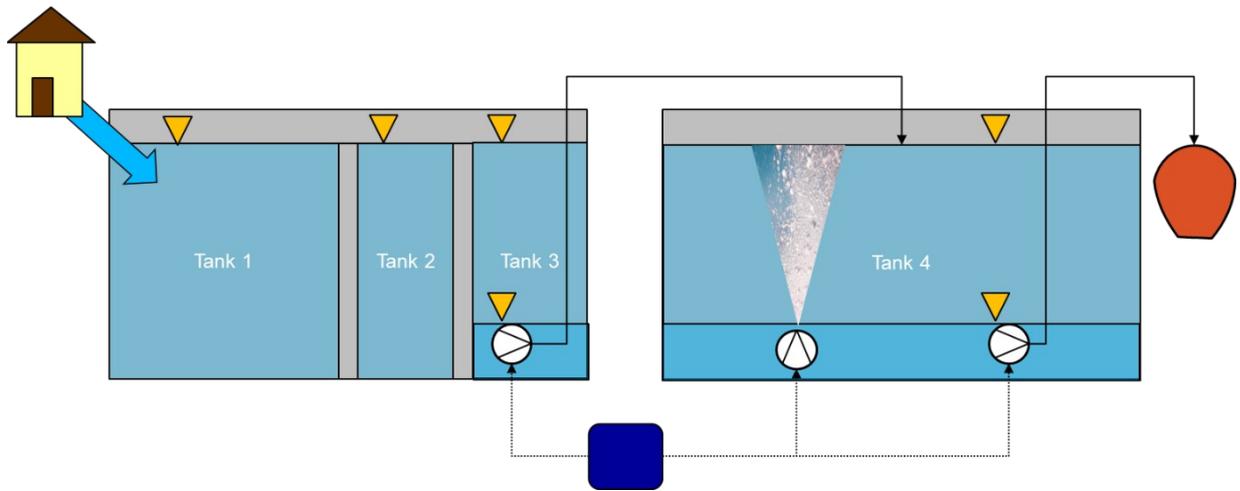


Abb. 18: Schemazeichnung der Durchströmung der Kleinkläranlage

Hier in Abb. 18 dargestellt ist die bereits erwähnte Anlage, die aus zwei Behältern besteht, wobei der erste Behälter ein Dreikammerbehälter ist, bei dem die häuslichen Abwässer unkontrolliert in die erste Kammer (1/2 Kreissegment) eingeleitet werden. Aufgrund der Füllstandshöhe überfließt sodann ein entsprechender Teil des Abwassers das Wehr und gelangt so in die zweite Kammer (1/4 Kreissegment) und auf die gleiche Weise weiter in die dritte Kammer (1/4 Kreissegment). Von hier wird über eine Pumpe (Druckluftgetriebener Wasserheber) eine bestimmte Zeit Wasser von dem ersten Behälter in den zweiten Behälter befördert. Dies geht mit einer Füllstandsänderung in der letzten Kammer einher. In dem zweiten Behälter, einem Einkammerbehälter, befindet sich die Biologische Reinigungsstufe. Hier wird das Abwasser eingeleitet, dann über eine bestimmte Zeit mithilfe von Belüftungsdüsen belüftet und nach dieser Zeit ebenfalls über einen längeren Zeitraum ruhen gelassen, damit sich die Schwebstoffe wieder absetzen können. Danach wird das klare Wasser in den Vorfluter gepumpt und ein Teil des am Boden befindlichen Klärschlammes über den Schlammheber in den ersten Behälter zurückgepumpt (dieser Prozessschritt ist nicht in der Schemazeichnung 18 dargestellt).

Diese jeweiligen Pumpvorgänge gehen ebenfalls mit einer Füllstandsänderung im Behälter einher.

Aufgrund dieser komplexen Strömungsführung sowie der teilweisen langen Zeiträume, haben wir uns entschieden, die Modellierung und Optimierung zu teilen. Einerseits soll die direkte geometrische Optimierung in der ersten Kammer erfolgen, da die Helmintheneier, die diese Kammer nicht verlassen am sichersten verwahrt sind, andererseits soll in der Biologischen Kammer von einem Einkammer- auf ein Zweikammersystem umgestellt werden, wodurch die Befüllung, Belüftung und der Klarwasserabzug alternierend jeweils in den Kammern erfolgen kann und damit eine doppelt so lange Verweilzeit bei gleichem Klärvolumen erfolgen kann. Durch diese Zweiteilung wird es im Folgenden sinnvoll, nur die erste Kammer zu untersuchen und hier die Strömungstechnische Optimierung anzusetzen.

- AP 3.2: Durchführung der Versuche und Auswertung des Abscheideverhaltens der Testanlage, beschickt mit einem Wasser-Surrogat-Gemisch (AP 1.3). (3 M)

Aus zuvor genannten Gründen ist die Entscheidung getroffen worden, bei den Versuchen und der strömungstechnischen Optimierung auf die erste Kammer zu konzentrieren. So wurde die Testanlage wie in Abbildung 19 zu sehen ist, dahingehend modifiziert, dass die zweite Kammer entleert worden ist und hier über einen Kanal das austretende Wasser aus dem Auslass der ersten Kammer über die Probefilter geführt wird. Diese können im Betrieb der Anlage zu bestimmten Zeiten gewechselt werden und so ein zeitlicher Verlauf der austretenden Partikel bestimmt werden. Das gefilterte Wasser wurde am Grund der zweiten Kammer von einer Pumpe in ein oberhalb positioniertes blaues Kunststofffass gepumpt. Da diese Pumpe nicht durchflussgeregelt ist, wurde am Auslass des blauen Kunststoffasses über ein Kugelventil ein festgelegter Volumenstrom eingestellt und durch zeitlich geregeltes ein- und ausschalten der Pumpe ein kontinuierlicher Zustrom von 0,8 l/s eingestellt. Dieser Volumenstrom entspricht einem sehr hohen zugeführten Volumenstrom, der eigentlich deutlich über dem liegt, was einer 25-50 EW-Kleinkläranlage beaufschlagt werden würde. In diesen Versuchen war ja auch zunächst nur eine theoretische Überprüfung der numerischen Vorhersage des Partikelverhaltens im Vergleich mit experimentellen Daten das Ziel und noch keinen Betrieb unter realistischen Betriebsbedingung.

Diesem Zulauf kann über eine angeschlossene Spritze eine bestimmte Menge an Wasser-Testpartikel Gemisch zugeführt werden. Im vorliegenden Versuch wurden 0,5 g Testpartikel eingewägt. In Abb 21 zu sehen, wie die Testpartikel portioniert worden sind und jeweils zu 0,5 g in ein vorher abgewogenes (hier 2,6 g) Aluminiumpaket aufgeteilt wird. Diese Mengen sind jeweils im Zulauf zum Zeitpunkt 0 in einer konzentrierten Entladung eingebracht. Nach diesem konzentrierten Einbringen der Testpartikel wurden keine weiteren Testpartikel in die Anlage injiziert. Der Wechsel der Probefilter erfolgte jeweils nach einem Intervall von 5, 15, 45 und 90 Minuten.



Abb. 19: Aufbau der Testkammer mit Auslasskanal



Abb. 20: Abbildung der verwendeten Analysesiebe jeweils bereist mit Testpartikeln



Abb. 21: Einwaage der Testpartikel

Im Betrieb der Anlage unter diesen Testbedingungen hat sich gezeigt, dass relativ viele Partikel im Zulauf an Blasen anhaften und damit an der Wasseroberfläche verbleiben und so schneller in den Auslass gelangen, als die es täten, wenn sie sich frei im Wasserkörper bewegen würden. Dieser Effekt stellt für die vergleichende Untersuchung eine Veränderung der Messwerte dar, da anhaftende und auftreibende Partikel in der numerischen Simulation nicht berücksichtigt werden. Auf der anderen Seite ist dieses Verhalten für das voraussichtliche Verhalten von Helmintheneiern in der Kleinkläranlage vermutlich doch von Bedeutung, da davon ausgegangen werden kann, dass diese Eier in der Mehrzahl angelagert an anderen Partikeln vorkommen. Das soll in der folgenden Optimierung ebenfalls berücksichtigt werden.

Die Auswertung der Eier mittels gravimetrischer Bestimmung hat sich im Fortgang des Forschungsprojekts als sehr fehleranfällig herausgestellt, da selbst mit den eingesetzten Reinigungsmitteln zur Verhinderung von Algenwachstum eine relativ zu der eingetragenen Partikelmenge sehr große Menge an Algen im Filter verbleiben. Diese würden die Messwerte zu sehr verfälschen. Dies ist der Grund, dass wir uns für eine alternative Auswertung entschieden haben. Hierzu haben wir eine Kamera mit einem Ultra-Nah-Aufnahmen-Objektiv versehen und damit sehr hoch aufgelöste Bilder von den Sieben in gleichbleibenden Abständen und Zoomweiten aufgenommen (vgl. Abb. 22). Zunächst war geplant, diese Bilder folgend zu einem Bild zu vereinen, dies hat sich aber aufgrund der unterschiedlichen Winkel als unsicher herausgestellt, da damit eine Mehrfachabbildung der selben Partikel möglich gewesen wäre. So haben wir dann von einem Sieb jeweils eine statistisch größere Menge an Bildern aufgenommen und die so ermittelten Partikelzahlen durch die Anzahl der Bilder geteilt. Damit erhalten wir zwar keine Absolutwerte, aber eine mittlere Partikelbeladung je Sieb, die sich dann über die Fläche wieder vergleichend extrapolieren lässt.

Zur Zählung der Partikel ist anschließend ein MATLAB-Programm zum Einsatz gekommen, bei dem zunächst ein gewählter Farbbereich isoliert werden kann (Abb. 23 & 24). Hier hat sich die Wahl der roten Testpartikel als sehr vorteilhaft herausgestellt, da diese sich gegenüber den sonst grünen oder braunen Verunreinigungen des Wassers klar separieren lassen. Hier kann ggf. eine weitere Verbesserung der Messergebnisse erzielt werden, indem die Fluoreszenz-Eigenschaften der Partikel genutzt wird, was eine Identifikation der gewünschten Farbbereiche weiterhin erleichtert.

Durch eine Betrachtung einzelner Partikel wird nun bestimmt, wie viele Pixel jeweils etwa ein Partikel im aktuellen Bildausschnitt bilden (Abb. 25) und die gesamte Pixelanzahl der separierten Farbbereich durch diesen Wert geteilt, was dann einer relativ genauen Zählung der Partikel entspricht.



Abb. 22: Aufnahmevorrichtung für die Nahaufnahmen der Testsiebes

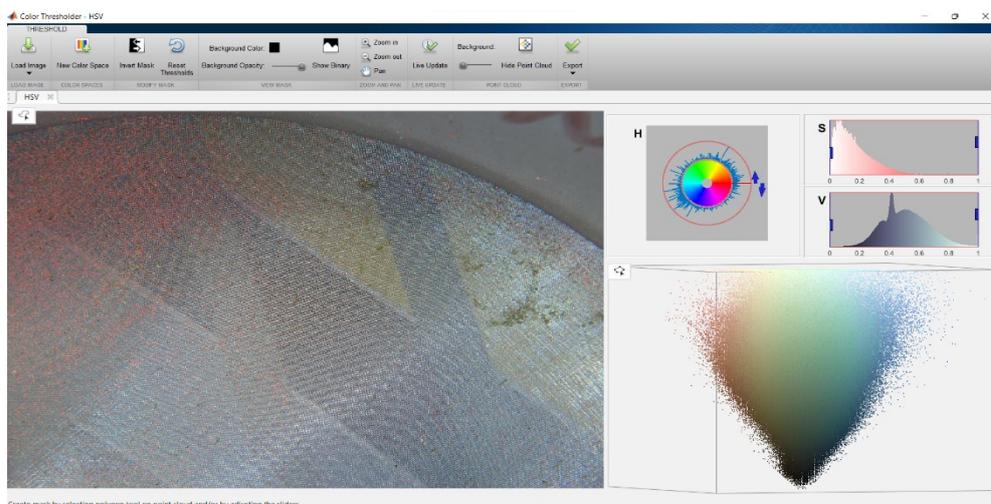


Abb. 23: Programm zur Bestimmung des zu filternden Farbanteils

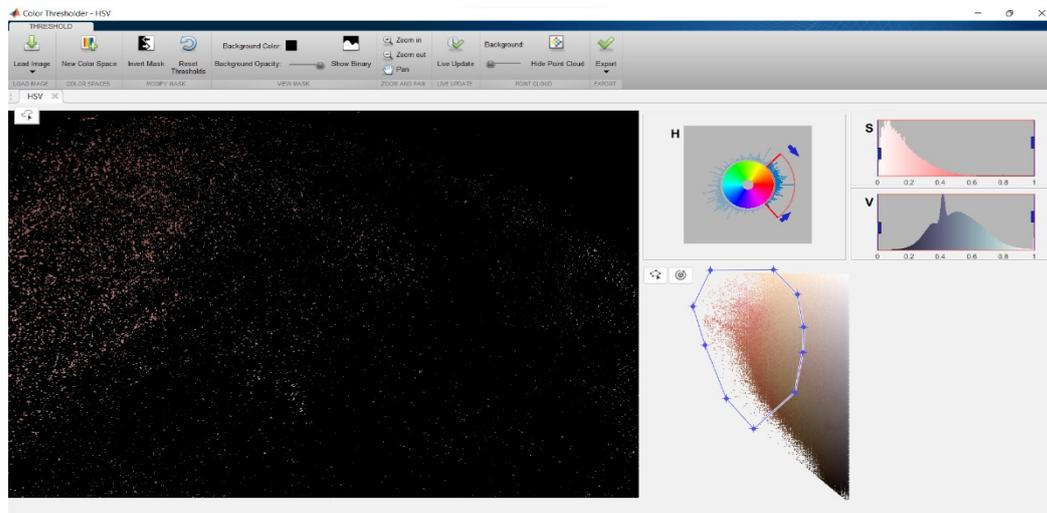


Abb. 24: Ergebnis nach Filterung des Farbbereichs der Testpartikel

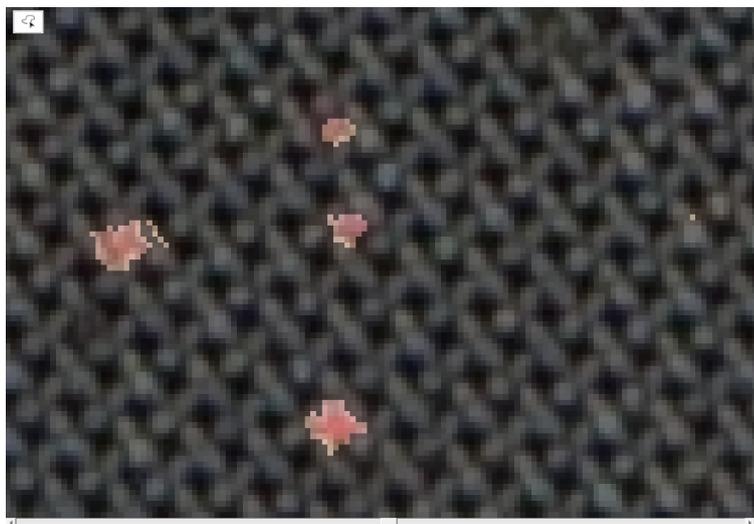


Abb. 25: Nahaufnahme einzelner Partikel zur Definition der Pixelanzahl je Partikel

Diese Untersuchung erfolgte für jeder der Bilder, die von den jeweiligen Analyseseiben aufgenommen worden ist und die einzelnen Ergebnisse sind in den jeweiligen weißen Boxen in Abb 27 dargestellt. Daraus ergibt sich ein möglicher Durchschnitt und für die einzelnen Abschnitte mit der jeweiligen Standardabweichung wie durch die entsprechenden Linien aufgezeigt. Hierbei wurde der Fehler über die einzelnen Analysen kumuliert. Durch diese Betrachtung ergibt sich auch, dass eine relativ große Streuung der Partikelanzahl im ersten Sieb direkt auf die folgenden Betrachtungen auswirkt. Hier war eine sehr große Streuung vorhanden da die schwimmenden Partikel, die sich im Schaum jeweils als Partikel-Konglomerat vereinen später im Sieb ebenfalls als größere Anhäufungen vorhanden waren und somit auf

einigen Bildern zu einer großen Partikelzahl geführt haben, wohingegen andere Bilder mit weniger Partikeln zu sehen waren.

Dass der Einfluss dieser schwimmenden Partikel auf die Streuung relativ groß ist, zeigt sich im Vergleich der Streuungen der ersten beiden Siebe mit der Streuung der Partikelanzahl im letzten Sieb. Hier waren bereits ein Großteil der schwimmenden Partikel zuvor aus dem Behälter ausgeströmt und die Streuung unter den einzelnen Aufnahmen ist deutlich verringert.

Um diesen Effekt zu reduzieren, soll im Folgenden noch ein Versuch durchgeführt werden, bei dem die schwimmenden Partikel durch ein eingetauchtes Brett abgehalten werden. Weiterhin soll die Streuung reduziert werden, indem die Anzahl der aufgenommenen Fotografien pro Sieb erhöht wird.

Mit den Widerstandsgesetzen für kugelförmige Partikel, die zur Implementierung in der Strömungssimulationssoftware ANSYS Fluent vorhanden ist, wurde unter Verwendung einer Zweiphasenströmung mit angepassten Modellparametern verwendet. Hierzu kam das Discrete Phase Modell zum Einsatz, bei dem eine diskrete Anzahl an Partikeln der Strömung unter bestimmten Bedingungen hinzugefügt werden kann. Erweitert wurde das Modell durch eine gewisse turbulenzabhängige Randomisierung der Strömungsbahnen (Random Walk Model), die der natürlichen Variation der Verhalten der einzelnen Partikel entspricht, sowie durch ein Angepasstes Widerstandsgesetz zur späteren Modellierung der einzelnen Helmintheneier wie in vorherigem Arbeitspaket entwickelt worden ist.

Mit diesen Einstellungen wurde eine dreidimensionale Strömungssimulation entsprechend der Versuchsbedingungen durchgeführt und es ergaben sich die in Abb. 26 gezeigten Strömungsbilder, wobei die Zeit der einzelnen Partikel aufgezeichnet wurde, wie lange die Partikel im Behälter verbleiben bevor die den Ausgang erreichen. Diese Zeiten sind in Abb. 27 als rote Linie im Vergleich mit den Messwerten gegenübergestellt.

Es zeigt sich, dass der Trend der Simulation deutlich dem der Versuche folgt. Die Simulationsergebnisse liegen innerhalb der zugegebenermaßen großen Toleranz durch die kumulierte Standardabweichung, insbesondere im Späteren Verlauf, wenn die Blasen-Anhaftenden-Partikel die Versuchsergebnisse nicht mehr so direkt beeinflussen, zeigt sich aber ein sehr ähnlicher Verlauf zwischen Versuch und Simulation. Aus diesem Grund sind wir von der generellen Anwendbarkeit der Simulationsmodells zur Vorhersage der Partikeldynamik in der Kleinkläranlage überzeugt und können dieses nutzen, um im nächsten Schritt eine Optimierung der Abscheidecharakteristik der Anlage vorzunehmen. Umso mehr, als dass die Verbesserung ebenfalls mit modellinternen Vergleichen prognostiziert wird und nicht in direktem Vergleich zu realen Messwerten gesehen wird.

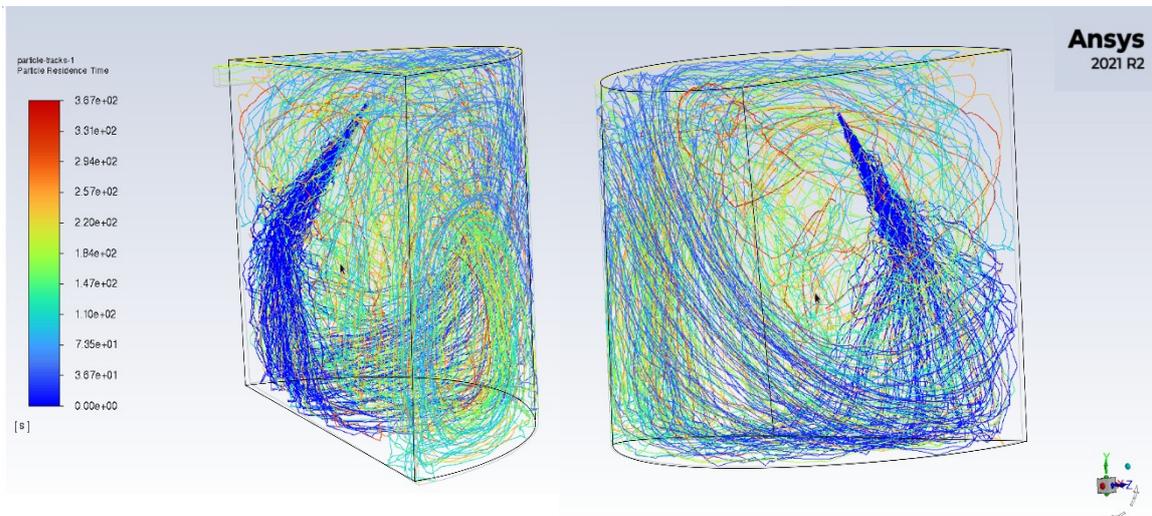


Abb. 26: Partikelverlauf aus den dreidimensionalen Strömungssimulationen für die Testpartikel

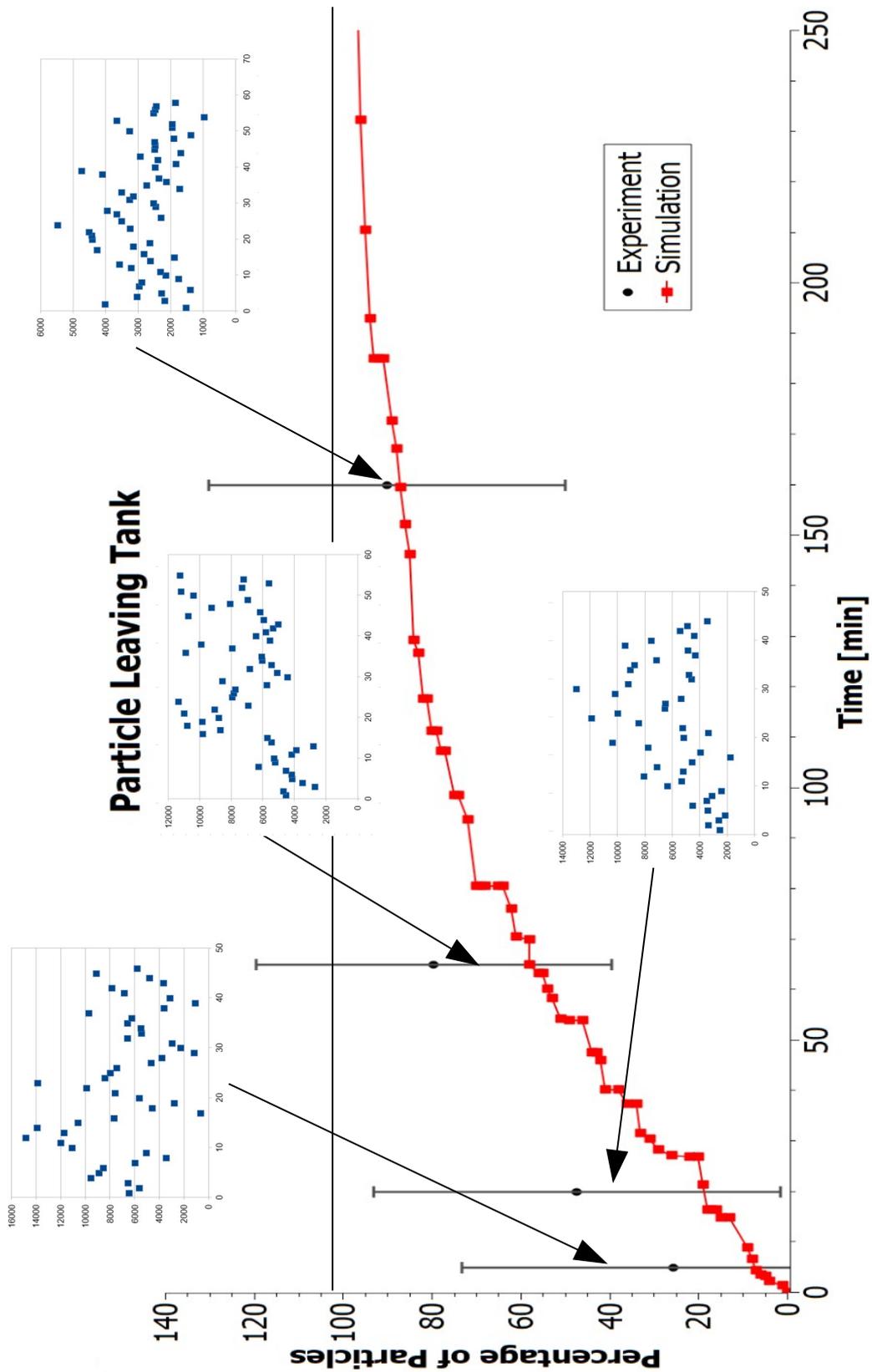


Abb. 27: Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen (Balken) und aus der Simulation (roter Graf)

- AP 3.3: Strömungstechnische Simulation zur Berechnung des Verhaltens der Testkläranlage. Die Strömungssimulationen basieren auf einem Zweiphasenmodells nach einer Euler-Lagrange-Darstellung, in dem das Wasser die kontinuierliche Phase (nach Euler), und das Helminthenei-Surrogat die disperse Phase (nach Lagrange) darstellen. (3 M)

Erste dreidimensionale Simulationen des Partikelverhaltens in den realistisch erfassten Behältern wurden durchgeführt.

Es ergab sich leider aufgrund der unklaren Situation bei der Versuchsanlage ebenfalls ein zeitlicher Verzug, bis diese Geometrien gesichert und entsprechend auch am Rechner abgebildet werden konnten.

Folgend dargestellt, der Modellaufbau und die ersten 3D-Simulationen der Geschwindigkeitsbahnen von Helmintheneiern bei dem Einfüllprozess.

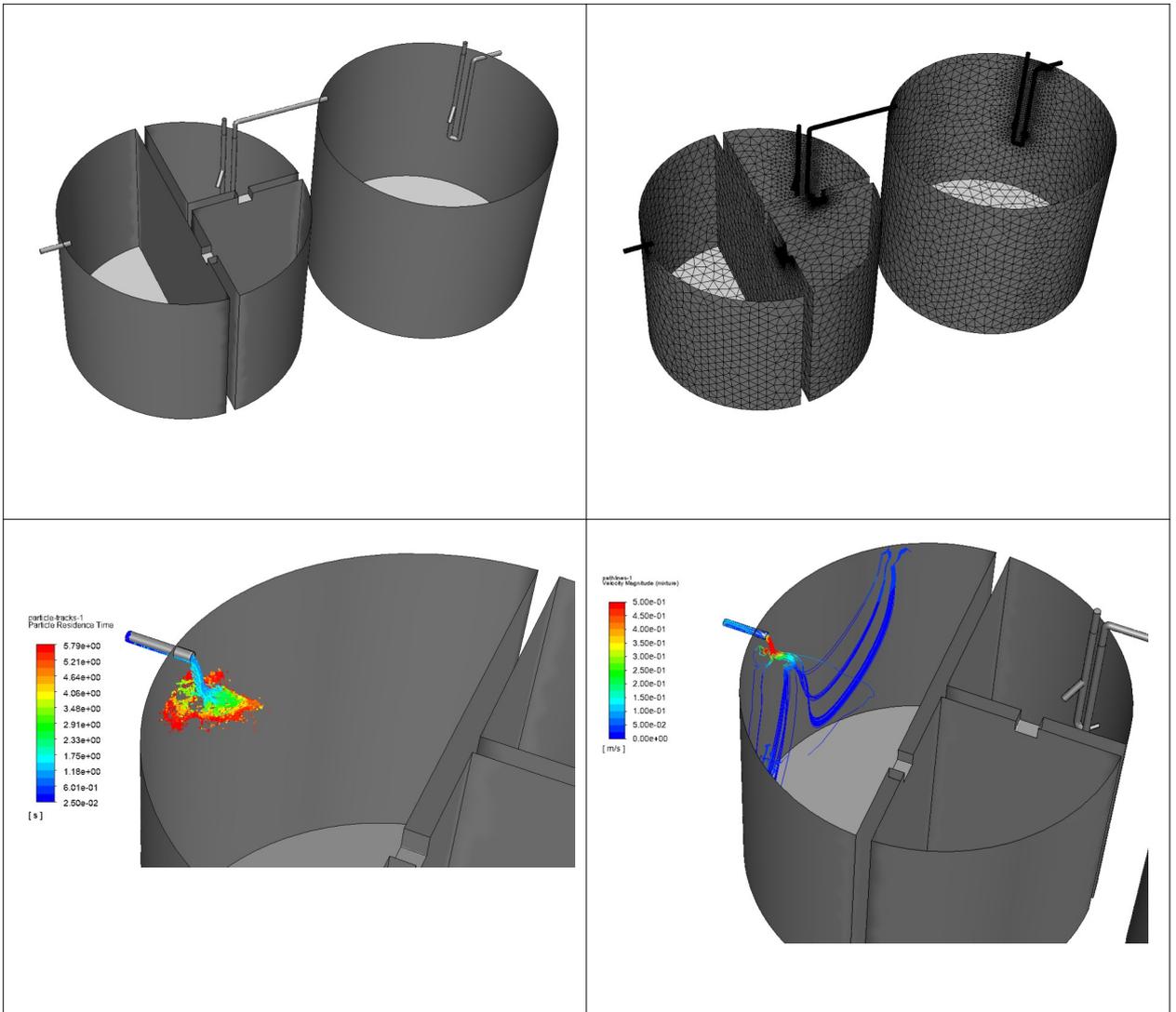


Abb. 28: Netz und Setup der dreidimensionalen Simulation des Partikelverhaltens bei Befüllung der Anlage

- AP 3.4: Anpassungen des Simulationsmodells (Vernetzung, numerische und mathematische Verfahren, Turbulenzmodell) um die bestmögliche Übereinstimmung mit den Messdaten zu erhalten. (3 M)

Ergebnis:

Validiertes Zweiphasen-Strömungsmodell für die Strömungsverhältnisse in einer kleinen Kläranlage

IV. Numerische Optimierung der kleinen Kläranlage für die Abscheidung von Helmintheneiern anhand von validierten numerischen Modellen bzw. Verfahren

- AP 4.1: Erarbeitung von möglichen Konzepten zur Minderung der Konzentration von Helmintheneiern im Ausgang der untersuchten kleinen Kläranlage (ausgehend aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Projektphase). (1 M)

Nach Absprache mit Mitarbeitern der Firma Menk, wurden einige Ideen zur Optimierung gesammelt. Es scheint, dass bei der SBR-Anlagentechnik hauptsächlich zwei Punkte von Interesse sind:

1. Die Beruhigung des Zuflusses, um bereits in der Vorklärung eine möglichst gute Abscheidung zu erhalten. Hierfür soll im Zulauf des Vorklärbeckens ein Prallelement eingebracht werden, das die Bewegungsenergie des zulaufenden Abwassers absorbiert und auch den Volumenstrom vergleichmäßig, um einen schwallartigen Zulauf zu beruhigen.
2. In der Belebungs-kammer muss nach der Belebungsphase (Einblasen von Luft) eine genügend lange Absetzphase erzeugt werden. Aktuell liegt diese bei ca. 6h. Es wäre ratsam, für eine bessere Klärung der Helmintheneier, diese Zeit zu maximieren. Darum ist die Idee entstanden, die biologische Reinigungsstufe nicht in einem Einkammer-, sondern in einem Zweikammerbehälter zu verbauen, dessen Kammern abwechselnd beschickt werden können. So würde sich die Absetzzeit annähernd verdoppeln. Diese Überlegungen sollen noch in diesem Vorhaben bestätigt werden.

- AP 4.2: Messungen (Trocknungsexperiment, Viskosimeter) zur Bestimmung des Fließverhaltens des Abwassers. (1 M)

In der Literaturrecherche wurden in entsprechenden Normen und Vorschriften bereits allgemein anerkannte Stoffwerte für kommunales Abwasser gefunden.

Dichte und Viskosität besitzen eine Abhängigkeit von der Temperatur des Durchflußstoffes nach Tabelle 1. Bei der Berechnung von Abwasserleitungen für Schmutz- und Regenwasser wird nach DIN 1986 Teil 2 [1] von einer Wassertemperatur $t_w = 10\text{ °C}$ und einer kinematischen

Viskosität $\nu_{10\text{ °C}} = 1,31 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ausgegangen. Darin sind die normalerweise höhere

Temperatur und die gegenüber Reinwasser andere Zusammensetzung von Abwasser berücksichtigt [3].

Tabelle 5: Dichte, spezifisches Volumen, dynamische und kinematische Viskosität von Wasser bei atmosphärischem Druck *

Temperatur J °C	Dichte kg/m ³	Spez. Volumen n dm ³ /kg	Dyn. Viskosität 10 ⁴ · η kg/ms	Kin. Viskosität 10 ⁴ · ν m ² /s
0	999,8	1,0002	1791,64	1,792
2	999,9	1,0001	1670,83	1,671
4	1000,0	1,0000	1560,20	1,562
6	999,9	1,0001	1463,85	1,464
8	999,8	1,0002	1374,73	1,375
10	999,6	1,0004	1296,48	1,297
12	999,4	1,0006	1226,26	1,227
14	999,2	1,0008	1162,07	1,163
16	999,8	1,0012	1104,67	1,106
18	999,5	1,0015	1051,42	1,053
20	998,2	1,0018	1002,19	1,004
25	997,0	1,0030	891,32	0,894
30	995,6	1,0044	797,48	0,801
35	993,8	1,0062	718,52	0,723
40	992,2	1,0079	652,87	0,658
45	990,1	1,0100	595,05	0,601
50	988,0	1,0121	546,36	0,553
55	985,7	1,0145	503,69	0,511
60	983,2	1,0171	466,04	0,474
65	980,5	1,0199	432,40	0,441
70	977,7	1,0228	402,81	0,412
75	974,8	1,0258	377,25	0,387
80	971,8	1,0290	363,71	0,365
85	968,7	1,0323	334,20	0,345
90	965,3	1,0359	314,69	0,326
95	961,9	1,0396	298,19	0,310
100	958,3	1,0435	282,70	0,295

*) Die Zustandsgrößen der Flüssigkeiten ändern sich wesentlich mit der Temperatur, dagegen nur geringfügig mit dem Druck. Die Änderung durch Druck kann praktisch vernachlässigt werden.

[1] DIN 1986-1, 06.88, Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke; Technische Bestimmungen für den Bau: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 1986-2, 03.95, ...; Ermittlung der Nennweiten von Abwasser- und Lüftungsleitungen.

[3] ATV-Arbeitsblatt A 110, 08.88, Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. (GFA), St. Augustin.

- AP 4.3: Herleitung und Implementierung eines Fließgesetzes für Abwasser. (1 M)

Durch die Vergleiche der einzelnen Sinkgeschwindigkeiten, die in den Experimenten von Sengupta et al gefunden worden sind, haben sich entsprechende Korrekturfaktoren, wie oben bereits gezeigt auch für die Sinkgeschwindigkeit in Schmutzwasser berechnen lassen.

- AP 4.4: Die Geometrie und die Strömungsführung der vorliegenden kleinen Kläranlage werden anhand von Simulationen numerisch optimiert. (6 M)

Tabelle 6: Durchschnittliche Menge an anfallendem Schmutzwasser nach Siedlungsgröße

Tabelle 6-2 Häusliches Schmutzwasser [6.7]

Siedlungsgröße [E]	täglicher Schmutzwasser- anfall ws [L/(E*d)]	Faktor für den stündlichen Spitzenabfluss 1/x * ws	spezif. stündl. Spitzenabfluss qh [L/s*1000 EW]
< 5.000	150	1/8	
5.000 - 10.000	175 – 180	1/10	
10.000 - 50.000	200 – 220	1/12	rd. 5,0
50.000 - 250.000	225 -260	1/14	
> 250.000	250 – 300	1/16	

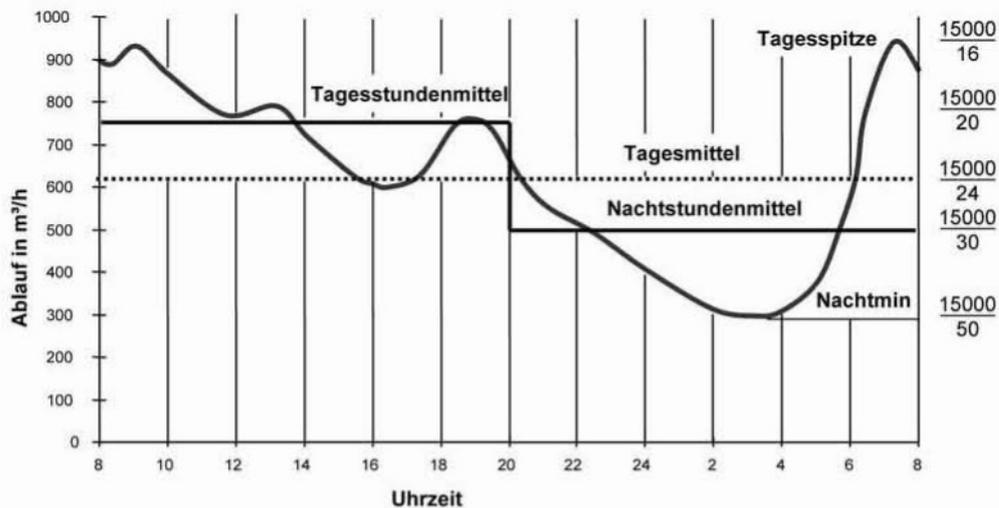


Abb. 29: Tagesganglinie des Trockenwetterabflusses einer Stadt mit 85.000 Einwohnern inkl. Industrie

[Hans-Peter Tietz, "Systeme der Ver- und Entsorgung", 1. Auflage Januar 2007, Teubner Verlag, ISBN 978-3-519-00497-4]

Zur Optimierung der Kleinkläranlage ist zunächst eine Bestimmung der jeweiligen Abflüsse und Klärzeiten notwendig, um das Optimierungsziel festzusetzen.

Hierzu wurden aus der Literatur gängige Tagesganglinien, wie in Abb. 29 gezeigt, verwendet, wobei die jeweiligen Volumenströme noch mit einem Faktor verrechnet worden sind, der repräsentativ für eine ländliche Infrastruktur steht. Wie in Tabelle 06 gezeigt, wird bei einer Siedlungsgröße von kleiner als 5000 Einwohnern ein täglicher Abfluss von $150 \text{ L}/(\text{E}^* \text{d})$ angenommen. Dieser Wert wurde zur Bestimmung der Abflüsse und Zeiten für die Optimierung verwendet. Die hier gezeigten Werte sind zwar für europäische Verbräuche repräsentativ, wohingegen afrikanische Verbräuche deutlich darunter, teilweise bei $20\text{-}80 \text{ L}/(\text{E}^* \text{d})$ liegen. Trotzdem wurde die Optimierung für Abflüsse mit einer Tagesmenge von $150 \text{ L}/(\text{E}^* \text{d})$ berechnet, insbesondere da eine optimierte Kleinkläranlage für einen höheren Volumenstrom bei einem geringeren Volumenstrom eine noch bessere Abscheidung aufweisen wird.

Für diese Tagesmenge wurden folgend für den mittleren Abfluss ($15000/24$) und für den Spitzenabfluss von ($15000/16$) für eine Anlage mit 25 Personen die entsprechenden Strömungsgeschwindigkeiten am Eingang berechnet. So wurde für die Anlage ein Eingangsvolumenstrom von $0,135 \text{ m/s}$ für die Maximale Strömung gewählt und für einen mittleren Ablauf eine Strömungsgeschwindigkeit von $0,091 \text{ m/s}$.

Für diese Volumenströme wurden jeweils typische Zeiten ermittelt. Die Tagesspitzen Volumenströme sollen etwa 3 h wirken und für die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten ist eine Strömungszeit von 10 h gewählt.

Für diese Strömungspunkte ($U_{\text{Max}}=0,135 \text{ m/s}$ $t_{\text{Max}}=3 \text{ h}$ und $U_{\text{Avg}}=0,091 \text{ m/s}$ $t_{\text{Avg}}=10 \text{ h}$) wurden unterschiedliche geometrische Änderungen an der Kleinkläranlage geplant. Ziel ist eine Verbesserung der Abscheidecharakteristik für Entwicklungsländer, wie Uganda. In diesen Ländern wird davon ausgegangen, dass für den Bau, die Wartung und Instandhaltung jeweils auf möglichst kostengünstige, langlebige und leicht verfügbare Lösungen zurückgegriffen werden sollte. Aus diesem Grund wurde in der Optimierung versucht, zunächst mit einem Brett, das die erste Kammer in zwei Bereich aufteilt und verschieden tief eingetaucht ist (720mm, 1200mm und 1600mm) und im weiteren Verlauf mit einem bzw. zwei aufgeschnittenen 220l-Ölfässern, die ebenfalls die erste Kammer in zwei Bereiche einteilt und seinerseits 800mm und 1300mm tief sind. Die einzelnen Geometrien sind in Abb. 31-35 gegenübergestellt.

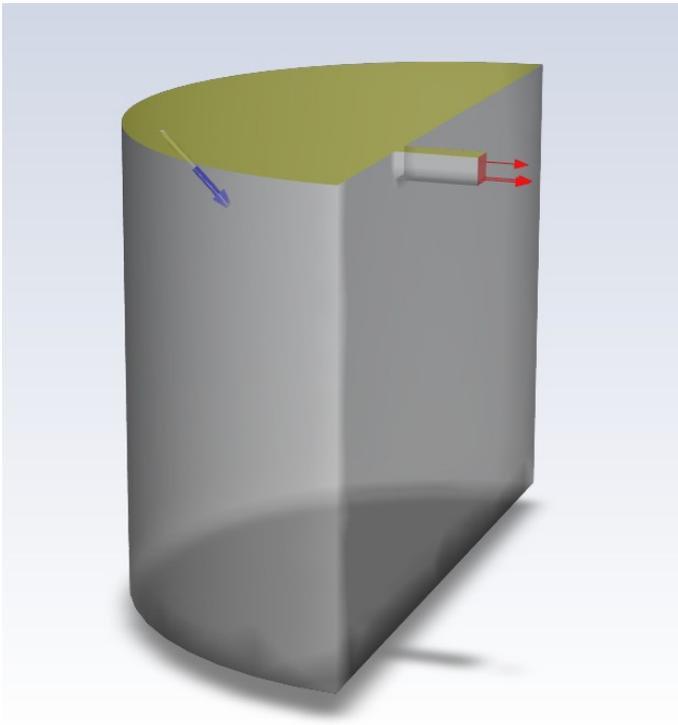


Abb. 31: Isometrische Darstellung des Strömungsraums für die Optimierung

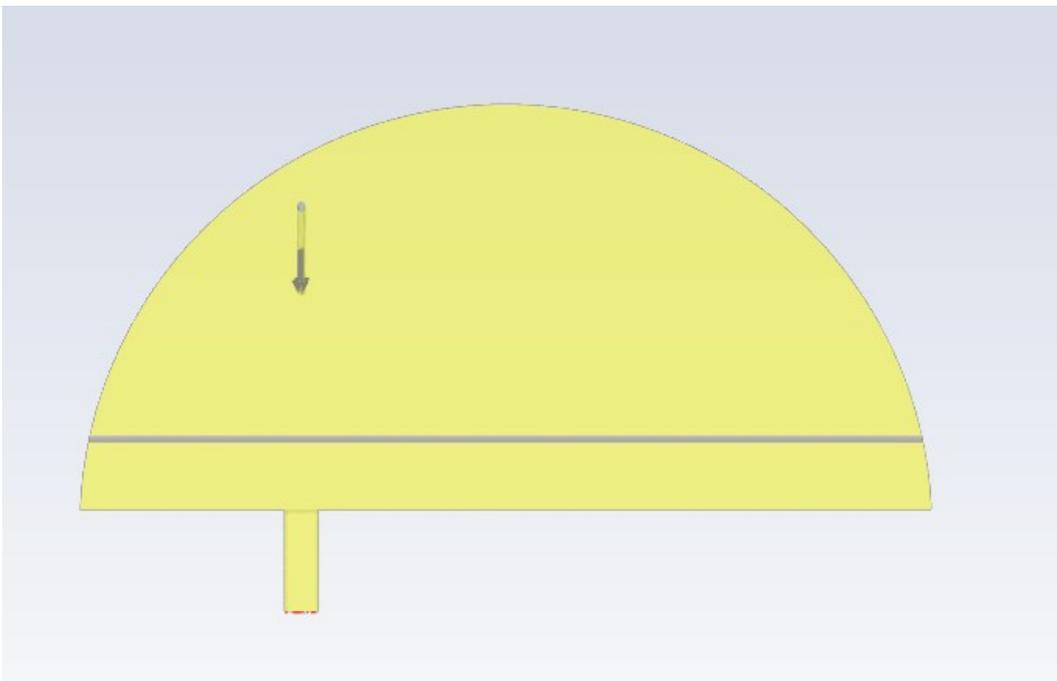


Abb. 32: Draufsicht von der Optimierungsvariante mit eingebautem Brett

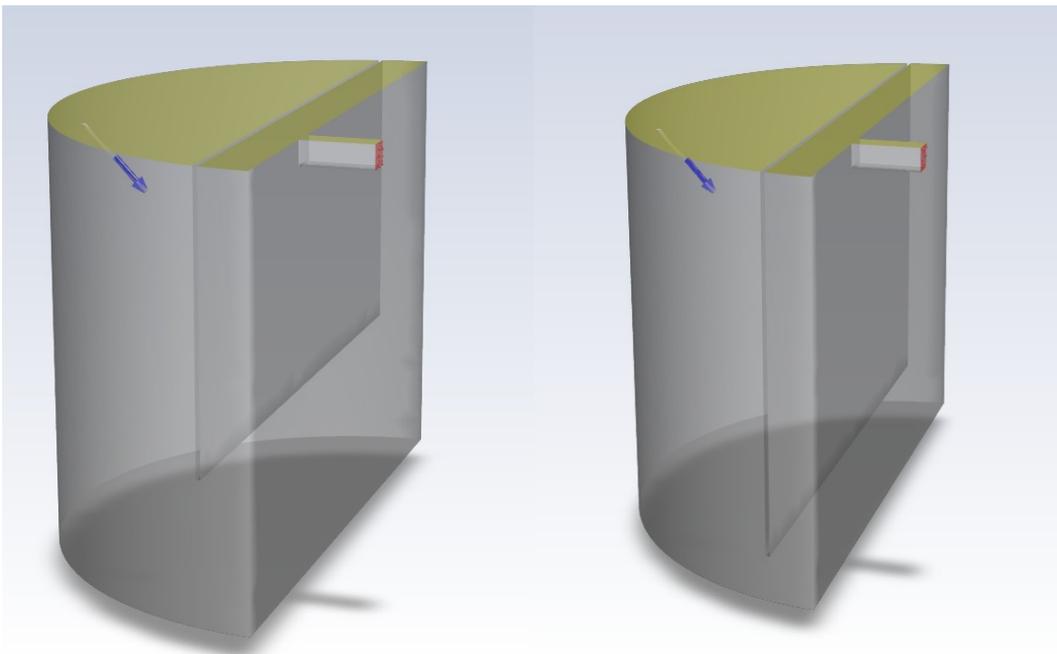
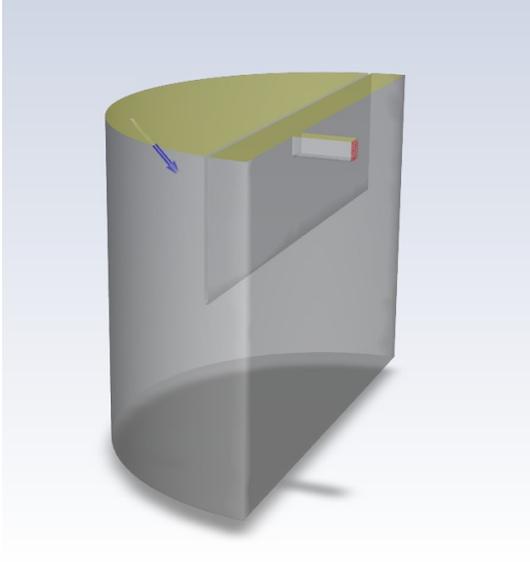


Abb. 33: Optimierung mit Brett bei 720 mm Eintauchtiefe (oben), 1200 mm (links) und 1600 mm (rechts)

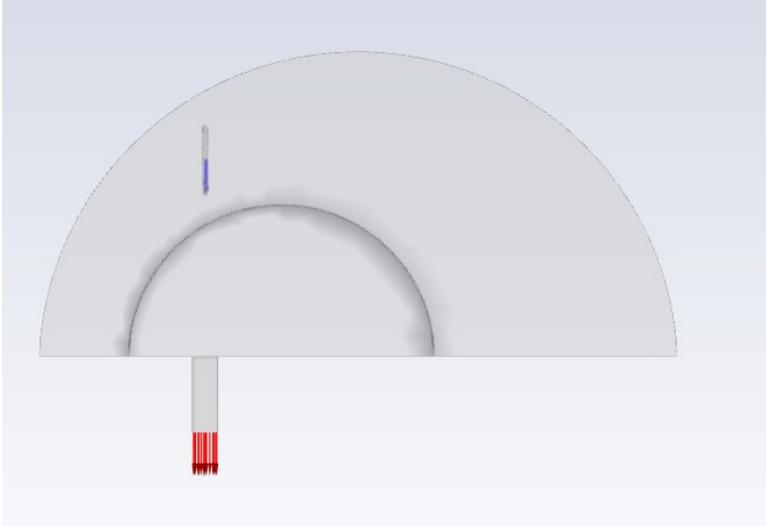


Abb. 34: Draufsicht von der Optimierungsvariante mit eingebautem Fass

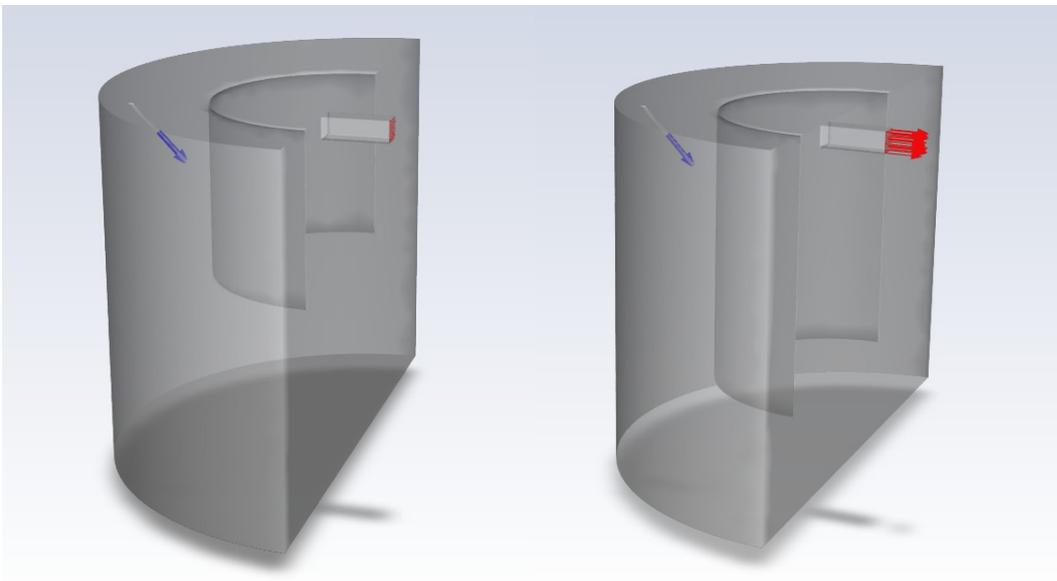


Abb. 35: Optimierung mit Fass bei 800 mm Eintauchtiefe (links) und 1300 mm (rechts)

Für diese Bauformen und für die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten haben sich die in Abbildung 36-44 gezeigten Partikelverläufe gezeigt.

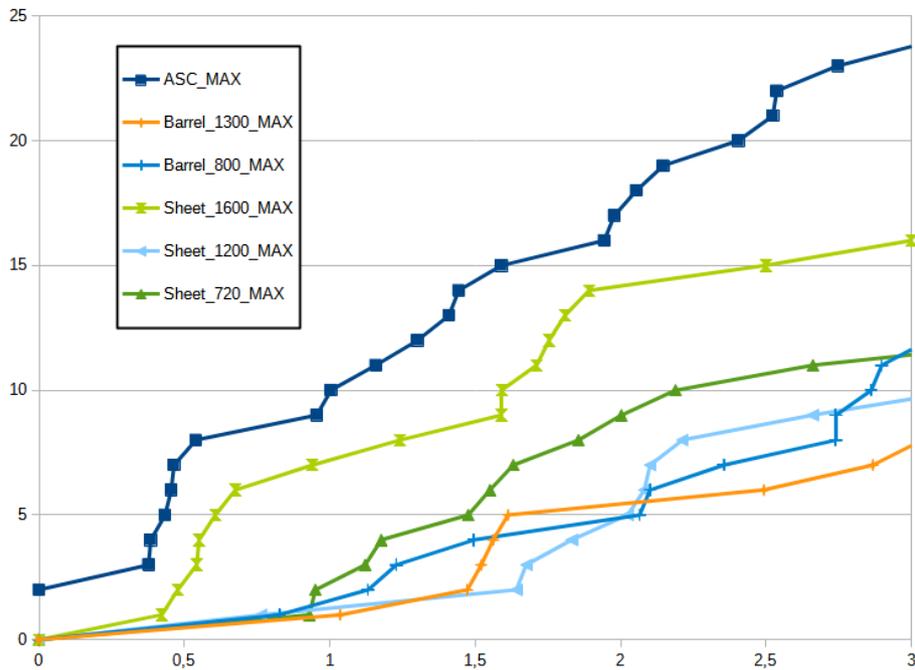


Abb. 36: Partikelverläufe der jeweiligen Optimierungsoptionen nach 3h mit maximalem Durchfluss

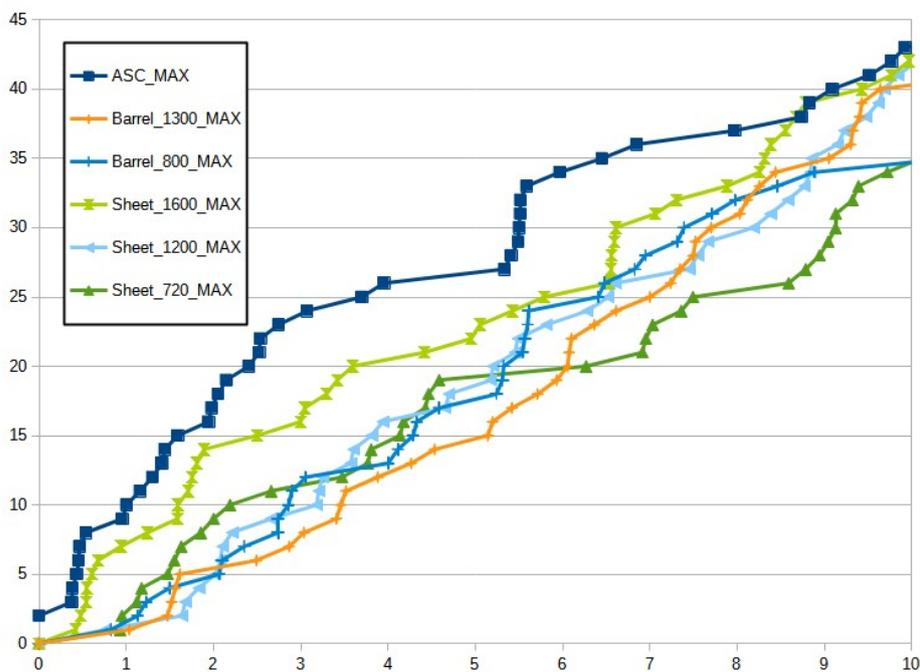


Abb. 37: Partikelverläufe der jeweiligen Optimierungsoptionen nach 10h mit maximalem Durchfluss

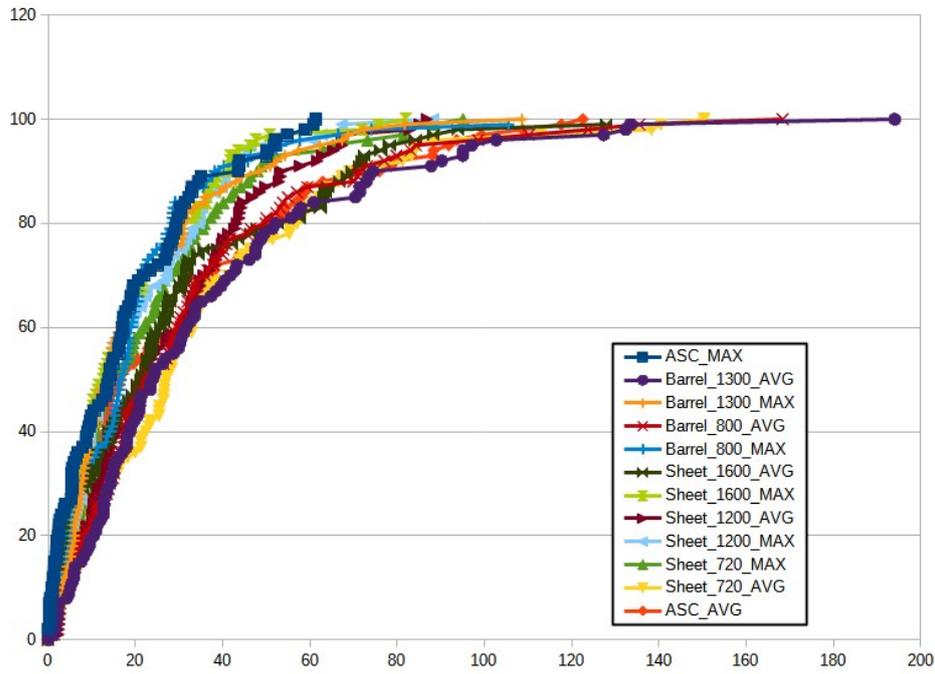


Abb. 38: Partikelverläufe der jeweiligen Optimierungsoptionen nach 200h

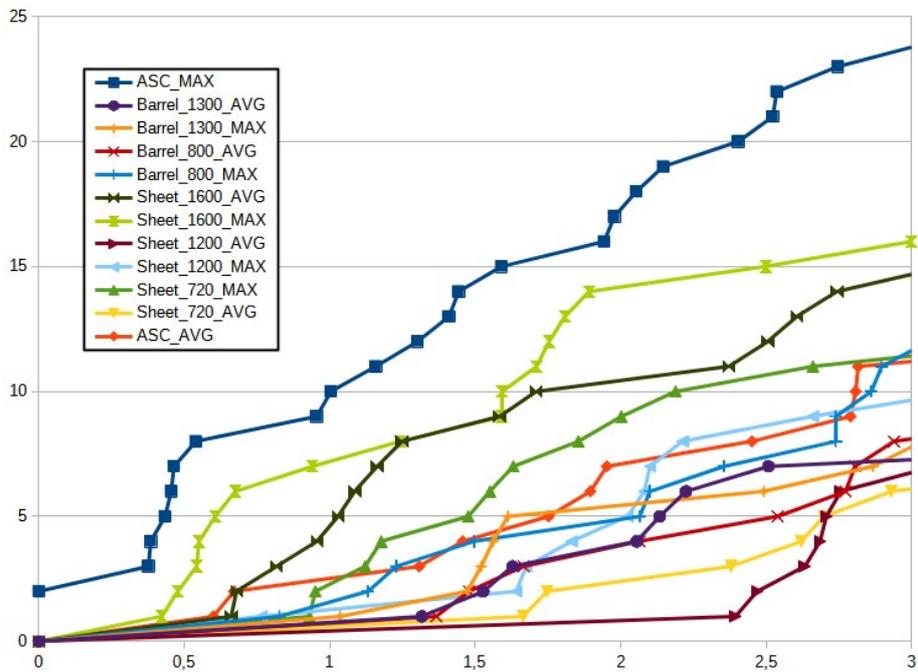


Abb. 39: Partikelverläufe der jeweiligen Optimierungsoptionen nach 3h

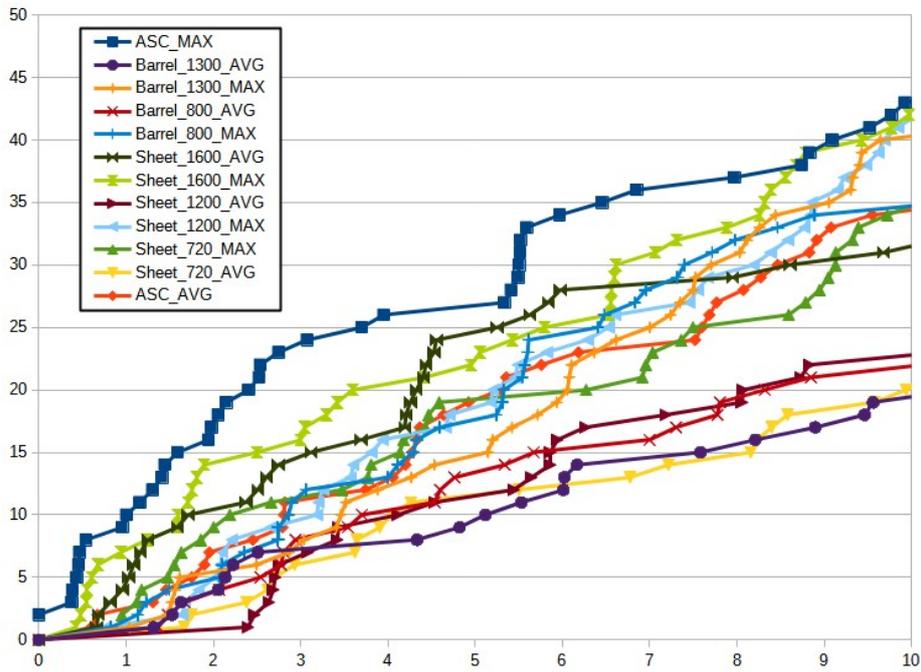


Abb. 40: Partikelverläufe der jeweiligen Optimierungsoptionen nach 10h

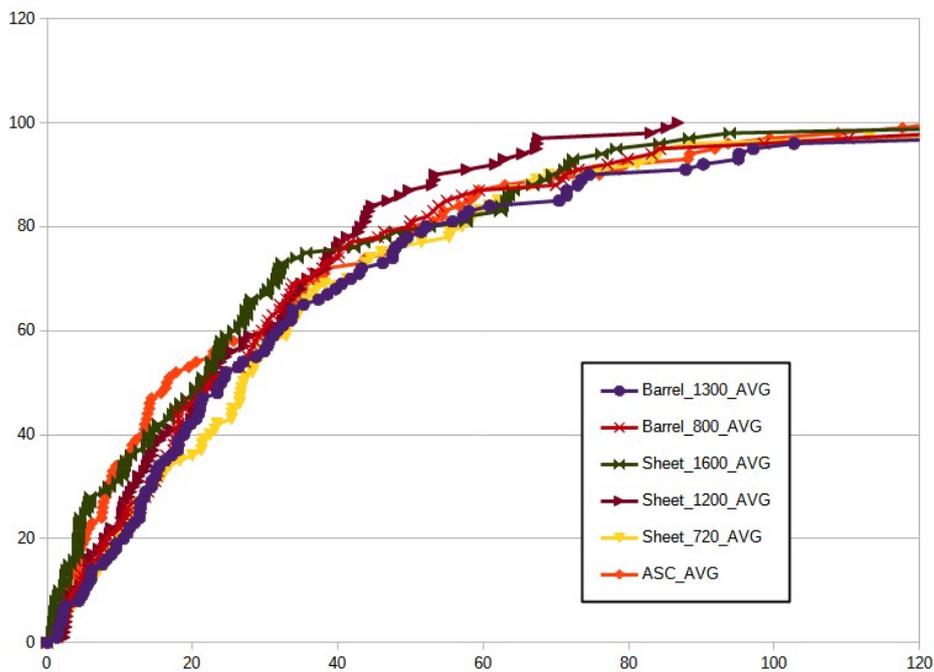


Abb. 41: Partikelverläufe der jeweiligen Optimierungsoptionen nach 120h mit mittlerem Durchfluss

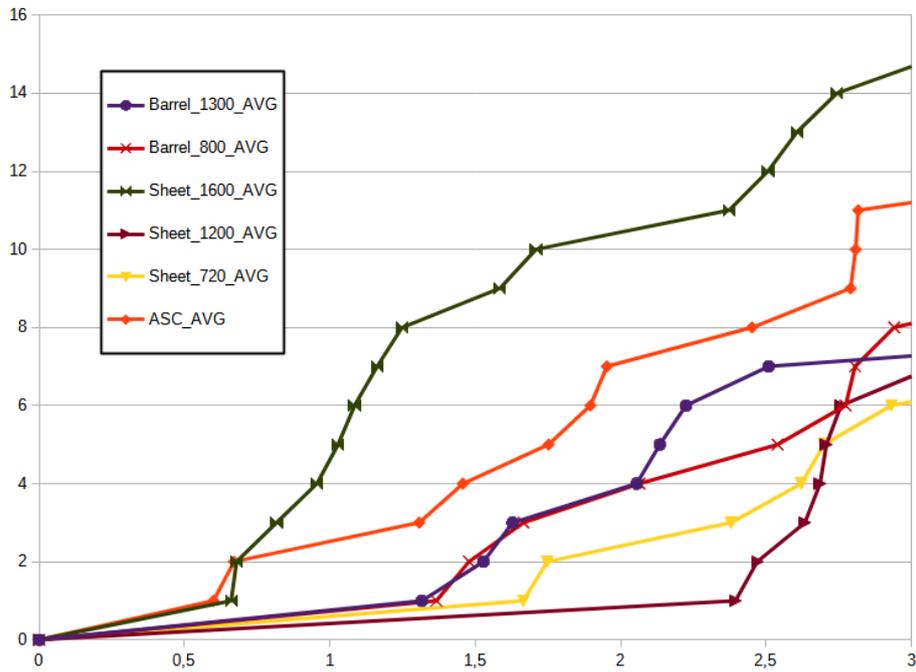


Abb. 42: Partikelverläufe der jeweiligen Optimierungsoptionen nach 3h mit mittlerem Durchfluss

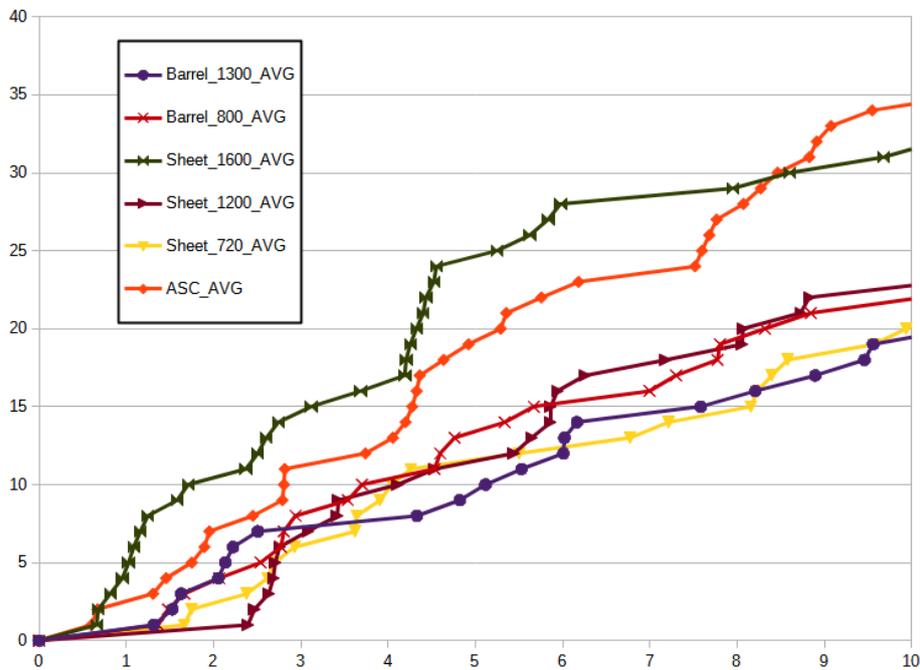


Abb. 43: Partikelverläufe der jeweiligen Optimierungsoptionen nach 10h mit mittlerem Durchfluss

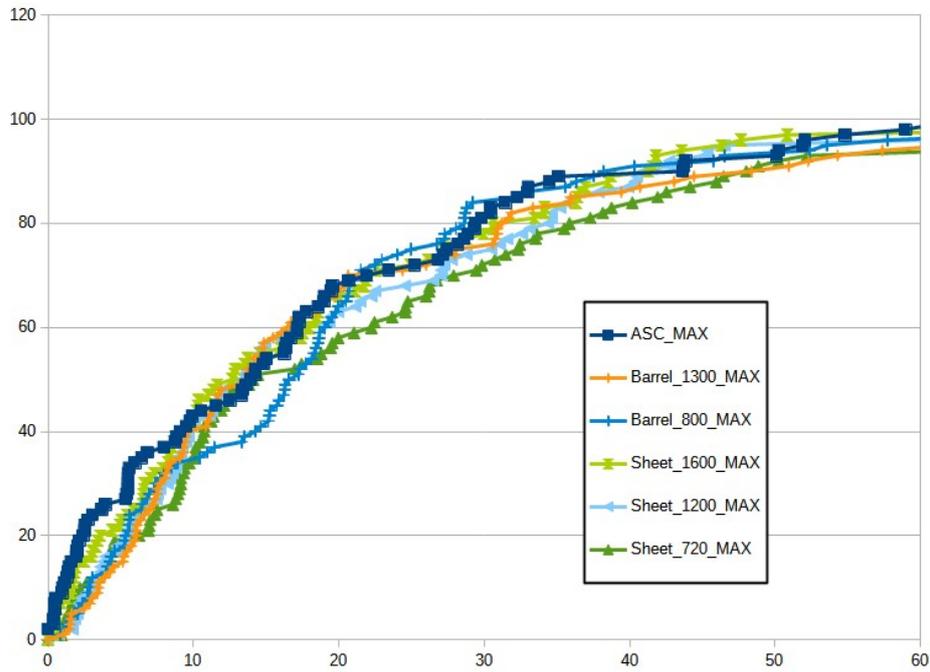


Abb. 44: Partikelverläufe der jeweiligen Optimierungsoptionen nach 60h mit maximalem Durchfluss

Zu diesen Abflüssen passend, haben sich die jeweiligen Partikelbewegungen im Zeitraum der ersten 3 h, wie in den Abbildungen 45 bis 56 dargestellt ergeben.

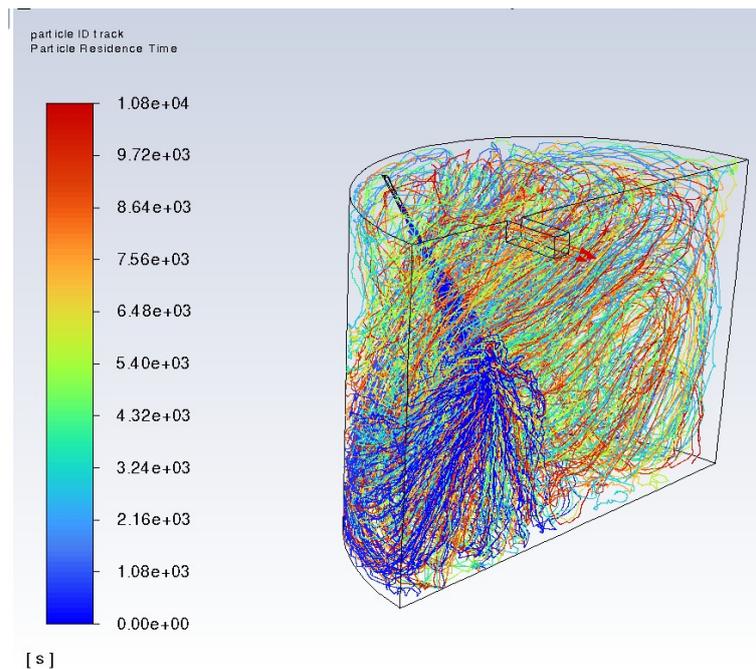


Abb. 45: Partikelströmung durch die Testanlage beobachtet über 3h

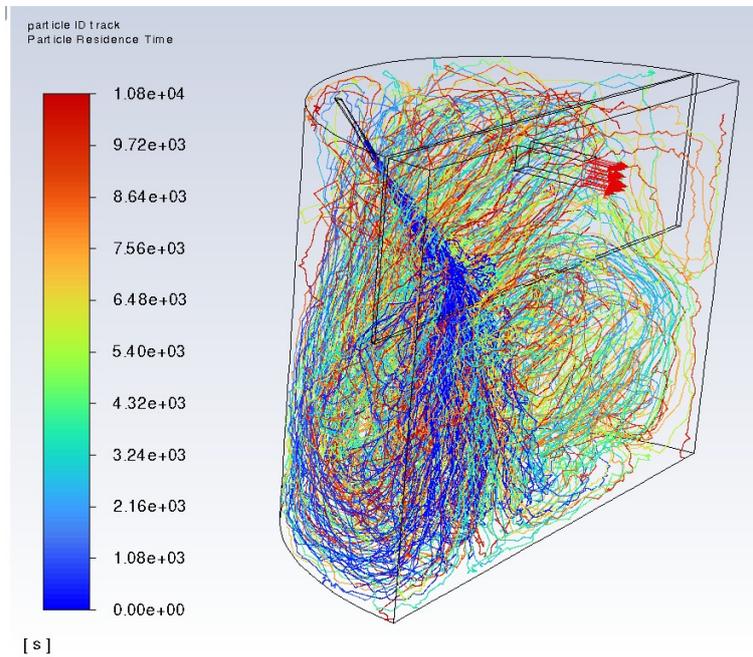


Abb. 46: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Brett bei 720mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Isometrische Ansicht

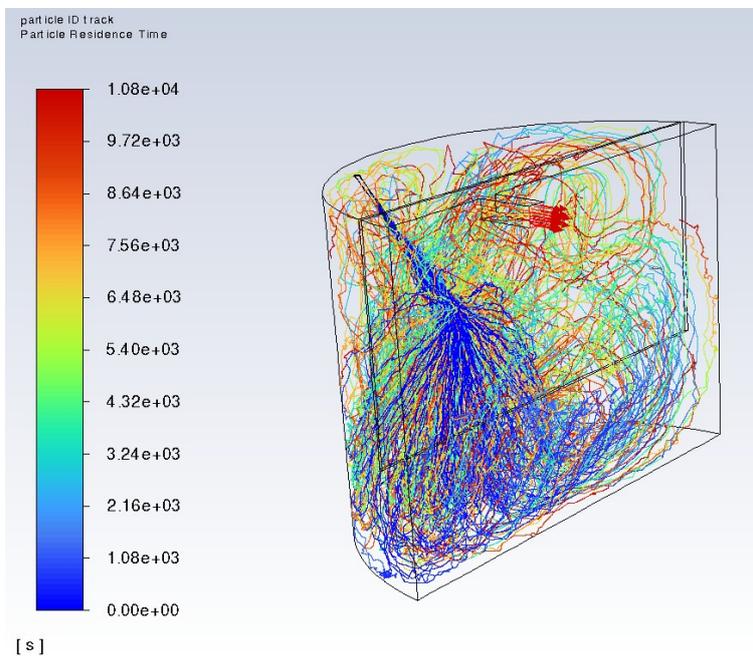


Abb. 47: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Brett bei 1200mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Isometrische Ansicht

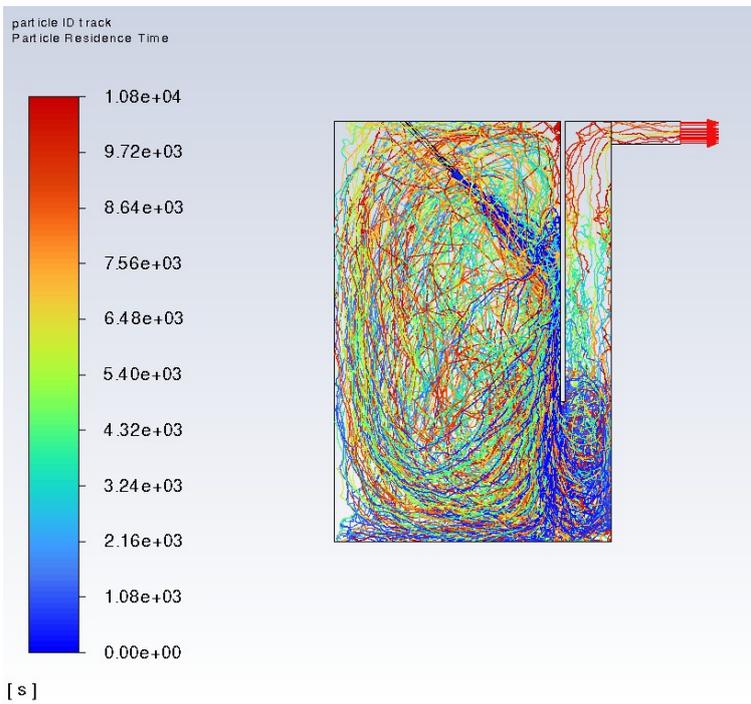


Abb. 48: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Brett bei 1200mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Seitenansicht

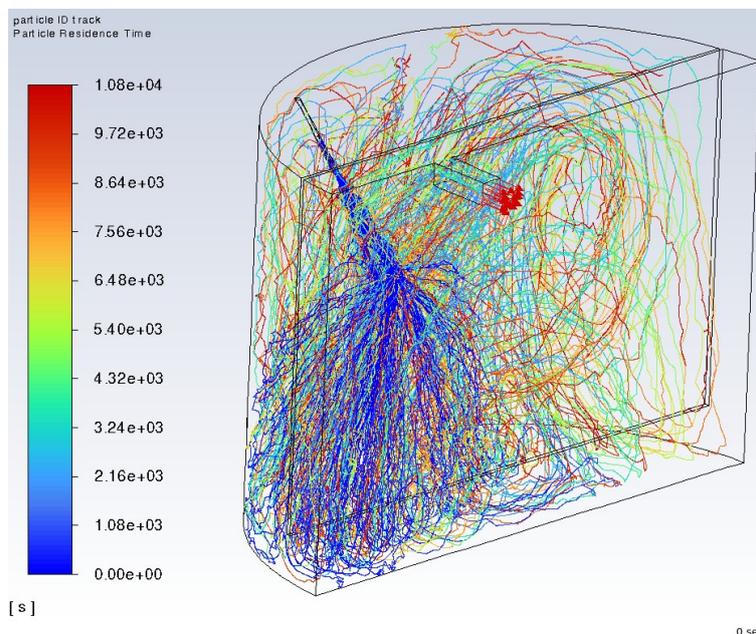


Abb. 49: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Brett bei 1600mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Isometrische Ansicht

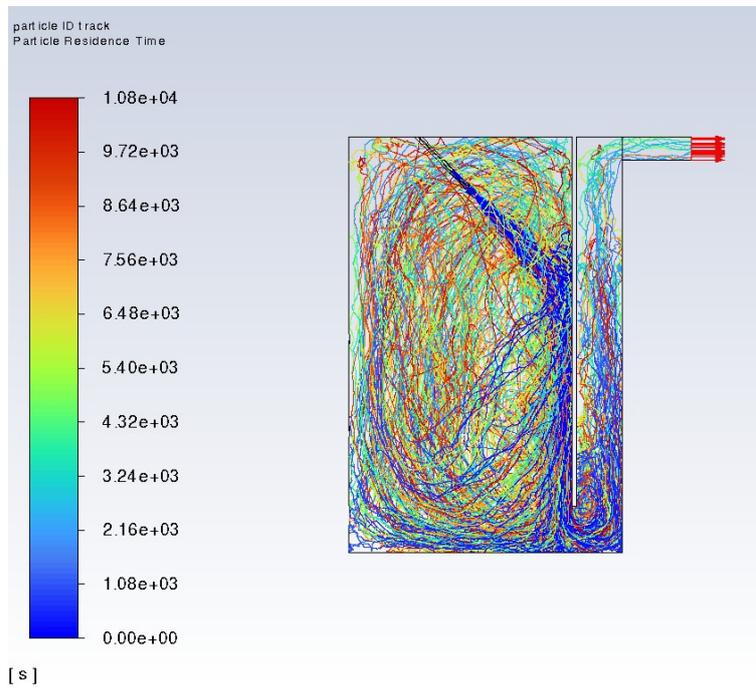


Abb. 50: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Brett bei 1600mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Seitenansicht

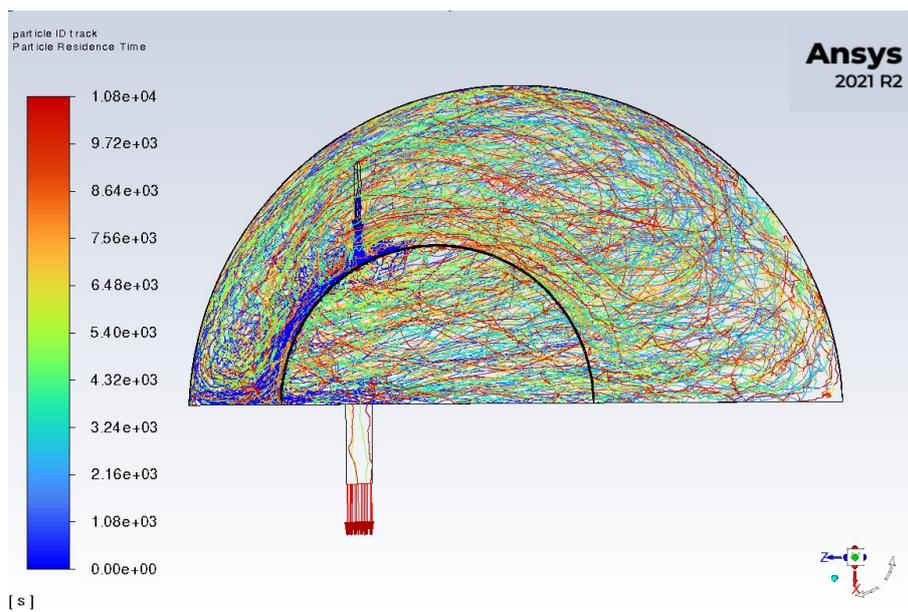


Abb. 51: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Fass bei 800mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Draufsicht

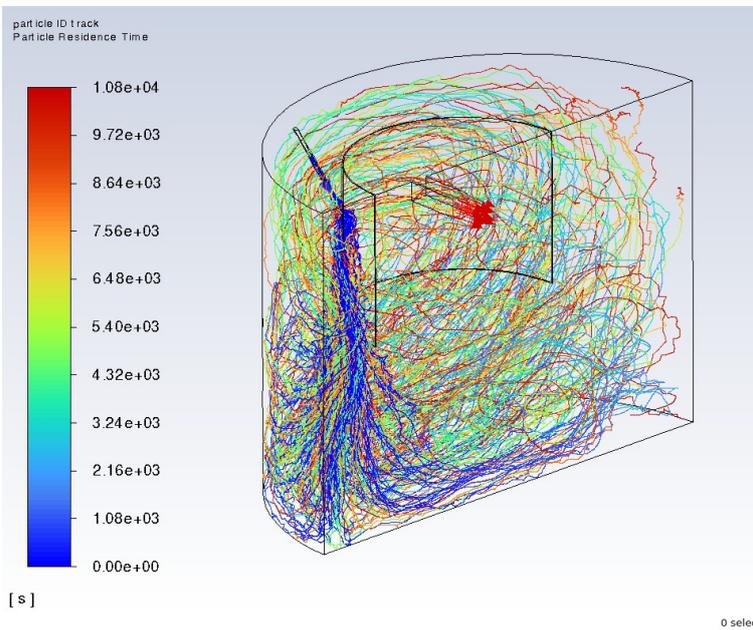


Abb. 52: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Fass bei 800mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Isometrische Ansicht

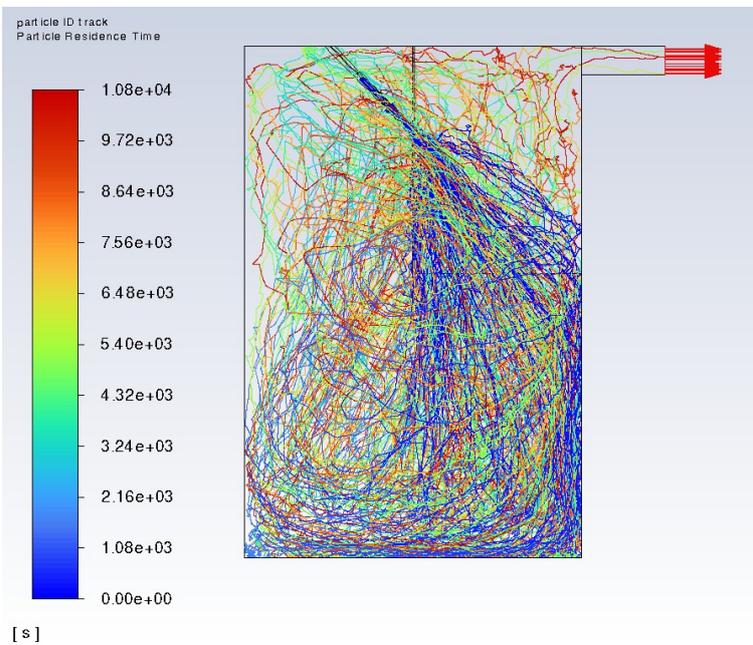


Abb. 53: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Fass bei 800mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Seitenansicht

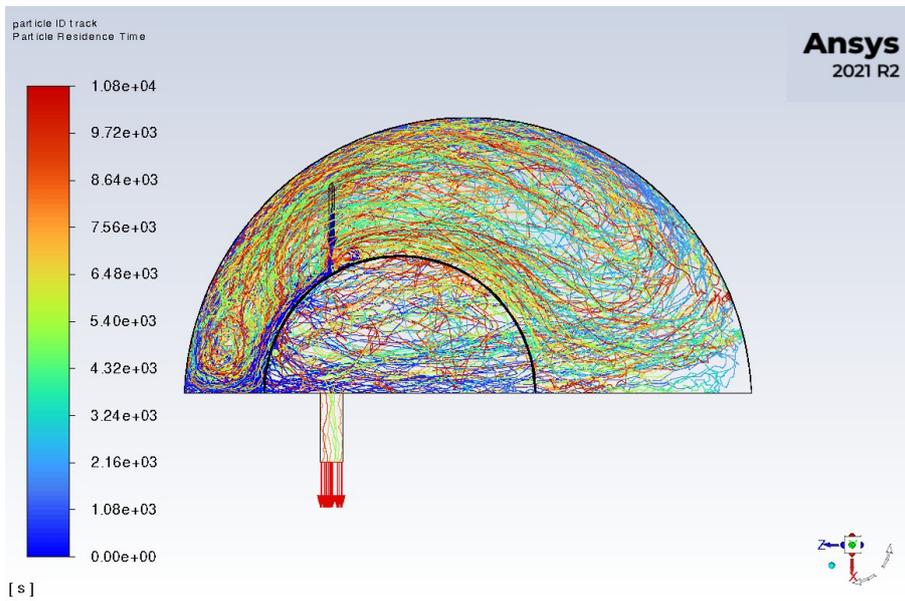


Abb. 54: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Fass bei 1300mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Draufsicht

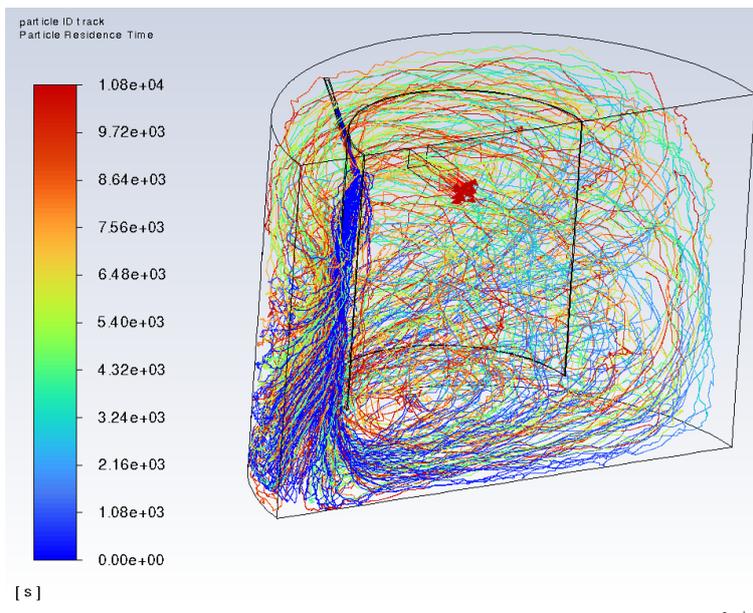


Abb. 55: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Fass bei 800mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Isometrische Ansicht

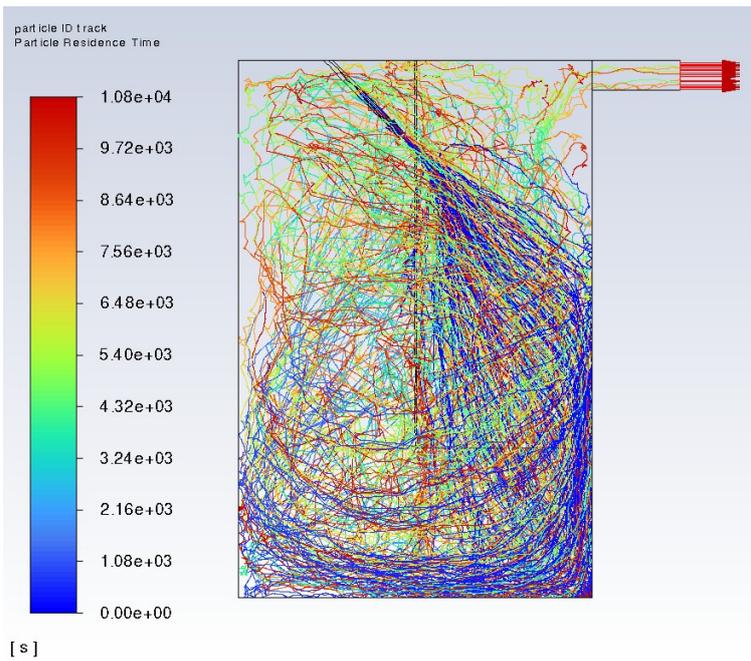


Abb. 56: Partikelströmung durch die Testanlage mit einem Fass bei 800mm Eintauchtiefe beobachtet über 3h, Seitenansicht

Ergebnis:

Optimierte kleine Kläranlage für bestmögliche Abscheiderate von Helmintheneiern

- AP 4.5: Schlussfolgerungen, Zusammenfassung, Dokumentation (3 M)

Tabelle 6: Gesamtbewertung der einzelnen Anlagenoptimierungen

Gesamtbewertung:

	AVG		MAX		SUM
	3 h	10 h	3 h	10 h	
Sheet 720	4	4	2	3	13
Sheet 1200	3	2	3	1	9
Sheet 1600	-1	1	1	1	2
Barrel 800	1	3	2	3	9
Barrel 1300	2	5	4	2	13

Abschließend wurden die Ergebnisse untereinander verglichen und jeweils nach 3 h mit maximaler Geschwindigkeit und 10 h mit mittlerer Geschwindigkeit geschaut, wie viele Partikel die jeweiligen Bauformen wieder verlassen haben. Dieses wurde dann in Relation zur Ausgangsbauform gesetzt und sollte eine Verschlechterung eingetreten sein, wurde ein negativer Wert für den jeweiligen Betriebspunkt und Bauform vergeben. Wenn eine Verbesserung aufgetreten ist, wurde jeweils aufsteigend Punkte vergeben nach der Reihenfolge der einzelnen Bauformen. So ergab sich Tabelle 06.

Hier zeigt sich erstaunlicherweise, dass die Bauform mit dem Brett, das nur 720 mm Eintauchtiefe hatte von allen Varianten mit Brett die beste ist und je tiefer das Brett folgend eingetaucht wird, desto mehr nimmt die Verbesserung ab. Dies geht sogar so weit, dass bei einer Eintauchtiefe von 1600 mm und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit eine Verschlechterung der Abscheidecharakteristik gegenüber der Ausgangslage auftritt. Bei den Bauformen, die ein aufgebogenes Ölfass als Grundkonstruktion nutzen, ist dieser Trend so nicht zu beobachten, hier weist die Bauform, die aus zwei 220 l Fässern (Standardmäßig ist eines 880 mm hoch) gebildet werden würde und eine Eindringtiefe von 1300 mm besitzt ebenfalls eine optimale Abscheidung auf.

Aus diesen Ergebnissen folgernd empfehlen wir folgendes:

- Der Einbau letztgenannter Trenneinrichtung, da diese auch am einfachsten zu montieren ist und Ölfässer in Afrika häufig vorkommen und so aus dem Schrott eine Art Recycling erfahren.
- Weiterhin empfehlen wir den Zulauf wie in den Simulationen bereits erfolgt, unter der Wasseroberfläche erfolgen zu lassen, da ein freies Einströmen in die Wasseroberfläche zu großen Verwirbelungen im gesamten Wasserkörper und zu einem großen Lufteintrag, was mit Schaumbildung einhergeht, führt.
- Außerdem sollte der Zulauf nicht wie hier gezeigt auf einer Ebene mit dem Ablauf liegen, sondern auf der anderen Seite (vgl. Abb. 57)
- Abschließend können und sollten die Klärzeiten, insbesondere zur Sedimentation in der biologischen Kammer verlängert werden, indem hier nicht im Einkammer sondern im Zweikammerbehälter mit alternierend beschickten Kammern gearbeitet wird. Dies bedeutet zwar einen gewissen zusätzlichen Investitionsbedarf, da somit noch drei weitere Heber (jeweils einen extra Heber für Zufluss zur Kammer, Klarwasserabzug und Klärschlammabzug) benötigt werden, die Reinigungsleistung kann damit aber voraussichtlich deutlich verbessert werden

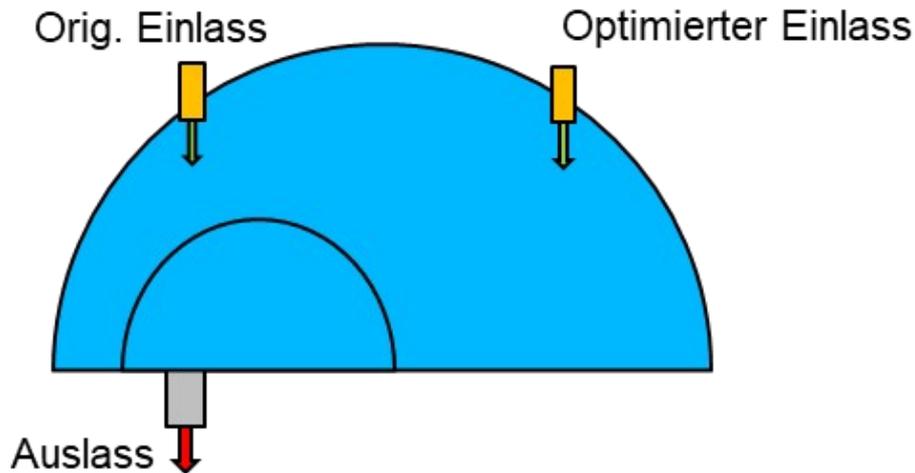


Abb. 57: Schemazeichnung der Ein- und Auslässe bei der optimierten Anlage

Publikationen, die im Rahmen der Forschungstätigkeiten entstanden sind:

- A. C. Benim, "Numerical Calculation of Sink Velocities for Helminth Eggs in Water", *Computation* (2021) 9(12), 136.
- M. Diederich, F. Gül, C. Özman, A. C. Benim, L. Ihringer and D. Möller, "Numerical Modelling and Experimental Validation of Mechanical Separation of Helminth Eggs for Wastewater Purification", 4th International Conference on Frontiers in Industrial and Applied Mathematics, Longowal, Punjab, India, December 21-22, 2021 (accepted).
- M. Diederich, F. Gül, C. Özman, A. C. Benim, L. Ihringer and D. Möller, "Mechanical Helminth Eggs Separation for Wastewater Purification: Analysis of the Fluid Dynamics", The 9th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow, July 31 - August 2, 2022, Prague Czech Republic (accepted).

Weitere Arbeiten bezüglich des Projektes:

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine Bachelorarbeit ausgegeben und betreut, die die Untersuchung der Infrastruktur in Uganda beinhaltet hat und bei der für die Implementierung von Kleinkläranlagen und eine optimierte Positionierung eine umfangreiche Studie angefertigt wurde. Auch wurde hier ein mögliches Geschäftsmodell aus Wartung von Kläranlagen, Sammlung, Entsorgung und Verwertung von Klärschlamm entwickelt und anhand vorhandener Modelle dessen Machbarkeit geprüft. Es scheint, dass dieses Geschäftsmodell nicht nur für die gewerbetreibende Person sehr lukrativ sein kann, sondern durch die energetische Verwertung des Klärschlammes auch monetär ein Anreiz geschaffen werden kann, der den Nutzern der Kleinkläranlage zurückgegeben werden kann. Damit erhöht sich die Bereitschaft zur Mitarbeit und Pflege der Anlage auf Seiten der Nutzer und es kann von einem nachhaltig funktionierenden, einen umfangreichen Mehrwert schaffenden System ausgegangen werden. Diese Arbeit wurde begleitet von einer studentischen Semesterarbeit, bei der die jeweiligen Positionierungen der Kläranlagen hinsichtlich der vorhandenen Infrastruktur zur Reinigung und Pflege untersucht worden sind. Hierzu wurde analog zum Traveling-Salesman-Problem eine Lösungsfindung angestrebt.

Außerdem wurde eine weitere Abschlussarbeit ausgegeben, die die Untersuchung der optimalen Positionierung einer möglichen Kleinkläranlagen in einem zentralafrikanischen Land zum Ziel hatte. Hier sollte geschaut werden, welche Informationen nötig sind, um eine optimale Positionierung planen zu können und welche Informationen hierfür vorhanden sind. Die Arbeit hat ebenfalls sehr interessante Ergebnisse erzielt im Hinblick auf einer zukünftigen Anwendung der Forschungsergebnisse zur optimalen Entfaltung der Wirksamkeit einer Kleinkläranlage im ländlichen Raum aus lokaler und auch globaler Sicht unter Einbeziehung der hydrologischen Rahmenbedingungen.

Abschließend wurde eine Abschlussarbeit ausgegeben, die zum Ziel hatte, ein mögliches Marketingkonzept für den Vertrieb von Kleinkläranlagen in Uganda zu entwickeln. Hierbei wurde zunächst für die mögliche Kläranlagenfirma eine Stakeholder-Analyse für die Stakeholder in Uganda und Deutschland angefertigt. Folgend wurde ein Marketingmix erstellt, der für die wichtigsten Stakeholder jeweils ein geeignetes Marketinginstrument beinhalten sollte und nach einer optimalen zeitlichen Abfolge einzelne Interessengruppen ansprechen sollte. Diese Arbeit stellt für uns ebenfalls einen guten Ausgangspunkt für eine mögliche versuchsweise Verwirklichung der Projektergebnisse in Uganda dar.

Ausblick:

Nachdem die Optimierung augenscheinlich eine deutlich bessere Abscheidecharakteristik verspricht und viele begleitende Arbeiten durchgeführt worden sind, die sehr positive Tendenzen zur Machbarkeit zur Umsetzung einer solchen Unternehmung in Uganda aufzeigen, ist der Plan, einen Folgeantrag beim DBU zu stellen mit der Bitte um Unterstützung bei dem Vorhaben, diese optimierte Kleinkläranlage in einem Geschäftsmodell, ähnlich dem in den Begleitarbeiten vorentwickelten Modell, tatsächlich in Uganda installieren zu können und ein entsprechendes Geschäftsmodell zu implementieren.