



**Universität für Bodenkultur Wien**  
Department für Wasser-Atmosphäre-  
Umwelt

# Untersuchung von Strömung und Sedimentationsleistung von Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser mittels numerischer Simulationen

Masterarbeit

*Daniel Wildt*

Wien  
2017



---

*universität des lebens*

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing. bzw. DI) unter der Leitung von:

Betreuer

**Loiskandl Willibald, Univ.-Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn.**  
Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft (IHLW)  
Universität für Bodenkultur Wien

Mitbetreuer

**Kammerer Gerhard, Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn.**  
Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft (IHLW)  
Universität für Bodenkultur Wien

eingereicht von

**Daniel Wildt**

Matrikelnummer: 01140454

Email: [dw.wildt@gmail.com](mailto:dw.wildt@gmail.com)

Datum: 11.08.2017



## Dank

Ich danke meinen Betreuern, Herrn Univ.-Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Willibald Loiskandl und Herrn Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Gerhard Kammerer. Ich habe stets die Möglichkeit gehabt, mich mit Fragen an sie zu wenden. Sie haben mich beim Erstellen dieser Masterarbeit bestmöglich unterstützt. Zusätzlich danke ich Herrn Dipl.-Ing. Tadele Measho Haile für die weitere Einführung in das Thema und das Bereitstellen zusätzlicher wichtiger Unterlagen für meine Arbeit.

Besonders gilt mein Dank auch Herrn Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Tritthart. Er hat mich mit seinen Erfahrungen im Bereich numerische Strömungsmo- dellierung am Beginn meiner Arbeit wesentlich unterstützt, die konkrete Heran- gehensweise beim Aufbau des Modells zu finden.

Herrn Rupert Gasser und Herrn Lukas Karbacher danke ich für die Bereitstellung ihrer Ergebnisse der Analysen von den Sedimentproben aus dem Absetzbecken Auhof-Wolfsgraben.

Herrn Wolfgang Sokol danke ich für die Einrichtung des Servers „UbuntuSim- Rechner“ am Server des Instituts für Hydraulik und landeskulturelle Wasser- wirtschaft an der Universität für Bodenkultur Wien, auf dem die numerischen Strömungsberechnungen durchgeführt wurden.

Weiters danke ich meinen Studienkollegen, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt haben und mir mit vielen Ratschlägen auch beim Erstellen der Masterarbeit geholfen haben. Unter anderen danke ich Frau Antonia Spitzer für die Unterstützung bei den Messarbeiten im Zuge der Besichtigung des Absetzbeckens Auhof-Wolfsgraben.

Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei meiner Familie für die Unterstützung im Laufe meines Studiums bedanken.



## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Wien, am 11. August 2017

Daniel Wildt



## Abstract

Urban stormwater detention basins play an important role in the pollution control of urban stormwater. Computational fluid dynamics is a useful tool to investigate the flow velocities in those basins. Numerous research projects investigating settling tanks using numerical methods could be found in literature. But only a few of these deal with urban stormwater detention basins in which flow is transient. In addition the literature study has shown that mainly commercial software has been used for the numerical models of settling tanks.

To investigate the transient flow inside an urban stormwater detention tank during the first flush, a computational fluid dynamics model has been developed using only open-source software.

In the developed numerical model the two-phase flow of water and air is modelled applying the volume of fluid method using the OpenFOAM solver interFoam. The modelled settling tank is integrated into a runoff infiltration system, in which surface runoff of a section of a motorway close to Vienna, Austria, is treated. The developed numerical model has been validated using documented observations as well as the data of a physical model of this settling tank. All comparisons have shown a good agreement.

Using the developed numerical model the flow velocities inside the settling tank have been investigated assuming different operation schemes. The simulations show that the flow velocities can be reduced by increasing the initial water level. By this means, the remobilisation of particles (estimated using the critical flow velocities by Shields) accumulated during earlier rainfall events can be reduced.

**Keywords:** settling tank; computational fluid dynamics; OpenFOAM; sedimentation; first flush; urban stormwater;

## Zusammenfassung

Absetzbecken spielen eine wichtige Rolle bei der Reinigung von Straßenwasser. Numerische Strömungsmodellierung ist eine nützliche Methode, um die Strömungsgeschwindigkeiten in diesen Absetzbecken zu untersuchen. In der Literatur konnten zahlreiche Forschungsarbeiten, bei denen Absetzbecken mithilfe von numerischen Methoden untersucht wurden, gefunden werden. Allerdings beschäftigen sich nur wenige davon mit Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser, in denen oft ein instationärer Strömungsprozess vorherrscht. Zusätzlich hat die Literaturrecherche gezeigt, dass hauptsächlich kommerzielle Softwarepakete für die bisher erstellten Modelle von Absetzbecken verwendet wurden.

Um die instationäre Strömung in Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser während des Spülstoßes zu untersuchen, wurde ein numerisches Strömungsmodell rein unter der Verwendung von quelloffener Software erstellt.

Im hier entwickelten numerischen Modell wird die Zweiphasenströmung von Wasser und Luft mit der Volume of Fluid Method modelliert und unter Verwendung des OpenFOAM-Solvers interFoam berechnet. Das modellierte Absetzbecken ist Teil einer Gewässerschutzanlage, in welcher das Straßenwasser eines Autobahnabschnittes in der Nähe von Wien, Österreich, behandelt wird. Das entwickelte numerische Modell wurde mittels dokumentierter Beobachtungen sowie mit Daten aus einem physikalischen Modell dieses Absetzbeckens validiert. Die Vergleiche zeigten eine gute Übereinstimmung.

Unter Verwendung des erstellten numerischen Modells wurden die Strömungsgeschwindigkeiten im Absetzbecken unter der Annahme von verschiedenen Betriebsweisen untersucht. Die Simulationen zeigen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten durch Anheben der Dauerstauhöhe reduziert werden können. Auf diese Art kann auch die Remobilisierung von Partikeln (abgeschätzt mithilfe der kritischen Geschwindigkeiten von Shields), die bei früheren Niederschlagsereignissen sedimentiert wurden, reduziert werden.

**Schlagworte:** Absetzbecken; numerische Strömungsberechnung; OpenFOAM; Sedimentation; Spülstoß; Straßenwasser;

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xi
Symbolverzeichnis	xiii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	2
1.3 Arbeitsschritte . . . . .	3
<b>2 Material und Methoden</b>	<b>5</b>
2.1 Literaturrecherche . . . . .	5
2.1.1 Gliederung des Themas . . . . .	5
2.1.2 Methoden zur Literaturrecherche . . . . .	5
2.1.3 Schlagwörter und Suchkriterien . . . . .	6
2.1.4 Inhaltliche Zusammenfassung der verwendeten Literatur . . . . .	7
2.1.5 Literatur speziell zu OpenFOAM . . . . .	9
2.2 Stand der Technik bei der Behandlung von Oberflächenabfluss . . . . .	10
2.2.1 Allgemeine Festlegungen zur Behandlung von Oberflächenabfluss . . . . .	10
2.2.2 Absetzbecken . . . . .	11
2.3 Theoretische Grundlagen zur numerischen Strömungsmodellierung . . . . .	12
2.3.1 Grundgleichungen . . . . .	12
2.3.2 Methoden zur Turbulenzmodellierung . . . . .	15
2.3.3 Bereiche niedriger Reynoldszahlen . . . . .	19
2.3.4 Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen . . . . .	20
2.3.5 Vorgehen bei der Erstellung der numerischen Modelle . . . . .	21
2.4 Wahl geeigneter Software für die Erstellung der Modelle . . . . .	22
2.4.1 Anforderungen an die Software . . . . .	22
2.4.2 Verfügbare Programmpakete . . . . .	22
2.4.3 Details zu OpenFOAM . . . . .	24
2.5 Grundlagen zur Modellierung des Sedimentationsprozesses . . . . .	26
2.5.1 Abschätzung der zurückgehaltenen Partikelgrößen . . . . .	26
2.5.2 Dichte und Korngröße der abzusetzenden Partikel . . . . .	28
2.6 Erstellung der Zuflussganglinie zum Absetzbecken Auhof-Wolfsgraben . . . . .	29
2.7 Erstellung der Abflussganglinie aus dem Absetzbecken . . . . .	31
2.7.1 Ablauf durch das Drosselrohr . . . . .	31

2.7.2	Ablauf über das Überlaufwehr . . . . .	35
2.8	Simulationen . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Modellaufbau</b>	<b>39</b>
3.1	Geometrie und Rechengebiet . . . . .	39
3.1.1	Plangrundlage . . . . .	39
3.1.2	Erstellung der Geometrie . . . . .	42
3.2	Räumliche Diskretisierung und Rechennetz . . . . .	42
3.2.1	Allgemeine Festlegungen und räumliche Auflösung . . . . .	42
3.2.2	Gütekriterien und Optimierung des Rechennetzes . . . . .	44
3.2.3	Erstellung des Rechennetzes . . . . .	46
3.3	Diskretisierungsschemen . . . . .	46
3.3.1	Grundlagen zu den Diskretisierungsschemen . . . . .	46
3.3.2	Zeitdiskretisierung . . . . .	47
3.3.3	Diskretisierung von Gradienten . . . . .	47
3.3.4	Diskretisierung der Divergenz . . . . .	47
3.3.5	Diskretisierung von Laplace-Termen . . . . .	48
3.3.6	Diskretisierung der flächennormalen Gradienten . . . . .	48
3.3.7	Interpolationsschemen . . . . .	48
3.4	Einstellungen zum Lösungsalgorithmus . . . . .	48
3.5	Turbulenzmodellierung . . . . .	49
3.6	Transporteigenschaften der Fluide . . . . .	50
3.7	Randbedingungen . . . . .	51
3.7.1	Geschwindigkeit . . . . .	51
3.7.2	Druck . . . . .	54
3.7.3	Turbulente kinetische Energie . . . . .	56
3.7.4	Charakteristische Frequenz der energietragenden Wirbel . . . . .	57
3.7.5	Wirbelviskosität der Turbulenz . . . . .	58
3.7.6	Randbedingung für den Volumenanteil von Wasser . . . . .	58
3.8	Anfangsbedingungen . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Durchführung der numerischen Strömungsberechnungen</b>	<b>61</b>
4.1	Hardware . . . . .	61
4.2	Einstellungen zu den Berechnungen . . . . .	61
4.3	Funktionen zum Postprocessing . . . . .	62
4.4	Dokumentation der Berechnungen . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>65</b>
5.1	Geschwindigkeiten entlang von Transekten . . . . .	65
5.2	Geschwindigkeiten in verschiedenen Bereichen des Absetzbeckens . . . . .	66
5.2.1	Horizontale Geschwindigkeitsverteilung . . . . .	66

5.2.2 Vertikale Geschwindigkeitsverteilung . . . . .	74
5.3 Geschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf . . . . .	74
<b>6 Interpretation und Diskussion</b>	<b>81</b>
6.1 Validierung und Plausibilitätskontrolle . . . . .	81
6.1.1 Überprüfung der Volumsbilanz . . . . .	81
6.1.2 Überprüfung der Reynoldszahlen der Turbulenz . . . . .	85
6.1.3 Sensitivitätsanalyse . . . . .	86
6.1.4 Vergleich mit einem physikalischen Modell . . . . .	87
6.1.5 Vergleich mit Beobachtungen am Absetzbecken im Betrieb	88
6.2 Geschwindigkeitsverteilung . . . . .	90
6.3 Einflussfaktoren auf die Strömungen im Absetzbecken . . . . .	91
6.4 Vergleich verschiedener Dauerstauhöhen . . . . .	92
6.5 Abschätzungen der remobilisierten Partikelgrößen . . . . .	93
<b>7 Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>97</b>
7.1 Erkenntnisse zur numerischen Modellierung der Strömung in Ab- setzbecken zur Reinigung von Straßenwasser . . . . .	97
7.2 Anwendungsbereich des erstellten numerischen Modells . . . . .	98
7.3 Ausblick . . . . .	98
<b>Literatur</b>	<b>101</b>
<b>Anhang 1: Pläne</b>	<b>109</b>
Lageplan . . . . .	111
Netzstrukturplan . . . . .	113
Detailplan Verteilbauwerk . . . . .	115
<b>Anhang 2: Listings</b>	<b>117</b>
Definition von Geometrie und Rechennetz . . . . .	117
Inputdatei blockMeshDict . . . . .	117
Output blockMesh . . . . .	121
Output checkMesh . . . . .	124
Diskretisierungsschemen und numerische Festlegungen . . . . .	125
Inputdatei fvSchemes . . . . .	125
Inputdatei fvSolution . . . . .	126
Einstellungen zur Turbulenzmodellierung . . . . .	128
Inputdatei turbulenceProperties . . . . .	128
Einstellungen zu den Transporteigenschaften der Fluide . . . . .	128
Inputdatei transportProperties . . . . .	128
Definition der Rand- und Anfangsbedingungen . . . . .	129

Inputdatei U . . . . .	129
Inputdatei p_rgh . . . . .	130
Inputdatei k . . . . .	131
Inputdatei omega . . . . .	132
Inputdatei nut . . . . .	132
Inputdatei alpha.water.orig . . . . .	133
Inputdatei setFieldsDict . . . . .	134
Einstellungen zur Berechnung . . . . .	134
Inputdatei controlDict . . . . .	134
Postprocessing-Funktionen . . . . .	136
Inputdatei probes . . . . .	136

## Abbildungsverzeichnis

1	Mittlere Grenzgeschwindigkeiten nach Shields (1936) aus Giesecke und Heimerl (2014) bei einer Dichte der abzusetzenden Partikel von $2650 \text{ kg m}^{-3}$ . . . . .	27
2	Einheitsganglinie zur Ermittlung der Zuflussganglinie in das Absetzbecken . . . . .	30
3	Foto des Absetzbeckens Auhof-Wolfsgraben; aufgenommen am 05.05.2017	40
4	Geometrie und Rechennetz für das Modell des Absetzbeckens Auhof-Wolfsgraben zur Simulation der Strömungen während des Bemessungsniederschlagsereignisses . . . . .	43
5	Niederschlagsganglinie vom 10.6.2012 sowie des Bemessungsniederschlagsereignisses $r_{15,n=5}$ und daraus resultierende Zuflussganglinien zum Absetzbecken . . . . .	52
6	Zuflussganglinien berechnet für das Niederschlagsereignis vom 10.6.2012 und für das Bemessungsniederschlagsereignis $r_{15,n=5}$ und zugehörige Abflussganglinien bei verschiedenen Dauerstauhöhen . . . . .	53
7	Zuflussganglinien berechnet für das Niederschlagsereignis vom 10.6.2012 und für das Bemessungsniederschlagsereignis $r_{15,n=5}$ und zugehörige Wasserstände bei verschiedenen Dauerstauhöhen, im Vergleich mit den Messungen von Lins (2013) . . . . .	55
8	Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten entlang von Transekt A (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit 30 cm Dauerstauhöhe, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s . . . . .	67
9	Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten entlang von Transekt B (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit 30 cm Dauerstauhöhe, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s . . . . .	68
10	Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten entlang von Transekt C (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit 30 cm Dauerstauhöhe, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s . . . . .	69
11	Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten entlang von Transekt D (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit 30 cm Dauerstauhöhe, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s . . . . .	70

12	Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten entlang von Transekt E (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit 30 cm Dauerstauhöhe, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s . . . . .	71
13	Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten in den Transekten A bis E (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s . . . . .	72
14	Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten in den Transekten A bis E (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s . . . . .	73
15	Geschwindigkeitsvektoren ( $\text{m s}^{-1}$ ) im Absetzbecken 25 cm über der Beckensohle während des Bemessungsereignisses (30 cm DSH) . . . . .	75
16	Geschwindigkeitsvektoren ( $\text{m s}^{-1}$ ) im Absetzbecken 25 cm über der Beckensohle während des Niederschlagsereignisses am 10.06.2012, 20 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses; $Q_{ZU} = 0,334 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	76
17	Beträge der Momentangeschwindigkeiten an allen Auswertepunkten in verschiedenen Tiefen während des Zeitraumes 9 min bis 13 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses für die Simulationen des Bemessungsniederschlagsereignisses sowie während des Zeitraumes 19 min bis 70 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses für die Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012, jeweils in Zeitintervallen von 5 s . . . . .	77
18	Geschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf beim Bemessungsniederschlagsereignis . . . . .	78
19	Geschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf während des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 . . . . .	79
20	Volumsbilanzen . . . . .	82
21	Integral der Volumsbilanzen . . . . .	84
22	Stichproben der Reynoldszahl der Turbulenz entlang von Transekt E bei der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit einer Dauerstauhöhe von 45 cm (180 s nach Beginn des Niederschlagsereignisses) und bei der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 (2400 s nach Beginn des Niederschlagsereignisses) . . . . .	86
23	Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation (45 cm DSH) mit Ergebnissen des physikalischen Modells . . . . .	89

24	Unterschreitungshäufigkeiten der Grenzgeschwindigkeiten nach Shields (1936) 10 cm über der Sohle . . . . .	94
25	Ausschnitt aus den Korngrößenverteilungen von Sedimentproben welche am 05.05.2017 aus dem Absetzbecken Auhof-Wolfsgraben entnommen und von Gasser und Karbacher (2017) analysiert wurden im Vergleich zu den Unterschreitungshäufigkeiten von Grenzgeschwindigkeiten an den Probenahmestellen aus der Simulation des Nierschlagsereignisses vom 10.06.2012 . . . . .	96



## Tabellenverzeichnis

1	Spezifizierungen der allgemeinen Modellgleichung (Formel 1) (Schwarze, 2013) . . . . .	12
2	Programme, welche zur numerischen Simulation von Sedimentationsprozessen verwendet wurden . . . . .	23
3	Abmessungen des Absatzbeckens laut Plan und in der Geometrie des Rechengebiets (Werte ohne Zulaufstruktur zum Drosselbauwerk) . . . . .	41
4	Festlegung zur räumlichen Auflösung des Modells für die Simulation der Bemessungsniederschlagsereignisse . . . . .	44
5	Gütekriterien und Informationen zum Rechnernetz . . . . .	45
6	Gleichungslöser und Toleranzen für die berechneten Größen . . . . .	49
7	Übersicht über die angesetzten Randbedingungen . . . . .	54
8	Übersicht über die berechneten numerischen Modelle . . . . .	62



## Abkürzungsverzeichnis

**AFS** abfiltrierbare Stoffe

**ASFINAG** Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**CFD** Computational Fluid Dynamics

**DNS** Direct Numerical Solution

**DSH** Dauerstauhöhe

**FOAM** Field Operation and Manipulation

**FSV** Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr

**GSA** Gewässerschutzanlage

**IQR** interquartile range (Interquartilabstand)

**JDTV** jährlicher durchschnittlicher Tagesverkehr

**Kfz** Kraftfahrzeug

**LES** Large-Eddy-Simulation

**ÖNORM** eine vom Austrian Standards Institute veröffentlichte nationale Norm

**ÖWAV** Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband

**RANS** Reynolds-Averaged Navier-Stokes

**RB** Regelblatt des ÖWAV

**RVS** Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (Regelwerk des FSV)

**VOF** Volume of Fluid



# Symbolverzeichnis

## Lateinische Formelsymbole

$A$	Fläche $[A] = \text{m}^2$
$b$	Wehrkronenbreite $[b] = \text{m}$
$C$	Konzentration $[C] = \text{mg l}^{-1}$
$c_w$	Formbeiwert $[c_w] = 1$
$Co$	Courant-Zahl $[Co] = 1$
$D_\phi$	diffusiver Fluss
$d$	Durchmesser des Drosselrohres $[d] = \text{m}$
$d_{ch}$	charakteristischer Korndurchmesser $[d_{ch}] = \text{mm}$
$d_H$	hydraulisch gleichwertiger Durchmesser $[d_H] = \text{m}$
$e$	spezifische innere Energie $[e] = \text{J kg}^{-1}$
$F$	Kraft $[F] = \text{N}$
$F_\phi$	konvektiver Fluss
$\mathbf{g}$	Erdbeschleunigung $[\mathbf{g}] = \text{m s}^{-2}$
$H$	Gesamtenergiehöhe $[H] = \text{m}$
$h$	spezifische Enthalpie $[h] = \text{J kg}^{-1}$
$h_0$	Höhe der Rohrunterkante über der Beckensohle $[h_0] = \text{m}$
$h_{max}$	Höhe der Wehrkrone über der Beckensohle $[h_{max}] = \text{m}$
$h_U$	Überfallhöhe $[h_U] = \text{m}$
$h_v$	Energieverlusthöhe $[h_v] = \text{m}$
$I$	Turbulenzintensität $[I] = 1$
$K$	Speicherkonstante $[K] = \text{min}$
$k$	spezifische turbulente kinetische Energie: $[k] = \text{m}^2 \text{s}^{-2}$
$\mathbf{M}_\phi$	Impulsaustausch zwischen den Phasen
$m$	Masse $[m] = \text{kg}$
$N$	Anzahl Speicher $[N] = 1$
$\hat{n}$	Flächennormale auf die Seitenflächen von KV
$p$	Druck $[p] = \text{Pa}$
$Q$	Volumenstrom $[Q] = \text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$Q_\phi$	sonstige Quellen und Senken
$Re$	Reynoldszahl $[Re] = 1$
$Re_T$	Reynoldszahl der Turbulenz / lokale Reynoldszahl $[Re_T] = 1$
$T$	Temperatur $[T] = \text{K}$
$t$	Zeit $[t] = \text{s}$
$\mathbf{u}$	Geschwindigkeitsvektor $[\mathbf{u}] = \text{m s}^{-1}$
$u_\tau$	Wandschubspannungsgeschwindigkeit $[u_\tau] = \text{m s}^{-1}$
$u^+$	dimensionslose Geschwindigkeit $[u^+] = 1$
$u(t)$	Einheitsganglinie $[u(t)] = \text{mm}^{-1}$

$V$	.....	Volumen $[V] = \text{m}^3$
$v$	.....	mittlere Geschwindigkeit im Strömungsquerschnitt $[v] = \text{m s}^{-1}$
$v_{gr}$	.....	Grenzgeschwindigkeit $[v_{gr}] = \text{m s}^{-1}$
$y^+$	.....	dimensionsloser Wandabstand $[y^+] = 1$
$z$	.....	geodätische Energiehöhe $[z] = \text{m}$

## Griechische Formelsymbole

$\alpha$	.....	Volumensanteil von Wasser in der Zelle $[\alpha] = 1$
$\Gamma$	.....	Diffusionskoeffizient der Größe $\phi$
$\epsilon$	.....	Dissipationsrate von $k$ $[\epsilon] = 1$
$\zeta$	.....	lokaler Verlustbeiwert $[\zeta] = 1$
$\eta$	.....	dynamische Viskosität $[\eta] = \text{Pa s}$
$\eta_{Sed}$	.....	Sedimentationsleistung $[\eta_{Sed}] = 1$
$\kappa = 0,41$	.....	Karman-Konstante
$\mu$	.....	Überfallbeiwert $[\mu] = 1$
$\nu$	.....	kinematische Viskosität $[\nu] = \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\nu_T$	.....	Wirbelviskosität $[\nu_T] = \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\phi$	.....	Strömungsgröße / Erhaltungsgröße
$\rho$	.....	Dichte $[\rho] = \text{kg m}^{-3}$
$\sigma$	.....	Oberflächenspannung $[\sigma] = \text{N m}^{-1}$
$\tau$	.....	Schubspannungstensor $[\tau] = \text{Pa}$
$\omega$	.....	charakteristische Frequenz energietragender Wirbel $[\omega] = \text{s}^{-1}$

## Indizes und Zusätze zu den Formelsymbolen

**AB** Ablauf

**ATM** Atmosphäre

**F** Fluid

**KV** Kontrollvolumen

**L** Luft

**OF** Oberfläche der Zelle

**P** Partikel

**rgH** Index für Druck abzüglich des hydrostatischen Drucks

**W** Wasser

**ZU** Zulauf

*′* turbulenter Schwankungsanteil der Strömungsgröße



---

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser haben die Aufgabe, Feststoffe zurückzuhalten und den ersten Spülstoß zu dämpfen (Measho Haile, Kammerer und Fürhacker, 2014). Messungen an Absetzanlagen zur Reinigung von Straßenwasser haben gezeigt, dass es bei erhöhter hydraulischer Belastung dazu kommen kann, dass bei vorangegangenen, kleineren Ereignissen bereits abgesetzte Stoffe wieder ausgetragen werden (z. B. Grotehusmann, Kasting und Hunze (2007) und Measho Haile, Kammerer und Fürhacker (2014)). Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei Absetzbecken ohne Dauerstau der erste Spülstoß mehr oder weniger ungedämpft das Absetzbecken durchfließt und in das ungefähr doppelt so große, nachgeschaltete Filterbecken weitergeleitet wird. Erst wenn es durch die Drosseleinrichtungen im Verteilbauwerk zwischen Absetzbecken und Filterbecken zu einem Rückstau im Absetzbecken kommt und sich der Wasserspiegel im Absetzbecken zu heben beginnt, kann sich die Strömung im Absetzbecken beruhigen und sich ein Sedimentationsprozess einstellen. Um zu verhindern, dass der erste Spülstoß zuvor abgesetzte Partikel vom Grund des Absetzbeckens wieder mobilisiert, können Absetzbecken mit Dauerstau konstruiert werden. Das heißt, dass diese sich nicht vollständig entleeren, sondern ein bestimmter Mindestwasserstand immer erhalten bleibt (FSV, 2010). Dieser Wasserstand muss hoch genug sein, dass sich die Volumenströme im Absetzbecken auf eine genügend hohe Fließquerschnittsfläche aufteilen können und so die Geschwindigkeiten auch zu Beginn des Ereignisses gering sind. Andererseits soll durch den Rückstau aber möglichst wenig Retentionsvolumen verloren gehen.

Um die Strömung eines Absetzbeckens bei verschiedenen Dauerstauhöhen während des ersten Spülstoßes zu untersuchen, soll in der vorliegenden Masterarbeit ein numerisches Strömungsmodell eines Absetzbeckens erstellt werden. Hierzu bietet sich als reale, seit 2011 in Betrieb befindliche Anlage der Grobstofffang der Filteranlage Auhof-Wolfsgraben an der A1-Westautobahn an. Diese Anlage wurde im Zuge von früheren Projekten (Lins, 2013; Measho Haile, Kammerer und Fürhacker, 2014) schon unter unterschiedlichen Gesichtspunkten untersucht. Weiters wurde im Rahmen eines konstruktiven Projektes an der Universität für Bodenkultur ein physikalisches Modell dieser Anlage erstellt und die Strömungen anhand von physikalischen Modellversuchen untersucht (Kessler und Steurer, 2012).

Besondere Herausforderung bei der geplanten numerischen Modellierung im Vergleich zu bisher erstellten Modellen von Absetzbecken ist die instationäre Strömung. Den meisten in der Literatur gefundenen Simulationen von Absetzbe-

cken (beispielsweise jene in Abwasserreinigungsanlagen) liegt ein stationärer Strömungsprozess zugrunde. Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser sind bei Trockenwetter entweder völlig leer oder haben einen Dauerwasserstand von wenigen Dezimetern. Während eines Regenereignisses füllen sich die Becken und der Wasserstand steigt bis zu über einem Meter, je nach Intensität des Niederschlags (ÖNORM B 2506 Teil 2, 2012).

### 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, Grundlagen dafür bereitzustellen, die Strömung und Sedimentationsleistung von Absetzbecken mithilfe von numerischen Methoden zu untersuchen. Dabei ist auf möglichst niedrige Lizenzkosten für Software zu achten. Soweit möglich soll mit Open-Source-Programmen gearbeitet werden. In einem ersten Schritt sollen Programme und Softwarepakete gesammelt werden, welche für diesen Zweck geeignet sind. Mithilfe eines solchen Softwarepakets soll dann ein numerisches Modell eines realen, in Betrieb befindlichen Absetzbeckens erstellt werden. Mit diesem Modell werden Simulationen des Spülstoßes beim Bemessungsniederschlagsereignis bei drei verschiedenen Dauerstauhöhen im Absetzbecken durchgeführt. Die Ergebnisse werden anhand der Geschwindigkeiten in verschiedenen Bereichen des Absetzbeckens verglichen. Um von den Geschwindigkeiten auf den Feststofftransport im Becken zu schließen, wird die kritische Grenzströmungsgeschwindigkeit für den Bewegungsbeginn von Sedimenten nach Shields (1936) betrachtet. Somit kann abgeschätzt werden, an welchen Stellen im Absetzbecken Feststoffe, die bei vorangegangenen Ereignissen bereits sedimentiert sind, durch die Strömung bei einem stärkeren Folgeereignis wieder in Bewegung gesetzt werden. Anhand dieser Ergebnisse soll jene Dauerstauhöhe bestimmt werden, welche nötig ist, um bereits am Boden abgesetzte Partikel möglichst nicht im Zuge eines stärkeren, nachfolgenden Ereignisses zu remobilisieren. Bei diesem Ansatz werden die Feststoffe im Absetzbecken als Geschiebe betrachtet. Um zusätzlich den Absetzvorgang von in Suspension befindlichen Feststoffen zu beschreiben, wären andere Ansätze wie z. B. die Stokessche Gleichung zu wählen (Measho Haile, Kammerer und Fürhacker, 2014). Im Rahmen der hier entwickelten Modelle steht jedoch der Aspekt der Remobilisierung im Fokus.

Zusätzlich zu den Modellen des Bemessungsereignisses wird noch ein Ereignis aus der Vergangenheit simuliert, welches von Lins (2013) untersucht wurde. Die Simulation bietet die Möglichkeit die Ergebnisse der numerischen Berechnungen mit Beobachtungen an der Anlage zu vergleichen. Weiters kann Sie eine Hilfe zur Interpretation der Ergebnisse der Untersuchungen von Wasserproben, die von Lins (2013) während dieses Ereignisses entnommen wurden, darstellen.

Neben den Ergebnissen der durchgeführten Simulationen sollen im Ausblick auch Möglichkeiten und Herausforderungen beschrieben werden, die Strömung und Sedimentationsvorgänge in Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser in Zukunft numerisch zu simulieren. Spezielles Augenmerk wird dabei auch darauf gelegt die numerischen Strömungsberechnungen unter der Verwendung von Open-Source-Software durchzuführen.

Zusätzlich sollen Optimierungsvorschläge und Erweiterungsmöglichkeiten zu den erstellten Modellen beschrieben werden. Im Besonderen soll beschrieben werden, inwiefern es möglich ist, ein Dreiphasenmodell zu erstellen, mit dem neben der instationären Strömung von Luft und Wasser auch die Bewegung der abzusetzenden Partikel (mit einer bestimmten Korngrößenverteilung) simuliert werden kann.

Auf die obigen Zielsetzungen aufbauend können folgende Arbeitshypothesen aufgestellt werden:

1. Es ist möglich, den instationären Strömungsprozess in Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser mithilfe von numerischen Simulationen, welche rein unter Anwendung von Open-Source-Software erstellt und berechnet werden, nachzubilden.
2. Durch Anheben der Dauerstauhöhe können die Strömungsgeschwindigkeiten in Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser – speziell zu Beginn eines Niederschlagsereignisses – reduziert werden, was ein zentrales Kriterium für die Wirksamkeit der Anlage darstellt, insbesondere im Hinblick auf zu vermeidende Remobilisierung bereits abgesetzter Feststoffe.

### **1.3 Arbeitsschritte**

Die Zielsetzung der Masterarbeit soll modular erreicht werden. Die folgenden Teilziele werden schrittweise abgearbeitet:

1. Literaturrecherche, um einen Überblick über die Möglichkeiten zur numerischen Modellierung von Absetzbecken zu bekommen (Abschnitt 2.1);
2. Recherche nach geeigneter Software oder Programmpaketen, welche für die Erstellung und Berechnung von Modellen von Absetzbecken geeignet sind (Abschnitt 2.4);
3. Aufbau eines Modells, mit dem die Strömung in einem realen Absetzbecken numerisch modelliert wird. Dabei soll der Fokus auf den Füllprozess während des ersten Spülstoßes gelegt werden. Bei der Strömung handelt es sich

hydraulisch um einen instationären Strömungsprozess unter Freispiegelabfluss.

- (a) Sind entsprechende Messungen zum bestehenden Absetzbecken verfügbar, kann das Modell mithilfe dieser kalibriert und eventuell auch validiert werden. Dazu wird die Strömung im Absetzbecken während eines Regenereignisses aus der Vergangenheit simuliert.
  - (b) Zusätzlich bieten von Kessler und Steurer (2012) durchgeführte physikalische Modellversuche die Möglichkeit einer Validierung der Ergebnisse des numerischen Modells.
  - (c) Auswertung der Geschwindigkeiten an verschiedenen Stellen im Absetzbecken während des ersten Spülstoßes, welcher beim Bemessungsniederschlagsereignis auftreten würde;
  - (d) Mithilfe von Erfahrungen aus der Literatur sollen Überlegungen angestellt werden, inwieweit aus dem Strömungsbild auf das Sedimentationsverhalten im Absetzbecken geschlossen werden kann.
4. Zusammenfassung der Erkenntnisse, die aus den Simulationsergebnissen für die Strömung im untersuchten Absetzbecken getroffen werden können;
  5. Schlussfolgerungen und Ausblick zur Anwendung von numerischen Methoden zur Untersuchung von Strömung und Sedimentationsleistung in Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser (Abschnitt 7).

---

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Literaturrecherche

#### 2.1.1 Gliederung des Themas

Um einen Überblick über bereits durchgeführte Forschungsarbeiten zu bekommen, welche mit dem Thema dieser Masterarbeit verwandt sind, wird im Februar 2017 eine Literaturrecherche durchgeführt. Weiters sollen auch der derzeitige Stand der Technik und der Stand der Wissenschaft im Bereich der Behandlung von Oberflächenabfluss stark befahrener Straßen in Österreich zusammengefasst werden. Dazu wird Literatur zu folgenden Unterthemen recherchiert:

- Absetzbecken zur Reinigung von Straßenabwässern
  - Absetzbecken
  - Straßenabwässer
- Strömung und Sedimentationsleistung in Absetzbecken
- numerische Simulationen

#### 2.1.2 Methoden zur Literaturrecherche

**Bibliothekskataloge und Datenbanken:** In folgenden Bibliothekskatalogen und Datenbanken wird im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit nach Publikationen zu den oben genannten Bereichen gesucht werden:

- Online-Katalog der Universitätsbibliothek Bodenkultur<sup>1</sup>
- eDOC für nicht selbstständige Werke
- Water Resources Abstracts (Datenbank Kulturtechnik, Wasser- und Abfallwirtschaft)
- Cambridge Scientific Abstracts, SciVerse SCOPUS (Datenbank Umweltwissenschaften)

---

<sup>1</sup>wird über die Recherche-Plattform BOKU:LITsearch abgefragt

Zusätzlich zu diesen aufgezählten Katalogen werden für das Thema der Masterarbeit relevante Begriffe auch in der Internetsuchmaschine Google beziehungsweise auch Google Scholar abgefragt. Auf diese Weise sollen eventuelle zusätzliche Erfahrungen mit dem Thema, außerhalb des streng wissenschaftlichen Bereichs in die Masterarbeit einfließen können.

**Zitate in Sekundärliteratur:** Die Literaturverzeichnisse von Lehrbüchern, welche sich mit für die Masterarbeit relevanten Themen befassen, sollen nach weiterer geeigneter Literatur durchsucht werden.

### **Regelblätter und technische Dokumentationen:**

- Regelblätter und Arbeitsbehelfe des ÖWAV:  
Der Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) hat eine Reihe von Regelblättern und Arbeitsbehelfen erstellt, welche sich auch mit der Behandlung von Straßenwasser befassen. Nach solchen wird auf der Homepage des ÖWAV ([www.oewav.at](http://www.oewav.at)) gesucht.
- Regelwerke RVS der FSV:  
Die Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV) publiziert Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS). Auf der Homepage der FSV ([www.fsv.at](http://www.fsv.at)) wird nach jenen Richtlinien gesucht, welche sich mit der Behandlung des Oberflächenabflusses von Straßen beschäftigen.
- ÖNORMEN
- Richtlinien der ASFINAG:  
Die Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG) erstellt verschiedene Richtlinien und Leitfäden als Ergänzung zu den oben genannten Regelwerken.

### **2.1.3 Schlagwörter und Suchkriterien**

**Schlagwörter in deutscher Sprache:** Für die thematische Suche in den Datenbanken der UB Bodenkultur werden folgende Schlagwörter verwendet, welche über die Funktion „Index blättern“ ermittelt wurden:

- Sedimentation, Trennverfahren

- Absetzbecken, Absetzanlage, absetzen
- numerische Berechnung
- Simulation, Computersimulation
- Straßenentwässerung

**Keywords in englischer Sprache:** Im Thesaurus der Datenbank „Water Resources Abstracts“ werden folgende relevante Schlagwörter (“keywords”) in englischer Sprache ermittelt.

- settling tank
- surface runoff
- computational fluid dynamics
- flow

Die englischen Keywords werden hauptsächlich zur Suche in den Datenbanken SCOPUS und Water Resources Abstracts verwendet.

**Kombination der Schlagwörter mit boolschen Operatoren:** Zur Suche werden die Schlagwörter bzw. Keywords in verschiedenen Kombinationen mit boolschen Operatoren verknüpft, um möglichst gut passende Treffer zu erhalten.

**Weitere Auswahlkriterien:** Bei der Auswahl relevanter Literatur werden Publikationen, welche sich mit dem Absetzvorgängen in Nachklärbecken (secondary clarifier) von Abwasserreinigungsanlagen beschäftigen, im Allgemeinen nicht berücksichtigt. In derartigen Anlagen geht es hauptsächlich um das Sedimentieren von organischen Stoffen bzw. Belebtschlamm. In den dieser Arbeit untersuchten Anlagen soll hingegen primär mineralisches Material abgesetzt werden.

#### 2.1.4 Inhaltliche Zusammenfassung der verwendeten Literatur

Die zum Thema gefundenen Artikel beschäftigen sich entweder mit der Methodik der numerischen Simulation von Absetzvorgängen generell oder beschreiben durchgeführte numerische Simulationen von konkreten Projekten. Bei den Projekten handelt es sich meist um die numerische Untersuchung von Absetzbecken

zur Aufbereitung von Wasser für die Trinkwasserversorgung (z.B. Al-Sammarraee, Chan et al., 2009) oder um Absetzbecken in Abwasserreinigungsanlagen (z.B. Liu und Garcia, 2011). Die in den Publikationen verwendeten Programme sind in Tabelle 2 in Abschnitt 2.4 zusammengestellt. In den gefundenen Regelwerken sind der Stand der Technik für den Umgang mit und die Behandlung von Straßenwasser festgelegt.

- Literatur zur Behandlung von Straßenwasser allgemein konnte hauptsächlich über den Bibliothekskatalog der UB Bodenkultur gefunden werden. Weiters können Informationen dazu den Regelblättern und technischen Dokumentationen entnommen werden. Die Informationen daraus werden in Abschnitt 2.2 zusammengefasst.
- Measho Haile, Kammerer und Fürhacker (2014) und Grotehusmann, Kasting und Hunze (2007) untersuchen bestehende Absetzbecken und beschreiben Möglichkeiten zur Ausgestaltung von Absetzbecken zur möglichst effektiven Reinigung von Straßenwasser;
- Tran und Kang (2013) optimieren die Ausführung von hydrodynamischen Abscheidern zur Reinigung von Straßenwasser mit Fokus auf das gesamte Einzugsgebiet;
- Al-Sammarraee, Chan et al. (2009) beschäftigen sich mithilfe numerischer Simulation mit dem Absetzvorgang von Partikeln generell;
- Al-Sammarraee und Chan (2009), Goula et al. (2008a), Guo et al. (2017) und N.-S. Park et al. (2006) untersuchen den Effekt von Umlenkblechen in Sedimentationsbecken auf die Sedimentationsleistung;
- Rostami et al. (2011) untersuchen den Einfluss der Ausgestaltung des Zuflusses auf die Fließvorgänge in Vorklärbecken;
- Morin et al. (2008) untersuchen ein Lamellensystem zur Absetzung von Feststoffen mit numerischen Methoden;
- Semadeni-Davies (2009) führt eine Literaturstudie zu verschiedenen Ansätzen für die Ermittlung der Absetzgeschwindigkeit von Feststoffen im Regenwasserabfluss durch;
- Guyonvarch et al. (2015) entwickeln eine 1D-Umgebung (als interpreted CFD/iCFD bezeichnet), in welcher statistische Meta-Modelle verwendet werden, um einen Pseudodispersionskoeffizienten als Funktion von Bauart des Absetzbeckens und Fließbedingungen zu berechnen;

- Ho (2011) testet mehrere Mehrphasenmodelle zur Simulation des Verhaltens von Feststoffen in Absetzbecken für Regenwasserabfluss;
- Liu und Garcia (2011) sowie Kriš und Hadi (2010) haben numerische Simulationen durchgeführt, um die Dimensionierung von Absetzbecken einer Abwasserreinigungsanlage zu optimieren;
- Maleki-Ardebili (1995) beschäftigt sich grundlegend mit der Sedimentation von Partikeln in einer schwingenden Flüssigkeit und untersucht diese mit numerischen Methoden;
- Patziger und Kiss (2015) analysieren den Feststofftransport in Vorklärbecken von Abwasserreinigungsanlagen mittels numerischer Methoden;
- Ramalingam et al. (2012) beschreiben kritische Modellparameter für 3D-CFD-Modelle von Absetzbecken in Abwasserreinigungsanlagen;
- Rodríguez López et al. (2008) beschäftigen sich mit physikalischen Modellen von Absetzbecken.

### 2.1.5 Literatur speziell zu OpenFOAM

Wie in Abschnitt 2.4 dargestellt wird, lässt sich das numerische Modell in dieser Arbeit am ehesten mit dem Paket OpenFOAM erstellen. Es wird daher zusätzlich zu den bereits gefundenen Publikationen noch Literatur aufgelistet, welche sich speziell mit der Verwendung dieses Programms beschäftigt. Neben Publikationen von mit OpenFOAM durchgeführten Projekten (Suchbegriff „OpenFOAM settling“ führte zu 60 Ergebnissen in BOKU:LITsearch) wird auch über die Internetsuchmaschine Google nach Dokumentationen über die Funktion und Verwendung dieses Programmpakets gesucht.

**Internetseiten zu OpenFOAM:** Die offizielle Dokumentation zu OpenFOAM (Greenshields (2016)) ist in Anbetracht der Komplexität und Vielfältigkeit dieses Programmpaketes relativ knapp gehalten. Es gibt jedoch einige, von verschiedenen Seiten betriebene Online-Wikis, welche zusätzlich dazu dienen können, die Bedienung von OpenFOAM zu erlernen. Weiters finden sich auf den meisten der hier aufgezählten Internetseiten Userforen, in denen eine große Nutzergemeinde von OpenFOAM Erfahrungen austauscht.

CFD Direct Ltd (2017). *CFD Direct*. URL: <https://cfd.direct>.

CFD Online (2017). *CFD online*. URL: <https://www.cfd-online.com/>.

OpenCFD Ltd (2016). *OpenFOAM*. URL: [www.openfoam.com](http://www.openfoam.com).

OpenFOAMwiki (2017). *Unofficial OpenFOAM wiki*. Hrsg. von B. Gschaider. URL: <https://openfoamwiki.net/>.

**Onlinetutorien zu OpenFOAM:** Eine große Hilfe beim Erlernen des Umgangs mit OpenFOAM bieten eine Reihe von Onlinetutorien, welche entweder in Form von Videos (hauptsächlich auf der Plattform Youtube), oder schriftlich zur Verfügung stehen. Auf der Internetseite OpenCFD Ltd (2016) werden verschiedene, teilweise mehrwöchige „Kurse“ zu OpenFOAM angeboten. Ein Teil eines solchen Kurses ist auch der Einführungskurs von Kenneth Hoste und Hrvoje Jasak, welcher im Mai 2016 an der Universität Ghent stattfand und von dem eine vollständige Aufzeichnung im Internet zur Verfügung steht (siehe [https://wiki.openfoam.com/Introduction\\_to\\_OpenFOAM:\\_A\\_User\\_View\\_by\\_Kenneth\\_Hoste\\_and\\_Hrvoje\\_Jasak](https://wiki.openfoam.com/Introduction_to_OpenFOAM:_A_User_View_by_Kenneth_Hoste_and_Hrvoje_Jasak)). Einige der Vorträge aus dem genannten Kurs werden in dieser Arbeit zitiert.

**OpenFOAM-Kurse und Workshops:** Eine Sammlung von Links zu OpenFOAM-Kursen ist unter [https://openfoamwiki.net/index.php/Handy\\_links#OpenFOAM\\_courses](https://openfoamwiki.net/index.php/Handy_links#OpenFOAM_courses) zu finden.

## 2.2 Stand der Technik bei der Behandlung von Oberflächenabfluss

### 2.2.1 Allgemeine Festlegungen zur Behandlung von Oberflächenabfluss

Der Stand der Technik der Behandlung des von versiegelten Flächen abfließenden Niederschlagswassers ist in Österreich hauptsächlich in drei Richtlinien festgehalten. Dabei handelt es sich um die RVS 04.04.11 „Gewässerschutz an Straßen“ der Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV, 2010), das Regelblatt 45 „Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund“ des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV, 2015) sowie die ÖNORM B 2506-2 „Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen; Teil 2: Qualitative Anforderungen an das zu versickernde Regenwasser sowie Anforderungen an Bemessung, Bau und Betrieb von Reinigungsanlagen“ (ÖNORM B 2506 Teil 2, 2012). Während im ÖWAV-Regelblatt 45 die Behandlung des Oberflächenabflusses von Verkehrsflächen mit einem JDTV unter 15 000 Kfz/24h behandelt wird, beschreibt die RVS 04.04.11 die Behandlung des Oberflächenabflusses von Verkehrsflächen mit einem JDTV über 15 000 Kfz/24h. Als Ergänzung zur RVS hat die ASFINAG einen Planungsleitfaden für die Pla-

nung von Gewässerschutzanlagen im hochrangigen Straßennetz erstellt (ASFİNAG, 2015).

In der RVS 04.04.11 werden drei Regelfälle für die Behandlung von Oberflächenabfluss hochrangiger Straßen unterschieden. Die Sammlung des Oberflächenabflusses und Ableitung zu einer Gewässerschutzanlage ist in wasserwirtschaftlich sensiblen Gebieten notwendig, wenn besondere Sicherungs- und Vermeidungsmaßnahmen erforderlich sind (Regelfall 3). Zusätzlich kann Regelfall 3 auch angewandt werden, wenn nicht genügend Böschungsfäche mit entsprechender Filterweglänge vorhanden und auch keine Grundfläche zur Anlage einer Mulde verfügbar ist oder der Boden nicht genügend durchlässig ist (Regelfall 1). Für den Fall, dass der Boden nicht genügend durchlässig ist, kann eine Ableitung zu einem Vorfluter oder zu einer Versickerung erfolgen (Regelfall 2) (FSV, 2010).

### 2.2.2 Absetzbecken

Das in dieser Arbeit untersuchte Absetzbecken ist ein Teil der Gewässerschutzanlage Auhof-Wolfsgraben zur Behandlung von Oberflächenabfluss einer hochrangigen Straße nach Regelfall 3 in der RVS 04.04.11. Bei Absetzbecken handelt es sich um wasserdichte Becken, die dem Rückhalt von absetzbaren Stoffen dienen (FSV, 2010). Weiters erfüllen die Absetzbecken eine Retentionsfunktion und vermindern so das Hochwasserrisiko in der anschließenden Vorflut (Yan et al., 2014). Beispiele für Stoffe, welche in Absetzbecken zurückgehalten werden, sind Schlamm, Sand, Erde und Streusplitt. Durch den Rückhalt dieser Stoffe kann die Gefahr der Verlegung und Verschlammung der Sickeranlage vermindert werden (ÖNORM B 2506 Teil 2, 2012). Da ein signifikanter Anteil der Verschmutzung in Straßenwässern von den absetzbaren Partikeln transportiert wird, kann rein durch den Rückhalt der leicht absetzbaren Partikel schon ein hoher Reinigungsgrad erreicht werden (Yan et al., 2014).

Es wird zwischen Absetzbecken mit und ohne Dauerstau unterschieden (FSV, 2010).

Neben dem Rückhalt von absetzbaren Stoffen sind Absetzbecken in der Regel auch für den Rückhalt von Leichtstoffen konzipiert. Beispiele hierfür sind Blätter, Plastik oder Mineralölprodukte (ÖNORM B 2506 Teil 2, 2012). Der Rückhalt von Leichtstoffen wird entweder durch die Anordnung einer Tauchwand oder eines getauchten T-Stückes am Ablauf realisiert (FSV, 2010; ÖNORM B 2506 Teil 2, 2012). Die für die Retentionsfunktion der Absetzbecken nötige Drossleinrichtung ist mechanisch auszuführen. Drosselleitungen sind mit einem Maximaldurchmesser von 100 mm zu konzipieren (ASFİNAG, 2015).

Tabelle 1: Spezifizierungen der allgemeinen Modellgleichung (Formel 1) (Schwarze, 2013)

Gleichung	$\phi$	$D_\phi$	$Q_\phi$
Kontinuität	1	0	0
Impulserhaltung	$\mathbf{u}$	$\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$	$-\nabla p + \rho \mathbf{g}$
Energieerhaltung	$h$	$-\nabla \cdot \mathbf{q}''$	$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u})$

## 2.3 Theoretische Grundlagen zur numerischen Strömungsmodellierung

### 2.3.1 Grundgleichungen

Die numerische Strömungsmodellierung baut auf der Erhaltung der physikalischen Größen Masse, Impuls (in den drei Raumrichtungen) und Energie auf. Durch das Lösen der fünf Erhaltungsgleichungen, welche als Navier-Stokes-Gleichungen bezeichnet werden, kann die Strömung in Fluiden berechnet werden (Lecheler, 2014). In der Literatur zur numerischen Strömungsmodellierung (z. B. Diersch (2015) und Schwarze (2013)) werden die Navier-Stokes-Gleichungen meist in Form der folgenden prototypischen Modellgleichung angegeben:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\phi)}_{F_\phi} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi)}_{D_\phi} + Q_\phi \quad (1)$$

$\phi$  ..... Strömungsgröße / Erhaltungsgröße  
 $\Gamma$  ..... Diffusionskoeffizient  
 $F_\phi$  ..... konvektiver Fluss  
 $D_\phi$  ..... diffusiver Fluss  
 $Q_\phi$  ..... sonstige Quellen und Senken

Darin steht  $\phi$  für eine Strömungsgröße.  $F_\phi$  ist der konvektive Fluss und  $D_\phi$  der diffusive Fluss von  $\phi$ . Setzt man für  $\phi$  die in Tabelle 1 gegebenen Terme ein, erhält man die Gleichungen für die Massenerhaltung (Kontinuität), Impulserhaltung und Energieerhaltung. Der Diffusionskoeffizient  $\Gamma$  der Größe  $\phi$  geht im Gradientenansatz in die Gleichung ein. Alle sonstigen Quellen und Senken von  $\phi$  werden in  $Q_\phi$  berücksichtigt (Schwarze, 2013).

Insgesamt enthalten die Navier-Stokes-Gleichungen im allgemeinsten Fall 17 Unbekannte ( $\rho$ ,  $\mathbf{u}$  in drei Richtungen,  $p$ ,  $e$ ,  $h$ ,  $T$  und 9  $\boldsymbol{\tau}$ -Terme des Schubspannungstensors) (Lecheler, 2014). Um alle diese Unbekannten zu berechnen, sind laut Lecheler neben den fünf Navier-Stokes-Gleichungen noch zwölf weitere Gleichungen erforderlich:

- thermische Zustandsgleichungen: Kopplung von Druck  $p$ , Dichte  $\rho$  und Temperatur  $T$  bei idealen Gasen
- kalorische Zustandsgleichungen: Kopplung von spezifischer innerer Energie  $e$  und Enthalpie  $h$  mit der Temperatur  $T$
- stokessche Beziehungen: Kopplung von Spannungen  $\tau$  mit den Geschwindigkeiten  $\mathbf{u}$  bei newtonschen Fluiden
- Berechnung der Stoffwerte (z. B. Viskosität) aus der Temperatur

Dabei gilt:

$e$	.....	spezifische innere Energie [ $e$ ] = J kg <sup>-1</sup>
$h$	.....	spezifische Enthalpie [ $h$ ] = J kg <sup>-1</sup>
$p$	.....	Druck [ $p$ ] = Pa
$T$	.....	Temperatur [ $T$ ] = K
$\mathbf{u}$	= $\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}$	.. Geschwindigkeitsvektor [ $\mathbf{u}$ ] = m s <sup>-1</sup>
$\rho$	.....	Dichte [ $\rho$ ] = kg m <sup>-3</sup>
$\boldsymbol{\tau}$	.....	Schubspannungstensor [ $\boldsymbol{\tau}$ ] = Pa

Mit den genannten Gleichungen können im Prinzip alle Strömungen newtonscher Fluide beschrieben werden, unter anderem auch Zweiphasenströmungen (Laurien und Oertel jr., 2013). In der vorliegenden Masterarbeit soll die Strömung der zwei Phasen Luft und Wasser berechnet werden. Zur Berechnung von Mehrphasenströmungen gibt es zwei Ansätze. Ist eine Phase nur zu einem sehr geringen Volumsanteil vorhanden, wird diese Hintergrundphase mit der Lagrangeschen Betrachtungsweise behandelt, während die hauptsächlich vorherrschende Phase mit der Eulerschen Betrachtungsweise behandelt wird. Kann keine Phase eindeutig als Hintergrundphase betrachtet werden, wie es beim Modell des Absetzbeckens der Fall ist, werden beide Phasen mit der Eulerschen Betrachtungsweise behandelt (Jasak, 2016b). Dazu wird eine zusätzliche Strömungsgröße  $\alpha$  eingeführt, die den

Volumensanteil der Phase Wasser in einem Zellvolumen ausdrückt. Alternativ kann  $\alpha$  auch als Wahrscheinlichkeit betrachtet werden, dass Wasser in einer bestimmten Zelle ist (Jasak, 2016b). Um die Strömung der beiden Phasen zu berechnen, gibt Jasak (2016b) die folgenden zusätzlichen Gleichungen an. Die Gleichungen wurden mit der „conditional averaging technique“ abgeleitet, welche von Dopazo (1977) beschrieben wird (Jasak, 2016b).

Kontinuitätsgleichungen für die Phasen Wasser und Luft (Jasak, 2016b):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}_W \alpha) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (1 - \alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}_L (1 - \alpha)) = 0 \quad (3)$$

$\alpha$  ..... Volumensanteil von Wasser in der Zelle [ $\alpha$ ] = 1

Impulsgleichungen für die Phasen Wasser und Luft (Jasak, 2016b):

$$\frac{\partial (\alpha \bar{\mathbf{u}}_W)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \bar{\mathbf{u}}_W \bar{\mathbf{u}}_W) + \nabla \cdot (\alpha \bar{\mathbf{R}}_W^{eff}) = -\frac{\alpha}{\rho_W} \nabla \bar{p} + \alpha \mathbf{g} + \frac{\mathbf{M}_W}{\rho_W} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial ((1 - \alpha) \bar{\mathbf{u}}_L)}{\partial t} + \nabla \cdot ((1 - \alpha) \bar{\mathbf{u}}_L \bar{\mathbf{u}}_L) + \nabla \cdot ((1 - \alpha) \bar{\mathbf{R}}_L^{eff}) \\ = -\frac{(1 - \alpha)}{\rho_L} \nabla \bar{p} + (1 - \alpha) \mathbf{g} + \frac{\mathbf{M}_L}{\rho_L} \end{aligned} \quad (5)$$

$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix}$  ... Erdbeschleunigung [ $\mathbf{g}$ ] =  $\text{m s}^{-2}$

$\mathbf{M}_\phi$  ..... Impulsaustausch zwischen den Phasen

Definition der Geschwindigkeit im Zellvolumen als gewichteter Mittelwert der Geschwindigkeit der Phasen (Jasak, 2016b):

$$\mathbf{u} = \alpha \cdot \bar{\mathbf{u}}_W + (1 - \alpha) \cdot \bar{\mathbf{u}}_L \quad (6)$$

Volumenerhaltungsgleichung (Jasak, 2016b):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

Definition der Dichte im Zellvolumen als gewichteter Mittelwert der Dichten von Wasser und Luft (Nagy, 2014):

$$\rho = \alpha\rho_W + (1 - \alpha)\rho_L \quad (8)$$

Um speziell Strömungen mit freiem Wasserspiegel mit den beschriebenen Methoden zu modellieren, kann die zusätzliche Bedingung eingeführt werden, dass  $\alpha$  nur die Werte 0 oder 1 annehmen kann. Damit wird erzielt, dass stets eine scharfe Grenzfläche zwischen Luft und Wasser erhalten bleibt (Jasak, 2016b).

Der beschriebene Ansatz zur Berechnung von Zweiphasenströmungen durch das Lösen der zusätzlichen Gleichung für  $\alpha$  wird als Volume of Fluid (VOF) Methode bezeichnet (Greenshields, 2016).

### 2.3.2 Methoden zur Turbulenzmodellierung

Die strömungsmechanische Turbulenz besteht aus vielen wirbelartigen Strukturen in verschiedenen Gestalten und kontinuierlicher Größenverteilung (Laurien und Oertel jr., 2013; Schwarze, 2013). Es ist bisher nicht gelungen, eine theoretische Beschreibung für turbulente Strömungen zu entwickeln (Schwarze, 2013). Da die Turbulenz aber ein kontinuumsmechanisches Phänomen ist, ist sie mithilfe der vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen (Formel 1) beschreibbar (Laurien und Oertel jr., 2013). Dieser Ansatz wird „direct numerical solution“ (DNS) genannt. Dabei wird die Turbulenz in allen Einzelheiten berechnet und bis in die kleinsten Dissipationsbereiche aufgelöst (Schwarze, 2013). Hierzu müssen sich jedoch auch die Zellgrößen des Rechenetzes an der Größe der kleinsten Turbulenzelemente (Kolmogorov-Skala) orientieren. Dies ist jedoch für die meisten Anwendungen und auch für die Modelle in dieser Arbeit zu aufwändig (Schwarze, 2013; Chen et al., 2014). Daher müssen für die Formulierung geeigneter physikalischer Modelle zur Beschreibung turbulenter Strömungen Erfahrungstatsachen in Form von Turbulenzmodellen genutzt werden.

Bei der numerischen Strömungsmodellierung turbulenter Strömungen mithilfe von Turbulenzmodellen werden anstelle der vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen verwendet. Dazu werden die Strömungsgrößen als Summe ihrer niederfrequenten Mittelwerte und ihres hochfrequenten turbulenten Schwankungsanteils betrachtet (Lecheler, 2014).

$$\begin{aligned}\rho &= \bar{\rho} + \rho' \\ \mathbf{u} &= \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \\ e &= \bar{e} + e'\end{aligned}$$

Die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen enthalten nur die niederfrequenten Mittelwerte, während die hochfrequenten Schwankungsanteile die Turbulenz erfassen und durch ein Turbulenzmodell ersetzt werden (Lecheler, 2014). Turbulenzmodelle basieren also darauf, dass die Turbulenzelemente einer turbulenten Strömung ein kontinuierliches Größenspektrum aufweisen (Schwarze, 2013).

Grundsätzlich gibt es neben DNS zwei häufig verwendete Modellansätze zur Turbulenzmodellierung. Zum einen ist dies der Modellansatz der Large-Eddy-Simulation (LES), bei der Turbulenzelemente, welche eine bestimmte Größe überschreiten, noch direkt aufgelöst werden und nur die Wirkung von kleinen Elementen durch ein Modell approximiert wird (Schwarze, 2013). Dadurch können mit LES zumindest die Effekte der großen, dominanten Turbulenzelemente direkt berechnet werden, während der Rechenaufwand im Vergleich zu DNS um einiges ökonomischer ausfällt (Chen et al., 2014).

Im zweiten häufig verwendeten Modellansatz, der Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) werden keine Turbulenzelemente direkt aufgelöst und nur das Reynolds-gemittelte Strömungsfeld berechnet. Dadurch kann der Rechenaufwand im Vergleich zu LES noch weiter reduziert werden. Die Eigenschaften der Turbulenz und ihre Wirkung auf die mittlere Strömung werden vollständig mit dem oben beschriebenen Vorgehen durch Turbulenzmodelle approximiert. Dazu werden unter anderem folgende mittlere Turbulenzgrößen verwendet (Schwarze, 2013):

- in den turbulenten Schwankungen enthaltene spezifische Energie  $k$
- die mittlere Dissipation  $\epsilon$  von  $k$

Aus  $k$  und  $\epsilon$  kann mit der Viskosität  $\nu$  die Reynoldszahl der Turbulenz  $Re_T$  (auch lokale Reynoldszahl) berechnet werden (Schwarze, 2013):

$$Re_T = \frac{k^2}{\nu\epsilon} = \frac{\nu_T}{\nu} \quad (9)$$

$$\text{mit } \nu_T = \frac{k^2}{\epsilon} \quad (10)$$

$$k = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{u}' \cdot \mathbf{u}' \quad (11)$$

$Re_T$ .....	Reynoldszahl der Turbulenz / lokale Reynoldszahl $[Re_T] = 1$
$k$ .....	spezifische turbulente kinetische Energie: $[k] = \text{m}^2 \text{s}^{-2}$
$\epsilon$ .....	Dissipationsrate von $k$ : $[\epsilon] = 1$
$\nu$ .....	kinematische Viskosität $[\nu] = \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\nu_T$ .....	Wirbelviskosität $[\nu_T] = \text{m}^2 \text{s}^{-1}$

Zur Wirbelviskosität  $\nu_T$  in Gleichung 9 ist anzumerken, dass dieser Wert im Gegensatz zur Viskosität  $\nu$  keine Materialkonstante ist, sondern die Strömung bzw. die Turbulenz an einer bestimmten Stelle charakterisiert. Die Reynoldszahl der Turbulenz kann auch als Verhältnis der Wirbelviskosität zur kinematischen Viskosität des Fluids interpretiert werden (Schwarze, 2013).

Bei der Verwendung von RANS-Turbulenzmodellen kommt es zu durchaus erheblichen Ungenauigkeiten bei den berechneten Strömungsgrößen im Bereich hoher Schubspannungen oder bei niedrigen Reynoldszahlen. Genau diese Bereiche sind jedoch bei der Untersuchung von Absetzvorgängen am relevantesten (Al-Sammarraee, Chan et al., 2009). Um die Rechenzeiten in einem vertretbaren Rahmen zu halten, wird trotzdem für das Modell in dieser Arbeit, entgegen den Empfehlungen von Al-Sammarraee, Chan et al. (2009), wie auch in vielen anderen Modellen von Absetzbecken, ein RANS-Turbulenzmodell verwendet. Es wird jedoch festgehalten, dass die Ergebnisse in den oben angesprochen Bereichen teilweise nicht verlässlich sein können.

Schwarze (2013) stellt eine Auswahl häufig genutzter Turbulenzmodelle vor. Diese Liste diene der Vorauswahl eines geeigneten Turbulenzmodells für die Strömungsmodellierung in der vorliegenden Arbeit und wird nachfolgend zusammengefasst. Dabei handelt es sich um high-Re-Turbulenzmodelle, die die voll ausgebildete Turbulenz einer Strömung beschreiben. Einige wesentliche Annahmen dieser Modelle sind nur korrekt, wenn die lokale Reynoldszahl (siehe Gleichung 9) groß ist, also  $Re_T \gg 1$  (Schwarze, 2013). Dies wird im Zuge der Validierung und Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse in Abschnitt 6.1 überprüft. Im wandnahen Bereich kann die Annahme der großen lokalen Reynoldszahl nicht erfüllt werden, deshalb müssen in diesem Bereich besondere Strategien eingehalten werden (Schwarze, 2013) (siehe unten).

**$k$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell:** Bei diesem Modell werden die zwei oben angesprochenen Variablen  $k$  und  $\epsilon$  ermittelt (Greenshields, 2016). Es gibt verschiedene  $k$ - $\epsilon$ -Modelle, die sich in den verwendeten Transportgleichungen für die Turbulenzgrößen  $k$  und  $\epsilon$  unterscheiden (Schwarze, 2013). Aus den beiden Parametern  $k$  und  $\epsilon$  wird nach Gleichung 12 die Turbulenzviskosität  $\nu_T$  ermittelt (Laurien und Oertel

jr., 2013).

$$\nu_T = \rho \cdot c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (12)$$

$c_\mu = 0,09$  ..... empirische Konstante:  $[c_\mu] = 1$

$k$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodelle eignen sich gut für die Modellierung einfacher Strömungsprozesse, wie beispielsweise im Kernbereich einer vollturbulenten Rohrströmung. Insbesondere werden sie häufig zur Analyse von Strömungen angewendet, bei denen globale Strömungsstrukturen analysiert werden sollen (Schwarze, 2013).

**Wilcox- $k$ - $\omega$ -Modell:** Bei  $k$ - $\omega$ -Modellen wird die charakteristische Frequenz  $\omega$  der energietragenden Wirbel als Turbulenzgröße verwendet (Schwarze, 2013).

$$\omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (13)$$

$\omega$  ..... charakteristische Frequenz energietragender Wirbel  $[\omega] = \text{s}^{-1}$

Mit dem  $k$ - $\omega$ -Modell können in der Nähe von festen Wänden bessere Ergebnisse als mit dem  $k$ - $\epsilon$ -Modell erzielt werden. Im Strömungsinnen wird jedoch die Qualität der Turbulenz- und Strömungsmodellierung deutlich schlechter, während in diesem Bereich die Güte der Simulationsergebnisse, welche mit dem  $k$ - $\epsilon$ -Modell erzielt werden können, zunimmt (Schwarze, 2013).

**Menter-Shear-Stress-Transport- $k$ - $\omega$ -Modell (SST- $k$ - $\omega$ -Modell):** Dieses Modell wurde entwickelt, um die Schwäche des Wilcox- $k$ - $\omega$ -Modells in den Außenbereichen zu kompensieren. Während in Wandnähe eine Modellgleichung zur Berechnung von  $\omega$  wie im oben beschriebenen Wilcox- $k$ - $\omega$ -Modell zur Anwendung kommt, wird im Außenbereich die  $\omega$ -Gleichung durch eine Transformation aus der Transportgleichung für  $\epsilon$  ermittelt. In dieser Region wird dann effektiv ein  $k$ - $\epsilon$ -Modell angewandt (Schwarze, 2013).

Neben diesen sogenannten Zwei-Gleichungsmodellen beschreibt Schwarze (2013) noch Ein-Gleichungsmodelle und Reynolds-Spannungs-Modelle, die jedoch für das Modell in dieser Masterarbeit nicht weiter relevant sind.

### 2.3.3 Bereiche niedriger Reynoldszahlen

In der Nähe fester Wände beträgt die Geschwindigkeit annähernd Null. Damit kann die für die Turbulenzmodelle getroffene Annahme  $Re_T \gg 1$  nicht mehr erfüllt werden. Um wandnahe Strömungen und Turbulenz möglichst präzise zu modellieren, werden sogenannte Wandfunktionen oder low-Re-Modelle eingesetzt (Schwarze, 2013).

**Wandfunktionen:** Dieser Ansatz wird in Kombination mit high-Re-Modellen eingesetzt. Wandfunktionen basieren darauf, dass im wandnahen Bereich in dimensionsloser Darstellung ähnliche Geschwindigkeitsverteilungen  $u^+(y^+)$  vorliegen, welche weitgehend als universell gültig erachtet werden (universelles Wandgesetz) (Schwarze, 2013).

$$u^+(y^+) = \begin{cases} y^+ & \text{für } y^+ \leq 5 \\ \star & \text{für } 5 < y^+ < 70 \\ \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C & \text{für } y^+ \geq 70 \end{cases} \quad (14)$$

\*) Um die Geschwindigkeitsverteilung in der Übergangsschicht ( $5 < y^+ < 70$ ) zu berechnen, ist ein komplexerer funktioneller Zusammenhang nötig (Schwarze, 2013).

$u_\tau$  ..... Wandschubspannungsgeschwindigkeit [ $u_\tau$ ] =  $\text{m s}^{-1}$   
 $y^+$  ..... dimensionsloser Wandabstand [ $y^+$ ] = 1  
 $u^+$  ..... dimensionslose Geschwindigkeit [ $u^+$ ] = 1  
 $\kappa = 0,41$  ..... Karman-Konstante

Um die dimensionslose Darstellung der wandnormalen Koordinate  $y$  und der wandparallelen Geschwindigkeit  $\bar{u}$  zu erhalten, werden sie mit der Wandschubspannungsgeschwindigkeit  $u_\tau$  entdimensionalisiert (Schwarze, 2013).

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_W}{\rho}} \quad (15)$$

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (16)$$

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \quad (17)$$

Mit der Integrationskonstanten  $C$  in Formel 14 kann der Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Geschwindigkeitsverteilung berücksichtigt werden (Schwarze, 2013).

Für einige Turbulenzgrößen der wandnahen Strömung lassen sich ebenfalls dimensionslose Zusammenhänge angeben. Auch diese weisen einen universellen Charakter auf, wodurch sich funktionale Beziehungen für  $k$ ,  $\epsilon$  und  $\nu_T$  entwickeln lassen (Schwarze, 2013).

Bei der Verwendung eines Turbulenzmodells mit Wandfunktionen ist es nicht notwendig, das Rechenetz im Bereich der Wände zu verfeinern, da die Strömung im Bereich der Wände ohnehin nicht aufgelöst, sondern nur modelliert wird (Greenshields, 2016). Ein dimensionsloser Wandabstand von  $y^+ < 20$  des Zentrums der wandnächsten Zellen sollte sogar vermieden werden, da dann das logarithmische Wandgesetz nicht mehr angewendet werden kann (siehe Formel 14) (Schwarze, 2013).

**low-Re-Modelle:** Diese Modelle kommen ohne Wandfunktionen aus, sodass die damit verbundenen Modellfehler und Probleme vermieden werden können. Stattdessen wird die turbulente Strömung von Bereichen mit hohen  $Re_T$  bis in Bereiche mit kleinen  $Re_T$  aufgelöst und modelliert. In Bereichen mit kleinen  $Re_T$ -Zahlen wird die Turbulenz mittels Dämpfungsfunktionen gedämpft. Somit kann mit diesen Modellen die Strömung und Turbulenz bis an die Wand heran beschrieben werden. Low-Re-Modelle führen zwar zu deutlich besseren Simulationsergebnissen, sind allerdings auch mit einem deutlich höheren Rechenaufwand verbunden als Wandfunktionen (Schwarze, 2013). Weil dieser hohe Rechenaufwand im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit nicht vertretbar wäre, werden low-Re-Modell hier nicht verwendet.

### 2.3.4 Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen

In der numerischen Strömungsmechanik ist die Finite-Volumen-Methode das am häufigsten eingesetzte Lösungsverfahren, da die konvektiven und diffusiven Flüsse auf den Seitenflächen jeder Zelle im Rechengitter explizit ausgewertet werden. Dadurch hat die Methode schon vom Ansatz her das Potential der konservativen Diskretisierung, das heißt, dass die Flüsse über die Zellgrenzen sowie im gesamten Strömungsgebiet erhalten bleiben (Schwarze, 2013).

Bei der Finite-Volumen-Methode wird das Integral der Modellgleichung 1 über ein Kontrollvolumen (KV) ausgewertet. Mit dem Gaußschen Satz werden die Volumenintegrale auf der rechten Seite in Oberflächenintegrale umgewandelt (Schwar-

ze, 2013):

$$\int_{KV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV = \int_{KV} [\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) - \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \phi) + Q_\phi] dV \quad (18)$$

$$\int_{KV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV = \oint_{OF} (\Gamma \nabla \phi) \cdot \hat{n} dA - \oint_{OF} (\rho \mathbf{u} \phi) \cdot \hat{n} dA + \int_V Q_\phi dV \quad (19)$$

$\hat{n}$  ..... Flächennormale auf die Seitenflächen von KV

Um Gleichung 19 zu diskretisieren ist es notwendig, Werte von den Zellzentren auf die Begrenzungsflächen zwischen den Zellen zu interpolieren (Schwarze, 2013). Weiters müssen die unbekanntenen Ableitungen auf den Zellflächen mithilfe der bekannten Werte in den Zellzentren approximiert werden (Schwarze, 2013). Schlussendlich müssen zur vollständigen Diskretisierung von Gleichung 19 die Integrale numerisch approximiert werden (Schwarze, 2013). Die hierfür verwendeten Interpolationsschemen und Diskretisierungsschemen werden in Abschnitt 3.3 beschrieben.

### 2.3.5 Vorgehen bei der Erstellung der numerischen Modelle

Lecheler (2014) schlägt einen Ablauf zur numerischen Strömungsberechnung vor, welcher als Grundlage für die Erstellung der Modelle in dieser Masterarbeit herangezogen wird. Zuerst wird die Geometrie des zu untersuchenden Strömungsgebiets erstellt (Rechengebiet). Diese Geometrie wird dann diskretisiert (Rechennetz). Anschließend werden alle weiteren für die Strömungsberechnung notwendigen Festlegungen, wie Randbedingungen und Wahl des Turbulenzmodells getroffen. Ist das Pre-Processing abgeschlossen, kann mit der eigentlichen Strömungsberechnung begonnen werden. Die Ergebnisse der Strömungsberechnung werden im Zuge des Post-Processing ausgewertet. In dieser Arbeit wird die Strömung vor allem mit Stromlinien und Geschwindigkeitsvektoren visualisiert. Weiters bieten sich noch Darstellungen von Isoflächen und Konturen der Geschwindigkeitsverteilung an. Zusätzlich zu dieser flächenmäßigen Darstellung von Momentaufnahmen werden mithilfe von Postprocessingfunktionen Strömungsgrößen an verschiedenen Stellen im Absetzbecken in regelmäßigen Zeitintervallen ausgelesen und deren Verteilung dargestellt.

Um die Genauigkeit der Ergebnisse der numerischen Berechnungen zu überprüfen muss eine Validierung durchgeführt werden (Lecheler, 2014). Dabei werden Strömungsgrößen der numerischen Simulation mit in der Realität gemessenen Werten verglichen.

## 2.4 Wahl geeigneter Software für die Erstellung der Modelle

### 2.4.1 Anforderungen an die Software

In den Absetzbecken herrscht Freispiegelabfluss mit stark schwankendem Wasserspiegel. Teilweise können die Absetzbecken auch vollständig entleert werden und nur noch mit Luft gefüllt sein. Um dies zu simulieren, ist im allgemeinen ein Mehrphasenmodell erforderlich, mit dem die Phasen Luft und Wasser sowie deren Interaktion modelliert werden können (siehe Abschnitt 2.3).

Die Kosten für die Software sollen möglichst gering gehalten werden, wenn möglich ist Open-Source-Software zu verwenden. Diese Programme haben neben den geringen Kosten für die Software selbst auch den Vorteil, dass sie durch die Verfügbarkeit des Quellcodes bei Bedarf und mit dem nötigen Know-How beliebig an spezielle Fragestellungen angepasst werden können.

### 2.4.2 Verfügbare Programmpakete

Um einen möglichst guten Überblick über die für die Erstellung der numerischen Modelle von Absetzbecken verfügbare Software zu erhalten, wird die in Abschnitt 2.1 gesammelte Literatur nach den verwendeten Programmen durchsucht. Zu den auf diese Weise gesammelten Programmen wird dann im Internet (z. B. auf den Seiten der Vertreiber) nach weiteren Informationen recherchiert, um deren Eignung für die Erstellung der Modelle in dieser Masterarbeit zu prüfen.

In Tabelle 2 sind einige Publikationen den für die Berechnung der numerischen Modelle verwendeten Programmen zugeordnet. Die Autoren der meisten im Zuge dieser Literaturrecherche gefundenen Publikationen, welche sich mit der Simulation von Absetzbecken beschäftigen, haben das Programm ANSYS Fluent verwendet.

Die beiden Programme ANSYS Fluent und ANSYS CFX stammen von der Firma ANSYS, Inc., welche eine Reihe von Computer Aided Engineering-Lösungen zu unterschiedlichen Bereichen der Technik anbietet, unter anderem auch zu Partikelströmungen (ANSYS, Inc., 2017). Da es sich dabei um kommerzielle Software handelt, kommen diese Programme auf Grund der hohen Kosten für die Erstellung der Modelle der Absetzbecken in dieser Masterarbeit nicht infrage.

Mit COMSOL kann jedes auf physikalischen Effekten basierende System modelliert werden (COMSOL Inc., 2017). Für spezielle Anwendungsfälle gibt es eine Reihe von Zusatzprodukten (Module). Aufgrund der Vielfältigkeit würde es wahrscheinlich möglich sein, die geplanten Modelle der Absetzbecken mit COMSOL

Tabelle 2: Programme, welche zur numerischen Simulation von Sedimentationsprozessen verwendet wurden

Programm	Verwendung
ANSYS CFX	N. Park et al. (2014) Morin et al. (2008)
ANSYS Fluent	Al-Sammarraee und Chan (2009) Goula et al. (2008a), Goula et al. (2008b) Grotehusmann, Kasting und Hunze (2007) He, Marsalek und Rochfort (2004) Kriš und Hadi (2010) Ramalingam et al. (2012) Reddy und Joshi (2009) Tarpagkou und Pantokratoras (2013) Yan et al. (2014)
COMSOL	Guo et al. (2017)
Flow-3D	Ho (2011) Rostami et al. (2011)
OpenFOAM	Liu und Garcia (2011)
SWMM	Tran und Kang (2013)

zu erstellen. Da es sich jedoch auch bei diesem Programm um ein kommerzielles Produkt handelt, ist es für die Masterarbeit nicht geeignet.

FLOW-3D wird in Österreich von Flow Science Deutschland GmbH vertrieben und betreut. Bei diesem Programm handelt es sich um eine Simulationssoftware für Anwendungen im Wasserbau mit der Möglichkeit, Strömungen mit freiem Wasserspiegel zu simulieren und auch bewegte Körper zu modellieren (Flow Science Deutschland GmbH, 2017). Auch bei FLOW-3D handelt es sich um eine kommerzielle Software, weshalb es für die geplanten Modelle der Absetzbecken ungeeignet ist.

OpenFOAM ist eine freie, Open-Source CFD-Software die von OpenFOAM Ltd., herausgegeben und hauptsächlich entwickelt wird (OpenCFD Ltd, 2016). Es sind unzählige Solver für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche verfügbar und somit können in dieser Masterarbeit damit auch die geplanten Modelle der Absetzbecken erstellt werden. Das Fehlen einer grafischen Benutzeroberfläche und einer umfassenden Dokumentation stellen allerdings Nachteile dar. Das erforderliche Know-How muss aus einer Reihe von Online-Wikis bezogen werden.

SWMM (Storm Water Management Model) wird von der United States Environmental Protection Agency herausgegeben und ist ebenfalls frei nutzbar. Mit

diesem Modell kann der gesamte hydrologische Prozess in einem Einzugsgebiet vom Niederschlag bis zur Abgabe an eine Abwasserreinigungsanlage oder einen Vorfluter modelliert werden (EPA, 2016). Eine detaillierte 3D-Modellierung der Strömungen innerhalb eines Absetzbeckens, wie sie in dieser Masterarbeit erstellt werden soll, ist jedoch nicht möglich.

Zusätzlich zu den oben aufgezählten in der Literatur verwendeten Programmen kommt noch das Programm SSIIM (Sediment Simulation in Intakes with Multiblock Option) infrage, welches von Dr. Nils Reider B. Olsen, Professor an der Norwegian University of Science and Technology (NTNU) entwickelt wurde (CFD Online, 2017). Das Programm löst die Navier-Stokes-Gleichungen mit der Kontrollvolumenmethode unter Verwendung des SIMPLE-Algorithmus und mit einem  $k$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell. Für den Sedimenttransport wird eine Konvektions-Diffusionsgleichung gelöst. Zusätzlich ist auch ein Wasserqualitätsmodell inkludiert (NTNU, 2016). Auch dieses Programm steht frei zum Download zur Verfügung, ist jedoch für die geplanten Modelle der Absetzbecken in dieser Masterarbeit nur bedingt geeignet, weil z. B. Lösungsalgorithmus oder Turbulenzmodell schon fix vorgegeben sind, was die Flexibilität einschränkt.

Als Ergebnis der Suche nach einem geeigneten Programm zur Erstellung der geplanten Modelle von Absetzbecken im Rahmen der Masterarbeit kann festgehalten werden, dass die Produkte von ANSYS, Inc. am häufigsten für ähnliche Anwendungen eingesetzt wurden und somit sicherlich auch in diesem Fall geeignet wären. Mit etwas mehr Aufwand können jedoch auch mit OpenFOAM Modelle von Absetzbecken erstellt werden. Dieses Programmpaket bringt vielleicht sogar einen noch größeren Funktionsumfang und höhere Flexibilität mit sich. Zusätzlich hat OpenFOAM den Vorteil, dass keine Lizenzkosten anfallen.

Über die Möglichkeiten sowie Vor- und Nachteilen der Verwendung von Open-Source-Paketen wie OpenFOAM für numerische Strömungsanalysen gibt es auch Publikationen (z. B. Chen et al. (2014) und Tabor et al. (2011)), mit denen sich der folgende Abschnitt unter anderem beschäftigt.

### 2.4.3 Details zu OpenFOAM

OpenFOAM ist eine der drei meistbenutzten CFD-Software-Pakete (OpenCFD Ltd, 2016). Für die Modellierung von Absetzbecken in OpenFOAM ist fundiertes Wissen nötig. Für die meisten in OpenFOAM erstellten Modelle von Absetzbecken wurden eigene Solver programmiert (z. B. Liu und Garcia, 2011). Chen et al. (2014) beschreiben neben den Vorteilen von OpenFOAM auch den Nachteil des durchaus aufwändigen Einstiegs in dieses Programm. Der Umgang mit OpenFOAM kann laut Chen et al. (2014) auf folgenden Wegen erlernt werden:

- Teilnahme an einem internationalen gemeinschaftlich organisierten Workshop
- Teilnahme an einem kommerziellen Kurs, dessen Kosten mehrere Tausend Dollar pro Person übersteigen können
- Beitritt zu Online- oder Campus-Usergruppen
- Hilfestellungen oder Kurse von erfahrenen Usern

**Geeignete Solver in OpenFOAM:** Für die Modellierung von freien Wasserspiegeln bietet OpenFOAM den Solver `potentialFreeSurfaceFoam` an. Bei diesem Solver ist es möglich eine spezielle Randbedingung für die Wasserspiegeloberfläche zu vergeben. Damit muss die Strömung nur in Zellen berechnet werden, die tatsächlich mit Wasser gefüllt sind. Aufgrund des Fehlens von Tutorial-Cases, aus denen der grundlegende Aufbau des Modells in der vorliegenden Masterarbeit mit diesem Solver entwickelt werden könnte, wird jedoch von der Verwendung dieses Solvers vorerst abgesehen.

Die meisten Tutorial-Cases mit Freispiegelabfluss in OpenFOAM sind für den OpenFOAM Solver `interFOAM` verfügbar. Dieser Solver basiert auf der in Abschnitt 2.3 beschriebenen VOF-Methode (Greenshields, 2016). Da dieser offensichtlich insgesamt häufig eingesetzt wird, sind in den Benutzerforen zu OpenFOAM wie z. B. jenes von CFD Online (2017) viele Informationen zu diesem Solver und Erfahrungen damit dokumentiert. Aus diesem Grund wird das Modell in dieser Masterarbeit auch mit dem Solver `interFOAM` berechnet.

OpenFOAM stellt einen Solver für die Modellierung von Absetzprozessen zur Verfügung, der den Namen `driftFluxFoam` trägt (Greenshields, 2016). Dieser Solver hat jedoch den Nachteil, dass eine fixe Wasserspiegeloberfläche zugrunde gelegt wird und damit der Füll- und Entleerungsvorgang des Beckens nicht in das Modell miteinbezogen werden kann. Grotehusmann, Kasting und Hunze (2007) hat ein Vorgehen angesprochen, mithilfe dessen wesentliche Einflüsse des Beckenbetriebes auch bei einer fest definierten Wasserspiegellage berücksichtigt werden können. Trotzdem wird in dieser Arbeit vorerst auf die numerische Modellierung des Absetzvorgangs selbst verzichtet und nur das Strömungsfeld numerisch berechnet.

## 2.5 Grundlagen zur Modellierung des Sedimentationsprozesses

### 2.5.1 Abschätzung der zurückgehaltenen Partikelgrößen

Measho Haile, Kammerer und Fürhacker (2014) schlagen zur Abschätzung der Vertikalbewegung der Partikel eine numerische Abschätzung mit Modellansätzen vor, die auf der Stokesschen Gleichung beruhen. Wesentliche Eingangsgrößen dafür sind die Partikelgrößenverteilung und die Dichte der abzusetzenden Partikel. Weiters ist eine physikalische Bestimmung der Sinkgeschwindigkeiten mittels Absetzversuchen möglich (Measho Haile, Kammerer und Fürhacker, 2014). Diese Ansätze gehen jedoch meist davon aus, dass sich die Flüssigkeit in Ruhe befindet.

In Zweiphasenmodellen, bei denen die Partikelbewegung in das numerische Strömungsmodell integriert wird, werden die Partikel häufig mit der Lagrangeschen Betrachtungsweise behandelt (Lagrangian particle tracking, z. B.: Yan et al. (2014)). Die Strömung des Fluids (kontinuierliche Phase) wird dabei zuerst berechnet und danach die Teilchen eingeführt. Voraussetzung für dieses Vorgehen ist, dass die Beladung mit Feststoffteilchen gering ist und deren Effekt auf die tragende Strömung vernachlässigt werden kann (Ferziger und Perić, 2008).

Zentraler Bestandteil zur Berechnung des Impulsaustausches zwischen Fluid und Partikel bei der Lagrangeschen Betrachtungsweise ist die folgende Formel zur Berechnung der Widerstandskraft des Fluids auf einen Partikel auf Basis der relativen Geschwindigkeit (Jasak, 2016b).

$$F = \frac{1}{2} c_w \rho A (\mathbf{u}_P - \mathbf{u}_F) |\mathbf{u}_P - \mathbf{u}_F| \quad (20)$$

$F$	.....	Kraft $[F] = \text{N}$
$c_w$	.....	Formbeiwert $[c_w] = 1$
$A$	.....	projizierte Fläche des Partikels $[A] = \text{m}^2$

In dieser Arbeit werden der Sedimentationsprozess und die Bewegung der abzusetzenden Partikel nicht in das numerische Modell integriert, sondern nur die Bewegung der Fluids Luft und Wasser numerisch berechnet. Die Sedimentationsleistung des Absetzbeckens soll daraus mit empirischen Methoden aus den errechneten Geschwindigkeiten abgeschätzt werden. Als Grundlage dafür wird ein Ansatz aus der Hydrologie genutzt. Dazu werden die Grenzgeschwindigkeiten  $v_{gr}$  von Shields (1936) betrachtet, bei denen ein abgelagertes Korn nicht mehr weitertransportiert oder resuspendiert wird (Giesecke und Heimerl, 2014). Mit dieser Methode kann nur die horizontale Bewegung der Feststoffe an der Beckensohle

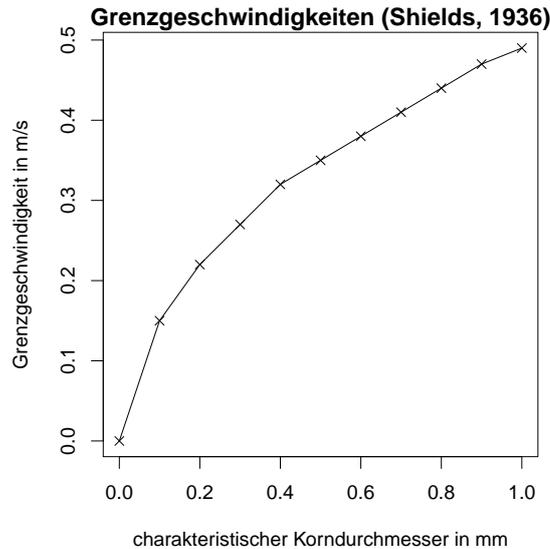


Abbildung 1: Mittlere Grenzgeschwindigkeiten nach Shields (1936) aus Giesecke und Heimerl (2014) bei einer Dichte der abzusetzenden Partikel von  $2650 \text{ kg m}^{-3}$

abgeschätzt werden. Dieser Ansatz impliziert also die Betrachtung der Feststoffe als Geschiebe. Der Schwebstofftransport, insbesondere die Vertikalbewegung von suspendierten Teilchen kann auf diese Weise nicht beschrieben werden. Hierzu wäre die oben beschriebene Stokessche Gleichung anzuwenden (Measho Haile, Kammerer und Fürhacker, 2014). Da der Ansatz mit den Grenzgeschwindigkeiten von Shields (1936), wie von Giesecke und Heimerl (2014) beschrieben wird, auch als Grundlage für die Dimensionierung von Sandfängen bei Wasserkraftanlagen dient, wird angenommen, dass er auch für den Ziele in dieser Masterarbeit geeignet ist. Vor allem die Abschätzung der Resuspension von Partikeln, welche sich bei vorangegangenen Niederschlagsereignissen abgesetzt haben, kann über die Grenzgeschwindigkeiten begründet werden. Darauf liegt, wie in der Einleitung beschrieben, das Hauptaugenmerk bei der Auswertung der Simulationsergebnisse.

Die Grenzgeschwindigkeit ist vom charakteristischen Korndurchmesser und der Dichte der abzusetzenden Partikel abhängig (Giesecke und Heimerl, 2014). Für die Dichte der abzusetzenden Partikel wird die Dichte von Quarz mit dem Wert  $2650 \text{ kg m}^{-3}$  angenommen. Die mittleren Grenzgeschwindigkeiten für solche Partikel nach Shields (1936) sind für Korndurchmesser bis 1 mm in Abbildung 1 angegeben (Giesecke und Heimerl, 2014).

Auf Basis der in Abbildung 1 dargestellten Grenzgeschwindigkeiten und der mit den numerischen Simulationen ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten wird ab-

geschätzt, in welchem Ausmaß Partikel mit verschiedenen charakteristischen Durchmessern im Absetzbecken remobilisiert werden. Um sicherzugehen, dass eine bestimmte Fraktion an Partikeln nicht aus dem Absetzbecken ausgeschwemmt wird, sollte die kritische Geschwindigkeit für diese Fraktion in allen Bereichen des Absetzbeckens und zu jedem Zeitpunkt unterschritten werden (Giesecke und Heimerl, 2014). Aufgrund der unten beschriebenen weiten Streuung der Dichte der mit dem Oberflächenabfluss von Straßen transportierten Partikel handelt es sich bei dieser Auswertemethode jedoch nur um eine grobe Abschätzung.

Zur Quantifizierung der Sedimentationsleistung geben Measho Haile, Kammerer und Fürhacker (2014) folgende Formel an:

$$\eta_{Sed} = \left(1 - \frac{C_{AB}}{C_{ZU}}\right) \quad (21)$$

$\eta_{Sed}$  ..... Sedimentationsleistung [ $\eta_{Sed}$ ] = 1  
 $C$  ..... Konzentration [ $C$ ] =  $\text{mg l}^{-1}$

### 2.5.2 Dichte und Korngröße der abzusetzenden Partikel

Wie in der Literaturstudie von Semadeni-Davies (2009) zusammengefasst ist, haben Untersuchungen von Straßenwasser gezeigt, dass die Dichte der im Abfluss transportierten Partikel über einen weiten Bereich von minimal  $1000 \text{ kg m}^{-3}$  bis zu  $3000 \text{ kg m}^{-3}$  streut. Diese starken Unterschiede der Dichten der Partikel können dadurch erklärt werden, dass die Partikel aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Materialien bestehen und sowohl organischen als auch mineralischen Ursprungs sind (Semadeni-Davies, 2009).

Auch bezüglich der Korngrößen unterscheiden sich die Partikel in Straßenwasser stark. Die von Semadeni-Davies (2009) zusammengefassten Untersuchungen haben gezeigt, dass die meisten der mit dem Abfluss von versiegelten Flächen transportierten Partikel einen Korndurchmesser von unter 1 mm aufweisen. Ungefähr 90 % der Partikel unterschreiten den Durchmesser von 100  $\mu\text{m}$  und immerhin 50 % unterschreiten den Durchmesser von 15  $\mu\text{m}$  (Semadeni-Davies, 2009). Dies deckt sich auch mit Untersuchungen von Measho Haile, Kammerer und Fürhacker (2014).

Am 05.05.2017 wurden im Rahmen der Bachelorarbeit von Gasser und Karbacher Sedimentproben von drei Stellen des in dieser Arbeit untersuchten Absetzbeckens Auhof-Wolfgraben entnommen. Die Probenahmestellen werden mit Sed1, Sed2 und Sed3 bezeichnet, ihre Lage kann Plan 2 in Anhang 1 entnommen werden.

Dichte und Kornverteilung des entnommenen Sediments wurden von Gasser und Karbacher (2017) untersucht. Die Proben Sed1 und Sed3, welche in der Nähe des linken und des rechten Randes des Absetzbeckens kurz vor dem Damm zum anschließenden Filterbecken entnommen wurden, weisen weniger Grobanteile auf (14% > 0,2 mm). Die Dichte einer Mischprobe des an diesen beiden Stellen entnommenen Sediments beträgt  $2410 \text{ kg m}^{-3}$ . Die Sedimentprobe aus der Mitte des Absetzbeckens (Sed2) weist größere Kornfraktionen auf (66% > 0,2 mm) und hat eine Dichte von  $2550 \text{ kg m}^{-3}$  (Gasser und Karbacher, 2017). Zu diesen Zahlen ist noch anzumerken, dass sie nur bedingt mit Korngrößen und die Dichte der Feststoffe im Zulauf von Absetzanlage vergleichbar sind, da es sich bei diesen Proben um bereits aus dem Gesamtzulauf abgesetzte Feststoffe handelt.

## 2.6 Erstellung der Zuflussganglinie zum Absetzbecken Auhof-Wolfsgraben

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die Strömungen im Absetzbecken (Grobstofffang) der Gewässerschutzanlage Auhof-Wolfsgraben numerisch modelliert. Es sind keine Messungen von tatsächlichen Zuflussganglinien in dieses Absetzbecken verfügbar. Um die Zuflussmenge in das Absetzbecken abschätzen zu können, wird wie in der Masterarbeit von Lins (2013) ein einfaches Niederschlags-Abfluss-Modell erstellt. In diesem wird der Zufluss in das Becken mittels einer Einheitsganglinie aus bekannten Niederschlagsdaten berechnet. Zur Ermittlung einer passenden Einheitsganglinie wird die folgende von O'Connell, Nash und Farrell (1970) angegebene Formel verwendet:

$$u(t) = \frac{1}{K \cdot (N - 1)!} e^{-\frac{t}{K}} \left( \frac{t}{K} \right)^{N-1} \quad (22)$$

$u(t)$  ..... Einheitsganglinie [ $u(t)$ ] =  $\text{mm}^{-1}$   
 $K$  ..... Speicherkonstante [ $K$ ] = min  
 $N$  ..... Anzahl Speicher [ $N$ ] = 1

Formel 22 gibt den zeitlichen Verlauf des Abflusses am Ende des Einzugsgebiets an, welcher aus einem Millimeter Effektivniederschlag resultiert. Die Formel ergibt sich aus der Annahme, dass das Wasser  $N$  lineare Speicher mit einer Speicherkonstanten von jeweils  $K$  durchfließt (Wittenberg, 2011). Für das Speichermodell zur Ermittlung der Einheitsganglinie des Einzugsgebiets des in dieser Arbeit untersuchten Absetzbeckens wird  $N = 3$  von Lins (2013) übernommen. Die Speicherkonstante wird mit  $K = 1,7 \text{ min}$  festgelegt. Damit kann die bei der Bemessung der

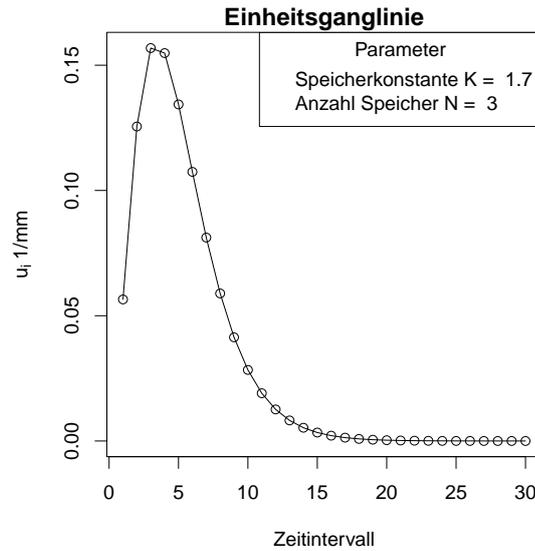


Abbildung 2: Einheitsganglinie zur Ermittlung der Zuflussganglinie in das Absetzbecken

Anlage (Retter & Partner Ziviltechniker Ges.m.b.H., 2006) angenommene Konzentrationszeit von 15 min erzielt werden. Für die Dauer der Zeitintervalle wird  $\Delta t = 1$  min festgelegt. Die mit diesen Parametern berechnete Einheitsganglinie ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Abfluss am Einzugsgebietsauslass zu einem Niederschlagsereignis wird immer bis zu einem Zeitpunkt 30 min nach dem letzten Zeitintervall, in dem Niederschlag gefallen ist, berechnet. Dies entspricht dem Doppelten der Konzentrationszeit und somit kann davon ausgegangen werden, dass der gesamte gefallene Effektivniederschlag auch als Zufluss im Modell des Absetzbeckens ankommt. Zur Abschätzung des Effektivniederschlags selbst wird die reduzierte Einzugsgebietsfläche von  $A_{red} = 49\,801,75 \text{ m}^2$  aus den Planungsunterlagen (Retter & Partner Ziviltechniker Ges.m.b.H., 2006) übernommen.

Der Abfluss zu einer Niederschlagsganglinie (in Form von Niederschlagsintervallen) kann schließlich durch Superposition der Abflussganglinien der einzelnen Niederschlagsintervalle mit folgender Formel berechnet werden (Wittenberg, 2011):

$$Q_i = \sum_{l=1}^i (u_{i-k+1} \cdot U_i) \tag{23}$$

- $i$  ..... Index für das Zeitintervall  $t = i \cdot \Delta t$
- $l$  ..... Index für das Niederschlagsintervall
- $Q_i$  ..... Abfluss im Intervall  $i$  [ $Q$ ] =  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$

$U_i$  ..... Niederschlagshöhe im Zeitintervall  $i$  [ $U_i$ ] = mm

## 2.7 Erstellung der Abflussganglinie aus dem Absetzbecken

### 2.7.1 Ablauf durch das Drosselrohr

Der Abfluss aus dem Absetzbecken der Gewässerschutzanlage Auhof-Wolfsgraben wird von einem Drosselrohr mit dem Durchmesser von 10 cm und einem Überlaufwehr gesteuert (Lins, 2013). Weder das Drosselrohr noch das Wehr werden im numerischen Modell des Absetzbeckens direkt modelliert. Der Ablauf aus dem Absetzbecken wird wie der Zufluss in Form einer Ganglinie berücksichtigt, die als Volumenstrom am Ablauf des Modells des Absetzbeckens als Randbedingung angesetzt wird. Bis zu einem Wasserstand von 1,2 m im Absetzbecken wird als Ablaufrandbedingung der Volumenstrom durch das Drosselrohr angesetzt. Steigt der Wasserspiegel auf ein Niveau über 1,2 m, wird zusätzlich der Ablauf über das Überlaufwehr berücksichtigt, welcher mit der Formel von Poleni berechnet wird (siehe Abschnitt 2.7.2). Die gesamte Ablaufsituation kann dem Schnitt durch das Verteilbauwerk in Plan 3 in Anhang 1 entnommen werden.

Um die Abflussganglinie durch das Drosselrohr zu ermitteln, wird wiederum in Anlehnung an das Vorgehen von Lins (2013) die Bernoulligleichung (Idelchik, 2008) angewandt:

$$H = \frac{p_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} + z_0 = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z + h_v \quad (24)$$

$H$  ..... Gesamtenergiehöhe [ $H$ ] = m  
 $p$  ..... Druck [ $p$ ] = Pa  
 $g$  ..... Erdbeschleunigung [ $g$ ] =  $\text{m s}^{-2}$   
 $v$  ..... Geschwindigkeit im Querschnitt [ $v$ ] =  $\text{m s}^{-1}$   
 $z$  ..... geodätische Energiehöhe [ $Q$ ] = m  
 $h_v$  ..... Energieverlusthöhe [ $h_v$ ] = m

Die Strömungsgrößen mit dem Index 0 stehen dabei für einen Punkt des Stromfadens im Absetzbecken. Die Höher des Wasserspiegels im Absetzbecken über dem Referenzniveau beträgt  $\frac{p_0}{\rho g} + z_0$ .

Vereinfachend wird angenommen, dass die Geschwindigkeit  $v_0$  im Absetzbecken  $0 \text{ m s}^{-1}$  beträgt. Als Referenzhöhe für die Energiehöhe wird die Höhe der Achse

des Drosselrohres festgelegt. Dass der Auslauf des Drosselrohres um 10 cm tiefer liegt als der Einlauf, wird vernachlässigt, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Abfluss im Rohr über die gesamte Länge unter Vollfüllung erfolgt und sich der Sog dadurch wirklich ausbildet. Da ein Einstau im Filterbecken nur bei Überströmung des Überlaufwehres des Absetzbeckens zu erwarten ist (Lins, 2013), kann davon ausgegangen werden, dass das Drosselrohr nicht eingestaut ist und gegen die freie Atmosphäre mündet. Für den Druck an der Mündung des Drosselrohres wird also – wie für den Druck an der Wasserspiegeloberfläche – der Atmosphärendruck als Relativdruck von 0 Pa eingesetzt. Im Falle einer Überströmung des Wehres und eines Rückstaus vom Filterbecken in das Drosselrohr läuft ein Großteil des Wassers aus dem Absetzbecken über das Wehr ab (siehe Abschnitt 2.7.2), und somit ist der Ablauf durch das Drosselrohr vernachlässigbar, auch wenn er in diesem Fall aufgrund der Vernachlässigung des Rückstaus etwas überhöht einfließt. Damit reduziert sich Gleichung 24 zu folgendem Ausdruck:

$$H = \frac{v^2}{2g} + h_v \quad (25)$$

Werden die kontinuierlichen Reibungsverluste im Drosselrohr aufgrund der geringen Länge des Rohres vernachlässigt, bleiben nur noch die lokalen Eintrittsverluste als Energieverluste  $h_v$  bei der Strömung des Wassers aus dem Absetzbecken übrig. Diese können mit der folgenden Formel aus Idelchik (2008) berechnet werden. Für den in dieser Formel vorkommenden Verlustbeiwert  $\zeta$  für den Eintrittsverlust gibt Idelchik (2008) den Wert  $\zeta = 0,5$  an.

$$h_v = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (26)$$

$\zeta$  ..... lokaler Verlustbeiwert [ $\zeta$ ] = 1

Mit den Gleichungen 25 und 26 kann schließlich die Geschwindigkeit im Drosselrohr und damit auch der Durchfluss in Abhängigkeit der Wasserspiegellhöhe  $z_0$  über der Rohrachse folgendermaßen berechnet werden:

$$z_0 = \frac{v^2}{2g} + \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{v^2}{2g} (1 + \zeta)$$

$$\Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta}} \sqrt{2gz_0} \quad (27)$$

$$\Rightarrow Q = v \cdot \frac{d^2\pi}{4} = \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta}} \sqrt{2gz_0} \quad (28)$$

$Q$  ..... Durchfluss [ $Q$ ] = m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>  
 $d$  ..... Durchmesser des Drosselrohres [ $d$ ] = m

Das Wasservolumen, welches sich im Absetzbecken befindet, und damit auch die Wasserspiegelhöhe  $z_0$  über der Rohrachse ist jedoch keineswegs konstant, sondern ändert sich mit der Zeit  $t$ . Die Änderung des im Absetzbecken befindlichen Wasservolumens kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{ZU} - Q_{AB} = Q_{ZU} - \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta}} \sqrt{2gz_0(t)} \quad (29)$$

$V$  ..... Volumen [ $V$ ] = m<sup>3</sup>

Um das tatsächlich im Becken befindliche Wasservolumen zu berechnen, wird die Gleichung über die Zeit integriert:

$$V(t) = \int Q_{ZU} dt - \int Q_{AB} dt + V_0$$

$$= \int Q_{ZU} dt - \int \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta}} \sqrt{2gz_0(t)} dt + V_0 \quad (30)$$

Die Integrationskonstante  $V_0$  entspricht dabei dem Wasservolumen im Absetzbecken zum Zeitpunkt  $t = 0$ .

Um das Volumen im Absetzbecken mithilfe von Formel 30 zu berechnen, wird die Formel diskretisiert. Für den Wasserstand  $z_0(t)$  wird dazu immer der Mittelwert

des Wasserstands zu Beginn des vorigen Intervalls und zu Beginn des aktuellen Intervalls herangezogen.

$$V_i = Q_{ZU,i-1} \cdot \Delta t - \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{2g \frac{z_{0,i-1} + z_{0,i}}{2}} \cdot \Delta t + V_{i-1} \quad (31)$$

Zur Berechnung der Wasserstandshöhe im Absetzbecken wird die Form des Absetzbeckens als Prisma angenommen. Die Fläche der Grundfläche des Prismas wird mit dem Mittelwert der Sohlfläche des Absetzbeckens und der Fläche der Wasserspiegeloberfläche beim jeweiligen Wasserstand abgeschätzt. Für die Fläche der Wasserspiegeloberfläche bei einer beliebigen Füllhöhe  $h$  wird zwischen der bekannten Sohlfläche  $A_S = 869,0 \text{ m}^2$  (siehe Abschnitt 3.1, Tabelle 3) und der Fläche der Wasserspiegeloberfläche  $A_{max} = 1213,3 \text{ m}^2$  bei einem Wasserstand von  $h_{max} = 1,2 \text{ m}$  linear interpoliert (Flächen ohne Zulaufstruktur zum Drosselbauwerk). Auf diese Art kann das Füllvolumen des Absetzbeckens in Abhängigkeit des Wasserstandes  $V(h)$  berechnet werden (Formel 32). Durch Auflösen der quadratischen Gleichung nach  $h$  ergibt sich für  $h$  der Ausdruck in Formel 33, welcher in Formel 31 für  $h_i$  eingesetzt werden kann.

$$V_i(h_i) = \frac{A_S + A_S + \frac{A_{max} - A_S}{h_{max}} h_i}{2} \cdot h \quad (32)$$

$$\Leftrightarrow h_i = \frac{\pm \sqrt{h_{max}} \cdot \sqrt{2 \cdot (A_{max} - A_S) \cdot V_i + A_S^2 \cdot h_{max}} - A_S \cdot h_{max}}{A_{max} - A_S} \quad (33)$$

$$\Rightarrow z_{0,i} = h_i - h_0 - \frac{d}{2} \quad (34)$$

$h_{max}$  ..... Höhe der Wehrkrone über der Beckensohle [ $h_{max}$ ] = m  
 $h_0$  ..... Höhe der Rohrunterkante über der Beckensohle [ $h_0$ ] = m

Die in Formel 34 eingeführte Höhe  $h_0$  beschreibt die Höhe der Rohrunterkante über der Beckensohle und somit gleichzeitig auch die Dauerstauhöhe. Der Abfluss unter Teilfüllung für den Fall, dass das Drosselrohr weniger als bis zur Hälfte gefüllt ist ( $h_i - h_0 \leq \frac{d}{2}$ ) wird vernachlässigt. Im Gegenzug wird für die Berechnung des Abflusses unter Teilfüllung mit einem Füllungsgrad  $> 0,5$  bereits die volle Rohrquerschnittsfläche als Fließquerschnittsfläche angesetzt.

In der dadurch entstehenden Gleichung kommt  $V_i$  zweimal vor. Um  $V_i$  zu berech-

nen, wird Gleichung 31 für jeden Zeitschritt  $i$  rekursiv iterativ gelöst:

$$V_{i_k} = Q_{ZU_{i-1}} \cdot \Delta t - \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{2g \frac{z_{0,i-1} + z_0(V_{i_{k-1}})}{2}} \cdot \Delta t + V_{0i} \quad (35)$$

$k$  ..... Index für Iterationsschritt

Als Startwert  $V_{i_0}$  wird dabei jeweils das Füllvolumen des vorigen Zeitschritts  $V_{i-1}$  eingesetzt. Die Iteration wird durchgeführt, bis die Differenz  $|V_{i_{k-1}} - V_{i_{k-1}}|$  den Wert  $\epsilon = 1 \times 10^{-6}$  unterschreitet.

### 2.7.2 Ablauf über das Überlaufwehr

Wie das Drosselrohr wird die Strömung über das Überfallwehr nicht mehr in das numerische Modell miteinbezogen. Um den Abfluss über das Überfallwehr bei der Randbedingung am Beckenablauf berücksichtigen zu können, wird dieser mithilfe von empirischen Methoden berechnet. Hierzu dient die Formel von Poleni (Aigner und Bollrich, 2015). Für den Überfallbeiwert  $\mu$  wird aus Aigner und Bollrich (2015) der Wert  $\mu = 0,65$  entnommen („scharfkantig, abgelöst“). Die Wehrkronenbreite beträgt laut den Plänen  $b = 3$  m.

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot h_U^{\frac{3}{2}} \cdot b \quad (36)$$

$\mu$  ..... Überfallbeiwert  $[\mu] = 1$   
 $h_U$  ..... Überfallhöhe  $[h_U] = \text{m}$   
 $b$  ..... Wehrkronenbreite  $[b] = \text{m}$

Steigt der Wasserspiegel im Absetzbecken über  $h_{max} = 1,20$  m an (Höhe der Wehrkronen über der Beckensohle), wird in Gleichung 29 zusätzlich der Abfluss über das Wehr aus Gleichung 36 berücksichtigt. Die entstehende Gleichung wird – wie schon bei der Berechnung des Abflusses durch das Drosselrohr alleine – über die Zeit integriert, um das im Becken gespeicherte Wasservolumen zu erhalten.

$$\frac{dV}{dt} = Q_{ZU} - \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{\frac{1}{1+\zeta}} \sqrt{2gz_0(t)} - \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot h_U^{\frac{3}{2}} \cdot b \quad (37)$$

$$V(t) = \int Q_{ZU} dt - \int \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{\frac{1}{1+\zeta}} \sqrt{2gz_0(t)} dt - \int \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot h_U(t)^{\frac{3}{2}} \cdot b dt + V_0 \quad (38)$$

Zur Lösung von Gleichung 38 wird wie oben vorgegangen. Die Gleichung wird diskretisiert und als Überfallhöhe während eines Zeitintervalls der Mittelwert der Überfallhöhen zum Intervallbeginn und zum Intervallende angenommen.

$$V_i = Q_{ZU,i-1} \cdot \Delta t - \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{2g \frac{z_{0,i-1} + z_{0,i}}{2}} \cdot \Delta t - \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot \left( \frac{h_{U,i-1} + h_{U,i}}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot b \cdot \Delta t + V_{i-1} \quad (39)$$

$$V_{i_k} = Q_{ZU,i-1} \cdot \Delta t - \frac{d^2\pi}{4} \sqrt{2g \frac{z_{0,i-1} + z_0(V_{i_{k-1}})}{2}} \cdot \Delta t - \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot \left( \frac{h_{U,i-1} + h_U(V_{i_{k-1}})}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot b \cdot \Delta t + V_{i-1} \quad (40)$$

## 2.8 Simulationen

Insgesamt werden im Zuge dieser Masterarbeit vier Simulationen mit den oben beschriebenen Methoden durchgeführt. In drei Simulationen wird die Strömung im Absetzbecken beim Bemessungsniederschlagsereignis  $r_{15,n=5}$  simuliert, wobei angenommen wird, dass das Becken mit den Dauerwasserständen 15 cm, 30 cm und 45 cm betrieben wird. Der Dauerwasserstand von 45 cm entspricht dabei der ursprünglich für das Becken geplanten Betriebsweise (Lins, 2013). Auf Basis der Ergebnisse dieser Simulationen kann unter anderem untersucht werden, inwiefern sich die unterschiedlichen Dauerwasserstände auf die Strömung im Absetzbecken auswirken.

Zusätzlich zu den drei Simulationen des Bemessungsereignisses wird auch noch das Niederschlagsereignis vom 10.06.2012 simuliert. Für die Simulation dieses Ereignisses wird das Absetzbecken ohne Dauerstau modelliert, da es so entgegen

den ursprünglichen Planungen gebaut wurde und betrieben wird (Lins, 2013). Lins (2013) hat während dieses Ereignisses die Vorgänge in der untersuchten Gewässerschutzanlage gezielt beobachtet und auch Wasserproben entnommen und analysiert. Durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Dokumentationen zu dem Niederschlagsereignis kann das numerische Modell auf Plausibilität überprüft werden. Zusätzlich können die Ergebnisse dieser Simulation eine Hilfe zur Interpretation der Analyseergebnisse der Wasserproben von Lins (2013) darstellen.

Bei den Simulationen in dieser Masterarbeit geht es hauptsächlich darum, die Strömungen im Absetzbecken während des ersten Spülstoßes zu untersuchen. In der RVS 04.04.11 ist der erste Spülstoß als der zu Beginn eines Niederschlagsereignisses auftretende schwallartige Wasseranfall beschrieben, der abgelagerte Stoffe abschwemmt und eine erhöhte Konzentration an Wasserinhaltsstoffen aufweist (FSV, 2010). In dieser Masterarbeit werden konkret die Geschwindigkeiten im Absetzbecken während kurzen intensiven Niederschlagsereignissen bis zu jenem Zeitpunkt betrachtet, ab dem kein zusätzlicher Niederschlag mehr fällt. Dies ist beim Bemessungsniederschlagsereignis  $r_{15,n=5}$  nach 15 min und beim Niederschlagsereignis vom 10.06.2012 nach 70 min der Fall (Abschnitt 3.7, Abbildung 5).



---

## 3 Modellaufbau

### 3.1 Geometrie und Rechengebiet

#### 3.1.1 Plangrundlage

Das Rechengebiet wird durch den Festkörpertrand sowie zur Atmosphäre hin und bei Zu- und Ablauf nach eigenen Festlegungen begrenzt. Im Inneren des Rechengebiets werden mit den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Methoden die Strömungsgrößen berechnet und an den Außenrändern die Randbedingungen definiert (Lecheler, 2014). Die Geometrie des Rechengebiets des numerischen Modells wird einem Lageplan entnommen, welcher im Zuge der Generalsanierung des Filterbeckens mit Grobstofffang vom Ingenieurbüro Retter & Partner Ziviltechniker Ges.m.b.H. erstellt wurde. Der Plan, in welchem der modellierte Bereich eingezeichnet ist, wurde in Anhang 1 aufgenommen. Zusätzlich wurden im Zuge einer Besichtigung am 05.05.2017 kritische Längen nachgemessen und die Geometrie des Modells mit dem realen Absetzbecken verglichen. Ein bei dieser Gelegenheit aufgenommenes Foto des Absetzbeckens ist in Abbildung 3 wiedergegeben. Um das Modell und die Auswertung der Ergebnisse möglichst übersichtlich zu gestalten, wird ein eigenes Koordinatensystem so definiert, dass der Ursprung des Koordinatensystems genau am untersten Punkt des Zulaufrohres liegt und die x-Achse horizontal in Richtung des Ablaufs verläuft. Ein maßstäblicher Plan des Rechengebiets mit den Achsen des Koordinatensystems und allen relevanten Punkten der Geometrie kann ebenfalls Anhang 1 entnommen werden.

Wie in den Plänen in Anhang 1 zu erkennen ist, weicht die Geometrie des Rechengebiets im Grundriss an manchen Stellen leicht von der Originalgeometrie ab. Diese kleinen Vereinfachungen wurden getroffen, um ein möglichst gutes Rechenetz erstellen zu können (siehe dazu Abschnitt 3.2). Da Kanten der Modellgeometrie maximal 0,50 m von den Kanten des realen Absetzbeckens abweichen, wird davon ausgegangen, dass dadurch die Ergebnisse nur wenig beeinflusst werden.

Zur weiteren Vereinfachung wird der Weg, der im Osten des Absetzbeckens in das Becken führt, im Modell nicht mitberücksichtigt. Da runde Strukturen mit einem strukturierten Netz aus Hexaedern nur schwer zu modellieren sind, wird das Zulaufrohr anstatt des kreisförmigen Querschnitts mit einem quadratischen Querschnitt mit der selben Querschnittsfläche modelliert.

Das Verteilbauwerk, durch das der Abfluss aus dem Absetzbecken stattfindet, wird auch nicht vollständig in die Modellgeometrie aufgenommen. Die Ablaufrandbedingung wird an der Bodenfläche der Zulaufstruktur zum Verteilbauwerk angesetzt (siehe dazu Detailplan in Anhang 1).



Abbildung 3: Foto des Absetzbeckens Auhof-Wolfsgraben; aufgenommen am 05.05.2017

Tabelle 3: Abmessungen des Absetzbeckens laut Plan und in der Geometrie des Rechengebiets (Werte ohne Zulaufstruktur zum Drosselbauwerk)

	Einheit	Geometrie laut Plan	Geometrie des Rechengebiets
Fläche Beckensohle	m <sup>2</sup>	862,8	869,0
Wasserspiegeloberfläche bei 1,2 m Wasserstand	m <sup>2</sup>	1207,7	1213,3
Füllvolumen bei 1,2 m Wasserstand	m <sup>3</sup>	1242,3	1249,4

Bei der Besichtigung der Anlage wurde weiter festgestellt, dass die Sohle des Absetzbeckens vom Zulauf zum Ablauf um 10 cm abfällt. Dies entspricht einem Gefälle von 3,7‰ und ist vor allem für den Fall relevant, in dem das Absetzbecken nicht eingestaut ist. Solche Situation können jedoch mit dem Modell nicht simuliert werden, da die Zellgröße in vertikaler Richtung hierfür zu hoch ist. Aus diesem Grund wird das Gefälle vom Zulauf zum Ablauf nicht in die Modellgeometrie aufgenommen und das Becken überall mit einer Tiefe von 1,2 m modelliert.

Durch die kleinen Abweichungen der Modellgeometrie von der realen Geometrie ergibt sich im Modell ein um 7,1 m<sup>3</sup> größeres Beckenvolumen als in der Realität. Da dieser Wert im Vergleich zum Gesamtvolumen des Beckens von über 1240 m<sup>3</sup> sehr gering ist, wird dieser Umstand im weiteren vernachlässigt (Volumen ohne Zulaufstruktur zum Drosselbauwerk). In Tabelle 3 sind die Beckendimensionen in der Realität und im Modell angegeben und können detailliert verglichen werden. Das Beckenvolumen wird mit dem Mittelwert der Sohlfläche und der Wasserspiegeloberfläche und dem Bemessungswasserstand von 1,2 m berechnet.

Die Gewässerschutzanlage wurde auf ein fünfjähriges Niederschlagsereignis bemessen. Bei einem solchen Ereignis würde der Wasserstand im Absetzbecken 1,2 m betragen (Retter & Partner Ziviltechniker Ges.m.b.H., 2006). Damit bei einem solchen Ereignis stets ein „Luftraum“ zwischen der Wasserspiegeloberfläche und dem Rand des Rechengebiets (Randbedingung zur Atmosphäre) bleibt, wird das Modell für die Simulationen zum Bemessungsniederschlagsereignis so erstellt, dass der niedrigste Punkt des oberen Modellrandes (Atmosphäre) 3,4 m über dem tiefsten Punkt der Beckensohle liegt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass mindestens sieben Zellen zwischen der Atmosphärenrandbedingung und der Wasserspiegeloberfläche liegen. Das gesamte Rechengebiet hat somit ein Volumen von insgesamt 3063,5 m<sup>3</sup>.

Für die Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 wird die Geome-

trie des Modells um 0,9 m niedriger erstellt, da bei diesem Ereignis der Wasserspiegel nicht so hoch ansteigt. Dadurch sind bei dieser Simulation in vertikaler Richtung neun Zellen weniger zu berechnen, wodurch insgesamt 223 791 Zellen gespart werden können und sich der Rechenaufwand dadurch deutlich verringert. Das Volumen dieses Modells beträgt  $1953,4 \text{ m}^3$ .

#### 3.1.2 Erstellung der Geometrie

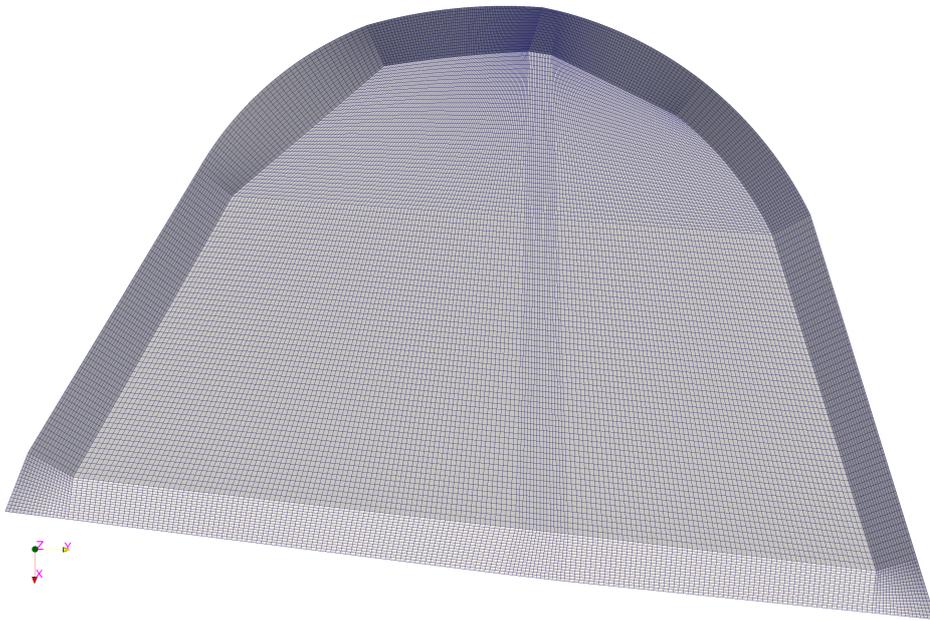
Das Rechengebiet und das Rechennetz werden mit dem Programm `blockMesh` erzeugt. Als Input für das Programm `blockMesh` dient die Datei `blockMeshDict`, in der alle nötigen Angaben zu Geometrie und Rechennetz festgelegt werden (siehe Anhang 2, Listings 1). Die Geometrie wird über insgesamt 82 Punkte definiert, zwischen denen 37 hexaederförmige Blöcke (jeweils zwei übereinander und einer zusätzlich am Ablauf) aufgespannt werden. Weitere Details zu Geometrie und Rechennetz sind in der Ausgabe des Programms `blockMesh` dokumentiert, die in Anhang 2, Listings 2 beigelegt ist. Die Punkte und Ränder der Blöcke im Grundriss sind in einem Plan in Anhang 1 dargestellt. Die fertige Geometrie des Modells kann in den Abbildungen 4 aus zwei Perspektiven betrachtet werden.

## 3.2 Räumliche Diskretisierung und Rechennetz

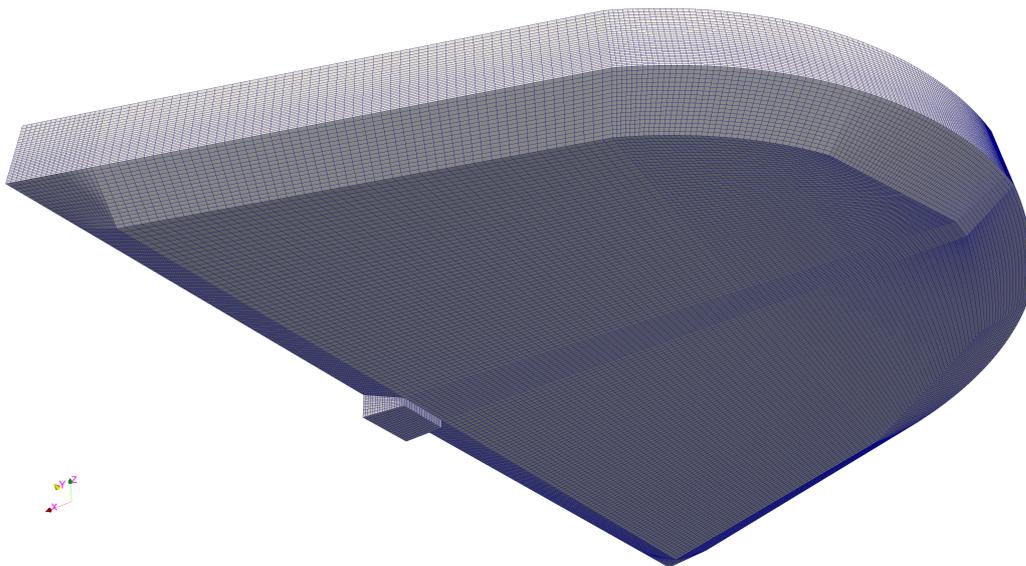
### 3.2.1 Allgemeine Festlegungen und räumliche Auflösung

Zur räumlichen Diskretisierung wird ein strukturiertes Rechennetz (einheitliche Topologie) aus Hexaedern verwendet. Strukturierte Gitter haben im Vergleich zu unstrukturierten Gittern den Vorteil, dass sie weniger Speicher benötigen und im Allgemeinen bei gleicher Auflösung der Rechenaufwand merklich geringer ist (Schwarze, 2013). Allerdings sind komplexe Geometrien mit strukturierten Gittern nur schwer zu diskretisieren. Mit den im nächsten Abschnitt beschriebenen kleinen Vereinfachungen ist es jedoch gelungen, die Geometrie des zu modellierenden Absetzbeckens mit einem strukturierten Gitter zu diskretisieren und eine akzeptable Netzgüte zu erzielen.

Das Rechengebiet für das Modell zur Simulation der Bemessungsniederschlagsereignisse wird von einem Quader mit den Abmessungen  $34,59 \text{ m} \times 52,77 \text{ m} \times 4,85 \text{ m}$  umschlossen. Die räumliche Auflösung des Modells wird so gewählt, dass die horizontalen Seiten der Zellen maximal 30 cm lang sind. In vertikaler Richtung beträgt die Zellgröße im Bereich von bis zu 60 cm über der Beckensohle 6 cm. Darüber steigt die Zellhöhe kontinuierlich auf bis zu 13,8 cm in der obersten Schicht an. Diese Festlegungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die detaillierten Zellgrößen



(a) Ansicht von oben



(b) Ansicht von schräg unten

Abbildung 4: Geometrie und Rechenetz für das Modell des Absetzbeckens Auhof-Wolfgraben zur Simulation der Strömungen während des Bemessungsniederschlagsereignisses

Tabelle 4: Festlegung zur räumlichen Auflösung des Modells für die Simulation der Bemessungsniederschlagsereignisse

Richtung	Länge in m	min. Zellgröße in m	max. Zellgröße in m	Anzahl Zellen
x	34,59	0,25	0,33	126
y	52,77	0,06	0,23	197
z	4,85	0,06	0,14	28
Summe				699 072

der einzelnen Blöcke sind in der Ausgabe des Programms blockMesh in Anhang 2, Listings 2 angegeben. In Summe besteht das Rechenetz aus 699 072 hexaederförmigen Zellen. Die Netzunabhängigkeit der Simulationsergebnisse wird im Zuge der Validierung und Plausibilitätskontrolle in Abschnitt 6.1 überprüft.

### 3.2.2 Gütekriterien und Optimierung des Rechnetzes

Die Qualität des Rechengitters ist von großer Bedeutung für die Genauigkeit der Ergebnisse der CFD-Simulation. Eine schlechte Qualität kann sogar zum Scheitern der Simulation führen (Schwarze, 2013). Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt die Qualität des erzeugten Rechengitters überprüft und analysiert. Weiters werden Maßnahmen zur Verbesserung der Netzqualität beschrieben.

Mithilfe des Programms checkMesh werden eine Reihe von Güteparametern des Netzes berechnet. Die Ausgabe von checkMesh ist in Anhang 2, Listing 3 angeschlossen und das Ergebnis in Tabelle 5 zusammengefasst. Im Folgenden werden die für das Modell in dieser Arbeit wichtigsten Ergebnisse kurz beschrieben.

**Maximale mesh non-orthogonality:** Die kritischsten Bereiche für die Diskretisierung sind die abgerundeten Kanten links und rechts des Zulaufs. Um diese Bereiche mittels eines strukturierten Netzes aus Hexaedern zu diskretisieren ist es unumgänglich, eine Ecke des Hexaeders entlang des Kreisbogens anzuordnen. Die Zellen im Bereich dieser Ecke werden im Grundriss sehr lang gezogen, was zu einer hohen non-orthogonality von über  $87^\circ$  führen würde. Das heißt, dass die Verbindungslinie zwischen den Zentren zweier benachbarter Zellen in einem Winkel von  $87^\circ$  auf die Flächennormale der Begrenzungsfläche zwischen diesen beiden Zellen steht (OpenFOAMwiki, 2015). Es ist in Vorversuchen zwar gelungen, auch mit einem solchen Rechenetz eine konvergente Lösung zu erzielen, trotzdem wird

Tabelle 5: Gütekriterien und Informationen zum Rechnetz

Parameter	Wert
max cell openness	$3,1 \times 10^{-16}$
max aspect ratio	5,3
min face area	0,0026 m <sup>2</sup>
max face area	0,0924 m <sup>2</sup>
min volume	0,0004 m <sup>3</sup>
max volume	0,0128 m <sup>3</sup>
total volume	3063,5 m <sup>3</sup>
max mesh non-orthogonality	76,4°
max skewness	1,08

zur Erhöhung der numerischen Stabilität die Geometrie an zwei Stellen leicht abgeändert. Dazu werden die Kanten zwischen den Punkten 24 und 0 sowie 6 und 27 (inklusive der vertikal darüber liegenden Kanten<sup>2</sup>) nur über die halbe Länge ausgerundet. Die Abschnitte zwischen den Punkten 7 und 27 sowie 3 und 0 werden gerade gezeichnet. Somit entsteht an den Punkten 3 und 7 eine Ecke im Grundriss. Auf diese Weise kann die non-orthogonality auf einen Wert von etwas über 76° reduziert werden. Ein Netz mit einer solchen non-orthogonality verursacht bei Verwendung von geeigneten Diskretisierungsschemen (siehe Abschnitt 3.3) bei der Berechnung keine Probleme (Greenshields, 2016; Jasak, 2016a).

**Maximale skewness:** Skewness gibt das Verhältnis zwischen dem Abstand der Verbindungslinie der Zentren zweier benachbarter Zellen vom Flächenmittelpunkt der Begrenzungsfläche zwischen diesen Zellen und der Länge dieser Linie an (OpenFOAMwiki, 2015). Zellen mit einer hohen skewness entstehen vor allem an der Böschungsunterkante der geböschten Wände ins Absetzbecken. Um die skewness möglichst gering zu halten, werden deshalb die Böschungsbereiche mit eigenen Blöcken, welche rund um den Mittelteil des Absetzbeckens angeordnet werden, gebildet. Die so erreichte maximale skewness von 1,08 stellt laut einigen Beiträgen im Forum von CFD Online (CFD Online, 2017) kein Problem dar.

**Maximales Längenverhältnis der Hexaederkanten und maximales Flächenverhältnis benachbarter Zellflächen:** Grundsätzlich wird das Rechnetz so

<sup>2</sup>Die vertikal über den Kanten 24 und 0 sowie 6 und 27 liegenden Kanten bilden eine Grenze zwischen zwei Blöcken innerhalb des Strömungsgebiets. Aus diesem Grund hat es hier keine Auswirkungen auf die Geometrie, dass diese Kanten gerade statt rund modelliert werden.

erstellt, dass die Zelldichte im gesamten Rechengebiet ungefähr gleich ist. Aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der Geometrie sind exakt gleiche Zellgrößen im gesamten Rechengebiet jedoch nicht realisierbar. Tritthart (2015) gibt als maximal noch akzeptable Werte für das Flächenverhältnis benachbarter Zellen 2 und für das Längenverhältnis der Kanten einer Zelle 10 an. Ergeben sich an der Grenze zwischen zwei Blöcken stark unterschiedliche Zellgrößen, werden entlang von manchen Blockkanten die Zellen nicht in gleichmäßigen Abständen angeordnet, sondern mit linear wachsenden oder sinkenden Abständen. Auf die gleiche Weise werden auch die Längenverhältnisse der Hexaederkanten versucht möglichst nicht zu groß werden zu lassen. Dies geschieht durch die Funktionen `simpleGrading` und `edgeGrading` in der Datei `blockMeshDict` (siehe Listing 1 in Anhang 2). Durch dieses Vorgehen ist es gelungen, ein maximales Längenverhältnis von Kanten einer Zelle von 5,3 zu erreichen, womit der Grenzwert von 10 unterschritten wird. Dabei ist anzumerken, dass sich ein Längenverhältnis von 1:5 schon alleine durch die feinere räumliche Diskretisierung in vertikaler als in horizontaler Richtung ergibt (siehe oben, Tabelle 4).

#### 3.2.3 Erstellung des Rechnetzes

Das Rechenetz wird gemeinsam mit der Geometrie mithilfe des Programms `blockMesh` erzeugt. Die oben getroffenen Festlegungen werden dem Programm in der Inputdatei `blockMeshDict` übergeben. Die Zellanzahlen aus Tabelle 4 werden in x-Richtung auf vier, in y-Richtung auf fünf und in z-Richtung auf zwei Blöcke aufgeteilt. Ein Bild des fertig erstellten Rechnetzes ist in Abbildung 4 dargestellt.

### 3.3 Diskretisierungsschemen

#### 3.3.1 Grundlagen zu den Diskretisierungsschemen

In OpenFOAM steht eine große Anzahl an unterschiedlichen Diskretisierungsschemen zur Verfügung, allerdings werden davon nur einige für die Modelle von realen Problemstellungen empfohlen (Greenshields, 2016). Um für das zu erstellende Modell die geeignetsten Schemen anzuwenden, wird neben den Informationen aus der OpenFOAM-Dokumentation vor allem auf Empfehlungen von Jasak (2016a) sowie auf Forenbeiträge der Internetseite CFD Online zurückgegriffen. Festgelegt werden die numerischen Schemen für die Diskretisierung der einzelnen Terme in der Inputdatei `fvSchemes`, welche in Anhang 2, Listing 4 angeschlossen ist.

### 3.3.2 Zeitdiskretisierung

Für die Diskretisierung der ersten Ableitungen nach der Zeit  $\frac{\partial}{\partial t}$  wird das Euler-Schema verwendet. Dabei handelt es sich um ein implizites Schema erster Ordnung für instationäre Strömungen (Greenshields, 2016).

### 3.3.3 Diskretisierung von Gradienten

Für die Diskretisierung von Gradienten  $\nabla \dots$  wird die Finite-Volumen-Diskretisierung der Gauß-Integration als Standard gewählt. Dazu ist es nötig, Werte auf den Mittelpunkten der Begrenzungsflächen zwischen den Zellen von jenen der Zellzentren zu interpolieren (Greenshields, 2016). Diese Werte werden linear interpoliert.

Aufgrund der nicht idealen Qualität des Rechnetzes (siehe Abschnitt 3.2) wird für den Gradienten der Geschwindigkeit  $\nabla \mathbf{u}$ , wie in Greenshields (2016) empfohlen, ein eigenes Integrationsschema angewandt. Der Geschwindigkeitsgradient wird so limitiert, dass der Wert an den Zellflächen, welcher sich durch Extrapolation mit dem berechneten Gradienten ergeben würde, nicht außerhalb des Bereichs der Werte der umgebenden Zellen fällt (Greenshields, 2016; Jasak, 2016a).

### 3.3.4 Diskretisierung der Divergenz

Für die Diskretisierung der Divergenz  $\nabla \cdot \dots$  werden die Interpolationsschemen für die einzelnen Erhaltungsgrößen getrennt festgelegt, da sich die Terme, in denen Divergenzen berechnet werden, grundlegend unterscheiden (Greenshields, 2016). Für alle Terme wird jedoch dasselbe Schema zur Finiten-Volumen-Diskretisierung der Gauß-Integration angewandt.

- Der Impulsstrom  $\nabla \cdot \rho \phi \mathbf{u}$  bzw.  $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u})$  wird mittels eines limitierten Interpolationsschemas diskretisiert. Es wird ein spezielles Schema für vektorielle Größen angewandt, bei dem nur ein Limiter berechnet wird, der auf alle Vektorkomponenten angewandt wird. Dieser Limiter wird auf Basis jener Vektorkomponente berechnet, welche sich am stärksten ändert. Das führt dazu, dass das Schema weniger genau ist (Greenshields, 2016). Laut einem Beitrag in CFD Online Forum (2011) kann mit diesem Schema jedoch trotzdem hinreichende Genauigkeit erzielt werden.
- Zur Interpolation bei der Diskretisierung des Terms  $\nabla \phi \alpha$  bzw.  $\nabla \cdot (\mathbf{u} \alpha)$  wird das limitierte Schema von van Leer angewandt, welches zu einer geringeren Limitierung als `limitedLinear` führt (Greenshields, 2016).

- Der Term  $\nabla\phi_{rb}\alpha$  bzw.  $\nabla \cdot (\mathbf{u}_{rb}\alpha)$  wird mit einem Zentrale-Differenzen-Algorithmus zur Diskretisierung interpoliert (Greenshields, 2016).
- Die Divergenz der Turbulenzgrößen  $\nabla\phi k$  und  $\nabla\phi\omega$  wird mit einem begrenzten Schema erster Ordnung diskretisiert (Greenshields, 2016).

#### 3.3.5 Diskretisierung von Laplace-Termen

Für die Diskretisierung von Laplace-Termen  $\nabla \cdot (F\nabla \dots)$  steht nur das Gauß-Schema zur Verfügung (Greenshields, 2016). Dieses wird gemeinsam mit der linearen Interpolationsmethode zweiter Ordnung, welche auch bei den oben beschriebenen Einträgen oft zur Anwendung kommt, verwendet. Aufgrund der hohen non-orthogonality des Rechennetzes von  $76^\circ$  (siehe Abschnitt 3.2) wird, wie von Jasak (2016a) und Greenshields (2016) empfohlen, ein limitiertes Schema für die Interpolation des flächennormalen Gradienten angewandt.

#### 3.3.6 Diskretisierung der flächennormalen Gradienten

Die Diskretisierung der flächennormalen Gradienten werden für die Auswertung von Laplace-Termen mit Gauß-Integration benötigt (Greenshields, 2016). Da bei dem verwendeten Rechennetz die Verbindungslinien von benachbarten Zellzentren nicht immer exakt normal auf die dazwischenliegende Begrenzungsfläche zwischen den beiden Zellen liegt (siehe auch Abschnitt 3.2 mesh non-orthogonality), muss eine Korrektur zur orthogonalen Komponente addiert werden (Greenshields, 2016).

#### 3.3.7 Interpolationsschemen

Als Standardeinstellung für das Interpolationsschema von Werten in Zellzentren zu Werten in den Flächenzentren wird das lineare Interpolationsschema verwendet, das auch in fast allen Tutorien, welche mit OpenFOAM mitgeliefert werden, verwendet wird (Greenshields, 2016).

### 3.4 Einstellungen zum Lösungsalgorithmus

Die Einstellungen zum Lösungsalgorithmus wie Gleichungslöser, Toleranzen und Algorithmen werden vom OpenFOAM-Tutorial „waterChannel“ übernommen.

Tabelle 6: Gleichungslöser und Toleranzen für die berechneten Größen

Größe	Gleichungslöser	Glättung	Toleranz	rel. Toleranz
$\alpha$	<code>smoothSolver</code>	Gauß-Seidl symmetrisch	$1 \times 10^{-8}$	0
$p_{corr}$	<code>PCG</code>		$1 \times 10^{-5}$	0
$p_{pgh}$	<code>GAMG</code>	Gauß-Seidl	$5 \times 10^{-9}$	0,01
$\mathbf{u}, k, \omega$	<code>smoothSolver</code>	Gauß-Seidl symmetrisch	$1 \times 10^{-6}$	0,1

Die Datei `fvSolution`, in der diese Festlegungen getroffen werden, ist in Anhang 2, Listing 5 angeschlossen. Tabelle 6 fasst die Einstellungen zu den Gleichungslösern zusammen. Grundsätzlich kommen drei verschiedenen Löser zum Einsatz, die von Greenshields (2016) folgendermaßen beschrieben werden:

**PCG:** Druck-rückgekoppelt (Greenshields, 2016)

**smoothSolver:** Löser, der eine Glättfunktion verwendet (Greenshields, 2016)

**GAMG:** allgemeines geometrisch-algebraisches Multi-Netz (Greenshields, 2016)

Nach jeder Iteration des Löser werden die Residuen ausgewertet. Fallen die Residuen unter den als Toleranz angegebenen Wert oder ist das Verhältnis von aktuellem Residuum zum Residuum am Anfang kleiner als der unter „relative“ Toleranz angegebene Wert (siehe Tabelle 6), beendet der Solver die Iteration. Sollte keine dieser Bedingungen erreicht werden, brechen die Solver für  $p_{corr}$  und  $p_{pgh}$  nach maximal 50 Iterationen ab, die anderen erst nach 1000 Iterationen (Greenshields, 2016).

Neben den Gleichungslösern und Toleranzen muss auch der Algorithmus für die Berechnung festgelegt werden. Beim festgelegten Algorithmus handelt es sich um eine iterative Methode, mit der die Gleichungen für Impulserhaltung und Massenerhaltung gekoppelt werden (Greenshields, 2016). Im Modell in dieser Arbeit wird der sogenannte „PIMPLE“-Algorithmus verwendet. Dieser Löser ist eine Kombination aus dem „PISO“-Algorithmus („pressure-implicit split-operator“) und dem „SIMPLE“-Algorithmus („semi-implicit method for pressure-linked equations“).

### 3.5 Turbulenzmodellierung

Zur Turbulenzmodellierung wird der Ansatz der Reynolds-averaged-numerical-solution herangezogen und das Menter-Shear-Stress-Transport- $k$ - $\omega$ -Turbulenzmo-

dell verwendet. Mit diesem Modell können die Stärken des  $k\text{-}\omega$ -Turbulenzmodells in Wandnähe und die Stärken des  $k\text{-}\epsilon$ -Turbulenzmodells im Strömungsinnen kombiniert werden (Schwarze, 2013) (siehe Abschnitt 2.3). Auch Yan et al. (2014) haben für ihre numerischen Modelle von Absetzbecken ein  $k\text{-}\omega$ -Turbulenzmodell verwendet, da mit diesem Modell eine bessere Übereinstimmung der numerischen Modelle mit physikalischen Experimenten erreicht werden konnte.

Die Einstellungen zur Turbulenzmodellierung werden in der Inputdatei `turbulenceProperties` festgelegt (siehe Anhang 2, Listings 6). Die für das verwendete High-Re-Turbulenzmodell benötigten Wandfunktionen werden als Randbedingungen für die Turbulenzgrößen festgelegt (siehe unten).

### 3.6 Transporteigenschaften der Fluide

Im Modell des Absetzbeckens wird die Strömung der zwei Fluide Luft und Wasser betrachtet. Da nur geringe Druckgradienten zu erwarten sind, werden – obwohl Luft ein kompressibles Gas ist – beide Fluide als inkompressibel betrachtet. Diese Vereinfachung wird auch in vielen Modellen der OpenFOAM-Tutorial-cases, bei denen vergleichbare Prozesse modelliert werden, vorgenommen.

Weiters werden beide Fluide als Newtonsche Fluide mit linearem Reibungsverhalten und der konstanten dynamischen Zähigkeit  $\eta$  betrachtet. Somit kann die Schubspannung  $\tau$  mit folgender Gleichung berechnet werden (Schröder und Zanke, 2003):

$$\tau = \eta \frac{du}{dn} \tag{41}$$

$\eta$  ..... dynamische Viskosität [ $\eta$ ] = Pa s

Die kinematische Viskosität  $\nu$  ergibt sich aus dem Quotienten der Dichte  $\rho$  des Fluids und der kinematischen Viskosität (Schröder und Zanke, 2003).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \tag{42}$$

Zur Berechnung der Schubspannungen ist es also nötig, Dichte und Viskosität der betrachteten Fluide anzugeben. Folgende, von Aigner und Bollrich (2015) angegebene Werte werden hierfür in der Inputdatei `transportProperties` (Anhang 2, Listings 7) festgelegt:

Wasser:

- $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$
- $\nu = 1,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Luft:

- $\rho = 1 \text{ kg m}^{-3}$
- $\nu = 1,42 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Oberflächenspannung zwischen Luft und Wasser:  $\sigma = 0,07 \text{ N m}^{-1}$

## 3.7 Randbedingungen

### 3.7.1 Geschwindigkeit

**Zuflussganglinie am Zulauf:** Die Randbedingung für die Geschwindigkeit am Zulauf wird mithilfe des in Abschnitt 2.6 erstellten Niederschlags-Abfluss-Modells für zwei Niederschlagsereignisse berechnet. Die erste Zuflussganglinie wird aus der Niederschlagsganglinie vom 10.06.2012 und die zweite aus dem Bemessungsniederschlag  $r_{15,n=5}$  berechnet. Die Niederschlagsdaten des Ereignisses vom 10.06.2012 werden auf Basis der Messwerte der Niederschlagsmessstelle Wien-Mauerbach (BMLFUW, 2017) sowie aus Angaben von Lins (2013) rekonstruiert. Die Ganglinien der Niederschläge und die daraus mit Formel 23 berechneten Zuflussganglinien zum Absetzbecken sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Zuflussganglinie wird über die Fließgeschwindigkeit am Zulauf in orthogonaler Richtung zur Rohrquerschnittsebene im Modell festgelegt (Dirichlet-Randbedingung).

**Abflussganglinie am Ablauf:** Die den Abfluss aus dem Absetzbecken steuernden Strukturen (Drosselrohr und Überfallwehr) werden nicht mehr in das numerische Modell miteinbezogen. Der Abfluss aus dem Modell wird mit den in Abschnitt 2.7 beschriebenen semi-empirischen Methoden in Abhängigkeit des Zuflusses und des Wasserstandes im Absetzbecken berechnet. Die Zuflussganglinien und daraus mit den Formeln 30 und 38 berechneten Abflussganglinien der modellierten Ereignisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Wie bei der Definition der Randbedingung am Zulauf des Absetzbeckens wird die Abflussganglinie dem Modell in Form der Geschwindigkeit orthogonal zur Fläche der Ablauföffnung vorgegeben (Dirichlet-Randbedingung).

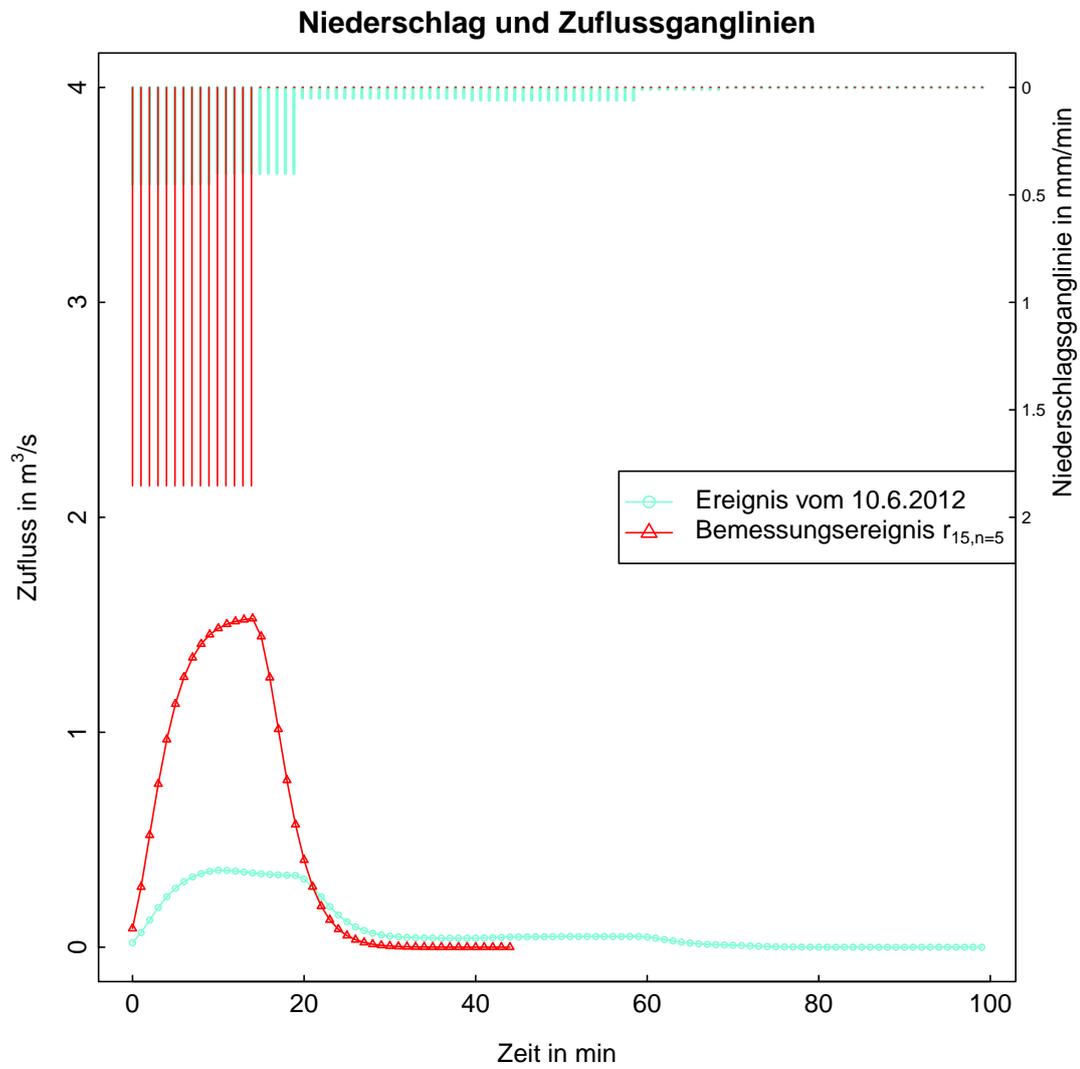


Abbildung 5: Niederschlagsganglinie vom 10.6.2012 sowie des Bemessungsniederschlagsereignisses  $r_{15,n=5}$  und daraus resultierende Zuflussganglinien zum Absetzbecken

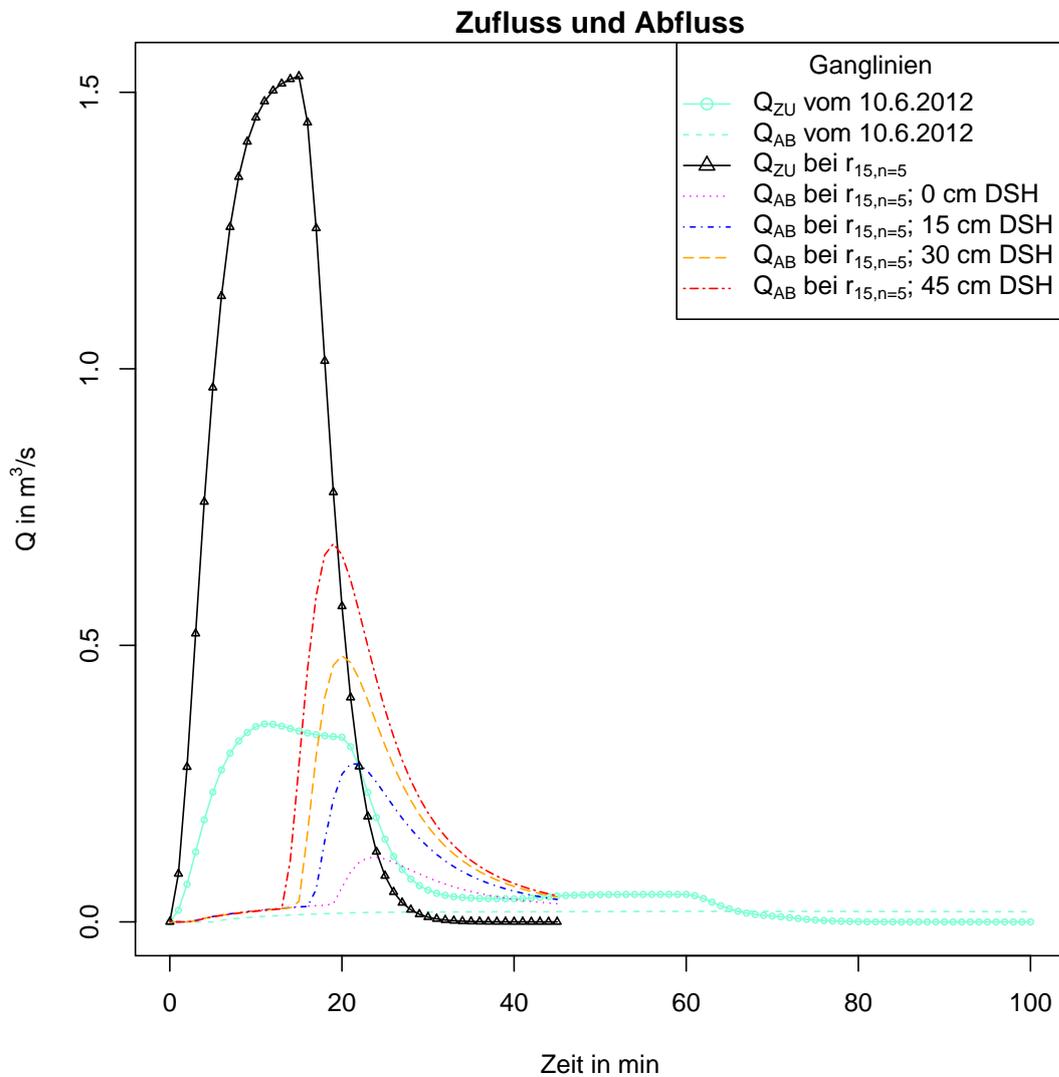


Abbildung 6: Zuflussganglinien berechnet für das Niederschlagsereignis vom 10.6.2012 und für das Bemessungsniederschlagsereignis  $r_{15,n=5}$  und zugehörige Abflussganglinien bei verschiedenen Dauerstauhöhen

Tabelle 7: Übersicht über die angesetzten Randbedingungen

Größe	Einheit	Zulauf	Ablauf	Wände	Atmosphäre
$u$	$\text{m s}^{-1}$	$\mathbf{u}(t)$	$\mathbf{u}(t)$	noSlip	$\nabla \mathbf{u} = 0$
$p$	Pa	$\nabla p = 0$	$\nabla p = 0$	$\nabla p = 0$	$\begin{cases} 0 \\ 0 - \frac{\rho}{2}  \mathbf{u}^2  \end{cases}$
$k$	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	0,0034	$\begin{cases} \nabla k = 0 \\ 0,0001 \end{cases}$	kqWallFunction	$\begin{cases} \nabla k = 0 \\ 0,0001 \end{cases}$
$\omega$	$\text{s}^{-1}$	0,52	$\begin{cases} \nabla k = 0 \\ 0,0001 \end{cases}$	omegaWallFunction	$\begin{cases} \nabla k = 0 \\ 0,0001 \end{cases}$
$\nu_T$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$\frac{k^2}{\epsilon}$	$\frac{k^2}{\epsilon}$	nutkWallFunction	$\frac{k^2}{\epsilon}$
$\alpha$	1	1	$\nabla \alpha = 0$	$\begin{cases} \nabla k = 0 \\ 0,0001 \end{cases}$	$\begin{cases} \nabla k = 0 \\ 0,0001 \end{cases}$

Um zu überprüfen, ob die verwendeten Modelle zur Berechnung des Zu- und Abflusses aus dem Absetzbecken zu realistischen Wasserständen im Absetzbecken führen, werden in Abbildung 7 die die Wasserstände im Modell mit Messwerten von Lins (2013) verglichen.

**Atmosphäre:** Die Funktion `pressureInletOutletVelocity` spezifiziert für den Modellrand zur Atmosphäre eine Null-Gradienten-Randbedingung unabhängig davon, ob der Geschwindigkeitsvektor in das Rechenggebiet hinein oder hinaus zeigt. Die Geschwindigkeit ist vom Druck im Strömungsgebiet abhängig, wobei für die Atmosphäre angenommen wird, dass der Druck ständig  $p_0 = 0$  Pa beträgt.

In Tabelle 7 sind die angesetzten Randbedingungen zusammengefasst. Die Festlegung der Randbedingungen für die Geschwindigkeit erfolgt in der Inputdatei `U`, die in Anhang 2, Listings 8 angeschlossen ist.

### 3.7.2 Druck

An den Wänden und am Zulauf wird für den Druck die `fixedFluxPressure` Randbedingung festgelegt. Damit wird eine Nullgradienten-Randbedingung angewandt, die speziell für Fälle geeignet ist, in denen Gravitationskräfte oder Kräfte durch Oberflächenspannungen in den Gleichungen vorkommen (Greenshields, 2016).

Zur Atmosphäre wird eine Randbedingung festgelegt, durch welche der Druck in Abhängigkeit der Richtung des Geschwindigkeitsvektors berechnet wird. Zeigt

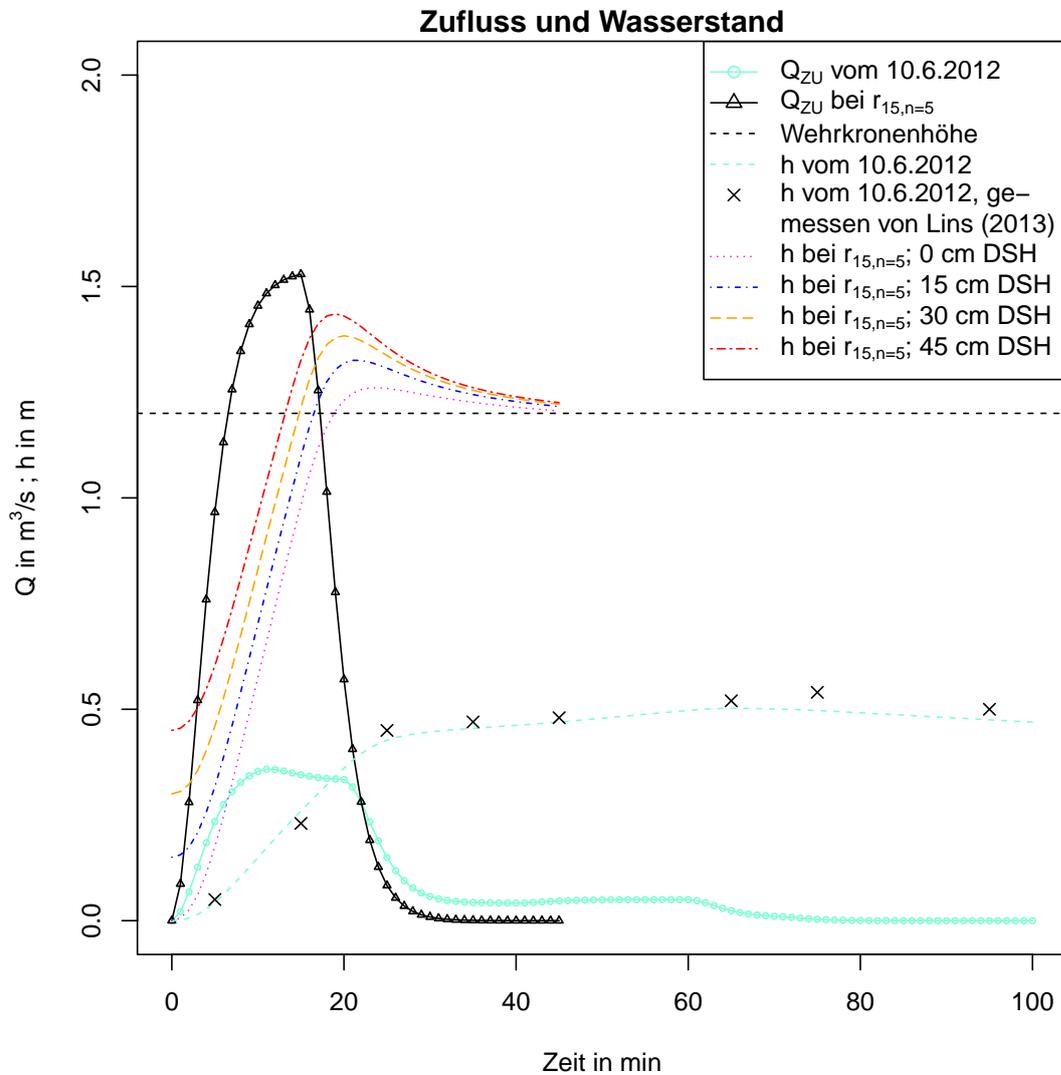


Abbildung 7: Zuflussganglinien berechnet für das Niederschlagsereignis vom 10.6.2012 und für das Bemessungsniederschlagsereignis  $r_{15,n=5}$  und zugehörige Wasserstände bei verschiedenen Dauerstauhöhen, im Vergleich mit den Messungen von Lins (2013)

der Geschwindigkeitsvektor in das Strömungsgebiet (Zufluss), wird der Druck mit  $0 - \frac{1}{2}|\mathbf{u}^2|$  berechnet. Zeigt der Geschwindigkeitsvektor aus dem Strömungsgebiet hinaus, wird der Druck an der Atmosphäre mit 0 Pa festgelegt (Greenshields, 2016). Damit wird der Grundsatz der Energieerhaltung implementiert. Festzuhalten ist hierbei weiter, dass mit dem Druck  $p$  in diesem Fall der Quotient aus Druck und Fluidichte gemeint ist.

Die Randbedingungen für den Druck werden in der Inputdatei `p_rgh` festgelegt (Anhang 2, Listings 9) und sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

### 3.7.3 Turbulente kinetische Energie

Für das  $k$ - $\omega$ -SST-Turbulenzmodell ist es nötig, die am Zulauf eingetragene turbulente kinetische Energie abzuschätzen. Schwarze (2013) gibt für diese Abschätzung von  $k$  im Zulauf die Formel

$$k = \frac{3}{2}(v \cdot I)^2 \quad (43)$$

an. Dabei ist  $I$  die Turbulenzintensität, welche mithilfe einer Formel aus CFD Online Wiki (2015) abgeschätzt wird:

$$I = 0,16Re^{-\frac{1}{8}} \quad (44)$$

$$Re = \frac{v \cdot d_H}{\nu} \quad (45)$$

$I$  ..... Turbulenzintensität [ $I$ ] = 1  
 $Re$  ..... Reynoldszahl [ $Re$ ] = 1  
 $d_H$  ..... hydraulisch gleichwertiger Durchmesser [ $d_H$ ] = m

Für die Zuflussgeschwindigkeit wird der Wert  $1,9 \text{ m s}^{-1}$  angenommen. Diese Geschwindigkeit würde vorherrschen, wenn der Zufluss von  $1,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  unter Vollfüllung zufließt. Für den hydraulisch gleichwertigen Durchmesser  $d_H$  zur Berechnung der Reynoldszahl  $Re$  wird statt dem Durchmesser des Zulaufrohres der doppelt so hohe Wert von 2 m angenommen, da im Becken selbst von einem um einiges höheren hydraulisch gleichwertigen Durchmesser ausgegangen werden kann. Auf Basis dieser Annahmen ergibt sich aus Formel 44  $I = 0.025$  und aus Formel 43  $k = 0.0034$ .

Am Ablauf wird angenommen, dass die Turbulenz voll ausgebildet ist, und somit eine Nullgradienten-Bedingung zugewiesen (Schwarze, 2013). Dieselbe Randbedingung wird auch für die Atmosphäre verwendet. Die kombinierte Randbedingung `inletOutlet` bewirkt, dass in dem Fall, dass der Geschwindigkeitsvektor in das Strömungsfeld zeigt, anstatt der Nullgradienten-Bedingung für  $k$  eine Dirichlet-Randbedingung angewandt wird. Die zuströmende turbulente kinetische Energie wird als `inletValue` vorgegeben und beträgt dann  $0,0001 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  (Greenshields, 2016).

An den Wänden wird für  $k$  die `kqRWallFunction`-Wandfunktion angewandt.

Alle Randbedingungen für die turbulente kinetische Energie sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Für OpenFOAM festgelegt werden die Randbedingungen für  $k$  in der Textdatei `k` (Anhang 2, Listings 10).

Bei der Simulation der Beckenströmungen während des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 beträgt der Zufluss ins Becken nur ungefähr ein Drittel jenes Zuflusses, der beim Bemessungsniederschlagsereignis auftreten würde. Da es sich bei den Werten der Turbulenzgrößen am Zulauf aber nur um grobe Abschätzungen handelt, werden trotzdem für alle im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Simulationen dieselben Randbedingungen für die Turbulenzgrößen verwendet.

### 3.7.4 Charakteristische Frequenz der energietragenden Wirbel

Auch die charakteristische Frequenz der energietragenden Wirbel im Zulauf kann nur abgeschätzt werden. Schwarze (2013) gibt hierfür die Formel

$$\omega = 1,8 \cdot \frac{\sqrt{k}}{0,1d_H} \quad (46)$$

an. Daraus ergibt sich mit dem oben errechneten Wert für  $k$  eine charakteristische Frequenz der energietragenden Wirbel am Zulauf von  $\omega = 0,52$ .

An den Wänden wird die `omegaWallFunction` als Randbedingung für die charakteristische Frequenz der energietragenden Wirbel angesetzt. An allen anderen Rändern des Rechengebiets wird – wie auch bei der turbulenten kinetischen Energie – die `inletOutlet` Randbedingung verwendet.

Die Randbedingungen für die charakteristische Frequenz der energietragenden Wirbel sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Die Inputdatei, in welcher die Randbedingungen für OpenFOAM festgelegt werden, ist in Anhang 2, Listing 11 angeschlossen.

### 3.7.5 Wirbelviskosität der Turbulenz

Für die Wirbelviskosität  $\nu_T$  wird an den Wänden die Wandfunktion `nutkWallFunction` verwendet. In allen anderen Feldern wird  $\nu_T$  mit Formel 10 aus  $k$  und  $\epsilon$  berechnet (siehe Tabelle 7 und die Inputdatei `nut` in Anhang 2, Listings 12).

### 3.7.6 Randbedingung für den Volumenanteil von Wasser

Da es sich bei dem erstellten Modell um ein Mehrphasenmodell handelt, wird neben den Standardströmungsgrößen auch noch die Größe  $\alpha$  transportiert, welche festlegt, zu welchem Anteil eine Zelle mit Wasser gefüllt ist (siehe Abschnitt 2.3). Aus dieser Größe wird dann mit Formel 8 auch eine mittlere Dichte für die Zelle ermittelt (Nagy, 2014). Besonders relevant ist die Randbedingung für  $\alpha$  am Zulauf des Modells. Mit  $\alpha = 1$  am Zulauf wird festgelegt, dass das gesamte Zulaufvolumen in Form von Wasser in das Modell strömt. An allen anderen Rändern des Strömungsgebiets wird die Nullgradienten-Randbedingung festgelegt (siehe Tabelle 7). Die Festlegung der Randbedingungen für  $\alpha$  erfolgt in der Inputdatei `alpha.water.orig` (Anhang 2, Listings 13).

## 3.8 Anfangsbedingungen

Neben den Randbedingungen müssen für die Strömungsgrößen auch Werte für das gesamte Strömungsgebiet vorgegeben werden, die zu Beginn der Simulation vorherrschen. Diese Werte werden in den jeweiligen Inputdateien, in denen auch die Randbedingungen festgelegt werden, unter dem Eintrag `internalField` angegeben. Es wird davon ausgegangen, dass sich das gesamte Strömungsgebiet zu Beginn in Ruhe befindet. Somit betragen Geschwindigkeit, Druck (abzüglich des hydrostatischen Drucks) und Wirbelviskosität zu Beginn der Simulation 0. Für die turbulente kinetische Energie wird angenommen, dass diese zu Beginn  $0,0001 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  beträgt. Die Frequenz der energietragenden Wirbel wird am Beginn der Simulation mit  $0,0003 \text{ s}^{-1}$  festgelegt.

Eine spezielle Stellung hat die Anfangsbedingung für den Volumenanteil von Wasser. Er ist nicht zu Beginn jeder Simulation gleich, da die Simulationen mit verschiedenen zu Beginn vorhandenen Wasserspiehlhöhen (entspricht den Dauerstauhöhen) begonnen werden sollen. Um die Anfangswerte für  $\alpha$  für einen Teil des Strömungsgebiets extra zu definieren, wird das Programm `setFields` verwendet. In der dazugehörigen Inputdatei `setFieldsDict` (siehe Anhang 2, Listings 14) wird ein Quader definiert, in dem  $\alpha$  den Wert 1 haben soll. Dieser Quader wird dann mit dem Strömungsgebiet verschnitten und in den Zellen, die in den Quader

fallen,  $\alpha = 1$  festgelegt.



---

## 4 Durchführung der numerischen Strömungsberechnungen

### 4.1 Hardware

Die numerischen Modelle werden auf dem „UbuntuSim-Rechner“ des Instituts für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft an der Universität für Bodenkultur Wien berechnet. Dabei handelt es sich um einen virtualisierten Server, welcher auf einem Rackserver unter ESXi als Hypervisor läuft. Dieser Rackserver verfügt über zwei XEON-CPU's mit jeweils sechs physikalischen Kernen mit einer Taktfrequenz von 2,4 GHz. Dem Ubuntu-Sim-Rechner sind davon allerdings nur zwei Kerne zugewiesen (insgesamt 8 GB RAM).

Theoretisch gäbe es die Möglichkeit, die Geometrie des Rechengebiets zu teilen und auf den beiden zur Verfügung stehenden Kernen parallel zu berechnen. Vorversuche habe jedoch gezeigt, dass dadurch nur eine geringe Beschleunigung der Berechnungen möglich ist. Aus diesem Grund wird für die Berechnung der eigentlichen Modelle der Arbeit auf die Parallelisierung verzichtet.

### 4.2 Einstellungen zu den Berechnungen

Die Einstellungen zu der Berechnung, wie zu berechnende Strömungszeit, Zeitschritt und Datenspeicherung werden in der Inputdatei `controlDict` (siehe Anhang 2, Listings 15) festgelegt.

Nach dem Ende des Niederschlagsereignisses wird die Strömungsberechnung noch für die Dauer der Konzentrationszeit (15 min) fortgeführt. Damit ergibt sich für die Modelle zu dem 15-minütigen Bemessungsniederschlagsereignissen eine Berechnungszeit von 30 min und für das Niederschlagsereignis vom 10.06.2012 eine Berechnungszeit von 85 min (siehe Tabelle 8).

Eine weitere wichtige Einstellung zu den Berechnungen ist das Intervall, in dem die Ergebnisse gespeichert werden. Dabei muss zwischen den Anforderungen einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung der Simulationsergebnisse und eines sparsamen Umgangs mit Speicherplatz abgewogen werden. Auf Basis dieser beiden Anforderungen wurde entschieden, bei den Modellen zum Bemessungsereignis alle 5 s einen Zeitschritt zu speichern. Für das Abspeichern der Strömungsgrößen des gesamten Rechengebiets zu einem Zeitpunkt werden ungefähr 40 MB Speicherplatz benötigt. Da das Modell `auhof20120610` zum Niederschlagsereignis vom 10.06.2012 weniger Zellen hat (siehe Abschnitt 3.2), benötigt diese Simulation einen etwas geringeren Speicherplatz. Der für die einzelnen Modelle insgesamt

Tabelle 8: Übersicht über die berechneten numerischen Modelle

Name	Rechen- dauer h	letzter gespeicher- ter Zeitschritt s	Speicher- intervall s	Dateigröße GB
auhof20120610	149,2	5100	10	14,0
auhofR15n5_45	66,9	1800	5	14,0
auhofR15n5_30	69,6	1800	5	14,0
auhofR15n5_15	68,8	1800	5	14,0

benötigte Speicherplatz ist in Tabelle 8 angegeben.

Der Berechnungsschritt wird über die Courant-Zahl  $Co$  (Formel 47) ermittelt (Greenshields, 2016; Tritthart, 2015). Da ein implizites Verfahren zur Zeitdiskretisierung herangezogen wird, kann die Courant-Zahl den Wert 1 überschreiten (Schwarze, 2013; Tritthart, 2015). Aus dem OpenFOAM-Tutorial-Case „water-Channel“ wird die Einstellung übernommen, dass der Zeitschritt jeweils so gewählt wird, dass die Bedingung  $Co \leq 6$  eingehalten wird.

$$Co = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \sup_{i \in I} (u_i) \leq 6 \quad (47)$$

$Co$  ..... Courant-Zahl [ $Co$ ] = 1  
 $\Delta t$  ..... Länge des Zeitintervall [ $\Delta t$ ] = s  
 $\Delta x$  ..... kleinste Abmessung der Zelle [ $\Delta x$ ] = m  
 $u_i$  ..... Geschwindigkeit in Richtung  $i$  [ $u_i$ ] =  $\text{m s}^{-1}$

### 4.3 Funktionen zum Postprocessing

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Einstellungen für die numerische Berechnung selbst werden in der Datei `controlDict` auch Funktionen für das Postprocessing definiert. Für die Auswertung der Geschwindigkeiten in den Modellen in dieser Arbeit wird die Funktion `probes` verwendet. Mit dieser Funktion können Strömungsgrößen an in der Datei `probes` (Anhang 2, Listings 16) vorgegebenen Punkten im Strömungsgebiet ausgelesen werden.

Um die Bilanz der in das Absatzbecken ein- und ausströmenden Masse während der Berechnung verfolgen zu können, werden in der Datei `controlDict` noch drei Funktionen definiert, die jeweils den Massenstrom durch die Modellränder

am Zulauf, am Ablauf und an der Atmosphäre berechnet (vom OpenFOAM-Tutorial-Case „waterChannel“ übernommen). Diese Daten werden während der Berechnung für jeden Zeitschritt ausgegeben (siehe unten) und zusätzlich – wie die Daten der Postprocessing-Funktionen `probes` und `singleGraph` – in Textdateien gespeichert.

## 4.4 Dokumentation der Berechnungen

Der verwendete Solver `interFoam` gibt während der Berechnung laufend Informationen zur Berechnung aus. Diese Informationen werden über den `Unix-tee`-Befehl in eine Textdatei mit dem Dateinamen `interFoamLog` gespeichert, um eventuell später darauf zugreifen zu können. Beispielhaft ist im Folgenden die Ausgabe des letzten Berechnungszeitschrittes der Berechnung des Modells `auhofR15n5_30` angegeben:

```
Courant Number mean: 0.119685 max: 3.86396
Interface Courant Number mean: 0.0102435 max: 2.53705
deltaT = 0.040688
Time = 1800

PIMPLE: iteration 1
smoothSolver: Solving for alpha.water, Initial residual =
  0.00191738, Final residual = 3.77539e-09, No Iterations 3
Phase-1 volume fraction = 0.442643 Min(alpha.water) = -7.61295e
  -05 Max(alpha.water) = 1.00001
MULES: Correcting alpha.water
Phase-1 volume fraction = 0.442643 Min(alpha.water) =
  -0.000483177 Max(alpha.water) = 1.00001
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.00338235, Final
  residual = 2.10527e-05, No Iterations 2
time step continuity errors : sum local = 0.000228879, global =
  6.2563e-06, cumulative = 0.139758
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.000408341, Final
  residual = 4.61445e-09, No Iterations 9
time step continuity errors : sum local = 5.01077e-08, global =
  5.40628e-09, cumulative = 0.139758
smoothSolver: Solving for omega, Initial residual = 0.010234,
  Final residual = 0.000624409, No Iterations 1
smoothSolver: Solving for k, Initial residual = 0.0120787, Final
  residual = 0.000295056, No Iterations 2
ExecutionTime = 250406 s ClockTime = 250488 s

surfaceRegion inletFlux write:
  sum(inlet) of rhoPhi = -8.64317

surfaceRegion outletFlux write:
```

```
sum(outlet) of rhoPhi = 172.157
```

```
surfaceRegion atmosphereFlux write:
```

```
sum(atmosphere) of rhoPhi = 0.190126
```

End

Zu Beginn jedes Zeitschrittes ist die Courant-Zahl des vorigen Zeitschrittes angegeben. Von ihr ist die Länge des folgenden Zeitschrittes abhängig, welche ebenfalls angegeben wird (siehe oben, Formel 47). Im daran anschließenden Block (beginnend mit `PIMPLE: iteration 1`) sind Informationen zu den in Abschnitt 3.4 (Tabelle 6) gewählten Gleichungslösern angegeben. Insbesondere können die Residuen und die Anzahl der nötigen Iterationsschritte kontrolliert werden. Diese sollten unter der in der Inputdatei `fvSolution` als `maxIter` festgelegten Anzahl liegen um sicherzugehen, dass die maximalen Residuen nicht überschritten werden.

---

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Geschwindigkeiten entlang von Transekten

Zur Auswertung und Analyse der Simulationsergebnisse wird die Verteilung der Geschwindigkeiten zu den gespeicherten Zeitschritten an 37 Punkten, jeweils in den Höhen 10 cm, 25 cm und 40 cm über der Beckensohle betrachtet. Dazu werden fünf Transekte (A bis E) durch das Strömungsgebiet gelegt, an denen im Abstand von jeweils 4 m Punkte angeordnet werden. Die Transekte A bis C verlaufen parallel zur x-Achse, wobei Transekt A genau geradlinig vom Zulauf zum Ablauf des Absetzbeckens verläuft ( $y = 0$  m). Die Transekte B ( $y = -12$  m) und C ( $y = 8$  m) decken den rechten und den linken Teil des Strömungsgebiets ab. Die Transekte D ( $x = 13$  m) und E ( $x = 25$  m) verlaufen parallel zur y-Achse und decken den vorderen und hinteren Teil des Absetzbeckens ab. Die genauen Lagen der Transekte und Punkte sowie das verwendete Koordinatensystem können dem Netzstrukturplan in Anhang 1 entnommen werden.

Um zu vermeiden, dass in die Auswertung auch Geschwindigkeiten einfließen, die eigentlich aus der Bewegung von Luft kommen, werden je nach Höhe der Punkte Geschwindigkeitswerte erst ab einem bestimmten Zeitpunkt betrachtet. Dieser Zeitpunkt wird so gewählt, dass die Zelle, in der der untersuchte Punkt liegt, und die darüber liegende Zelle bereits vollständig eingestaut sind. Maßgebend für diesen Zeitpunkt ist das Modell, bei dem von der geringsten ständigen Einstauhöhe ausgegangen wird. Da der Fokus bei der Auswertung der Simulationen auf den Strömungen während des ersten Spülstoßes liegt, werden die Strömungsgeschwindigkeiten im Absetzbecken bei den Simulationen des Bemessungsereignisses nur bis zu 13 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses ausgewertet. Ab diesem Zeitpunkt beginnt bei der Simulation mit 45 cm Dauerstauhöhe Wasser über das Überlaufwehr aus dem Absetzbecken abzufließen. Dadurch ändert sich der Ablauf aus dem Absetzbecken stark und die Strömungen können nicht mehr mit denen ohne Ablauf über das Überlaufwehr verglichen werden. Die genauen Zeiträume, welche für die Auswertung der Geschwindigkeiten aus den Simulationen des Bemessungsniederschlagsereignisses in den verschiedenen Höhen herangezogen werden, können Abbildung 18 entnommen werden.

Für die Analyse der Geschwindigkeiten in verschiedenen Bereichen des Absetzbeckens während des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 werden dieselben Transekte wie zur Analyse während des Bemessungsniederschlagsereignisses herangezogen. Da der maximale Wasserstand im Absetzbecken bei diesem Niederschlagsereignis jedoch nur etwas mehr als 50 cm beträgt, werden in vertikaler Richtung nur die Punkte 10 cm und 25 cm über der Sohle betrachtet.

Im Gegensatz zu den Simulationen der Bemessungsereignisse wird das Absetzbecken für die Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 ohne Dauerstau simuliert. So wurde es auch zum Zeitpunkt dieses Ereignisses betrieben. Um sicherzugehen, dass die Zellen, welche für die folgenden Auswertungen der Geschwindigkeiten herangezogen werden, vollständig mit Wasser gefüllt sind, werden die Geschwindigkeiten an Punkten 10 cm über der Sohle ab 13 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses und an Punkten 25 cm über der Sohle ab 17 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses ausgewertet (siehe auch Abbildung 19).

In den Abbildungen 8, 9, 10, 11 und 12 werden die Geschwindigkeiten der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses bei der Dauerstauhöhe von 30 cm dargestellt. Die Boxplots stellen die Momentangeschwindigkeiten im Zeitintervall von 5 s an den oben beschriebenen Punkten, in den drei verschiedenen Tiefen und im beschriebenen Zeitraum dar. Alle Punkte, die weiter als der eineinhalbfache Interquartilabstand (IQR, dargestellt durch die Box) unter dem 25 % Quantil oder über dem 75 % Quantil liegen, werden als Punkte unterhalb bzw. oberhalb der Whiskers dargestellt.

## 5.2 Geschwindigkeiten in verschiedenen Bereichen des Absetzbeckens

### 5.2.1 Horizontale Geschwindigkeitsverteilung

Um Aussagen über die horizontale Geschwindigkeitsverteilung treffen zu können, werden fünf Bereiche des Absetzbeckens betrachtet. Hierfür werden wiederum die oben beschriebenen Transekte genutzt. Dabei steht Transekt B für den in Fließrichtung linken Bereich des Absetzbeckens, Transekt C für den rechten Bereich und Transekt A für den mittleren Bereich. In Fließrichtung werden mit Transekt D der vordere Bereich des Absetzbeckens und mit Transekt E der hintere Bereich des Absetzbeckens betrachtet. Die Verteilung der Momentangeschwindigkeiten in diesen Bereichen ist wiederum in Form von Boxplots dargestellt. Abbildung 13 zeigt die Geschwindigkeiten bei den Simulationen des Bemessungsniederschlagsereignisses und Abbildung 14 jene bei der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012.

Zusätzlich zu den Geschwindigkeitsverteilungen während des gesamten betrachteten Zeitraumes in Form der Abbildungen 13 und 14 kann die horizontale Geschwindigkeitsverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt aus den Ergebnissen ermittelt werden. So lässt sich neben dem Betrag der Momentangeschwindigkeit auch die Richtung der Geschwindigkeitsvektoren darstellen. Abbildung 15 zeigt die Geschwindigkeiten in der Ebene 25 cm über der Beckensohle zu drei verschiede-

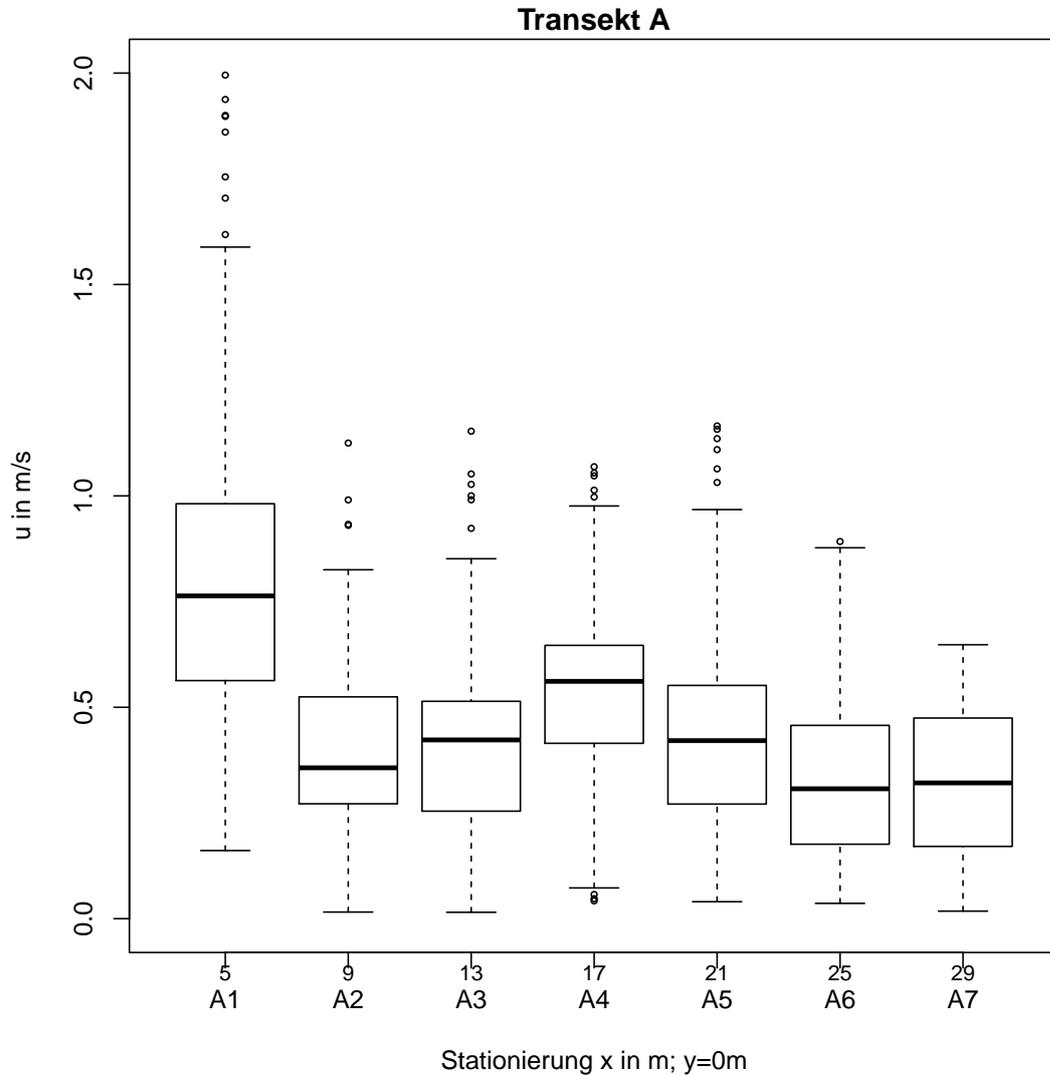


Abbildung 8: Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten entlang von Transekt A (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit 30 cm Dauerstauhöhe, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s

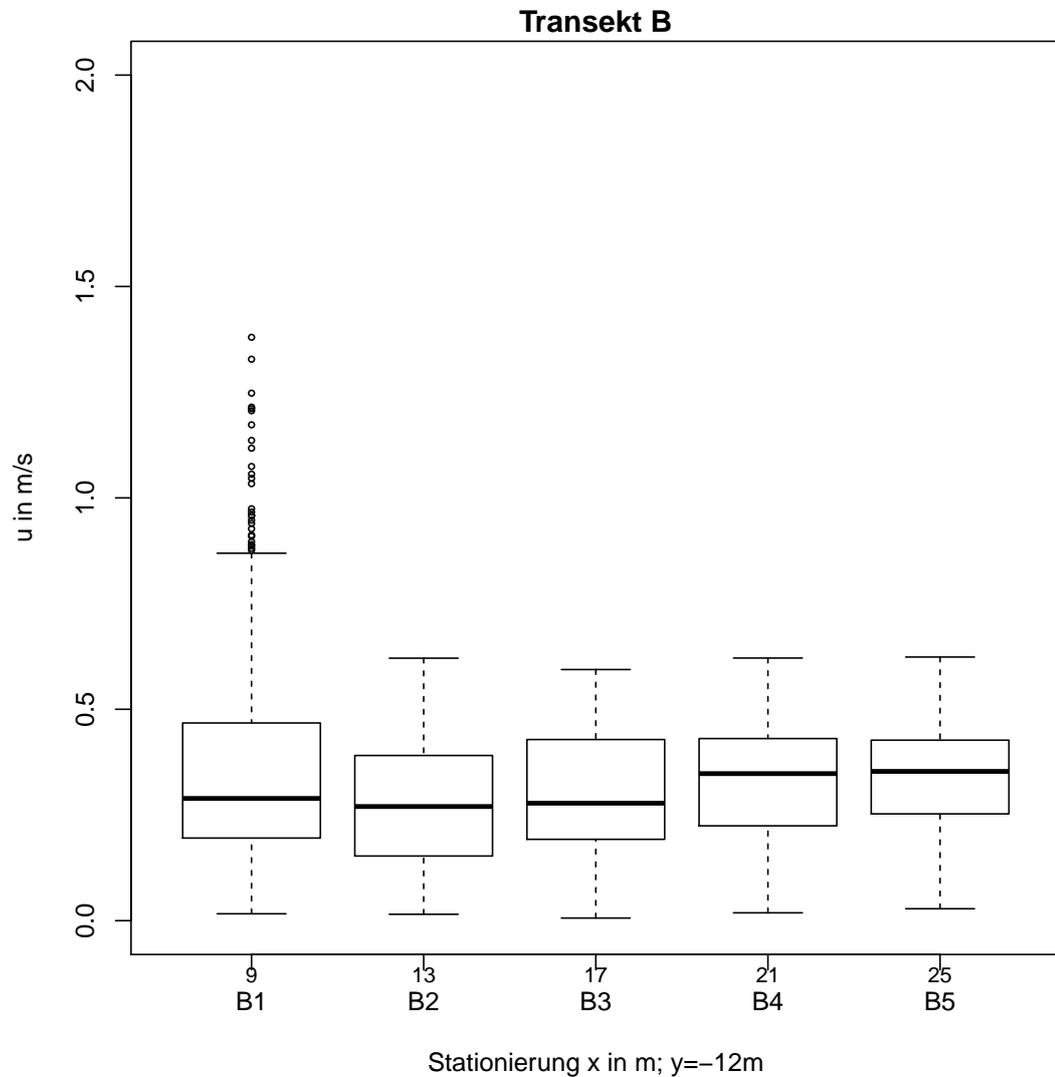


Abbildung 9: Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten entlang von Transekt B (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit 30 cm Dauerstauhöhe, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s

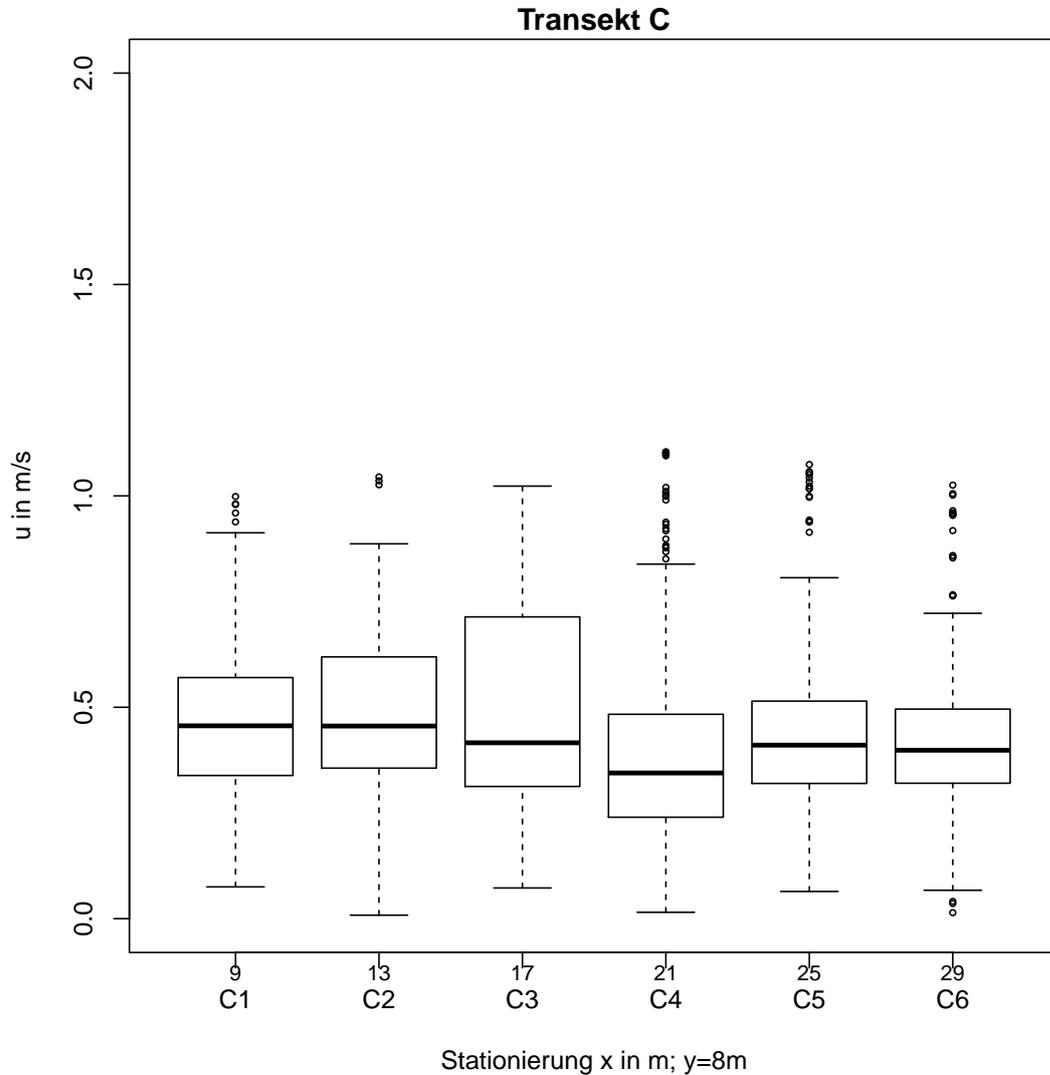


Abbildung 10: Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten entlang von Transekt C (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit 30 cm Dauerstauhöhe, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s

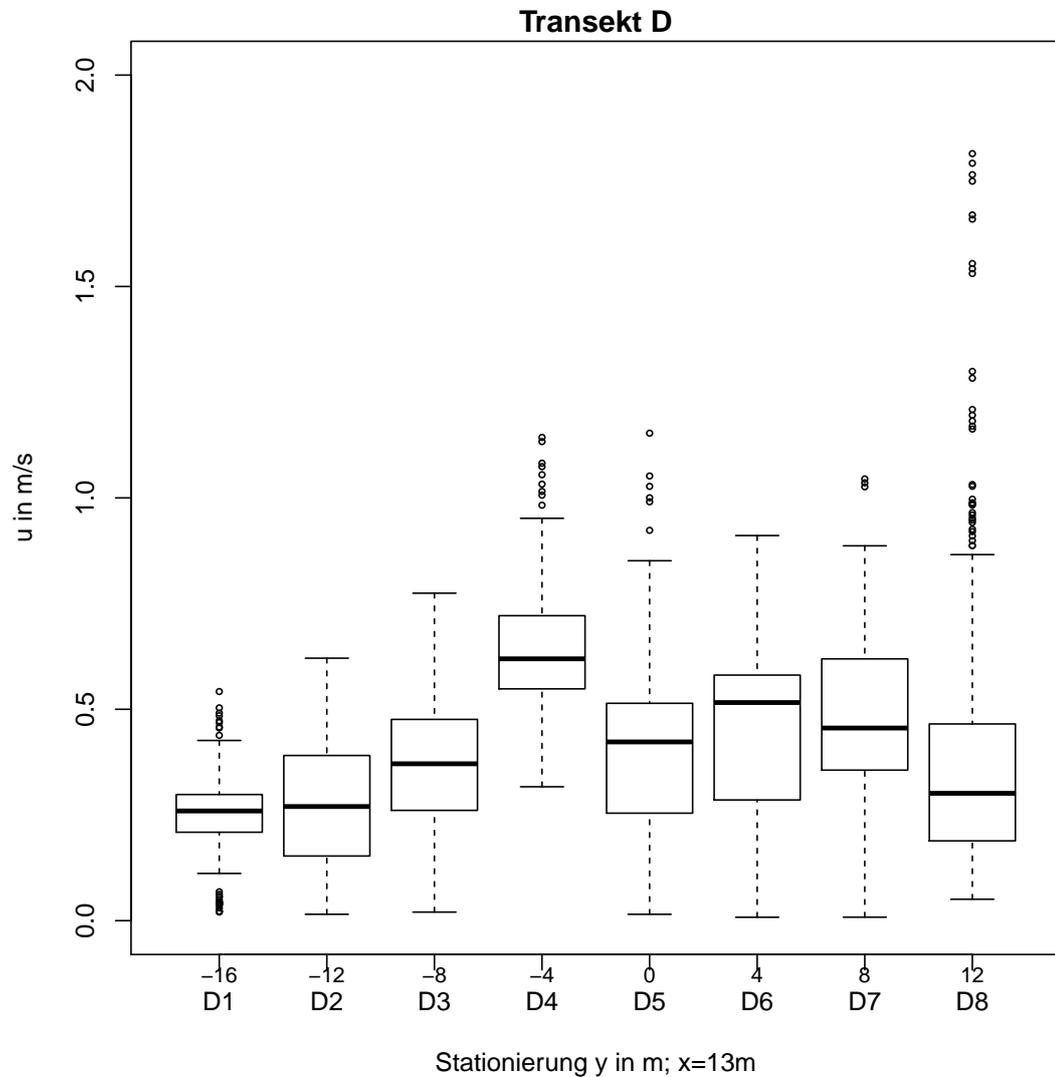


Abbildung 11: Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten entlang von Transekt D (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit 30 cm Dauerstauhöhe, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s

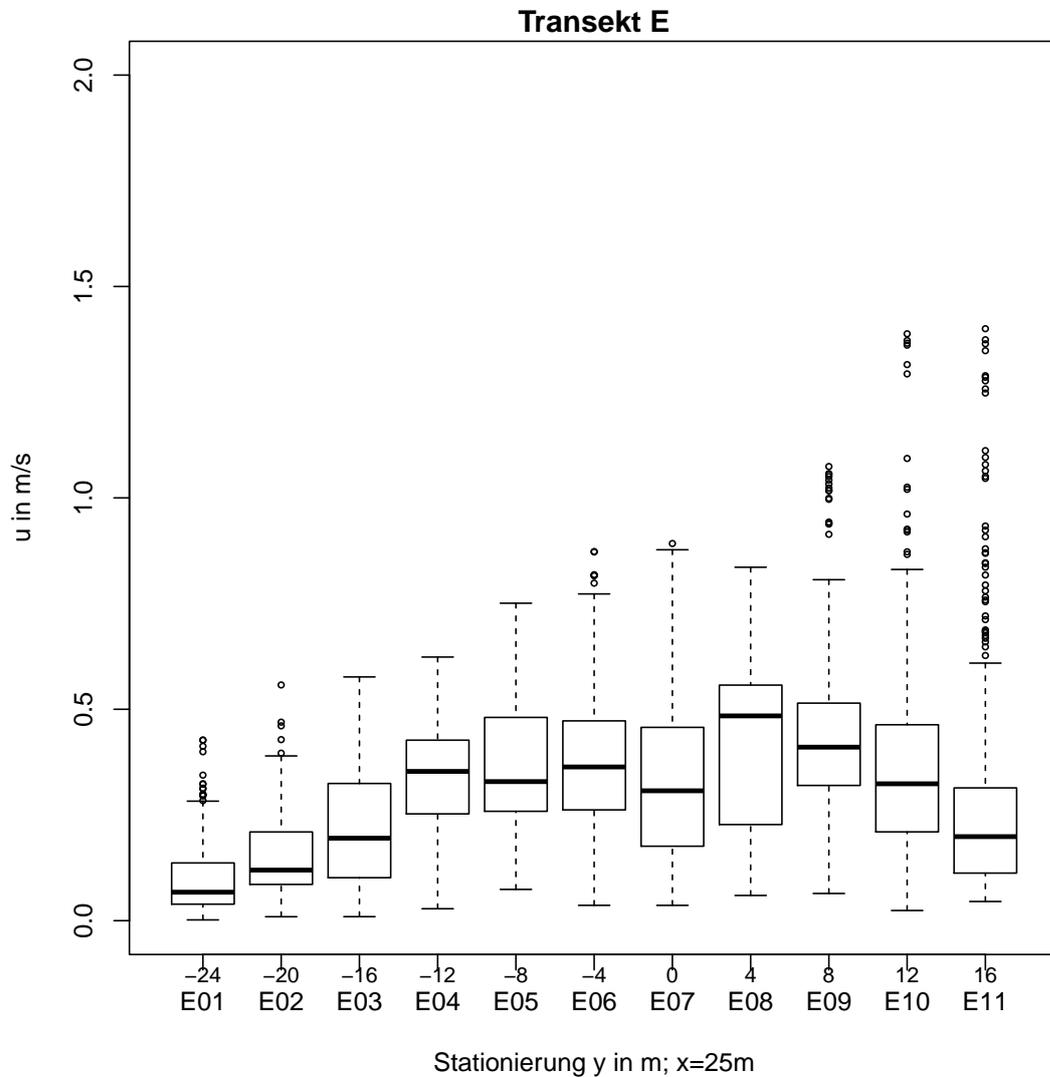


Abbildung 12: Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten entlang von Transekt E (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit 30 cm Dauerstauhöhe, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s

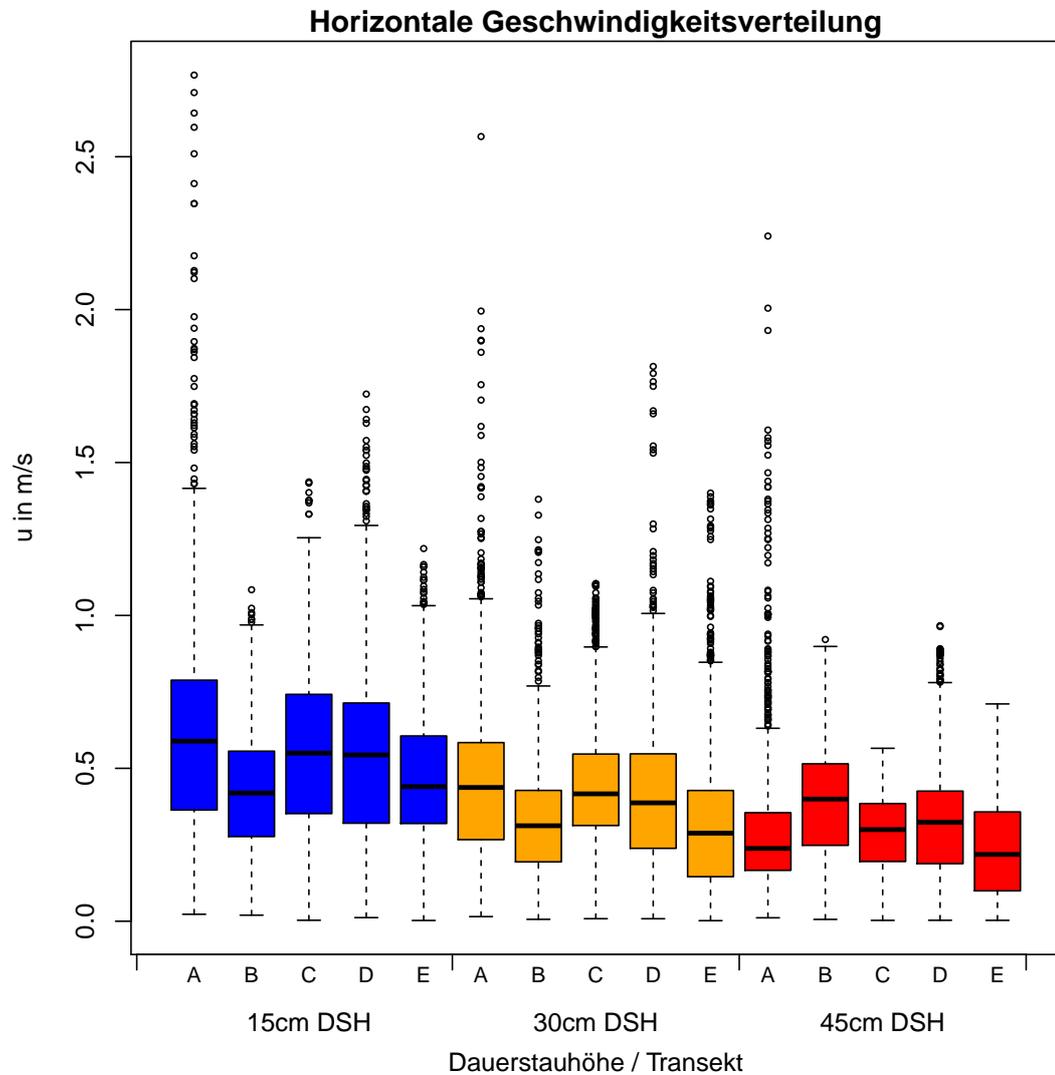


Abbildung 13: Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten in den Transekten A bis E (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s

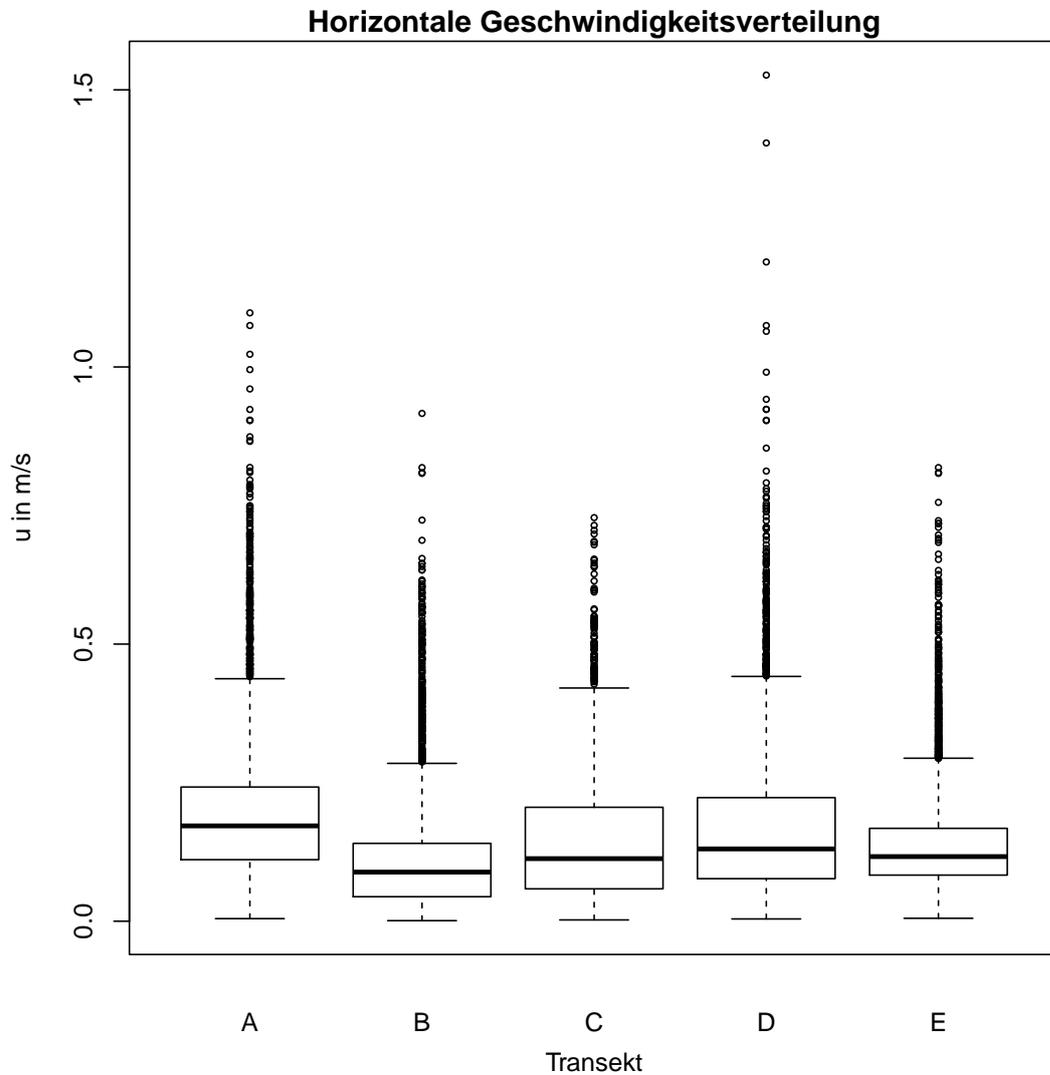


Abbildung 14: Beträge der Momentangeschwindigkeiten an den Auswertepunkten in den Transekten A bis E (alle drei Tiefen) aus der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012, dargestellt für den beschriebenen Auswertungszeitraum in Zeitintervallen von 5 s

nen Zeitpunkten der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses bei einer Dauerstauhöhe von 30 cm.

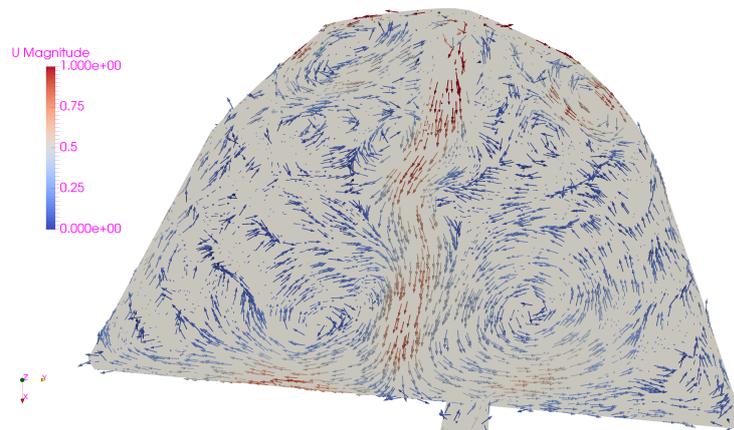
Geschwindigkeitsvektoren 25 cm über der Beckensohle aus der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 sind in Abbildung 16 dargestellt. Da sich im Verlauf dieser Simulation das Strömungsbild nur gering ändert, wird es bei der Darstellung eines Zeitschritts belassen. Hierfür wird der Zeitschritt 20 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses ausgewählt, da zu diesem Zeitpunkt der Wasserstand im Absetzbecken schon genügend hoch ist und gleichzeitig noch ein hoher Zufluss von  $0,334 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  vorherrscht.

### 5.2.2 Vertikale Geschwindigkeitsverteilung

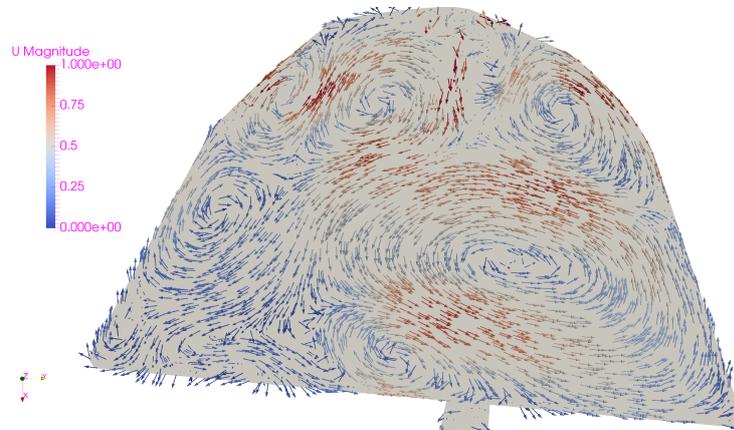
Um die Geschwindigkeiten im vertikalen Profil betrachten zu können, werden an den 37 Auswertepunkten, welche horizontal verteilt entlang der oben beschriebenen Transekte liegen, die Momentangeschwindigkeiten nach ihrer vertikalen Lage (10 cm, 25 cm und 40 cm über der Beckensohle) betrachtet. Wie oben beschrieben liegen nicht von allen Tiefen Geschwindigkeitswerte für den selben Zeitraum vor. Deshalb müssen die Werte der unteren Punkte so weit eingeschränkt werden, dass nur Zeitpunkte betrachtet werden, von denen die Geschwindigkeit in allen Tiefen vorliegt. Ansonsten würde das Ergebnis verfälscht werden, da von den unteren Punkten Zeitpunkte betrachtet würden, an denen Bedingungen (z. B. Zuflussmenge) vorgeherrscht haben, welche an den oberen Punkten nie aufgetreten sind. Die Verteilung der Momentangeschwindigkeiten in den drei verschiedenen Tiefen ist in Abbildung 17 in Form von Boxplots dargestellt. Zusätzlich können die Mittelwerte der Geschwindigkeiten in der drei Ebenen im zeitlichen Verlauf in Abbildung 18 (Bemessungsniederschlagsereignis) sowie in Abbildung 19 (Niederschlagsereignis vom 10.06.2012) betrachtet werden.

### 5.3 Geschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf

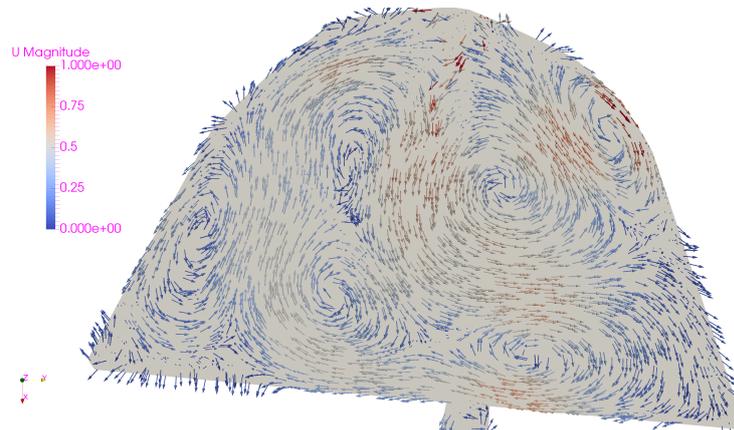
Um die Veränderung der Geschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf zu analysieren, werden die Geschwindigkeiten an allen Punkten, in vertikaler Richtung getrennt nach den drei Ebenen, zu jedem gespeicherten Zeitschritt gemittelt. Diese Mittelwerte sind in Abbildung 18 für das Bemessungsniederschlagsereignis und in Abbildung 19 für das Niederschlagsereignis vom 10.06.2012 dargestellt. Um zusätzlich einen Eindruck von der Streuung der Geschwindigkeiten zu bekommen, werden für das Niederschlagsereignis vom 10.06.2012 neben den mittleren Geschwindigkeiten im Absetzbecken auch die minimale und die maximale Geschwindigkeit im Absetzbecken im zeitlichen Verlauf dargestellt.



(a) 240 s,  $Q_{ZU} = 0,759 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$



(b) 480 s,  $Q_{ZU} = 1,347 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$



(c) 720 s,  $Q_{ZU} = 1,503 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Abbildung 15: Geschwindigkeitsvektoren ( $\text{m s}^{-1}$ ) im Absetzbecken 25 cm über der Beckensohle während des Bemessungsereignisses (30 cm DSH)

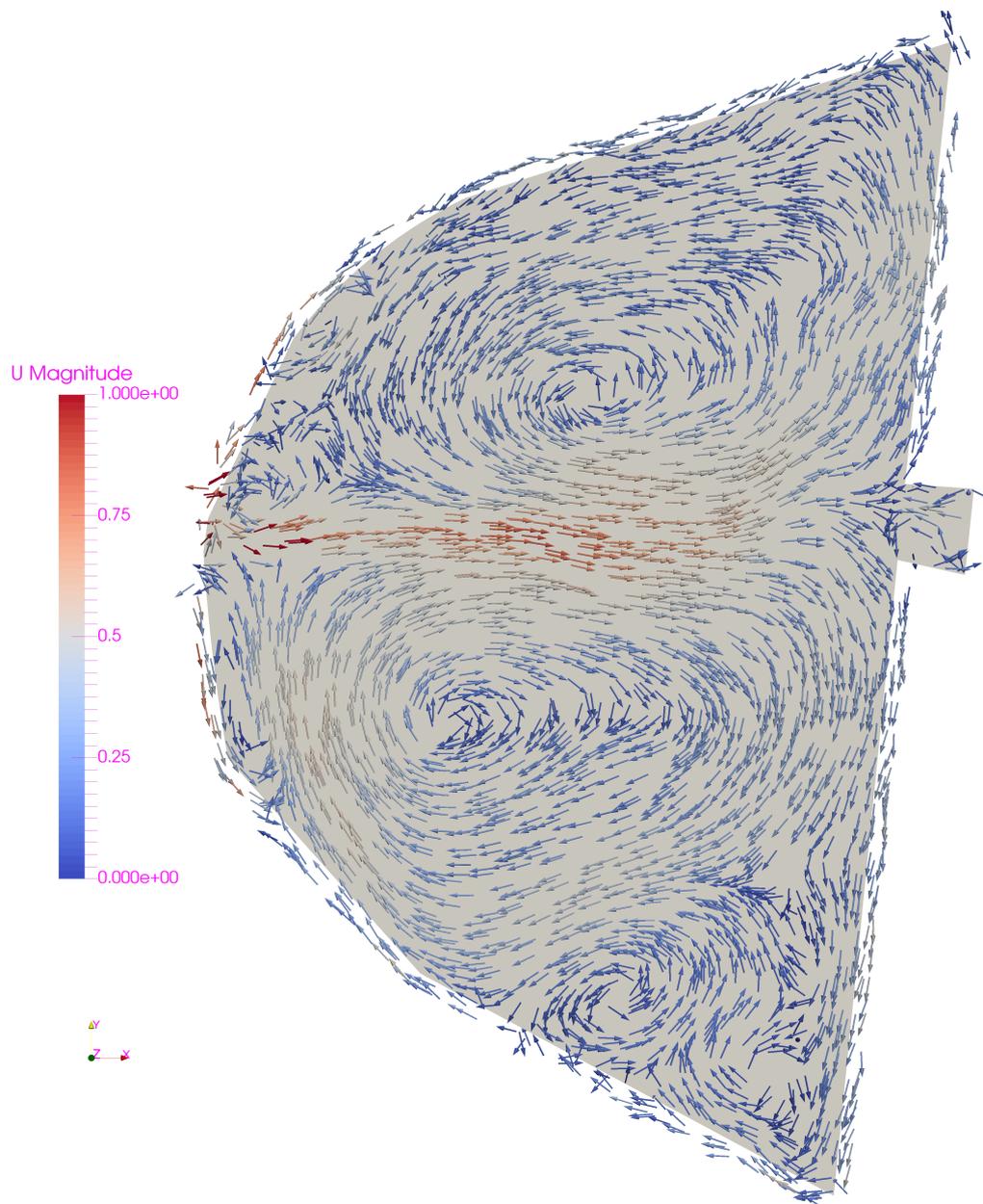


Abbildung 16: Geschwindigkeitsvektoren ( $\text{m s}^{-1}$ ) im Absetzbecken 25 cm über der Beckensole während des Niederschlagsereignisses am 10.06.2012, 20 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses;  $Q_{ZU} = 0,334 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

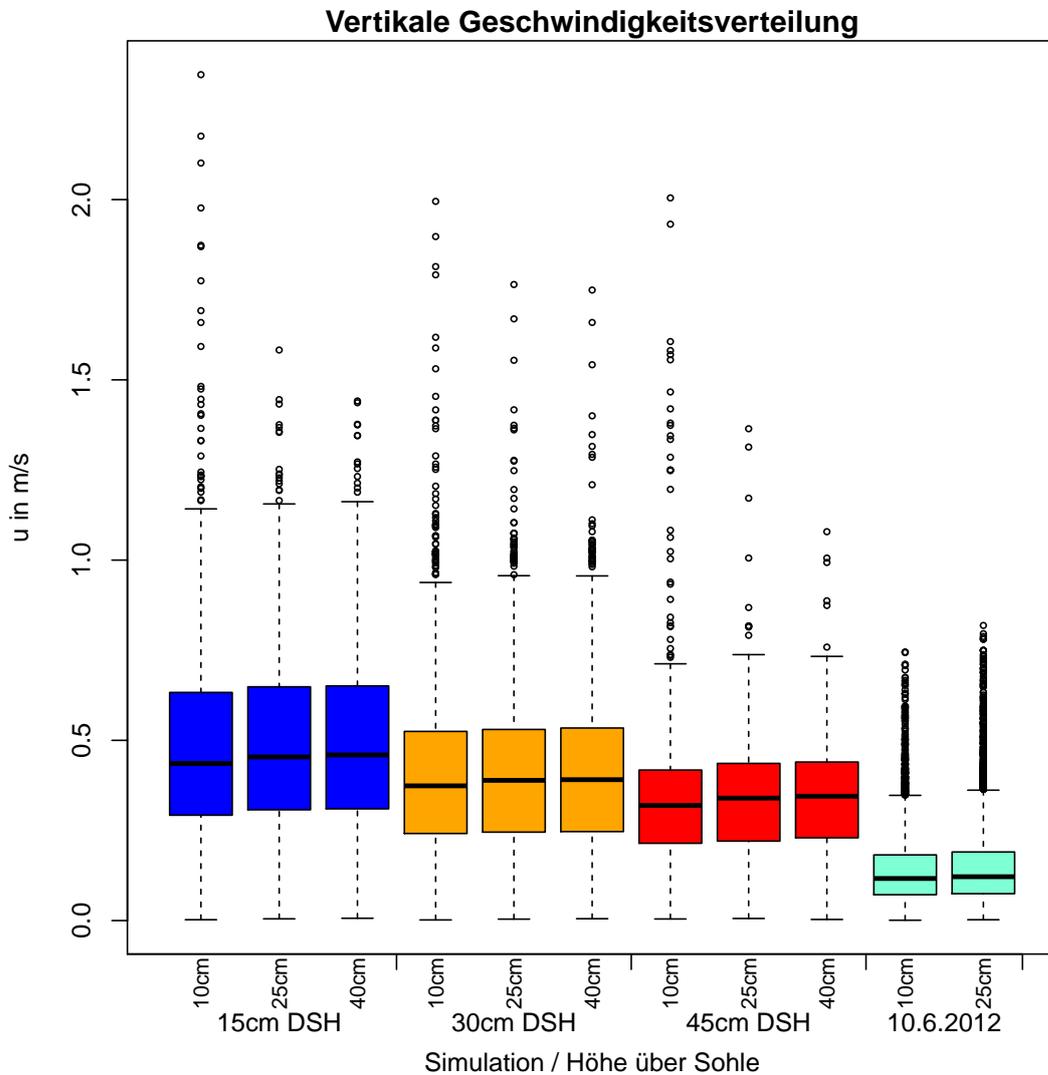


Abbildung 17: Beträge der Momentangeschwindigkeiten an allen Auswertepunkten in verschiedenen Tiefen während des Zeitraumes 9 min bis 13 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses für die Simulationen des Bemessungsniederschlagsereignisses sowie während des Zeitraums 19 min bis 70 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses für die Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012, jeweils in Zeitintervallen von 5 s

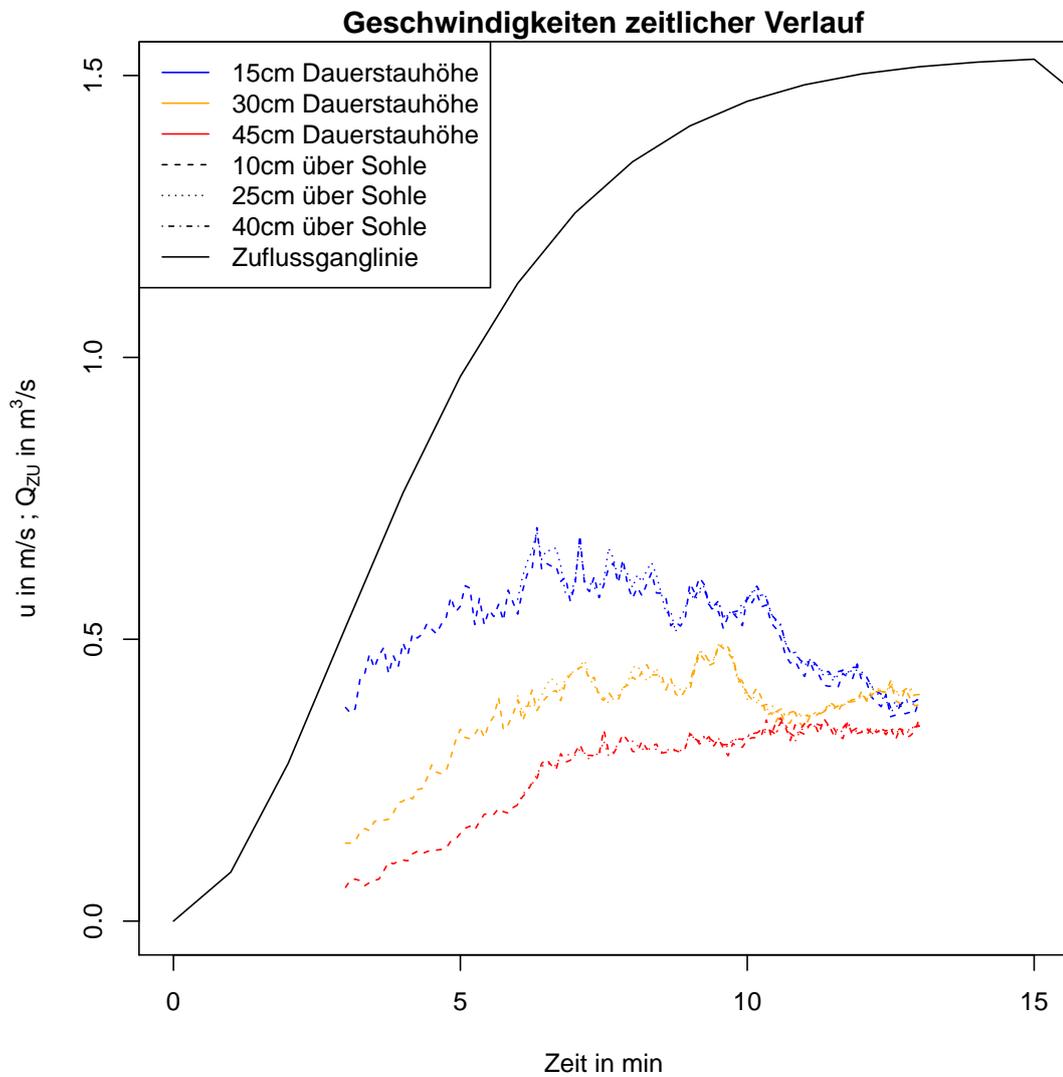


Abbildung 18: Geschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf beim Bemessungsniederschlagsereignis

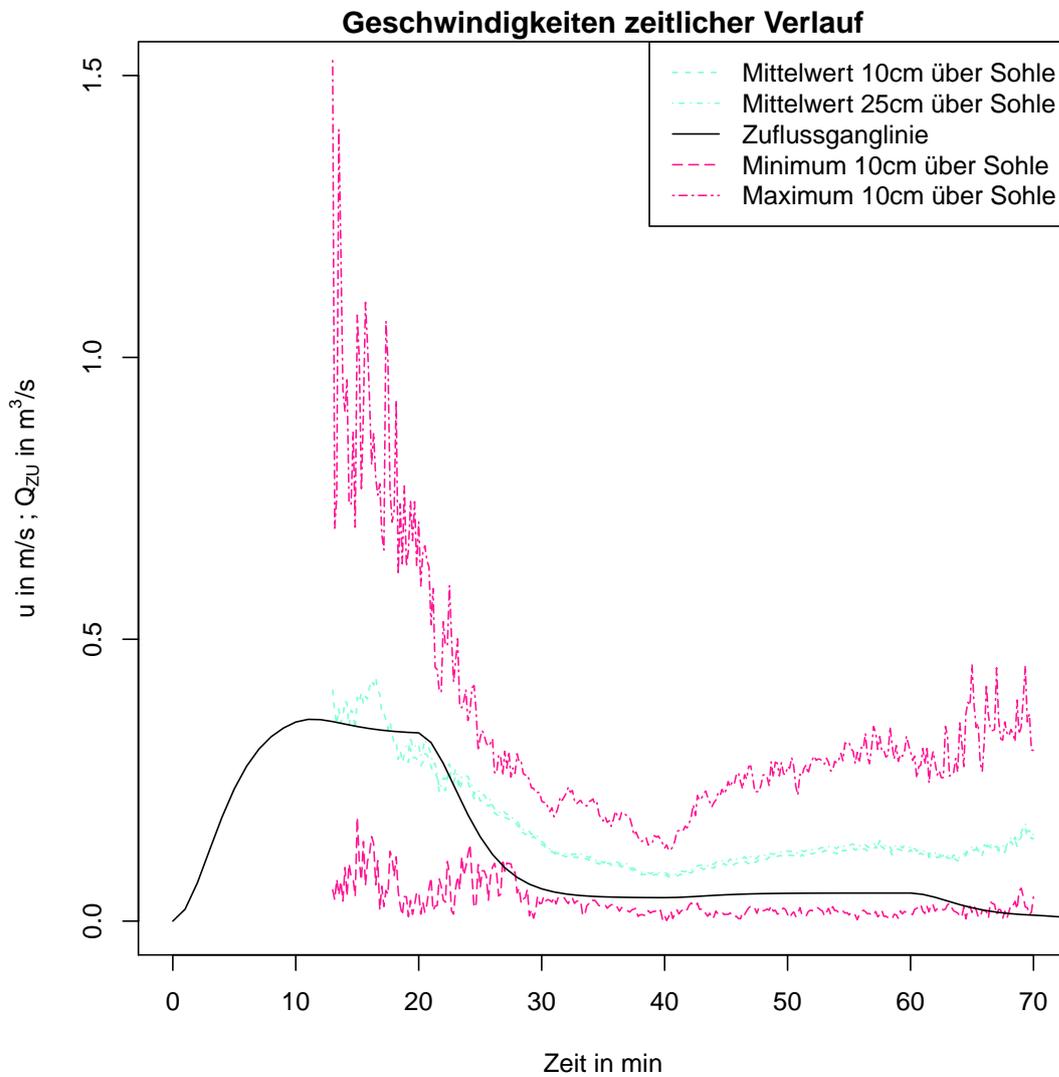


Abbildung 19: Geschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf während des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012



---

## 6 Interpretation und Diskussion

### 6.1 Validierung und Plausibilitätskontrolle

#### 6.1.1 Überprüfung der Volumsbilanz

Um zu überprüfen, ob in dem Modell Volumen durch numerische Fehler verloren geht oder entsteht, werden die Daten aus den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Funktionen zur Berechnung des Massenstroms durch die Modellränder betrachtet. Da sowohl das Wasser als auch die Luft im Modell als inkompressibel betrachtet werden (siehe Abschnitt 3.6), muss zu jedem Zeitpunkt das einströmende Volumen gleich dem ausströmenden Volumen sein. Wird das zuströmende Volumen mit einem positiven und das abströmende Volumen mit einem negativen Vorzeichen versehen, muss folgende Formel zu jedem Zeitpunkt gelten:

$$\sum_{i \in I} Q_i = 0 \quad (48)$$

Dabei steht  $i \in I$  für die Modellränder Zulauf, Ablauf und Atmosphäre. Um von dem mit den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Postprocessingfunktionen ermittelten Massenstrom auf den Volumenstrom zu kommen, wird der Massenstrom durch die Dichte des jeweiligen Fluids dividiert. Dabei wird angenommen, dass durch den Zulauftrand und durch den Ablauftrand nur Wasser fließt. Für den Zulauftrand entspricht diese Annahme der angesetzten Randbedingung für  $\alpha$  (siehe Abschnitt 3.7). Für den Ablauf muss kontrolliert werden, ob die gesamte Fläche des Ablaufs ständig mit Wasser bedeckt ist. Am Modellrand für die Atmosphäre wird angenommen, dass der gesamte Massenstrom an diesem Rand aus Luft besteht. Für die zuströmende Masse entspricht diese Annahme wieder der Randbedingung für  $\alpha$ , für die abströmende Masse muss sichergestellt werden, sodass das Modell hoch genug ist, dass kein Wasser durch den Atmosphärenrand austreten kann. Mit diesen Annahmen können die Massenströme aus den Postprocessingfunktionen auf folgende Weise in Formel 48 eingesetzt werden. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 20 dargestellt.

$$\sum_{i \in I} Q_i = \frac{1}{\rho_W} \frac{dm_{ZU}}{dt} + \frac{1}{\rho_W} \frac{dm_{AB}}{dt} + \frac{1}{\rho_L} \frac{dm_{ATM}}{dt} \quad (49)$$

$\frac{dm}{dt}$  ..... Massenstrom  $[\frac{dm}{dt}] = \text{kg s}^{-1}$

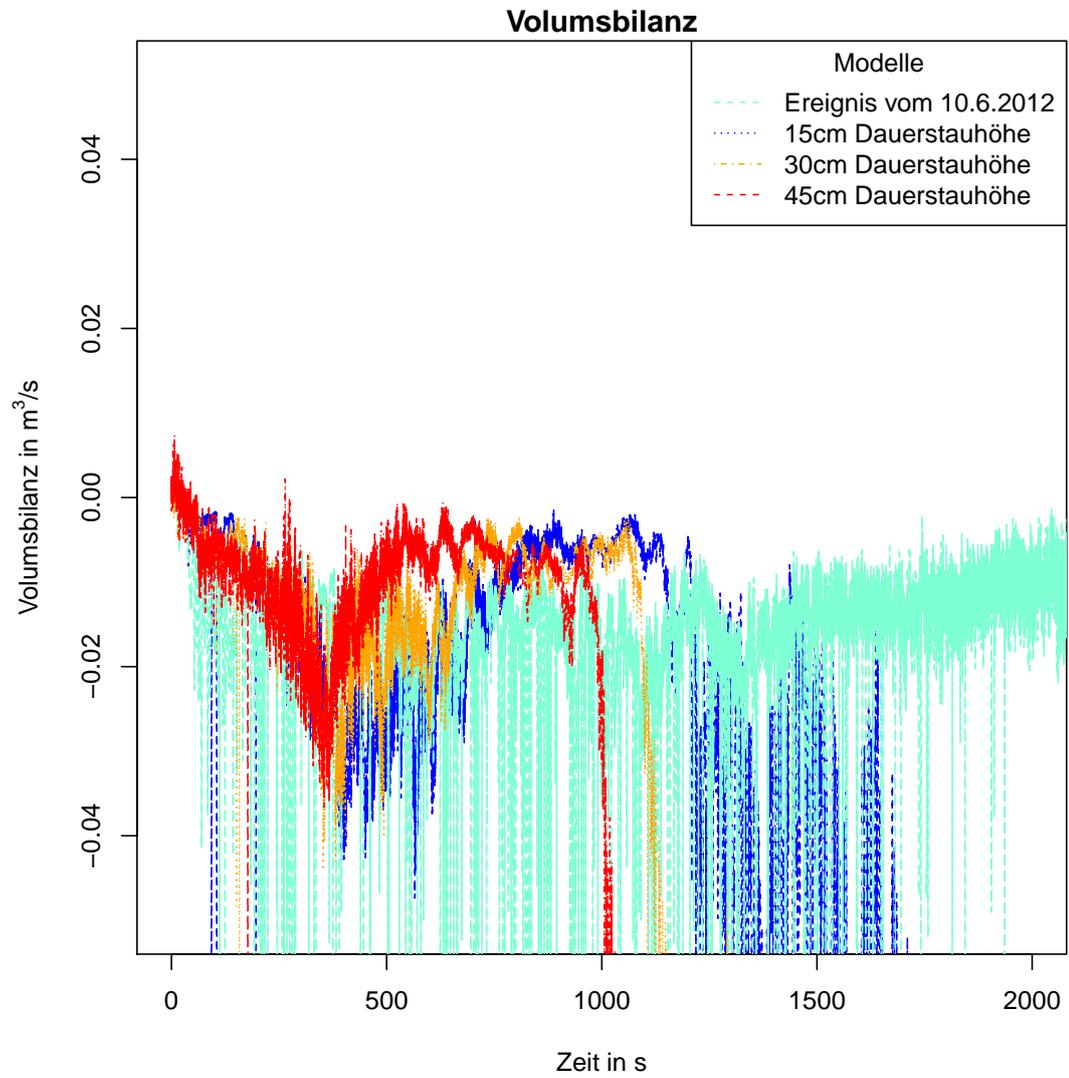


Abbildung 20: Volumsbilanzen

Um neben den Momentanwerten der Volumenstrombilanz auch zu kontrollieren, ob es einen Trend gibt, also ob tendenziell eher Volumen verloren geht oder entsteht wird Formel 49 über die Zeit integriert. Das Ergebnis von Gleichung 50 ist in Abbildung 21 dargestellt.

$$\int \sum_{i \in I} Q_i dt = \int \left( \frac{1}{\rho_W} \frac{dm_{ZU}}{dt} + \frac{1}{\rho_W} \frac{dm_{AB}}{dt} + \frac{1}{\rho_L} \frac{dm_{ATM}}{dt} \right) dt \quad (50)$$

In Abbildung 20 ist zu erkennen, dass die Volumsbilanz über weite Strecken wie gefordert knapp um den Wert von  $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  schwankt, ihn allerdings tendenziell eher unterschreitet als überschreitet. Nach einer bestimmten Zeit fällt die Bilanz jedoch rasch ab. Es wird angenommen, dass der Grund dafür darin besteht, dass der Wasserspiegel zu nahe an den oberen Modellrand ansteigt und somit Wasser zur Atmosphäre hin verloren geht. Bei den Strömungsergebnissen wirkt sich das in Form der Bildung von starken Wellen aus, die ungefähr ab dem Zeitpunkt auftreten, zu dem auch die Volumsbilanz abfällt. Die negative Bilanz ergibt sich dabei durch die oben beschriebene, der Gleichung 49 zugrundegelegte Annahme, dass der gesamte Massenstrom durch die Atmosphäre in Form von Luft erfolgt. Um dies zu verhindern, müsste das Modell etwas höher ausgebildet werden. Da dazu mehr Zellen notwendig wären und dies zu längeren Rechenzeiten und höherem Speicherplatzbedarf führen würde, wurde entschieden, die Geometrien nicht weiter zu vergrößern. Im Zeitraum der ersten 780 s der Simulationen des Bemessungsniederschlagsereignisses, welcher zur Auswertung herangezogen wird, tritt das Problem noch nicht auf.

Bei Betrachtung der Integrale der Volumsbilanzen in Abbildung 21 fällt auf, dass bei allen Modellen mehr Volumen das Modell verlässt als hineinfließt. Da im Modell nur ein bestimmtes Volumen Platz hat und dieses von Anfang an voll aufgefüllt ist, folgt daraus, dass Volumen im Modell entsteht. Auffallend ist, dass der das Modell verlassende Volumenstrom nach einer bestimmten Zeit abnimmt. Da diese Abnahme bei der Simulation mit der größten Dauerstauhöhe als erstes eintritt und bei jener mit der geringsten Dauerstauhöhe als letztes, wird angenommen, dass diese Abnahme mit der Menge an im Modell befindlichem Wasser zusammenhängt. Zu Beginn der Simulationen sind vor allem bei niederen Dauerstauhöhen die Zellgrößen im Vergleich zur Größendimension der Wellen im Becken sehr groß. Es wird angenommen, dass die Ungenauigkeiten in der Volumsbilanz damit zusammenhängen.

Weiters fällt auf, dass bei der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 mehr Volumen verloren geht als bei den Simulationen zum Bemessungsniederschlagsereignis. Dies ist deshalb bemerkenswert, da der Zufluss beim Niederschlagsereignis vom 10.06.2012 nur ungefähr ein Fünftel jenes Zuflusses betragen

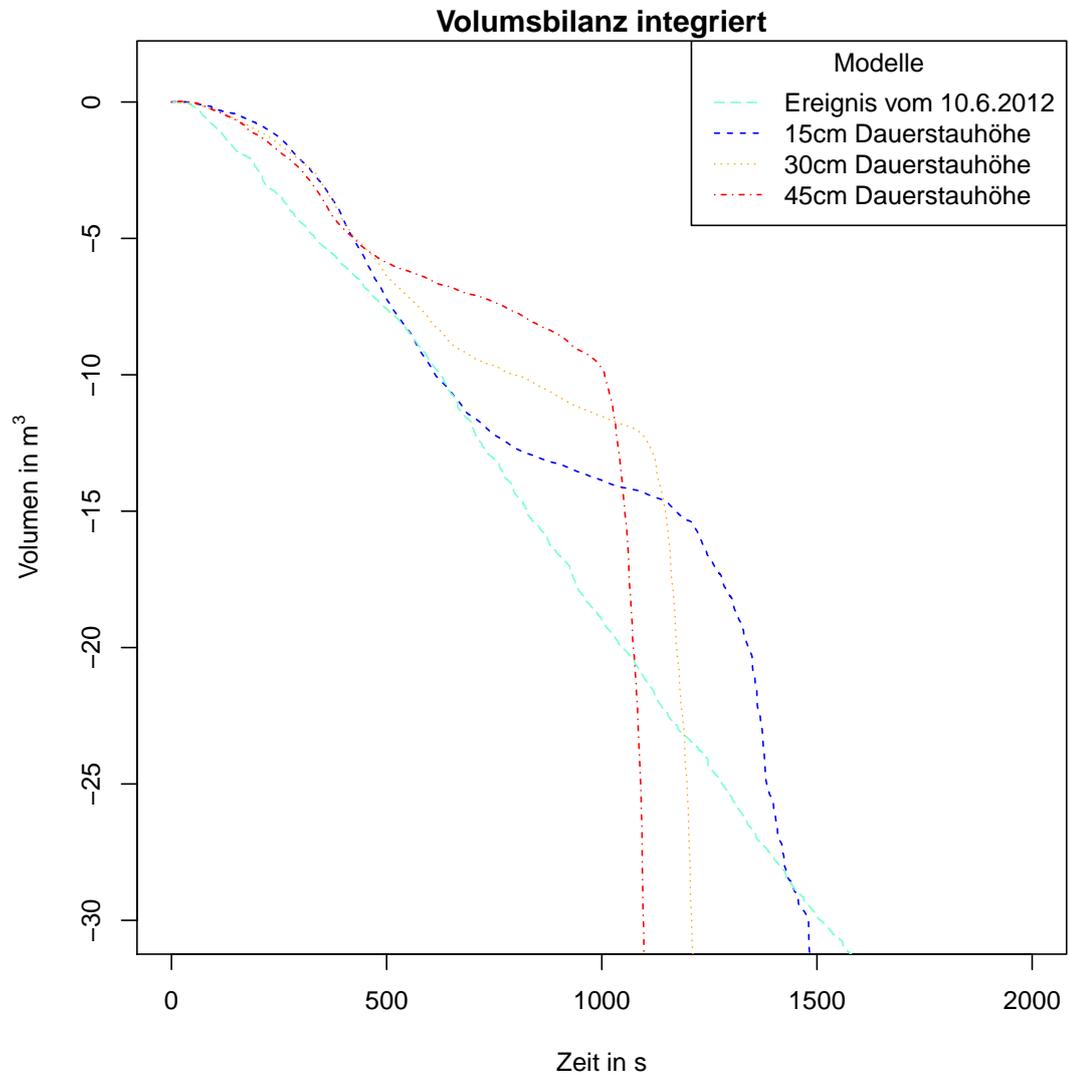


Abbildung 21: Integral der Volumsbilanzen

hat, der bei dem Bemessungsereignis auftreten würde. Begründung hierfür könnte wiederum sein, dass die Zellgrößen im Vergleich zum zuströmenden Wasservolumen und auch zum Wasserstand im Becken sehr groß sind.

Bis zu dem Zeitpunkt, an dem bei den Simulationen des Bemessungsniederschlagsereignisses Wasser durch die Atmosphäre verloren geht, gehen in Summe ungefähr  $10 \text{ m}^3$  verloren. Dies entspricht weniger als 1 % der gesamten Zulaufmenge von  $1168 \text{ m}^3$  im selben Zeitraum. Zusätzlich werden Strömungssituationen bei sehr niedrigen Wasserständen ( $< 20 \text{ cm}$ ) nicht in die Auswertung miteinbezogen. Solche Situationen liegen offensichtlich außerhalb des Anwendungsbereichs des erstellten numerischen Modells. Auf die Ergebnisse der numerischen Strömungsberechnung wurden keine Auswirkungen der Ungenauigkeiten in der Volumsbilanz erkannt. Aus diesem Grund wird für die weitere Auswertung der in Abschnitt 5 zusammengefassten Ergebnisse aus den angegebenen Zeiträumen diese Unschärfe nicht weiter betrachtet.

Bei der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 geht im Vergleich zum gesamten Zulaufvolumen mehr Volumen verloren. Bei Betrachtung des Wasserstandes im Modell fällt jedoch zu keiner Zeit eine Abweichung des Wasserstandes auf, der mit Formel 33 und dem Volumen aus den Formeln 30 bzw. 38 berechnet wurde. Es ist also auch nicht ausgeschlossen, dass die negative Volumsbilanz auf einer Ungenauigkeit in den Postprocessingfunktionen beruht, mit denen die Massenströme durch die Modellränder berechnet werden.

Neben den kontinuierlichen Volumsverlusten ist in Abbildung 21 auch der Zeitpunkt eindeutig zu erkennen, ab dem der Wasserstand im Absetzbecken jene Höhe erreicht hat, bei der Wasser zur Atmosphäre hin verloren geht. Hier fallen die Kurven der Integrale der Volumsbilanzen stark ab.

### 6.1.2 Überprüfung der Reynoldszahlen der Turbulenz

Das zur Turbulenzmodellierung verwendete SST- $k$ - $\omega$ -Turbulenzmodell ist ein high-Re-Turbulenzmodell. Damit solche Modelle angewandt werden können, müssen die lokalen Reynoldszahlen  $Re_T$  (Formel 9) größer als 1 sein (Schwarze, 2013; siehe auch Abschnitt 2.3). Ob diese Bedingung bei den durchgeführten Simulationen eingehalten wurde, wird anhand von Stichproben überprüft. Dazu werden die Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit einer Dauerstauhöhe von 45 cm und die Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 betrachtet. Bei diesen Simulationen wird die Wirbelviskosität an 100 Punkten entlang des Transekts E zum Zeitpunkt 180 s nach Beginn des Bemessungsniederschlagsereignisses bzw. 2400 s nach Beginn des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 ausgelesen und daraus mit Formel 9 die Reynoldszahl der Turbulenz berechnet.

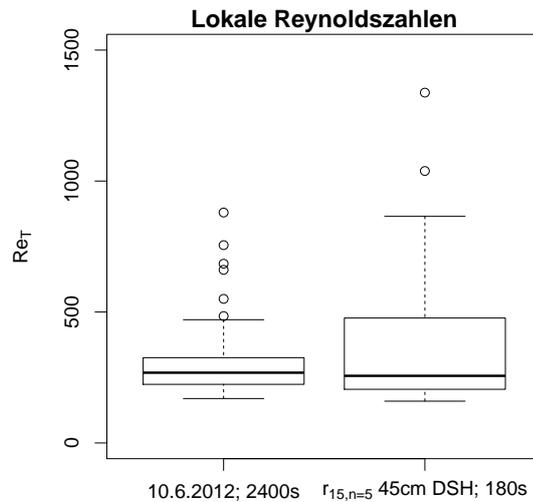


Abbildung 22: Stichproben der Reynoldszahl der Turbulenz entlang von Transekt E bei der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit einer Dauerstauhöhe von 45 cm (180 s nach Beginn des Niederschlagsereignisses) und bei der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 (2400 s nach Beginn des Niederschlagsereignisses)

Das Ergebnis ist in Abbildung 22 dargestellt.

Auf diese Weise kann gezeigt werden, dass die minimale lokale Reynoldszahl der überprüften Stichproben 160 beträgt. Damit wird der minimal geforderte Wert von 1 eindeutig überschritten. Aufgrund der Geschwindigkeiten in den Abbildungen 18 und 19 sowie 13 wird angenommen, dass die Turbulenz in den anderen durchgeführten Simulationen und zu anderen Zeitpunkten höher ist als in den untersuchten Stichproben. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen, dass die Bedingung  $Re_T \gg 1$  bei allen Simulationen eingehalten wird.

### 6.1.3 Sensitivitätsanalyse

Insgesamt wurden im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit über 30 verschiedene Versionen von Modellen des Absetzbeckens Auhof-Wolfgraben erstellt und damit unterschiedliche Strömungssituationen berechnet. Bei den verschiedenen Versionen wurden vor allem unterschiedliche Netze getestet, aber auch der Einfluss von verschiedenen numerischen Diskretisierungsschemen überprüft. Als Ergebnis daraus kann festgehalten werden, dass in Zellen mit zu hoher maximaler skewness und

non-orthogonality unrealistisch hohe Geschwindigkeiten ( $\gg 100 \text{ m s}^{-1}$ ) auftreten. Als Folge davon kann das Modell nicht mehr konvergieren.

Weiters wurden Simulationsergebnisse verglichen, welche mit verschiedenen Rechennetzen (Knoten leicht verschoben, unterschiedliche Netzdichte) erzielt wurden. Mit freiem Auge sind keine Unterschiede in den Ergebnissen aufgefallen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Simulationsergebnisse unabhängig vom verwendeten Rechenetz sind.

Neben den strukturierten Rechennetzen aus Hexaedern wurden auch Rechenetze aus Tetraedern getestet, welche im Programm Salome erstellt wurden. Mit diesen Netzen konnten jedoch keine plausiblen Ergebnisse erzielt werden.

Auch bei der letzten Version des Rechenetzes (strukturiertes Rechenetz aus Hexaedern; siehe auch Abschnitt 3.2) waren noch Bereiche zu beobachten, in denen sehr hohe Geschwindigkeiten auftraten. Dabei handelt es sich vor allem um einige Zellen im Bereich des Zulaufs und die Wasseranschlagslinie an der Beckenböschung. Durch die Auswahl von Diskretisierungsschemen, welche für Netze mit hoher non-orthogonality geeignet sind und wie sie in Abschnitt 3.3 beschrieben werden, konnten diese Problem gelöst werden. Schließlich konnte mithilfe dieser Diskretisierungsschemen auch der Zeitschritt um einiges vergrößert und dadurch die Berechnung beschleunigt werden. Auffallend bei dieser Endversion des Modells ist jedoch, dass die Courant-Zahl bei einzelnen Berechnungsschritten kurzfristig stark ansteigt und beim nächsten Berechnungsschritt wieder abfällt.

#### 6.1.4 Vergleich mit einem physikalischen Modell

Kessler und Steurer (2012) haben im Rahmen eines konstruktiven Projekts an der Universität für Bodenkultur Wien ein physikalisches Modell der Absetzanlage Auhof-Wolfsgraben erstellt. Das Froude-ähnliche Modell wurde im Längenmaßstab  $M_L = 50$  erstellt. Die Versuche wurden bei einem Zufluss durchgeführt, der in der Natur  $3,237 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  entsprechen würde. Mit Farbtracerversuchen konnte festgestellt werden, dass ein Großteil des zufließenden Wassers auf geradlinigem Weg vom Zulauf zum Ablauf des Absetzbeckens fließt (siehe Abbildung 23c). Dadurch werden große Bereiche des Absetzbeckens kaum genutzt, und die Geschwindigkeiten in der Mitte des Absetzbeckens sind um einiges höher als in Fließrichtung links und rechts davon<sup>3</sup> (Kessler und Steurer, 2012).

---

<sup>3</sup>Da davon auszugehen ist, dass die physikalischen Modellversuche unter stationären Bedingungen ( $Q_{ZU} = Q_{AB}$ ) durchgeführt wurden, wurde bei diesen Versuchen ein Zustand betrachtet, bei dem Wasser über das Überfallwehr aus dem Absetzbecken abfließt. Das Ergebnis, dass nur ein geringer Teil des Absetzbeckens tatsächlich durchflossen wird, kann also auf den Großteil der zu erwartenden Niederschlagsereignisse nicht übertragen werden, da erst bei sehr intensiven

Anhand dieses Ergebnisses kann überprüft werden ob das in dieser Arbeit erstellte numerische Modell des Absetzbeckens mit dem physikalischen Modell übereinstimmt. Dazu werden (zusätzlich zu den Geschwindigkeitsvektoren) Stromlinien ausgehend vom Zulauf des Absetzbeckens betrachtet, und mit einem Foto des Farbtracerversuchs von Kessler und Steurer (2012) in Abbildung 23 verglichen. Es wird angenommen, dass die physikalischen Modellversuche von Kessler und Steurer (2012) unter stationären Bedingungen ( $Q_{ZU} = Q_{AB}$ ) durchgeführt wurden. Eine solche Situation wurde mit den numerischen Modellen nicht simuliert. Damit für den Vergleich im numerischen Modell möglichst ähnliche Bedingungen (hoher Zufluss und hoher Abfluss) wie im physikalischen Modell vorherrschen, werden für den Vergleich zwei Zeitschritte der Ergebnisse des numerischen Modells gewählt, zu denen möglichst ähnliche Bedingungen wie bei den physikalischen Versuchen vorherrschen. Auf Basis dieser Überlegung werden die Zeitschritte 15 min und 17 min nach Einsetzen des Niederschlagsereignisses im Modell mit einer Einstauhöhe von 45 cm in Abbildung 23 betrachtet. Zu diesen Zeitpunkten herrscht noch ein hoher Zufluss über  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  und auch der Überlauf am Ablauf ist bereits angesprungen, wodurch ein hoher Abfluss vorliegt (siehe auch Abbildung 6). Ein späterer Zeitpunkt, bei dem Zufluss und Abfluss ungefähr gleich hoch wären, kann nicht betrachtet werden, weil das Modell aus dem oben beschriebenen Grund zu diesen Zeitpunkten keine plausiblen Ergebnisse liefern kann (Wasser entweicht durch Atmosphäre, siehe oben).

In Abbildung 23 ist eindeutig zu erkennen, dass der Fließweg des Tracers vom Zulauf zum Ablauf des Absetzbeckens im physikalischen Modell mit den Stromlinien zu den beiden betrachteten Zeitpunkten im numerischen Modell übereinstimmt. Nicht nur der generelle Fließweg vom Zulauf zum Ablauf, sondern vor allem auch die Tatsache, dass alle Stromlinien über den rechten Bereich des Absetzbeckens verlaufen, stimmt mit dem Bild des Farbtracerversuchs überein. Aus dieser Übereinstimmung der Ergebnisse des numerischen Modells mit den Beobachtungen am physikalischen Modell kann geschlossen werden, dass die Ergebnisse der numerischen Modelle durchaus als plausibel betrachtet werden können.

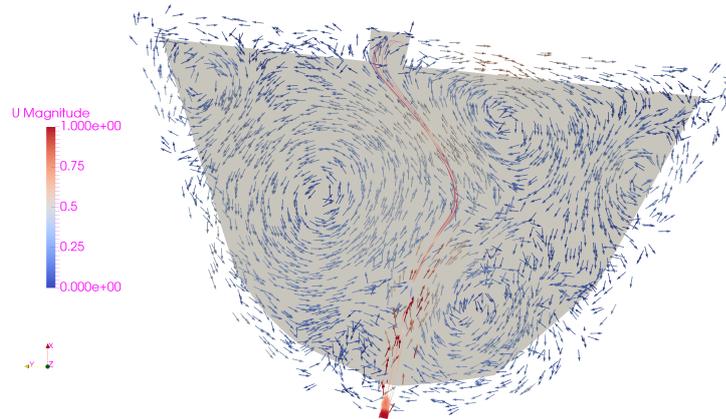
### 6.1.5 Vergleich mit Beobachtungen am Absetzbecken im Betrieb

Lins (2013) hat die Strömung im Absetzbecken während der von ihm beobachteten Niederschlagsereignisse folgendermaßen beschrieben:

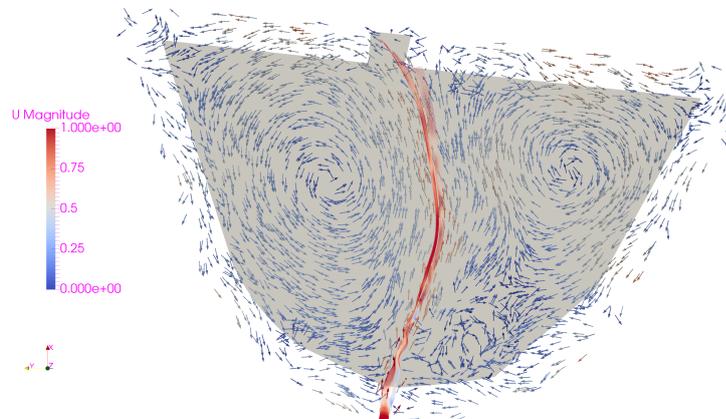
*„Der Spülstoß zu Beginn des Ereignisses in das aufgrund des trockenfallenden Betriebs leere Becken dürfte hohe Schleppspannungen*

---

Niederschlagsereignissen der Wasserstand im Absetzbecken so hoch ansteigt, dass es zu einer Überströmung des Überfallwehres kommt.



(a) 900 s,  $Q_{ZU} = 1,529 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $Q_{AB} = 0,283 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $u$  in  $\text{m s}^{-1}$



(b) 1020 s,  $Q_{ZU} = 1,254 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $Q_{AB} = 0,589 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $u$  in  $\text{m s}^{-1}$

Da die Bemühungen um die Zustimmung der Rechteinhaber nicht erfolgreich waren, kann diese Abbildung in der elektronischen Version dieser Arbeit nicht angezeigt werden. Es wird auf die Printversion verwiesen, welche an der Universitätsbibliothek der Universität für Bodenkultur Wien einsehbar ist (<http://www.boku.ac.at/bib/>).

(c) Abbildung von Kessler und Steurer (2012);  
 $Q_{ZU} = Q_{AB} = 0,1831 \text{ l s}^{-1} \hat{=} 3,327 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Abbildung 23: Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulation (45 cm DSH) mit Ergebnissen des physikalischen Modells

*an der Sohle verursachen. Dadurch kommt das beim vorhergehenden Ereignis abgelagerte Sediment erneut in Bewegung. Bei anhaltendem Zulauf und steigendem Wasserspiegel entwickelt sich eine Kreisströmung im Becken. Diese Strömung verhindert die Sedimentation der Feinfraktion. Erst mit dem Abklingen des Zulaufs beruhigt sich die Strömung im Becken“ (Lins, 2013, S.60)*

Die angesprochenen hohen Schleppspannungen zu Beginn des Ereignisses treten durchaus auch im numerischen Modell auf. Dies kann in Abbildung 19 erkannt werden. Es ist zu sehen, dass die höchsten Geschwindigkeiten zu Beginn des Niederschlagsereignisses auftreten und dann mit steigendem Wasserstand abnehmen. Auch die angesprochene „Kreisströmung“ tritt bei den numerischen Simulationen auf, wie an den Geschwindigkeitsvektoren in Abbildung 15 und Abbildung 16 zu erkennen ist.

Nach dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Beobachtungen am realen Absetzbecken kann also der Schluss gezogen werden, dass das numerische Strömungsmodell zu durchaus validen Ergebnissen führt und die in der Natur beobachteten Strömungsverhältnisse im Becken wiedergeben kann.

### 6.2 Geschwindigkeitsverteilung

In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass in verschiedenen Bereichen des Absetzbeckens durchaus unterschiedlich hohe Geschwindigkeiten auftreten. Bei der Simulation des Bemessungsniederschlagsereignisses mit der Dauerstauhöhe von 15 cm und 30 cm treten die höchsten Geschwindigkeiten entlang von Transekt A auf. Dies liegt hauptsächlich am Punkt A1, der direkt hinter dem Zulauf liegt (siehe Abbildung 8). Bei einer Dauerstauhöhe von 45 cm während eines Bemessungsniederschlagsereignisses ist offensichtlich eine geringere Beruhigungsstrecke nach dem Zulauf notwendig. Für die Sedimentationsleistung positiv sind sicher die im Vergleich zu anderen Bereichen im Absetzbecken geringen Geschwindigkeiten im Bereich des Ablaufs bei Punkt A7 (siehe Abbildung 8)

Bei allen untersuchten Dauerstauhöhen treten tendenziell im hinteren Bereich des Absetzbeckens (Transekt E) die geringsten Geschwindigkeiten auf. Interessant ist, dass die Geschwindigkeiten im rechten Bereich des Absetzbeckens (Transekt B) bei der Simulation mit 45 cm Dauerstauhöhe höher sind als mit den beiden simulierten geringeren Dauerstauhöhen. Grund dafür könnte sein, dass bei höherem Wasserstand – z. B. induziert durch eine Kreisströmung – ein Großteil des Wassers über den, vom Zulauf aus gesehen, rechten Bereich des Absetzbeckens abfließt. Abbildung 23 gibt einen Eindruck davon, wie ein solches Strömungsbild aussehen

könnte.

Bei den Geschwindigkeiten in verschiedenen Abständen von der Sohle ist zu erkennen, dass bei allen Simulationen mit zunehmenden Abstand von der Sohle etwas höhere Geschwindigkeiten auftreten (siehe Abbildung 17). Dies lässt sich dadurch erklären, dass durch die größere Entfernung von der Beckensohle auch der Einfluss der Wandreibung abnimmt.

Bei Betrachtung der Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf ist nur bei der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 ein klarer Unterschied der Mittelwerte der Geschwindigkeiten 10 cm und 25 cm über der Beckensohle zu erkennen (siehe Abbildung 19). Ab dem Zeitpunkt ungefähr 20 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses liegen die mittleren Geschwindigkeiten im Abstand von 25 cm über der Sohle konstant um etwas weniger als  $0,005 \text{ m s}^{-1}$  über den Geschwindigkeiten 15 cm tiefer. In den entsprechenden Ergebnissen der Simulationen des Bemessungsniederschlagsereignisses in Abbildung 18 ist dies nicht so eindeutig zu erkennen. Zu manchen Zeitpunkten liegt die mittlere Geschwindigkeit in größerer Tiefe sogar über der Geschwindigkeit weiter oben. Begründung hierfür könnte sein, dass sich durch die größere Zulaufmenge mehr Turbulenz entwickelt.

### 6.3 Einflussfaktoren auf die Strömungen im Absetzbecken

Aus den Ergebnissen der durchgeführten numerischen Strömungssimulationen soll abgeleitet werden, wodurch die Strömungsgeschwindigkeiten im Absetzbecken beeinflusst werden. In Abbildung 17 ist zu erkennen, dass bei den Simulationen des Bemessungsniederschlagsereignisses höhere Strömungsgeschwindigkeiten im Absetzbecken auftreten als bei dem Niederschlagsereignis vom 10.06.2012, dessen Intensität ungefähr nur ein Viertel der Intensität des Bemessungsniederschlagsereignisses betragen hat (siehe Abbildung 5). Daraus lässt sich schließen, dass die Niederschlagsintensität Einfluss auf die Strömung im Absetzbecken hat. Offensichtlich bilden sich mit zunehmendem Zufluss auch mehr Kreisströmungen und die Strömung im Absetzbecken wird generell unruhiger. Dies ist gut beim Vergleich der Abbildungen 15 und 16 zu erkennen. Während des Bemessungsniederschlagsereignisses bilden sich ständig neue Kreisströmungen und lösen sich wieder auf. Bei der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 bleibt je eine große Kreisströmung im linken und im rechten Teil des Absetzbeckens, wie sie in Abbildung 16 zu erkennen sind, über lange Zeit erhalten.

Aus den Ergebnissen der numerischen Simulationen lässt sich weiters ableiten, dass neben der Zuflussgeschwindigkeit auch der Wasserstand im Absetzbecken einen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeiten hat. Diese Beobachtung wird

im folgenden Abschnitt analysiert.

### 6.4 Vergleich verschiedener Dauerstauhöhen

In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass eine Erhöhung der Dauerstauhöhe zu einer Verringerung der Fließgeschwindigkeiten führt. Zusätzlich reduziert sich auch die Streuung der Verteilung der Geschwindigkeiten, was vor allem an der mit steigender Dauerstauhöhe geringeren Anzahl an Ausreißern zu erkennen ist.

Auch in Abbildung 18 ist eindeutig der Einfluss der Dauerstauhöhe auf die Geschwindigkeit im Absetzbecken zu erkennen. Vor allem zu Beginn des Niederschlagsereignisses ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Simulation mit der niedrigsten Dauerstauhöhe um einiges höher als bei den anderen Simulationen. Es fällt auf, dass im Modell mit nur 15 cm Dauerstauhöhe nach ungefähr 7 min die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Absetzbecken sogar abnimmt, obwohl der Zufluss und damit auch die Zuflussgeschwindigkeit noch weiter ansteigen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass ab diesem Zeitpunkt die Beruhigung der Strömung durch den höheren Wasserspiegel mehr Einfluss hat als die erhöhte Zuflussgeschwindigkeit. Auch an den Strömungsvektoren in Abbildung 15 ist zu erkennen, dass es zum Zeitpunkt 8 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses (Abbildung 15b) größere Bereiche mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten gibt als zum Zeitpunkt 12 min nach Beginn des Niederschlagsereignisses (Abbildung 15c) bei einem um über  $0,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  höheren Zufluss. Noch deutlicher zu sehen ist dieser Effekt bei Betrachtung der mittleren Geschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf aus der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012, bei dem das Becken ohne Dauerstau simuliert wurde (siehe Abbildung 19). Zu Beginn fallen die Geschwindigkeiten sehr stark ab, während der Zufluss mehr oder weniger konstant bleibt. In dieser Abbildung ist auch zu erkennen, dass die höhere mittlere Geschwindigkeit im Absetzbecken zu Beginn des Niederschlagsereignisses hauptsächlich darauf zurückzuführen ist, dass in einigen Bereich sehr hohe maximale Geschwindigkeiten auftreten. Diese Geschwindigkeitsspitzen verringern sich mit der Zeit und die Streuung der Geschwindigkeiten im Absetzbecken nimmt ab. Ein höherer Wasserstand im Becken führt also zu einer besseren Verteilung der Strömung im Absetzbecken. Die minimale Geschwindigkeit im Absetzbecken ändert sich im Verlauf der Simulation nur gering.

Mit zunehmender Wasserspiegelhöhe nimmt der Einfluss eines weiter ansteigenden Wasserstandes auf die Geschwindigkeit im Becken offensichtlich ab. Dies ist zum einen dadurch erkennbar, dass die Differenzen der mittleren Geschwindigkeiten der Simulationen mit 30 cm und 45 cm Dauerstauhöhe geringer sind als jene der Simulationen mit 30 cm und 15 cm. Weiters ist in Abbildung 18 zu erkennen,

dass die Geschwindigkeiten nach 13 min bei allen drei simulierten Dauerstauhöhen ungefähr gleich hoch sind, obwohl der Wasserstand im Becken bei 15 cm Dauerstauhöhe nur ungefähr 95 cm beträgt und jener bei 45 cm Dauerstauhöhe bereits fast 120 cm erreicht hat. Da die mittlere Geschwindigkeit bei der Simulation mit 45 cm Dauerstauhöhe ab ungefähr neun Minuten nach Beginn des Niederschlagsereignisses mehr oder weniger konstant bleibt, kann angenommen werden, dass nach dieser Zeit eine Wasserspiegelhöhe im Becken erreicht wurde, bei welcher bei zusätzlicher Erhöhung keine nennenswerte Beruhigung der Strömungen im Absetzbecken mehr erzielt werden kann. Der Wasserstand im Becken beträgt zu diesem Zeitpunkt bei dieser Simulation fast 90 cm (siehe auch Abbildung 7).

Zusammenfassend kann auf Basis der Simulationsergebnisse in dieser Masterarbeit für das untersuchte Absetzbecken ein Betrieb mit einer Dauerstauhöhe von 30 cm am ehesten empfohlen werden. In den Simulationen konnten mit dieser Dauerstauhöhe die Fließgeschwindigkeiten im Becken im Vergleich zu einem Betrieb mit geringerer Dauerstauhöhe merkbar reduziert werden. Das zur Verfügung stehende Retentionsvolumen des Absetzbeckens würde sich durch den Betrieb mit einer Dauerstauhöhe von 30 cm um  $273,6 \text{ m}^3$  reduzieren. Es ist nicht zu erwarten, dass die vergleichsweise geringe zusätzliche Reduktion der Fließgeschwindigkeiten bei noch höherer Dauerstauhöhe den zusätzlichen Verlust an Retentionsvolumen rechtfertigt.

## 6.5 Abschätzungen der remobilisierten Partikelgrößen

Um mit den mittels der numerischen Simulationen ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten abschätzen zu können, welche Partikelgrößen remobilisiert werden, werden die kritischen Strömungsgeschwindigkeiten nach Shields (1936) in Abbildung 1 (Abschnitt 2.5) betrachtet und in Abbildung 24 mit den Strömungsgeschwindigkeiten aus den numerischen Simulationen verglichen.

Messungen von Lins (2013) haben ergeben, dass während des Ereignisses vom 10.06.2012 eine mittlere Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen (AFS) im Zulauf von  $204,5 \text{ mg l}^{-1}$  und im Ablauf von  $366,0 \text{ mg l}^{-1}$  vorgeherrscht hat. Daraus ergibt sich mit Formel 21 ein Wirkungsgrad von  $\eta_{Sed} = -79,0\%$ . Es wurden während dieses Ereignisses also Partikel wieder aus dem Absetzbecken ausgeschwemmt, welche sich bei vorhergehenden Niederschlagsereignissen abgesetzt haben (Lins, 2013).

Wie in der Abbildung 24 zu erkennen ist, werden bei der Simulation des Niederschlagsereignisses vom 10.06.2012 die Grenzggeschwindigkeiten von Partikeln mit einem charakteristischen Durchmesser von  $< 0,4 \text{ mm}$  an über 10 % der Beobachtungen überschritten. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass während der ersten

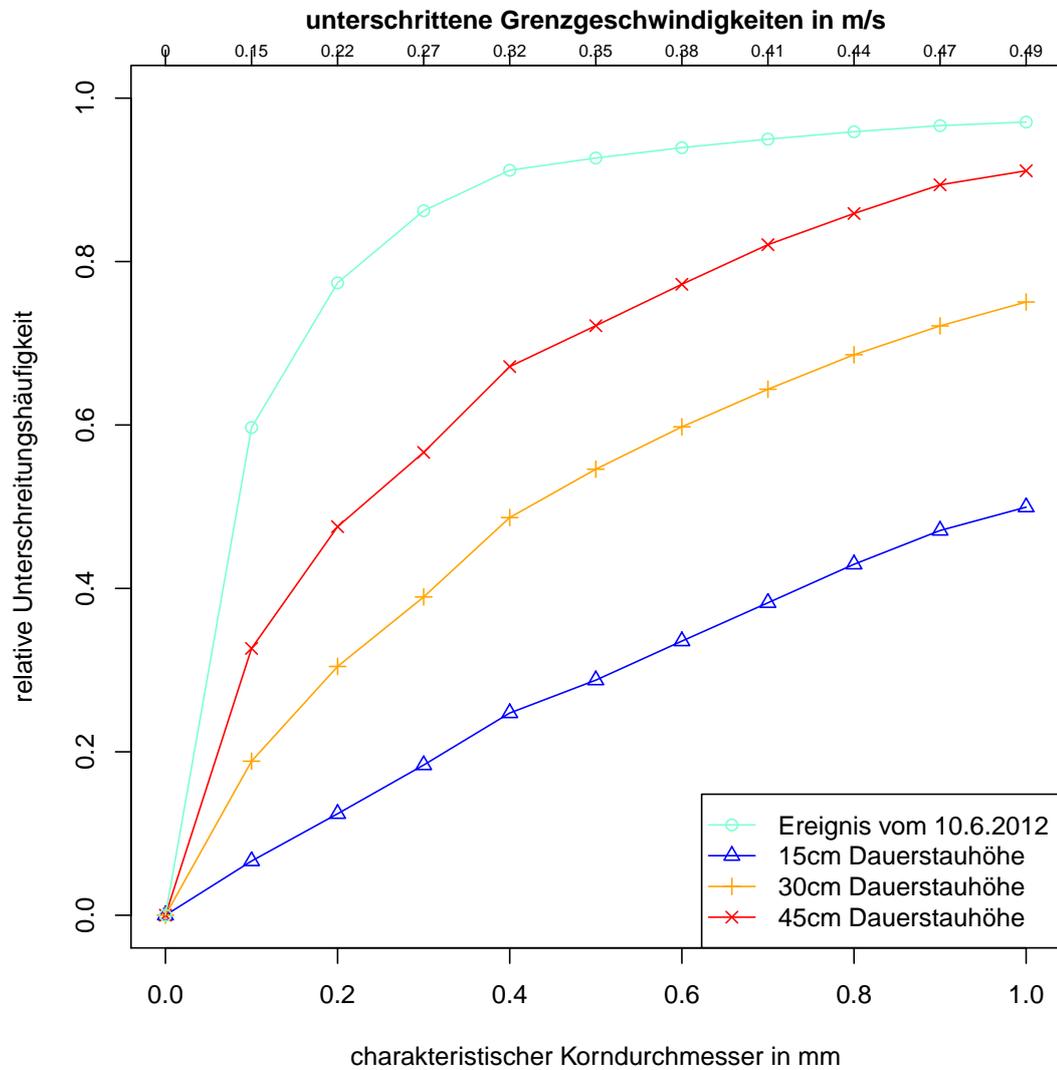


Abbildung 24: Unterschreitungshäufigkeiten der Grenzggeschwindigkeiten nach Shields (1936) 10 cm über der Sohle

13 min des Niederschlagsereignisses, welche aufgrund des geringen Wasserstands im Absetzbecken noch nicht in die Auswertung in Abbildung 24 miteinbezogen wurden, sogar noch höhere Geschwindigkeiten vorgeherrscht haben. Es ist also nachvollziehbar, dass Partikel dieser Größe im Becken remobilisiert wurden.

In Abbildung 25 werden die Korngrößenverteilungen von Sedimentproben, welche am 05.05.2017 im Rahmen einer Bachelorarbeit aus dem Absetzbecken Auhof-Wolfgraben entnommen und von Gasser und Karbacher (2017) analysiert wurden, dargestellt. Die Lage der Probenahmestellen Sed1, Sed2 und Sed3 kann Plan 2 in Anhang 1 entnommen werden. Zusätzlich sind wie oben die aus den Simulationen ermittelten Unterschreitungshäufigkeiten von Grenzggeschwindigkeiten für Korndurchmesser zwischen 0,1 mm und 1,0 mm an drei Punkten in der Nähe der Probenahmestellen wiedergegeben. Die Unterschreitungshäufigkeiten der Geschwindigkeiten an den Punkten E02 und E10 kann mit der Korngrößenverteilung der Mischprobe von Sed1 und Sed3 verglichen werden. Der Punkt D4 wird der Sedimentprobe von Sed2 zugeordnet.

Da die Sedimentproben fast fünf Jahre nach dem simulierten Regenereignis vom 10.06.2012 entnommen wurden, kann klarerweise nicht davon ausgegangen werden, dass die Zusammensetzung der Sedimente direkt mit diesem Regenereignis in Zusammenhang steht. Es wird jedoch angenommen, dass das die Intensität des Regenereignisses vom 10.06.2012 repräsentativ für die meisten Regenereignisse ist, die zur Ansammlung und der Zusammensetzung der Sedimente im Absetzbecken führen.

In Abbildung 25 ist durchaus ein Zusammenhang zwischen den Unterschreitungshäufigkeiten von Grenzggeschwindigkeiten bestimmter Korndurchmesser und der Unterschreitungshäufigkeit von Körnern mit den jeweiligen charakteristischen Korndurchmessern zu erkennen. Der Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten aus der Simulation mit den Korngrößenverteilungen von Gasser und Karbacher (2017) zeigt also, dass der Ansatz, von den Strömungsgeschwindigkeiten in einem Bereich auf die dort abgesetzten Sedimente zu schließen, durchaus berechtigt und zielführend ist. Um aus den Strömungsgeschwindigkeiten im Absetzbecken genauer auf die Absetzleistung schließen zu können, wären noch weitere Vergleichsmessungen der AFS-Konzentrationen im Zulauf bzw. im Ablauf des Absetzbeckens und zusätzliche Analysen der Korngrößenverteilung der Sedimente notwendig. Zusätzlich sind für verlässliche Modelle eine exakte Zuordnung der Proben zu den entsprechenden Niederschlagsereignissen sowie Informationen über die relevanten Betriebsbedingungen zur Zeit der betrachteten Ereignisse erforderlich.

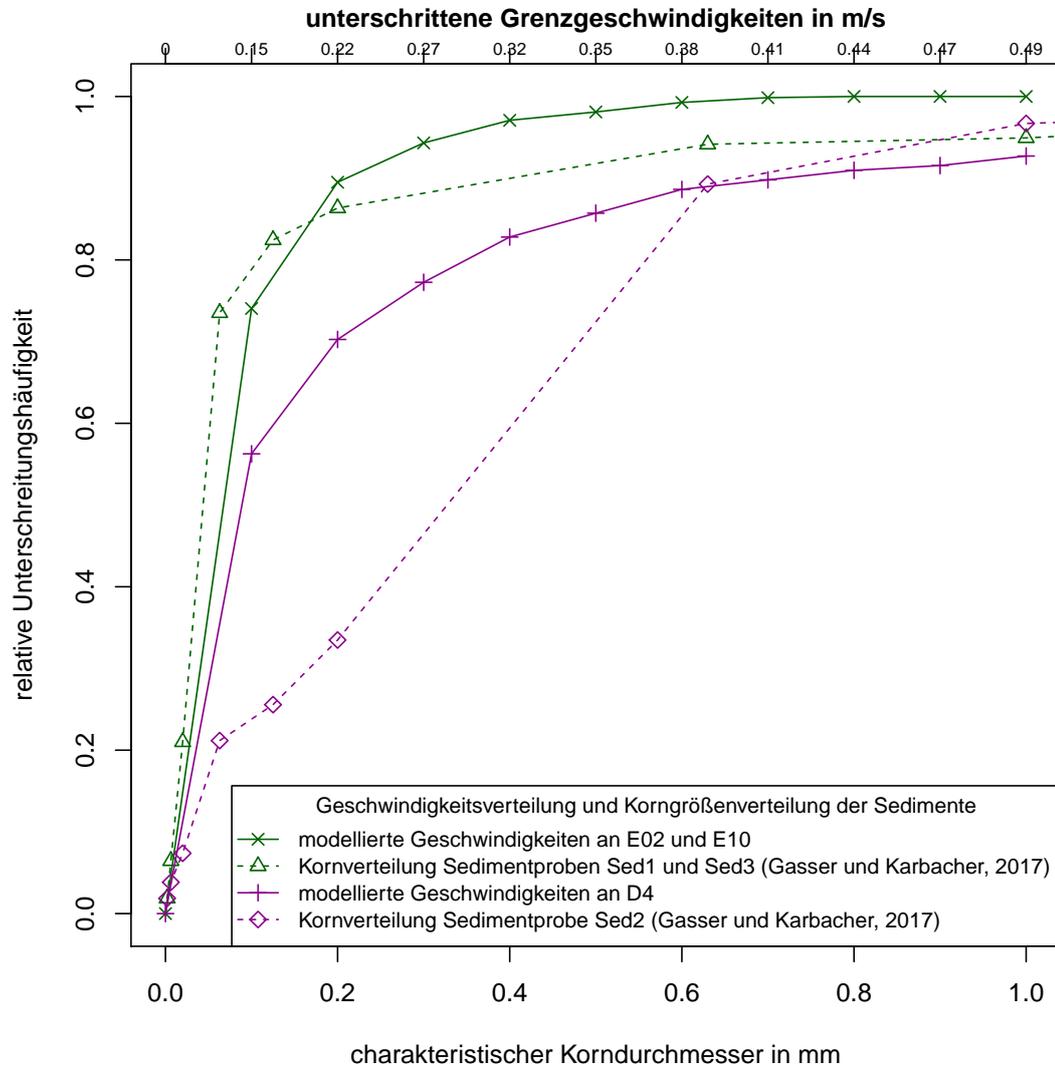


Abbildung 25: Ausschnitt aus den Korngrößenverteilungen von Sedimentproben welche am 05.05.2017 aus dem Absetzbecken Auhof-Wolfsgraben entnommen und von Gasser und Karbacher (2017) analysiert wurden im Vergleich zu den Unterschreitungshäufigkeiten von Grenzggeschwindigkeiten an den Probenahmestellen aus der Simulation des Nierschlagsereignisses vom 10.06.2012

---

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

### 7.1 Erkenntnisse zur numerischen Modellierung der Strömung in Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser

Die vorliegende Masterarbeit zeigt, dass es durchaus möglich ist, die Strömung in Absetzbecken mittels numerischer Simulationen zu untersuchen. Mit allen im Zuge der Literaturrecherche gefundenen, bisher erstellten Modellen von Absetzbecken wurden stationärere Strömungszustände simuliert. Für fast alle dieser Simulationen wurden kommerzielle Softwarepakete verwendet. Bei einigen dieser Modelle wurden neben der Strömung von Wasser auch die abzusetzenden Partikel als zusätzliche Phase modelliert. In Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser herrschen jedoch fast immer instationäre Strömungsbedingungen mit stark unterschiedlichen Wasserspiegeln vor. Das in dieser Arbeit erstellte Modell des Absetzbeckens unterscheidet sich von anderen Modellen hauptsächlich dadurch, dass der gesamte Füllungsprozess des Absetzbeckens während eines Niederschlagsereignisses als instationärer Strömungsprozess modelliert wird. Die Herausforderung liegt dabei darin, dass das Modell zur Simulation vom Anfangszustand, bei dem das gesamte Becken mit Luft gefüllt ist, bis zu dem Zustand, bei dem die Höhe des Wasserspiegels im Absetzbecken mehr als einen Meter beträgt, geeignet sein muss.

Neben der Strömungsmodellierung selbst ist die instationäre Eigenschaft der Strömung in Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser auch für die Analyse der Ergebnisse eine Herausforderung. Den meisten bisherigen Überlegungen zur Sedimentationsleistung von Absetzbecken liegt ein stationärer Strömungsprozess zugrunde. Um Möglichkeiten der instationären Modellierung der Strömung in Absetzbecken in Bezug auf die Ermittlung der Sedimentationsleistung voll ausschöpfen zu können, ist zusätzliches Wissen über den Sedimentationsprozess speziell bei instationärer Strömung notwendig.

Durch die stark unterschiedlichen Strömungsbedingungen in Absetzbecken ist es nicht möglich, die abzusetzenden Partikel entweder ausschließlich als Geschiebe oder ausschließlich als Schwebstoffe zu betrachten, für die in der Hydrologie jeweils schon Ansätze zur Simulation bestehen würden. Auch dadurch ist es komplex, rein aus den Strömungsgeschwindigkeiten auf die Absetzleistung zu schließen.

Das Modell in dieser Arbeit wurde ausschließlich unter der Verwendung von Open-Source-Software erstellt und berechnet. Vor allem für die numerische Strömungsberechnung ist dies durchaus mit zusätzlichem Aufwand und Herausforderungen verbunden. Mit dem nötigen Know-how und der nötigen Erfahrung sind die Möglichkeiten bei Verwendung von freier Software jedoch teilweise sogar größer als jene, die von kommerzieller Software angeboten werden. Zusätzlich hat die Quell-

offenheit den Vorteil der lückenlosen Nachvollziehbarkeit der Berechnungen, die bei kommerzieller Software teilweise nicht gegeben ist (Jasak, 2016a). Die finanzielle Ersparnis durch die Vermeidung von Lizenzkosten für Modellierungssoftware ist enorm.

Neben der numerischen Strömungsberechnung selbst konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch das gesamte Preprocessing und Postprocessing rein auf Basis von freier Software durchgeführt werden.

### 7.2 Anwendungsbereich des erstellten numerischen Modells

Mit dem in dieser Arbeit erstellten Modell des Absatzbeckens Auhof-Wolfsgraben können durchaus plausible Ergebnisse zu den Strömungsvorgängen in diesem Absatzbecken erzielt werden. Es ist jedoch festzuhalten, dass das Modell im Rahmen dieser Arbeit nicht in strengerem Sinne validiert werden konnte. Weiters kann aus den Ergebnissen der erstellten Modelle geschlossen werden, dass die Modelle in einigen Situationen keine plausiblen Ergebnisse liefern.

Zusätzlich ist speziell festzuhalten, dass das Modell nicht geeignet ist um Strömungsvorgänge bei geringem Wasserstand im Absatzbecken zu untersuchen. Diese Einschränkung kommt daher, dass das Gefälle der Beckensohle von 3,7‰ vom Zulauf zum Ablauf bei der Erstellung der Geometrie nicht berücksichtigt wurde. Damit der Fehler durch diese Abweichung der Modellgeometrie von der realen Geometrie nicht zu groß wird, sollte der Wasserstand mindestens 10 cm betragen und somit das gesamte Becken eingestaut sein (siehe auch Abschnitt 3.1). Aufgrund der räumlichen Diskretisierung wird jedoch davon ausgegangen, dass das Modell erst ab einem Wasserstand von ungefähr 18 cm (entspricht drei Zellen in vertikaler Richtung) plausible Ergebnisse liefern kann (siehe auch Abschnitt 3.2).

Weiters wurde oben schon erwähnt, dass das Modell nicht für die Modellierung des Beckens bei sehr hohen Wasserständen verwendet werden kann, weil die Geometrie hierfür in vertikaler Richtung zu klein ist (siehe Abschnitte 6.1).

Bei der Analyse der Strömung im Absatzbecken mit sehr geringem Zufluss muss im Einzelfall überprüft werden, ob die für das  $k$ - $\omega$ -Turbulenzmodell notwendige Bedingung erfüllt ist, wonach die lokalen Reynoldszahlen größer als 1 sein müssen.

### 7.3 Ausblick

Aus den Ergebnissen der in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen können einige Möglichkeiten entwickelt werden, das Modell des Absatzbeckens weiter zu

verbessern. Im Folgenden sollen einige davon beschrieben werden.

Um die in das Modell durch den Zulauf eingebrachte Energie und den Impuls genauer zu modellieren, kann das Zulaufrohr in das Becken um einige Meter stromaufwärts verlängert werden. Dadurch würde sich der bei geringen Zulaufmengen zu erwartende Teilfüllungszustand im Zulaufrohr einstellen und die modellierte Zulaufgeschwindigkeit näher an der realen Geschwindigkeit sein.

Um die Strömung im Absetzbecken genauer zu modellieren, könnte statt des strukturierten Rechenetzes ein unstrukturiertes verwendet werden. Dadurch würde sich ein Netz mit einer niedrigeren non-orthogonality und skewness erstellen lassen. Für so ein Netz könnten dann genauere Diskretisierungsschemen verwendet werden, wodurch eventuell auch die Simulationsergebnisse verbessert werden könnten. Für die Erstellung eines unstrukturierten Netzes in OpenFOAM steht das Tool `snappyHexMesh` zur Verfügung (Greenshields, 2016).

Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit wäre es, anstatt des verwendeten high-Re-Turbulenzmodells mit Wandfunktionen ein low-Re-Turbulenzmodell zu verwenden. Dadurch kann die Strömung in den hauptsächlich interessanten wandnahen Bereichen noch besser modelliert werden, und es können verlässlichere Aussagen über die Geschwindigkeiten knapp über der Sohle gemacht werden (Schwarze, 2013). Ist die Geschwindigkeit knapp über Sohle bekannt, kann die Sohlschubspannung berechnet und daraus geschlossen werden, welche Partikelgrößen mobilisiert werden.

Nach Niederschlagsereignissen mit hoher Intensität können Sedimentproben entnommen werden und diese dann wie in Abschnitt 6.5 mit den Strömungsgeschwindigkeiten aus Simulationen des Niederschlagsereignisses verglichen werden (siehe Abschnitt 6.5). Auf diese Weise kann eventuell ein stochastischer Ansatz zur Abschätzung der Sedimentationsleistung aus den simulierten Strömungsgeschwindigkeiten entwickelt werden. Neben der gesamten Sedimentationsleistung könnte mit einem solchen Ansatz auch ermittelt werden, an welchen Stellen im Absetzbecken sich Sedimente hauptsächlich ansammeln.

Als Erweiterung des numerischen Strömungsmodells können die abzusetzenden Partikel in das Modell integriert werden. Für den ersten Schritt würde es sich anbieten, die Partikel als zusätzliche Fluidphase zu betrachten. Mit dem OpenFOAM Solver `multiphaseInterFoam` könnten auf diese Weise die Partikel in das Modell integriert werden.

An der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH) werden Strömungen unter dem Einfluss von absetzbaren Partikeln mit eigens zusammengesetzten OpenFOAM Solvern simuliert (Chadha et al., 2017). Mit solchen Modellen könnten die Absetzvorgänge in Absetzbecken zur Reinigung von Straßenwasser noch

genauer analysiert werden.

## Literatur

- Aigner, D. und G. Bollrich (2015). *Handbuch der Hydraulik für Wasserbau und Wasserwirtschaft*. Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH. ISBN: 978-3-410-21341-3.
- ANSYS, Inc. (2017). *ANSYS*. URL: <http://www.ansys.com> (besucht am 18.03.2017).
- ASFINAG – Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (2015). *Planungshandbuch Straße-Bau, Technische Richtlinie*. Version 2. Wien. 97 S.
- BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2017). *eHYD*. URL: <http://ehyd.gv.at/> (besucht am 14.05.2017).
- CFD Online (2017). *CFD online*. URL: <https://www.cfd-online.com/>.
- CFD Online Forum (2011). *Artificial high velocities at the interface using interFoam*. URL: <https://www.cfd-online.com/Forums/openfoam-solving/85412-artificial-high-velocities-interface-using-interfoam.html> (besucht am 04.04.2017).
- CFD Online Wiki (2015). *Turbulence Intensity*. URL: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_intensity#Estimating\\_the\\_turbulence\\_intensity](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity#Estimating_the_turbulence_intensity) (besucht am 01.04.2017).
- Chadha, T., R. Henniger, A. Kubik und Y. Reinhardt (2017). *Simulation of Particle-Laden Flows*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. URL: <http://www.ifd.mavt.ethz.ch/research/group-kleiser/particle-laden-flows.html> (besucht am 29.05.2017).
- Chen, G., Q. Xiong, P. J. Morris, E. G. Paterson, A. Sergeev und Y.-C. Wang (2014). „OpenFOAM for Computational Fluid Dynamics“. In: *Notices of the AMS* 61.4, S. 354–363. DOI: 10.1090/noti1095.
- COMSOL Inc. (2017). *COMSOL*. URL: <https://www.comsol.de/> (besucht am 19.03.2017).
- Diersch, H.-J. G. (2015). „Numerische Modellierung über- und unterirdischer Strömungs- und Transportprozesse“. In: *Technische Hydromechanik 4. Hydraulische und numerische Modelle*. Hrsg. von H. Martin und R. Pohl. 3. Aufl. 4 Bde. Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH. Kap. 3, S. 129–177. ISBN: 978-3-410-24172-0.
- Dopazo, C. (1977). „On conditioned averages for intermittent turbulent flows“. In: *Journal of Fluid Mechanics* 81.3, S. 433–438. DOI: 10.1017/S0022112077002158.

- EPA – United States Environmental Protection Agency (2016). *Storm Water Management Model (SWMM)*. URL: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (besucht am 19.03.2017).
- Ferziger, J. H. und M. Perić (2008). *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-68228-8. DOI: 10.1007/078-3-540-68228-8.
- Flow Science Deutschland GmbH (2017). *FLOW-3D*. URL: <https://www.flow3d.de/> (besucht am 18.03.2017).
- FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (2010). *Gewässerschutz an Straßen. RVS 04.04.11*. Wien.
- Gasser, R. und L. Karbacher (2017). „Methoden zur Überprüfung der Sedimentationsanalyse von Partikeln“. Bachelorarbeit. Universität für Bodenkultur Wien.
- Giesecke, J. und S. Heimerl (2014). „Sandfang“. In: *Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb*. 6. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 225–236. ISBN: 978-3-642-53871-1. DOI: 10.1007/978-3-642-53871-1\_7.
- Goula, A. M., M. Kostoglou, T. D. Karapantsios und A. I. Zouboulis (2008a). „A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment. Case study: The influence of a feed flow control baffle“. English. In: *Chemical Engineering Journal* 140.1, S. 110–121. DOI: 10.1016/j.cej.2007.09.022.
- Goula, A. M., M. Kostoglou, T. D. Karapantsios und A. I. Zouboulis (2008b). „The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment - A computational fluid dynamics study“. English. In: *Water Research* 42.13, S. 3405–3414. DOI: 10.1016/j.watres.2008.05.002.
- Greenshields, C. J. (2016). *OpenFOAM*. Hrsg. von O. F. Ltd. User Guide. Version 4.0. URL: <http://openfoam.org>.
- Grotehusmann, D., U. Kasting und M. Hunze (2007). „Optimierung von Absetzbecken“. In: Bd. 54. 7. Bremerhaven, Hannover: Wirtschaftsverlag Nordrhein-Westfalen, Verlag für neue Wissenschaft. Kap. Entwässerungssysteme, S. 690–697.
- Guo, H., S. Ki, S. Oh, Y. Kim, S. Wang und J. Kim (2017). „Numerical simulation of separation process for enhancing fine particle removal in tertiary sedimentation tank mounting adjustable baffle“. English. In: *Chemical Engineering Science* 158, S. 21–29. DOI: 10.1016/j.ces.2016.09.22.
- Guyonvarch, E., E. Ramin, M. KulaHCI und B. G. Plosz (2015). „iCFD: Interpreted Computational Fluid Dynamics - Degeneration of CFD to one-dimensional

- advection-dispersion models using statistical experimental design - The secondary clarifier“. English. In: *Water research* 83, S. 396–411. DOI: 10.1016/j.watres.2015.06.012.
- He, C., J. Marsalek und Q. Rochfort (2004). „Numerical modelling of enhancing suspended solids removal in a CSO facility“. English. In: *Water Quality Research Journal of Canada* 39.4, S. 457–465. ISSN: 12013080.
- Ho, J. (2011). „Multiphase modeling study for storm water solids treatment in experimental storm water settling chamber“. English. In: *Water Science and Technology* 63.12, S. 3020–3026. ISSN: 02731223. DOI: 10.2166/wst.2011.638.
- Idelchik, I. E. (2008). *Handbook of Hydraulic Resistance*. Hrsg. von M. O. Steinberg. Hrsg. von O. G. Martynenko. Übers. von G. R. Malyavskaya. 3. Aufl. New York: Jaico Publishing House, S. 826. ISBN: 81-7992-118-2.
- Jasak, H. (2016a). *Introduction to OpenFOAM: Finite Volume Discretization*. Hrsg. von K. Hoste. YouTube. OpenFOAM introductory course at Ghent University in May 2016. Wikki Ltd. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=a4B\\_oXR5Kzs&list=PLqXHj6bcnY9RoIgzef6xDh5L9bbeK3BL&index=8](https://www.youtube.com/watch?v=a4B_oXR5Kzs&list=PLqXHj6bcnY9RoIgzef6xDh5L9bbeK3BL&index=8) (besucht am 27.02.2017).
- Jasak, H. (2016b). *Introduction to OpenFOAM: Multi-Phase and Free-Surface Flows*. Hrsg. von K. Hoste. YouTube. OpenFOAM introductory course at Ghent University in May 2016. Wikki Ltd. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=oPiDnB8Ibc8&index=6&list=PLqXHj6bcnY9RoIgzef6xDh5L9bbeK3BL> (besucht am 27.02.2017).
- Kessler, C. und T. Steurer (2012). *Modifikation eines Absetzbeckens für Straßenabwässer zur selektiven Entfernung von Partikeln bestimmter Größe*. Techn. Ber. Wien: Universität für Bodenkultur Wien. nicht veröffentlichtes Projekt.
- Kriš, J. und G. A. Hadi (2010). „Improvement Performance of AlWathba Settling Tank by a Computational Fluid Dynamics Model“. English. In: *Journal of Hydrology and Hydromechanics/Vodohospodarsky Casopis* 58.3, S. 201–210. DOI: 10.2478/v10098-010-0019-8.
- Land Niederösterreich (2017). *Niederösterreich Atlas*. URL: <http://atlas.noegv.at> (besucht am 06.08.2017).
- Laurien, E. und H. Oertel jr. (2013). *Numerische Strömungsmechanik. Grundgleichungen und Modelle – Lösungsmethoden – Qualität und Genauigkeit*. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg. 317 S. ISBN: 978-3-658-03145-9. DOI: 10.1007/978-3-658-03145-9.

- Lecheler, S. (2014). *Numerische Strömungsberechnung. Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele mit ANSYS 15.0*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg. 199 S. ISBN: 978-3-658-05201-0. DOI: 10.1007/978-3-658-05201-0.
- Lins, A. (2013). „Untersuchungen an zweistufigen Gewässerschutzanlagen mit trockenfallenden Bodenfilterbecken“. Masterarbeit. Wien: Universität für Bodenkultur Wien. 99 S.
- Liu, X. und M. H. Garcia (2011). „Computational Fluid Dynamics Modeling for the Design of Large Primary Settling Tanks“. English. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 137.3, S. 343–355. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000313..
- Maleki-Ardebili, M. (1995). „Sedimentation of a cylindrical particle in an oscillating fluid“. English. In: 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage. Bd. 21. 2, S. 285–303. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030193229400074T>.
- Measho Haile, T., G. Kammerer und M. Fürhacker (2014). „Probleme bei Planung und Betrieb von Absetzbecken für Straßenabwässer“. German. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 66.3, S. 112–119. DOI: 10.1007/s00506-014-0138-2.
- Morin, A., J.-F. Figue, J. Schaffner und J. Steinhardt (2008). „Advanced mechanical stormwater treatment – Numerical simulations of a counter flow particle separator“. In: 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage. 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, Scotland, UK.
- Nagy, J. (2014). *Understanding multiphase modelling (VOF)*. YouTube. Onlinetutorium. Johannes Kepler Universität Linz. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=5W02cDRB\\_iY](https://www.youtube.com/watch?v=5W02cDRB_iY) (besucht am 26.02.2017).
- NTNU – Norwegian University of Science and Technology (2016). *SSIIM*. URL: <http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiim/> (besucht am 19.03.2017).
- O’Connell, P. E., J. E. Nash und J. P. Farrell (1970). „River flow forecasting through conceptual models part II – The Brosna catchment at Ferbane“. English. In: *Journal of Hydrology* 10.4, S. 317–329. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90221-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90221-0).
- ÖNORM B 2506 Teil 2 (2012). *Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen. Teil 2: Qualitative Anforderungen an das zu versickernde Regenwasser sowie Anforderungen an Bemessung, Bau und Betrieb von Reinigungsanlagen*. Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut (ON). 18 S.
- OpenCFD Ltd (2016). *OpenFOAM*. URL: [www.openfoam.com](http://www.openfoam.com).

- OpenFOAMwiki (2015). *checkMesh*. Hrsg. von B. Gschaider. Unofficial OpenFOAM wiki. URL: <https://openfoamwiki.net/index.php?title=CheckMesh&oldid=16565> (besucht am 24.04.2017).
- ÖWAV – Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (2015). *Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund. ÖWAV-Regelblatt 45*. Wien. 49 S.
- Park, N.-S., J.-L. Lim, S.-J. Lee, K.-H. Lee und S.-B. Kwon (2006). „Examining the effect of transverse troughs on hydrodynamic behavior in a sedimentation basin with CFD simulation and ADV technique“. English. In: *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* 55.4, S. 247–256. ISSN: 00037214. DOI: 10.2166/aqua.2006.010.
- Park, N., S. Kim, Y. Lee und C. Wang (2014). „Effects of longitudinal baffles on particles settling in a sedimentation basin“. English. In: *Water Science and Technology* 69.6, S. 1212–1218. ISSN: 02731223. DOI: 10.2166/wst.2013.818.
- Patziger, M. und K. Kiss (2015). „Analysis of suspended solids transport processes in primary settling tanks“. English. In: *Water Science & Technology* 72.1, S. 1–9. DOI: 10.2166/wst.2015.168.
- Ramalingam, K., S. Xanthos, M. Gong, J. Fillos, K. Beckmann, A. Deur und J. McCorquodale (2012). „Critical modeling parameters identified for 3D CFD modeling of rectangular final settling tanks for New York City wastewater treatment plants“. English. In: *Water Science and Technology* 65.6, S. 1087–1094. ISSN: 02731223. DOI: 10.2166/wst.2012.944.
- Reddy, R. K. und J. B. Joshi (2009). „CFD modeling of solid-liquid fluidized beds of mono and binary particle mixtures“. English. In: *Chemical Engineering Science* 64.16, S. 3641–3658. DOI: 10.1016/j.ces.2009.05.004.
- Retter & Partner Ziviltechniker Ges.m.b.H. (2006). *A1 West Autobahn – GE Purkersdorf – Wolfsgraben*. Technischer Bericht\_Ergänzungen Februar 2006.
- Rodríguez López, P., A. Lavín, M. Mahamud López und J. Bueno de las Heras (2008). „Flow models for rectangular sedimentation tanks“. English. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 47.9-10, S. 1705–1716. ISSN: 02552701. DOI: 10.1016/j.cep.2007.09.020.
- Rostami, F., M. Shahrokhi, M. Md Said, R. Abdullah und Syafalni (2011). „Numerical modeling on inlet aperture effects on flow pattern in primary settling tanks“. English. In: *Applied Mathematical Modelling* 35.6, S. 3012–3020. ISSN: 0307904X. DOI: 10.1016/j.apm.2010.12.007.

- Al-Sammarraee, M. und A. Chan (2009). „Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part 2: The effects of baffles“. English. In: *Chemical Engineering Journal* 152.2-3, S. 315–321. ISSN: 13858947. DOI: 10.1016/j.cej.2009.01.052.
- Al-Sammarraee, M., A. Chan, S. Salim und U. Mahabaleswar (2009). „Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part I: Particle settling performance“. English. In: *Chemical Engineering Journal* 152.2-3, S. 307–314. ISSN: 13858947. DOI: 10.1016/j.cej.2009.04.062.
- Schröder, R. C. M. und U. C. E. Zanke (2003). *Technische Hydraulik. Kompendium für den Wasserbau*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. 308 S. ISBN: 3-540-00060-7.
- Schwarze, R. (2013). *CFD-Modellierung. Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg. 193 S. ISBN: 978-3-642-24378-3. DOI: 10.1007/978-3-642-24378-3.
- Semadeni-Davies, A. (2009). *Fall Velocities of Stormwater Sediment Particles. Literature Review*. Technical Report 2009/035. Auckland Regional Council. Prepared by NIWA Ltd for Auckland Regional Council.
- Shields, A. (1936). „Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung“. In: *Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasser- Erd- und Schiffbau* (26).
- Tabor, G., D. Jarman, A. R., D. Butler, I. Galambos und S. Djordjevic (2011). „Application of Open Source CFD in Urban Water Management“. In: *World Environmental and Water Resources Congress 2011*. World Environmental and Water Resources Congress 2011. Hrsg. von R. E. Beighley II und M. W. Killgore. American Society of Civil Engineers. Palm Springs, California. DOI: 10.1061/41173(414)153.
- Tarpagkou, R. und A. Pantokratoras (2013). „CFD methodology for sedimentation tanks: The effect of secondary phase on fluid phase using DPM coupled calculations“. English. In: *Applied Mathematical Modelling* 37.5, S. 3478–3494. DOI: 10.1016/j.apm.2012.08.011.
- Tran, D. und J.-H. Kang (2013). „Optimal design of a hydrodynamic separator for treating runoff from roadways“. In: *Journal of Environmental Management* 116. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.11.036.
- Tritthart, M. (2015). *Numerical methods in hydrodynamic modelling*. Vorlesung an der Universität für Bodenkultur Wien. Universität für Bodenkultur Wien.

- Wittenberg, H. (2011). *Praktische Hydrologie. Grundlagen und Übungen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. 117 S. ISBN: 978-3-8348-0789-2.
- Yan, H., G. Lipeme Kouyi, C. Gonzalez-Merchan, C. Becouze-Lareure, C. Sebastian, S. Barraud und J. Bertrand-Krajewski (2014). „Computational fluid dynamics modelling of flow and particulate contaminants sedimentation in an urban stormwater detention and settling basin“. English. In: *Environmental science and pollution research international* 21.8, S. 5347–5356. DOI: 10.1007/s11356-013-2455-6.



---

## Anhang 1: Pläne

Die folgenden Pläne wurden unter anderem auf Basis von Plänen des Ingenieurbüros Retter & Partner Ziviltechniker Ges.m.b.H. erstellt, welche im Zuge der Generalsanierung der Gewässerschutzanlage Auhof-Wolfgraben (Bauprojekt 2008) verfasst wurden.

- Plan 1, Luftbild/Lageplan der Gewässerschutzanlage Auhof-Wolfgraben: Ausschnitt eines Luftbildes, welches im Landes-GIS vom Land Niederösterreich (Niederösterreich Atlas) im Internet zur Verfügung gestellt wird (Land Niederösterreich, 2017). In dem Luftbild wurde der modellierte Bereich rot umrandet.
- Plan 2, Netzstrukturplan: Darstellung der Punkte zur Definition von Rechengebiet und Rechengeometrie im Grundriss; zusätzlich sind in diesem Plan auch die Transekte und Beobachtungspunkte dargestellt, welche zur Auswertung der Ergebnisse der numerischen Simulationen herangezogen wurden. An den Punkten Sed1, Sed2 und Sed3 wurden die Sedimentproben entnommen, die von Gasser und Karbacher (2017) untersucht wurden.
- Plan 3, Verteilbauwerk, Schnitt A–A: Schnitt durch das Verteilbauwerk und Veranschaulichung der angesetzten Randbedingungen.





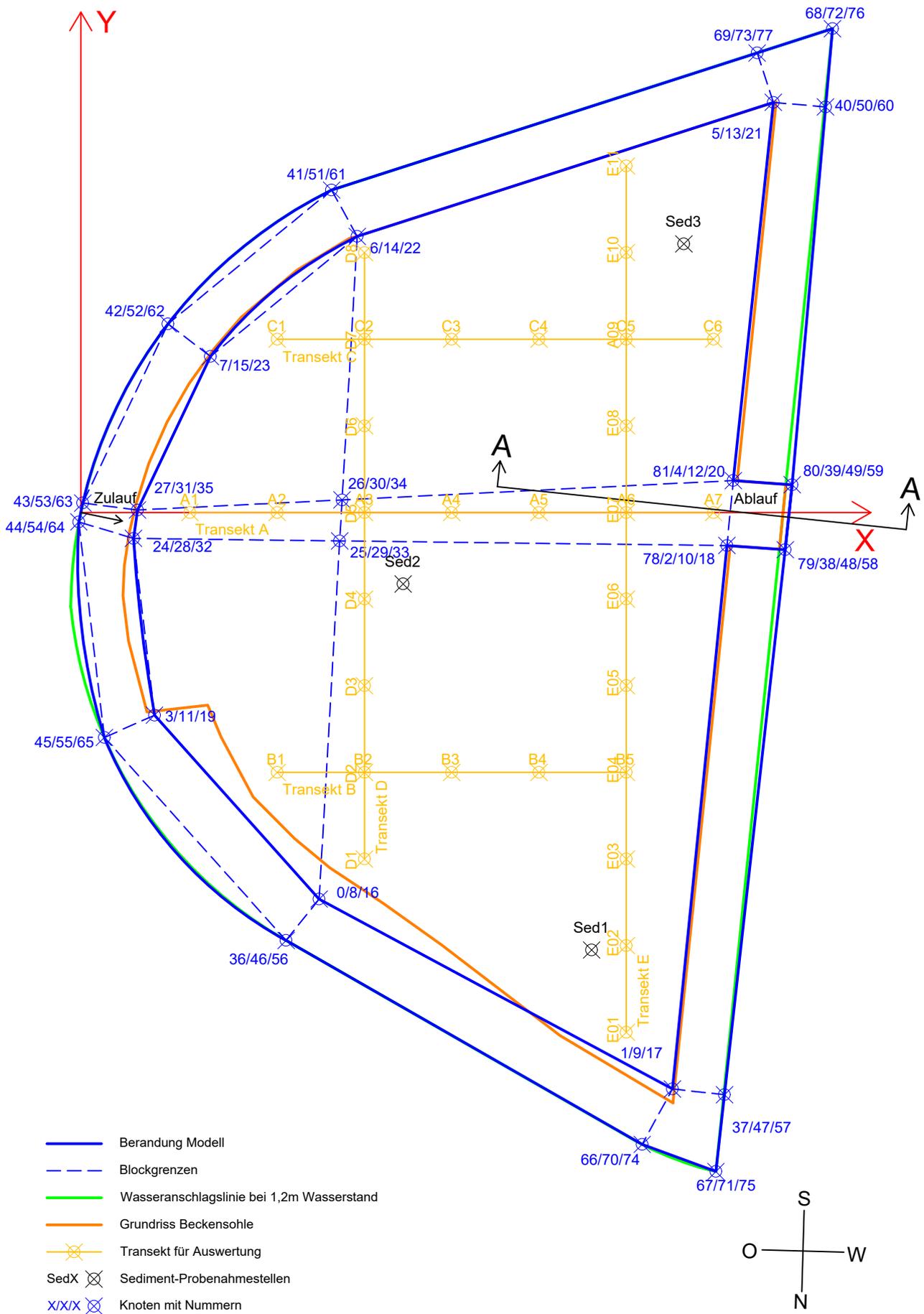
Quellen: Land Niederösterreich, BEY

© Land Niederösterreich: Kein Anspruch auf Richtigkeit und Vollständigkeit!

Verwendungszweck: Masterarbeit Daniel Wildt

Druckdatum: 06.08.2017





- Berandung Modell
- - - Blockgrenzen
- Wasseranschlagslinie bei 1,2m Wasserstand
- Grundriss Beckensohle
- ⊗ Transekt für Auswertung
- SedX ⊗ Sediment-Probenahmestellen
- X/X/X ⊗ Knoten mit Nummern

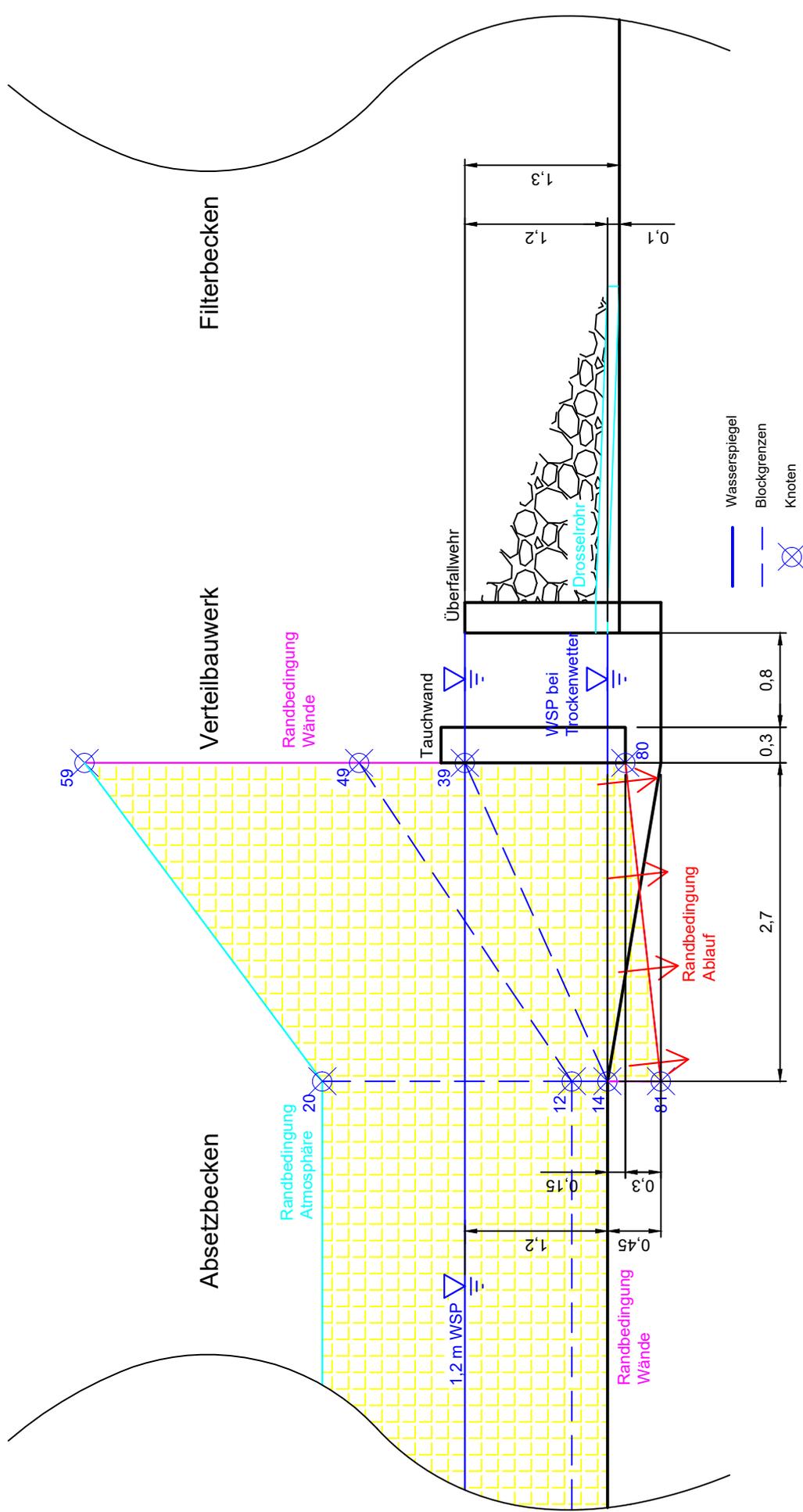
Masterarbeit Daniel Wildt Plan 2: Netzstrukturplan

M 1:250; GSA Auhof-Wolfsgraben

Rechengebiet für das Absetzbecken; vgl.:

Bauprojekt 2008 Retter & Partner ZT GmbH, i.A. ASFINAG





Masterarbeit Daniel Wildt Plan 3: Verteilbauwerk, Schnitt A-A  
 M 1:50; GSA Auhof-Wolfsgraben  
 Randbedingungen und Rechengelbiet Absetzbecken; vgl.:  
 Bauprojekt 2008 Retter & Partner ZT GmbH, i.A. ASFINAG



---

## Anhang 2: Listings

### Definition von Geometrie und Rechengetz

#### Inputdatei blockMeshDict

Listing 1: Datei blockMeshDict zur Definition der Geometrie und des Rechengetzes für das Modell zur Simulation der Bemessungsniederschlagsereignisse. Die Datei wurde auf Grundlage der gleichnamigen Datei im OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ entwickelt.

```
1  /*----- C++ -----*/
2  /====/
3  / \ \ / Field / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox /
4  / \ \ / Operation / Version: 4.0 /
5  / \ \ / And / Web: www.OpenFOAM.org /
6  / \ \ / Manipulation / /
7  /*-----*/
8  //last modified: Daniel Wildt, 2017-05-19
9
10 FoamFile
11 {
12     version      2.0;
13     format       ascii;
14     class        dictionary;
15     object       blockMeshDict;
16 }
17
18 // * * * * *
19
20 convertToMeters 1;
21
22 vertices
23 (
24     (10.92 -17.85 -1.2) //0
25     (27.11 -26.62 -1.2) //1
26     (29.61 -1.53 -1.2) //2
27     ( 3.38 -9.36 -1.2) //3
28     (29.90  1.47 -1.2) //4
29     (31.74 18.93 -1.2) //5
30     (12.67 12.75 -1.2) //6
31     ( 5.94  7.20 -1.2) //7
32
33     (10.92 -17.85 -0.6) //8
34     (27.11 -26.62 -0.6) //9
35     (29.61 -1.53 -0.6) //10
36     ( 3.38 -9.36 -0.6) //11
37     (29.90  1.47 -0.6) //12
38     (31.74 18.93 -0.6) //13
39     (12.67 12.75 -0.6) //14
40     ( 5.94  7.20 -0.6) //15
41
42     (10.92 -17.85  1.2) //16
43     (27.11 -26.62  1.2) //17
44     (29.61 -1.53  1.2) //18
45     ( 3.38 -9.36  1.2) //19
46     (29.90  1.47  1.2) //20
47     (31.74 18.93  1.2) //21
48     (12.67 12.75  1.2) //22
49     ( 5.94  7.20  1.2) //23
50
51     ( 2.42 -1.20 -1.2) //24
52     (11.87 -1.31 -1.2) //25
53     (11.97  0.58 -1.2) //26
54     ( 2.60  0.11 -1.2) //27
55
56     ( 2.42 -1.20 -0.6) //28
57     (11.87 -1.31 -0.6) //29
58     (11.97  0.58 -0.6) //30
59     ( 2.60  0.11 -0.6) //31
60 )
```

```

61
62 ( 2.42 -1.20 1.2) //32
63 (11.87 -1.31 1.2) //33
64 (11.97 0.58 1.2) //34
65 ( 2.60 0.11 1.2) //35
66
67
68 ( 9.41 -19.76 0.00) //36
69 (29.50 -26.88 0.00) //37
70 (32.25 -2.12 0.00) //38
71 (32.60 1.28 0.00) //39
72 (34.13 18.72 0.00) //40
73 (11.49 14.89 0.00) //41
74 ( 4.00 8.71 0.00) //42
75 ( 0.09 0.44 0.00) //43
76 (-0.09 -0.44 0.00) //44
77 ( 1.08 -10.39 0.00) //45
78
79 ( 9.41 -19.76 0.89) //46
80 (29.50 -26.88 0.89) //47
81 (32.25 -2.12 0.89) //48
82 (32.60 1.28 0.89) //49
83 (34.13 18.72 0.89) //50
84 (11.49 14.89 0.89) //51
85 ( 4.00 8.71 0.89) //52
86 ( 0.09 0.44 0.89) //53
87 (-0.09 -0.44 0.89) //54
88 ( 1.08 -10.39 0.89) //55
89
90 ( 9.41 -19.76 3.2) //56
91 (29.50 -26.88 3.2) //57
92 (32.25 -2.12 3.2) //58
93 (32.60 1.28 3.2) //59
94 (34.13 18.72 3.2) //60
95 (11.49 14.89 3.2) //61
96 ( 4.00 8.71 3.2) //62
97 ( 0.09 0.44 3.2) //63
98 (-0.09 -0.44 3.2) //64
99 ( 1.08 -10.39 3.2) //65
100
101 (25.73 -29.18 0.00) //66
102 (29.11 -30.43 0.00) //67
103 (34.45 22.34 0.00) //68
104 (31.00 21.22 0.00) //69
105
106 (25.73 -29.18 0.89) //70
107 (29.11 -30.43 0.89) //71
108 (34.45 22.34 0.89) //72
109 (31.00 21.22 0.89) //73
110
111 (25.73 -29.18 3.2) //74
112 (29.11 -30.43 3.2) //75
113 (34.45 22.34 3.2) //76
114 (31.00 21.22 3.2) //77
115
116 (29.61 -1.53 -1.65) //78
117 (32.25 -2.12 -1.35) //79
118 (32.60 1.28 -1.35) //80
119 (29.90 1.47 -1.65) //81
120
121 );
122
123 blocks
124 (
125 hex ( 0 1 2 25 8 9 10 29) (56 88 10) simpleGrading (1 1 1) //Block 0
126 hex (25 2 4 26 29 10 12 30) (56 15 10) simpleGrading (1 1 1)
127 hex (26 4 5 6 30 12 13 14) (56 62 10) simpleGrading (1 1 1)
128 hex ( 3 0 25 24 11 8 29 28) (38 88 10) edgeGrading (1 1 1 1 0.25 1 1 0.25
129 1 1 1 1)
129 hex (24 25 26 27 28 29 30 31) (38 15 10) simpleGrading (1 1 1) //Block 4
130 hex (27 26 6 7 31 30 14 15) (38 62 10) edgeGrading (1 0.5 0.5 1 4 1 1 4
131 1 1 1 1)
132 hex ( 8 9 10 29 16 17 18 33) (56 88 18) simpleGrading (1 1 2) //Block 6
133 hex (29 10 12 30 33 18 20 34) (56 15 18) simpleGrading (1 1 2)
134 hex (30 12 13 14 34 20 21 22) (56 62 18) simpleGrading (1 1 2)
135 hex (11 8 29 28 19 16 33 32) (38 88 18) edgeGrading (1 1 1 1 0.25 1 1 0.25
136 2 2 2 2)
136 hex (28 29 30 31 32 33 34 35) (38 15 18) simpleGrading (1 1 2) //Block 10

```

```

137     hex (31 30 14 15 35 34 22 23) (38 62 18) edgeGrading (1 0.5 0.5 1 4 1 1 4
138         2 2 2 2)
139
140     hex (36 66 1 0 46 70 9 8) (56 17 10) simpleGrading (1 1 1) // Block 12
141     hex (66 67 37 1 70 71 47 9) (17 17 10) simpleGrading (1 1 1)
142     hex (37 38 2 1 47 48 10 9) (88 17 10) simpleGrading (1 1 1) //Block 14
143     hex (38 39 4 2 48 49 12 10) (15 17 10) simpleGrading (1 1 1)
144     hex (39 40 5 4 49 50 13 12) (62 17 10) simpleGrading (1 1 1)
145     hex (40 68 69 5 50 72 73 13) (17 17 10) simpleGrading (1 1 1)
146     hex (69 41 6 5 73 51 14 13) (56 17 10) simpleGrading (1 1 1)
147     hex (41 42 7 6 51 52 15 14) (38 17 10) simpleGrading (2 1 1)
148     hex (42 43 27 7 52 53 31 15) (62 17 10) simpleGrading (0.25 1 1) //Block 20
149     hex (43 44 24 27 53 54 28 31) (15 17 10) simpleGrading (1 1 1)
150     hex (44 45 3 24 54 55 11 28) (88 17 10) simpleGrading (4 1 1)
151     hex (45 36 0 3 55 46 8 11) (38 17 10) simpleGrading (1 1 1)
152
153     hex (46 70 9 8 56 74 17 16) (56 17 18) simpleGrading (1 1 2) //Block 24
154     hex (70 71 47 9 74 75 57 17) (17 17 18) simpleGrading (1 1 2)
155     hex (47 48 10 9 57 58 18 17) (88 17 18) simpleGrading (1 1 2) //Block 26
156     hex (48 49 12 10 58 59 20 18) (15 17 18) simpleGrading (1 1 2)
157     hex (49 50 13 12 59 60 21 20) (62 17 18) simpleGrading (1 1 2)
158     hex (50 72 73 13 60 76 77 21) (17 17 18) simpleGrading (1 1 2)
159     hex (73 51 14 13 77 61 22 21) (56 17 18) simpleGrading (1 1 2)
160     hex (51 52 15 14 61 62 23 22) (38 17 18) simpleGrading (2 1 2)
161     hex (52 53 31 15 62 63 35 23) (62 17 18) simpleGrading (0.25 1 2)
162     hex (53 54 28 31 63 64 32 35) (15 17 18) simpleGrading (1 1 2)
163     hex (54 55 11 28 64 65 19 32) (88 17 18) simpleGrading (4 1 2)
164     hex (55 46 8 11 65 56 16 19) (38 17 18) simpleGrading (1 1 2)
165
166     hex (78 79 80 81 2 38 39 4) (17 15 8) edgeGrading (1 1 1 1 1 1 1 1 0.5
167         0.5 1) //Block 36
168 );
169 edges
170 (
171     //Innen
172     /*arc 3 0 (6.00 -13.83 -1.2)
173     arc 11 8 (6.00 -13.83 -0.9)
174     arc 19 16 (6.00 -13.83 0.27)*/
175
176     arc 24 3 (3.00 -6.97 -1.2)
177     arc 38 11 (3.00 -6.97 -0.6)
178     arc 32 19 (3.00 -6.97 1.2)
179
180     arc 6 7 (7.00 8.48 -1.2)
181     arc 14 15 (7.00 8.48 -0.6)
182     arc 22 23 (7.00 8.48 1.2)
183
184     /*arc 7 27 (3.00 1.55 -1.2)
185     arc 15 31 (3.00 1.55 -0.9)
186     arc 23 35 (3.00 1.55 0.27)*/
187
188
189     //aussen
190     arc 45 36 (6.00 -17.35 0.0)
191     arc 55 46 (6.00 -17.35 0.89)
192     arc 65 56 (6.00 -17.35 3.2)
193
194     arc 41 42 (7.00 11.89 0.0)
195     arc 51 52 (7.00 11.89 0.89)
196     arc 61 62 (7.00 11.89 3.2)
197
198     arc 42 43 (3.00 7.29 0.0)
199     arc 52 53 (3.00 7.29 0.89)
200     arc 62 63 (3.00 7.29 3.2)
201
202     arc 44 45 (0.0 -5.0 0.0)
203     arc 54 55 (0.0 -5.0 0.89)
204     arc 64 65 (0.0 -5.0 3.2)
205 );
206 boundary
207 (
208     inlet
209     {
210         type patch;
211         faces
212         (
213

```

```
214         ); (44 54 53 43)
215     };
216 }
217
218 walls
219 {
220     type wall;
221     faces
222     (
223         //unten Becken
224         (0 25 2 1)
225         (25 26 4 2)
226         (26 6 5 4)
227         (3 24 25 0)
228         (24 27 26 25)
229         (27 7 6 26)
230
231         //unten Boeschung
232         (36 0 1 66)
233         (66 1 37 67)
234         (1 2 38 37)
235         (4 5 40 39)
236         (5 69 68 40)
237         (5 6 41 69)
238         (6 7 42 41)
239         (7 27 43 42)
240         (24 44 43 27)
241         (45 44 24 3)
242         (36 45 3 0)
243
244
245         //vorne unten
246         (43 53 52 42)
247         (45 55 54 44)
248
249         //vorne mitte
250         (53 63 62 52)
251         (54 64 63 53)
252         (55 65 64 54)
253
254
255         //hinten unten
256         (67 37 47 71)
257         (37 38 48 47)
258         (38 39 49 48)
259         (39 40 50 49)
260         (40 68 72 50)
261         //Tauchwand
262         (79 80 39 38)
263
264         //hinten mitte
265         (71 47 57 75)
266         (47 48 58 57)
267         (48 49 59 58)
268         (49 50 60 59)
269         (50 72 76 60)
270
271
272         //Ablauf
273         (78 2 4 81)
274         (78 79 38 2)
275         (80 81 4 39)
276
277         //seite rechts
278         (45 36 46 55)
279         (36 66 70 46)
280         (66 67 71 70)
281
282         (55 46 56 65)
283         (46 70 74 56)
284         (70 71 75 74)
285
286         //seite links
287         (68 69 73 72)
288         (69 41 51 73)
289         (41 42 52 51)
290
291         (72 73 77 76)
292         (73 51 61 77)
293         (51 52 62 61)
294     );
295 }
296
```

```

297     outlet
298     {
299         type patch;
300         faces
301         (
302             (78 81 80 79)
303         );
304     }
305
306     atmosphere
307     {
308         type patch;
309         faces
310         (
311             //hinten
312             (16 17 18 33)
313             (33 18 20 34)
314             (34 20 21 22)
315
316             //vorne
317             (19 16 33 32)
318             (32 33 34 35)
319             (35 34 22 23)
320
321             //Boeschung
322             (56 74 17 16)
323             (74 75 57 17)
324             (17 57 58 18)
325             (18 58 59 20)
326             (20 59 60 21)
327             (21 60 76 77)
328             (21 77 61 22)
329             (22 61 62 23)
330             (23 62 63 35)
331             (35 63 64 32)
332             (32 64 65 19)
333             (19 65 56 16)
334         );
335     }
336 );
337
338 // ***** //

```

## Output blockMesh

Listing 2: Output des Programms blockMesh exemplarisch für das Modell auhofR15n5\_30

```

1  /*-----*
2  /  ===== /
3  /  \ \      /  F i e l d           /  O p e n F O A M :   T h e   O p e n   S o u r c e   C F D   T o o l b o x
4  /  \ \      /  O p e r a t i o n   /  V e r s i o n :   4 . 1
5  /  \ \      /  A n d               /  W e b :           w w w . O p e n F O A M . o r g
6  /  \ \      /  M a n i p u l a t i o n /
7  \*-----*/
8  Build   : 4.1
9  Exec    : blockMesh
10 Date    : May 22 2017
11 Time    : 09:25:51
12 Host    : "ubusim"
13 PID     : 10754
14 Case    : /home/ubuntuusim/Daniel/OpenFOAM/run/interFoam/auhofR15n5_30
15 nProcs  : 1
16 sigFpe  : Enabling floating point exception trapping (FOAM_SIGFPE).
17 fileModificationChecking : Monitoring run-time modified files using
18   timeStampMaster
19 allowSystemOperations : Allowing user-supplied system call operations
20 // * * * * * //
21 Create time
22
23 Creating block mesh from
24   "/home/ubuntuusim/Daniel/OpenFOAM/run/interFoam/auhofR15n5_30/system/
25   blockMeshDict"
26 Creating curved edges
27 Creating topology blocks
28 Creating topology patches

```

```
28
29 Creating block mesh topology
30
31 Check topology
32
33     Basic statistics
34         Number of internal faces : 77
35         Number of boundary faces : 68
36         Number of defined boundary faces : 68
37         Number of undefined boundary faces : 0
38     Checking patch -> block consistency
39
40 Creating block offsets
41 Creating merge list .
42
43 Creating polyMesh from blockMesh
44 Creating patches
45 Creating cells
46 Creating points with scale 1
47     Block 0 cell size :
48         i : 0.328799 .. 0.328799
49         j : 0.188264 .. 0.188264
50         k : 0.06 .. 0.06
51
52     Block 1 cell size :
53         i : 0.31681 .. 0.31681
54         j : 0.126176 .. 0.126176
55         k : 0.06 .. 0.06
56
57     Block 2 cell size :
58         i : 0.320573 .. 0.320573
59         j : 0.196615 .. 0.196615
60         k : 0.06 .. 0.06
61
62     Block 3 cell size :
63         i : 0.298811 .. 0.298811
64         j : 0.172366 .. 0.0430915
65         k : 0.06 .. 0.06
66
67     Block 4 cell size :
68         i : 0.248701 .. 0.248701
69         j : 0.0881539 .. 0.0881539
70         k : 0.06 .. 0.06
71
72     Block 5 cell size :
73         i : 0.246889 .. 0.246889
74         j : 0.0582648 .. 0.233059
75         k : 0.06 .. 0.06
76
77     Block 6 cell size :
78         i : 0.328799 .. 0.328799
79         j : 0.188264 .. 0.188264
80         k : 0.0691531 .. 0.138306
81
82     Block 7 cell size :
83         i : 0.31681 .. 0.31681
84         j : 0.126176 .. 0.126176
85         k : 0.0691531 .. 0.138306
86
87     Block 8 cell size :
88         i : 0.320573 .. 0.320573
89         j : 0.196615 .. 0.196615
90         k : 0.0691531 .. 0.138306
91
92     Block 9 cell size :
93         i : 0.298811 .. 0.298811
94         j : 0.172271 .. 0.0430677
95         k : 0.0691531 .. 0.138306
96
97     Block 10 cell size :
98         i : 0.248701 .. 0.248701
99         j : 0.0881539 .. 0.0881539
100        k : 0.0691531 .. 0.138306
101
102     Block 11 cell size :
103         i : 0.246889 .. 0.246889
104         j : 0.0582648 .. 0.233059
105         k : 0.0691531 .. 0.138306
106
107     Block 12 cell size :
108         i : 0.336492 .. 0.336492
109         j : 0.159673 .. 0.159673
110         k : 0.089 .. 0.089
111
112     Block 13 cell size :
113         i : 0.211984 .. 0.211984
114         j : 0.185065 .. 0.185065
```

```
115         k : 0.089 .. 0.089
116
117     Block 14 cell size :
118         i : 0.283094 .. 0.283094
119         j : 0.158056 .. 0.158056
120         k : 0.089 .. 0.089
121
122     Block 15 cell size :
123         i : 0.227864 .. 0.227864
124         j : 0.174079 .. 0.174079
125         k : 0.089 .. 0.089
126
127     Block 16 cell size :
128         i : 0.282371 .. 0.282371
129         j : 0.174162 .. 0.174162
130         k : 0.089 .. 0.089
131
132     Block 17 cell size :
133         i : 0.213772 .. 0.213772
134         j : 0.157798 .. 0.157798
135         k : 0.089 .. 0.089
136
137     Block 18 cell size :
138         i : 0.366271 .. 0.366271
139         j : 0.158187 .. 0.158187
140         k : 0.089 .. 0.089
141
142     Block 19 cell size :
143         i : 0.178443 .. 0.356883
144         j : 0.160147 .. 0.160147
145         k : 0.089 .. 0.089
146
147     Block 20 cell size :
148         i : 0.27407 .. 0.068518
149         j : 0.16092 .. 0.16092
150         k : 0.089 .. 0.089
151
152     Block 21 cell size :
153         i : 0.0598814 .. 0.0598814
154         j : 0.1648 .. 0.1648
155         k : 0.089 .. 0.089
156
157     Block 22 cell size :
158         i : 0.0527932 .. 0.211172
159         j : 0.16965 .. 0.16965
160         k : 0.089 .. 0.089
161
162     Block 23 cell size :
163         i : 0.336378 .. 0.336378
164         j : 0.164189 .. 0.164189
165         k : 0.089 .. 0.089
166
167     Block 24 cell size :
168         i : 0.336492 .. 0.336492
169         j : 0.167913 .. 0.167913
170         k : 0.0887464 .. 0.177493
171
172     Block 25 cell size :
173         i : 0.211984 .. 0.211984
174         j : 0.19222 .. 0.19222
175         k : 0.0887464 .. 0.177493
176
177     Block 26 cell size :
178         i : 0.283094 .. 0.283094
179         j : 0.166376 .. 0.166376
180         k : 0.0887464 .. 0.177493
181
182     Block 27 cell size :
183         i : 0.227864 .. 0.227864
184         j : 0.181667 .. 0.181667
185         k : 0.0887464 .. 0.177493
186
187     Block 28 cell size :
188         i : 0.282371 .. 0.282371
189         j : 0.181747 .. 0.181747
190         k : 0.0887464 .. 0.177493
191
192     Block 29 cell size :
193         i : 0.213772 .. 0.213772
194         j : 0.166131 .. 0.166131
195         k : 0.0887464 .. 0.177493
196
197     Block 30 cell size :
198         i : 0.366271 .. 0.366271
199         j : 0.166501 .. 0.166501
200         k : 0.0887464 .. 0.177493
201
202     Block 31 cell size :
203         i : 0.178443 .. 0.356883
204         j : 0.168364 .. 0.168364
```

```

205         k : 0.0887464 .. 0.177493
206
207     Block 32 cell size :
208         i : 0.27407 .. 0.068518
209         j : 0.169099 .. 0.169099
210         k : 0.0887464 .. 0.177493
211
212     Block 33 cell size :
213         i : 0.0598814 .. 0.0598814
214         j : 0.172796 .. 0.172796
215         k : 0.0887464 .. 0.177493
216
217     Block 34 cell size :
218         i : 0.0527932 .. 0.211172
219         j : 0.177427 .. 0.177427
220         k : 0.0887464 .. 0.177493
221
222     Block 35 cell size :
223         i : 0.336378 .. 0.336378
224         j : 0.172213 .. 0.172213
225         k : 0.0887464 .. 0.177493
226
227     Block 36 cell size :
228         i : 0.160101 .. 0.160101
229         j : 0.200932 .. 0.200932
230         k : 0.05625 .. 0.05625
231
232
233 There are no merge patch pairs edges
234
235 Writing polyMesh
236 -----
237 Mesh Information
238 -----
239     boundingBox: (-0.142533 -30.43 -1.65) (34.45 22.34 3.2)
240     nPoints: 732756
241     nCells: 699072
242     nFaces: 2130570
243     nInternalFaces: 2063862
244 -----
245 Patches
246 -----
247     patch 0 (start: 2063862 size: 150) name: inlet
248     patch 1 (start: 2064012 size: 41409) name: walls
249     patch 2 (start: 2105421 size: 255) name: outlet
250     patch 3 (start: 2105676 size: 24894) name: atmosphere
251
252 End

```

## Output checkMesh

Listing 3: Output des Programms checkMesh exemplarisch für das Modell auhofR15n5\_30

```

1  /*-----*
2  /  ===== /
3  /  \ \      /  F i e l d           /  O p e n F O A M :   T h e   O p e n   S o u r c e   C F D   T o o l b o x
4  /  \ \      /  O p e r a t i o n   /  V e r s i o n :   4 . 1
5  /  \ \      /  A n d                 /  W e b :           w w w . O p e n F O A M . o r g
6  /  \ \      /  M a n i p u l a t i o n /
7  /*-----*/
8  Build   : 4.1
9  Exec    : checkMesh
10 Date    : May 22 2017
11 Time    : 09:26:30
12 Host    : "ubusim"
13 PID     : 10760
14 Case    : /home/ubuntu/Daniel/OpenFOAM/run/interFoam/auhofR15n5_30
15 nProcs  : 1
16 sigFpe  : Enabling floating point exception trapping (FOAM_SIGFPE).
17 fileModificationChecking : Monitoring run-time modified files using
    timeStampMaster
18 allowSystemOperations : Allowing user-supplied system call operations
19
20 // * * * * *
21 Create time
22
23 Create polyMesh for time = 0
24
25 Time = 0

```

```

26
27 Mesh stats
28   points:          732756
29   faces:           2130570
30   internal faces:  2063862
31   cells:           699072
32   faces per cell:  6
33   boundary patches: 4
34   point zones:    0
35   face zones:     0
36   cell zones:     0
37
38 Overall number of cells of each type:
39   hexahedra:      699072
40   prisms:         0
41   wedges:         0
42   pyramids:       0
43   tet wedges:     0
44   tetrahedra:    0
45   polyhedra:     0
46
47 Checking topology...
48   Boundary definition OK.
49   Cell to face addressing OK.
50   Point usage OK.
51   Upper triangular ordering OK.
52   Face vertices OK.
53   Number of regions: 1 (OK).
54
55 Checking patch topology for multiply connected surfaces...
56 Patch      Faces    Points  Surface topology
57 inlet      150      176    ok (non-closed singly connected)
58 walls      41409   41758  ok (non-closed singly connected)
59 outlet     255     288    ok (non-closed singly connected)
60 atmosphere 24894   25188  ok (non-closed singly connected)
61
62 Checking geometry...
63   Overall domain bounding box (-0.142533 -30.43 -1.65) (34.45 22.34 3.2)
64   Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
65   Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
66   Boundary openness (7.05237e-16 -4.76807e-16 2.63107e-15) OK.
67   Max cell openness = 3.10794e-16 OK.
68   Max aspect ratio = 5.27341 OK.
69   Minimum face area = 0.00258361. Maximum face area = 0.0923592. Face area
70   magnitudes OK.
71   Min volume = 0.000375491. Max volume = 0.0127738. Total volume = 3063.52.
72   Cell volumes OK.
73   Mesh non-orthogonality Max: 76.4285 average: 21.972
74   *Number of severely non-orthogonal (> 70 degrees) faces: 1260.
75   Non-orthogonality check OK.
76   <<Writing 1260 non-orthogonal faces to set nonOrthoFaces
77   Face pyramids OK.
78   Max skewness = 1.07813 OK.
79   Coupled point location match (average 0) OK.
80
81 Mesh OK.
82 End

```

## Diskretisierungsschemen und numerische Festlegungen

### Inputdatei fvSchemes

Listing 4: Datei fvSchemes zur Festlegung der Diskretisierungsschemen. Die Datei wurde auf Grundlage der gleichnamigen Datei im OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ entwickelt; ersetzte Einstellungen wurden als Kommentar in der Datei belassen;

```

1  /*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*\
2  | =====|
3  | \\      / Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox      |

```

```

4 /  \ \ /  O peration / Version: 4.0 /
5 /  \ \ /  A nd / Web: www.OpenFOAM.org /
6 /  \ \ /  M anipulation / /
7 /*-----*/
8 //last modified: Danie Wildt, 2017-04-26
9
10 FoamFile
11 {
12     version      2.0;
13     format        ascii;
14     class         dictionary;
15     location      "system";
16     object        fvSchemes;
17 }
18 // * * * * *
19
20 ddtSchemes
21 {
22     default       Euler;
23 }
24
25 gradSchemes
26 {
27     default       Gauss linear;
28     grad(U)       cellLimited Gauss linear 1; //lt. User-Guide bei schlechtem
                Netz
29 }
30
31 divSchemes
32 {
33     default       none;
34
35     //div(rhoPhi,U)      Gauss linearUpwind grad(U);
36     div(rhoPhi,U)       Gauss limitedLinearV 1; //robuster lt. CFD-online Forum
37     //noch robuster lt. CFD-online Forum:
38     //div(rhoPhi,U)       Gauss linearUpwindV cellLimited Gauss linear 1;
39     div(phi,alpha)      Gauss vanLeer;
40     div(phirb,alpha)    Gauss linear;
41
42     "div\(\phi,(k|\omega)\)"      Gauss upwind;
43     div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
44 }
45
46 laplacianSchemes
47 {
48     //default           Gauss linear corrected;
49     default             Gauss linear limited corrected 0.5; //da max
                nonorthogonality >70
50 }
51
52 interpolationSchemes
53 {
54     default             linear;
55 }
56
57 snGradSchemes
58 {
59     //default           corrected;
60     default             limited corrected 0.5; //lt. User-Guide (=>mesh-non-ortho.)
61 }
62
63 wallDist
64 {
65     method meshWave;
66 }
67
68 // * * * * *
69

```

## Inputdatei fvSolution

Listing 5: Datei fvSolution zur Festlegung der Gleichungslöser. Die Datei wurde unverändert aus dem OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ übernommen.

```

1 /*-----* C++ *-----*/
2 / ===== /

```

```

3  /  \  \  /  F i e l d      /  O p e n F O A M :  T h e  O p e n  S o u r c e  C F D  T o o l b o x      /
4  /  \  \  /  O p e r a t i o n  /  V e r s i o n :  4 . 0      /
5  /  \  \  /  A n d      /  W e b :      w w w . O p e n F O A M . o r g      /
6  /  \  \  /  M a n i p u l a t i o n  /
7  \*-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         dictionary;
13     location      "system";
14     object        fvSolution;
15 }
16 // *****
17
18 solvers
19 {
20     "alpha.water.*"
21     {
22         nAlphaCorr      1;
23         nAlphaSubCycles 1;
24         cAlpha          1;
25
26         MULESCorr       yes;
27         nLimiterIter    3;
28
29         solver          smoothSolver;
30         smoother        symGaussSeidel;
31         tolerance       1e-8;
32         relTol          0;
33     }
34
35     pcorr
36     {
37         solver          PCG;
38         preconditioner
39         {
40             preconditioner  GAMG;
41             tolerance       1e-5;
42             relTol          0;
43             smoother        GaussSeidel;
44         }
45         tolerance       1e-5;
46         relTol          0;
47         maxIter         50;
48     }
49
50     p_rgh
51     {
52         solver          GAMG;
53         tolerance       5e-9;
54         relTol          0.01;
55
56         smoother        GaussSeidel;
57
58         maxIter         50;
59     };
60
61     p_rghFinal
62     {
63         $p_rgh;
64         tolerance       5e-9;
65         relTol          0;
66     }
67
68     "(U|k|omega).*"
69     {
70         solver          smoothSolver;
71         smoother        symGaussSeidel;
72         nSweeps         1;
73         tolerance       1e-6;
74         relTol          0.1;
75     };
76 }
77
78 PIMPLE
79 {
80     momentumPredictor no;
81 }
82

```

```

83     nCorrectors      2;
84     nNonOrthogonalCorrectors 0;
85 }
86
87 relaxationFactors
88 {
89     equations
90     {
91         ".*" 1;
92     }
93 }
94
95 // *****
96

```

## Einstellungen zur Turbulenzmodellierung

### Inputdatei turbulenceProperties

Listing 6: Datei `turbulenceProperties` zur Festlegung des Turbulenzmodells. Die Datei wurde unverändert aus dem OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ übernommen.

```

1  /*-----* C++ *-----*/
2  / ===== /
3  / \ \ / \ / F i e l d / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox /
4  / \ \ / \ / O p e r a t i o n / Version: 4.0 /
5  / \ \ / \ / A n d / Web: www.OpenFOAM.org /
6  / \ \ / \ / M a n i p u l a t i o n / /
7  /*-----* /
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        dictionary;
13     location     "constant";
14     object       turbulenceProperties;
15 }
16 // * * * * * //
17
18 simulationType  RAS;
19
20 RAS
21 {
22     RASModel      kOmegaSST;
23
24     turbulence    on;
25
26     printCoeffs  on;
27 }
28
29 // *****
30

```

## Einstellungen zu den Transporteigenschaften der Fluide

### Inputdatei transportProperties

Listing 7: Datei `transportProperties` zur Festlegung der Transporteigenschaften der Fluide. Die Datei wurde auf Grundlage der gleichnamigen Datei im OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ entwickelt.

```

1  /*-----* C++ *-----*/
2  / ===== /
3  / \ \ / \ / F i e l d / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox /

```

```

4 /  \ \ /  O peration      / Version:  4.0                               /
5 /  \ \ /  A nd           / Web:       www.OpenFOAM.org                 /
6 /  \ \ /  M anipulation  /                                           /
7 \*-----*
8 //last modified: Daniel Wildt, 2017-05-19
9
10 FoamFile
11 {
12     version      2.0;
13     format       ascii;
14     class        dictionary;
15     location     "constant";
16     object       transportProperties;
17 }
18 // * * * * *
19
20 phases (water air);
21
22 water
23 {
24     transportModel  Newtonian;
25     nu              [0 2 -1 0 0 0 0] 1.31e-06;
26     rho             [1 -3 0 0 0 0 0] 1000;
27 }
28
29 air
30 {
31     transportModel  Newtonian;
32     nu              [0 2 -1 0 0 0 0] 1.42e-05;
33     rho             [1 -3 0 0 0 0 0] 1;
34 }
35
36 sigma             [1 0 -2 0 0 0 0] 0.07;
37
38 // * * * * *
39

```

## Festlegung der Rand- und Anfangsbedingungen

### Inputdatei U

Listing 8: Datei U zur Festlegung der Rand- und Anfangsbedingungen für die Geschwindigkeit beispielhaft für das Modell `auhofR15n5_30`. Die Datei wurde auf Grundlage der gleichnamigen Datei im OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ entwickelt.

```

1 /*-----* C++ *-----*\
2 /=====|
3 /  \ \ /  F ield          / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox      /
4 /  \ \ /  O peration     / Version:  4.0                               /
5 /  \ \ /  A nd           / Web:       www.OpenFOAM.org                 /
6 /  \ \ /  M anipulation  /                                           /
7 \*-----*
8 //last modified: Daniel Wildt, 2017-05-08
9
10 FoamFile
11 {
12     version      2.0;
13     format       ascii;
14     class        volVectorField;
15     object       U;
16 }
17 // * * * * *
18
19 dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
20
21 internalField   uniform (0 0 0);
22
23 boundaryField
24 {
25     inlet
26     {

```

```

27     type          flowRateInletVelocity;
28     volumetricFlowRate    csvFile;
29     volumetricFlowRateCoeffs
30     {
31         fileName      "inflowR15n5.csv";
32         nHeaderLine    1;
33         refColumn      0;           //Zeitspalte
34         componentColumns (1);      //Q Spalte
35         separator      ",";
36         mergeSeparators no;
37     }
38 }
39
40 walls
41 {
42     type          noSlip;
43 }
44
45 atmosphere
46 {
47     type          pressureInletOutletVelocity;
48     value         uniform (0 0 0);
49 }
50
51 outlet
52 {
53     type          flowRateInletVelocity;
54     volumetricFlowRate    csvFile;
55     volumetricFlowRateCoeffs
56     {
57         fileName      "outflowR15n5_30.csv";
58         nHeaderLine    1;
59         refColumn      0;           //Zeitspalte
60         componentColumns (1);      //Q Spalte
61         separator      ",";
62         mergeSeparators no;
63     }
64 }
65 }
66 }
67
68 // ***** //
69

```

### Inputdatei p\_rgh

Listing 9: Datei p\_rgh zur Festlegung der Rand- und Anfangsbedingungen für den Druck. Die Datei wurde auf Grundlage der gleichnamigen Datei im OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ entwickelt.

```

1  /*----- C++ -----*/
2  / ===== /
3  / \ \ \ \ / F i e l d / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox /
4  / \ \ \ \ / O p e r a t i o n / Version: 4.0 /
5  / \ \ \ \ / A n d / Web: www.OpenFOAM.org /
6  / \ \ \ \ / M a n i p u l a t i o n /
7  \*-----*/
8  //last modified: Daniel Wildt, 2017-04-20
9
10 FoamFile
11 {
12     version      2.0;
13     format       ascii;
14     class        volScalarField;
15     object       p_rgh;
16 }
17 // * * * * * //
18
19 dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];
20
21 internalField   uniform 0;
22
23 boundaryField
24 {
25     atmosphere

```

```

26     {
27         type          totalPressure;
28         p0            uniform 0;
29     }
30     outlet
31     {
32         type          zeroGradient;
33     }
34 }
35
36 ".*"
37 {
38     type          fixedFluxPressure;
39     value         uniform 0;
40 }
41 }
42
43 // ***** //

```

## Inputdatei k

Listing 10: Datei k zur Festlegung der Rand- und Anfangsbedingungen für die turbulente kietische Energie. Die Datei wurde auf Grundlage der gleichnamigen Datei im OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ entwickelt.

```

1  /*----- C++ -----*/
2  /=====/
3  / \ \ / \ / F i e l d           / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox /
4  / \ \ / \ / O p e r a t i o n   / Version: 4.0 /
5  / \ \ / \ / A n d                / Web:      www.OpenFOAM.org /
6  / \ \ / \ / M a n i p u l a t i o n /
7  /*-----*/
8  //last modified: Daniel Wildt, 2017-04-03
9
10 FoamFile
11 {
12     version      2.0;
13     format       ascii;
14     class        volScalarField;
15     object       k;
16 }
17 // ***** //
18
19 dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];
20
21 internalField   uniform 0.0001;
22
23 boundaryField
24 {
25     inlet
26     {
27         type          fixedValue;
28         //intensity    0.05;
29         //value         $internalField;
30         intensity     0.025;
31         value         0.0034;
32     }
33
34     walls
35     {
36         type          kqRWallFunction;
37         value         $internalField;
38     }
39
40     ".*"
41     {
42         type          inletOutlet;
43         inletValue    $internalField;
44         value         $internalField;
45     }
46 }
47
48 // ***** //

```

## Inputdatei omega

Listing 11: Datei `omega` zur Festlegung der Rand- und Anfangsbedingungen für die charakteristische Frequenz der energietragenden Wirbel. Die Datei wurde auf Grundlage der gleichnamigen Datei im OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ entwickelt.

```

1  /*----- C++ -----*/
2  /====/
3  / \ \ / \ / F i e l d           / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox /
4  / \ \ / \ / O p e r a t i o n   / Version: 4.0 /
5  / \ \ / \ / A n d               / Web: www.OpenFOAM.org /
6  / \ \ / \ / M a n i p u l a t i o n /
7  /*-----*/
8  //last modified: Daniel Wildt, 2017-04-03
9
10 FoamFile
11 {
12     version      2.0;
13     format       ascii;
14     class        volScalarField;
15     object       omega;
16 }
17 // ***** //
18
19 dimensions      [0 0 -1 0 0 0 0];
20
21 internalField   uniform 0.003;
22
23 boundaryField
24 {
25     inlet
26     {
27         type      fixedValue;
28         value     0.52;
29     }
30
31     walls
32     {
33         type      omegaWallFunction;
34         value     $internalField;
35     }
36
37     ".*"
38     {
39         type      inletOutlet;
40         inletValue $internalField;
41         value     $internalField;
42     }
43 }
44
45 // ***** //

```

## Inputdatei nut

Listing 12: Datei `nut` zur Festlegung der Rand- und Anfangsbedingungen für die Wirbelviskosität. Die Datei wurde auf Grundlage der gleichnamigen Datei im OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ entwickelt.

```

1  /*----- C++ -----*/
2  /====/
3  / \ \ / \ / F i e l d           / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox /
4  / \ \ / \ / O p e r a t i o n   / Version: 4.0 /
5  / \ \ / \ / A n d               / Web: www.OpenFOAM.org /
6  / \ \ / \ / M a n i p u l a t i o n /
7  /*-----*/
8  //last modified: Daniel Wildt, 2017-04-03
9
10 FoamFile
11 {

```



```

41     atmosphere
42     {
43         type          inletOutlet;
44         inletValue    uniform 0;
45         value         uniform 0;
46     }
47 }
48 }
49 }
50 // *****

```

## Inputdatei setFieldsDict

Listing 14: Datei `setFieldsDict` zur Festlegung der Anfangsbedingung für den Volumsanteil von Wasser in bestimmten Bereichen des Rechengebiets beispielhaft für das Modell `auhofR15n5_30`. Die Datei wurde auf Grundlage der gleichnamigen Datei im OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ entwickelt.

```

1  /*-----* C++ *-----*/
2  /=====/
3  / \ \ / \ / F i e l d           / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox /
4  / \ \ / \ / O p e r a t i o n   / Version: 4.0 /
5  / \ \ / \ / A n d                / Web: www.OpenFOAM.org /
6  / \ \ / \ / M a n i p u l a t i o n / /
7  /*-----*
8  //last modified: Daniel Wildt, 2017-05-08
9
10 FoamFile
11 {
12     version      2.0;
13     format       ascii;
14     class        dictionary;
15     location     "system";
16     object       setFieldsDict;
17 }
18 // *****
19
20 defaultFieldValues
21 (
22     volScalarFieldValue alpha.water 0
23 );
24
25 regions
26 (
27     boxToCell
28     {
29         box (-2 -35 -2) (40 35 -0.9);
30         fieldValues
31         (
32             volScalarFieldValue alpha.water 1
33         );
34     }
35 );
36
37 // *****
38

```

## Einstellungen zur Berechnung

### Inputdatei controlDict

Listing 15: Datei `controlDict` zur Festlegung der Einstellungen zur Berechnung der numerischen Modelle. Die Datei wurde auf Grundlage der gleichnamigen Datei im OpenFOAM-Tutorial-case „waterChannel“ entwickelt.

```

1  /*-----* C++ *-----*/

```

```

2 / ===== /
3 / \ \ \ / F i e l d / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox /
4 / \ \ \ / O p e r a t i o n / Version: 4.0 /
5 / \ \ \ / A n d / Web: www.OpenFOAM.org /
6 / \ \ \ / M a n i p u l a t i o n / /
7 \*-----*/
8 //last modified: Daniel Wildt, 2017-05-22
9
10 FoamFile
11 {
12     version      2.0;
13     format       ascii;
14     class        dictionary;
15     location     "system";
16     object       controlDict;
17 }
18 // * * * * *
19
20 application     interFoam;
21
22 startFrom       latestTime;
23
24 startTime       0;
25
26 stopAt          endTime;
27
28 endTime         1800;
29
30 deltaT          0.001;
31
32 writeControl    adjustableRunTime;
33
34 writeInterval   5;
35
36 purgeWrite      0;
37
38 writeFormat     ascii;
39
40 writePrecision  6;
41
42 writeCompression compressed;
43
44 timeFormat      general;
45
46 timePrecision   6;
47
48 runTimeModifiable yes;
49
50 adjustTimeStep  yes;
51
52 maxCo           6;
53 maxAlphaCo      6;
54 maxDeltaT       1;
55
56 functions
57 {
58     #includeFunc probes
59     // #includeFunc singleGraph
60
61     inletFlux
62     {
63         type          surfaceRegion;
64         libs ("libfieldFunctionObjects.so");
65         writeControl   timeStep;
66         log            true;
67         // Output field values as well
68         writeFields    false;
69         regionType     patch;
70         name           inlet;
71         operation      sum;
72
73         fields
74         (
75             rhoPhi
76         );
77     }
78
79     outletFlux
80     {
81         $inletFlux;
82         name           outlet;
83     }
84 }

```

```

84     atmosphereFlux
85     {
86         $inletFlux;
87         name          atmosphere;
88     }
89 }
90 }
91 // *****
92 // *****

```

## Postprocessing Funktionen

### Inputdatei probes

Listing 16: Ausschnitt aus der Datei `probes` zur Festlegung der Punkte an denen die Strömungsgrößen zur Auswertung für jeden Zeitschritt ausgelesen werden sollen. Die Datei wurde auf Grundlage einer von OpenFOAM mitgelieferten Vorlage erstellt.

```

1  /*----- C++ -----*\
2  =====
3  \ \ / / F i e l d           / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  \ \ / / O p e r a t i o n   /
5  \ \ / / A n d               / Web:      www.OpenFOAM.org
6  \ \ / / M a n i p u l a t i o n /
7  -----
8  //last modified: Daniel Wildt, 2017-05-22
9
10 Description
11     Writes out values of fields from cells nearest to specified locations.
12
13 \*-----*\
14
15 #includeEtc "caseDicts/postProcessing/probes/probes.cfg"
16
17 fields (p U alpha);
18 probeLocations
19 (
20 // 10cm ueber Beckensohle
21 //Transekt A
22 ( 5.0 0 -1.1) //1
23 ( 9.0 0 -1.1) //2
24 (13.0 0 -1.1) //3
25 (17.0 0 -1.1) //4
26 (21.0 0 -1.1) //5
27 (25.0 0 -1.1) //6
28 (29.0 0 -1.1) //7
29
30 //Transekt B
31 ( 9.0 -12.0 -1.1) //1
32

```