



Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

NRW MEREBEN

Maßnahmen zur Ertüchtigung von Regen- klärbecken und Hinweise zu deren Neubau

des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und
Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

– Phase 2: Neubau von Regenklärbecken –

Förderprogramm: ResA II

Juni 2018

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. R. Mohn

Prof. Dr.-Ing. M. Uhl

Prof. Dr.-Ing. H. Grüning

Sachbearbeiter:

Dr.-Ing. N. Voßwinkel

M. Wietbüscher M.Sc.

J. Schomaker-Loth B.Eng.

Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>I</i>
<i>Verzeichnis der Bilder</i>	<i>IV</i>
<i>Verzeichnis der Tabellen</i>	<i>XIV</i>
<i>Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen</i>	<i>XVII</i>
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung und Vorgehensweise	3
3 Grundlagen	4
3.1 Theoretische Grundlagen zu Prozessen in Sedimentationsbecken	4
3.2 Zusammensetzung von Feststoffen im Niederschlagswasser	11
3.3 Schadstoffbelastung von Feststoffen im Niederschlagsabfluss	13
4 Simulationsumgebung	19
4.1 Verwendete Software	19
4.2 Grundlagen der numerischen Simulation	19
5 Neubau-Rechteckbecken	23
5.1 Einführung und Untersuchungskonzept	23
5.2 Material und Methoden	26
5.2.1 Geometrische Randbedingungen	26
5.2.2 Hydraulische Randbedingungen	39
5.3 Stand der Wissenschaft und Technik zu Rechteckbecken	39
5.4 Ergebnisse der Beckenuntersuchung	40
5.4.1 „worst-case“-Variante	41
5.4.2 Grundvariante V0	42
5.4.3 Variante V1: Einlaufgestaltung	46
5.4.4 Variante V2: Fließwegführung	53
5.4.5 Variante V3: Sohlgestaltung	57

5.4.6	Auswertung der Wirkungsgrade	60
5.4.7	Idealisierte Ein- und Auslauftrandbedingungen.....	65
5.4.8	Variation von L/B bei konstanter Tiefe	71
5.4.9	Gleichrichter mit Grundwalze	82
5.4.10	Vergleich zwischen der V0 Grundvariante und der „worst-case“ Variante.....	88
5.4.11	Vergleich zwischen V1 Einlaufgestaltung und Gleichrichter mit Grundwalze	90
5.5	Fazit.....	97
6	<i>Neubau-Rundbecken</i>	100
6.1	Einführung und Untersuchungskonzept	100
6.2	Stand der Wissenschaft und Technik zu Rundbecken	102
6.3	Material und Methoden.....	109
6.3.1	Physikalische Modellierung	109
6.3.2	Numerische Simulation.....	119
6.4	Ergebnisse und Diskussion.....	124
6.4.1	Physikalische Modell-Ergebnisse	124
6.4.2	Validierung des numerischen Modells.....	130
6.4.3	Numerische Simulations-Ergebnisse.....	140
6.5	Empfehlungen zur Dimensionierung von Rundbecken im Neubau	158
7	<i>Systematischer Vergleich zwischen rechteckigen und runden Regenklärbecken.....</i>	159
7.1	Einführung und Untersuchungskonzept	159
7.2	Vergleich der Grundvarianten	159
7.3	Vergleich der optimierten-Becken.....	163
7.4	Auswirkung der Beckengrundform auf den Absetzwirkungsgrad.....	166
8	<i>Untersuchung einer der Filtration vorgeschalteten Sedimentationsstufe</i>	168
8.1	Einführung und Untersuchungskonzept	168
8.2	Stand der Wissenschaft und Technik	169
8.3	Material und Methoden.....	173
8.3.1	Geometrische Randbedingungen des ausgewählten Stammbeckens.....	173

8.3.2	Hydraulische Randbedingungen des ausgewählten optimierten Beckens	175
8.3.3	Eigenschaften des numerischen Gitternetzes	176
8.3.4	Einstellungen im numerischen Modell	177
8.3.5	Verwendete Partikel im numerischen Modell	178
8.4	Untersuchungen zu den Abmessungsverhältnissen einer Sedimentationsstufe	
	179	
8.4.1	Stufe 1: Untersuchungen zum Einfluss des Längen-/Breitenverhältnisses L/B	179
8.4.2	Stufe 2: Untersuchungen zum Einfluss der Beckentiefe H	183
8.5	Stufe 3: Entwurf von Bemessungsdiagrammen auf Basis einer	
	systematischen Volumenreduktion der Beckenkammer	190
9	Zusammenfassung der Erkenntnisse	195
10	Weiterer Forschungsbedarf	199
	Literaturverzeichnis	201
	Anhangsverzeichnis	205

Verzeichnis der Bilder

Bild 3.1: Absetzvorgang in einem Rechteckbecken mit laminarer Strömung und gleichmäßiger, blockförmiger Verteilung der Fließgeschwindigkeit v über den Beckenquerschnitt (Pfropfenströmung) (Gujer 2007)	4
Bild 3.2: Wirkungsgrade idealer Beckendurchströmungen in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit und der Oberflächenbeschickung.....	7
Bild 3.3: Sieblinien aus Forschungsergebnissen.....	12
Bild 3.4: Aufteilung der Partikel in organische und mineralische Fraktionen.....	12
Bild 3.5: Schwermetallkonzentrationen (Zhao et al. 2010).....	13
Bild 3.6: Schwermetallkonzentrationen (Karlsson et al., 2010)	14
Bild 3.7: Zusammenhang zwischen Zink und der Partikelgröße unter $63 \mu\text{m}$ (Karlsson et al., 2010).....	14
Bild 3.8: Verteilung von Schwermetallen bezogen auf Partikelgrößen (Adachi and Tainosho, 2005).....	15
Bild 3.9: Durchschn. Metallkonzentrationen verschiedener Partikelfraktionen (Gunawardana et al., 2014).....	15
Bild 3.10: Gelöste und partikulär gebundene Zink und Kupfer Konzentrationen (Gasperi et al. 2010).....	16
Bild 3.11: Schwermetallverteilung bezogen auf Partikelgrößenfraktionen nach (Roger et al., 1998).....	17
Bild 5.1 Vorgehensweise Neubau von Rechteckbecken.....	24
Bild 5.2: Isometrische Darstellung der „worst-case“ Variante	29
Bild 5.3: Isometrische Darstellung der Grundvariante V0	30
Bild 5.4: Isometrische Darstellung „Variante 1 Einlaufgestaltung“; links: Gesamtansicht, rechts: Ansicht Einlaufbereich.....	32
Bild 5.5: Isometrische Darstellung „Variante 2 Fließwegführung“	33
Bild 5.6: Isometrische Darstellung „Variante 3 Sohlgestaltung“	35
Bild 5.7: Darstellung von zwei Geometrien der Untersuchungsstudie H/H, zu sehen sind H/H 0,75 (oben) und H/H 0,25 (unten).....	36

Bild 5.8: Darstellung von zwei Geometrien der Untersuchungsstudie L/B, zu sehen sind L/B 2,13 (links) und L/B 10,00 (rechts).....	37
Bild 5.9: Geometrie des eingebauten Gleichrichters mit Grundwalze	38
Bild 5.10: „worst-case“-Variante; Isolinien der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 10$ m/h; oben: Längsschnitt, unten: Querprofile	41
Bild 5.11: „worst-case“-Variante; Stromlinien der Geschwindigkeiten mit der Einfärbung der in X-Richtung 3D-Ansicht $q_A = 10$ m/h.....	42
Bild 5.12: Variante V0; Isolinien der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 4$ m/h; oben: Längsschnitt, unten: Querprofile	43
Bild 5.13: Variante V0; Stromlinien der Geschwindigkeiten; oben: Längsschnitt in Beckenmitte $q_A = 4$ m/h, unten: 3D-Ansicht $q_A = 10$ m/h	44
Bild 5.14: Variante V0; Isolinien der resultierenden Geschwindigkeiten mit Stromlinien $q_A = 4$ m/h; oben: Schnitt 5,00 cm über Gerinneeinlauf-Sohle, unten: Schnitt 0,50 m über Beckensohle	45
Bild 5.15: Variante V1; Isolinien der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 4$ m/h; oben: Längsschnitt, unten: Querprofile	47
Bild 5.16: Variante V1; Stromlinien der Geschwindigkeiten; oben=Längsschnitt in Beckenmitte, unten=isometische Ansicht des Einlaufbereichs.....	49
Bild 5.17: Variante V1; Isolinien der resultierenden Geschwindigkeiten mit Stromlinien $q_A = 4$ m/h; oben: Schnitt 0,05 m über Gerinneeinlauf-Sohle, unten: Schnitt 0,50 m über Beckensohle	49
Bild 5.18: Variante V1; Isolinien der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 10$ m/h; oben: Längsschnitt, unten: Querprofile	50
Bild 5.19: Variante V1; Stromlinien der Geschwindigkeiten $q_A = 10$ m/h; oben: Längsschnitt in Beckenmitte, unten: 3D-Ansicht des gesamten Beckens	51
Bild 5.20: Variante V1; Isolinien der resultierenden Geschwindigkeiten mit Stromlinien $q_A = 10$ m/h; oben: Schnitt 0,05 m über Gerinneeinlauf-Sohle, unten: Schnitt 0,50 m über Beckensohle	52
Bild 5.21: Variante V2; oben: Isolinien-Querschnitte der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 4$ m/h; Mitte/unten: Isolinien der resultierenden Geschwindigkeiten $q_A = 4$ m/h; oben: Schnitt 0,05 m über Gerinneeinlauf-Sohle, unten: Schnitt 0,50 m über Beckensohle	54

Bild 5.22: Variante V2; Stromlinien der Geschwindigkeiten $q_A = 4$ m/h; oben: 3D-Ansicht „links“, unten: 3D-Ansicht „rechts“	56
Bild 5.23: Variante V3; oben: Isolinien-Querschnitte der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 4$ m/h; Mitte/untern: Isolinien der resultierenden Geschwindigkeiten $q_A = 4$ m/h; oben: Schnitt 0,05 m über Gerinneeinlauf-Sohle, unten: Schnitt 0,50 m über Beckensohle	58
Bild 5.24: Variante V3; Stromlinien der Geschwindigkeiten $q_A = 4$ m/h; 3D-Ansicht „rechts“	60
Bild 5.25: Variante V3; Detailansicht der Trichterkonstruktion für $q_A = 4$ m/h - Koturplot der resultierenden Geschwindigkeit mit Stromlinien	60
Bild 5.26: Partikelwirkungsgrade für $q_A = 10$ m/h.....	61
Bild 5.27: Partikel-Wirkungsgrade für $q_A = 10$ m/h - Partikel mineralisch ($\rho_s = 2650$ kg/m ³) ..	62
Bild 5.28: Partikel-Wirkungsgrade für $q_A = 4$ m/h - Partikel mineralisch ($\rho_s = 2650$ kg/m ³)	63
Bild 5.29: Gesamt- und Fraktionswirkungsgrade der verschiedenen Varianten für $q_A = 10$ m/h	64
Bild 5.30: Gesamt- und Fraktionswirkungsgrade der verschiedenen Varianten für $q_A = 4$ m/h	65
Bild 5.31: Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Zulaufhöhenverhältnisse für $q_A = 10$ m/h	68
Bild 5.32: Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Zulaufhöhenverhältnisse für $q_A = 4$ m/h	69
Bild 5.33: Der Einfluss verschiedener Oberflächenbeschickungen auf die Partikelwirkungsgrade.....	70
Bild 5.34: Darstellung von zwei Geometrien der Untersuchungsstudie L/B, zu sehen sind L/B 2,13 (links) und L/B 10,00 (rechts).....	72
Bild 5.35: Darstellung der Sekundärströmungen L/B 4.44 mittels <i>Isolinien</i> und der Vektoren 3 m hinter dem Zuflussquerschnitt (siehe Schnitt in Tabelle 5-15).....	75
Bild 5.36: Darstellungen der Schubspannungen auf der Sohle für $q_A = 10$ m/h.....	76
Bild 5.37: Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Abmessungsverhältnisse für $q_A = 10$ m/h	76
Bild 5.38: Vergleich der Gesamtwirkungsgrade verschiedener Abmessungsverhältnisse für $q_A = 10$ m/h	77

Bild 5.39: Vergleich der Wirkungsgrade für das Becken $L/B = 4.44$ für die verschiedenen Oberflächenbeschickungen	78
Bild 5.40: Vergleich der Wirkungsgrade für den Partikel mit einer Hazen-Zahl von 0.5 für die verschiedenen Oberflächenbeschickungen und Abmessungsverhältnisse ..	79
Bild 5.41: Darstellung der Trennhazenzahl für die verschiedenen Oberflächenbeschickungen und Abmessungsverhältnisse	80
Bild 5.42: Darstellung der Trennsinkgeschwindigkeit der Konfigurationen bezogen auf die Oberflächenbeschickungen	81
Bild 5.43: Detailzeichnung: Gleichrichter mit integrierter Grundwalze	82
Bild 5.44: Isometrische Darstellung des eigens entwickelten Bauteils: Gleichrichter.....	83
Bild 5.45: Stromlinien der Geschwindigkeiten $q_A = 10$ m/h; oben: 3D-Ansicht.....	84
Bild 5.46: Isolinien von Fließgeschwindigkeiten in X- Richtung in der Draufsicht des Beckens; 0,25 m unter dem Zulaufgerinne.....	85
Bild 5.47: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten u in X- Richtung in der Draufsicht des Beckens; Höhenlage: 0,30 m über der Beckensohle.....	85
Bild 5.48: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten u in x-Richtung in der 3D-Ansicht des Beckens bei (x/L) 0,05, 0,30, 0,55, 0,85 der Sedimentationskammer	86
Bild 5.49: Darstellung der Partikelwirkungsgrade im Hazen-Diagramm Vergleich zwischen der Grundvariante V_0 und dem Gleichrichter mit Grundwalze bei $q_A = 10$ m/h	87
Bild 5.50: Darstellung der Partikelwirkungsgrade im Hazen-Diagramm Vergleich zwischen der Grundvariante V_0 und dem Gleichrichter mit Grundwalze bei $q_A = 4$ m/h	88
Bild 5.51: Vergleich der Wirkungsgrade der Varianten ohne Einbauten	90
Bild 5.52: Darstellung der Partikelwirkungsgrade im Hazen-Diagramm Vergleich zwischen den beiden „Best-Cases“ aus der Literatur und der eigens entwickelten Konfiguration.....	91
Bild 5.53: Vergleich der Fraktionswirkungsgrade zwischen der Variante 1 Einlauf und dem Gleichrichter mit Grundwalze für $q_A = 10$ m/h.....	92
Bild 5.54: Vergleich der Fraktionswirkungsgrade zwischen der Variante 1 Einlauf und dem Gleichrichter mit Grundwalze für $q_A = 4$ m/h	93

Bild 5.55: Vergleich der Fraktionswirkungsgrade zwischen der Variante 1 Einlauf und dem Gleichrichter mit Grundwalze für $q_A = 4$ m/h (rot) und $q_A = 10$ m/h (blau).....	94
Bild 5.56: Darstellung der Sieblinie mit erhöhtem Fein- und Grobanteil.....	95
Bild 5.57: Vergleich der Fraktionswirkungsgrade bei originaler, feiner und grober Sieblinienzusammensetzung	97
Bild 6.1: Untersuchungskonzept.....	101
Bild 6.2: Schematische Skizze des Modellaufbaus (Bajcar et al. 2009).....	102
Bild 6.3: 3D-Ansicht des untersuchten Regenzyklonbeckens (Jörissen 2009)	103
Bild 6.4: Verläufe der Absetzwirkungsgrade des untersuchten Beckens mit $q_A = 10$ m/h (Jörissen 2009).....	104
Bild 6.5: Sedimentationsbereiche mit $q_A = 10$ m/h und links: $v_s = 5$ m/h; Mitte: $v_s = 10$ m/h; rechts: $v_s = 15$ m/h (Jörissen 2009)	104
Bild 6.6: links: Untersuchtes Becken in Rundbauweise mit zentralem Zulauf; rechts: Partikel-Durchmesser und Sinkgeschwindigkeit der untersuchten Partikelklassen (Huang und Jin 2011)	105
Bild 6.7: links: Absetzwirkungsgrad einzelner Partikelklassen entlang des Becken-Radius; rechts: Vergleich des Absetzwirkungsgrads verschiedener Modelle (Huang und Jin (2011)).....	105
Bild 6.8: Randbedingungen für das untersuchte Vorklärbecken (Liu et al. 2011)	106
Bild 6.9: Ansicht des Vorklärbeckens (Liu et al. 2011)	107
Bild 6.10: Maßnahme zur Regulierung der Strömung mit Hilfe einer Strömungsleitwand und Verlegung des Klarwasserabzugs in den empfohlenen 4ten Quadranten (Kemper et al. (2015)): Maßnahme zur Regulierung der Strömung mit Hilfe einer Strömungsleitwand und Verlegung des Klarwasserabzugs in den empfohlenen 4ten Quadranten (Kemper et al. (2015)).....	108
Bild 6.11: links: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten bei Regenwasserabfluss; a) originale Zulauf-Konfiguration, b) optimierte Zulauf-Konfiguration, rechts: Kontourplots der turbulenten kinetischen Energie: c) originale Zulauf-Konfiguration, d) optimierte Zulauf-Konfiguration (Patziger (2016)).....	108
Bild 6.12: Funktionsschema des physikalischen Modells in Rundbauweise	110
Bild 6.13: Ansicht des Gesamtsystem des Modellbeckens	110
Bild 6.14: Zulaufbehälter mit Turbulenzgitter (blau)	112

Bild 6.15: Mögliche Anschluss-Positionen des Zulaufs für das physikalische Modell	112
Bild 6.16: Beckenbereich des IWARU-Rundbecken-Modells (Draufsicht)	113
Bild 6.17: Klärüberlauf; links: Ansicht; rechts: Draufsicht	114
Bild 6.18: Modellgrenzen des Modellbeckens	114
Bild 6.19: Versuchsmaterialien, links: Millisil®; rechts: SiLibeads®	115
Bild 6.20: Zugabeort des Versuchsmaterials über eine Trichter-Vorrichtung, links: Draufsicht; rechts: Ansicht	116
Bild 6.21: links: Lage des Filters im eingebauten Zustand; rechts: Filter in der Ansicht	117
Bild 6.22: Prinzipielle Durchströmungscharakteristik des untersuchten Modellbeckens	125
Bild 6.23: Tracerverteilung für das Modellbecken und Zulauf 2 von $t = 2 - 15$ sec in der Draufsicht.....	126
Bild 6.24: Tracerverteilung für das Modellbecken und Zulauf 2 von $t = 20 - 35$ sec in der Draufsicht.....	127
Bild 6.25: Absetzwirkungsgrad und Absetzbild für das Modellbecken und Versuchsmaterial Millisil; links: Zulauf 1; rechts Zulauf 2	129
Bild 6.26: Absetzwirkungsgrad und Absetzbild für das Modellbecken und Versuchsmaterial SiLibeads; links: Zulauf 1; rechts Zulauf 2	129
Bild 6.27: Wirkungsgrad und Absetzbild; links: $k-\epsilon$ RNG Turbulenzmodell, rechts: Reynolds- Stress Modell (RSM).....	132
Bild 6.28: Einfluss der CL-Zahl auf einzelne Partikel	133
Bild 6.29: Vergleich der Absetzbilder des physikalischen (links) und des numerischen (rechts) Modells; markiert ist der am äußeren Rand frei bleibende Bereich, der durch Abminderung der kritischen Schubspannung reproduziert werden sollte	134
Bild 6.30: Schrittweise Abminderung der kritischen Schubspannung nach van Rijn und dessen Einfluss auf das Absetzbild	135
Bild 6.31: Wirkungsgrad und Absetzbild des physikalischen Modells	136
Bild 6.32: Wirkungsgrad und Absetzbild des validierten numerischen Modells	136
Bild 6.33: Ort der Probenahme-Stellen aus dem physikalischen Versuch	137
Bild 6.34: Prozentualer Anteil je Partikelklasse für unterschiedliche Sedimentationsbereiche; Versuchsmaterial: SiLibeads	138

Bild 6.35: Sedimentations-Bereich einzelner Partikelfraktionen aus dem validierten numerischen Modell.....	139
Bild 6.36: Gegenüberstellung der Tracerverteilung nach $t = 5$ und 20 sec für das physikalische Modell (links) und das numerische Modell (rechts)	140
Bild 6.37: Isometrische Darstellung der Becken-Konfiguration zur Untersuchung des Einflusses des Zulauf-DN	142
Bild 6.38: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten verschiedener Zulauf-Durchmesser, links: DN 500; rechts: DN 2000;.....	142
Bild 6.39: Einfluss des Verhältnisses von Zulauf-Durchmesser zur Beckentiefe auf den Absetzwirkungsgrad einzelner Partikel	143
Bild 6.40: Einfluss des Verhältnisses von Zulauf-Durchmesser zur Beckentiefe auf Gesamt- und Fraktions-Absetzwirkungsgrade (DN 500 – 1000).....	144
Bild 6.41: Einfluss des Verhältnisses von Zulauf-Durchmesser zur Beckentiefe auf Gesamt- und Fraktions-Absetzwirkungsgrade (DN 1200 – 2000).....	144
Bild 6.42: Schematische Darstellung der untersuchten Durchmesser-Tiefen-Verhältnisse bei gleichbleibendem Volumen von $V = 150 \text{ m}^3$	145
Bild 6.43: Einfluss des Durchmesser/Tiefen-Verhältnisses bzw. der Oberflächenbeschickung in Abhängigkeit des Zulauf-DN auf den Absetzwirkungsgrad ausgewählter Partikel.....	146
Bild 6.44: Einfluss des Durchmesser/Tiefen-Verhältnisses auf den Gesamt-Absetzwirkungsgrad für $h_{zu}/h_{ges} = 0,40$ (DN 800).....	147
Bild 6.45: Schematische Darstellung der untersuchten Zulauf-Winkel.....	147
Bild 6.46: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten verschiedener Zulauf-Winkel, links: $0,85 \cdot r$; Mitte: $0,50 \cdot r$; rechts: $0,00 \cdot r$;	148
Bild 6.47: Stromlinien mit Start im Einlauf verschiedener Zulauf-Winkel, links: $0,85 \cdot r$; Mitte: $0,50 \cdot r$; rechts: $0,00 \cdot r$;.....	148
Bild 6.48: Einfluss des Zulauf-Winkels auf den Absetzwirkungsgrad einzelner Partikel (mineralisch, $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$)	149
Bild 6.49: Einfluss des Zulauf-Winkels auf den Absetzwirkungsgrad einzelner Partikel (organisch, $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$).....	150
Bild 6.50: Einfluss des Zulauf-Winkels auf Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade	151

Bild 6.51: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten der Variante mit zentralem Klärüberlauf und tangentelem Zulauf	152
Bild 6.52: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade für die Konfiguration aus zentralem Klärüberlauf und tangentelem Zulauf.....	152
Bild 6.53: Lage des Zu- und Ablaufs der Becken-Konfiguration mit zentraler Beschickung und außen umlaufendem Klärüberlauf.....	153
Bild 6.54: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten der Variante mit zentralem Zulauf und außen umlaufendem Klärüberlauf.....	154
Bild 6.55: 3D-Ansicht der Stromlinien der Variante mit zentralem Zulauf und außen umlaufendem Klärüberlauf.....	154
Bild 6.56: Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel für die Konfiguration aus zentralem Zulauf und außen umlaufendem Klärüberlauf.....	155
Bild 6.57: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade für die Konfiguration aus zentralem Zulauf und außen umlaufendem Klärüberlauf.....	155
Bild 6.58: Absetzwirkungsgrade der Partikelfraktionen in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschickung für das optimierte Becken.....	156
Bild 6.59: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade für das optimierte Becken und $q_A = 2-6$ m/h	157
Bild 6.60: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade für das optimierte Becken und $q_A = 8-12$ m/h	157
Bild 7.1: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten der Grundvariante in rechteckiger Bauweise	160
Bild 7.2: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten der Grundvariante in runder Bauweise	160
Bild 7.3: Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel für mineralische Partikel der Grundvarianten	161
Bild 7.4: Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel für organische Partikel der Grundvarianten	162
Bild 7.5: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade der Grundvarianten mit $q_A = 10$ m/h	162
Bild 7.6: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten für das optimierte-Becken in rechteckiger Bauweise	163
Bild 7.7: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten für das optimierte-Becken in runder Bauweise	164

Bild 7.8: Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel für mineralische Partikel der optimierten-Becken	165
Bild 7.9: Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel für organische Partikel der optimierten-Becken	165
Bild 7.10: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade der optimierten-Becken mit $q_A = 10$ m/h... 166	
Bild 7.11: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade der optimierten-Becken mit $q_A = 4$ m/h..... 167	
Bild 8.1: Schematische Darstellung eines Geschiebeschachts ohne Sammeleinsatz (DWA-M 176, Bild 64).....	170
Bild 8.2: Geometrie des ausgewählten optimierten Beckens mit teilweise geblockter Lamellenwand (die Sohle ist blau eingefärbt); 3D-Ansicht	174
Bild 8.3: Gewählte Grundform des optimierten Beckens: oben: Draufsicht; unten: Längsschnitt.....	175
Bild 8.4: Auflösung des numerischen Gitternetzes und Darstellung der selektiven Verfeinerungen	177
Bild 8.5: Darstellung der unterschiedlichen Beckengeometrien der simulierten Becken der Stufe 2 "QAV"	180
Bild 8.6: Durchströmungscharakteristik in den fünf unterschiedlichen Becken; dargestellt sind die Geschwindigkeitsbeträge (velocity-magnitude) auf einem horizontalen Schnitt 20 cm oberhalb der Sohle.....	182
Bild 8.7: Im numerischen Modell ermittelte Absetzwirkungsgrade für die in der Simulationsstudie „QAV“ untersuchten Becken für einen Partikel mit einer Dichte von 2650 kg/m^3 und einem Durchmesser von $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom L/B-Verhältnis der Becken; $q_A = 48 \text{ m/h}$, $V = 9,75 \text{ m}^3$	183
Bild 8.8: Darstellung der unterschiedlichen Beckengeometrien der simulierten Becken der Stufe 3 „VLB“	184
Bild 8.9: Im numerischen Modell ermittelte Absetzwirkungsgrade für die in der Simulationsstudie „VLB“ untersuchten Becken für einen Partikel mit einer Dichte von 2650 kg/m^3 und einem Durchmesser von $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit von der Tiefe des Beckens (links) und dem B/H Verhältnis der Becken (rechts); $Q = 0,1 \text{ kg/s}$, $V = 9,75 \text{ m}^3$	186

Bild 8.10: Differenzen der im numerischen Modell ermittelten Wirkungsgrade zum theoretischen Wirkungsgrad gemäß Hazen-Theorie für die unterschiedlichen Becken bzw. Beckentiefen H	188
Bild 8.11: Bewertung des Platzbedarfes der untersuchten Beckentiefen H [m] mit Hilfe des Indikators I_{Becken} [-]	189
Bild 8.12: Bemessungsdiagramm zum Einfluss des Volumens der Sedimentationskammer auf den Absetzwirkungsgrad einzelner organischer Partikel	191
Bild 8.13: Bemessungsdiagramm zum Einfluss des Volumens der Sedimentationskammer auf den Absetzwirkungsgrad einzelner Partikel mit einer repräsentativen Mischdichte für Mischwasser	192
Bild 8.14: Bemessungsdiagramm zum Einfluss des Volumens der Sedimentationskammer auf den Absetzwirkungsgrad einzelner mineralischer Partikel.....	192
Bild 8.15: Anwendung des Bemessungsdiagrammes für mineralische Partikel. Die Zielvorgaben sind: Absetzwirkungsgrad mindestens 80 % für Partikel des Durchmessers 125 μm und größer. Das Ergebnis ist das erforderliche Beckenvolumen $V = 9 \text{ m}^3$ der Sedimentationskammer und bei einem Durchfluss von $Q = 100 \text{ l/s}$	194

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 5-1: Übersicht der betrachteten Varianten zum Neubau von Rechteckbecken.....	27
Tabelle 5-2: Randbedingungen der „worst-case“ Variante.....	29
Tabelle 5-3: Randbedingungen der Grundvariante V0.....	31
Tabelle 5-4: Randbedingungen der „Variante 1 Einlaufgestaltung“	32
Tabelle 5-5: Randbedingungen der „Variante 2 Fließwegführung“	34
Tabelle 5-6: Randbedingungen der „Variante 3 Sohlgestaltung“	35
Tabelle 5-7: Simulationsmatrix Untersuchung H/H	37
Tabelle 5-8: Simulationsmatrix Untersuchung L/B	38
Tabelle 5-9: Simulationsmatrix Gleichrichter mit Grundwalze	39
Tabelle 5-10: hydraulische Randbedingungen der numerischen Simulationen	39
Tabelle 5-11: Simulationen der H/H Untersuchung mit der Darstellung der <i>Isolinien</i> der Geschwindigkeiten in Fließrichtung in der Mitte des Beckens.....	66
Tabelle 5-12: Simulationen der H/H Untersuchung mit der Darstellung der <i>Stromlinien</i> eingefärbt mit den Geschwindigkeitskomponenten in Fließrichtung.....	67
Tabelle 5-13: Abmessungsverhältnisse nach DWA-A 166.....	71
Tabelle 5-14: Simulationen der L/B Untersuchung, Darstellung des <i>Isolinien</i> der Geschwindigkeiten in Fließrichtung v_U in der Mitte des Beckens	73
Tabelle 5-15: Simulationen der L/B Untersuchung mit der Darstellung der <i>Stromlinien</i> eingefärbt mit den Geschwindigkeiten in Fließrichtung	74
Tabelle 5-16: Wirkungsgrade des Gleichrichters mit Grundwalze	87
Tabelle 5-17: Wirkungsgrade der Varianten ohne Einbauten	89
Tabelle 5-18: Wirkungsgrade des Gleichrichters, verglichen mit der Variante V1 Einlauf	92
Tabelle 5-19: Summenhäufigkeiten der Sieblinien.....	96
Tabelle 6-1: Ermittelte Wirkungsgrade der untersuchten Rundbecken (Kemper et al. 2015)	107
Tabelle 6-2: Geometrische und hydraulische Randbedingungen des physikalischen Modells	111

Tabelle 6-3: Geometrische und hydraulische Randbedingungen der Becken zur Untersuchung des Einflusses des Zulauf-DN	120
Tabelle 6-4: Geometrische und hydraulische Randbedingungen der Becken zur Untersuchung des Durchmesser-Tiefen-Verhältnis	121
Tabelle 6-5: Geometrische und hydraulische Randbedingungen der Becken zur Untersuchung des Zulauf-Winkels	122
Tabelle 6-6: Geometrische und hydraulische Randbedingungen der Sonderkonstruktionen	123
Tabelle 6-7: Übersicht der Absetzwirkungsgrade der physikalischen Experimente	128
Tabelle 6-8: Übersicht der Absetzwirkungsgrade bei unterschiedlichen Zulauf-Durchmessern des Modellbeckens mit Zulauf 2	128
Tabelle 6-9: Einfluss des Gitternetzes auf den Absetzwirkungsgrad	131
Tabelle 6-10: Gesamtwirkungsgrade in Abhängigkeit der CL-Zahl	132
Tabelle 8-1: Zusammenfassung der Empfehlungen für unterschiedliche Sedimentationsbauwerke in aktuellen, deutschen Regelwerken	171
Tabelle 8-2: Übersicht über die Eigenschaften des verwendeten Partikelgemisches	178
Tabelle 8-3: Oben: Übersicht über die hydraulischen und geometrischen Randbedingungen der fünf simulierten Becken der Simulationsstufe "QAV"; Unten: Empfehlungen aus dem DWA-A 166 (2013) zu den Abmessungsverhältnissen; in Rot markiert sind solche Abmessungsverhältnisse, die außerhalb der Empfehlungen des DWA-A 166 (2013) liegen (sind unten angefügt)	181
Tabelle 8-4: Übersicht der simulierten Becken der Stufe 2 "VLB" (Abmessungen beziehen sich auf die Sedimentationskammer); Unten: Empfehlungen aus dem DWA-A 166 (2013) zu den Abmessungsverhältnissen; in Rot markiert sind solche Abmessungsverhältnisse, die außerhalb der Empfehlungen des DWA-A 166 (2013) liegen (sind unten angefügt)	185
Tabelle 8-5: Übersicht über die verwendeten Partikel in der weitergehenden Untersuchung zum Einfluss der Beckentiefe H auf den Absetzwirkungsgrad	187
Tabelle 8-6: Auf Basis der Ergebnisse in diesem Kapitel gewählte Abmessungsverhältnisse im Vergleich zu den im DWA A-166 definierten Abmessungsverhältnissen	189

Tabelle 8-7: Übersicht der simulierten Becken der Stufe 3 "V" (Abmessungen beziehen sich auf die Sedimentationskammer);	190
---	-----

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m ²	Beckenoberfläche
A _{Ein}	m ²	Zulaufquerschnitt
AFS		Abfiltrierbare Stoffe
Al		Aluminium
A _{Sed}	m ²	Sedimentations-Oberfläche
A _o		Oberfläche
A _{zu}	m ²	Fläche des Zulaufs
B	m	Beckenbreite, Breite des Fließweges
CFD		Computational Fluid Dynamics
Cd		Cadmium
CL-Zahl		Time scale constant
Cr		Chrom
Cu		Kupfer
C _μ		Empirische Modellkonstanten
d, d _k	μm	Korndurchmesser
D*	-	Sedimentologischer Korndurchmesser
DN	mm	Rohrinnendurchmesser
DN _{zu}	mm	Durchmesser des Zulaufs
DWA-A		Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft
DWA-M		Merkblatt der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft
DWA-T		Themenblatt der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft
EG-WRRL		Europäischen Wasserrahmenrichtlinie
Fe		Eisen
Fr	-	Froude-Zahl
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
Gl.		Gleichung
Ha	-	Hazen-Zahl
H, h _{Becken} , h _{ges}	m	Beckenhöhe bzw. Becken(wasser)tiefe bzw. Abstand KÜ-Beckensole
h _{Block}	m	Höhe des verblockten Zulaufes
h _{Ein}	m	Höhe der Becken-breiten Einströmzone
h _{Ein} /h _{ges} , H/H	m	Verhältnis der Höhe der Einströmzone zur Beckenhöhe bei Rechteckbecken
h _{zu} /h _{ges}	m	Verhältnis der Höhe des Zulaufrohrs zur Beckenhöhe bei Rundbecken
h _{KÜ}	m ; cm	Überfallhöhe am Wehr

I	-	Strömungs-Indikator
I _{Becken}	-	Becken Indikator
K		Kalium
KA		Korrespondenz Abwasser
k _{Beton}	m	Rauheit von Beton
k _{Metall}	m	Rauheit von Metall
KÜ		Klärüberlauf
k-ε		k-ε Turbulenzmodell
L	m	Beckenlänge
L _{ges}	m	Gesamtlänge des Fließweges
L _{Rezirk}	m	Länge der Grundwalze/Rezirkulation
M	-	Modell-Maßstab
Ma	g	Ausgetragene Masse der Partikel
M _{Filter}	g	Masse des beladenen Filters
MID		magnetisch-induktiver Durchflussmesser
M _{Leergewicht}	g	Masse des Filter-Leergewichtes
Mn		Mangan
Mz	g	Zugegebene Masse der Partikel
Ni		Nickel
p _{spez}	W/m ³	Spezifischer Energieeintrag
Pb		Blei
Q	m ³ /s ; l/s	Durchfluss/Zufluss
q _A	m/h	Oberflächenbeschickung
Q _x	kg/s	hydraulische Belastung
Re	-	Reynolds-Zahl
RKB		Regenklärbecken
RNG		Re-Normalisation- Group Turbulenzmodell
RSM		Reynolds-Stress-Modell
Si		Silicium
T		Titan
t	s	Zeit
t _R	s	Aufenthaltszeit
t _s	s	Sinkzeit
u	m · s ⁻¹	Fließgeschwindigkeit in X-Richtung
UDF		User defined function
V	m ³	Volumen
V _s	m ³ /ha	<i>Spezifisches Beckenvolumen</i>
V _{Becken}	m ³	Volumen des Beckens
V _{Ein}	m ³	Volumen des Einlaufs

v	m/s	Fließgeschwindigkeit
v_{Becken}	m/s	mittlere horizontale Fließgeschwindigkeit
v_{Ein}	m/s	Fließgeschwindigkeit des Einlaufs
v_M	m/s	Mittlere Fließgeschwindigkeit
v_s	m/h	Sinkgeschwindigkeit
v_U	m/s	Geschwindigkeitsprofile
v_v	m/s	vertikale Fließgeschwindigkeit
v_w	m/s	Sekundär Geschwindigkeit
WIBAS-Datenbank		Informationssystem Wasser, Immissionsschutz, Boden, Abfall, Arbeitsschutz „Grundwasserdatenbank“
WW		wastewater
WWF		wet weather flow at catchment outlet
x	m	Koordinate in X-Richtung
y	m	Koordinate in Y-Richtung
Zn		Zink
z	m	Koordinate in Z-Richtung
Δ	-	Differenz zwischen zwei Wirkungsgraden
ε	m^2/s^3	Dissipationsrate
η	-	Wirkungsgrad
η_{Millisil}	%	Absetzwirkungsgrad für Millisil
η_{Pf}	-	Wirkungsgrad einer Pfropfenströmung nach Hazen
$\eta_{\text{SiLibeads}}$	%	Absetzwirkungsgrad für SiLibeads
η_{vd}	-	Wirkungsgrad voll durchmischter Reaktor
η	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$	Dynamische Viskosität
η_t	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$	Wirbelviskosität
$\rho_{\text{Fluid}} ; \rho$	kg/m^3	Dichte Fluid, Dichte Wasser
ρ_s	kg/m^3	Dichte Partikel
τ_{dim}	-	Dimensionslose Schubspannung
τ_{krit}	N/m^2	kritische Schubspannung
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur vom Wasser
\varnothing	m	Durchmesser
$\varnothing_{\text{Becken}}$	m	Durchmesser des Beckens

1 Einleitung

Regenklärbecken (RKB) dienen der mechanischen Reinigung des Niederschlagswassers von absetzbaren und schwimmfähigen Stoffen, sodass die in das Gewässer entlastenden Schmutzfrachten reduziert werden. Nach dem Prinzip der Sedimentation sollen Partikel durch eine Aufweitung des Fließquerschnitts und die daraus resultierende geringere Fließgeschwindigkeit absinken. Hier sind vor allem die feinen, mineralischen Fraktionen mit einem Durchmesser kleiner $63\ \mu\text{m}$ (AFS_{63}) von Bedeutung, denn diese binden auf Grund ihrer in Relation zum Durchmesser großen Oberfläche einen Großteil der Schadstoffe, insbesondere Schwermetalle, an sich und stellen somit eine erhebliche Belastung für Gewässer dar (z.B. Boller (2005)).

Bisherige und laufende Forschungsvorhaben (u.a. Uhl et al. (2012), Eyckmanns-Wolters et al. (2013)) zeigen, dass bestehende Regenklärbecken oftmals nur einen unzureichenden Rückhalt von feinpartikulären Substanzen und den daran gebundenen Schadstoffen aufweisen. Deshalb stellt sich die Frage, ob das Funktionsprinzip der Sedimentation grundsätzlich anzuzweifeln ist. Im Hinblick auf den Bestand von mehr als 28.000 Becken in Deutschland (Statistisches Bundesamt (2015)) und dem darin gebundenen Investitionsvolumen sollte jedoch vielmehr die Frage nach dem vorhandenen Potenzial dieser Becken gestellt werden.

Theoretische Betrachtungen (Oberflächensatz nach Hazen (1904)) legen nahe, dass ein Sedimentationsbecken, welches mit den in DWA-A 166 (2013) definierten Verhältnissen von Länge, Breite und Tiefe konzipiert wird, in der Lage sollte, Partikel mit einer Dichte von $\rho_S = 2650\ \text{kg/m}^3$ und einem Durchmesser von $d_k = 63\ \mu\text{m}$ vollständig im Becken zurückzuhalten, sofern eine Oberflächenbeschickung von $q_A = 10\ \text{m/h}$ nicht überschritten wird.

Diese theoretische Betrachtung des Leistungspotenziales weicht jedoch deutlich von den in-Situ Beobachtungen bestehender Becken ab. Das bedeutet, dass das Beckenvolumen nicht vollständig für Sedimentationsvorgänge genutzt werden kann und deshalb mit großer Wahrscheinlichkeit eine Durchströmungscharakteristik vorhanden sein muss, welche für die Sedimentation ungünstige Bedingungen aufweist.

Angesichts des Klimawandels und den damit verbundenen, verstärkten Belastungen des Kanalnetzes sowie den Anforderungen der WRRL werden Regenbecken auch zukünftig ein zentrales Element der Niederschlagswasserbehandlung sein.

Hierdurch ergeben sich folgende grundlegenden Handlungsfelder in diesem Forschungsprojekt:

- I. Ertüchtigung von bestehenden Regenklärbecken in Rechteckbauweise durch einfache, nachrüstbare Bauteile (Phase 1)
- II. Definition von eindeutigen Richtlinien für den Neubau von Regenklärbecken in Rechteck- und Rundbauweise (Phase 2)
- III. Beckendimensionierung für eine Kombination von Sedimentation und Filtration als Neubau- aber auch als Ertüchtigungsmaßnahme für Regenklärbecken im Bestand (Phase 2)

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Grundsätzlich war es das Ziel dieses Forschungsvorhabens, belastbare Grundlagen zur Gestaltung und Dimensionierung von Regenklärbecken zu schaffen, an denen sich sowohl der Konstrukteur als auch die Genehmigungsbehörde bei der Auslegung bzw. Genehmigung solcher Becken orientieren können. Das oberste Ziel war es, die Wirkung der Regenklärbecken zur Regenwasserbehandlung auf ein, gegenüber dem jetzigen Stand, höheres Niveau zu heben, sodass insbesondere der Eintrag feinpartikulärer und feinpartikulär gebundener Stoffe in die Gewässer so weit wie möglich reduziert wird.

Um die in der Einleitung geschilderten, grundlegenden Handlungsfelder zu behandeln, wurde das Forschungsprojekt in zwei Phasen gegliedert.

In **Phase 1** wurde das Optimierungspotenzial bestehender, rechteckiger Regenklärbecken anhand der Analyse der vorliegenden Durchströmungscharakteristik aufgezeigt. Auf dieser Basis wurden unterschiedliche Optimierungsmaßnahmen als einfache und kostengünstig nachrüstbare Bauteile entwickelt und deren Wirksamkeit mit Hilfe von Strömungs-Indikatoren bewertet. Über die Ergebnisse der Phase 1 ist, zusammengefasst in einem Katalog mit möglichen Einbauten, in einem separaten, ersten Band des Abschlussberichts bereits berichtet worden.

In **Phase 2** wird hier für Regenklärbecken in Rechteck- und Rundbauweise jeweils ein optimiertes Becken für den Neubau vorgeschlagen. Diese optimierten Becken werden nicht als „Musterbecken“ bezeichnet, da eine allumfassende und erschöpfende Untersuchung in diesem Rahmen nicht möglich war. Die Becken in Rechteck-Bauweise wurden rein numerisch untersucht. Für die Konzipierung des optimierten Rundbeckens wurden sowohl physikalische Experimente als auch numerische Simulationen durchgeführt. Zudem wurde ein Vergleich zwischen der Rechteck- und Rundbauweise angestellt, in dem der Einfluss der Beckengrundform auf den Absetzwirkungsgrad analysiert wurde. Weiterhin wurden Konstruktionshinweise und Bemessungsgrundlagen für Sedimentationsanlagen entwickelt, die einer zweiten Reinigungsstufe (z.B. technischer Filter, Retentionsbodenfilter) vorgeschaltet werden können. Spezifisch für unterschiedliche Filtertypen sollten gezielt solche Feststoffgrößenklassen in der Vorstufe zurückgehalten werden, welche die Leistungsfähigkeit des Filters beeinträchtigen können. Dies wurde mit Hilfe von numerischen Simulationen erarbeitet. Eine ausführlichere Vorgehensweise zu den verschiedenen Themen ist in den entsprechenden Kapiteln zu finden.

Der vorliegende Band des Abschlussberichts bezieht sich ausschließlich auf die Phase 2.

3 Grundlagen

3.1 Theoretische Grundlagen zu Prozessen in Sedimentationsbecken

Regenklärbecken liegt das Prinzip der Schwerkraft-Abscheidung zugrunde. Diese beschreiben das Absinken von Feststoffen auf Grund von Dichteunterschieden (Gujer 2007). Einen der ersten Beiträge zur Sedimentationswirkung von Rechteckbecken leistete Hazen (1904), der die Modellvorstellung eines ideal durchströmten Absetzbeckens entwickelte, gemeinhin „Hazen-Theorie“ genannt. Die maßgebenden geometrischen Größen sind dazu in Bild 3.1 dargestellt.

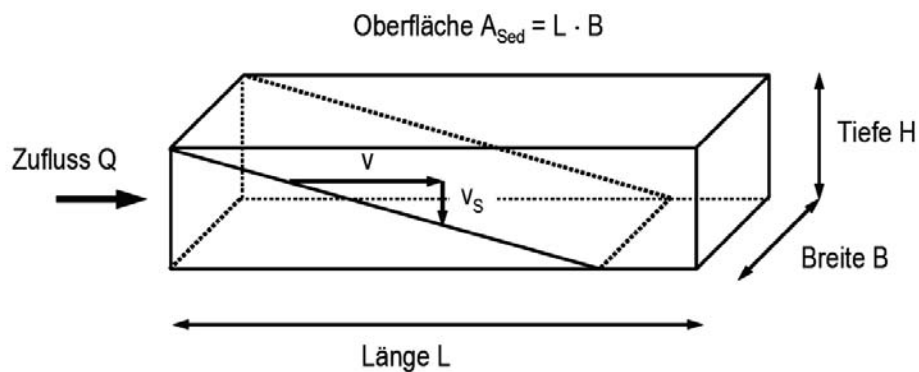


Bild 3.1: Absetzvorgang in einem Rechteckbecken mit laminarer Strömung und gleichmäßiger, blockförmiger Verteilung der Fließgeschwindigkeit v über den Beckenquerschnitt (Pfropfenströmung) (Gujer 2007)

Nach Hazens Annahmen erfolgt die Durchströmung laminar, stationär sowie gleichförmig. Das Fluid ist frei von Diffusion, inkompressibel und es treten keine Dichteunterschiede auf, auch nicht durch das Absetzen von Partikeln, deren Bewegung (reines Absinken) ohnehin keine Auswirkungen auf das Strömungsfeld hat. Benachbarte Stromlinien vermischen sich nicht und es liegt eine sogenannte „Pfropfenströmung“ vor. Die von der Strömung transportierten Teilchen treten gleichmäßig über den Beckenquerschnitt verteilt ein und gelten als abgeschieden, sobald sie den Boden berührt haben, bevor sie das Ende des Beckens erreichen.

Für diese idealen Bedingungen lässt sich die Fließgeschwindigkeit v wie folgt definieren:

$$v = \frac{Q}{B * H} \quad (\text{m/s}) \quad (\text{Gl. 1})$$

mit v Fließgeschwindigkeit (m/s)

Q Durchfluss (m^3/s)

B Beckenbreite (B)

H Fließtiefe (m)

Pfropfenströmung

Eine Pfropfenströmung kann nur in einem laminar durchströmten Reaktor vorliegen. Die Stoffkonzentration sowie die Strömungsgeschwindigkeiten sind über den gesamten Querschnitt homogen verteilt. Lediglich in Grenzbereichen kommt es zu einem sprunghaften Geschwindigkeitsabfall. Charakteristisch ist außerdem, dass in Längsrichtung keine Diffusionsvorgänge auftreten. Kommt es bei der Pfropfenströmung zu einem Konzentrationsimpuls, tritt dieser unverändert, lediglich zeitlich versetzt, im Ablauf auf Munson et al. (2014).

Für ein idealisiertes Becken mit Pfropfendurchströmung gilt:

$$\eta_{Pf} = \begin{cases} v_s/q_A & \text{für } v_s/q_A \leq 1 \\ 1 & \text{für } v_s/q_A > 1 \end{cases} \quad (-) \quad (\text{Gl. 2})$$

mit η_{Pf} Wirkungsgrad einer Pfropfenströmung nach Hazen (-)

v_s Sinkgeschwindigkeit (m/h)

q_A Oberflächenbeschickung (m/h)

Sobald durch den Einfluss von Wänden, von Turbulenz oder Ein- und Auslaufgestaltungen von der idealen laminaren Strömung abgewichen wird, entsteht eine Abweichung der Wirkungsgrade zu den in der Hazen-Theorie beschriebenen, scheinbar theoretisch maximal möglichen Wirkungsgraden. Diese Abweichung kann entgegen dem Anschein in beide Richtungen auftreten, wie bereits in einem vorherigen Projekt dargestellt worden ist (Mohn et al. 2013).

Vollständige Durchmischung

Ein zur Hazen-Theorie konträres Denkmodell hilft gelegentlich, sich die Wirkung von Strömungsphänomenen in einem Absetzreaktor besser vorzustellen. Anders als bei der Pfropfenströmung liegt bei einer vollständigen Durchmischung zu jeder Zeit im Auslaufstrom die gleiche Konzentration vor wie im gesamten Becken. Es herrscht unendliche, isotrope Turbulenz bzw. unendlich große turbulente Diffusion. Auf einen Konzentrationsimpuls, der zwar vom Einlauf ausgeht, aber sofort überall im Becken verfügbar ist, folgt ein exponentieller Abfall des Konzentrationsverlaufs durch die Absetzwirkung (Munson et al. 2014). Diese sinkt nicht etwa, wie man meinen könnte, auf Null ab, da die, an sich negative, Turbulenz bzw. turbulente Diffusion auch permanent dafür sorgt, dass ein gewisser Mindestanteil (auch) der feinsten Partikel sich ständig unmittelbar über der Sohle befindet und dort demobilisiert werden kann, und zwar ganz unabhängig von der Aufenthaltsdauer im Becken.

Den Wirkungsgrad für voll durchmischte Reaktoren beschreibt Feldhaus (1993) wie folgt:

$$\eta_{vd} = \frac{1}{1 + \frac{1}{v_s/q_A}} \quad (-) \quad \text{(Gl. 3)}$$

mit η_{vd} Wirkungsgrad voll durchmischten Reaktor (-)

v_s Sinkgeschwindigkeit (m/h)

q_A Oberflächenbeschickung (m/h)

Beide Theorien beruhen auf der Annahme, dass Phänomene wie Resuspension oder Partikelagglomeration ausgeschlossen werden. In Bild 3.2 sind die o.g. Wirkungsgrade der beiden Modelle dargestellt. Es wird deutlich, dass Becken, in denen eine Pfropfenströmung vorliegt, den besseren Wirkungsgrad aufweisen und damit scheinbar den theoretisch maximal möglichen Wirkungsgrad markieren. Voll durchmischte Becken dagegen zeigen die schlechtere Rückhalteleistung, die dennoch nicht komplett auf Null absinken kann. Sie markieren damit den scheinbar theoretisch minimal möglichen Wirkungsgrad.

Im Becken finden an verschiedensten Stellen Störungen der Strömung statt. Diese können beispielsweise Querschnittsänderungen am Einlauf oder bei Einbauten sein. Die Idealvorstellung einer Pfropfenströmung kann laut Kutzner (2005) daher nicht erreicht werden. Vielmehr stelle die Strömung im Becken eine Hybridlösung dar, stellt dieser Autor fest.

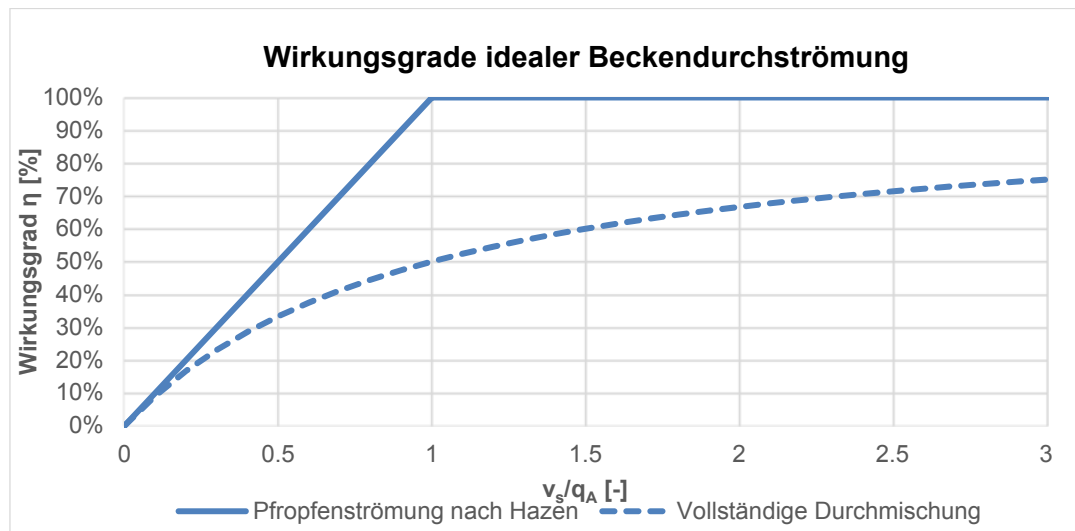


Bild 3.2: Wirkungsgrade idealer Beckendurchströmungen in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit und der Oberflächenbeschickung

Kritische Schubspannung

Der Sedimenttransport auf der Beckensohle beginnt, sobald die Strömungskraft der Fluids die Widerstandskraft des Partikels übersteigt. Die in diesem Zustand auftretende Schubspannung wird die kritische Schubspannung τ_{krit} genannt.

Nach Shields (1936) ist die kritische Schubspannung von verschiedensten Parametern abhängig:

- Gefälle der Sohle
- Gewicht des Partikels
- Kornform
- u.ä.

Die kritische Schubspannung kann nach dem allgemein bekannten Diagramm von Shields (hier nicht dargestellt) oder nach zahlreichen anderen Autoren definiert werden, von denen hier nur van Rijn (2016) zitiert wird, da er die Schubspannung, den Erfordernissen dieses Forschungsvorhabens entsprechend, formelmäßig beschreibt und wie folgt definiert:

$$\tau_{dim} = \frac{0,3}{(1 + D^*)} + 0,055 * [1 - e^{(-0,02 \cdot D^*)}] \text{ für } D^* > 0,1 \quad (-) \quad (\text{Gl. 4})$$

mit τ_{dim} Dimensionslose Schubspannung (-)

D^* Sedimentologischer Korndurchmesser (-)

wobei

$$D^* = d \cdot \left[\frac{(\rho_s / \rho_{Fluid} - 1) \cdot g}{\nu_d^2} \right]^{1/3} \quad (-) \quad \text{(Gl. 5)}$$

mit D^* Sedimentologischer Korndurchmesser (-)

d Korndurchmesser (mm)

ρ_s Dichte Partikel (kg/m^3)

ρ_{Fluid} Dichte Fluid (kg/m^3)

g Erdbeschleunigung = $9,81 \text{ kg}/\text{s}^2$

ν_d Dynamische Viskosität ($\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$)

Daraus wird die dimensionsbehaftete kritische Schubspannung gewonnen:

$$\tau_{krit} = \frac{\tau_{dim}}{(\rho_s - \rho_{Fluid}) \cdot g \cdot d} \quad (\text{N}/\text{m}^2) \quad \text{(Gl. 6)}$$

mit τ_{krit} Kritische Schubspannung (N/m^2)

ρ_s Dichte Partikel (kg/m^3)

ρ_{Fluid} Dichte Fluid (kg/m^3)

g Erdbeschleunigung = $9,81 \text{ kg}/\text{s}^2$

d Korndurchmesser (mm)

Da die kritischen Schubspannungen für Remobilisierungsvorgänge definiert wurden, hier jedoch in erster Linie die Demobilisierung von Interesse ist, kann nicht ohne Weiteres vorausgesetzt werden, dass die so ermittelten Werte unmittelbar auf das hier behandelte Problem übertragen werden können. In diesem Vorhaben kommen daher auch eigene Forschungsergebnisse aus einem parallel bearbeiteten Vorhaben (ReFeNi, Phase 2) zur Anwendung, über die bisher noch nicht formell berichtet wurde. Im Wesentlichen bedeutet dies eine Abminderung der kritischen Schubspannungen für Absetzvorgänge (Demobilisierung).

Nach Hazens Theorie werden alle Partikel abgeschieden, innerhalb der Durchflusszeit bzw. Aufenthaltsdauer des Wassers im Becken t_R die Sohle zu erreichen. Dabei kommt der Grenzpartikel im ungünstigsten Fall am Wasserspiegel in das Becken hinein und muss die gesamte

Höhe mit seiner ihm eigenen Vertikalgeschwindigkeit überwinden, also muss seine Absetzdauer t_s geringer sein als die Aufenthaltsdauer t_R . Es gilt:

$$\frac{L}{v_h} = \frac{H}{v_v} = t_s \quad \rightarrow \quad \frac{L}{\frac{Q}{B * H}} = \frac{H}{v_v} \quad \rightarrow \quad \frac{V}{Q} = \frac{H}{v_v} = t_R \quad \text{(Gl. 7)}$$

mit L Länge der Sedimentationskammer (m)

v_h Fließgeschwindigkeit (m/s)

H Höhe der Sedimentationskammer (m)

v_v Sinkgeschwindigkeit (m/s)

t_s Dauer des Absetzvorgangs

Q Durchfluss (m^3/s)

B Breite der Sedimentationskammer (m)

V Volumen der Sedimentationskammer (m^3)

t_R Aufenthaltsdauer (s)

Somit lässt sich für die vertikale Geschwindigkeit in der Hazen-Theorie aufstellen:

$$v_v = \frac{Q}{A_0} = q_A \text{ (m/s)} \quad \text{(Gl. 8)}$$

mit v_v Sinkgeschwindigkeit (m/s)

Q Durchfluss (m^3/s)

A_0 Beckenoberfläche (m^2)

q_A Oberflächenbeschickung

Es wird ersichtlich, dass die zulässige Vertikalgeschwindigkeit eines Partikels in der Hazen-Theorie unabhängig ist von der Fließtiefe H und nur vom Durchfluss Q und der Oberfläche A_0 abhängt. Anstelle der zulässigen Vertikalgeschwindigkeit wird deshalb die Oberflächenbeschickung q_A eingeführt, die nach ATV-A 128 (1992) bzw. DWA-A 102 (2016) eine wichtige Dimensionierungsgröße für Sedimentationsbecken ist. Es sei anzumerken, dass sich Abweichungen vom theoretischen Idealfall stets auf Grund der punktuellen Strömungsverhältnisse ergeben.

Geiger et al. (1998) führen Hazens Überlegungen weiter fort und definieren die sogenannte Hazen-Zahl:

$$Ha = \frac{v_s}{q_A} \text{ (-)} \quad \text{(Gl. 9)}$$

mit Ha Hazen-Zahl (-)

v_s Sinkgeschwindigkeit eines Partikels (m/h)

q_A Oberflächenbeschickung (m/h)

Sie besagt, dass sich ein Partikel vor dem Austritt aus dem Becken abgesetzt hat, sobald seine Sinkgeschwindigkeit mindestens der Oberflächenbeschickung entspricht.

Die Sinkgeschwindigkeit wird mit der Stokeschen Gleichung für sphärische Körper berechnet:

$$v_s = 200 \cdot \frac{g d_K^2 (\rho_F - \rho)}{\eta} \left(\frac{m}{h} \right) \quad (\text{Gl. 10})$$

mit v_s Sinkgeschwindigkeit eines Partikels (m/h)

g Erdbeschleunigung

d_K Korndurchmesser (m)

ρ

3.2 Zusammensetzung von Feststoffen im Niederschlagswasser

Zur Auswertung des Masse-gewichteten Wirkungsgrades werden Stützstellen für mineralische sowie organische Partikel definiert. Dazu wird eine Sieblinie (roter Graf in Bild 3.3) gewählt, die sich an den tatsächlichen Zusammensetzungen von Regenwasserproben orientiert, welche aus verschiedenen Sieblinien der Forschungsergebnisse von Adachi and Tainosho (2005); Dierschke (2014); Dierschke and Welker (2015); Gunawardana et al. (2014); Karlsson et al. (2010); Kim and Sansalone (2008) und Zhao et al. (2010) stammen und in (Bild 3.3) zusammengestellt wurden.

Weiterhin erfolgt eine Untersuchung zum Einfluss der Partikelverteilung auf den Gesamtwirkungsgrad. Hierzu wurde die in Bild 3.3 erstellte Verteilung des Gemisches sowohl nach links als auch rechts verschoben (blauer und grüner Graf). Anhand dieser Betrachtung werden sowohl die Ober- als auch Untergrenzen der gemessenen Partikelverteilungen aus den Literaturangaben gesetzt.

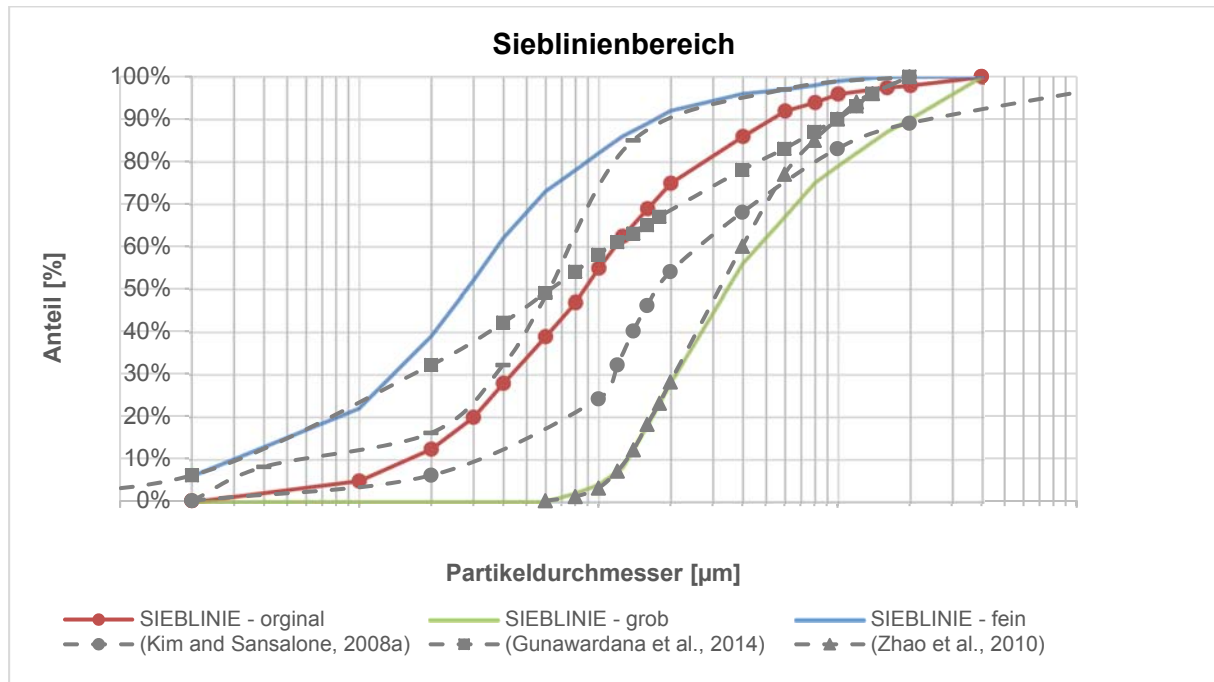


Bild 3.3: Sieblinien aus Forschungsergebnissen

Das Partikelgemisch besteht aus Partikeln zwischen $d_K = 1$ und $d_K = 2000 \mu\text{m}$. Alle Stützstellen liegen jeweils in mineralischer und organischer Form vor. Die Korndichte ρ_s definiert sich für die mineralischen Partikel mit $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$. Die organischen Partikel werden mit einer Dichte von $\rho_s = 1020 \text{ kg/m}^3$ angegeben.

Ferner erfolgt eine Aufteilung der Partikel in die beiden Fraktionen AFS $< 63 \mu\text{m}$ sowie AFS $\geq 63 \mu\text{m}$. Die Feinfraktion AFS $< 63 \mu\text{m}$ nimmt insgesamt einen Anteil von 55 % der Gesamtmasse ein, die Fraktion AFS $\geq 63 \mu\text{m}$ entsprechend 45 %. Nach Erkenntnissen werden dieser Fein- und Grobfraktion Anteile an mineralischen sowie organischen Bestandteilen zugewiesen. Diese werden im folgenden Bild 3.4 dargestellt.

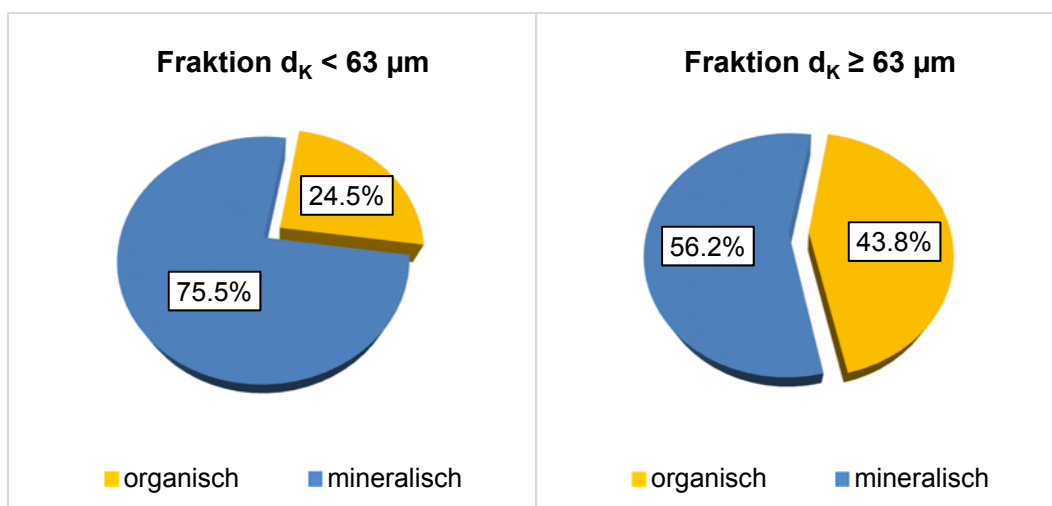


Bild 3.4: Aufteilung der Partikel in organische und mineralische Fraktionen

Eine ausführliche Zusammenstellung aller Partikel ist in **Anhang 1** hinterlegt.

3.3 Schadstoffbelastung von Feststoffen im Niederschlagsabfluss

Nach Angaben von Zhao et al. (2010) haben Partikel mit den kleinsten Korngrößen die höchsten Metallkonzentrationen, denn 70 % der Metallfrachten im Niederschlagsabfluss binden sich an die Fraktionen von 0 - 44 µm. Als weitere Einschätzung gab Zhao et al. (2010) an, dass Schwermetalle von Straßenablagerungen zu 80% in den Fraktionen < 250 µm sind. Er untersuchte die Schwermetallbelastung von sechs verschiedenen Stoffen in drei verschiedenen Einzugsgebietstypen, wie in dem Bild 3.5 ersichtlich wird.

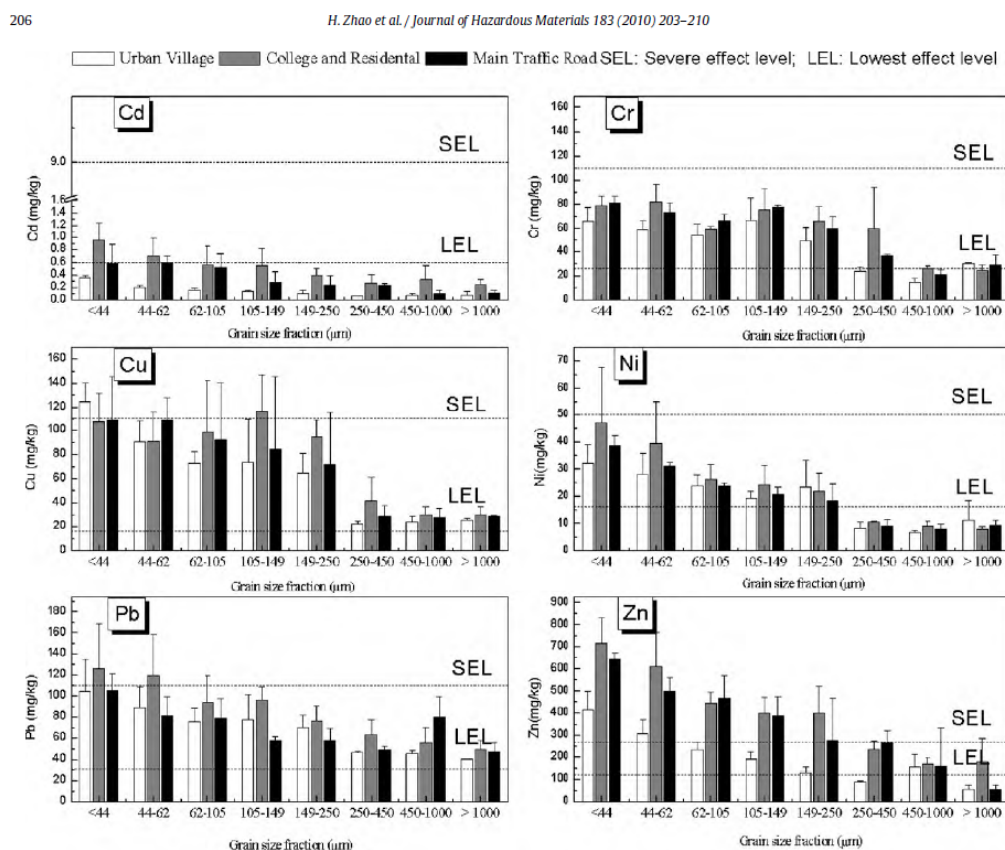


Fig. 3. Heavy metal concentrations in RDS (SEL: severe effect level; LEL: lowest effect level). Values expressed as mean \pm standard deviation.

Bild 3.5: Schwermetallkonzentrationen (Zhao et al. 2010)

Aus den Untersuchungen (vgl. Bild 3.6) von Karlsson et al. (2010), die Konzentrationen in der Nähe von Stockholm sowohl von zwei Sedimentationsbecken (RS, HS) als auch von zwei Teichen (LH, KÖ) gemessen haben, geht hervor, dass ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Partikelgröße unter $d_K = 63 \mu\text{m}$ und der Zinkkonzentration besteht. Wie in Bild 3.7 ersichtlich wird, steigt die Zinkkonzentration bei steigender Partikelgröße an. Demnach

wäre für den Parameter Zink, gegensätzlich zu der Aussage von Zhao et al. (2010), die Zielfraktion nicht im Bereich von 0 – 44 µm sondern im Bereich größerer Fraktionen.

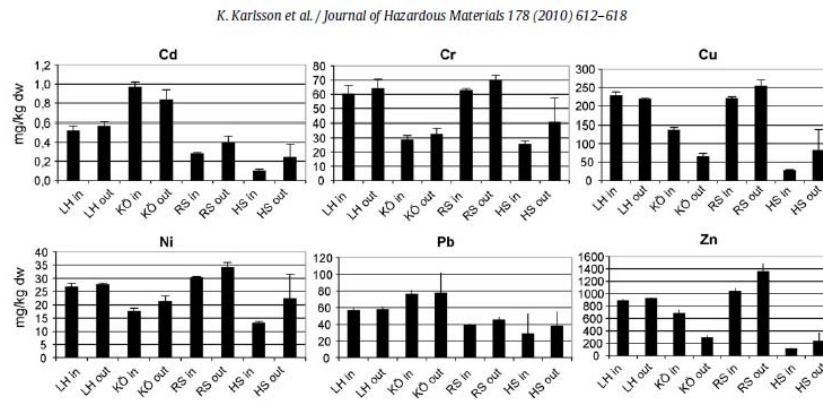


Fig. 3. Heavy metal sediment concentrations (with standard deviations) in the ponds and the sedimentation tanks (mg/kg dw).

Bild 3.6: Schwermetallkonzentrationen (Karlsson et al., 2010)

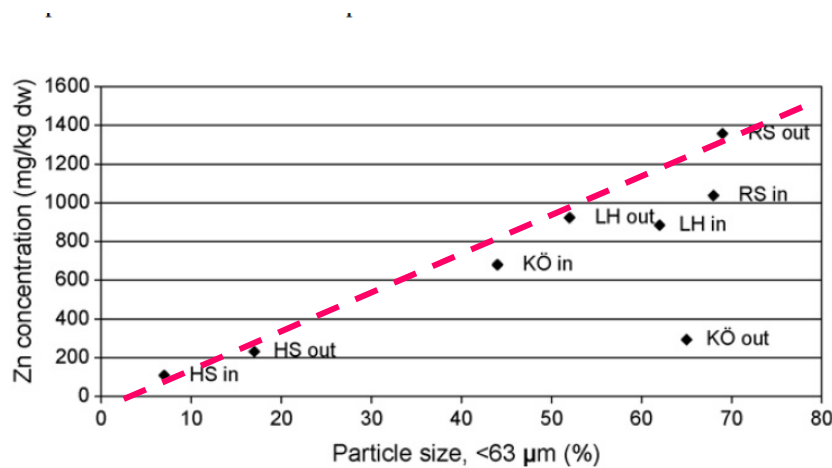


Fig. 4. Relationship between total Zn concentration and percentage of particles less than 63 µm for all sediment samples.

Bild 3.7: Zusammenhang zwischen Zink und der Partikelgröße unter 63 µm (Karlsson et al., 2010)

Da bekannt ist, dass Stofffrachten von Verkehrsflächen eine nennenswerte Quelle der Metall- und Schadstofffrachten des urbanen Umfelds sind, untersuchten (Adachi und Tainosho 2005) lediglich die Frachten von Verkehrsflächen (Bild 3.8). Dabei fanden sie heraus, dass Mangan (Mn), Eisen (Fe), Kupfer (Cu) und Blei (Pb) die höchsten Metallkonzentrationen bei Partikelfraktionen unter 50 µm haben. Dies würde die Aussage von (Zhao et al. 2010) weiter stützen. Lediglich Zink (Zn) hingegen hatte primär an der Partikelgröße von 56 bis 60 µm, vergleichbar mit der Aussage von Karlsson et al. (2010). Gegensätzlich verhalten sich nach von Aussagen von Adachi and Tainosho (2005) Aluminium (Al), Silicium (Si) und Kalium (K), die sich eher an Partikel der Größenordnung rund um 1000 µm binden. An dieser Stelle wird deutlich, dass

eine Definition von lediglich einer Zielpartikelfraktion für den Rückhalt eines Spektrums verschiedener Metallfrachten sehr schwer ist.

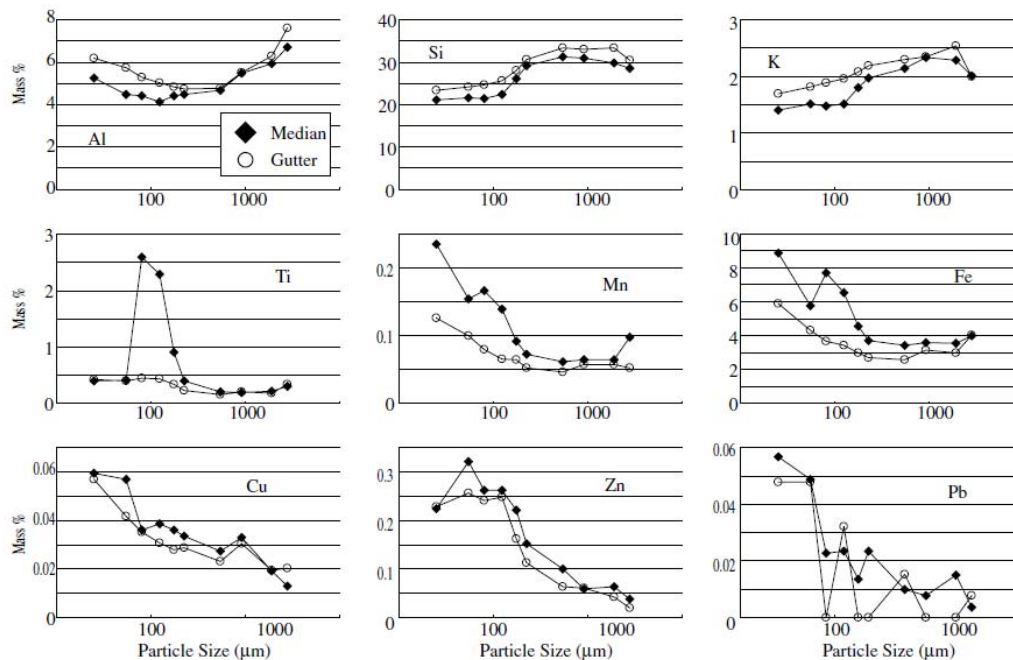


Fig. 4. Distribution of elemental concentrations in the size-fractionated bulk road sediments.

Bild 3.8: Verteilung von Schwermetallen bezogen auf Partikelgrößen (Adachi and Tainosho, 2005)

Neben der Betrachtung von Adachi and Tainosho (2005) haben auch Gunawardana et al. (2014) die straßenbürtigen Partikeln untersucht. Sie hingegen haben bei allen Einzugsgebieten mehr als 70 % der straßenbürtigen Partikel an den Partikelfraktionen unter 150 µm gefunden. Bei Aluminium (Al), Mangan (Mn) und Eisen (Fe) liegt die höchste Konzentration bei einer Partikelgröße von unter 75 µm (Bild 3.9), dies widerspricht der Aussage von Adachi and Tainosho (2005).

C. Gunawardana et al. / Environmental Pollution 184 (2014) 44–53

47

Table 2
Average metal concentration in solids of different particle sizes.

Particle size µm	Al mg/g	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
<75	5.18 ± 3.07	0.01 ± 0.00	0.14 ± 0.08	7.98 ± 5.98	0.01 ± 0.01	0.09 ± 0.02	0.25 ± 0.16	0	0.05 ± 0.05
75–150	3.11 ± 2.21	0.01 ± 0.01	0.13 ± 0.01	5.37 ± 5.00	0.01 ± 0.01	0.14 ± 0.11	0.32 ± 0.30	0	0.05 ± 0.03
150–300	2.13 ± 1.58	0.00 ± 0.00	0.10 ± 0.06	4.18 ± 2.55	0.01 ± 0.01	0.13 ± 0.10	0.23 ± 0.19	0	0.03 ± 0.01
300–425	1.29 ± 1.05	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.04	2.79 ± 1.97	0.00 ± 0.00	0.05 ± 0.05	0.11 ± 0.14	0	0.03 ± 0.02
Total	11.71	0.03	0.42	20.31	0.03	0.40	0.91	0	0.17

Bild 3.9: Durchschn. Metallkonzentrationen verschiedener Partikelfraktionen (Gunawardana et al., 2014)

Bei der Betrachtung der Schwermetallfrachten im Niederschlagsabfluss aus Siedlungsgebieten ist weitergehend zu prüfen, ob die Frachten an partikuläre Stoffe gebunden sind oder ob sie in gelöster Form im Wasser vorliegen. Insbesondere bei den gebundenen Frachten besteht die Möglichkeit diese durch Sedimentation der partikulären Stoffe zurückzuhalten. Dazu dient im Folgenden die Untersuchung von (Gasperi et al. 2010), welcher eben diesen Unterschied herausgearbeitet hat. In der Untersuchung sind 84 % (Zink) – 95 % (Kupfer) der Metalle in der Kanalisation am Ende eines Einzugsgebietes an Partikel gebunden (Bild 3.10). Wichtig ist darüber hinaus die Erkenntnis, dass am Ende von Einzugsgebieten, die Konzentration von Kupfer und Zink um das 4-fache höher seien, als es bei dem Kanalzufluss noch der Fall ist.

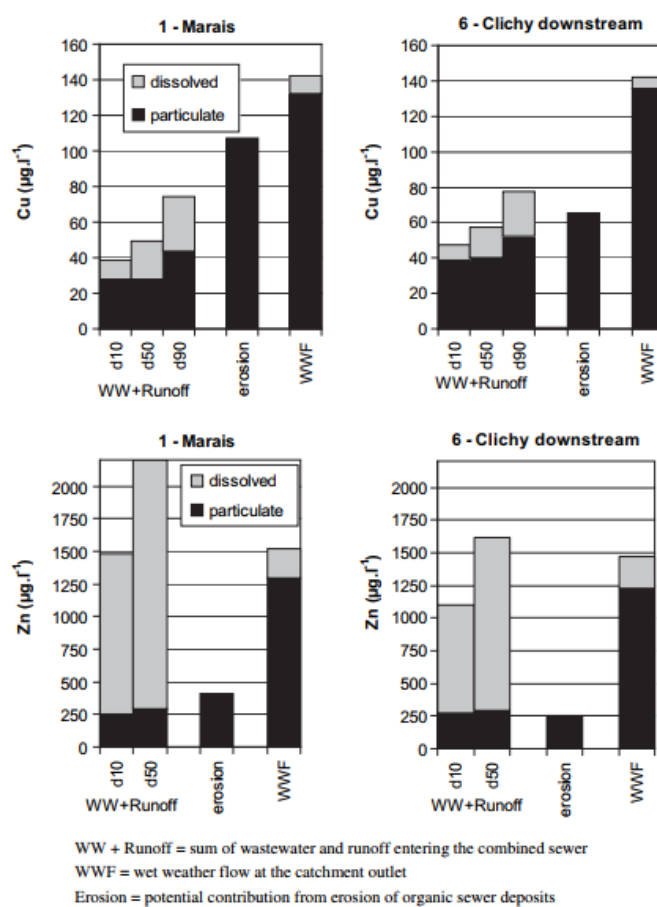


Fig. 6 – Dissolved and particle-bound Zn and Cu transfers in the combined sewer.

Bild 3.10: Gelöste und partikulär gebundene Zink und Kupfer Konzentrationen (Gasperi et al. 2010)

Die Annahme, dass der Großteil der Schwermetallbelastung partikelgebunden ist, wird von der Untersuchung von *Furumai et al. (2002)* unterstützt. Sie beschreiben, dass partikuläre Fraktionen für Zink (Zn), Kupfer (Cu) und Blei (Pb) jeweils ca. 55 - 89 %, 56 – 89 % und 79 – 96 % der gesamten Schadstoffbelastung betragen.

Eine Erklärung dafür, dass die Schwermetallbelastungen vorwiegend bei den feinsten Fraktionen der Partikel am höchsten sind, formulieren (Roger et al. 1998) in ihrer Untersuchung. Als Grund nennen sie die spezifische Oberfläche der Partikel und gibt als einfaches Beispiel an, dass ein Partikel mit einem Durchmesser von 75 μm eine um das 4-fach größere spezifische Oberfläche hat, als beispielsweise Partikel der Größenordnung 300 – 425 μm . Zudem erklären sie, dass die im Abwasser vorhandenen tonbildenden Materialien einen signifikanten Einfluss auf die Kationenaustauschkapazität haben und als Folge daraus die Metalladsorption verbessert wird. Die Fraktionen unter 50 μm leisten einen signifikanten Beitrag zur gesamten Schwermetallbelastung im Abwasser. Daraus ziehen sie als Fazit, dass eine Bestimmung der Feststoffcharakteristiken im Hinblick auf die Verschmutzung städtischer Gewässer, zielführende Informationen für Maßnahmen zur Verbesserung der Regenwasserbehandlung liefern würde. Auch (Roger et al. 1998) haben die Metalle Zink (Zn), Blei (Pb), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Aluminium (Al) untersucht. Demnach haben alle die höchsten Konzentrationen bei der Partikelgröße unter 50 μm , siehe Bild 3.11.

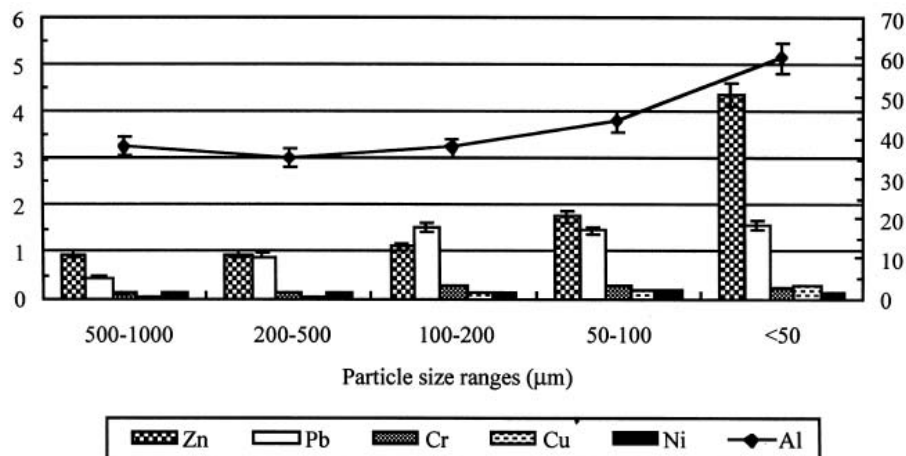


Fig. 5. Distribution of metals (g/kg) in each particle size range (channel sediments 4 to 9).

Bild 3.11: Schwermetallverteilung bezogen auf Partikelgrößenfraktionen nach (Roger et al., 1998)

Zusammenfassend können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Zhao et al. (2010): 70 % der Metallfrachten im Niederschlagsabfluss binden sich an die Fraktionen von 0 - 44 μm .
- (Karlsson et al. 2010): Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Partikelgröße unter $d_K = 63 \mu\text{m}$ und der Zinkkonzentration.
- (Adachi und Tainosho 2005): Auf Verkehrsflächen sind die höchsten Metallkonzentrationen bei Partikelfraktionen unter 50 μm .

- (Gasperi et al. 2010): 84 % – 95 % der Metalle in der Kanalisation sind am Ende eines Einzugsgebietes an Partikel gebunden.
- (Roger et al. 1998): Grund für die vorwiegenden hohen Schwermetallbelastungen bei den feinsten Fraktionen ist die spezifische Oberfläche der Partikel.

4 Simulationsumgebung

4.1 Verwendete Software

Im Rahmen dieser Arbeit wird das kommerzielle Softwarepaket von ANSYS, Inc.1 in der Version 13.0 verwendet.

Der Solver ANSYS FLUENT basiert auf der Finite-Volumen-Methode. Grundlage der numerischen Simulation ist das Prinzip der Erhaltung von Masse und Impuls. Beide Größen - Masse und Impuls – werden in Bezug auf einen in der Regel ortsfesten, endlich oder infinitesimal kleinen Kontrollraum bilanziert. Sie können über die Kontrollraumgrenzen ein- und austreten jedoch innerhalb des Kontrollraumes weder vernichtet noch erzeugt werden Herwig, (2006). Diese Erhaltungsgleichungen werden als Navier-Stokes-Gleichungen bezeichnet.

Das Rechengebiet wird zur Berechnung der numerischen Lösung in sog. finite Volumen oder finite Differenzen diskretisiert.

4.2 Grundlagen der numerischen Simulation

Im Rahmen dieses Projektes werden die numerischen Betrachtungen der Regenbecken mit den stationären Berechnungen und dem gekoppelten Löser das Pseudo-Zeitschrittverfahren („Quasi-Zeitschrittmethode“) verwendet. Hierdurch wird eine künstliche Zeitebene erzeugt. Die Zeitterme im stationären Fall werden zur numerischen Dämpfung und damit zur Verbesserung des Konvergenzverhaltens verwendet. Zudem bietet dieses Verfahren Stabilität bei Strömungen, die zu instationären Phänomenen neigen Pyliouras (2011).

Außerdem wird ein druckbasierter Löser (pressure-based solver) verwendet, da es sich bei allen verwendeten Materialien der Untersuchung um inkompressible Stoffe handelt.

Turbulenzmodellierung

Das hier gelöste System von Grundgleichungen basiert auf der von REYNOLDS vorgeschlagenen zeitlichen Mittelung der turbulenten Strömung über Zeitschritte, die ausreichend klein gegenüber instationären Änderungen der Randbedingungen sind. Daraus entstehen die sogenannten (Reynolds-averaged-Navier-Stokes-) RANS-Gleichungen. Die durch diese einfache statistische Operation ebenfalls entstehenden Mittelungen der Schwankungsgrößen werden Reynoldsspannungen genannt. Man unterscheidet Reynolds-Normal- und Reynolds-Schub-Spannungen, die mathematisch gesehen gemeinsam einen Spannungstensor bilden. Turbulenzmodelle, die auf diesem Ansatz beruhen, also die Wirkung der Reynoldsspannungen

auf das zeitgemittelte Strömungsfeld beschreiben, werden auch „Statistische Turbulenzmodelle“ genannt.

Wirbelviskositätsprinzip nach BOUSSINEQ

Diesen Ansatz benutzen Turbulenzmodelle, welche die Wirkung der turbulenten Reynoldsspannungen nicht unmittelbar modellieren, sondern als eine durch Turbulenz gegenüber der reinen Stoffgröße überhöhte Zähigkeit, die sogenannte Wirbel(Turbulenz)viskosität, beschreiben. Alle darauf beruhenden Turbulenzmodelle setzen eine Isotropie (Richtungsunabhängigkeit) der Turbulenz voraus, wie sie nur in freien Strömungen, nicht aber an Wänden und in Scherschichten vorkommt.

Der bekannteste Vertreter die Klasse ist das k - ϵ -Modell, ein Zwei-Gleichungs-Modell, das heißt, es benötigt zwei zusätzliche Transportgleichungen (für k und für ϵ), um die Wirbelviskosität zu bestimmen. Das k - ϵ -Modell existiert mittlerweile in einer Vielzahl unterschiedlicher Ausführungen. Das allgemein bekannte Standard k - ϵ Modell ist das am weitesten verbreitete k - ϵ Modell und zählte lange Jahre zum Standard-Turbulenzmodell in der Praxis. Es ist bei niedrigem Rechenaufwand gleichzeitig sehr stabil. Es ist insbesondere für Strömungen im Inneren des Strömungsfeldes (voll ausgebildete Turbulenz; hohe Reynolds-Zahlen) gut geeignet. Weniger gut ist es jedoch für Strömungen geeignet, deren Randstromlinien sich auf Grund von Druckgradienten von der Wand ablösen. Die berechneten Ablösezone werden zu klein bei einer zu späten Ausbildung der Ablösung simuliert.

In der Literatur (z.B. Zhou et al. (2014) und Patziger (2016)) wird überwiegend das k - ϵ Re-Normalisation Group (RNG) Modell zur Modellierung der Turbulenz in Regenbecken verwendet. Im RNG k - ϵ Modell werden die niedrigen Reynolds-Zahlen im Bereich der viskosen Unterschicht durch einen zusätzlichen Term in der ϵ -Gleichung berücksichtigt sowie durch eine Anpassung der Konstanten besser abgebildet (Schröder, 1997).

Sind jedoch Scherschichten, Rotationsströmungen oder ähnliches zu erwarten, die eine Berücksichtigung der Anisotropie der Turbulenz erfordern, so bieten sich weiterhin die s.g. RSM-Modelle an.

Das RSM ist das genaueste und bei weitem aufwändigste Turbulenzmodell, das die verwendete Software anbietet. Das RSM gehört zu den statistischen Turbulenzmodellen (RANS) und löst alle Komponenten des Spannungstensors direkt. Die Anwendung des RSM ermöglicht die Abbildung von Anisotropien der Turbulenz (z.B. Sekundärströmungen). Außerdem kann das RSM die Auswirkungen von Stromlinienkrümmungen, Verwirbelungen und Rotation abbilden (ANSYS 2017).

Der Wasserspiegel, welcher sich aus der Überfallhöhe des Wehres am Klärüberlauf ergibt, wird nach Poleni berechnet und im numerischen Modell vereinfacht als Symmetrie-Ebene definiert. Zur Berechnung der Strömung in Wandnähe werden scable-wall-functions verwendet. Strömungen im Bereich von Wänden unterscheiden sich auf Grund von Haftbedingungen von der freien Strömung. Durch die Haftbedingungen resultiert eine Fließgeschwindigkeit an der Wand, die gleich null ist. Da jedoch die meisten Turbulenzmodelle für hoch turbulente Strömungen ausgelegt sind, nicht aber für Strömungen in Wandnähe, werden in der Numerik Wandfunktionen eingesetzt, um die Anwendung der Turbulenzmodelle zu ermöglichen.

Die Berechnung erfolgt pseudo-transient. Als Solver wird der Pressure-Based Solver verwendet, da lediglich inkompressible Stoffe betrachtet werden.

Partikelauswertung mittels Discret Phase Model

Die Ermittlung der Wirkungsgrade erfolgt massegetrieben. Dazu wird auf die Ergebnisse einer s.g. User defined function (UDF) zurückgegriffen, einem benutzerspezifischen Skript, das in FLUENT hinzugeladen werden kann und zusätzliche Auswertungen oder Berechnungen durchführt. Die hier angewendete UDF wurde auf Grundlage der UDF von Yan (2013) weiterentwickelt. Dabei gelten die im Kapitel 3.1 beschriebenen Ansätze zur Definition der kritischen Schubspannung nach van Rijn (2016).

Die Berechnung von Wirkungsgraden des Partikelrückhalts erfolgt im numerischen Modell mit einer Kombination aus einer Berechnung der Strömungsvorgänge des Wassers im Euler'schen Bezugssystem und einer Berechnung der Partikelbewegungen im mitbewegten Lagrange'schen Bezugssystem mittels eines sogenannten „Discrete Phase Model“ (DPM). Diese Vorgehensweise ermöglicht es, jeden einzelnen Partikel auf seinem Weg durch das Strömungsfeld zu verfolgen und schließlich Absetzbilder zu erzeugen. In der realen Strömung unterliegen die Partikel den Einflüssen der molekularen und der turbulenten Diffusion, wobei der molekulare Anteil gegenüber der Turbulenz vernachlässigbar ist. Die turbulenten Bewegungen werden allerdings nicht direkt simuliert, sondern es wird, wie zuvor beschrieben, nur die Wirkung der Turbulenz auf das mittlere Strömungsfeld modelliert.

Außerdem ist zur Berücksichtigung der turbulenten Diffusion das stochastische Random Walk Model hinzugeschaltet, welches durch die number of tries und die time scale constant (CL-Zahl) beeinflusst wird. Zur Berechnung der Wirkungsgrade werden pro Zelle 10 Partikel (number of tries) für jede eingegebene Partikelfraktion hinzugegeben. Hier sind in der Regel eine Anzahl von 30 Partikel pro Fraktion und Zelle vorzusehen, dies ist auf Grund der hohen Anzahl jedoch nicht umsetzbar. Bei einer vergleichenden Simulation zwischen dem Ergebnis von 30 number of tries und 10 number of tries entsteht eine Abweichung von unter 0.20 %, welche in

den Ergebnissen der Partikelwirkungsgrade als mögliche Abweichung vorzuhalten ist. Die CL-Zahl wurde an Absetzbildern der Rundbecken kalibriert und zu 0.15 eingestellt.

Die Auswertung der Partikel auf der Sohle erfolgt mittels user defined function nach Yan (2013). Diese wird mithilfe der Formel zur kritischen Schubspannung nach van Rijn (2016) angepasst, sodass die kritische Schubspannung für jeden Partikel unter Berücksichtigung der Dichte und des Durchmessers errechnet wird und die Entscheidung, ob ein Partikel weiter bewegt wird (reflect) oder an der Stelle des Auftretens liegen bleibt (trap), errechnet wird. Für die Absetzbilder wird die Formel zur Berechnung von τ_{krit} nach (van Rijn 2016b) um 30 % abgemindert. Dies erfolgt auf Basis von Validierungsergebnissen mittels physikalischem Modell an Rundbecken, welche auch im Rahmen des Projektes MEREBEN durchgeführt worden sind.

Bei der Interpretation der im numerischen Modell berechneten Absetzwirkungsgrade ist zu berücksichtigen, dass diese für kontrollierte Randbedingungen definiert wurden. Eine eventuelle Beeinflussung der Wirkungsgrade durch Feststoffe, die sich auf Grund von vorhergehenden Ereignissen (Becken im Dauerstau) oder aufgrund eines engen zeitlichen Bezuges mit vorhergehenden Ereignissen (Ereignisabfolge bei Becken ohne Dauerstau) noch im Becken befinden, wurde hier bewusst nicht betrachtet. Weiterhin wurde die simulierte Ereignislänge so kontrolliert, dass es den Partikeln zeitlich möglich war, sich entweder auf der Sohle absetzen oder über den Klärüberlauf das Becken zu verlassen. Diese Vorgehensweise im Rahmen der Modellierung hatte das Ziel, aufzuzeigen, wie hoch der „theoretisch maximal mögliche Wirkungsgrad“ der Becken sein kann.

5 Neubau-Rechteckbecken

5.1 Einführung und Untersuchungskonzept

Die Behandlung von Niederschlagswasser in Regenwasserbehandlungsanlagen, sowohl zentralen als auch dezentralen, ist in den letzten Jahren stark in den Fokus der Wasserwirtschaft gerückt. Hierzu gibt es verschiedene Prozesse, um einen Rückhalt von partikulären bzw. partikulär gebundenen Stoffen zu ermöglichen, bevor das Niederschlagswasser aus Siedlungsgebieten in die Gewässer eingeleitet wird.

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Verhalten der Feinstofffraktion von partikulären bzw. partikulär gebundenen Stoffe (AFS63) in zentralen Regenbecken in rechteckiger Bauweise untersucht werden. Dazu ergibt sich folgendes Vorgehen:

Die Empfehlungen zum Neubau von Regenbecken in rechteckiger Bauweise sind in einem zweigleisigen Verfahren entwickelt worden. Hierzu dient zum einen eine umfassende Literaturstudie der bisher in der nationalen und internationalen Fachwelt entworfenen Becken zur Sedimentation. Parallel dazu wurden zum anderen am IWARU, aufbauend auf den Erkenntnissen der Phase 1 dieses Vorhabens, weitere Studien zur Durchströmungscharakteristik von Regenbecken durchgeführt und die jeweils resultierenden Reinigungsleistungen simuliert. Auf diese beiden Arbeitslinien wurde eine abschließende Beckenstudie aufgesetzt, in der die jeweils quasi-optimalen Beckenkonfigurationen miteinander verglichen wurden.

In dem folgenden Bild 5.1 ist die Vorgehensweise der Projektphase zum Neubau von Rechteckbecken ersichtlich.

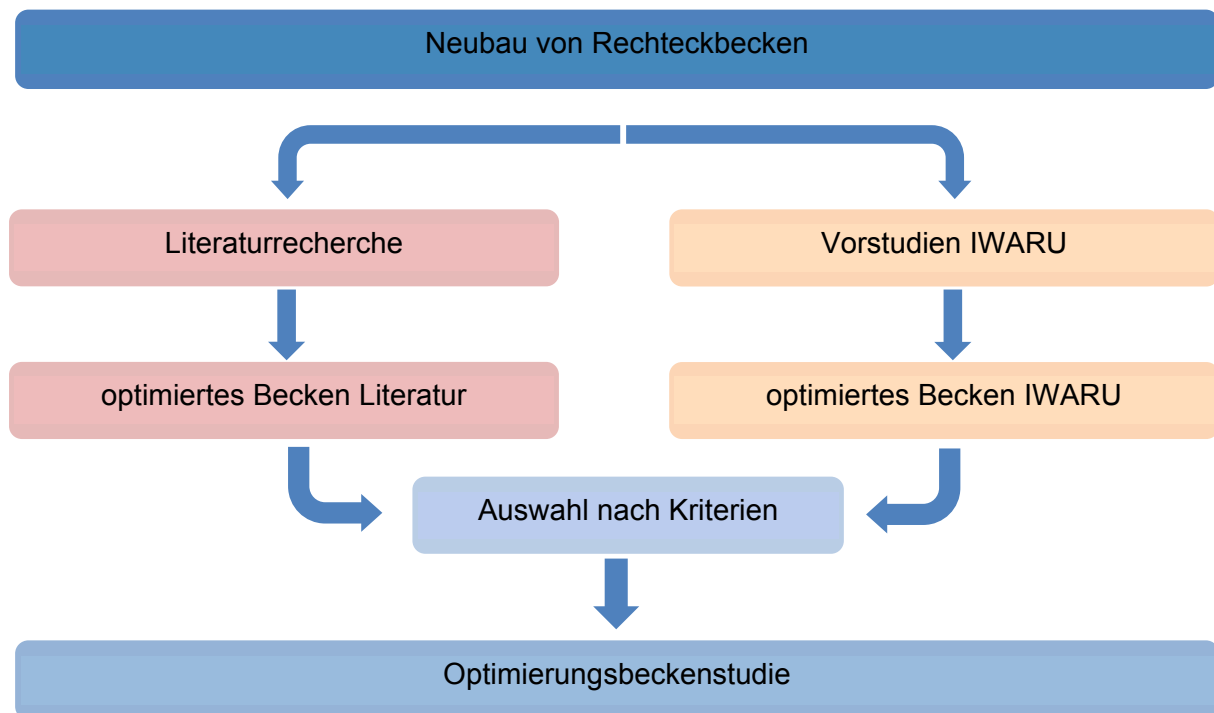


Bild 5.1 Vorgehensweise Neubau von Rechteckbecken

Die einzelnen Arbeitsschritte gliedern sich wie folgt:

1. *Literaturrecherche einschl. Katalog*

Zahlreiche Studien haben sich in den vergangenen Jahrzehnten mit der optimalen Gestaltung von Sedimentationsanlagen beschäftigt. Dabei wurde eine Vielzahl von möglichen Ausführungen der einzelnen Beckenkomponenten untersucht. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse besteht bis heute jedoch nicht, obwohl dies eine äußerst nützliche Handreichung bei Planungsprozessen darstellen würde.

2. *Entwurf eines optimierten Beckens auf Basis der Literaturrecherche*

Aufbauend auf der zuvor durchgeführten Literaturstudie liegt der Schwerpunkt hierbei auf dem Entwurf verschiedener optimierte Beckenkonfigurationen auf Basis der best-practice Konfigurationen der Literatur sowie der Überprüfung von deren Durchströmungsverhalten und Absetzleistung.

3. Vorstudien zur Untersuchungen des grundsätzlichen Einflusses der Bauweise

- Abmessungsverhältnisse der Sedimentationskammer (Variation von L/B)

Zunächst wird der Einfluss verschiedener Abmessungsverhältnisse auf die Wirksamkeit des Partikelrückhalts verschiedener Fraktionen untersucht. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein verhältnismäßig langes Becken auch einen längeren Absetzweg für die Partikel bietet, welches somit höhere Wirkungsgrade aufweisen müsste. Wie wirkt sich jedoch die resultierende erhöhte Fließgeschwindigkeit aus dem verhältnismäßig kleineren Zulaufquerschnitt auf das Sedimentationsverhalten aus?

- Anströmung der Sedimentationskammer (Idealisierte Ein- und Auslaufbedingungen)

Aufbauend darauf wird der Einfluss der Anströmung der Sedimentationskammer untersucht. Es wird das Verhältnis der Höhe des durchströmten Zuflussquerschnittes zur gesamten Höhe des Beckenquerschnittes variiert. Damit wird gezielt die parallelisierte Durchströmung mit gleichverteiltem Geschwindigkeitsprofil, wie sie als zielführende Strömung für Sedimentationsprozesse angesehen wird, gestört. Hinter der Verblockung des unteren Zulaufquerschnitts wird sich eine großräumige Rezirkulation mit liegender Achse, eine sogenannte Grundwalze, ausbilden, welche das Partikelverhalten positiv beeinflussen soll. Durch die verlängerten Aufenthaltszeiten innerhalb der Rezirkulationszone und durch eine Krümmung der Stromlinien wird eine erhöhte Sedimentation insbesondere der feineren Partikelfraktionen erhofft.

4. Gestaltung eines optimierten Beckens aus den Erkenntnissen der Phase 1 und den Vorstudien (Gleichrichter mit liegender Grundwalze)

Bei der Gestaltung des optimierten Beckens sind die Erkenntnisse aus den bereits durchgeführten Simulationen der Phase 1 und der Vorstudien zusammengetragen worden. Hieraus ergab sich eine Kombination des in Phase 1 konfigurierten Gleichrichters mit einer induzierten Grundwalze, wie sie bei der Anströmung der Sedimentationskammer verwendet worden ist.

5. Optimierte Beckenstudie

Bei der soeben beschriebenen optimierten Beckenkonfiguration wurde anschließend die Wirksamkeit der Konfiguration bei unterschiedlicher hydraulischer und stofflicher Belastung untersucht.

6. Vergleich des optimierten Beckens aus der Literaturstudie mit dem optimierten Becken, welches am IWARU entwickelt wurde

Als letzter Schritt des Arbeitspaketes wurden die beiden Konfigurationen mit den jeweils besten Wirkungsgraden aus der Literatur und der Eigenentwicklung des IWARUs verglichen.

5.2 Material und Methoden

Bei der Entwicklung von Neubau-Konfigurationen im Rahmen dieser Phase 2 des Vorhabens ist methodisch zwischen der Literaturstudie und den numerischen Untersuchungen zu unterscheiden.

Die Methodik und das Vorgehen der Literaturstudie zur Identifizierung der bereits entworfenen Möglichkeiten zur Sedimentation von partikulären Stoffen des Niederschlagswassers ist in der Anlage 01 ersichtlich. Hier werden ausführlich die Herangehensweise sowie die Kriterien zur Bewertung der Angaben aus der Literatur beschrieben.

Für die internen Untersuchungen mittels hydro-numerischer Strömungssimulationen wurde das Softwarepaket ANSYS, FLUENT verwendet (Kapitel 4.1). Hierbei wurden anhand von rund 200 numerischen Simulationen sukzessive die verschiedenen Einflüsse auf die Wirksamkeit von Regenbecken in rechteckiger Bauweise (Kapitel 5.2.1) untersucht. Dabei wurden für alle Untersuchungen stationäre Randbedingungen (Kapitel 5.2.2) angenommen. Die Wirkungsgrade auf Basis der hier betrachteten Partikel (Kapitel 3.2) wurden im Post-Processing (siehe Kapitel 4.2) mit Hilfe der Euler-Lagrange Betrachtungsweise untersucht, das heißt, die Partikel beeinflussen das Strömungsfeld nicht, können aber dafür einzeln bei ihrer Strömung durch das Becken verfolgt werden.

5.2.1 Geometrische Randbedingungen

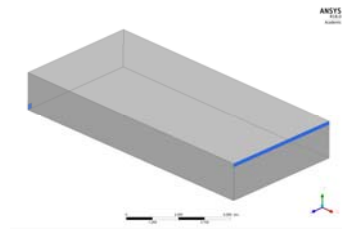
Im Folgenden werden die geometrischen Randbedingungen der Simulationen erläutert. Beginnend mit den betrachteten Konfigurationen für die Becken der Literaturstudie.

Tabelle 5-1: Übersicht der betrachteten Varianten zum Neubau von Rechteckbecken

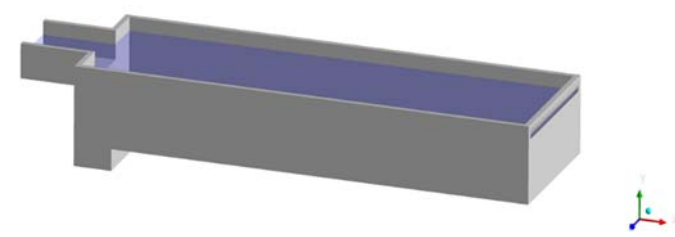
Variantenname

Piktogramm

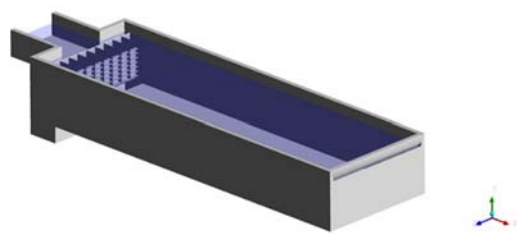
„worst-case“



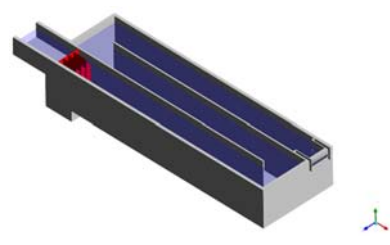
V0 Grundvariante



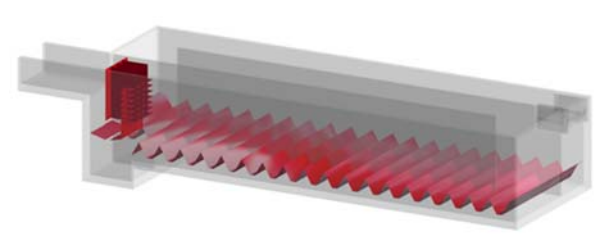
V1 Einlaufgestaltung



V2 Fließwegführung

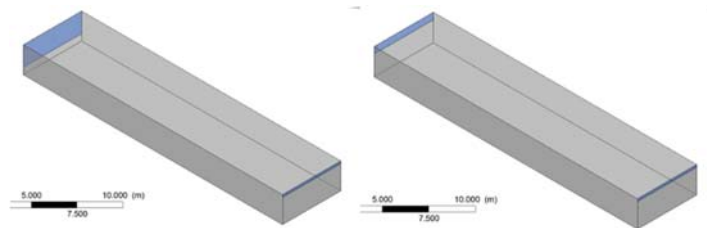


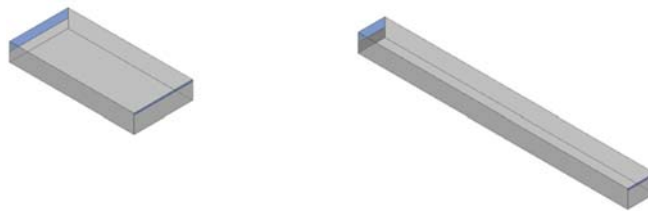
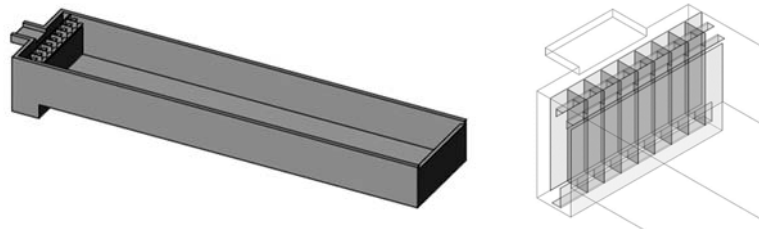
V3 Sohlgestaltung



Varianten

H/H 0,25 – H/H 1,0



Varianten**L/B 2,13 – 10,00****Gleichrichter mit integrierter Grundwalze****5.2.1.1 „worst-case“-Variante**

Anhand dieser Variante (Bild 5.2) mit einer Konfiguration, die nicht dem Stand der Technik entspricht, handelt es sich auch, vergleichbar zu den anderen Becken, um ein rechteckiges Becken mit einer Oberfläche von 90,00 m². Die Abmessungen jedoch betragen hier $H/B/L = 2,00/ 6,50/ 13,85$ m und sind abweichend gewählt worden. Im Gegensatz zum Gerinneeinlauf ist hier ein untenliegender außermittiger, sogar direkt an der Wand befindlicher Rohr-zulauf der einem äquivalenten Querschnitt eines DN300-Rohres entspricht.

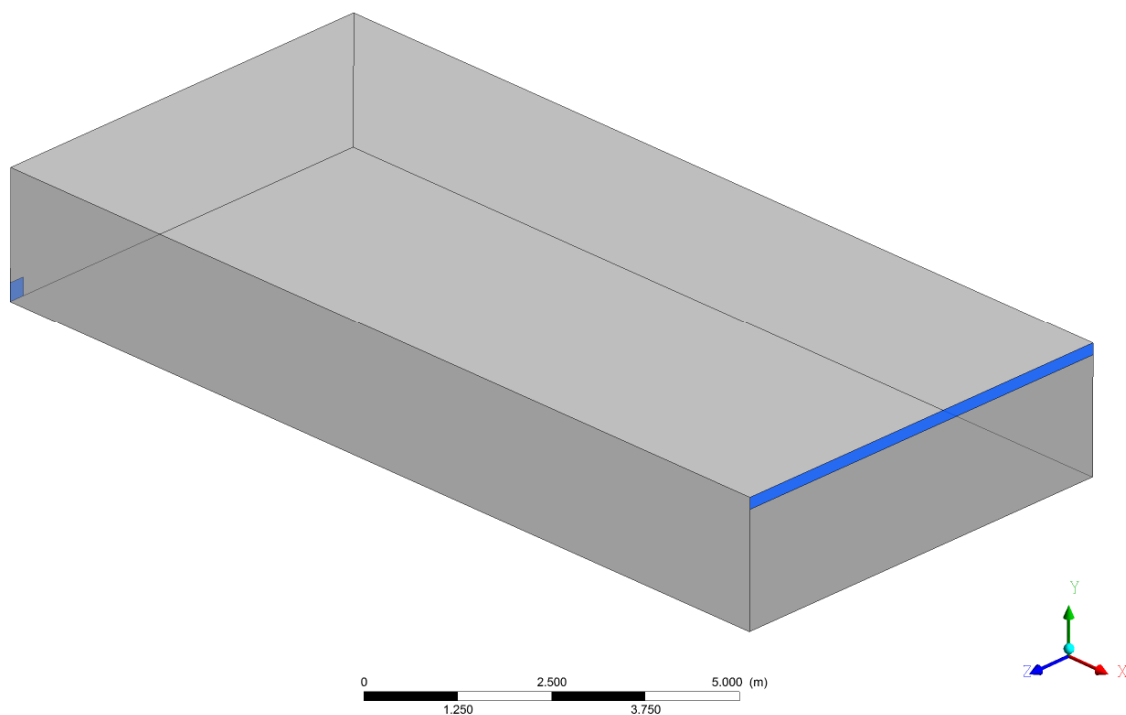


Bild 5.2: Isometrische Darstellung der „worst-case“ Variante

In der folgenden Tabelle 5-2 sind die geometrischen und hydraulischen Randbedingungen dieser „worst-case“ Variante beschrieben.

Tabelle 5-2: Randbedingungen der „worst-case“ Variante

		Parameter		$q_A=10 \text{ m/h}$
Geometrische RB	Gesamtlänge Fließweg	L_{ges}	(m)	13,85
	Breite Fließweg	B	(m)	6,50
	Wassertiefe	h_{Becken}	(m)	2,00
	Volumen	V	(m ³)	180,00
	Oberfläche	A_o	(m ²)	90,00
Hydraulische RB	Fließgeschwindigkeit Einlauf	v_{Ein}	(m/s)	3,08
	mittlere horizontale Fließgeschw.	v_{Becken}	(m/s)	0,019
	Durchfluss	Q	(m ³ /s)	0,25

5.2.1.2 Grundvariante V0

Es handelt sich um ein Rechteckbecken mit den Abmessungen $H/B/L = 2,70/ 5,00/ 16,50$ m. Der Zufluss erfolgt über einen Gerinneeinlauf mit einer Breite von 2,15 m. Im Einlaufbereich ist über die gesamte Beckenbreite außerdem ein Pumpensumpf mit einer Tiefe von 1,50 m positioniert. Der Klärüberlauf ist als Schlitzwand mit einem Schlitzabstand von 0,20 m ausgeführt.

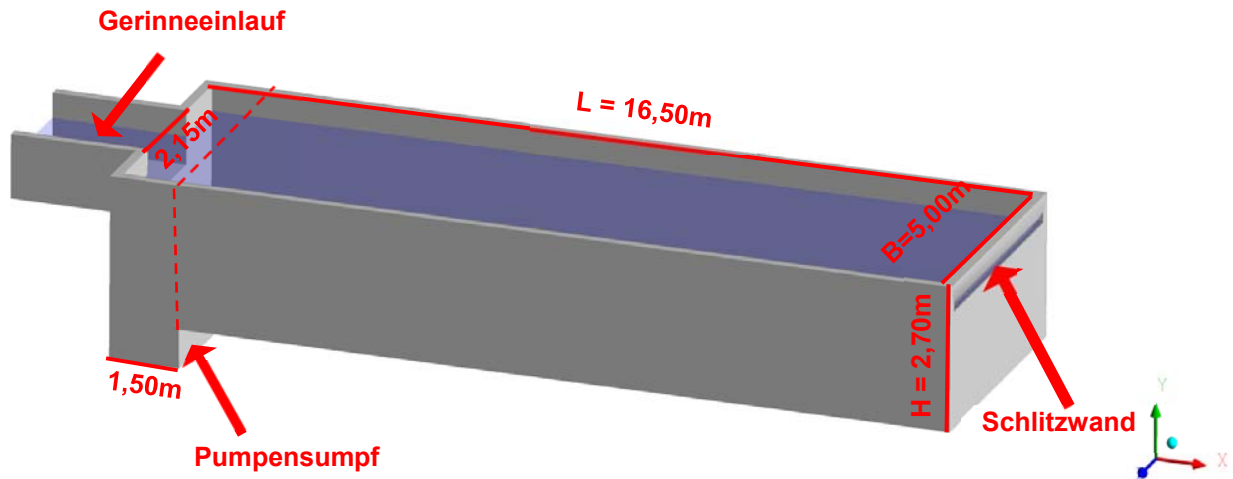


Bild 5.3: Isometrische Darstellung der Grundvariante V0

In der folgenden Tabelle 5-3 werden die wichtigsten geometrischen und hydraulischen Randbedingungen der Grundvariante V0 zusammengetragen. Die Abmessungen des Breiten/Tiefen –Verhältnisses der Sedimentationskammer entspricht den Vorgaben des (DWA 2013). Die Abmessungen des Pumpensumpfes sind angelehnt an die Empfehlungen des (DWA-T3/2013 2013) Themenblattes. Die Einlaufgestaltung ist wie in Phase 1 bereits beschrieben, als beckenparalleler, hochliegender Gerinne Einlauf gewählt worden. (In dem Phase 1 Bericht ist abweichend hierzu diese Grundvariante auch mit Variante 1 beschrieben worden)

Tabelle 5-3: Randbedingungen der Grundvariante V0

	Parameter			$q_A = 4 \text{ m/h}$	$q_A = 10 \text{ m/h}$
Geometrische RB	Gesamtlänge Fließweg	L_{ges}	(m)	16,50	16,50
	Breite Fließweg	B	(m)	5,00	5,00
	Wassertiefe	h_{Becken}	(m)	2,04	2,08
	Volumen	V	(m ³)	153,20	155,90
	Oberfläche	A_O	(m ²)	75,00	75,00
Hydraulische RB	Fließgeschwindigkeit Einlauf	v_{Ein}	(m/s)	0,07	0,17
	mittlere horizontale Fließgeschw.	v_{Becken}	(m/s)	0,008	0,020
	Durchfluss	Q	(m ³ /s)	0,08	0,21
	Reynolds-Zahl Becken	Re_{Becken}	(-)	12.754	31.885
	Froude-Zahl Becken	Fr_{Becken}	(-)	0,002	0,004
	Überfallhöhe am Wehr	h KÜ	(m)	0,04	0,08

5.2.1.3 Variante V1: Einlaufgestaltung

Die erste Optimierungsvariante sieht eine Modifizierung des Einlaufbereichs mit einem Diffusor vor und hat zum Ziel die kinetische Energie im Einlaufbereich zu verringern und eine gleichmäßige Verteilung der Strömung auf den gesamten Fließquerschnitt zu fördern. Die grundsätzliche Konstruktion des Einlaufs ist in Bild 5.4 dargestellt. Die verschiedenen Randbedingungen beinhaltet Tabelle 5-4.

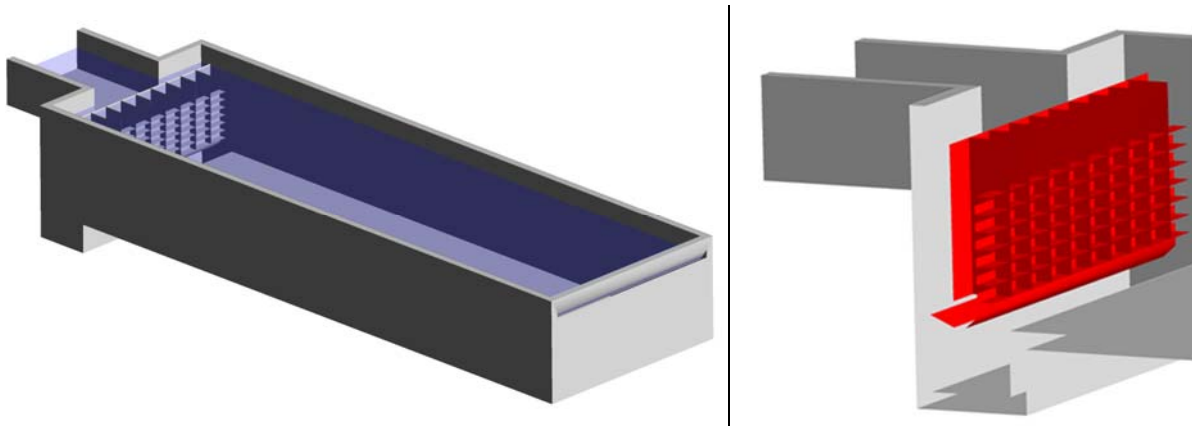


Bild 5.4: Isometrische Darstellung „Variante 1 Einlaufgestaltung“; links: Gesamtansicht, rechts: Ansicht Einlaufbereich

Die verschiedenen Randbedingungen der „Variante 1 Einlaufgestaltung“ beinhaltet Tabelle 5-4.

Tabelle 5-4: Randbedingungen der „Variante 1 Einlaufgestaltung“

	Parameter			q _A = 4 m/h	q _A = 10 m/h
Geometrische RB	Gesamtlänge Fließweg	L _{ges}	(m)	16,50	16,50
	Breite Fließweg	B	(m)	5,00	5,00
	Wassertiefe	h _{Becken}	(m)	2,04	2,08
	Volumen	V	(m ³)	153,20	155,90
	Oberfläche	A _O	(m ²)	75,00	75,00
Hydraulische RB	Fließgeschwindigkeit Einlauf	v _{Ein}	(m/s)	0,07	0,17
	mittlere horizontale Fließgeschw.	v _{Becken}	(m/s)	0,008	0,02
	Durchfluss	Q	(m ³ /s)	0,08	0,21
	Reynolds-Zahl Becken	Re _{Becken}	(-)	12.754	31.885
	Froude-Zahl Becken	Fr _{Becken}	(-)	0,002	0,004
	Überfallhöhe am Wehr	h _{KÜ}	(m)	0,04	0,08

5.2.1.4 Variante V2: Fließwegführung

Die hier vorgestellte Variante wird nach den Empfehlungen von Kattinig (2014) und Carlston (2015) aufgestellt und ist in Bild 5.5 dargestellt. Es erfolgt das Einbringen von zwei Leitwänden, so dass sich drei Gerinne à 1,60 m Breite bilden. Die Maße in den Kurvenbereichen entsprechen jeweils der Gerinnebreite, damit die Fließgeschwindigkeiten nicht unnötig erhöht werden. Die Einlaufkonstruktion (Gerinne sowie Diffusor) wird über die gesamte Gerinnebreite ausgebildet, so dass die Anströmfläche maximiert wird. Der Diffusor, der in der Variante 1 eingebracht wurde, bleibt in dieser Variante erhalten. Da die Schwellenbelastung am Klärüberlauf von $75,00 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m})$, die von angegeben wird, auf Grund der geringeren Gerinnebreite überschritten wird, werden an beiden Seiten des Gerinnes Überlaufrinnen mit einer Länge von je 1,50 m hinzugefügt.

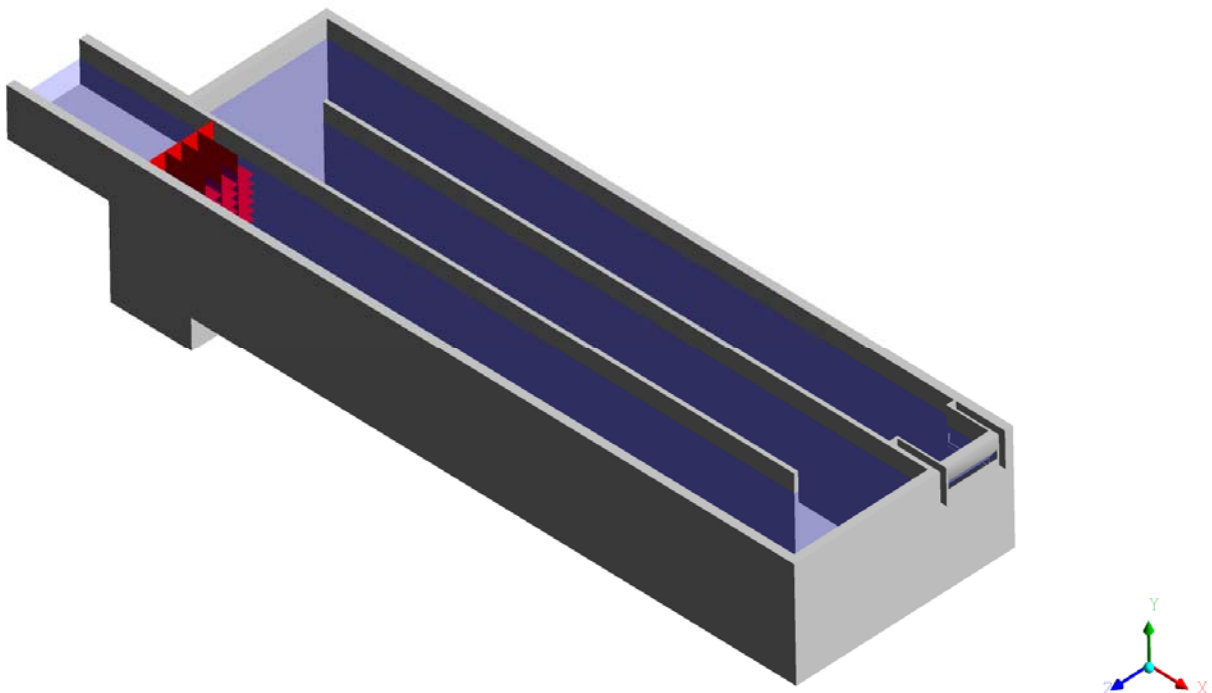


Bild 5.5: Isometrische Darstellung „Variante 2 Fließwegführung“

Die verschiedenen Randbedingungen der „Variante 2 Fließwegführung“ beinhaltet Tabelle 5-5:
Randbedingungen der „Variante 2 Fließwegführung“

Tabelle 5-5: Randbedingungen der „Variante 2 Fließwegführung“

	Parameter			$q_A = 4 \text{ m/h}$	$q_A = 10 \text{ m/h}$
Geometrische RB	Gesamtlänge Fließweg	L_{ges}	(m)	49,70	49,70
	Breite Fließweg	B	(m)	1,60	1,60
	Wassertiefe	h_{Becken}	(m)	2,06	2,10
	Volumen	V	(m ³)	156,90	160,49
	Oberfläche	A_O	(m ²)	76,32	76,32
Hydraulische RB	Fließgeschwindigkeit Einlauf	v_{Ein}	(m/s)	0,10	0,22
	mittlere horizontale Fließgeschw.	v_{Becken}	(m/s)	0,03	0,06
	Durchfluss	Q	(m ³ /s)	0,09	0,21
	Reynolds-Zahl Becken	Re_{Becken}	(-)	40.557	101.393
	Froude-Zahl Becken	Fr_{Becken}	(-)	0,006	0,014
	Überfallhöhe am Wehr	$h_{\text{KÜ}}$	(m)	0,06	0,10

5.2.1.5 Variante V3: Sohlgestaltung

Die Modifizierung, die für die dritte Variante vorgesehen wird, entspricht keiner Empfehlung der Literatursynthese. Vielmehr wird die Idee von Wang et al. (2010), aufgenommen. Im Rahmen dieser Optimierungsstudie werden die Trichter in das Becken der Variante 2 Fließwegführung eingearbeitet. Sie besitzen eine Tiefe sowie Breite von 0,60 m. Die tatsächliche Ausführung sähe eine Öffnung der Trichter nach unten hin vor, so dass die sedimentierten Partikel in einen Hohlraum zwischen Trichterkonstruktion und Betonsohle und anschließend zum Pumpensumpf gelangen können. Im Rahmen dieser Simulationsstudie wird allerdings diese Öffnung als geschlossen simuliert, um keine numerischen Instabilitäten zu erzeugen, die auf Grund der Wechselwirkung der entstehenden Aufenthaltsräume entstehen könnten. Das Becken wird so bemessen, dass das Volumen über den Trichtern dem Volumen der Variante 2 entspricht. Das Trichtervolumen wird demnach als reiner Schlammraum angesetzt. Die Konstruktion ist in Bild 5.6 dargestellt.

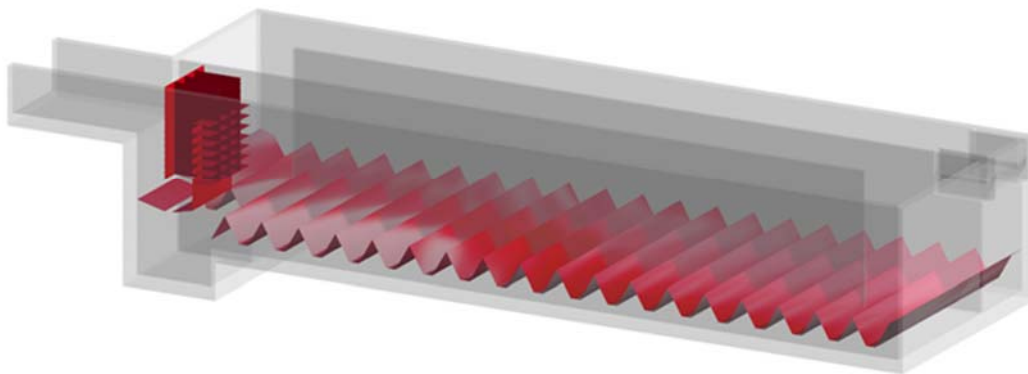


Bild 5.6: Isometrische Darstellung „Variante 3 Sohlgestaltung“

Die verschiedenen Randbedingungen der „Variante 3 Sohlgestaltung“ beinhaltet Tabelle 5-6

Tabelle 5-6: Randbedingungen der „Variante 3 Sohlgestaltung“

	Parameter		$q_A = 4 \text{ m}^3/\text{h}$	$q_A = 10 \text{ m}^3/\text{h}$
Geometrische RB	Gesamtlänge Fließweg	L_{ges} (m)	49,70	49,70
	Breite Fließweg	B (m)	1,60	1,60
	Wassertiefe	h_{Becken} (m)	2,06	2,10
	Volumen	V (m^3)	156,90	160,49
	Oberfläche	A_o (m^2)	76,32	76,32
Hydraulische RB	Fließgeschwindigkeit Einlauf	v_{Ein} (m/s)	0,10	0,22
	mittlere horizontale Fließgeschw.	v_{Becken} (m/s)	0,03	0,06
	Durchfluss	Q (m^3/s)	0,09	0,21
	Reynolds-Zahl Becken	Re_{Becken} (-)	40.557	101.393
	Froude-Zahl Becken	Fr_{Becken} (-)	0,006	0,014
	Überfallhöhe am Wehr	$h_{\text{KÜ}}$ (m)	0,056	0,10

5.2.1.6 Untersuchung der Zulaufhöhenverhältnisse

Hierbei wird die frei durchströmte Höhe des Zulaufes (h_{Ein}) in das Verhältnis zur gesamten Beckenhöhe gesetzt (h_{Ges}). Eine Konzentration des Zuflusses hat zur Folge, dass insbesondere im vorderen Bereich des Beckens eine gleichmäßige Durchströmung nicht stattfinden kann und daraufhin verschiedene Grundwalzen mit horizontaler Achse provoziert werden. Bei dieser Untersuchung diene das Becken mit den Abmessungsverhältnissen L/B 4,44 als Grundvariante und weist somit eine Länge $L = 20,00$ m, eine Breite $B = 4,50$ m und eine Höhe $H = 2,00$ m auf.

In dem folgenden Bild 5.7 sind zwei Geometrien der Untersuchungen des Zulaufhöhenverhältnisses dargestellt. Im oberen Teil ist ein $h_{\text{Ein}}/h_{\text{Ges}}$ -Verhältnis von $H/H = 0,75$ dargestellt, sprich $\frac{3}{4}$ des Zulaufes können durch ein gleichmäßiges Blockprofil angeströmt werden. Im unteren Teil des Bildes ist gegensätzlich ein $h_{\text{Ein}}/h_{\text{Ges}}$ von $H/H = 0,25$ dargestellt.

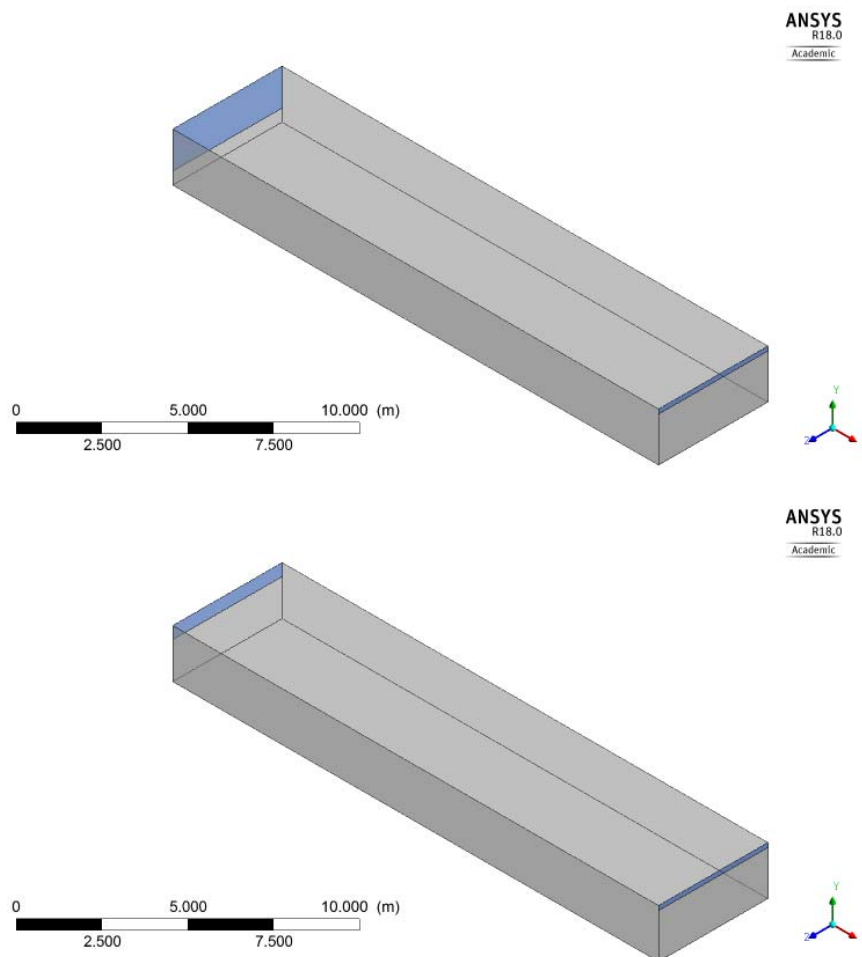


Bild 5.7: Darstellung von zwei Geometrien der Untersuchungsstudie H/H , zu sehen sind H/H 0,75 (oben) und H/H 0,25 (unten)

Hierbei wurden fünf verschiedene Zulaufhöhenverhältnisse untersucht.

Tabelle 5-7: Simulationsmatrix Untersuchung H/H

H/H (-)	h_{Ein} (m)	h_{ges} (m)	h_{Block} (m)	A_{Ein} (m ²)	v_{Ein} für $q_A = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ (m/s)
1,00	2,00	2,00	0,00	9,00	0,028
0,75	1,50	2,00	0,50	6,75	0,037
0,63	1,25	2,00	0,75	5,63	0,044
0,38	0,75	2,00	1,25	3,38	0,074
0,25	0,50	2,00	1,50	2,25	0,111

5.2.1.7 Untersuchung der Abmessungsverhältnisse

Auf dem folgenden Bild 5.34 sind Geometrien dargestellt. Auf der linken Seite die verhältnismäßig kürzeste Geometrie mit einem Abmessungsverhältnis von L/B 2,13 und auf der rechten Seite die verhältnismäßig längste Geometrie mit einem Abmessungsverhältnis von L/B 10,00. Weiterhin sind die in grau dargestellten Wände des Beckens zu erkennen und in blau sowohl der Zulauf (oben) als auch der Klärüberlauf (unten) eingefärbt. Die Fließrichtung ist hier von oben links nach unten rechts. Zum weiteren Verständnis ist bereits ein Koordinatensystem eingetragen. Hier ersichtlich verläuft die Beckenlängsrichtung in X-Richtung, die Beckenbreite ist über die Z-Koordinate aufgetragen und die Beckenhöhe wird in Y-Richtung abgebildet.

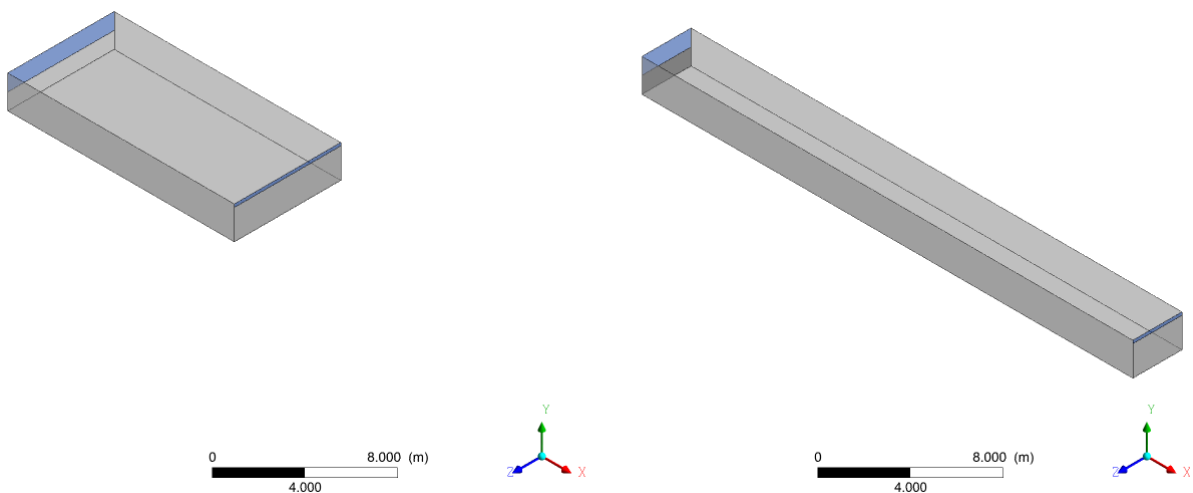


Bild 5.8: Darstellung von zwei Geometrien der Untersuchungsstudie L/B, zu sehen sind L/B 2,13 (links) und L/B 10,00 (rechts)

Darauf aufbauend wurden die simulierten Geometrien der Tabelle 5-8 der Vorstudie zur Variation der Abmessungsverhältnisse der Sedimentationskammer, bei gleichbleibender Tiefe. Hierbei wurden bewusst die Abmessungsverhältnisse des DWA-A 166 (2013) sowohl unter als auch überschritten.

Tabelle 5-8: Simulationsmatrix Untersuchung L/B

L/B	L	B	H	V	A _o	B/H	L/H	L/B
(-)	(m)	(m)	(m)	(m ³)	(m ²)			
2,13	13,85	6,50	2,00	180,00	90,00	JA	JA	NEIN
2,98	16,36	5,50	2,00	180,00	90,00	JA	JA	NEIN
3,60	18,00	5,00	2,00	180,00	90,00	JA	JA	JA
4,44	20,00	4,50	2,00	180,00	90,00	JA	JA	JA
10,00	30,00	3,00	2,00	180,00	90,00	NEIN	JA	NEIN

5.2.1.8 Der Gleichrichter mit integrierter Grundwalze

Das ideale Verhältnis der freizufließenden Höhe zur gesamten Beckenhöhe wird mit $H/H \cdot 0.25$ definiert. Hieraus ergibt sich für die optimierte Beckenstudie die Einlaufkomponente. Die Sedimentationskammer wird auf Basis der Erkenntnisse der Abmessungsverhältnisse konzipiert und geht mit einem L/B Verhältnis von 4,44 und einer Beckentiefe von 2,00 m ein. Die Auswirkungen des Klärüberlaufs wurden bereits in der Phase 1 als marginal beschrieben und werden hierbei nicht detaillierter betrachtet.

Die daraus resultierende Geometrie der Sedimentationskammer zur Betrachtung des Bauteils „Gleichrichter mit integrierter Grundwalze“ stellt sich wie folgt dar.

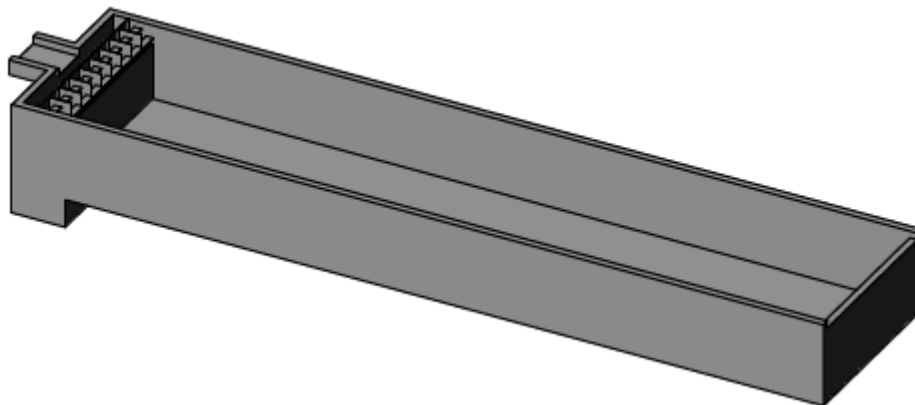


Bild 5.9: Geometrie des eingebauten Gleichrichters mit Grundwalze

Tabelle 5-9: Simulationsmatrix Gleichrichter mit Grundwalze

H/H	L (m)	B (m)	H (m)	V (m ³)	A_o (m ²)
0,25	20,00	4,50	2,00	180,00	90,00

5.2.2 Hydraulische Randbedingungen

Zusätzlich zu den geometrischen Randbedingungen werden hier im Folgenden die hydraulischen Randbedingungen der Untersuchungen beschrieben. Die Untersuchungen wurden mit 10°C Süßwasser für bis zu fünf verschiedene hydraulische Belastungen (Tabelle 5-10) durchgeführt.

Tabelle 5-10: hydraulische Randbedingungen der numerischen Simulationen

q_A (m/h)	Q (m ³ /s)	V_{Becken} (m ³)	A_o (m ²)	V_{Becken} (m/s)	Re_{Becken} (-)	k_{Beton} (m)	k_{Metall} (m)	ϑ (°C)	ρ (kg/m ³)
2	0,05	180,00	90,00	0,006	8.5E+03	0,005	0,0005	10	999,70
4	0,10	180,00	90,00	0,011	1.7E+04	0,005	0,0005	10	999,70
6	0,15	180,00	90,00	0,017	2.6E+04	0,005	0,0005	10	999,70
10	0,25	180,00	90,00	0,028	4.3E+04	0,005	0,0005	10	999,70
12	0,30	180,00	90,00	0,033	5.1E+04	0,005	0,0005	10	999,70

5.3 Stand der Wissenschaft und Technik zu Rechteckbecken

Hier wird lediglich ein Auszug der Literaturrecherche zum Stand der Wissenschaft und Technik dargestellt. Das umfassende Dokument befindet sich in Anlage 01.

Regenklärbecken stellen als wasserwirtschaftliche Anlage eine entscheidende Emissionsquelle für die Gewässer dar. Dabei tragen sie durch Sedimentationsprozesse zumindest zur groben Entschlammung des Wassers bei. Infolge hydraulischer Mängel muss bei einer Vielzahl der eingesetzten Becken davon ausgegangen werden, dass die Rückhalteleistung gemindert ist. Im Rahmen verschiedenster Forschungsvorhaben der letzten Jahrzehnte wurde die Abhängigkeit des hydraulischen Verhaltens von der Beckengeometrie untersucht. Dabei konnten zahlreiche Optimierungsvorschläge ermittelt werden. Ziel war die systematische Aufarbeitung dieser Erkenntnisse sowie die Synthese in einem übersichtlichen Katalog. In diesem Zuge sollte eine normierte Bewertung der verschiedenen Komponenten aufgestellt werden.

Der entstandene Katalog soll als übersichtliche Handreichung für Planungsprozesse dienen. Dabei wird keine allgemeingültige Aussage getroffen, sondern ein Hinweis auf ein mögliches hydraulisches Potential der Komponente gegeben. Für den Fall, dass dies möglich ist, werden darüber hinaus weitere Detailempfehlungen angesetzt. Es ist anzumerken, dass alle gelisteten Bewertungen und Empfehlungen lediglich die Ergebnisse aus der erhobenen Literatur widerspiegeln und keine eigenen Erkenntnisse sind.

Ausgehend von dem Katalog können erste Rückschlüsse auf die Wirksamkeit verschiedener Komponenten gezogen werden. Die daraus folgende Aufgabe des Planers ist dann die genaue Ausgestaltung der Beckenkonstruktion.

Weiterhin wurden aufbauend auf die durchgeführte Literaturstudie drei optimierte Beckenkonfigurationen der Literatur entnommen, die hinsichtlich ihrer Sedimentations-Wirkung untersucht wurden: eine verbesserte Einlaufkonstruktion, eine Fließwegverlängerung mithilfe von alternierenden Leitwänden sowie eine veränderte Sohlgestaltung mithilfe von Trichterkonstruktionen. Im Vergleich dazu wurde eine Grundvariante aufgestellt, in der keinerlei Optimierungs-Komponenten implementiert wurden. Alle Varianten wurden hydro-numerisch für zwei Oberflächenbeschicken simuliert.

5.4 Ergebnisse der Beckenuntersuchung

Mit Hilfe der in der vorhergehenden Literaturstudie gewonnenen Kenntnisse werden vier optimierte Strömungskonfigurationen für Becken gewählt, die einen erhöhten Wirkungsgrad gegenüber Becken ohne jegliche Einbauten erreichen sollen. Es erfolgt keine Betrachtung von nachträglich durchgeführten Beckenoptimierungen, sondern ausschließlich von Neubauten. Die Konfigurationen beinhalten Änderungen in

- der Einlaufgestaltung,
- der Fließwegführung und
- der Sohlgestaltung.

Die grundsätzliche Geometrie des Beckens (Länge/ Breite/ Tiefe) bleibt in allen Fällen erhalten. Begonnen wird mit einer sogenannten „worst-case-Variante“, die ein Neubaubecken mit denkbar schlechter Einlaufgestaltung, ohne jede Einbauten, darstellen soll. Diesem „worst-case“ wird zunächst eine Lösung nach dem heutigen Stand der Technik als sogenannte „Grundvariante“ V0 gegenübergestellt, die im folgenden Text auch mit der Abkürzung V0 bezeichnet werden kann. Ausgehend von dieser Grundvariante V0 werden modular aufeinander aufbauend die drei Varianten V1 bis V3 aufgestellt. Auf diese Weise soll von Variante zu Variante eine stetige Verbesserung herbeigeführt werden. Die aus der Literatur ausgewählten Strömungskonfigurationen sind wie folgt definiert:

5.4.1 „worst-case“-Variante

Die Variante „worst-case“ ist, wie bereits im Kapitel 5.2.1.1 beschrieben, konzipiert worden, um einen Vergleich zu den optimierten Becken und insbesondere einen Vergleich zu der Grundvariante V0 herstellen zu können. Hierbei wird ersichtlich, was passiert, wenn bereits Becken denkbar schlecht konzipiert wurden.

Ein erster Überblick über die Durchströmungsmuster im Becken geben die im folgenden Bild 5.10 dargestellten Isolinien mit den Fließgeschwindigkeiten in Fließrichtung (Velocity u). Hierbei wird auf Grund der hohen negativen Geschwindigkeiten deutlich ersichtlich, dass eine große Rezirkulationszone das gesamte Becken durchströmt.

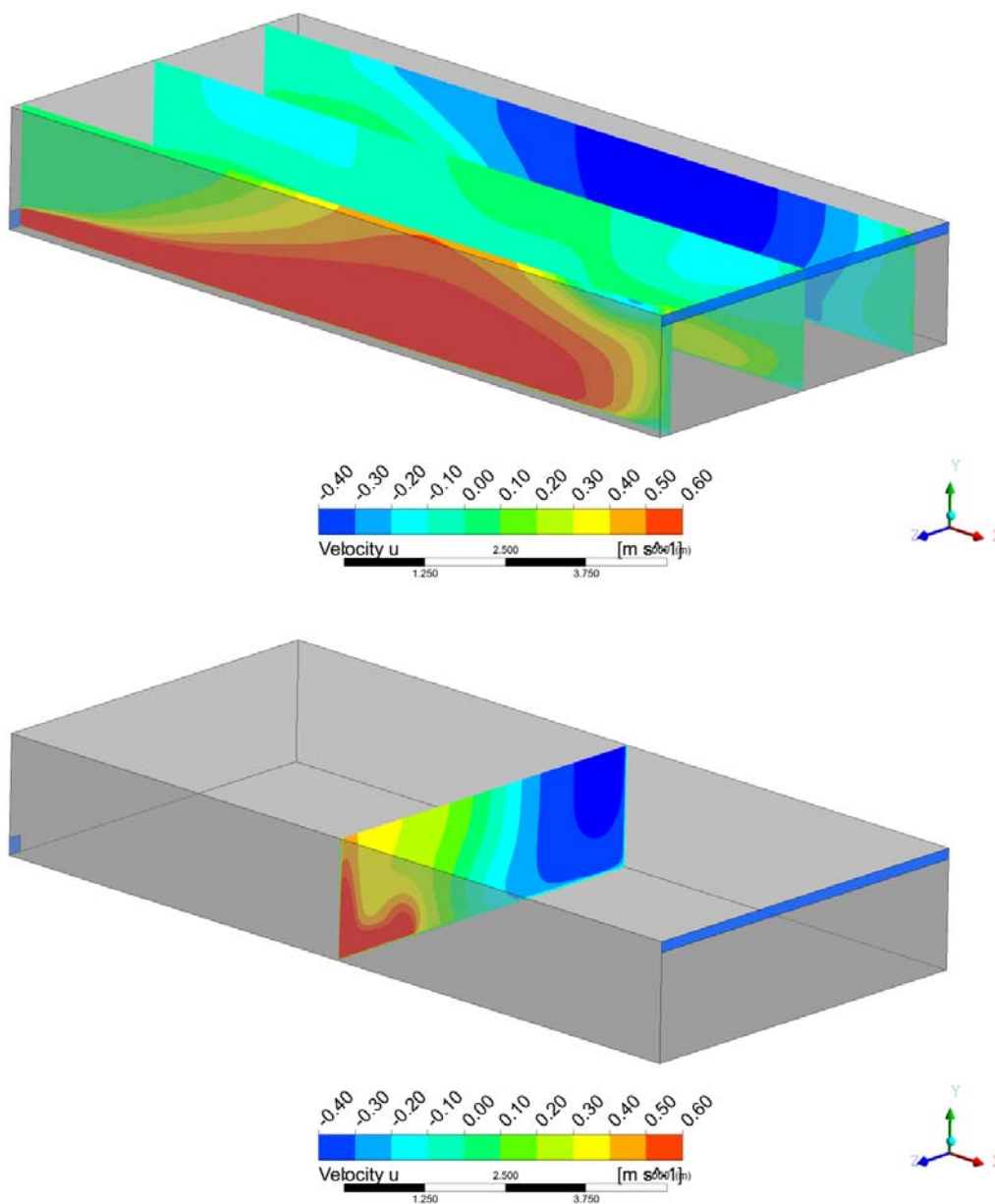


Bild 5.10: „worst-case“-Variante; Isolinien der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 10$ m/h; oben: Längsschnitt, unten: Querprofile

Im folgenden Bild 5.11 sind die Stromlinien im dem Becken dargestellt. Diese verdeutlichen noch einmal mehr, die großräumige Rezirkulationszone.

ANSYS
R18.0
Academic

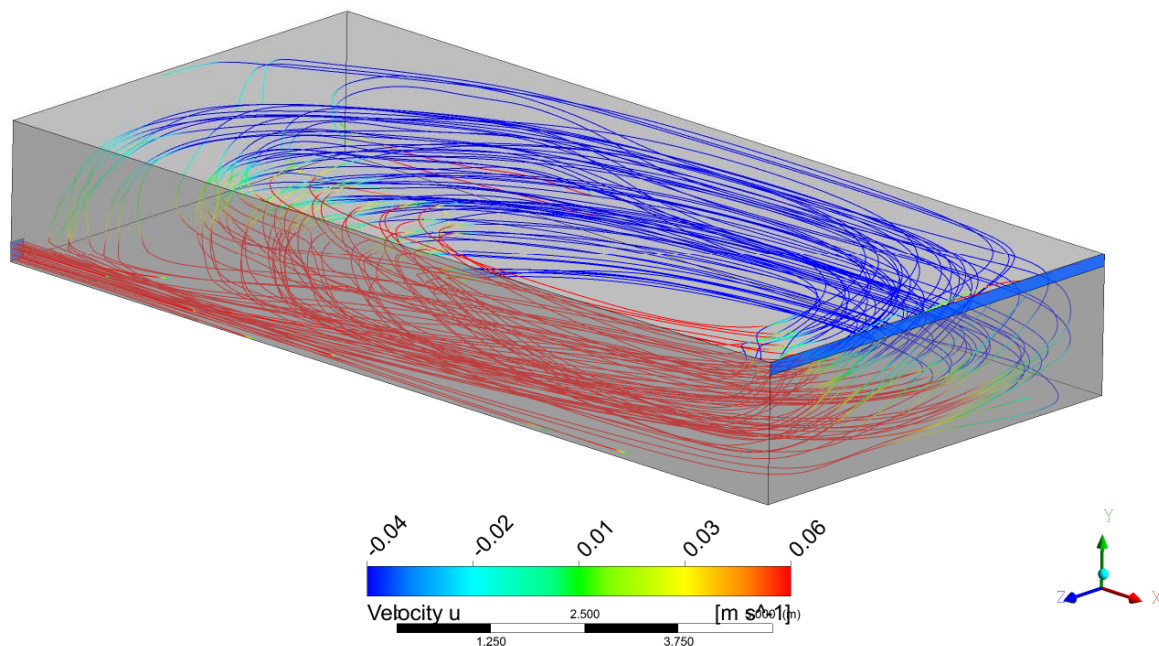


Bild 5.11: „worst-case“-Variante; Stromlinien der Geschwindigkeiten mit der Einföhrung der in X-Richtung 3D-Ansicht $q_A = 10 \text{ m}^3/\text{h}$

5.4.2 Grundvariante V0

Die Grundvariante V0, wie bereits in Kapitel 5.2.1.2 beschrieben, ist die Referenz für einen Vergleich der auf Basis der Literaturrecherche ermittelten Becken bezogen auf die ausgewerteten Wirkungsgrade.

Einen guten Überblick über die grundsätzliche Durchströmung geben zunächst die Isolinien der Geschwindigkeiten, die in Bild 5.12 dargestellt sind. Aufgestellt wird eine 3D-Ansicht der Geschwindigkeiten in x-Richtung (entspricht Fließrichtung, auch velocity u) jeweils im Beckenlängsschnitt und für verschiedene Querschnitte.

Die Grundvariante charakterisiert sich demnach insbesondere durch die deutliche Jet-Strömung, die sich auf Grund des mittig liegenden Gerinneinlaufs ausbildet. Da dieser nicht über die gesamte Breite konstruiert ist, entsteht eine zentrierte Strömung mit erhöhten Geschwindigkeiten, die durchgehend bis zum Beckenende erkennbar sind. Um diese Bereich herum

bildet sich eine Scherschicht, in der die Geschwindigkeit von sehr hoch zu sehr niedrig wechselt. Die Dicke dieser Scherschicht nimmt entlang der Beckenlänge zu.

Ein annähernde Gleichverteilung der Geschwindigkeiten über den Beckenquerschnitt wird auch am Beckenende nicht erreicht, wie gut im unteren Bild 5.12 zu erkennen ist. Die Jet-Strömung lässt darauf schließen, dass das Becken einen großen Anteil an Kurzschlussströmung aufweist. Ein großer Teil der eingeführten Wassermengen verlässt das Becken mit einer geringen Aufenthaltszeit. Dies gilt ebenfalls für die mitgeführten Partikel. Die horizontale Geschwindigkeit übersteigt die Sinkgeschwindigkeiten verschiedener Feststoffe, die zum größten Teil zwischen 0,00 und 0,05 m/s liegen. Nach Hazens Annahmen können sich demnach viele Partikel nicht komplett im Becken absetzen.

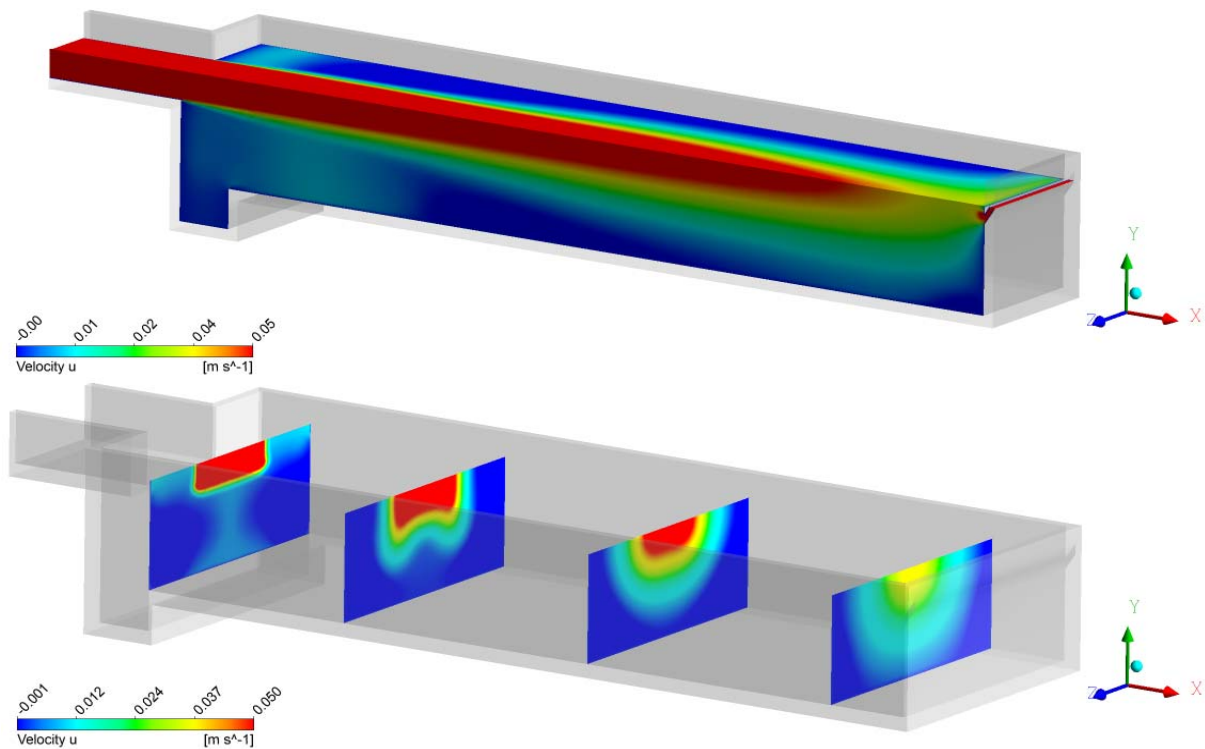


Bild 5.12: Variante V0; Isolinien der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 4$ m/h; oben: Längsschnitt, unten: Querprofile

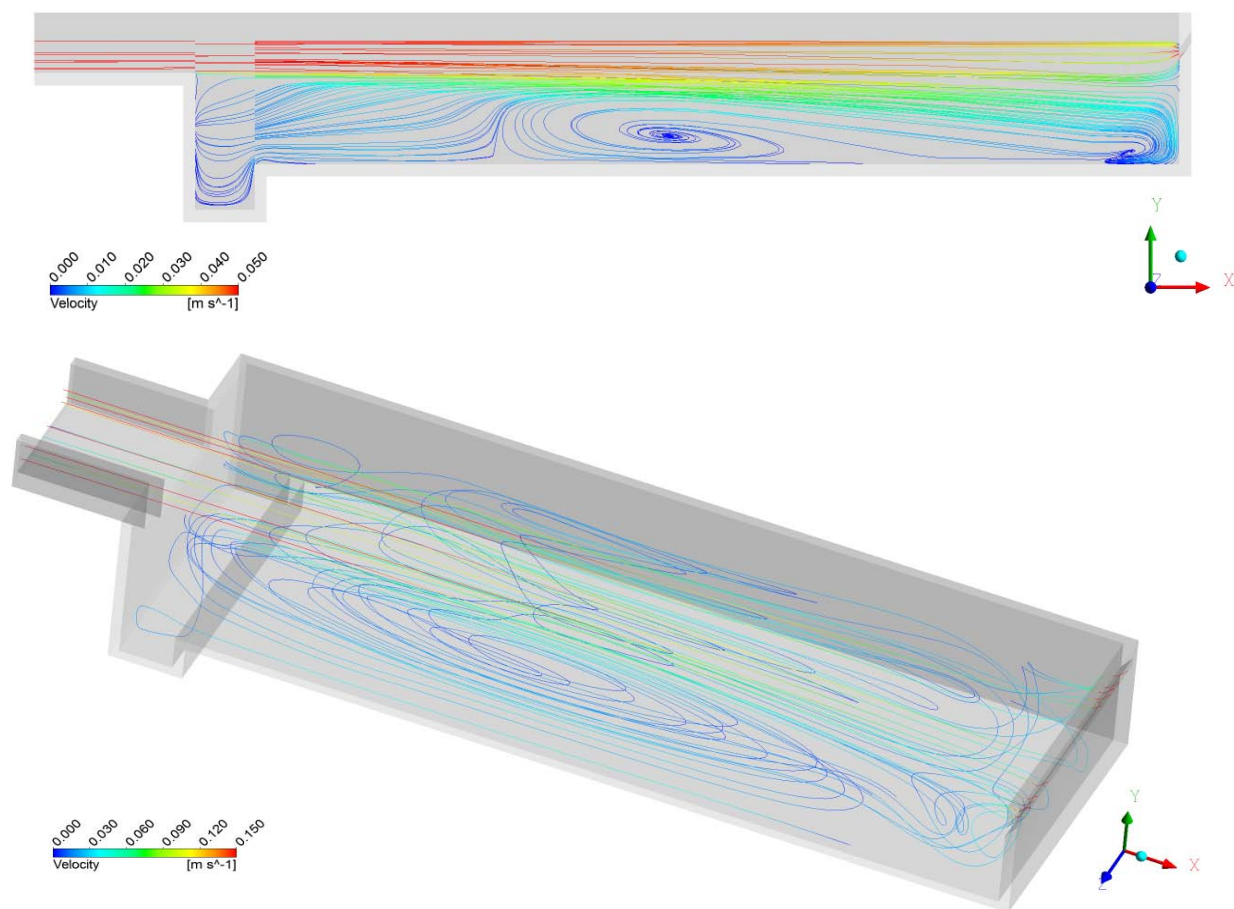


Bild 5.13: Variante V0; Stromlinien der Geschwindigkeiten; oben: Längsschnitt in Beckenmitte $q_A = 4 \text{ m/h}$, unten: 3D-Ansicht $q_A = 10 \text{ m/h}$

Da die Jet-Strömung so ausgeprägt ist, sind im Umkehrschluss auch große inaktive bzw. Rezirkulationsvolumina vorhanden. Diese sind deutlich durch die Stromlinien in Bild 5.13 zu erkennen. Im Längsschnitt ist die Grundwalze dargestellt, die sich bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 4 \text{ m/h}$ etwa ab der Beckenmitte bildet. Zur Darstellung der Stromlinien sei an dieser Stelle gesagt, dass auf Grund der im Modellaufbau nötigen Separation des Modells in mehrere Teile eine durchgängige Darstellung der flächengebundenen Stromlinien nicht möglich ist. Dies gilt auch für alle weiteren Grafiken.

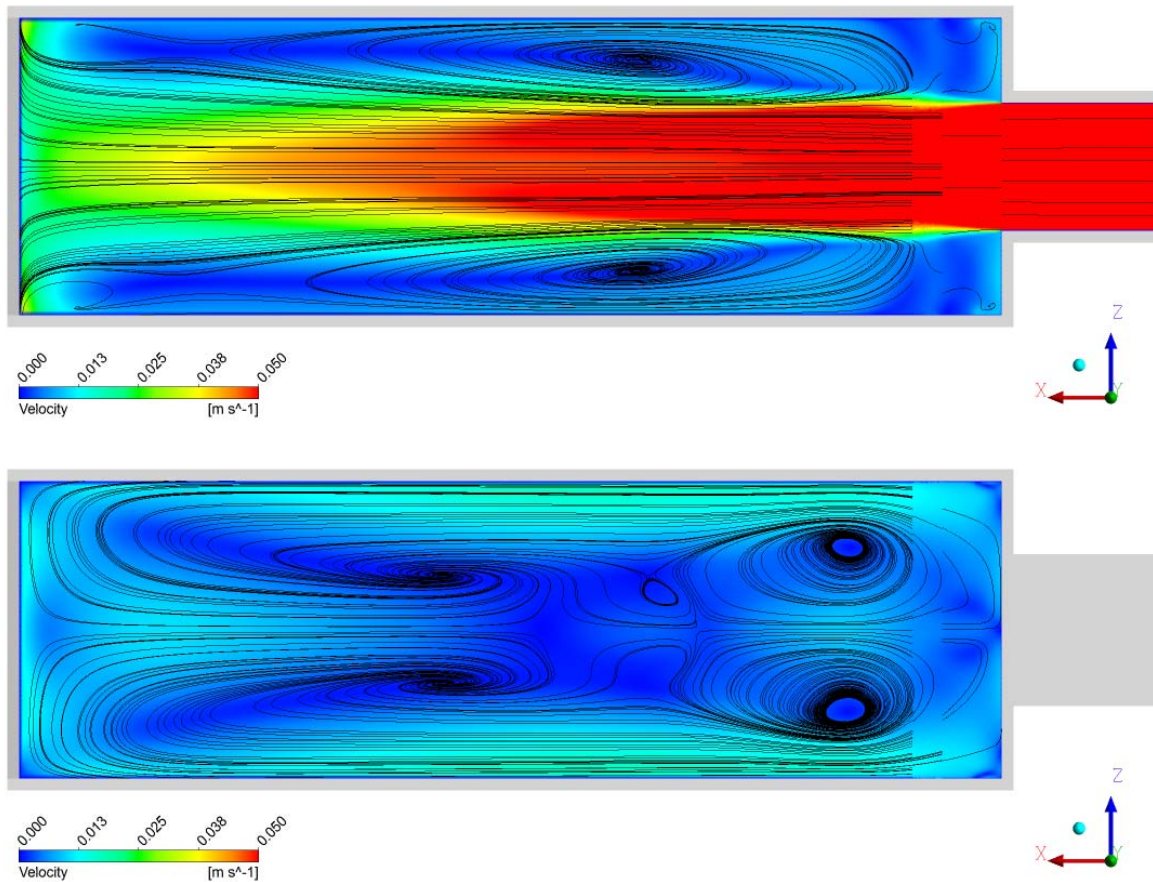


Bild 5.14: Variante V0; Isolinien der resultierenden Geschwindigkeiten mit Stromlinien $q_A = 4 \text{ m}^3/\text{h}$; oben: Schnitt 5,00 cm über Gerinneeinlauf-Sohle, unten: Schnitt 0,50 m über Beckensohle

Totzonen sind außerdem in allen Eckbereichen vorhanden, was sehr typisch ist, da das Volumen auf Grund der Geometrie hier nicht komplett ausgenutzt werden kann. Sehr markant sind auch die seitlichen Rezirkulationen, die auf Grund der Strahlwirkung des Einlaufbereichs entstehen. Eine gute Visualisierung ebendieser stellt das obere Bild 5.14 dar. Während mittig die hohen und durchgehenden Geschwindigkeiten der Gerinneströmung sichtbar werden, entwickeln sich in den Randbereichen Rezirkulationen, die als inaktives Sedimentationsvolumen zu werten sind. In den unteren Lagen (Bild 5.14 unten, 0,50 m über Beckensohle) dagegen ergibt sich ein ganz anderes Fließbild. Insgesamt sind die Fließgeschwindigkeiten deutlich geringer. Im hinteren Bereich des Beckens ist die bereits erwähnte Grundwalze zu erkennen. Zu beachten sind jedoch weiterhin die vertikalen Rezirkulationen, die sich am Beckenanfang im Bereich des Pumpensumpfes bilden. Es ist von deutlichen Sekundärströmungen auszugehen. In den Querschnitten der u -Geschwindigkeiten (Bild 5.12, unten) sind sie anhand der randseitigen geringeren Geschwindigkeiten erkennbar.

Insgesamt sind keine grundlegenden Unterschiede im Durchströmungsverhalten der unterschiedlichen Oberflächenbeschickungen zu erkennen.

5.4.3 Variante V1: Einlaufgestaltung

Die erste Optimierungsvariante sieht eine Modifizierung des Einlaufbereichs mit einem Diffusor vor, entsprechend der geometrischen Beschreibung der Variante in Kapitel 5.2.1.3. Diese Modifikation hat zum Ziel, die kinetische Energie im Einlaufbereich zu verringern und eine gleichmäßige Verteilung der Strömung auf den gesamten Fließquerschnitt zu fördern. Direkt hinter dem Gerinneinlauf, im Bereich des Pumpensumpfes, wird eine Prallwand angeordnet, welche die Strömung nach unten lenkt. Der Abstand der Prallwand zum Einlauf sowie die Höhe der Öffnungen sind so gewählt, dass der zur Verfügung stehende Querschnitt dem Fließquerschnitt des zugeführten Gerinnes entspricht. Demnach ist gewährleistet, dass auf Grund einer Querschnittsverengung keine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit entsteht. Die horizontalen Leitbleche an den Öffnungen greifen die Abwärtsströmung ab und sollen zu einer gleichmäßigeren Horizontalströmung führen. Die Konstruktion wird durch vertikale Leitbleche stabilisiert. Außerdem erfüllen sie zusätzlich die Funktion der Gleichverteilung der Strömung über das Becken. Darüber ist im Bereich des Pumpensumpfes ein Geröllfang angeordnet, um grobe Partikel wie Kies oder Steine zu entfernen. Die Konstruktion erfolgt in Anlehnung an He (2008).

Es wird erwartet, dass sich die Strömung durch den Diffusor gleichmäßig über den Querschnitt verteilen kann. Demnach soll weder eine übermäßige Strömung an der Beckensohle im Unterwasser der Prallwand entstehen, noch sollten auf Grund der Einlaufgestaltung zusätzliche Turbulenzen entstehen. Die horizontalen Leitbleche des Diffusors, die an den Öffnungen angeordnet sind, sollen dafür sorgen, dass die Strömung gleichmäßig und ohne zusätzliche Turbulenzen in das Becken geleitet wird.

Ziel der Konstruktion ist ein gleichmäßigeres Strömungsbild über den gesamten Fließquerschnitt. Bezugnehmend auf die Theorie von Hazen müsste daraus eine Verbesserung der Sedimentationsleistung resultieren. Der Anteil des inaktiven Beckenvolumens kann durch den Rückgang von Rezirkulationszonen insbesondere im Strahlwinkel des ursprünglichen Gerinneinlaufs vermindert werden.

Die Variante 1 Einlaufgestaltung wird ähnlich der Grundvariante V0 ausgewertet. Da hier jedoch deutlichere Unterschiede zwischen den beiden Oberflächenbeschickungen zu erkennen sind, werden diese im Folgenden separat erläutert.

Oberflächenbeschickung $q_A = 4 \text{ m}^3/\text{h}$

In Bild 5.15 werden die Isolinien im Längs- sowie Querschnitt für die Geschwindigkeiten in x-Richtung dargestellt. In beiden Grafiken wird eine erhöhte Geschwindigkeit im vorderen Beckenbereich an der Oberfläche ersichtlich. Diese ist jedoch anders als bei der Grundvariante über die gesamte Beckenbreite verteilt. Die vormals deutlich erkennbare Jet-Strömung ist durch den Diffusor aufgehoben. Eine zentrierte Strömung ist in allen Querschnitten nicht mehr erkennbar. Vielmehr kann am Ende des Beckens von einer relativ gleichmäßigen Durchströmung über den gesamten Beckenquerschnitt ausgegangen werden.

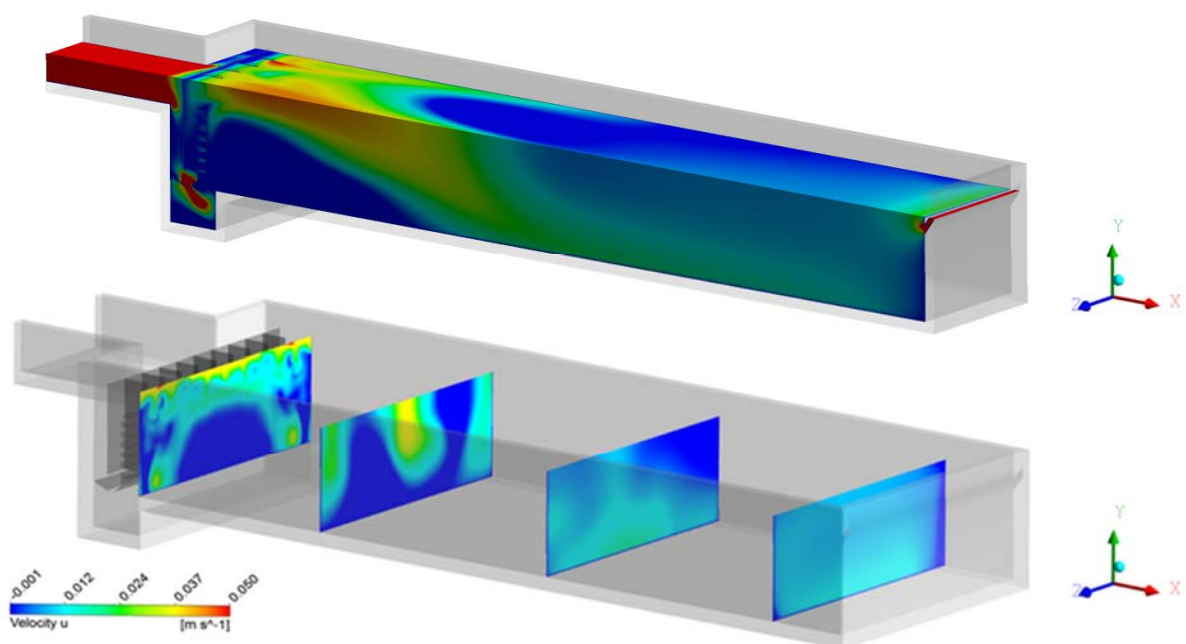


Bild 5.15: Variante V1; Isolinien der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 4 \text{ m}^3/\text{h}$; oben: Längsschnitt, unten: Querprofile

Der erste Beckenquerschnitt lässt erkennen, dass durch die Einlaufkonstruktion, die durch das Gerinne vormals gebündelte Strömung mehr oder minder über die gesamte Beckenbreite verteilt wird. Wider Erwarten bildet sich jedoch am Wasserspiegel eine Schicht mit höheren Geschwindigkeiten, welche sich im weiteren Beckenverlauf weiter nach unten zieht. Auf Grund der in den ersten drei Querschnitten anhaltend ungleichmäßigen Geschwindigkeiten im Fließquerschnitt, lassen sich insgesamt diffuse Strömungszustände sowie Rezirkulationen vermuten.

Die Auswertung der Stromlinien gibt näheren Aufschluss zur Beckendurchströmung. In Bild 5.16 sind die Stromlinien der Geschwindigkeiten in Beckenmitte sowie eine 3D-Ansicht des Einlaufbereichs dargestellt. An dieser Stelle wird ersichtlich, warum nahe der Oberfläche hohe Geschwindigkeiten zu beobachten sind:

Die Strömung wird durch die Prallwand nach unten geleitet und gelangt in den Trichter, der einerseits zur Strömungsumlenkung nach oben und andererseits zur Abtrennung von Grobstoffen dient. Anstatt dass die Strömung in ihrer Gesamtheit wieder nach oben gelenkt wird, bildet sich jedoch im Pumpensumpf eine Rezirkulation, wie in beiden Bildern ersichtlich wird. Von hier aus wird das Wasser-Feststoff-Gemisch in die Sedimentationskammer geleitet. Hinter der Einlaufgestaltung bildet sich in der Sedimentationskammer eine Grundwalze (mit liegender Achse) aus.

Dass eine Rezirkulation mit senkrechter Achse in der Beckenmitte entsteht (Bild 5.17), ist auf die zentrierte Wirkung des Gerinneeinlaufs zurückzuführen. In den Randbereichen dagegen sind Wirbelbildungen im Pumpensumpf zu erkennen, wie im unteren Bild 5.16 dargestellt ist. Diese führen dazu, dass hier die Strömung eher waagrecht in das Becken geleitet wird. Im ersten Querschnitt in Bild 5.15 sind diese Bereiche anhand der erhöhten Geschwindigkeiten in x-Richtung zu erkennen.

Die Strömung, die innerhalb der Trichterführung bleibt, wird senkrecht nach oben gelenkt. Es erfolgt jedoch nicht wie gewünscht eine Aufteilung der Strömung über die Höhe durch die mehrfachen Öffnungen. Vielmehr erfolgt der Austritt fast vollständig im oberen Bereich, was die erhöhten Geschwindigkeiten an der Oberfläche nochmals verstärkt.

Zur weiteren Visualisierung dient das Bild 5.17. Ähnlich wie zuvor bei der Grundvariante werden auch hier die Isolinien der resultierenden Geschwindigkeiten mit den Stromlinien für die bereits bekannten Höhenlagen kombiniert. Im oberen Bild wird insbesondere die allgemein diffusere Durchströmungscharakteristik ersichtlich. Neben Bereichen mit erhöhten Geschwindigkeiten befinden sich scheinbar ohne nähere Systematik kleinere Rezirkulationen. Dies gilt auch für den unteren Horizontalschnitt. Hier sind darüber hinaus die bereits erwähnten Rezirkulationen zu erkennen, die sich in den Randbereichen des Pumpensumpfes bilden. Im hinteren Beckenbereich entsteht eine zunehmend gleichmäßige Durchströmung.

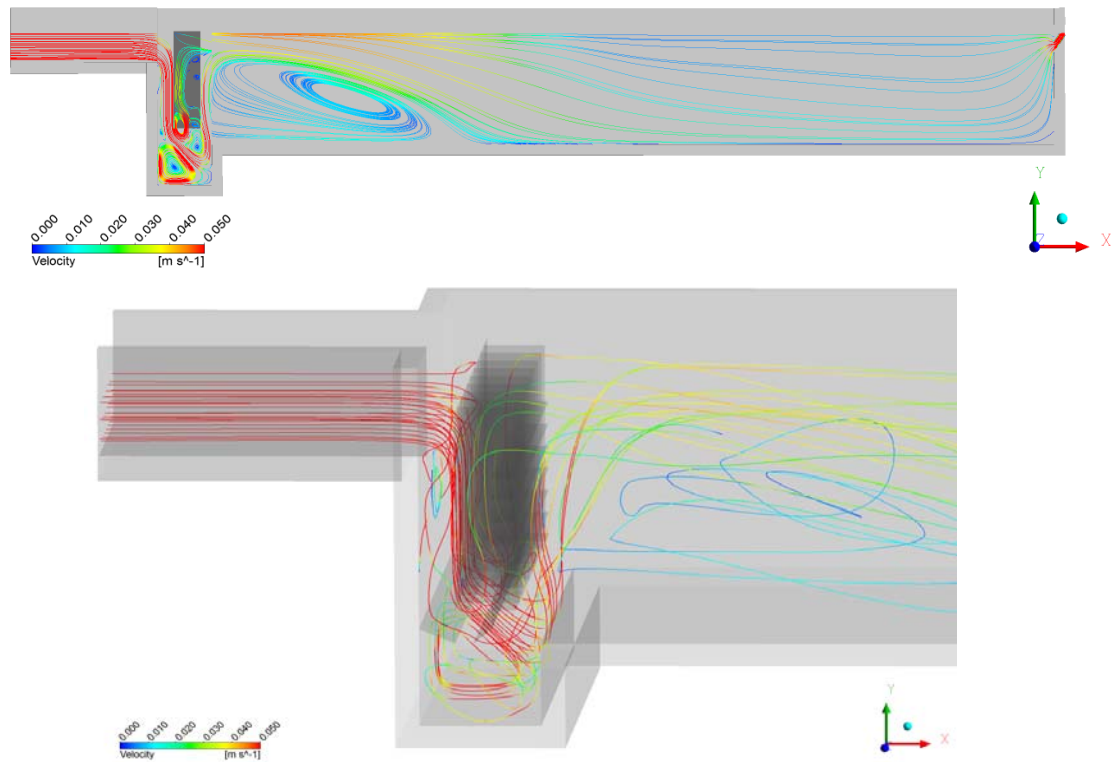


Bild 5.16: Variante V1; Stromlinien der Geschwindigkeiten; oben=Längsschnitt in Beckenmitte, unten=isometrische Ansicht des Einlaufbereichs

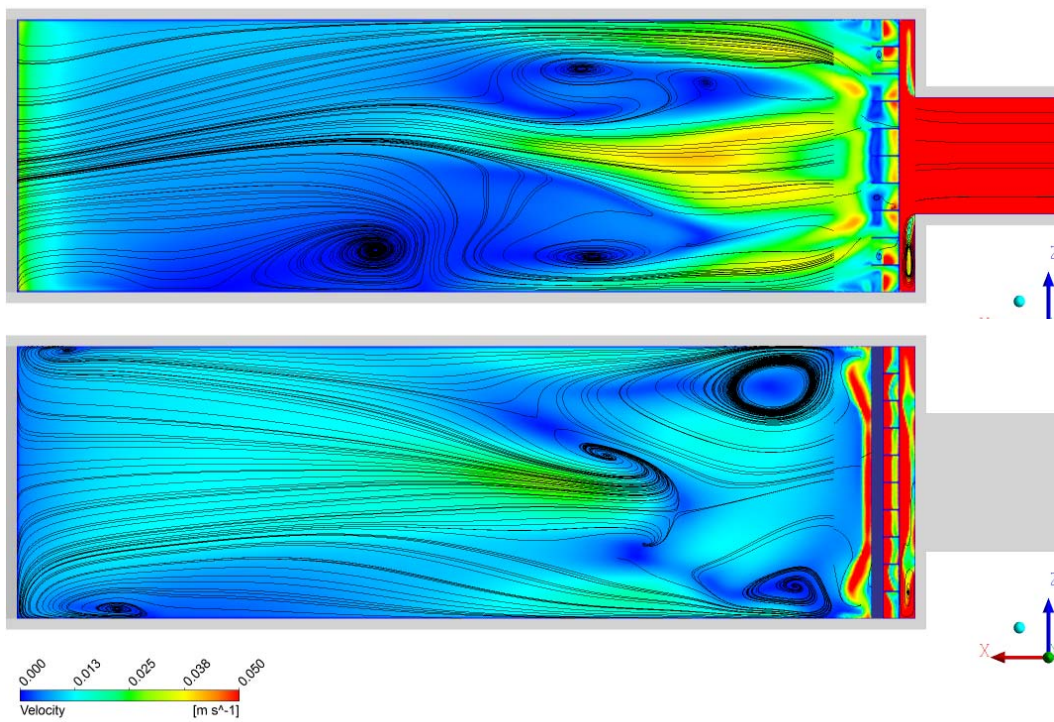


Bild 5.17: Variante V1; Isolinien der resultierenden Geschwindigkeiten mit Stromlinien $q_A = 4 \text{ m}^3/\text{h}$; oben: Schnitt 0,05 m über Gerinneeinlauf-Sohle, unten: Schnitt 0,50 m über Beckensohle

Oberflächenbeschickung $q_A = 10 \text{ m/h}$

Bei der höheren Oberflächenbeschickung von $q_A = 10 \text{ m/h}$ ergibt sich ein etwas anderes Fließbild. Hierzu sind zunächst in Bild 5.18 die bereits bekannten Isolinien der x-Geschwindigkeiten dargestellt. Zunächst einmal kann, ähnlich wie bei der geringeren Oberflächenbeschickung einerseits festgestellt werden, dass sich die Strömung besser als bei der Grundvariante über die Beckenbreite aufteilt. Andererseits sind auch hier erhöhte Geschwindigkeiten in der Nähe des Wasserspiegels erkennbar.

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Ausführungen entwickelt sich jedoch im Anschluss an den Einlauf ein deutlich diffuseres Bild. Zwar sind im Einlaufbereich die zuvor herausgearbeiteten Merkmale - geringe Geschwindigkeiten unten in der Mitte, Ansätze von Jet-Strömungen in den Randbereichen, hohe Geschwindigkeiten oben – in Ansätzen erkennbar, jedoch ergeben sich insbesondere im weiteren Beckenverlauf größere Unterschiede:

Das Maximum der Geschwindigkeiten bewegt sich nicht in Richtung der Sohle, sondern verbleibt im oberen Bereich. In den hinteren Querschnitten kann man sogar Ansätze einer zentrierten Strömung finden. Da kaum negative Geschwindigkeiten zu beobachten sind, kann nicht von einer so klar ausgeprägten Rezirkulationszone in der Beckenmitte ausgegangen werden. Die durchgängig höheren Geschwindigkeiten an der Beckenoberfläche lassen wiederum einen höheren Anteil an Kurzschlussströmung vermuten. Dies wird nochmals durch die Tatsache bestärkt, dass sich auch im hinteren Beckenbereich keine gleichmäßige Durchströmung des Beckenquerschnitts entwickelt hat.

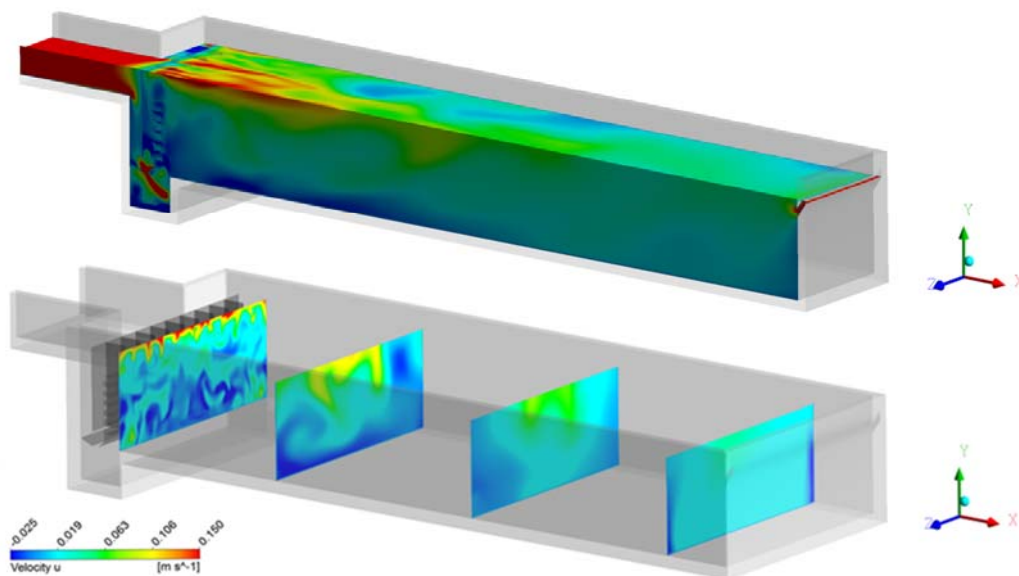


Bild 5.18: Variante V1; Isolinien der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 10 \text{ m/h}$; oben: Längsschnitt, unten: Querprofile

Durch Auswertung der Geschwindigkeits-Stromlinien wird der o.g. Eindruck nochmals bestätigt. Hierzu werden in Bild 5.19 die Stromlinien als Längsschnitt in der Beckenmitte sowie in der 3D-Ansicht dargestellt. Im Längsschnitt ist zunächst ein sehr ähnliches Verhalten wie bei der Oberflächenbeschickung von $q_A = 4 \text{ m/h}$ zu erkennen. Im Pumpensumpf bilden sich Rezirkulationen. Die Einleitung in die Sedimentationskammer erfolgt jedoch weniger senkrecht, sondern teils innerhalb weiterer Wirbelstrukturen. Wie bereits vermutet, ist keine klar abgegrenzte Grundwalze erkennbar. Das turbulente Durchströmungsverhalten bleibt fast über die gesamte Beckenlänge erhalten. Es liegen zahlreiche kleinere und größere Wirbelstrukturen vor. Nach hinten hin erfolgt wie bereits beobachtet eine zunehmende Vergleichmäßigung. Hervorzuheben ist an dieser Stelle außerdem eine hinabsteigende Wirbelstruktur, die sich vor der Prallplatte in den Eckbereichen bildet.

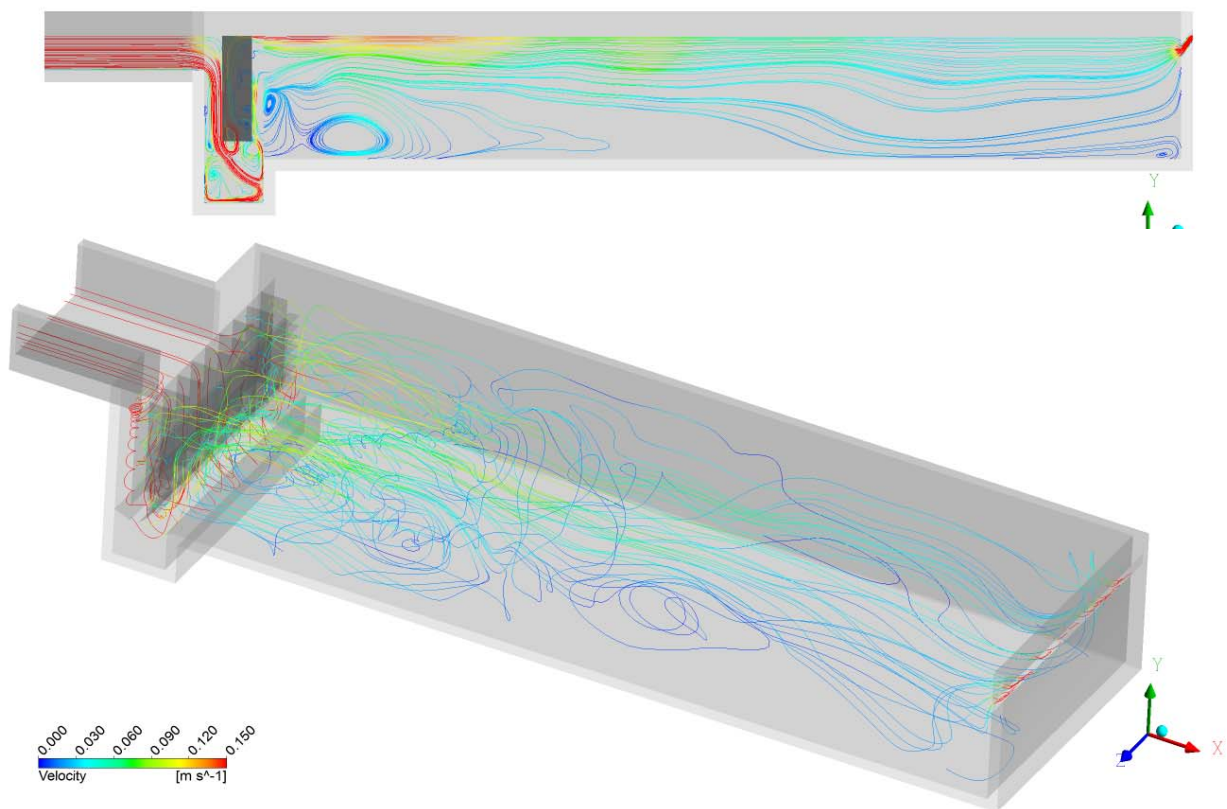


Bild 5.19: Variante V1; Stromlinien der Geschwindigkeiten $q_A = 10 \text{ m/h}$; oben: Längsschnitt in Beckenmitte, unten: 3D-Ansicht des gesamten Beckens

In einem letzten Schritt erfolgt die Auswertung der Grundrisse der resultierenden Geschwindigkeiten (Bild 5.20). Hier können die Unterschiede zur niedrigeren Oberflächenbeschickung besonders gut herausgearbeitet werden. In der oberen Höhenlage sind – anders als zuvor – keine Rezirkulationen zu erkennen. Tendenziell bewegt sich das Wasser in schwingenden, wellenartigen Bewegungen durch das Becken. Auch hier ist die Entwicklung eines zentralen Bereichs erhöhter Geschwindigkeiten zu erkennen, der trotz des Diffusors möglicherweise auf

die nicht gebrochene Jet-Wirkung des Gerinneeinlaufs zurückzuführen ist. Im unteren Schnitt können in den Randbereichen des Beckenanfangs nicht, wie zuvor, Rezirkulationen festgestellt werden. Vielmehr entwickeln sich an mehreren Punkten wirbelartige Strukturen.

Zum Ende des Beckens hin ist anhand der zunehmend gerade verlaufenden Stromlinien eine Vergleichmäßigung der Strömung zu erkennen. Auf Grund des Beckenendes wird diese Entwicklung jedoch unterbunden. Es ist zu vermuten, dass ein besseres Fließbild durch eine Verlängerung des Beckens um einige Meter möglich gewesen wäre. Ungewiss ist jedoch an dieser Stelle, inwiefern dies den Wirkungsgrad des Beckens verbessert hätte.

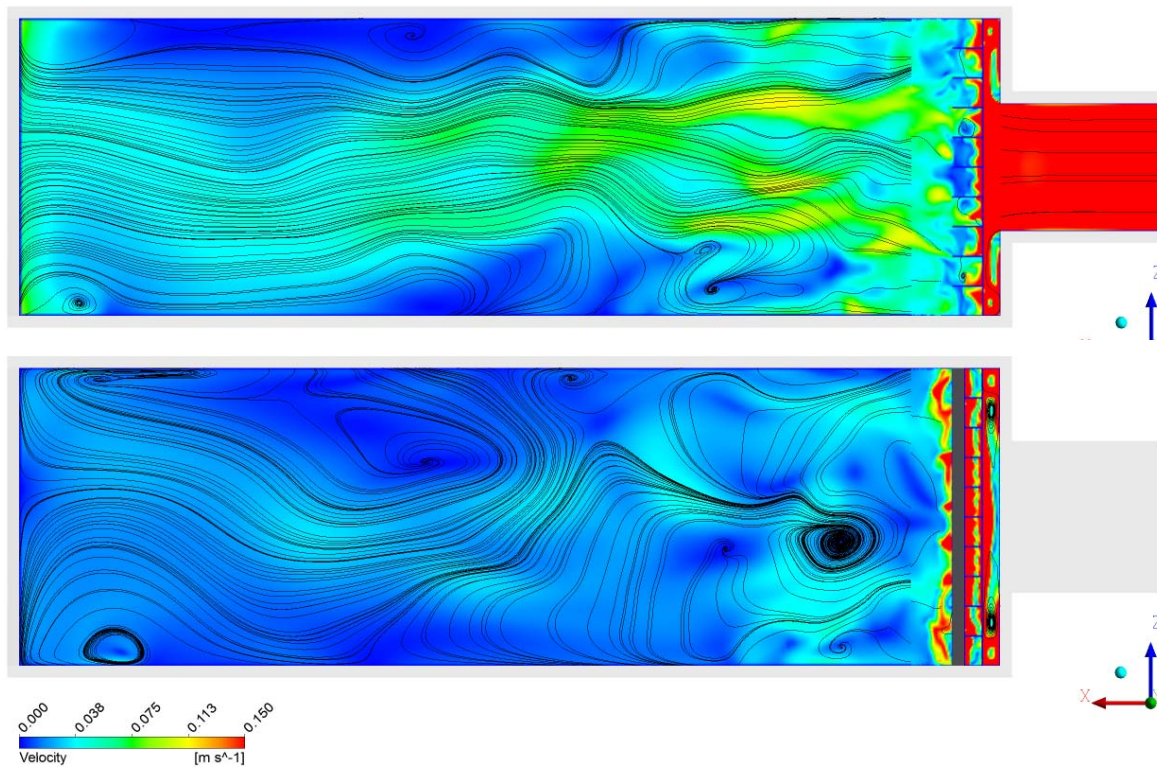


Bild 5.20: Variante V1; Isolinien der resultierenden Geschwindigkeiten mit Stromlinien $q_A = 10$ m/h; oben: Schnitt 0,05 m über Gerinneeinlauf-Sohle, unten: Schnitt 0,50 m über Beckensohle

5.4.4 Variante V2: Fließwegführung

Die Auswahl der zweiten Modifizierung erfolgt in Anlehnung an den häufig genutzten Ansatz der Fließwegverlängerung durch alternierende Leitelemente, um den Anteil der Kurzschlussströmung zu vermindern. Der Ansatz, der u.a. von Kattnig (2014) und Carlston (2015) untersucht wurde, stammt ursprünglich aus der Trinkwasserbehandlung. Beim Bau von Kontaktbecken soll die Aufenthaltszeit möglichst hoch sein, um ein optimales Desinfektionsergebnis zu erzielen. Dabei sollen – entsprechend der Erwartungen an Regenklärbecken - Totzonen und Kurzschlussströmungen vermieden werden.

Entsprechend der Empfehlungen aus Kapitel 5.3 wird erwartet, dass sich der Sedimentations-Wirkungsgrad des Beckens verbessert. Auch sollte eine weitestgehend gleichmäßige Durchströmung des Beckens vorliegen, da die Empfehlungen von Kattnig (2014) und Carlston (2015) eingehalten werden.

Die Auswertung des Durchströmungsverhalten der Variante 2 Fließwegführung ergibt keine maßgeblichen Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Oberflächenbeschickungen. Im folgenden Bild 5.21 werden die Querschnitte mit den Geschwindigkeiten in x-Richtung gezeigt. Zusätzlich werden auch hier die Stromlinien mit den zugehörigen Isolinien der resultierenden Geschwindigkeiten für zwei Höhenlagen aufgezeigt. Ausgewählt wird dazu einerseits ein Schnitt 0,05 m über der Sohle des Gerinneinlaufs sowie ein Schnitt 0,50 m über der Beckensohle. Alle Grafiken wurden für eine Oberflächenbeschickung von $q_A = 4 \text{ m/h}$ ausgegeben.

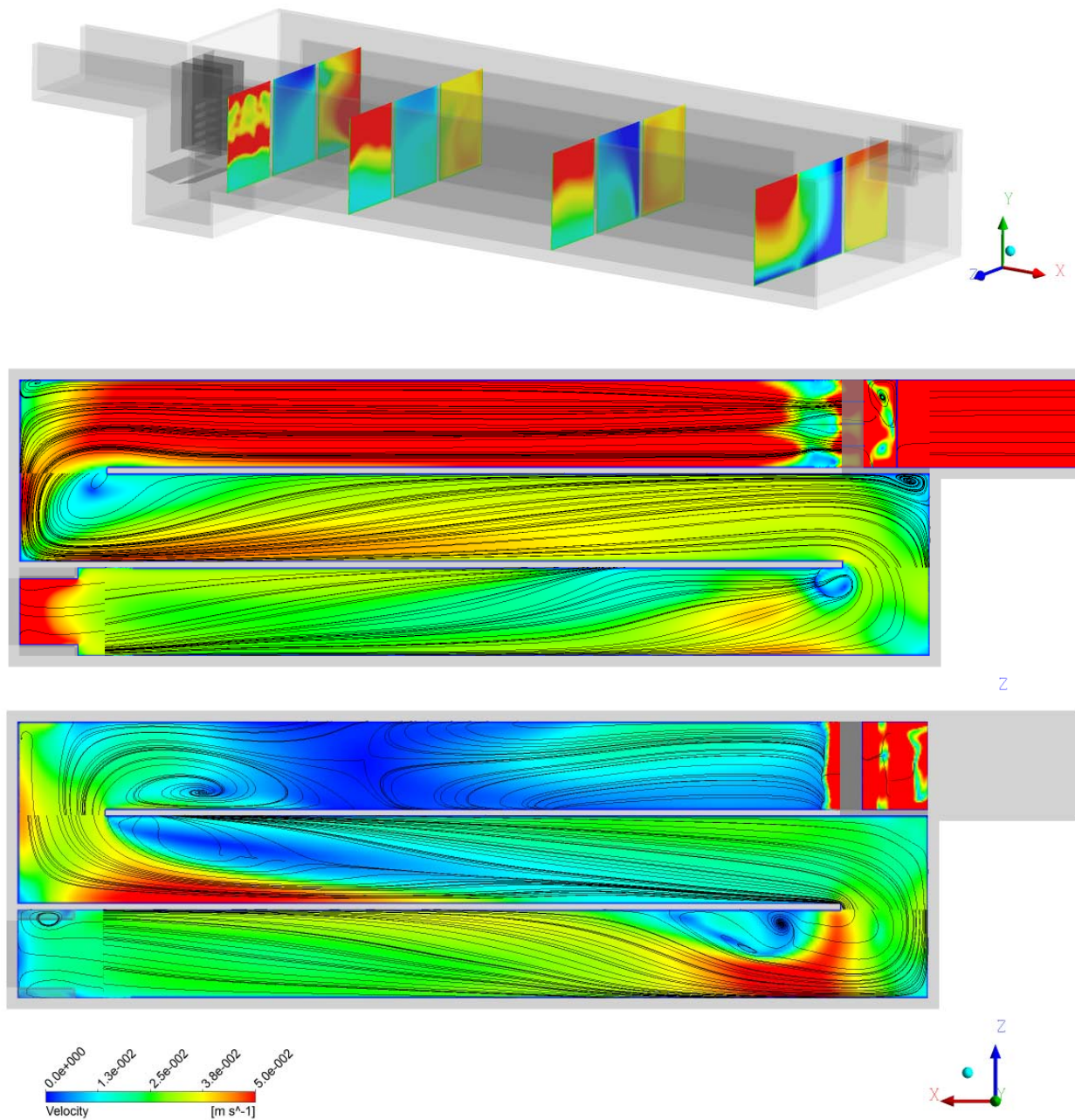


Bild 5.21: Variante V2; oben: Isolinen-Querschnitte der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 4$ m/h; Mitte/unten: Isolinen der resultierenden Geschwindigkeiten $q_A = 4$ m/h; oben: Schnitt 0,05 m über Gerinneeinlauf-Sohle, unten: Schnitt 0,50 m über Beckensohle

Zunächst einmal ist in allen Grafiken der Einfluss der Einlaufkonstruktion zu erkennen, die auf Grund des modularen Aufbaus der Konstruktion der Variante 1 Einlaufgestaltung entspricht. Auch hier ergeben sich im Bereich der Wasseroberfläche erhöhte Geschwindigkeiten, die auf die verbesserungswürdige Konstruktion des Einlaufbereichs zurückzuführen sind.

In den beiden Grundrissen sind in den Kurvenbereichen jeweils auf der stromabgewandten Seite Rezirkulationen zu erkennen. Diese fallen in den beiden Höhenlagen unterschiedlich aus. Im ersten Gerinne ist die Strömung noch sehr inhomogen. Die Jet-Strömung, die als mehr

oder weniger gebündelter Strom in der oberen Höhenlage auf den Kurvenbereich trifft, wird umgelenkt. So entstehen am äußeren Rand erhöhte Geschwindigkeiten. Innen dagegen sind sie sehr gering bzw. negativ. Die Rezirkulationszone auf der stromabgewandten Seite ist länglich und schnürt den freien Fließquerschnitt deutlich ein.

Deutlich wird insgesamt, dass bei einem schmalen Gerinne, in dem folglich auch höhere Geschwindigkeiten herrschen, die Wirkung des Diffusors, der eigentlich die Strömung gleichmäßig auf den Querschnitt verteilen soll, geringer ist, als bei einem breiteren Gerinne mit geringeren Fließgeschwindigkeiten. Die wellenartige Strömungsentwicklung, die bei der vorherigen Variante teilweise beobachtet werden konnte, tritt hier nicht auf.

Für das zweite Gerinne ist in den Querschnitten sowie im oberen Grundriss zu erkennen, dass der Geschwindigkeitsgradient geringer ist, als im ersten Gerinne. Eine gebündelte Strömung, wie sie im ersten Gerinne auftritt, ist in diesem Maße nicht mehr vorhanden. Dies führt dazu, dass die Rezirkulation im zweiten Kurvenbereich auf der stromabgewandten Seite nicht mehr so groß ausfällt. Jedoch sind auch hier im Außenbereich leicht erhöhte Geschwindigkeiten zu erkennen.

In den beiden äußeren Ecken im Kurveneintrittsbereich sind Totzonen und demnach inaktive Volumina zu erkennen. Im Gegensatz dazu führen die Stromlinien deutlicher in die beiden folgenden Ecken hinein.

Der untere Grundriss zeigt ein völlig anderes Verhalten. Zunächst ist anhand der aufgetragenen Stromlinien im Anschluss an die Einlaufkonstruktion eine Grundwalze zu vermuten, wie sie auch bei der Variante 1 zu beobachten war. Hinzu kommt eine Rezirkulation im hinteren Bereich des ersten Gerinnes. Die Rezirkulationszonen, die auch hier auf den stromabgewandten Seiten entstehen, formen sich viel mehr länglich in Fließrichtung und befinden sich – anders als in der höheren Lage – nicht im direkten Kurvenbereich. Die Totzonen in den Ecken des Kurveneintritts sind in dieser Variante nicht so deutlich festzustellen. Dies ist möglicherweise durch die insgesamt geringeren Geschwindigkeiten vor der Kurve zu erklären. Da die Strömung nicht mit einer solch großen „Wucht“ in die Kurve eintritt, entstehen in den Ecken keine Rezirkulationen.

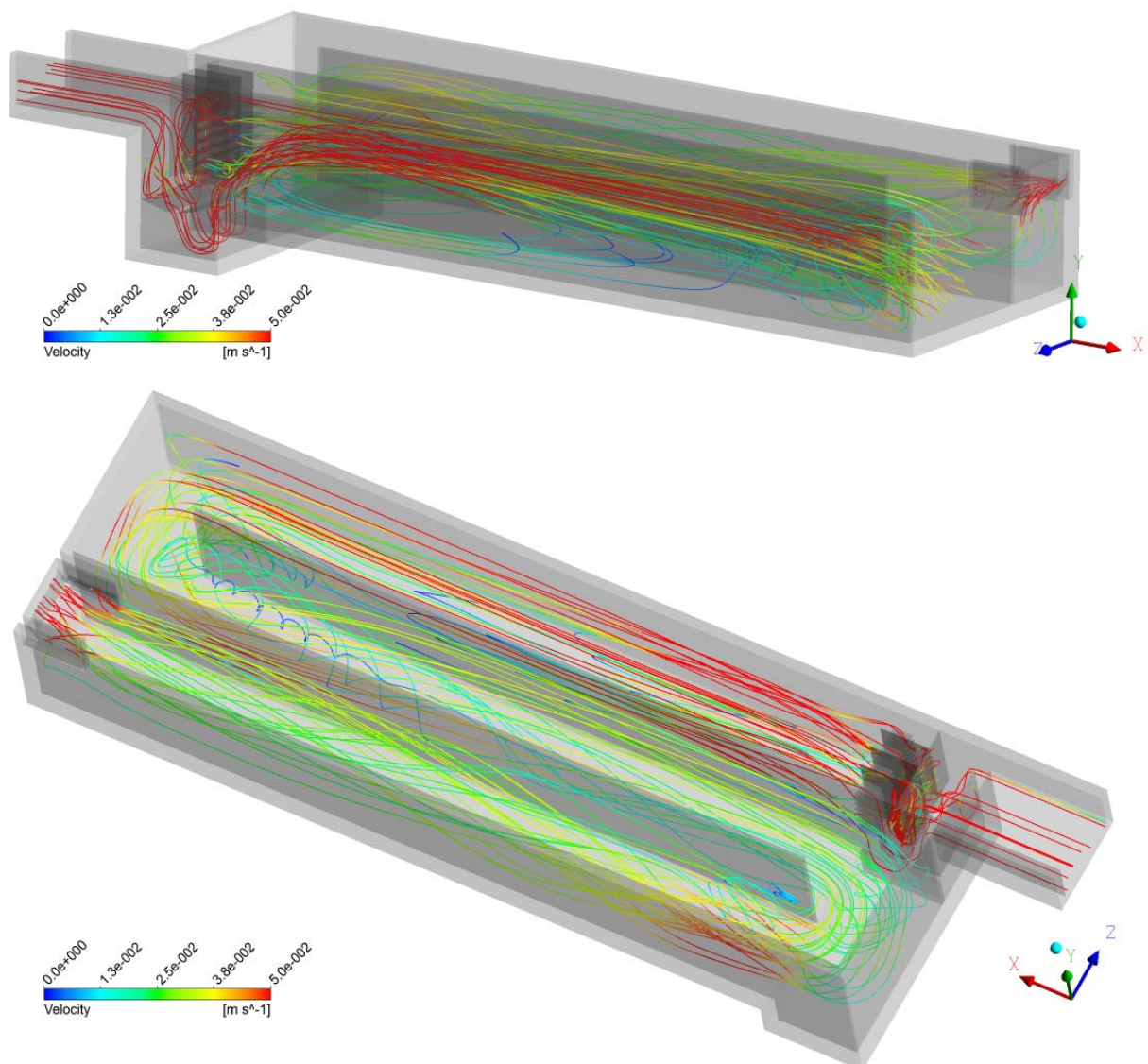


Bild 5.22: Variante V2; Stromlinien der Geschwindigkeiten $q_A = 4$ m/h; oben: 3D-Ansicht „links“, unten: 3D-Ansicht „rechts“

Zur weiteren Analyse des Durchströmungsverhaltens werden auch bei dieser Variante 3D-Ansichten mit den Stromlinien aufgestellt (Bild 5.22). In der „Ansicht links“ ist im ersten Gerinne gut die Grundwalze zu erkennen, die sich im Anschluss an das Durchfließen des Diffusors bildet. Darüber wird hier deutlich, dass die Rezirkulation vor dem Kurveneintritt durch Sekundärströmungen geprägt ist, wie bereits der Grundriss der unteren Höhenlage vermuten ließ. Rezirkulationen sind auch im stromabgewandten unteren Kurvenbereich zu erkennen: Eine wirbelartige Struktur bildet sich in den strömungsberuhigten Bereichen, die unten, länglich in das zweite Gerinne hineingezogen, zu erkennen sind (Bild 5.22).

Insgesamt sind innerhalb der 3D-Ansicht zu Beginn des zweiten Gerinnes in der unteren Grafik Ansätze einer Verdrehung zu erkennen, die sich jedoch im Laufe der Gerinnelänge auflöst. Anders sieht dies im dritten Gerinne aus: Hier setzt sich die Verdrehung nach der Kurve über die gesamte Fließlänge des Gerinnes fort. Dies erfolgt jedoch mit über den Querschnitt gleichmäßig verteilter Geschwindigkeiten, wie auch in den Querschnitten (Bild 5.21, oben) zu erkennen ist. Fraglich ist an dieser Stelle, inwiefern die drehenden Bewegungen den Sedimentationsprozess beeinflussen. Einen möglichen Aufschluss dazu kann die Auswertung der Wirkungsgrade (Kapitel 5.4.6) geben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Durchströmungsverhalten von Becken mit verlängerter Fließwegführung auf Grund der wiederkehrenden Strömungsumlenkung deutlich mehr von Sekundärströmungen und Rezirkulationszonen geprägt ist als die Durchströmung von Becken, die gerade durchströmt werden. Insbesondere im Anschluss an die Kurvenbereiche entstehen Rezirkulationszonen, die den Fließquerschnitt einschnüren und so gleichzeitig erhöhte Geschwindigkeiten in den Randbereichen zur Folge haben. Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Varianten nehmen die Rezirkulationen einen recht großen Teil des Fließquerschnitts ein. Ferner kann eine Tendenz zur spiralförmigen Strömungsentwicklung festgestellt werden. Im Laufe des Fließweges findet trotzdem eine zunehmende Vergleichmäßigung der Geschwindigkeiten über den Fließquerschnitt statt.

5.4.5 Variante V3: Sohlgestaltung

Es wird erwartet, dass sich in den Trichtern (siehe Kapitel 5.2.1.5) ein strömungsberuhigter Bereich bildet, in dem sich die sedimentierten Partikel absetzen. Auf Grund dieser strömungstechnischen Abkopplung der Schlammsammelräume vom Sedimentationsbereich soll die Gefahr der Resuspension von Partikeln stark gemindert sein.

Da sich das Durchströmungsverhalten der beiden untersuchten Oberflächenbeschickungen grundsätzlich ähneln, können sie auch hier gemeinsam besprochen werden. Zunächst werden dazu Isolinien der Geschwindigkeiten in x-Richtung als Querschnitte sowie die Grundrisse inklusive der Stromlinien herangezogen (Bild 5.23).

Grundsätzlich lassen sich einige wichtige Charakteristika der Durchströmung der Variante V2 Fließwegführung wiederfinden. Auch hier erfolgt eine ungleichmäßige Aufteilung der Geschwindigkeiten über den Fließquerschnitt im Anschluss an die Einlaufkonstruktion. Auch werden auf Grund der erhöhten Geschwindigkeiten in den Kurvenaußenbereichen auf der stromabgewandten Seite Rezirkulationszonen gefördert. Außerdem kann man über den gesamten Fließweg eine Vergleichmäßigung der Geschwindigkeitsverteilung über den Fließquerschnitt beobachten.

Der maßgebliche Unterschied besteht allerdings in dem allgemein unruhigeren Strömungsbild. Im gesamten Becken bilden sich wellenartige Fließstrukturen aus. Insbesondere in der tieferen Höhenlage sind darüber hinaus immer wieder kleinere Wirbelstrukturen zu beobachten. Bis zum Ende des Fließweges kommt es nicht zu einer Beruhigung der Strömung. Eine Grundwalze, wie sie als Folge der Einlaufkonstruktion sonst zu beobachten war, ist hier nicht zu erkennen. Dies lässt sich in allen aufgeführten Visualisierungen beobachtet. An vielen Stellen sind turbulente Strukturen erkennbar, die in dieser Form in der Variante V2 Fließwegführung nicht zu sehen waren. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Trichter diese maßgebliche Veränderung der Durchströmung mit sich bringen.

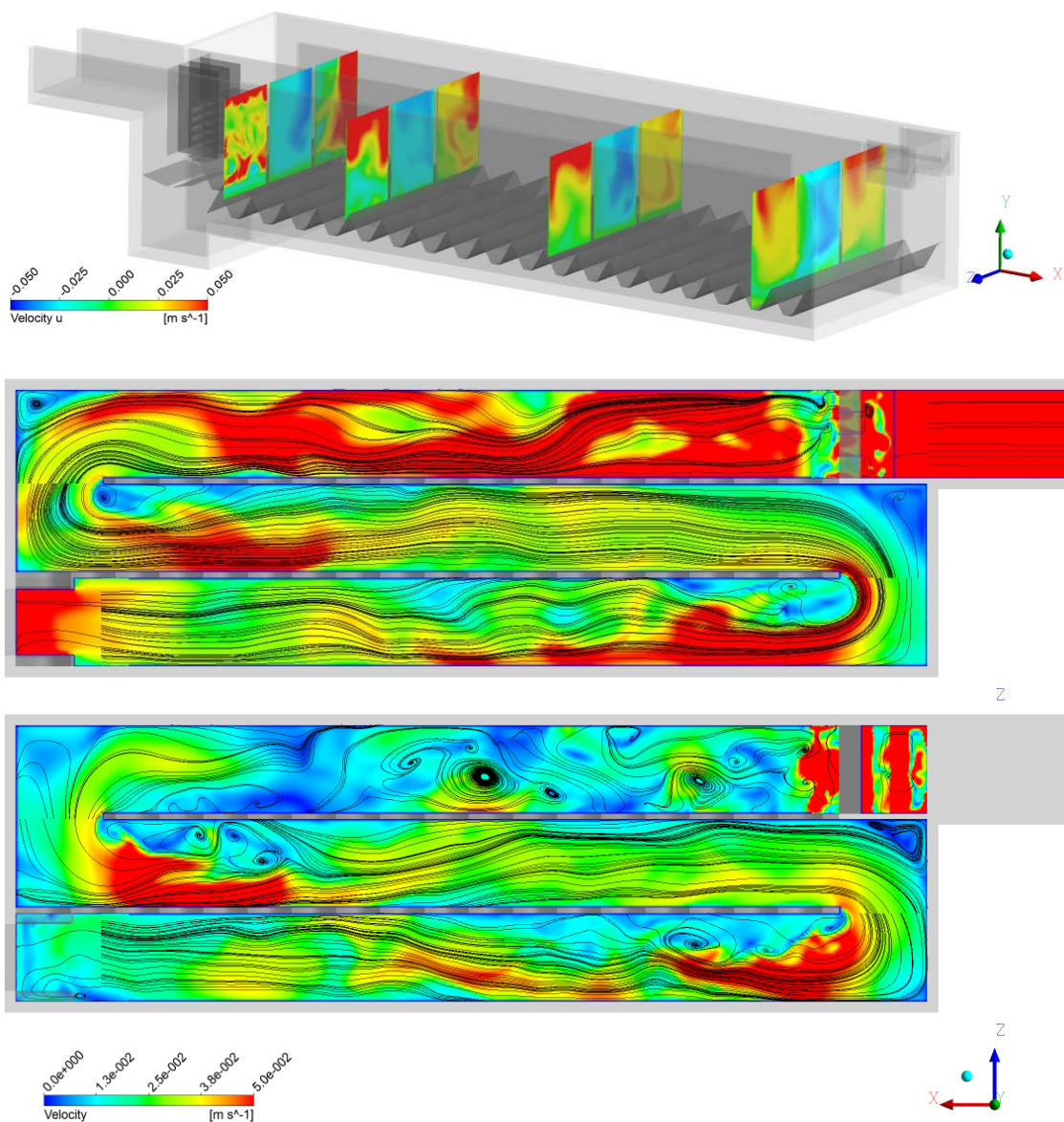


Bild 5.23: Variante V3; oben: Isolinen-Querschnitte der Geschwindigkeit in x-Richtung für $q_A = 4$ m/h; Mitte/untern: Isolinen der resultierenden Geschwindigkeiten $q_A = 4$ m/h; oben: Schnitt 0,05 m über Gerinneeinlauf-Sohle, unten: Schnitt 0,50 m über Beckensohle

Betrachtet man die Stromlinien in der isometrischen 3D-Ansicht (Bild 5.24), sind im Vergleich zur Variante V2 Fließwegführung nicht die dort beobachteten drehenden Fließbewegungen zu erkennen. Zwar sind an vielen Stellen im Becken kleinere Wirbelstrukturen vorhanden, wie auch mithilfe der Stromlinien gut zu erkennen ist, jedoch kommt es in nur sehr geringem Maße zu Vermischungsvorgängen der oberen und unteren Höhenlagen.

Da in der 3D-Ansicht kein guter Eindruck von den Fließverhältnissen innerhalb der Trichterkonstruktion gewonnen werden kann, wird in Bild 5.25 eine Detailansicht inklusive der Darstellung der Stromlinien gegeben. Wie bereits erläutert wird erwartet, dass die Trichter als strömungsberuhigte, vom Hauptstrom abgekoppelte Bereiche fungieren, in denen sich Partikel absetzen können und wo die Gefahr der Resuspension gemindert ist. Entsprechend der Darstellung in Bild 5.25 wird ebendiese Annahme widerlegt. Deutlich ist zu erkennen, wie sich die Strömung in die Trichterkonstruktionen hineinbewegt, innerhalb des Trichters rezirkuliert und wieder austritt. Dies ist in allen Trichtern zu beobachten, so dass sich eine Art „Kugellager“ bildet, das die eigentlich abgekoppelten Bereiche komplett ausfüllt und sich entlang des Fließwegs fortbewegt. Für die Sedimentation der Feststoffphase bedeutet dies, dass die Partikel je nach Fließgeschwindigkeiten und resultierenden Schubspannungen immer wieder aus den Trichtern herausgetragen werden und möglicherweise daraus eine schlechte Rückhalteleistung dieses Beckens entsteht. Fraglich ist, inwiefern sich das Fließbild ändern würde, wenn die Simulation entsprechend der tatsächlichen Ausführung die Öffnung der Trichter nach unten beinhalten würde. Auf Grund der generellen geometrischen Struktur der Konstruktion, wird es allerdings als eher unwahrscheinlich bewertet, dass sich das grundsätzliche Verhalten – Bildung eines fortschreitenden „Kugellagers“ über die Trichter – verändern würde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die Variante V3 mit veränderter Sohlgestaltung durch Trichterkonstruktionen, Ähnlichkeiten zur V2 Fließwegführung wiederzufinden sind. Insgesamt sind die durchschnittlichen Geschwindigkeiten auf Grund des kleineren Fließquerschnitts erhöht. In den Kurvenbereichen bilden sich Rezirkulationszonen, die den Fließquerschnitt zusätzlich einschnüren und an anderer Stelle erhöhte Geschwindigkeiten fördern. Drehende Fließbewegungen, wie sie bei der Variante V2 zu beobachten sind, ergeben sich nicht. Vielmehr entwickelt sich eine wellenartige Strömung mit vielen kleineren Wirbelstrukturen, die als insgesamt diffuser und turbulenter zu beschreiben ist. Die genauere Betrachtung der Trichterkonstruktionen ergibt, dass sich entgegen der Erwartungen in allen Trichtern drehende Fließstrukturen bilden, die sich wie ein „Kugellager“ entlang des Fließwegs bewegen und die Trichter und die darin enthaltenden Partikel immer wieder aushöhlen. Fraglich ist aus diesem Grund, inwiefern die Rückhalteleistung dieser Beckenkonstruktion sogar gehemmt ist.

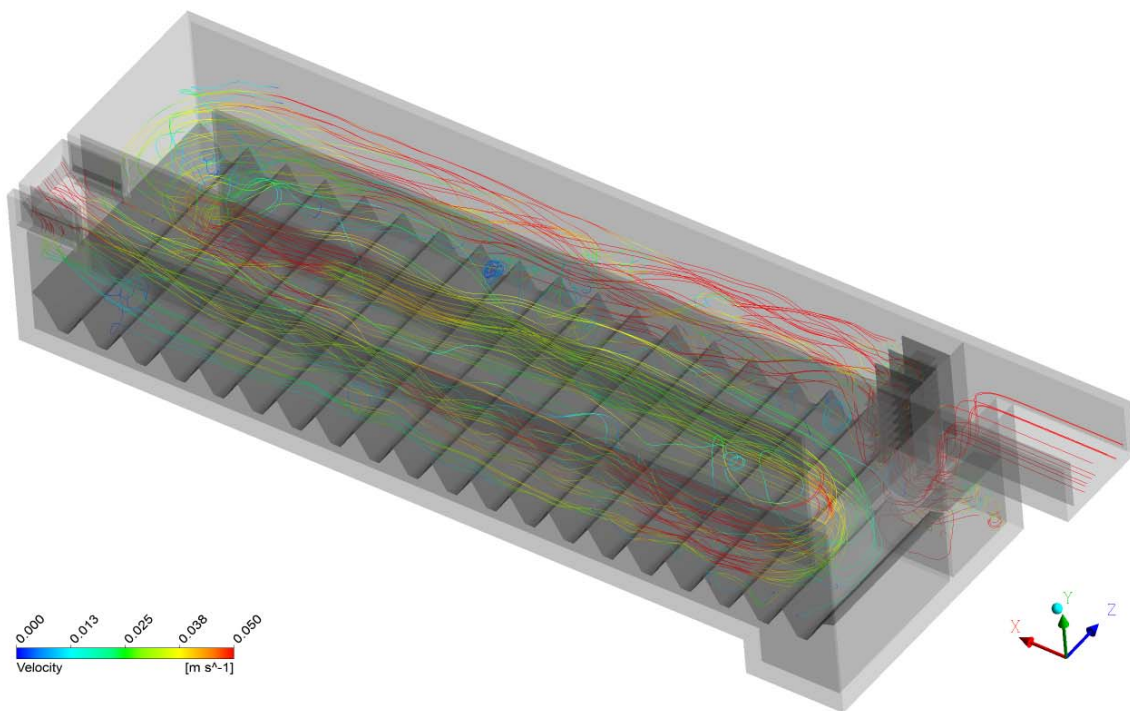


Bild 5.24: Variante V3; Stromlinien der Geschwindigkeiten $q_A = 4 \text{ m/h}$; 3D-Ansicht „rechts“

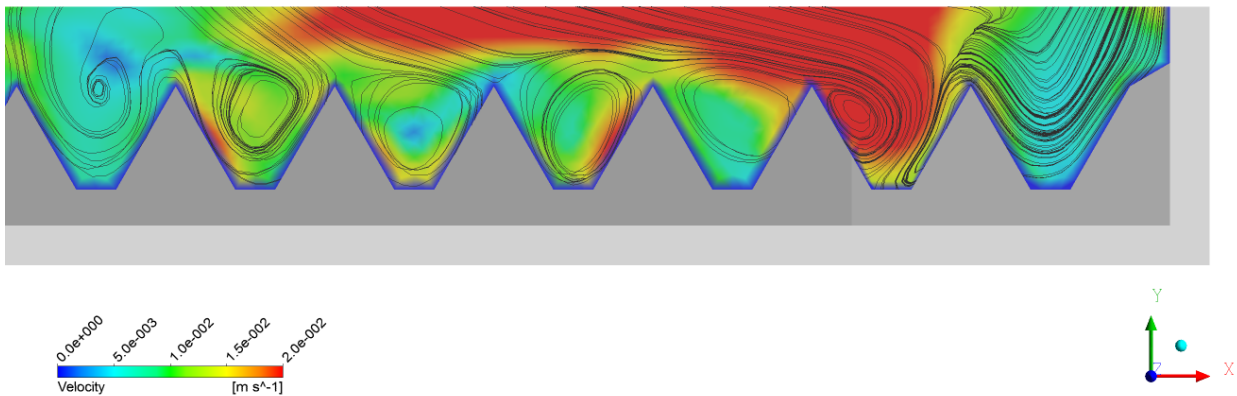


Bild 5.25: Variante V3; Detailansicht der Trichterkonstruktion für $q_A = 4 \text{ m/h}$ - Konturplot der resultierenden Geschwindigkeit mit Stromlinien

5.4.6 Auswertung der Wirkungsgrade

Die Auswertung der Sedimentations-Wirkungsgrade erfolgt auf Grundlage der in Kapitel 4.2 erläuterten UDF (User Defined Function). Die daraus resultierenden Partikel-Wirkungsgrade sind in den folgenden Diagrammen dargestellt. Aufgezeigt werden die Ergebnisse für die verschiedenen Varianten für eine Oberflächenbeschickung $q_A = 10 \text{ m/h}$. Die Diagramme bauen auf die Hazen-Zahl auf, weshalb die nach Hazen-Theorie theoretisch mögliche Rückhalteleistung in grauer Farbe hinterlegt ist. Demnach müssten sich Partikel mit einer Hazen-

Zahl $Ha > 1$ komplett im Becken absetzen. Bei einer Hazen-Zahl von 0,5 müssten 50 % Rückhalteleistung erbracht werden usw. Es sind die Werte bis zu einer Hazen-Zahl von 4 dargestellt. Auch wenn noch größere Partikel analysiert wurden, können in diesem Wertebereich alle entscheidenden Beobachtungen gemacht werden. Als Sekundärachse werden, zusätzlich zu den Hazen-Zahlen, am oberen Rand des Diagramms als zusätzliche x-Achse die zugehörigen Korngrößen aufgetragen. (Bild 5.27).

Für die Auswertung der Wirkungsgrade der „*worst-case*“ Variante ist im folgenden Diagramm Bild 5.26 zu sehen, dass die Partikelwirkungsgrade der feinsten Fraktion nahe des theoretisch errechneten Wirkungsgrades nach Hazen sind. Partikel ab 40 μm jedoch weichen deutlich vom theoretisch maximal möglichen Wirkungsgrad ab, sodass selbst ein Partikel mit einem Durchmesser von 100 μm lediglich 42 % erreicht.

Die **Grundvariante V0** weist für die mineralische Fraktion bis zu einer Partikelgröße von etwa 15 μm ($Ha \leq 0,25$) die besten Wirkungsgrade aller Varianten (bis zu 45 %) auf. Bei höheren Hazen-Zahlen verläuft sie eher flach, so dass sie ab einer Hazen Zahl $Ha = 1,25$ die geringsten Wirkungsgrade aller Varianten mit sich bringt. Ganz ähnlich verhalten sich die Wirkungsgrade für die organische Fraktion.

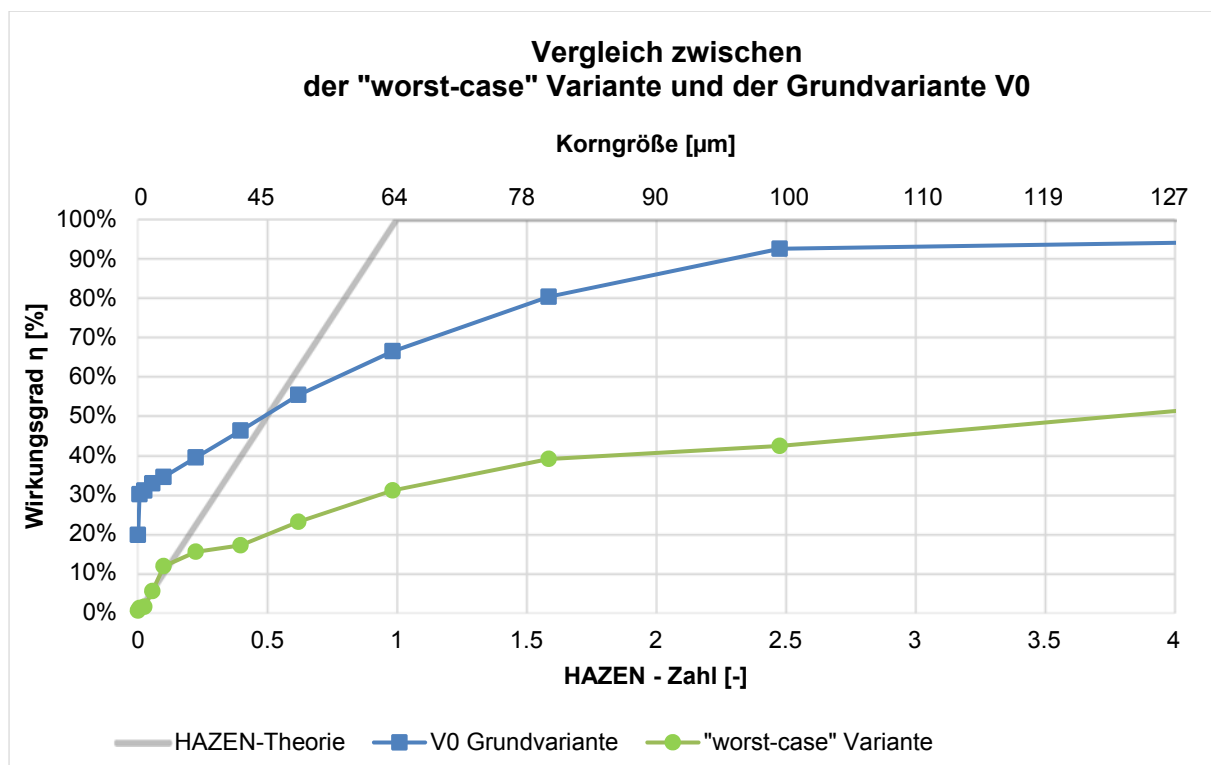


Bild 5.26: Partikelwirkungsgrade für $q_A = 10 \text{ m/h}$

Die **Variante V1 Einlaufgestaltung**, die mit einem Diffusor ausgestattet wurde, zeigt bei der mineralischen Fraktion für die Partikel 15 μm zunächst ähnlich gute Partikel-Wirkungsgrade, wie die Grundvariante. Danach zeigt sie mit bis zu 10 % Abstand zu allen anderen Varianten über eine große Bandbreite von Partikel-Durchmessern das beste Rückhaltevermögen. Etwas anders sieht die Entwicklung bei der organischen Fraktion aus. Zwar können ab einer Hazen-Zahl von 0,5 auch hier die besten Wirkungsgrade beobachtet werden, allerdings sind diese im Bereich $H_a < 0,5$ um bis zu 10 % schlechter, als bei der Grundvariante.

Die Partikel-Rückhalteleistungen der **Variante V2** befinden sich durchweg im Mittelfeld. Die positive Wirkung auf kleine Partikel fällt bei der organischen Fraktion noch etwas geringer aus, als bei der Variante V1. Gleichzeitig steigen die Wirkungsgrade auch nur gemäßigt, so dass sie sich ab einer Hazen-Zahl $H_a = 1,5$ für beide Fraktionen etwa im Bereich der Variante V3 befinden.

Im weiteren Vergleich der Varianten weist die **Variante V3** mit den Trichterkonstruktionen insgesamt die schlechtesten Rückhalteleistungen auf. Dies wird im Besonderen bei den kleineren Partikeln deutlich, bei denen ein Abstand von bis zu 10 % zu den anderen Partikeln zu erkennen ist.

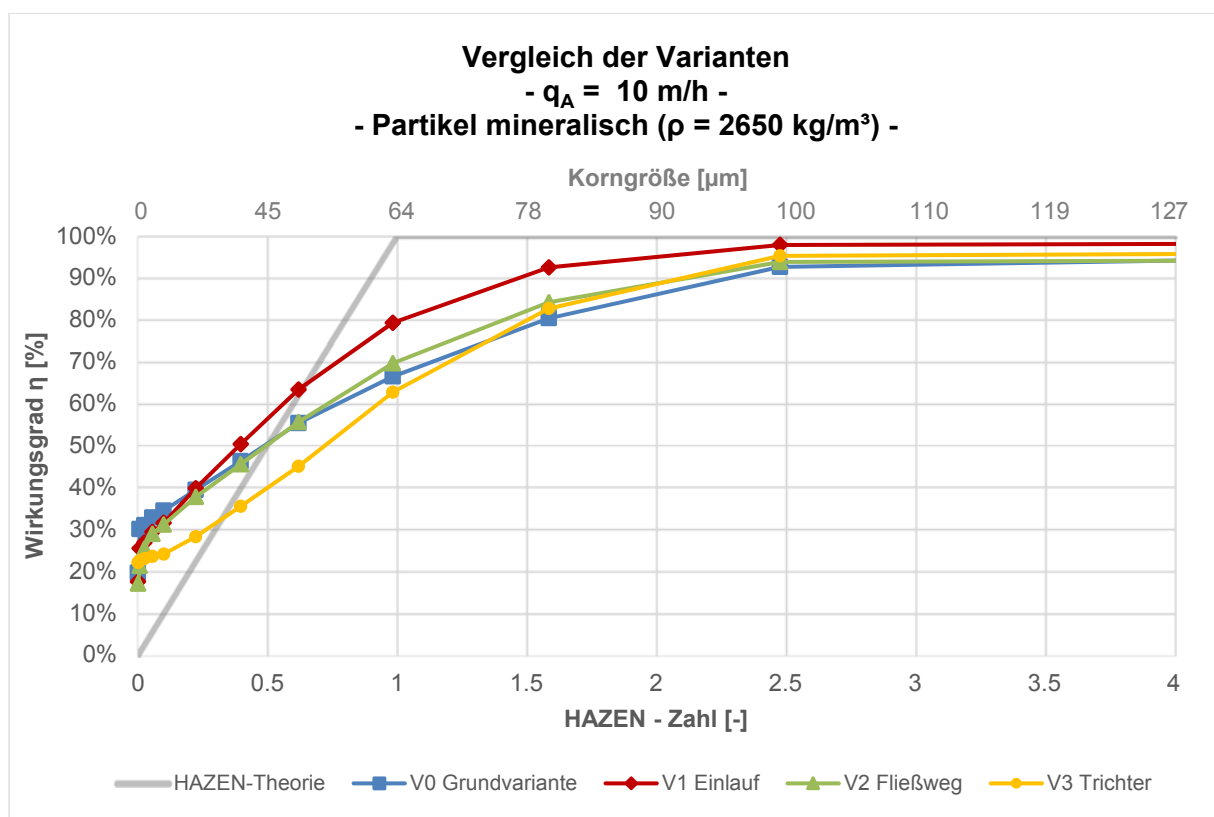


Bild 5.27: Partikel-Wirkungsgrade für $q_A = 10 \text{ m/h}$ - Partikel mineralisch ($\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$)

Auffällig ist, dass alle Varianten bei einer Hazen-Zahl $Ha < 0,4-0,6$ für beide Fraktionen bessere Wirkungsgrade, als sie nach Hazen-Theorie für eine Pfropfenströmung erwartet werden, anzeigen. Dagegen wird bei den größeren Partikeln $Ha > 0,4-0,6$ der zu erwartende Wirkungsgrad nicht erreicht. Dieser Effekt ist bei der Grundvariante am deutlichsten zu erkennen, bei der Variante V3 dagegen am wenigsten. Für die beiden Varianten V1 und V2 nimmt der Abstand zur Hazen-Theorie für organische Partikel etwas ab, ist allerdings noch besser, als bei der Variante V3. Folglich muss innerhalb der Durchströmungscharakteristik der Grundvariante ein Mechanismus gegeben sein, der bei den Varianten V1 bis V3 nur abgeschwächt oder gar nicht vorhanden ist und durch den sich insbesondere kleinere Partikel gut abscheiden lassen. Bei einer Reduktion der hydraulischen Belastung von $q_A = 10$ m/h auf lediglich $q_A = 4$ m/h stellen sich die Partikelwirkungsgrade wie folgt da.

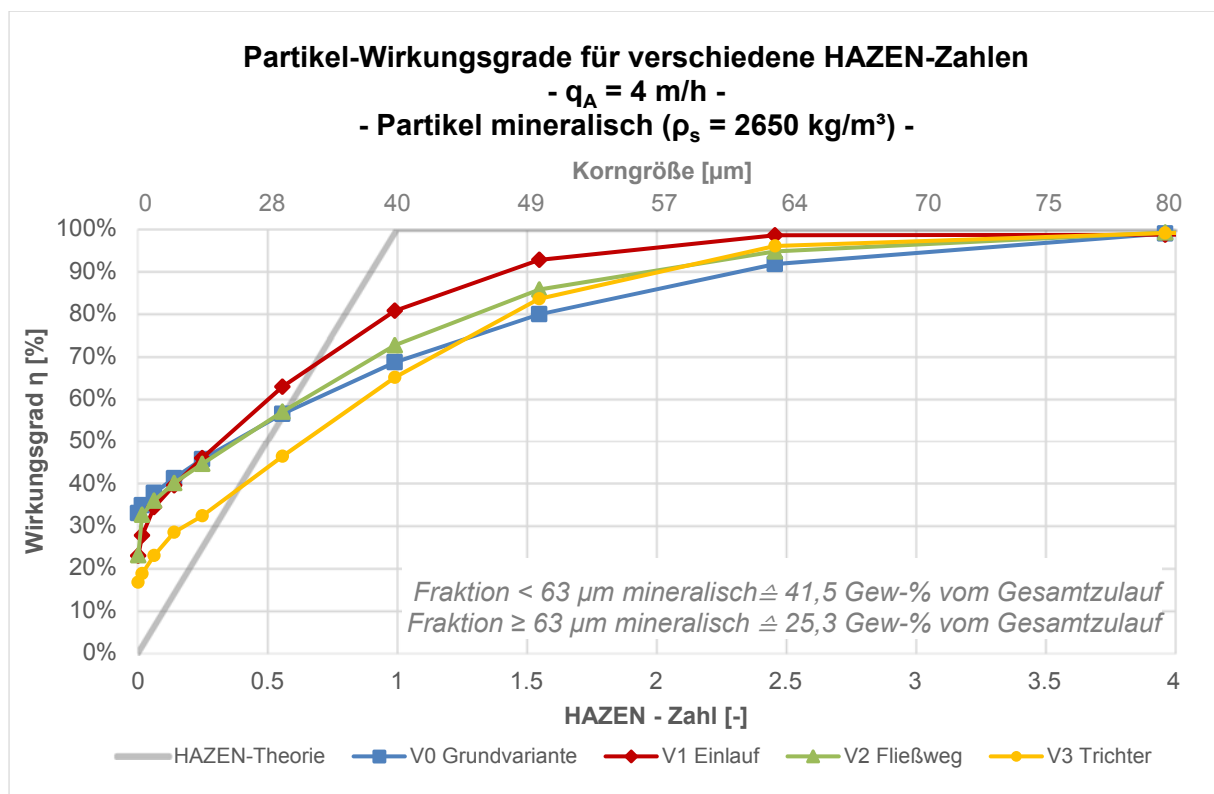


Bild 5.28: Partikel-Wirkungsgrade für $q_A = 4$ m/h - Partikel mineralisch ($\rho_s = 2650$ kg/m³)

Bei einem Vergleich der beiden Hazen-Diagramme (Bild 5.27 und Bild 5.28) wird ersichtlich, dass der Verlauf der Grafen nahezu identisch ist. So auch der Schnittpunkt der Grafen, der bei einer hydraulischen Belastung von $q_A = 4$ m/h bei Hazen-Zahlen zwischen 0,4 und 0,6 liegt. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass die zugehörigen tatsächlichen Partikeldurchmesser bei einer Hazen-Zahl von 0,5 von 45 µm bei einer Oberflächenbeschickung $q_A = 10$ m/h zu einem Durchmesser von 28 µm bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 4$ m/h sich ändern.

In Bild 5.29 sind zur weiteren Auswertung die Gesamt- sowie die Fraktionswirkungsgrade dargestellt. Demnach weisen die Grundvariante V0 sowie die Variante V1 die besten Wirkungsgrade auf. Sie liegen in beiden Fällen nur leicht auseinander: Bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 4$ m/h ist die Grundvariante mit 60,1 % um 0,1 % effektiver als die optimierte Einlaufkonstruktion. Bei der höheren Oberflächenbeschickung von $q_A = 10$ m/h dagegen übersteigt die Variante V1 mit 47,3 % den Wirkungsgrad der Grundvariante um 0,7 %. Zwar sind in den vorherigen Diagrammen stets deutliche Unterschiede zwischen den beiden Konstruktionen ersichtlich, jedoch wird durch die massengewichtete Auswertung dieser Unterschied wieder relativiert, da sich die unterschiedlichen Wirkungsgrade mit den entsprechenden Masseanteilen wieder gegenseitig aufheben.

Die schlechtesten Wirkungsgrade sind wie bereits erwartet bei der Variante V3 zu beobachten. Sie kann lediglich 39,7 % der AFS-Gesamtfraktion aus dem Niederschlagswasser entfernen und zeigt damit um 8 % geringere Sedimentations-Wirkungsgrade, als V0 und V1.

Die Variante V2 liegt mit 57,1 % für $q_A = 4$ m/h bzw. 41,4 % für $q_A = 10$ m/h zwischen den anderen Konfigurationen. Auffällig ist hier, dass sie bei der höheren Oberflächenbeschickung $q_A = 10$ m/h für alle Fraktionen deutlich schlechter zu bewerten ist als bei $q_A = 4$ m/h. Da in der Analyse der Durchströmungscharakteristik keine maßgeblichen Unterschiede zwischen den beiden Zuflüssen zu erkennen sind, wird an dieser Stelle gefolgert, dass die schlechte Wirkung auf die erhöhten Geschwindigkeiten zurückzuführen ist, die sich auf Grund des kleinen Fließquerschnitts ergeben. Rückschlüsse auf Wirkmechanismen besonderer Fließphänomene können hier nicht gezogen werden.

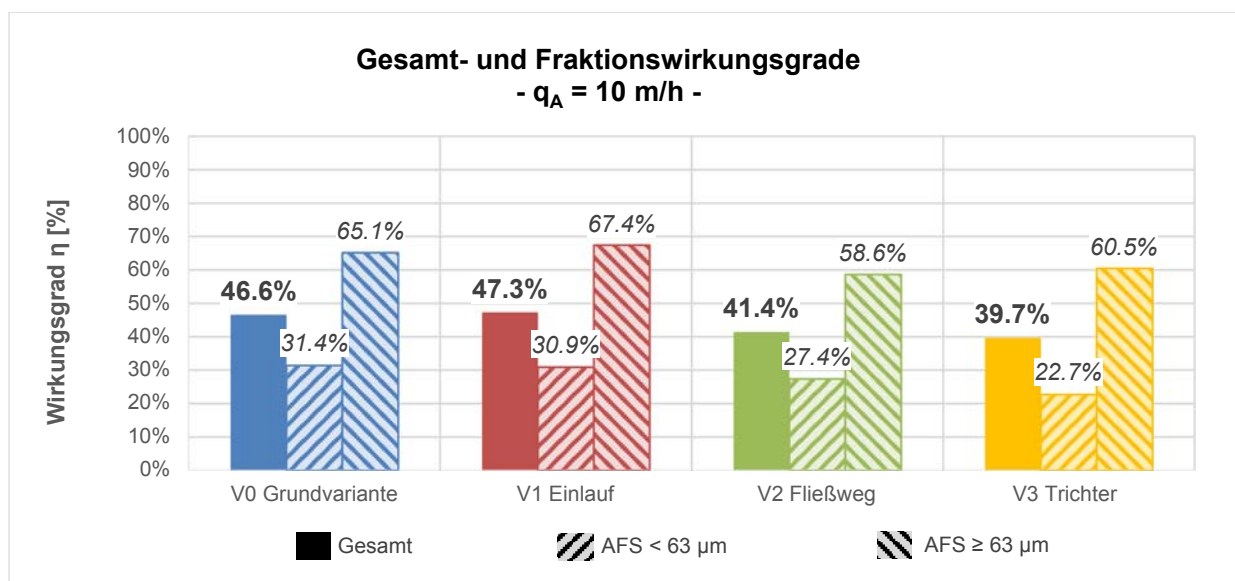


Bild 5.29: Gesamt- und Fraktionswirkungsgrade der verschiedenen Varianten für $q_A = 10$ m/h. Auch hier wird im direkten Vergleich der Fraktionswirkungsgrade zwischen der Oberflä-

chenbeschickung von $q_A = 10 \text{ m/h}$ und $q_A = 4 \text{ m/h}$ ersichtlich, dass grundsätzlich die Wirkungsgrade ähnlich in Relation zu einander sind. Jedoch ist von einer Wirkungsgradsteigerung der gesamten Sieblinie um rund 13 %-Punkte und einer Steigerung von sogar rund 16 %-Punkte bei den feinen Anteilen der Sieblinie zu erkennen.

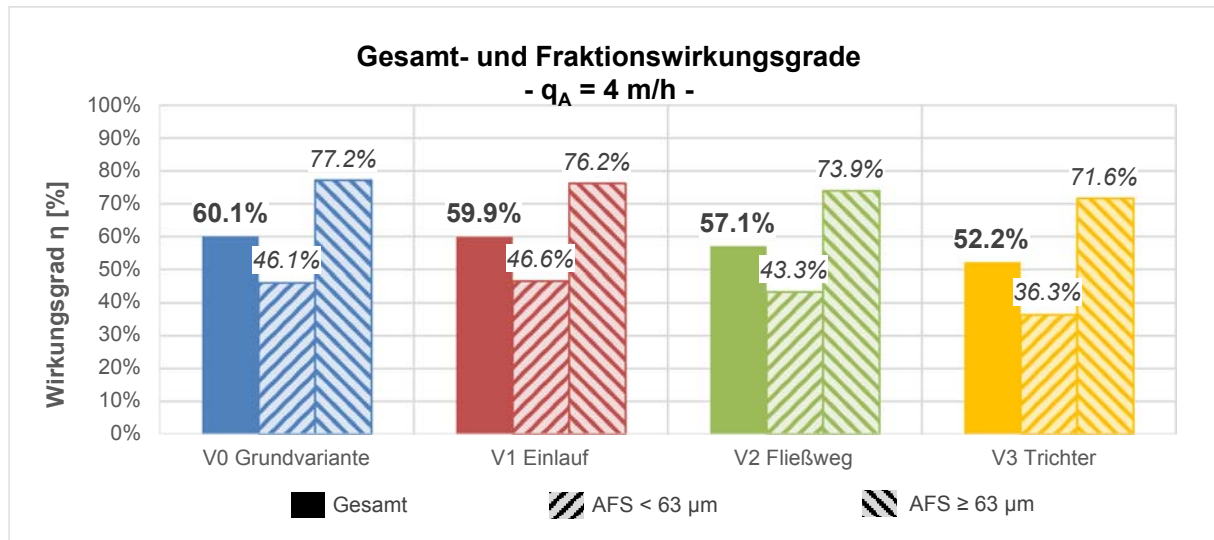


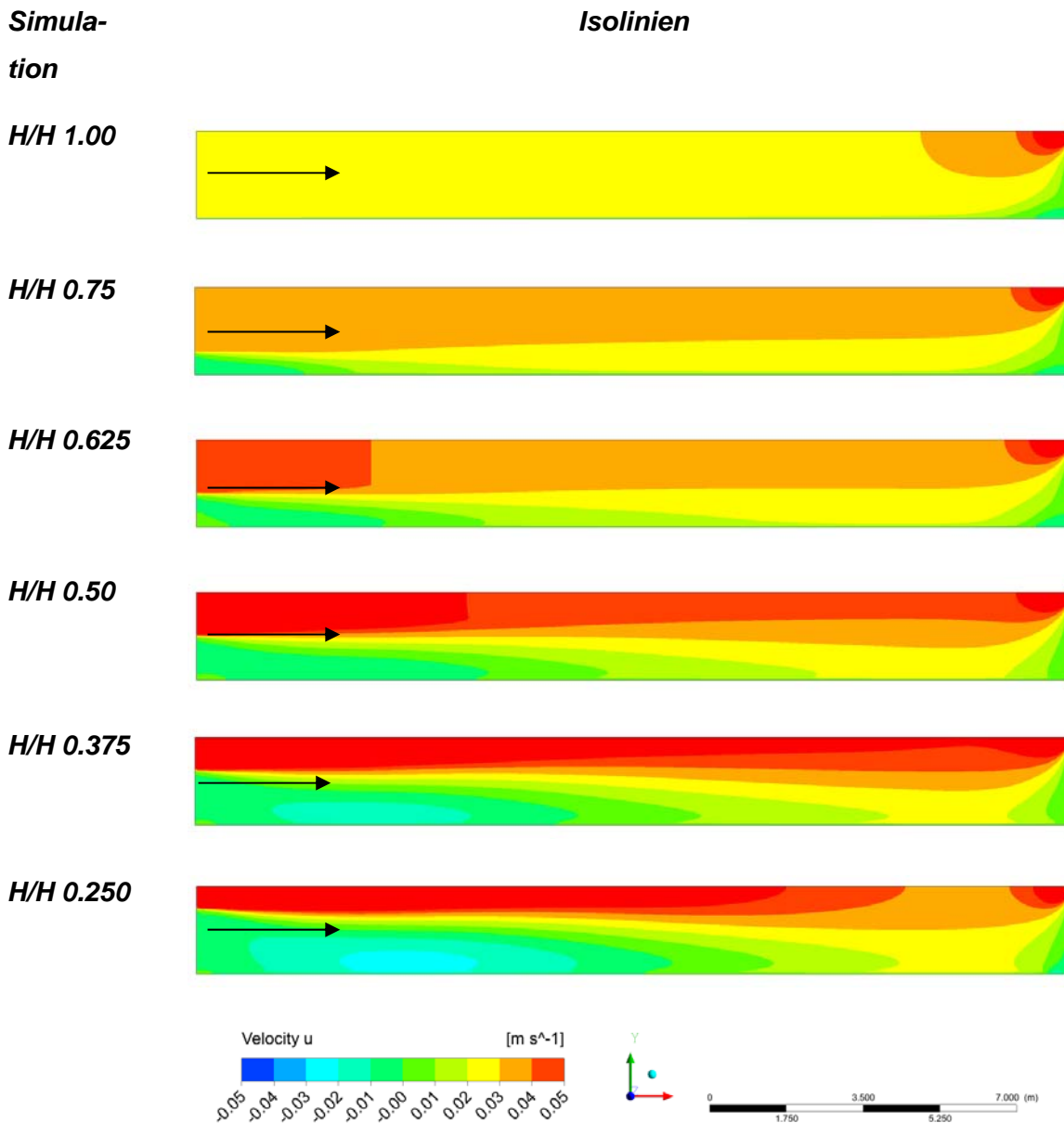
Bild 5.30: Gesamt- und Fraktionswirkungsgrade der verschiedenen Varianten für $q_A = 4 \text{ m/h}$

5.4.7 Idealisierte Ein- und Auslauftrandbedingungen

Zur Untersuchung der idealen Einlauftrandbedingung erfolgte die Betrachtung des Zulaufhöhenverhältnisses.

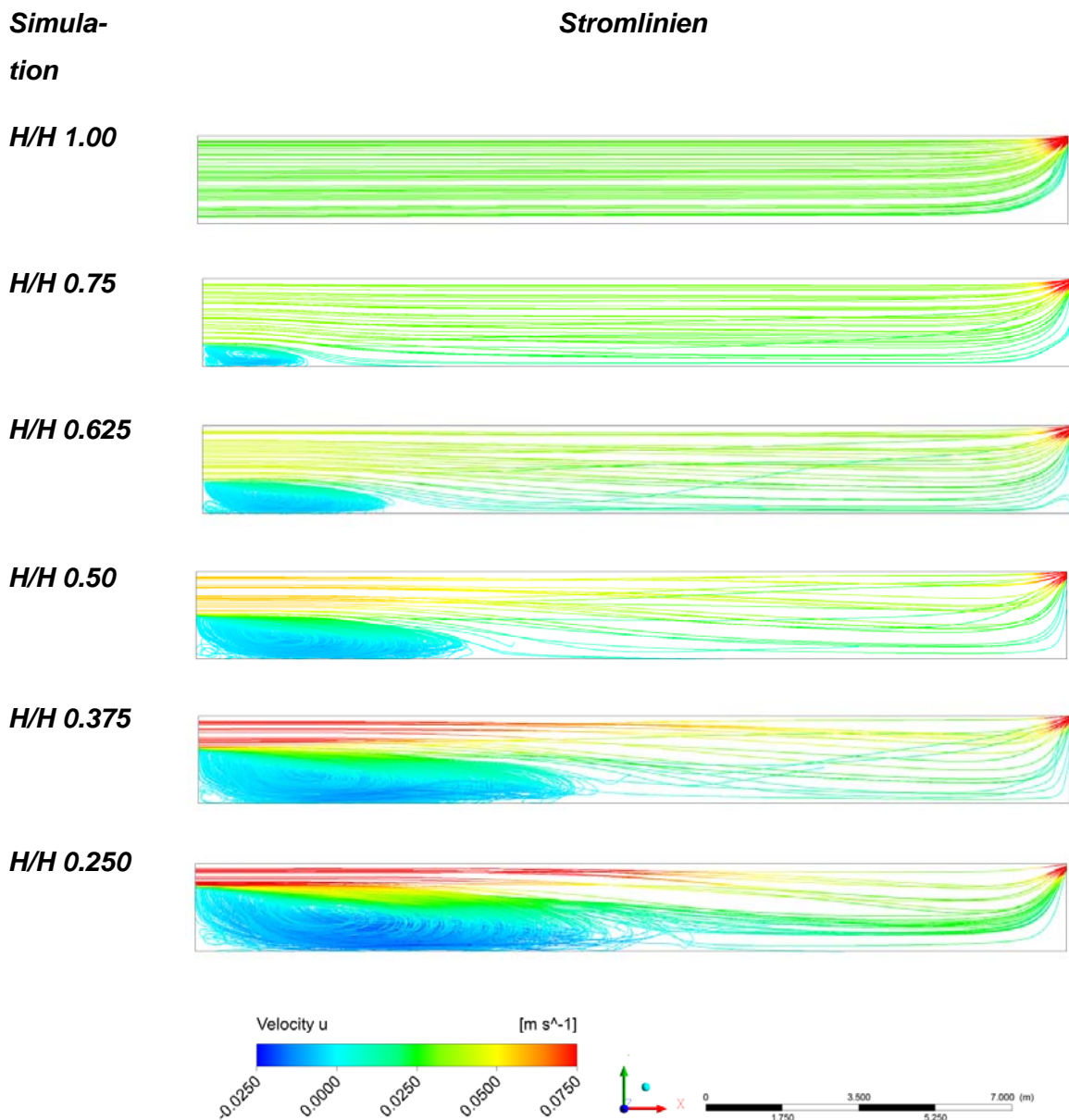
Annahme dieser Untersuchung ist, dass der Einfluss des Zulaufhöhenverhältnisses und der Einfluss der daraus resultierenden Grundwalze das Sedimentationsverhalten von bestimmten Partikelfraktionen positiv beeinflusst. Die Untersuchungen finden statt an einem Becken mit einem L/B Verhältnis von 4.44 bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 10 \text{ m/h}$. In einem ersten Schritt (Tabelle 5-11) sind die Geschwindigkeiten in Fließrichtung in einer *Isolinie* auf der vertikalen Symmetrieebene mittig im Becken dargestellt. Hierbei sind die Geschwindigkeiten $v_U = -0.05 \text{ m/s}$ in Blau und $v_U = 0.05 \text{ m/s}$ in Rot visualisiert. Eine logische Schlussfolgerung ist, dass bei einer geringer werdenden Einlaufhöhe die Geschwindigkeiten im Einlauf steigen. Bei der $H/H = 1.0$ -Variante findet die Anströmung über die gesamte Höhe gleichverteilt mit einer Geschwindigkeit von $v_U = 0.028 \text{ m/s}$ statt. Die Strömungsmuster der *Isolinien* fallen für die Varianten $H/H = 1.0$ bis $H/H = 0.375$ wie erwartet aus, jedoch ist bei $H/H = 0.250$ eine Unterbrechung der höchsten Geschwindigkeiten im obersten Bereich – einer möglichen Kurzschlussströmung – zu sehen. Der Rückgang des zufließenden, durch hohe Geschwindigkeiten charakterisierten, durchgehenden Strahls ist verwunderlich.

Tabelle 5-11: Simulationen der H/H Untersuchung mit der Darstellung der *Isolinien* der Geschwindigkeiten in Fließrichtung in der Mitte des Beckens



Zum weiteren Verständnis der Durchströmungscharakteristiken dienen die *Stromlinien* (Tabelle 5-12), dargestellt für eine hydraulische Belastung der Becken von $q_A = 10 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Farbe der Stromlinien wird durch die Geschwindigkeit in Fließrichtung v_U bestimmt. Sie verlaufen von blau $v_U = -0.025 \text{ m/s}$ bis rot $v_U = 0.075 \text{ m/s}$. Zu erkennen ist, dass die Größe der Grundwalze durch das Zulaufhöhenverhältnis bestimmt wird. Zudem wird deutlich, dass die Länge und Höhe der Rezirkulationszone offenbar in einem festen Verhältnis zueinanderstehen. Zudem steigen mit zunehmender Größe der Rezirkulationszone die rückläufigen Geschwindigkeiten v_U in der unteren Hälfte der Grundwalze an.

Tabelle 5-12: Simulationen der H/H Untersuchung mit der Darstellung der *Stromlinien* eingefärbt mit den Geschwindigkeitskomponenten in Fließrichtung



Als zusätzliche Auswertung werden auch hier die Wirkungsgrade der zurückgehaltenen Partikelfraktionen untersucht. Eine erste Übersicht der Ergebnisse bietet, ein Hazen-Diagramm (Bild 5.31) in dem die Wirkungsgrade aller Partikel einzeln eingetragen werden. Auf der horizontalen Primärachse sind die Partikel dimensionslos mit Hilfe der Hazen-Zahl aufgetragen, die sekundäre X-Achse stellt die zugehörigen Durchmesser der Partikel dar. Die unterschiedlichen Zulaufhöhenverhältnisse sind in blauen und grünen Linien dargestellt. Diese sind von hellblau H/H 0.25 bis dunkelblau H/H 0.75, farblich abgestuft. Evident wird, dass je schmäler die Zulaufhöhe ist, die Wirkungsgrade der feineren Fraktionen deutlich steigen. Das konträre Verhalten der Partikelwirkungsgrade spiegelt sich um den Punkt bei einer Hazen-Zahl von

rund $Ha = 0.75$ und ist sehr diffuser und dadurch schwer zu identifizieren. Eine Verbesserung der Wirkungsgrade der feineren Partikel kann bis zu 20 % betragen. Dahingegen ist eine Verschlechterung der gröberen Partikelfraktion von nur rund 16 % zu verzeichnen.

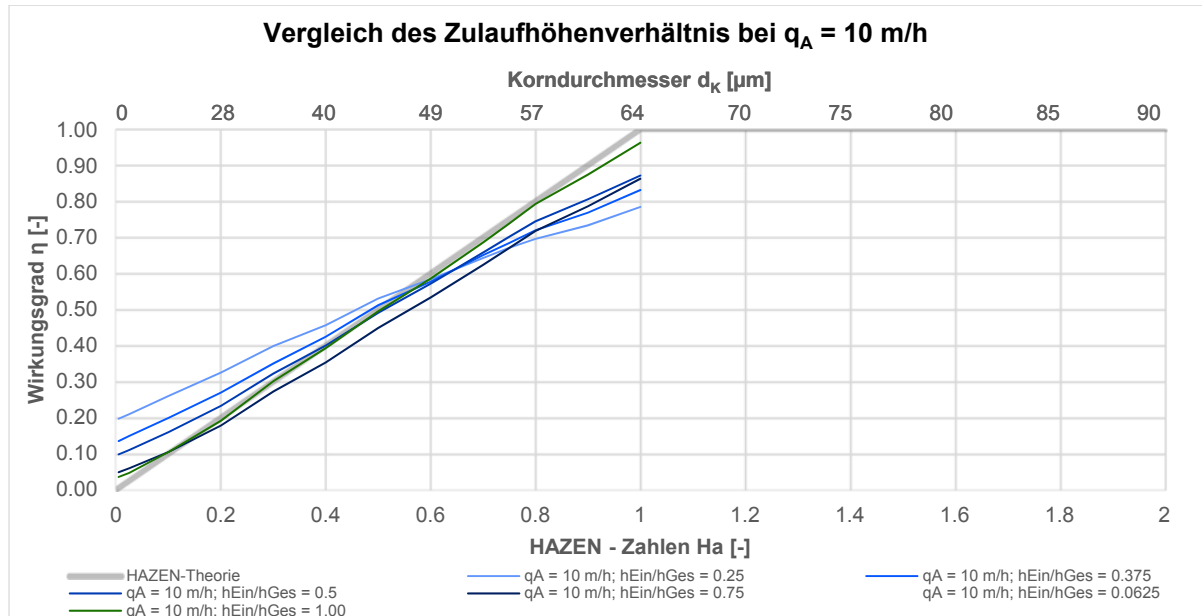


Bild 5.31: Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Zulaufhöhenverhältnisse für $q_A = 10 \text{ m/h}$

Auch hier der direkte Vergleich zwischen den Partikelwirkungsgraden bei einer Belastung von $q_A = 10 \text{ m/h}$ (Bild 5.31) und $q_A = 4 \text{ m/h}$ (Bild 5.32). Der Umschlagpunkt des konträren Verhaltens der Partikel liegt in beiden Fällen bei einer Hazen-Zahl von rund 0,6. Jedoch ist auch hier darauf zu verweisen, dass dies bei $q_A = 10 \text{ m/h}$ mineralische Partikel mit einem Korndurchmesser von 49 μm sind. Bei einer Oberflächenbeschickung von lediglich $q_A = 4 \text{ m/h}$ hingegen nur 31 μm .

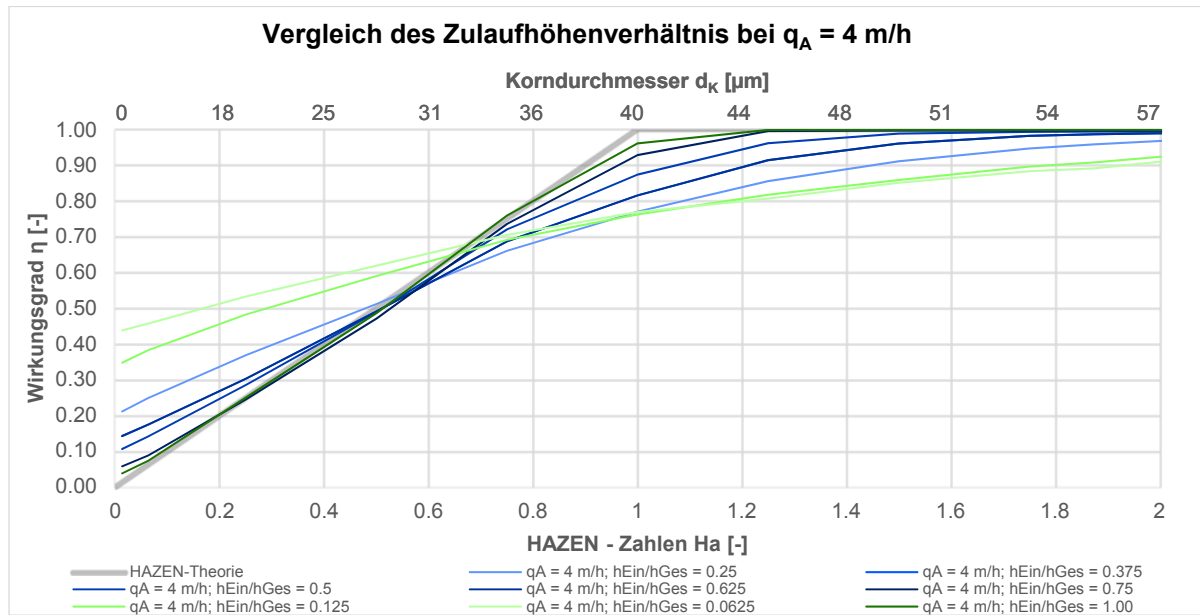


Bild 5.32: Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Zulaufhöhenverhältnisse für $q_A = 4 \text{ m/h}$

Neben der Auswertung des Hazen-Diagramms wurde der Einfluss der Oberflächenbeschickung auf ausgewählte unterschiedliche Partikelwirkungsgrade untersucht. Zusehen ist hierbei die Variante $H/H = 0,25$ mit einer integrierten Grundwalze. Dabei wird ersichtlich, dass die feinen Partikel von $4 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ sich durch die Änderung der Oberflächenbeschickung in Ihren Wirkungsgraden nicht beeinflussen lassen. Die größeren Partikel hingegen reagieren sehr sensitiv auf eine zunehmende Oberflächenbeschickung. Diese wirkt sich beispielsweise bei einem Partikel von $64 \mu\text{m}$ mit einer Reduktion des Wirkungsgrades von nahezu 100 % bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 2 \text{ m/h}$ auf lediglich 67 % bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 12 \text{ m/h}$ aus.

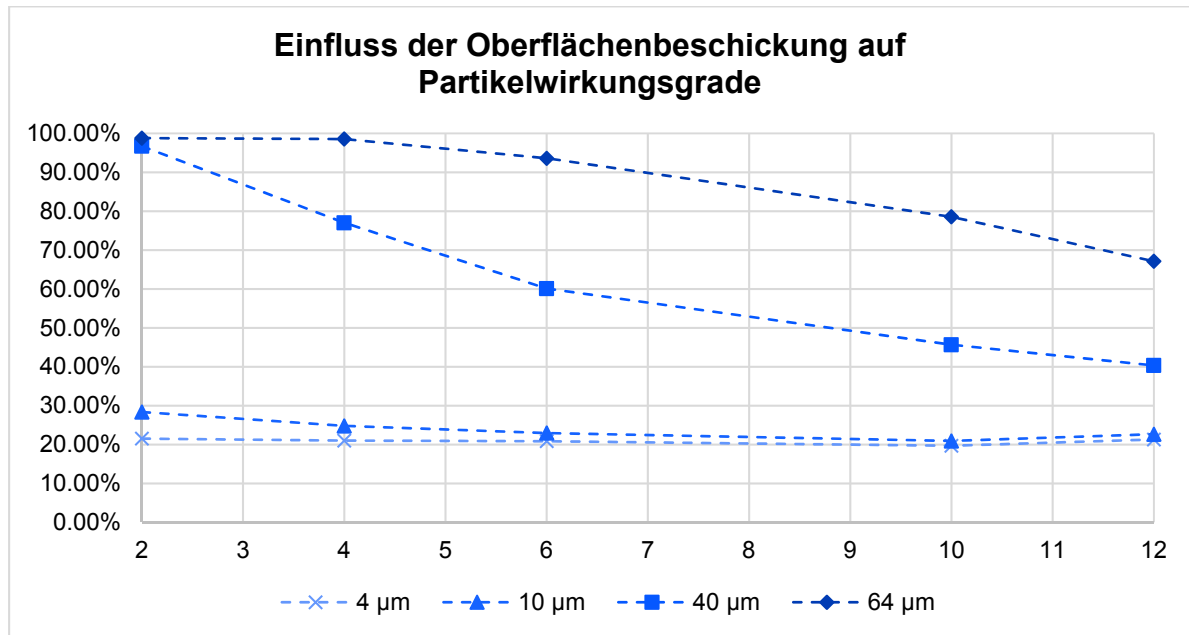


Bild 5.33: Der Einfluss verschiedener Oberflächenbeschickungen auf die Partikelwirkungsgrade

Resultat der Untersuchung

Die numerische Untersuchung des Zulaufhöhenverhältnisses zeigt deutlich, dass schmalere Zulaufhöhen insbesondere für die feinen Fraktionen der betrachteten Partikel verbesserte Wirkungsgrade aufweisen. Ausschlaggebend für das Strömungsmuster dieser Untersuchung sind die Variationen der Höhe des Zuflusses. Anhand der Höhe wird das Ausmaß der Grundwalze, als die Höhe der Grundwalze und äquivalent dazu die Länge der Grundwalze beeinflusst. Die Geschwindigkeiten im Einlaufbereich sind wie erwartet mit abnehmender Einlaufhöhe hoch, jedoch vergleichmäßigen sich die Geschwindigkeitsprofile zum Ende des Beckens nahezu vollständig. Das Verhalten der errechneten Wirkungsgrade ist vergleichbar zur vorherigen Untersuchung L/B. Demnach werden in den Verhältnissen, in denen bessere Wirkungsgrade für die feineren Fraktionen erzielt werden, für die gröberen Partikel schlechtere Wirkungsgrade erzielt. Hierbei ist jedoch zu bemerken, dass bspw. für eine Oberflächenbeschickung $q_A = 10 \text{ m/h}$ eine Verbesserung der einzelnen Partikelwirkungsgrade der feinen Fraktion um 20 % möglich ist jedoch eine Verschlechterung der gröberen Fraktionen um lediglich 16 % damit einhergeht.

5.4.8 Variation von L/B bei konstanter Tiefe

Anlass der Untersuchung ist die Annahme, dass bei verhältnismäßig langen Becken, der lange Absetzweg sich, trotz der aus dem geringer werdenden Zulaufquerschnitt resultierenden höheren Geschwindigkeiten im Zulauf, die Absetzleistung bis zu einem gewissen Optimum verbessert, da Rezirkulationen und Kurzschlussströmungen verhindert werden. Wird dieses überschritten, kann eine Verschlechterung wegen Überschreitung der kritischen Schubspannungen eintreten. Grundlage der Untersuchung sind die Beckenabmessungen des DWA-A 166 (2013).

Diese werden wie folgt deklariert:

Tabelle 5-13: Abmessungsverhältnisse nach DWA-A 166

$$6 \leq l_{DB} : h_{DB} \leq 15$$

$$3 \leq l_{DB} : b_{DB} \leq 4,5$$

$$2 \leq b_{DB} : h_{DB} \leq 4$$

Zudem wurden bewusst weitere Abmessungsverhältnisse über und unter der in dem Regelwerk vorgegeben Grenzen, untersucht.

Auf dem folgenden Bild 5.34 sind zwei der soeben beschriebenen Geometrien dargestellt. Auf der linken Seite die verhältnismäßig kürzeste Geometrie mit einem Abmessungsverhältnis von $L/B = 2,13$ und auf der rechten Seite die verhältnismäßig längste Geometrie mit einem Abmessungsverhältnis von $L/B = 10,00$. Weiterhin sind die in grau dargestellten Wände des Beckens zu erkennen und in blau sowohl der Zulauf (oben) als auch der Klärüberlauf (unten) eingefärbt. Die Fließrichtung ist hier von oben links nach unten rechts. Zum weiteren Verständnis ist bereits ein Koordinatensystem eingetragen. Hier ersichtlich verläuft die Beckenlängsrichtung in X-Richtung, die Beckenbreite ist über die Z-Koordinate aufgetragen und die Beckenhöhe wird in Y-Richtung abgebildet.

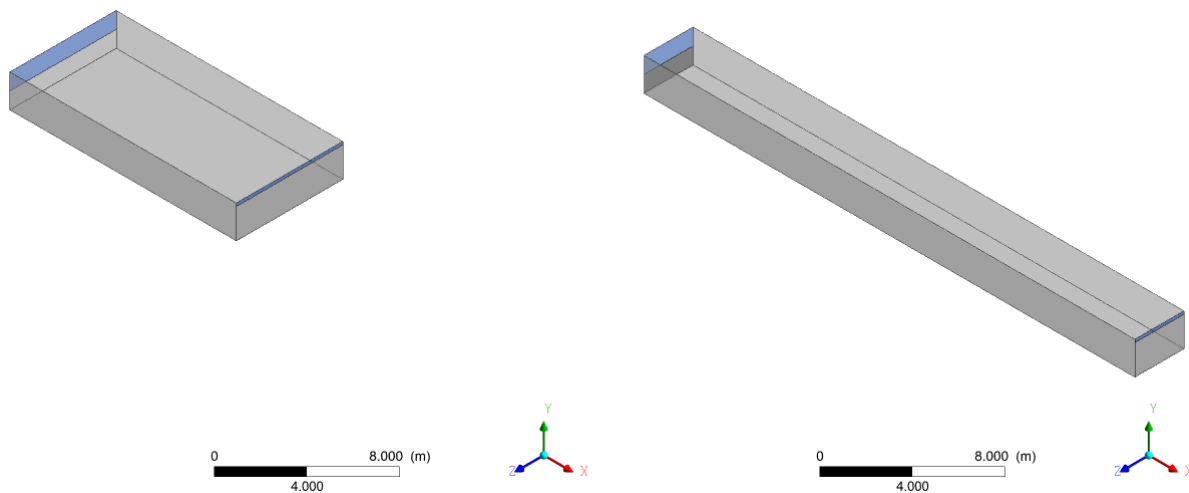
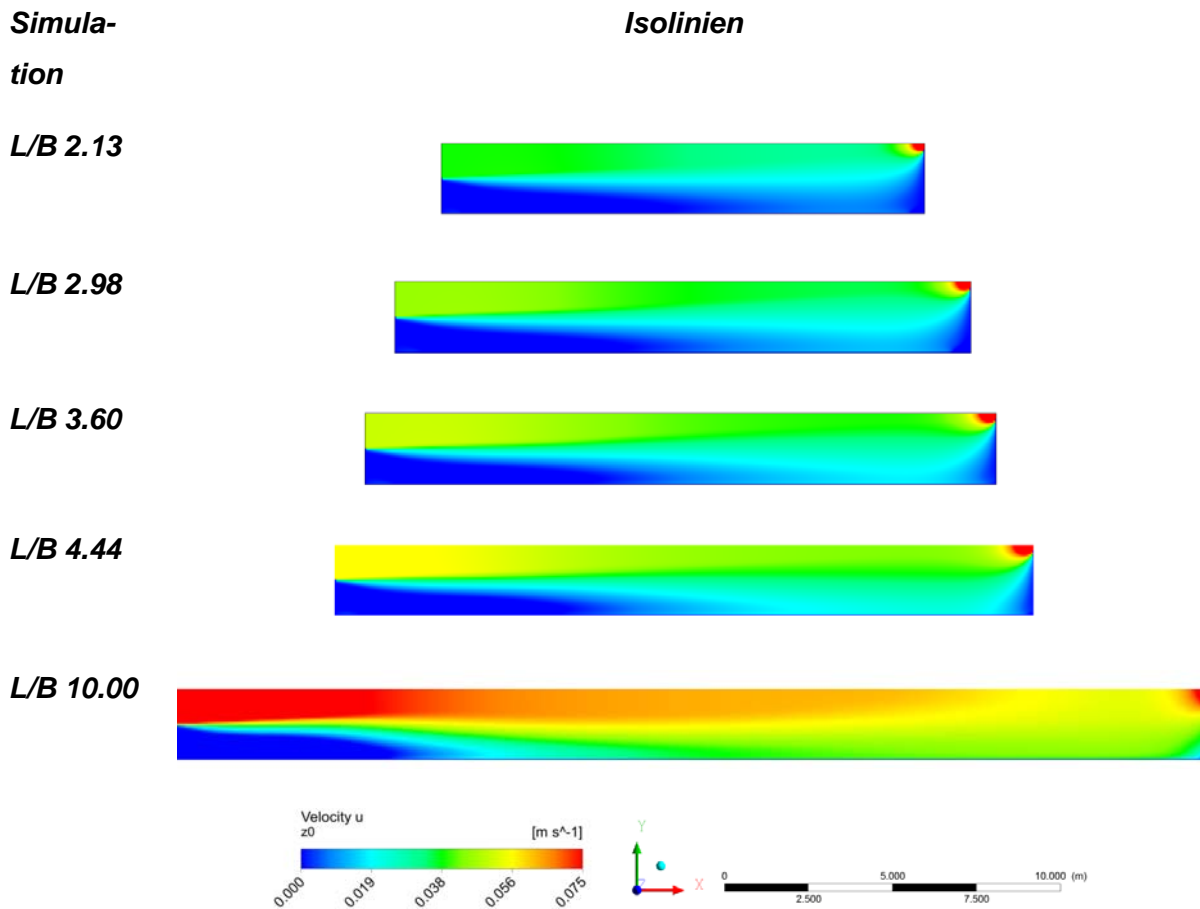


Bild 5.34: Darstellung von zwei Geometrien der Untersuchungsstudie L/B, zu sehen sind L/B 2,13 (links) und L/B 10,00 (rechts)

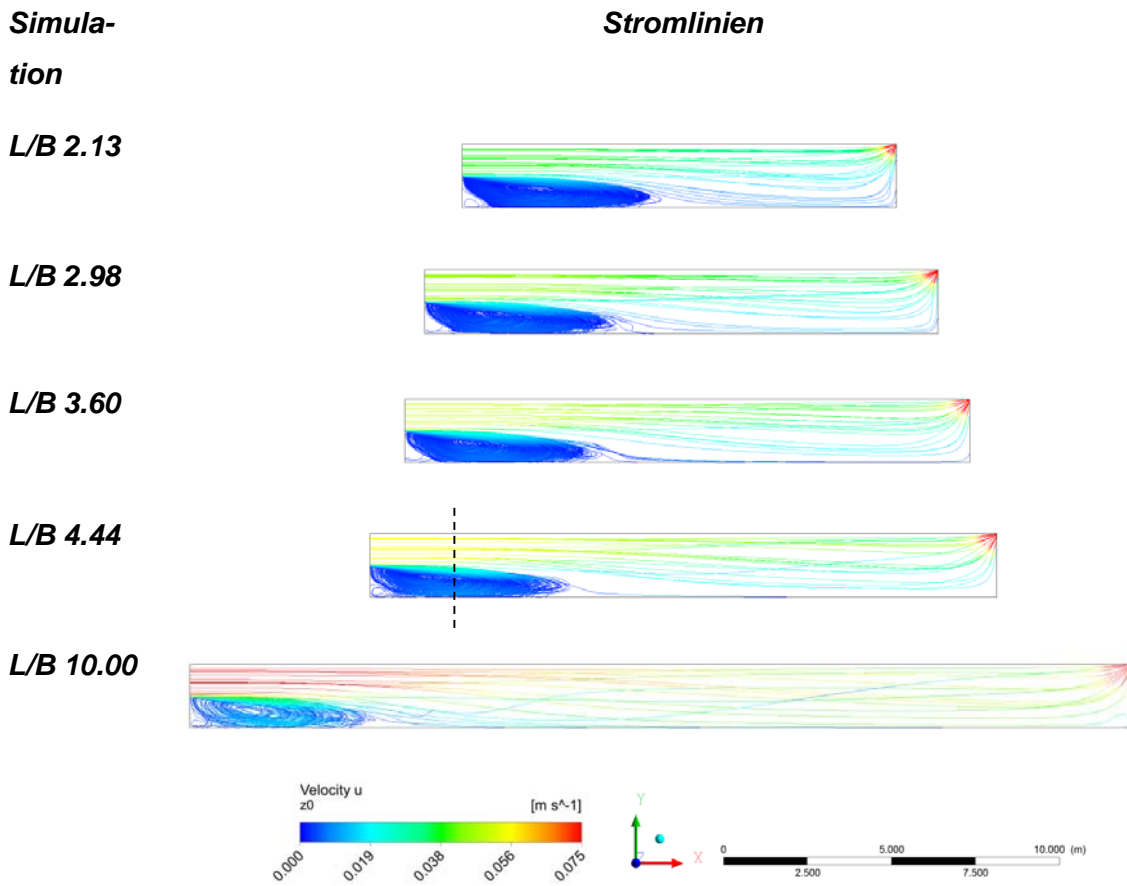
Zur Auswertung des Einflusses der Abmessungsverhältnisse werden zu Beginn die Geschwindigkeiten in Fließrichtung aller hierzu durchgeführten Simulationen mit einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ verglichen. In der folgenden Tabelle 5-14 sind die *Isolinien* in der Mitte der Becken als Längsschnitt dargestellt. Aufgezeigt werden jeweils die unterschiedlichen Abmessungsverhältnisse von $L/B = 2,13$ im obersten Plot bis $L/B = 10,00$ im untersten Plot. Es ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeit abhängig von den Abmessungsverhältnissen ist. Je länger ein Becken ist, desto schmaler ist die Beckenbreite und somit ergibt sich ein verhältnismäßig kleinerer Zuflussquerschnitt, woraus höhere Geschwindigkeiten resultieren. Dies ist anhand der Einfärbung in den folgenden *Isolinien* von $v_U = 0.0 \text{ m/s}$ (blau) bis $v_U = 0.075 \text{ m/s}$ (rot) dargestellt.

Tabelle 5-14: Simulationen der L/B Untersuchung, Darstellung des *Isolinien* der Geschwindigkeiten in Fließrichtung v_u in der Mitte des Beckens



Als weitere Visualisierung (Tabelle 5-15) dienen die *Stromlinien*. Anhand dieser ist ersichtlich, dass die Grundwalze in den Becken mit einem geringen L/B Verhältnis gebündelter wirkt. Die Länge der Grundwalze hingegen ist bei allen Varianten mit rund $L_{\text{Rezirk}} = 6.0$ m gleich. Somit haben die Abmessungsverhältnisse keine Auswirkungen auf die Form der Grundwalze. Der sich ändernde Zuflussquerschnitt hat jedoch Auswirkungen auf die Geschwindigkeiten. Es existieren zum Teil hohe Gradienten, definiert als Scherschicht, zwischen den zuströmenden Geschwindigkeiten und den Geschwindigkeiten in der Rezirkulationszone.

Tabelle 5-15: Simulationen der L/B Untersuchung mit der Darstellung der *Stromlinien* eingefärbt mit den Geschwindigkeiten in Fließrichtung



Weiterhin ist bei der dreidimensionalen Ansicht der *Stromlinien* zu vermerken, dass die Grundwalze insbesondere in den wandnahen Bereichen spiralförmige Sekundärströmungen aufweist. Um dies zu verdeutlichen, werden im folgenden

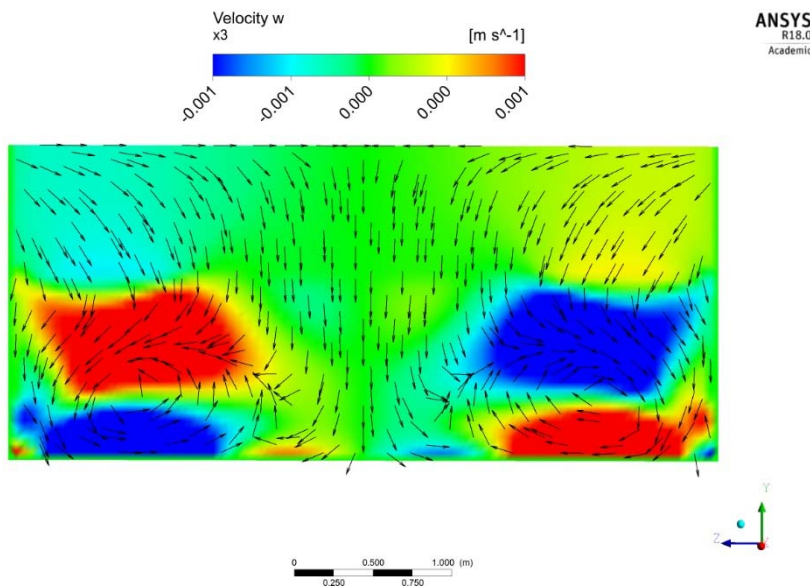


Bild 5.35 eine *Isolinie* mit den Sekundär-Geschwindigkeiten v_w in Z-Richtung aufgezeigt. Auf dieser *Isolinie* sind Vektoren visualisiert, welche die Drallbewegung der Strömung aufzeigen. Hier ist klar erkennbar, dass vor allem im unteren Bereich, also im Bereich der Grundwalze beginnend auf Höhe der Scherschicht deutlich nach außen gerichtete Vektorpfeile vorzufinden sind.

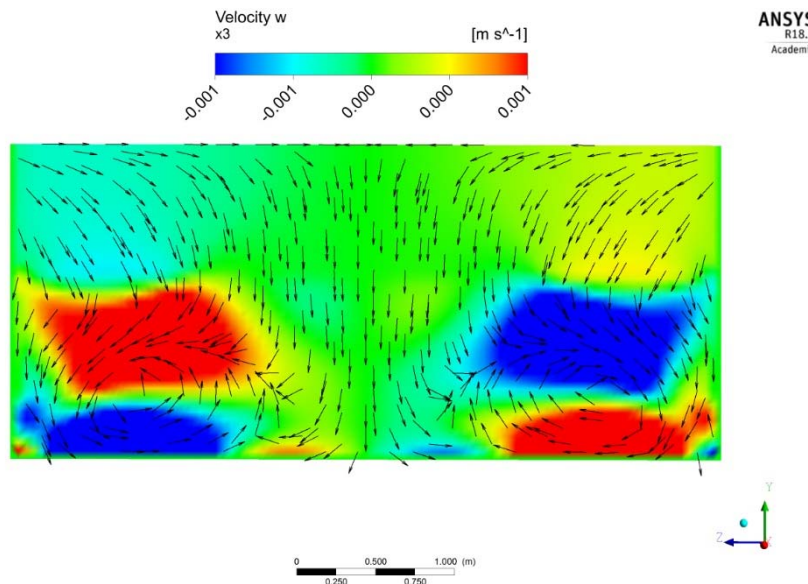


Bild 5.35: Darstellung der Sekundärströmungen L/B 4.44 mittels *Isolinien* und der Vektoren 3 m hinter dem Zuflussquerschnitt (siehe Schnitt in Tabelle 5-15)

Das Verhalten der Durchströmungscharakteristik beeinflusst das Sedimentationsverhalten der Partikel. Jedoch hat sie keine Auswirkungen darauf, ob ein Partikel auf der Sohle verbleibt oder von der Strömung weiter transportiert wird, dazu müssen die Schubspannungen der Sohle mit den kritischen Schubspannungen der Partikel verglichen werden. Die Auswertung der Schubspannungen (*exemplarisch* Bild 5.36) zeigt, dass sogar bei einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ die Schubspannungen auf der Sohle deutlich unter denen der kritischen Schubspannung der betrachteten Partikel liegen. Dargestellt sind die vorliegenden Schubspannungen von $\tau = 0 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^2)$ bis $0,011 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^2)$ (äquivalent zu Pa). Im Vergleich dazu ist die berechnete kritische Schubspannung nach (van Rijn 2016b), beispielsweise für einen $44 \mu\text{m}$ großen Partikel, bei $\tau_{\text{krit}} = 0,110 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^2)$. Die Schubspannungen liegen somit für den Lastfall $q_A = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einem Zehntel ($1/10$) der simulierten Schubspannungen. Hieraus ist zu schließen, dass der maßgebende Prozess der Sedimentationsvorgang ist und ein anschließendes Remobilisieren ausgeschlossen werden kann.

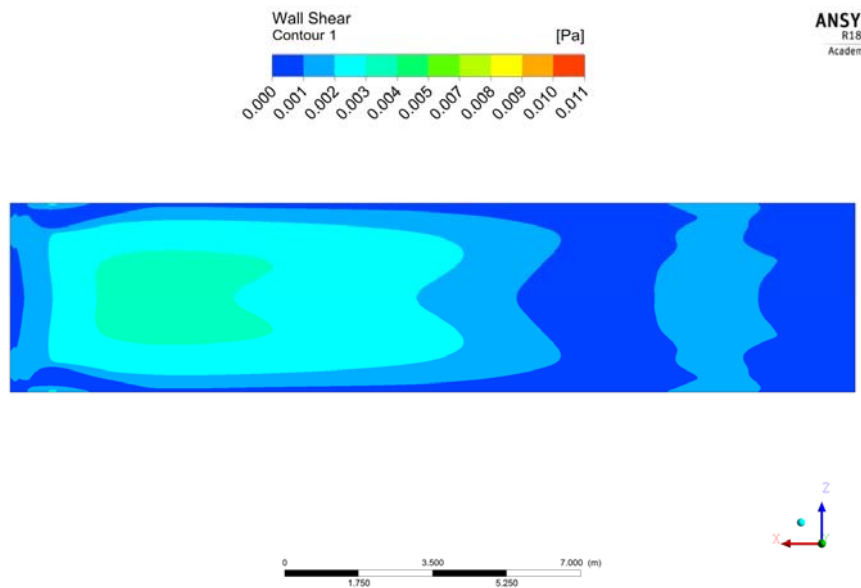


Bild 5.36: Darstellungen der Schubspannungen auf der Sohle für $q_A = 10 \text{ m/h}$

Weitergehend werden die errechneten Wirkungsgrade der Partikelfractionen untersucht. Dies ist dargestellt in einem Hazen-Diagramm (Bild 5.37) für eine hydraulische Belastung von $q_A = 10 \text{ m/h}$. Die graue Linie beschreibt den theoretisch errechneten Verlauf der Hazen-Theorie. Als blaue Linien sind die unterschiedlichen Abmessungsverhältnisse visualisiert. Diese sind von hellblau $L/B = 2,13$ bis dunkelblau $L/B = 10,00$, farblich abgestuft. Zu sehen ist, dass die simulierten Ergebnisse für feinere Fraktionen bessere Wirkungsgrade erzielen, als von der Hazen-Theorie erwartet. Dahingegen sind die Wirkungsgrade der größeren Fraktionen schlechter. Dieses konträre Verhalten weist seinen Wendepunkt auf bei einer Hazen-Zahl von rund $Ha = 0,67$.

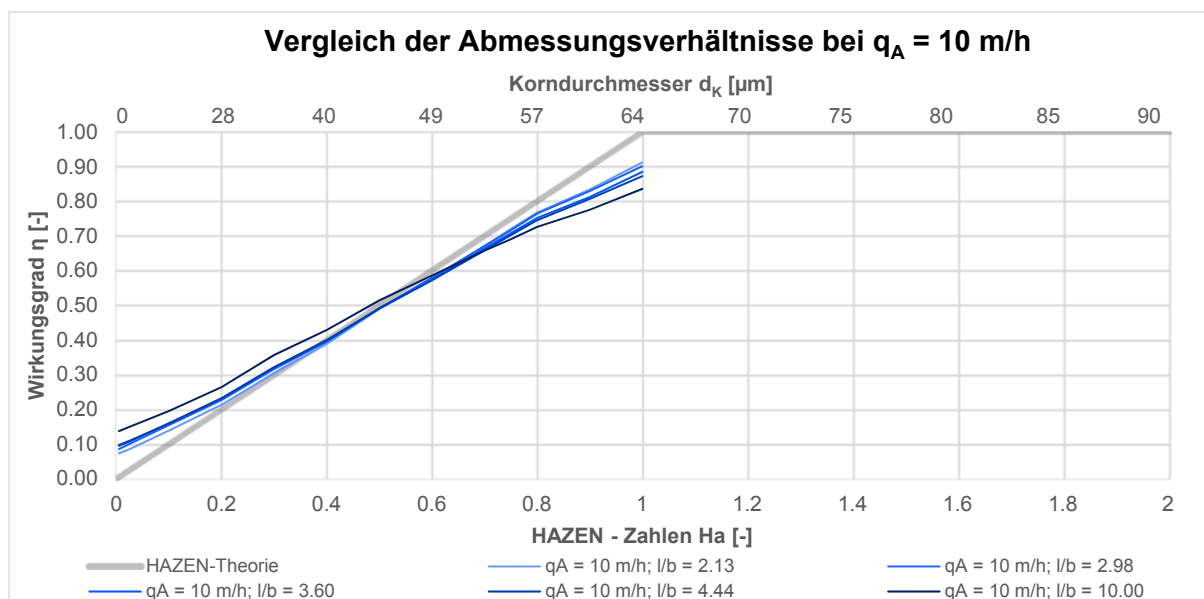


Bild 5.37: Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Abmessungsverhältnisse für $q_A = 10 \text{ m/h}$

Im Anschluss daran werden nun die Gesamtwirkungsgrade (

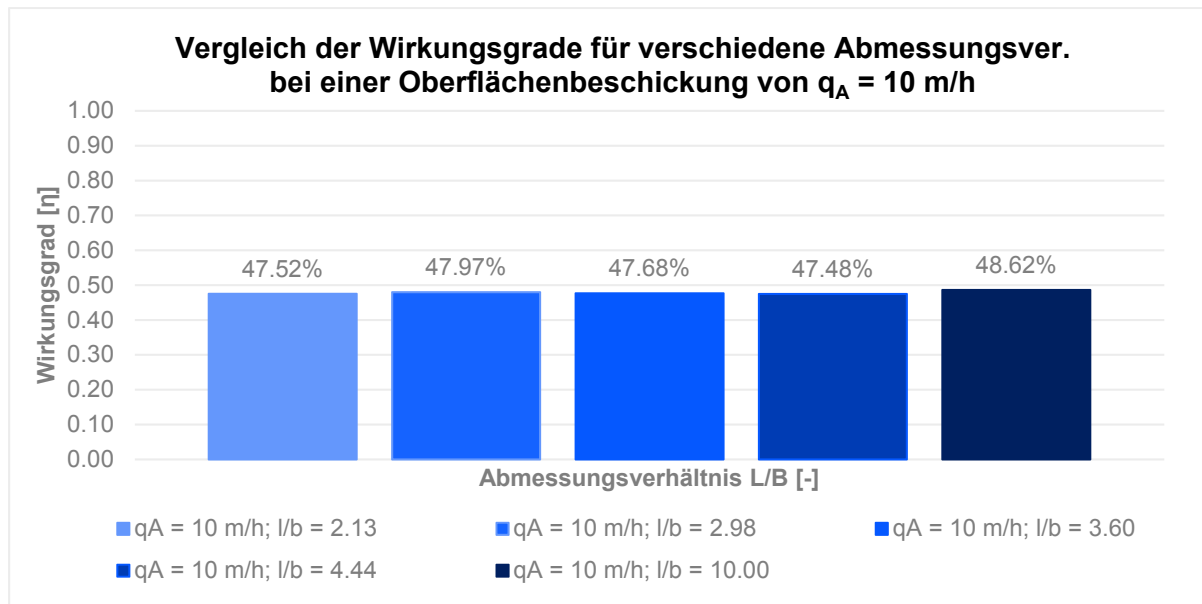


Bild 5.38), welche massegeteilt gemittelt über alle betrachteten Fraktionen berechnet werden, für die Abmessungsverhältnisse verglichen. Hierbei ist zu sehen, dass die Änderung der Gesamtwirkungsgrade lediglich 1,39 % beträgt. Das konträre Verhalten, welches sich bei der Betrachtung einzelner Partikelwirkungsgrade darstellt, ist demnach, bei einer massegeteilten Betrachtung aller Partikelgrößen gemeinsam, nicht zu erkennen.

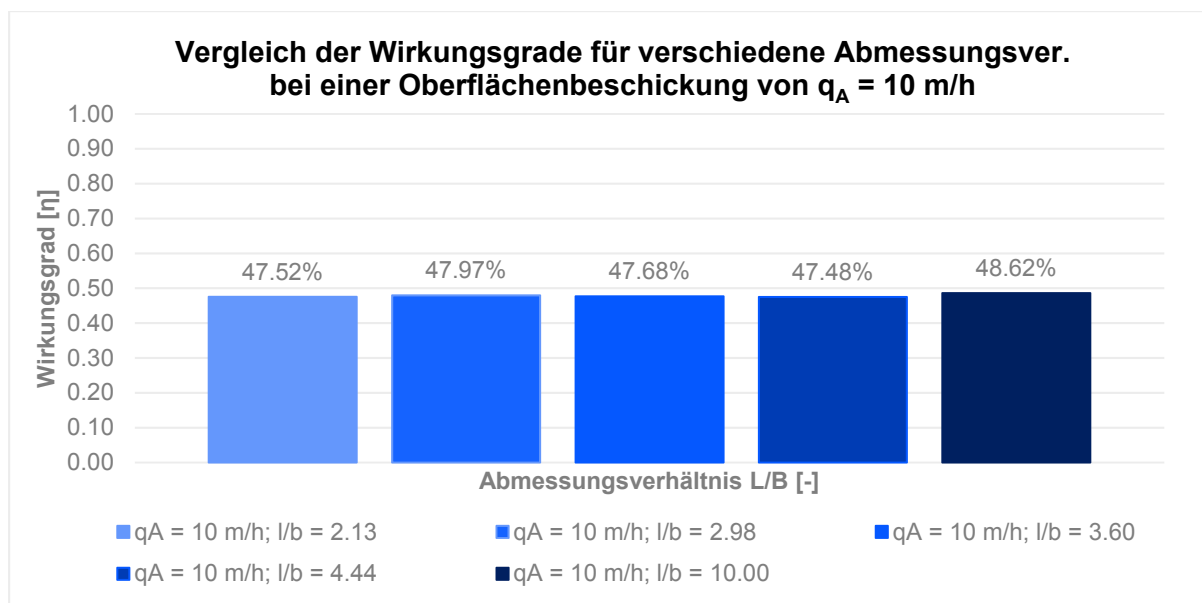


Bild 5.38: Vergleich der Gesamtwirkungsgrade verschiedener Abmessungsverhältnisse für $q_A = 10 \text{ m/h}$

Weiterhin soll der Einfluss der Oberflächenbeschickung auf die Wirkungsgrade anhand dieser Untersuchung deutlich gemacht werden (

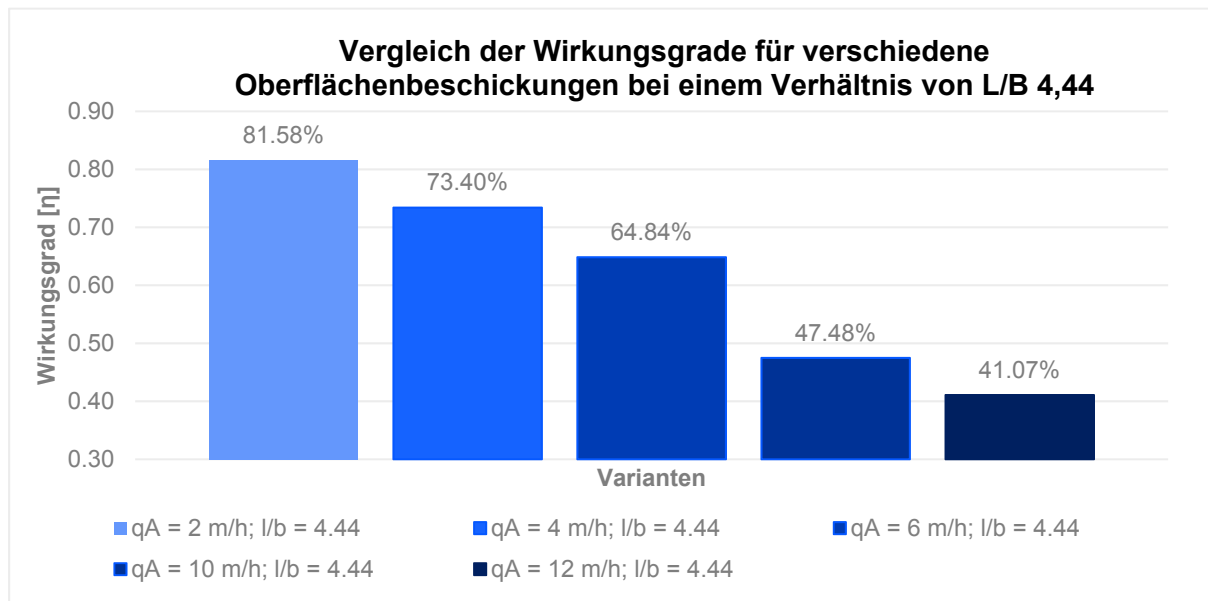


Bild 5.39). Möglicherweise könnte genau dies der Parameter sein, mit dem die Wirkungsgrade maßgebend beeinflusst werden können. Als grobe Faustformel kann hier formuliert werden, dass sich für $L/B = 4,44$ der gesamte Wirkungsgrad, bei einer mehrfachen Erhöhung der Oberflächenbeschickung um $\Delta q_A = 2 \text{ m/h}$, um jeweils im Durchschnitt rund 8 % verringert.

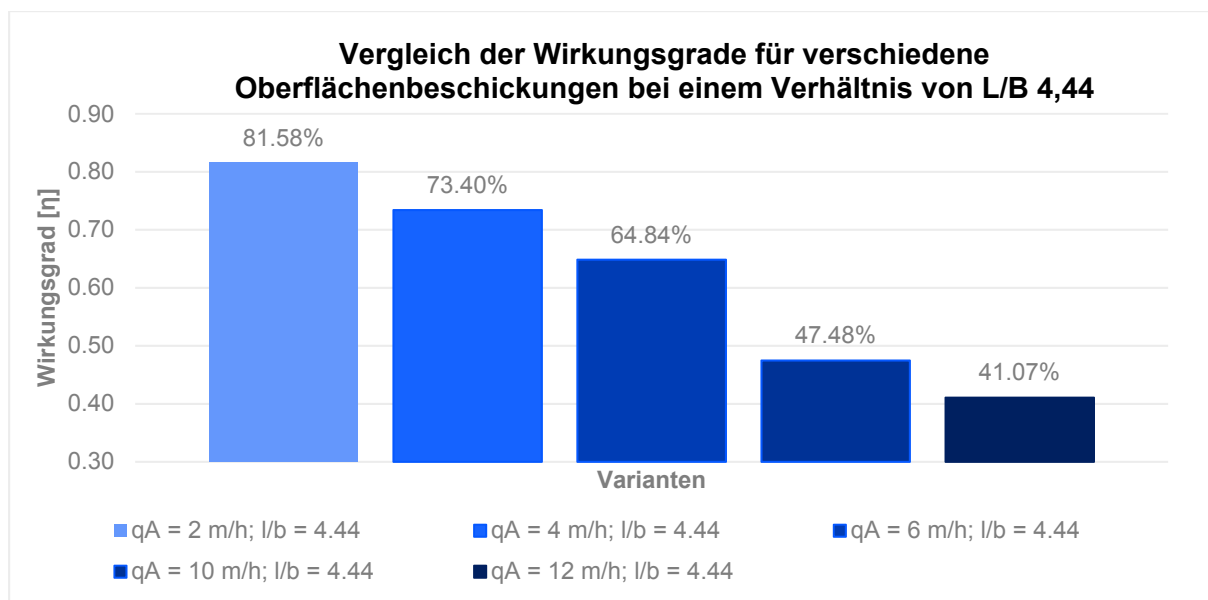


Bild 5.39: Vergleich der Wirkungsgrade für das Becken $L/B = 4.44$ für die verschiedenen Oberflächenbeschickungen

Ziel der nachfolgenden Auswertung sollte eine Korrelation zwischen den Partikelwirkungsgraden und den Hazen-Zahlen, als dimensionslose Kennzahl der Partikel, sein. Im nachfolgenden Diagramm (Bild 5.40) wird dies anhand des Partikels mit einer dimensionslosen Hazen-Zahl

von $Ha = 0,5$ überprüft. Auf der horizontalen Achse ist die Oberflächenbeschickung des Beckens aufsteigend aufgetragen. Die Punkte stellen die Verhältnisse von $L/B = 2,13$ (hellblau) bis $L/B = 10,00$ (dunkelblau) dar. Eine sehr feine Streuung der Wirkungsgrade wird bereits durch die Skalierung der vertikalen Achse deutlich. Die Änderungen der Wirkungsgrade liegen in dem Bereich von 45 % bis knapp 53 % und weisen somit lediglich eine Streuung von 8 % auf. Ersichtlich wird auch, dass das Becken mit den Abmessungsverhältnissen von $L/B = 10,0$ in allen Fällen den besten Wirkungsgrad aufweist. Allerdings ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad und der hydraulischen Belastung erkennbar.

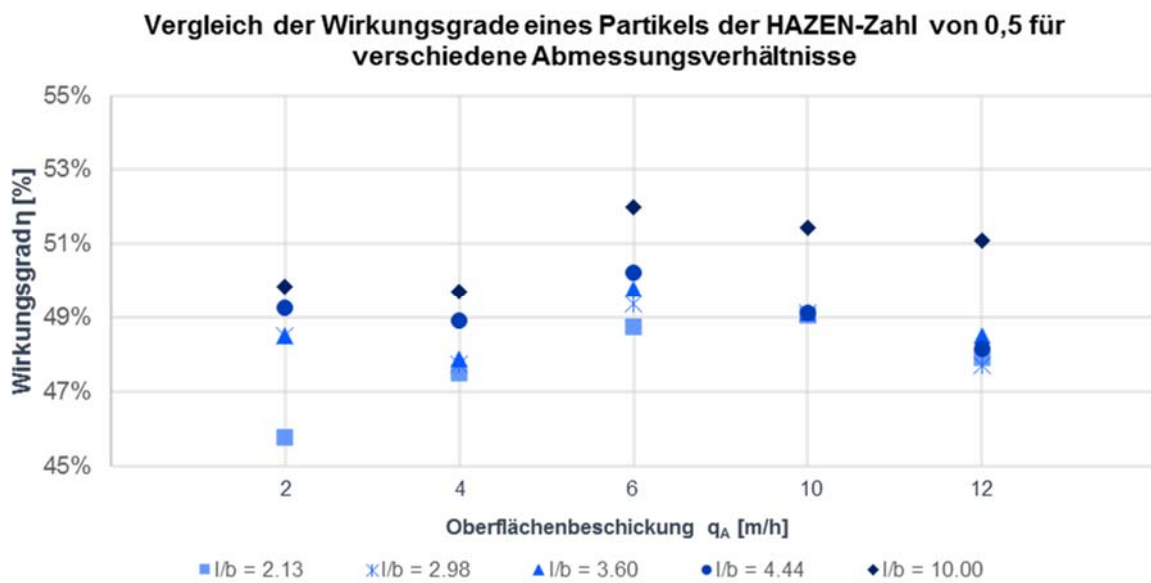


Bild 5.40: Vergleich der Wirkungsgrade für den Partikel mit einer Hazen-Zahl von 0.5 für die verschiedenen Oberflächenbeschickungen und Abmessungsverhältnisse

Eine weitere theoretische Analyse zum Absetzvorgang führten bereits (Geiger et al. 1998b) durch. Sie führten zur theoretischen Beschreibung des instationären Sinkvorganges den Parameter der Trennsinkgeschwindigkeit v_{sT} ein. Diese beschreibt die Sinkgeschwindigkeit des Partikels bei 50 % des Wirkungsgrades, für die eine bestimmte hydraulische Belastung vorliegt. Resultierend aus der ermittelten Trennsinkgeschwindigkeit kann die dazugehörige Trennhazenzahl errechnet werden. Diese ist als Zielgröße, zur Beschreibung der Funktionsfähigkeit deklariert. Im folgenden Diagramm (Bild 5.41) wird eben diese ermittelte Trennhazenzahl im Bezug zu den Oberflächenbeschickungen für alle Abmessungsverhältnisse aufgetragen. Hier ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Datenpunkten erkennbar, lediglich, dass das Abmessungsverhältniss $L/B = 10,0$ immer die geringste Trennhazenzahl Ha_T aufweist. Daraus resultiert: Je geringer die ermittelte Trennsinkgeschwindigkeit bei $\eta = 50\%$ ist, desto geringer ist der Partikeldurchmesser. Wenn die Sinkgeschwindigkeit für diesen Partikeldurchmesser dann durch die jeweilige Oberflächenbeschickung geteilt wird, so ist die

Trennhazenzahl für alle Oberflächenbeschickungen die dimensionslose Kennzahl, welche den Partikel, der bereits $\eta = 50\%$ des Wirkungsgrades erreicht, beschreibt.

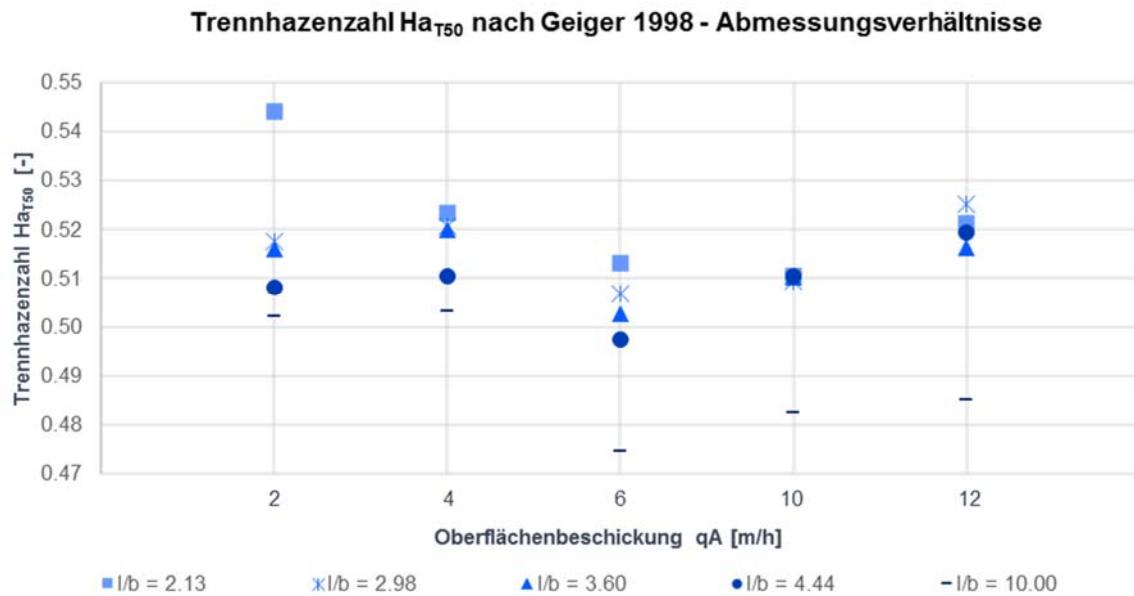


Bild 5.41: Darstellung der Trennhazenzahl für die verschiedenen Oberflächenbeschickungen und Abmessungsverhältnisse

Im folgenden Diagramm (Bild 5.42) ist zu sehen, dass es einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen einer steigenden Oberflächenbeschickung im Bezug zur Trennsinkgeschwindigkeit, definiert nach (Geiger et al. 1998), gibt. Hieraus lässt sich ablesen, wie sensibel die jeweiligen Abmessungsverhältnisse gegenüber den steigenden hydraulischen Belastungen sind. Verhältnismäßig kurze Beckenabmessungen führen gegenüber der veränderlichen Oberflächenbeschickung zu sensiblen Ergebnissen der Wirkungsgrade, denn die Trendlinien sind in der nachfolgenden Darstellung (Bild 5.42) steiler als die der längeren Beckenabmessungen.

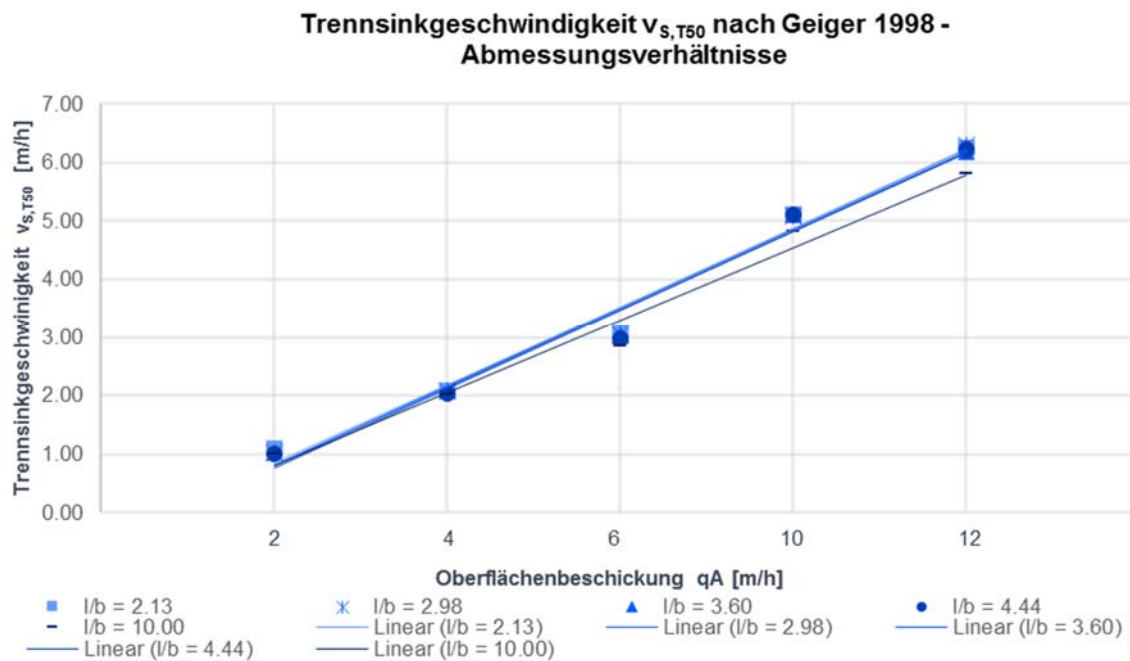


Bild 5.42: Darstellung der Trennsinkgeschwindigkeit der Konfigurationen bezogen auf die Oberflächenbeschickungen

Resultat der Untersuchung

Die Geschwindigkeiten in der Zulaufzone ändern sich, der Änderung der Oberflächenbeschickung entsprechend, sehr stark. Die Grundwalze wird durch den Durchfluss jedoch nicht beeinflusst und behält, trotz sich ändernder L/B-Abmessungsverhältnisse, eine gleichbleibende Länge. Weiterhin weist die Grundwalze eine leichte Neigung in Richtung der Wände auf, was durch die Grenzschichtbildung an den Wänden erklärt werden kann. Die Partikelwirkungsgrade verhalten sich konträr. Bei einem Becken $L/B = 10,00$ weisen die feinen Partikel bessere und die größeren Partikel schlechtere Wirkungsgrade auf, als von der Hazen-Theorie angenommen. Sobald die Wirkungsgrade massengewichtet ausgewertet werden, sind die Unterschiede der Wirkungsgrade marginal. Es lässt sich keine Korrelation zwischen den Wirkungsgraden und der systematischen Veränderung der Abmessungsverhältnisse herstellen. Abhilfe schafft die Betrachtung nach Geiger et al. (1998), bei dem mit Hilfe der Trennhazen-Zahl die besten Abmessungsverhältnisse für $L/B = 10,00$ festgelegt werden können und das anhand der Trenn-Sinkgeschwindigkeit die Sensitivität der Abmessungsverhältnisse bezogen auf steigende hydraulische Belastungen definiert werden kann. Daraus resultiert, dass der Einfluss der Abmessungsverhältnisse gering ist, jedoch zu verhältnismäßig langen Beckenkonfigurationen geraten wird, da diese robuster gegenüber hydraulischen Änderungen sind.

5.4.9 Gleichrichter mit Grundwalze

Aufbauend auf den bereits erhaltenden Erkenntnissen der Phase 1 und der literaturbasierten Vorstudien wurde eine Auswahl verschiedener Komponenten mit dem jeweils größten Potential zur Partikelabscheidung in unterschiedlichen Größenfraktionen getroffen. Als Einlaufkonstruktion kommt der in Phase 1 entwickelte Gleichrichter in Frage, der in einer stratifizierten Strömung die Abscheidung der gröberen Partikel der Feinstofffraktion fördert. Für die feineren Partikelfraktionen ergab die Studie mit den idealisierten Ein- und Auslaufbedingungen, dass eine liegende Grundwalze unmittelbar hinter dem Einlauf zielführend ist. Hier wird daher eine Kombination der beiden Strömungsmuster vorgeschlagen und weiter untersucht.

Der Gleichrichter wird, wie im folgenden Detail (Bild 5.43) ersichtlich, im Pumpensumpf eingebaut und ist somit Teil der Einlaufkomponente. Bestandteile des Gleichrichters sind die Tauchwand und ein Leitblech im unteren Bereich zur Aufteilung des nach oben strömenden Durchflusses. Auf Basis der Ergebnisse aus der Vorstudie zu den Zulaufhöhenverhältnissen wurde ein freies Anströmverhältnis der Sedimentationskammer von $H/H = 0,25$ gewählt. Dies wird erzielt durch eine Trennwand, welche den Pumpensumpf von der Sedimentationskammer trennt und deren Höhe $\frac{3}{4}$ der Wassertiefe der Sedimentationskammer, beträgt. In den verbleibenden, oberen 0,50 m der Wassertiefe, über die der Durchfluss möglichst gleichmäßig verteilt der Sedimentationskammer zuströmen soll, werden zwei weitere Leitbleiche angeordnet (siehe Bild 5.44). Weiterhin werden zur Stabilisierung der Strömungsaufteilung über die gesamte Breite des Beckens acht Leitwände zwischen der Tauchwand und der Trennwand integriert. Die genauen Abmessungen sowie die Anordnungen der einzelnen Bauteile des Gleichrichters zueinander und im Verhältnis zum Bauwerk sind noch nicht abschließend auf ihre optimalen Abmessungen untersucht worden. Bisher untersuchte Variationen wiesen kein erkennbares Optimum auf. Hier bleibt noch Forschungsbedarf für etwaige nachfolgende Projekte.

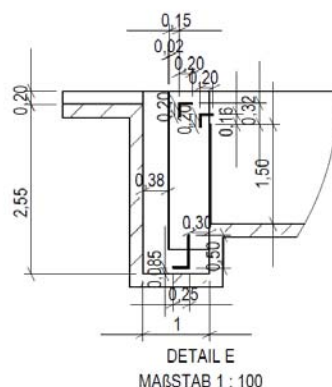


Bild 5.43: Detailzeichnung: Gleichrichter mit integrierter Grundwalze

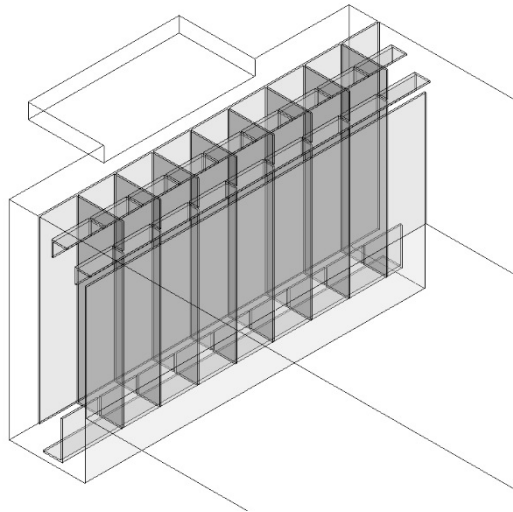


Bild 5.44: Isometrische Darstellung des eigens entwickelten Bauteils: Gleichrichter

Auf Basis dieser geometrischen Konfiguration wurden in diesem Arbeitspunkt wiederum die hydraulischen Belastungen $q_A = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ und $4 \text{ m}^3/\text{h}$ untersucht.

Hier ist in Bild 5.45 das resultierende Strömungsbild des Gleichrichters dargestellt. Gezeigt werden die Stromlinien des Fluides für eine Oberflächenbeschickung von $q_A = 10 \text{ m}^3/\text{h}$. In Rot sind die Geschwindigkeiten in Fließrichtung mit $v_U = 0.06 \text{ m/s}$ und in Blau sind die Geschwindigkeiten gegen die Fließrichtung mit $v_U \leq -0.02 \text{ m/s}$ dargestellt. Dabei ist die sich ausbildende Grundwalze hinter der Trennwand zwischen Pumpensumpf und Sedimentationskammer zu sehen. Die Anströmung des Beckens ist über die gesamte Beckenbreite relativ gut vergleichmäßig. Die Grundwalze umfasst ziemlich genau die Hälfte der Länge der Sedimentationskammer, dahinter verteilen sich die Stromlinien über die gesamte Wassertiefe und in der zweiten Hälfte des Beckens befindet sich ein relativ ausgeglichenes Strömungsprofil.

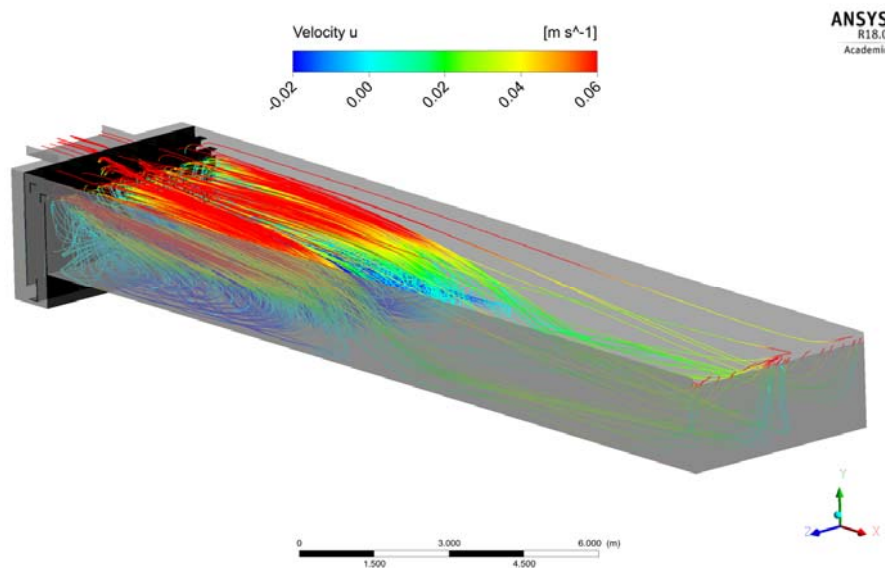
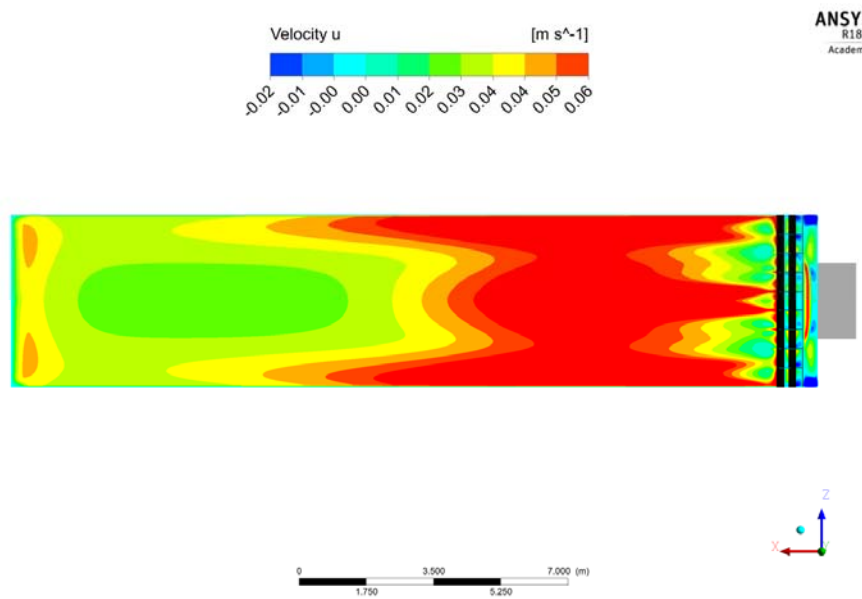


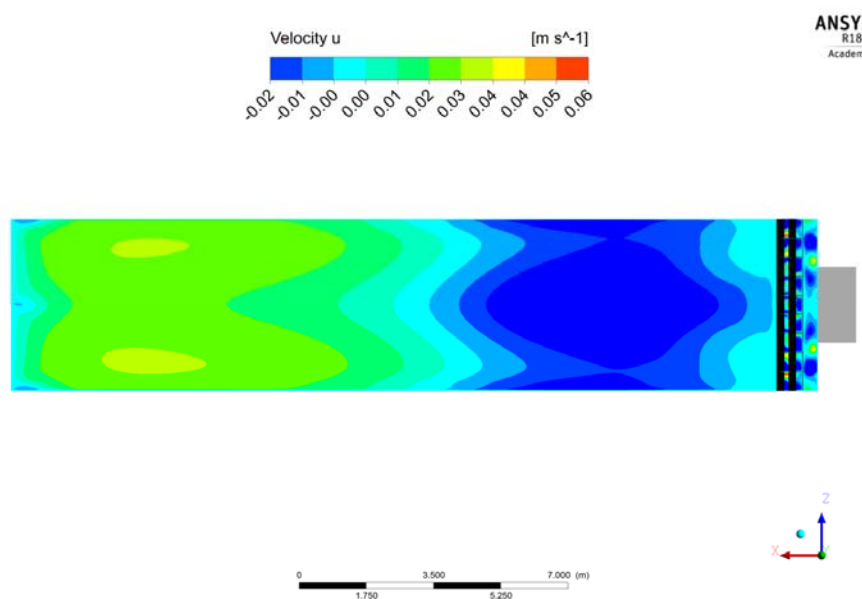
Bild 5.45: Stromlinien der Geschwindigkeiten $q_A = 10 \text{ m/h}$; oben: 3D-Ansicht

Als weitere Betrachtung folgen die Isolinien der Horizontalkomponenten u der Geschwindigkeit auf einer Höhe von 0,25 m unter der Sohle des Zulaufgerinnes, und somit noch oberhalb der Trennwand zwischen Pumpensumpf und Sedimentationskammer. Die farbliche Skalierung der Geschwindigkeiten ist mit Rot $v_U = 0,06 \text{ m/s}$ und Blau $v_U = -0,02 \text{ m/s}$ die gleiche wie im vorherigen Bild. Die Isolinie bestätigt, dass die Geschwindigkeiten hinter dem Gleichrichterbauteil über die gesamte Beckenbreite über 0,06 m/s liegen, aber nur über etwa die Hälfte der Beckenlänge. Weiterhin ist ein symmetrisches Profil der Strömung zu sehen, welches an den Wänden deutlich länger höhere Geschwindigkeiten aufweist, als dies in der Mitte des Beckens der Fall ist. Dies lässt sich vermutlich durch den Einfluss der Wände erklären.



**Bild 5.46: Isolinien von Fließgeschwindigkeiten in X- Richtung in der Draufsicht des Beckens;
0,25 m unter dem Zulaufgerinne**

Zusätzlich zu der oberen Schnittebene liegt im Bild 5.47 eine Draufsicht der Geschwindigkeiten u in x-Richtung 0,30 m über der Beckensohle vor. Hier ist in Blau deutlich die Rückwärtsströmung der Grundwalze ersichtlich. Auch hier bildet sich die Beckenströmung symmetrisch aus. Weiterhin ist auch kurz über der Sohle der Sedimentkammer eine nahezu vergleichmäßigte Strömung im zweiten Teil der Sedimentationskammer ersichtlich.



**Bild 5.47: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten u in X- Richtung in der Draufsicht des Beckens;
Höhenlage: 0,30 m über der Beckensohle**

Als weitere Darstellung wurden die x-Komponenten der Geschwindigkeiten auf vier hintereinander angeordneten Isolinien dargestellt. Diese befinden sich an den Orten $x/L = 0,05, 0,30, 0,55$ und $0,85$ der Sedimentationskammer. Dargestellt sind, wie zuvor, die Geschwindigkeiten zwischen $v_U = -0,02$ m/s und $v_U = 0,06$ m/s. Auch hier ist das Verhalten der Grundwalze auf den ersten beiden Ebenen zu erkennen und eine nahezu gleichmäßige Strömung auf den letzten beiden.

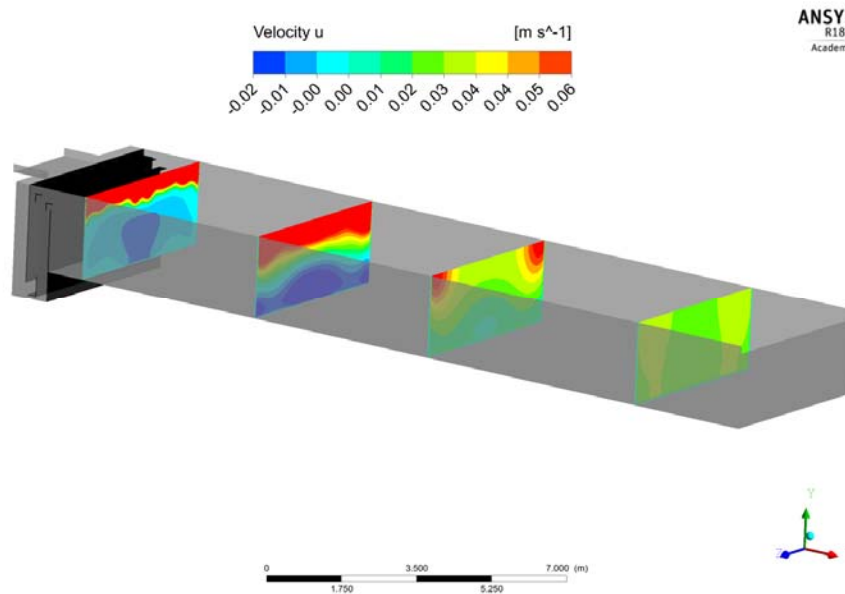


Bild 5.48: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten u in x-Richtung in der 3D-Ansicht des Beckens bei (x/L) 0,05, 0,30, 0,55, 0,85 der Sedimentationskammer

Die Auswertung der Wirkungsgrade erfolgt mit Hilfe der bereits beschriebenen UDF mit dem Euler-Lagrange'-Ansatz, und zwar für die definierten Stützstellen einer synthetischen Sieblinie, bestehend aus mineralischen und organischen Partikeln. Die folgende Tabelle 5-16 enthält Wirkungsgrade für die hydraulischen Belastungen von $q_A = 4$ m/h und $q_A = 10$ m/h.

Tabelle 5-16: Wirkungsgrade des Gleichrichters mit Grundwalze

		Gleichrichter mit Grundwalze		Grundvariante V0	
		4 m/h	10 m/h	4 m/h	10 m/h
AFS < 63 µm	mineralisch	60,34 %	44,81 %	53,40 %	39,07 %
	organisch	24,53 %	5,44 %	23,53 %	7,74 %
	synthetisches Gemisch	51,57 %	35,16 %	46,08 %	31,39 %
AFS ≥ 63 µm	mineralisch	95,12 %	89,45 %	98,45 %	90,59 %
	organisch	52,45 %	33,53 %	49,88 %	32,50 %
	synthetisches Gemisch	76,43 %	64,96 %	77,18 %	65,15 %
Gesamt	mineralisch	73,51 %	61,71 %	70,45 %	58,57 %
	organisch	41,11 %	22,12 %	39,19 %	22,45 %
	synthetisches Gemisch	62,76 %	48,57 %	60,07 %	46,58 %

Weiterhin lassen sich die einzelnen Partikelwirkungsgrade in einem Hazen-Diagramm (Bild 5.49) darstellen. Hier ist erkennbar, dass die einzelnen Partikelwirkungsgrade der Fraktionen zwischen etwa 10 µm und 100 µm um bis zu 10 %-Punkte über denen der Grundvariante liegen.

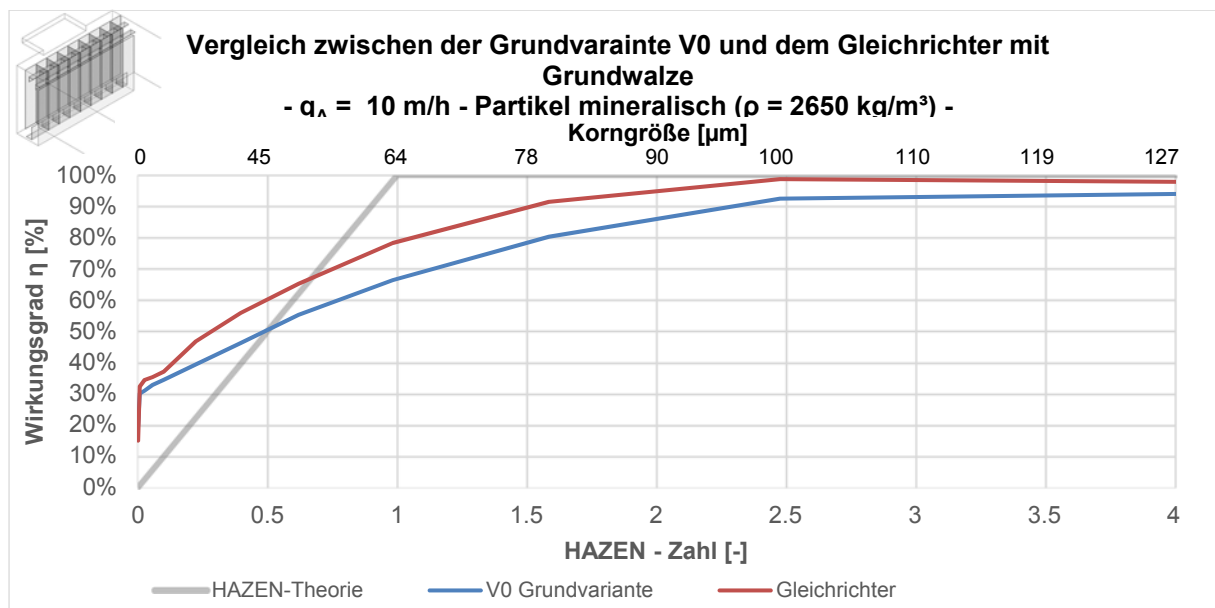


Bild 5.49: Darstellung der Partikelwirkungsgrade im Hazen-Diagramm Vergleich zwischen der Grundvariante V0 und dem Gleichrichter mit Grundwalze bei $q_A = 10 \text{ m/h}$

Wie bereits in der Tabelle 5-16, ist der Vergleich der Wirkungsgrade auch in den Hazen-Diagrammen für $q_A = 10 \text{ m/h}$ und $q_A = 4 \text{ m/h}$ ersichtlich. Hierbei wird deutlich, dass der Verlauf der aufgetragenen Partikelwirkungsgrade nahezu identisch ist. Jedoch ist auch hier drauf hinzuweisen, dass das Verhalten für unterschiedliche hydraulische Belastungen im Rahmen der Hazen-Zahlen identisch ist jedoch nicht für die dazugehörigen Korngrößen.

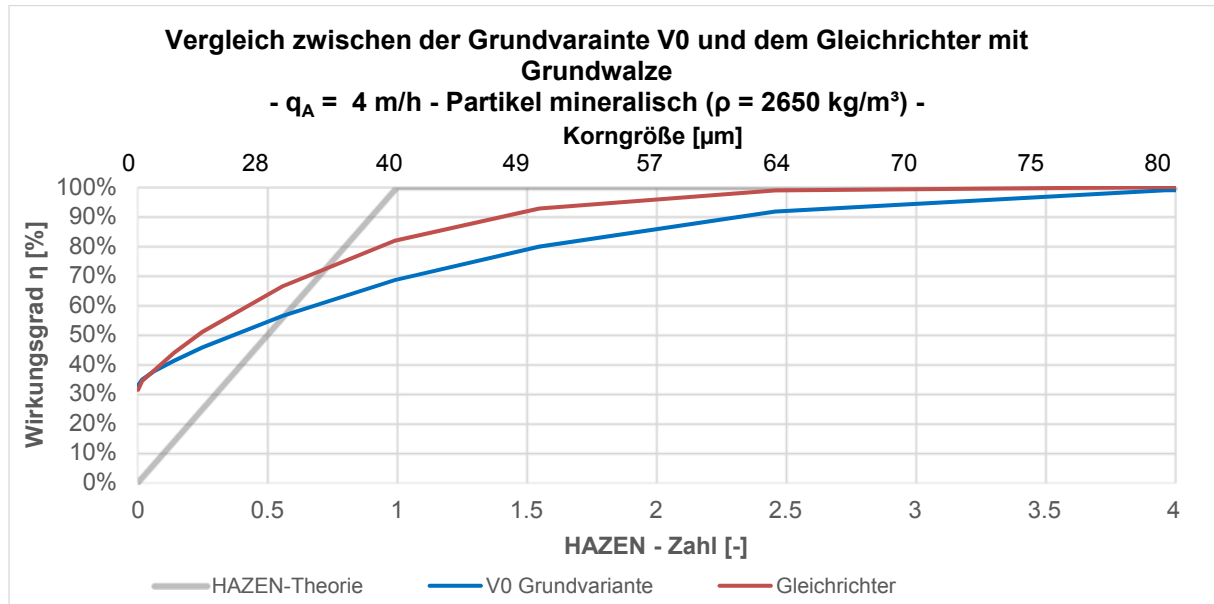


Bild 5.50: Darstellung der Partikelwirkungsgrade im Hazen-Diagramm Vergleich zwischen der Grundvariante V0 und dem Gleichrichter mit Grundwalze bei $q_A = 4 \text{ m/h}$

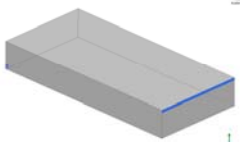
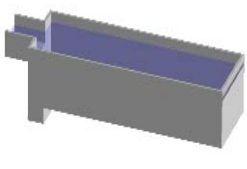
Der maximale Unterschied der einzelnen Partikelwirkungsgrade liegt bei rund 12 %, jedoch ergibt sich bei einer gewichteten Mittelung zu einem gesamten Wirkungsgrad lediglich eine Verbesserung von 2 %- Punkten, was die Vorteile des Gleichrichters in der hier untersuchten Form gegenüber der V0 Grundform marginal erscheinen lässt.

5.4.10 Vergleich zwischen der V0 Grundvariante und der „worst-case“ Variante

Auffallend waren bei der gesamten Auswertung der Wirkungsgrade die verhältnismäßig guten Wirkungsgrade der Grundvariante V0. Daraufhin wurde als weitere Untersuchung die hier oftmals beschriebene Grundvariante mit einer absichtlich vom Themenband abweichenden Variante verglichen. Die Grundvariante V0 wurde in Anlehnung an das DWA-T3 (2013) konstruiert. In diesem Themenband sind bereits viele Konstruktionshinweise zur Gestaltung von Becken gegeben worden. Dennoch entspricht die Durchströmung der Grundvariante V0 nicht dem Grundprinzip der Pfropfenströmung, so dass es Anlass zur Optimierung der Durchströmung gab. Sofern nun diese Variante V0 mit den hier erarbeiteten Optimierungsmöglichkeiten verglichen wird, ergeben sich kaum Unterschiede in den Gesamt-Wirkungsgraden. Es stellt sich

also die Frage, ob mit irgendwelchen Empfehlungen zur Beckenauslegung überhaupt signifikante Wirkungsgrad-Verbesserungen erzielt werden können, oder ob die Becken unabhängig von ihrer Konstruktion in jedem Fall einen passablen Wirkungsgrad erzielen, sodass es nicht die Mühe wert ist, diesen verbessern zu wollen. Der folgende Vergleich (Tabelle 5-17 und Bild 5.51) dient also dem Zweck, zu demonstrieren, dass es einen signifikanten Unterschied der Wirkungsgrade zwischen einer denkbar schlechten „worst-case“-Variante und der Konstruktion V0 gibt.

Tabelle 5-17: Wirkungsgrade der Varianten ohne Einbauten

		„worst-case“ Variante 	Grundvariante V0 
		10 m/h (%)	10 m/h (%)
AFS < 63 µm	mineralisch	11,58	39,07
	organisch	0,00	7,74
	synthetisches Gemisch	8,74	31,39
AFS >= 63 µm	mineralisch	67,46	90,59
	organisch	0,28	32,50
	synthetisches Gemisch	38,03	65,15
Gesamt	mineralisch	32,73	58,57
	organisch	0,16	22,45
	synthetisches Gemisch	21,92	46,58

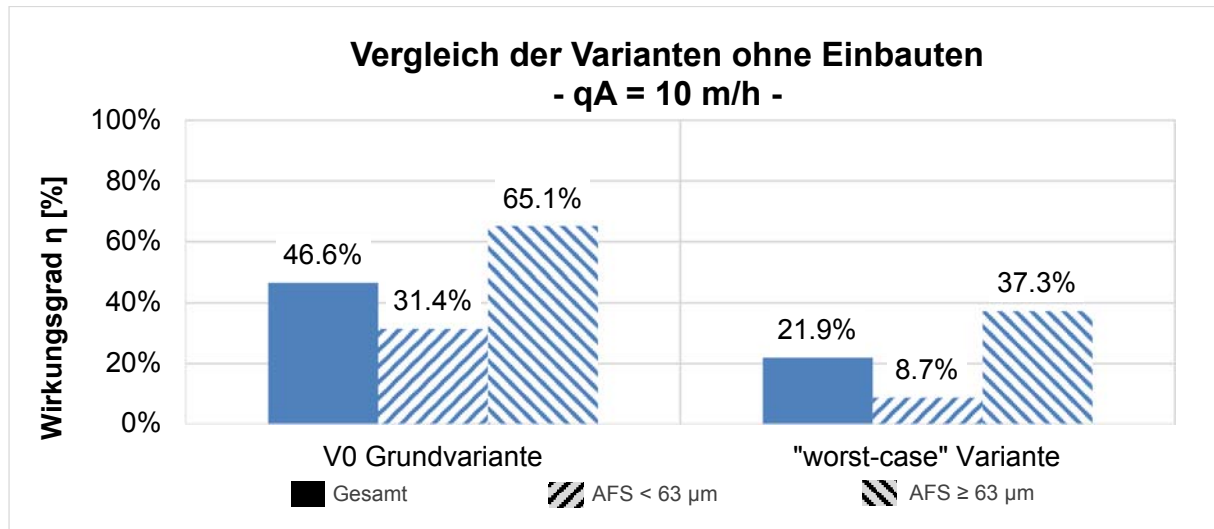


Bild 5.51: Vergleich der Wirkungsgrade der Varianten ohne Einbauten

Hierbei wird ersichtlich, dass Regenbecken, die sinnvoll nach den Regeln des DWA-A 166 (2013) und unter Bezugnahme der Gestaltungshinweise aus dem DWA-T3 (2013) konzipiert wurden, gegenüber einer denkbar schlechten Lösung sehr wohl signifikante Verbesserungen erzielten. Der massegewichtete Wirkungsgrad der optimalen Grundvariante V0 ist mehr als doppelt so hoch wie der Wirkungsgrad der „worst-case“-Grundvariante. Hier sind im Einzelnen vor allem auch deutliche Unterschiede bei der Behandlung von organischen Partikeln zu vermerken, da diese bei einer schlechten Durchströmung praktisch gar nicht zurückgehalten werden können. Außerdem werden die Wirkungsgrade der mineralischen Fraktionen sowohl bei den Fraktionen unter $63 \mu\text{m}$ als auch bei den Fraktionen über $d_k = 63 \mu\text{m}$ um mehr als 20 %-Punkte verbessert.

5.4.11 Vergleich zwischen V1 Einlaufgestaltung und Gleichrichter mit Grundwalze

Bei dem Vergleich zwischen der besten Variante aus der Literaturstudie und der besten der im Rahmen dieses Vorhabens erarbeiteten Konfigurationen ist Folgendes zu beachten. In der Literaturstudie hat die Einlaufgestaltung, die besten Wirkungsgrade erzielt. In der zweiten Phase des MEREBEN-Vorhabens wurde, aufbauend auf Untersuchungen zum Abmessungsverhältnis und zu den idealen Einlaufbedingungen, festgestellt, dass horizontale Scherschichten, wie sie in Verbindung mit der implementierten Grundwalze auftreten, zu verbesserten Wirkungsgraden der feinsten Fraktionen führen. Darum wird der Gleichrichter mit Grundwalze als zweites Becken zu diesem Vergleich hinzugezogen. Im folgenden Diagramm (Bild 5.52) ist die Verbesserung gerade bei den Partikelfraktionen bis $50 \mu\text{m}$ erkennbar. Bei der

Fraktion um 50 μm , d.h. in dem Schnittpunkt mit der Hazen-Theorie, sind die beiden Varianten nahezu deckungsgleich.

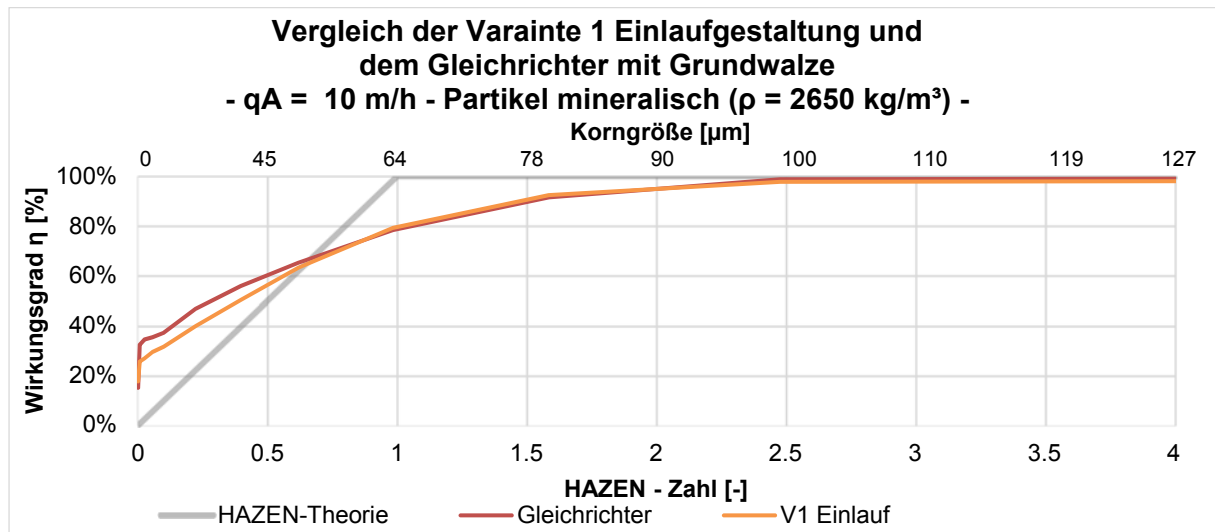


Bild 5.52: Darstellung der Partikelwirkungsgrade im Hazen-Diagramm Vergleich zwischen den beiden „Best-Cases“ aus der Literatur und der eigens entwickelten Konfiguration

Dies spiegelt sich auch im Vergleich der massengewichteten Wirkungsgrade wider (siehe Bild 5.53 und Tabelle 5-18). Hier ist eine deutliche Steigerung von über 5 %-Punkten von 39 % auf 44,8 % bei den mineralischen Fraktionen unter 63 μm , ersichtlich. Dagegen jedoch bei den mineralischen Fraktionen größer 63 μm lediglich eine Verbesserung von knapp nur 0,8 %-Punkten von knapp 94,96 % auf 95,04 %. Insgesamt liegt jedoch noch eine Wirkungsgradsteigerung des gesamten synthetischen Gemisches von 2,66 %-Punkten von 47,32 % auf 49,98 % vor.

Tabelle 5-18: Wirkungsgrade des Gleichrichters, verglichen mit der Variante V1 Einlauf

		V1 Einlauf		Gleichrichter mit Grundwalze		Verbesserung von V1 zu Gleichrichter	
		4 m/h (%)	10 m/h (%)	4 m/h (%)	10 m/h (%)	4 m/h (%)	10 m/h (%)
AFS < 63 μm	min.	57,03	39,04	60,34	44,81	3,31	5,77
	org.	14,58	5,76	24,53	5,44	9,95	-0,32
	synth.	46,63	30,89	51,57	35,16	4,94	4,27
AFS \geq 63 μm	min.	99,39	94,96	95,12	95,04	-4,27	0,08
	org.	46,48	32,08	52,45	33,53	5,97	1,45
	synth.	76,22	67,41	76,43	68,10	0,21	0,69
Gesamt	min.	73,06	60,20	73,51	63,82	0,45	3,62
	org.	33,53	21,39	41,11	22,12	7,58	0,73
	synth.	59,94	47,32	62,76	49,98	2,82	2,66

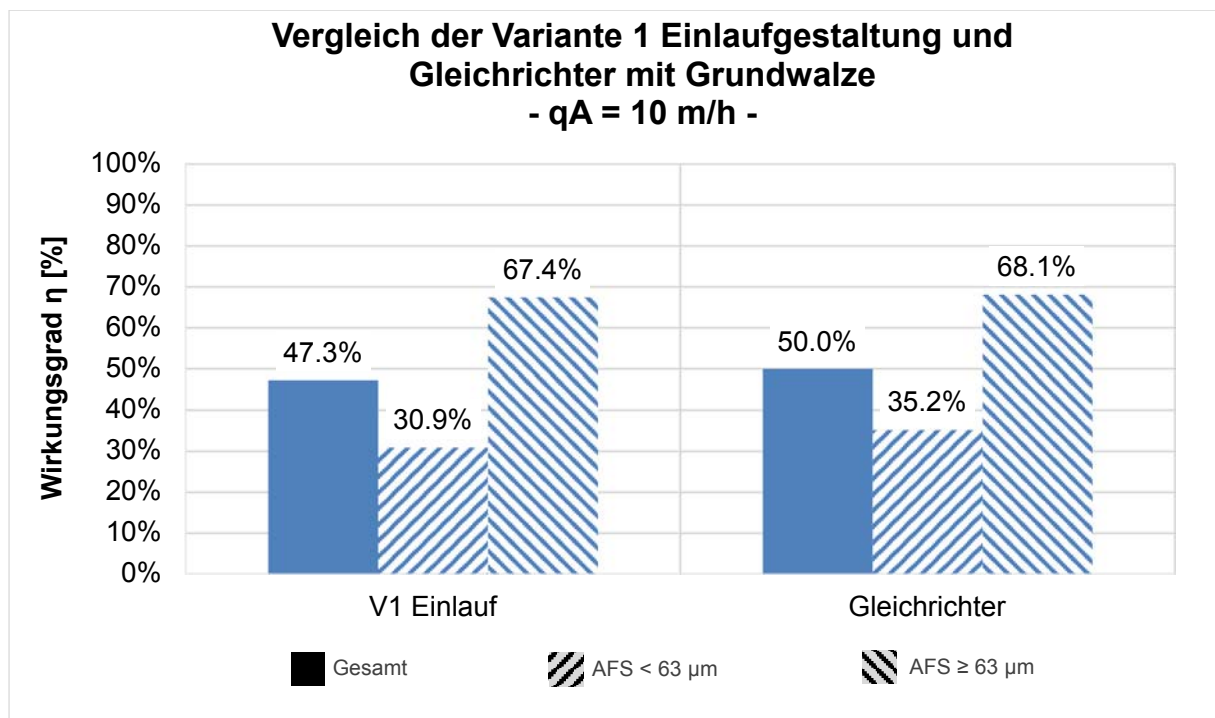


Bild 5.53: Vergleich der Fraktionswirkungsgrade zwischen der Variante 1 Einlauf und dem Gleichrichter mit Grundwalze für $q_A = 10 \text{ m/h}$

Die Auswirkungen der verschiedenen Einbaukonstruktionen im Einlauf sind für die sowohl bei $q_A = 10 \text{ m/h}$ als auch $q_A = 4 \text{ m/h}$ vergleichbar untereinander. Insgesamt sind die Wirkungsgrade jedoch bei einer Reduktion der Oberflächenbeschickung von $q_A = 10 \text{ m/h}$ auf $q_A = 4 \text{ m/h}$ um rund 13 %-Punkt besser.

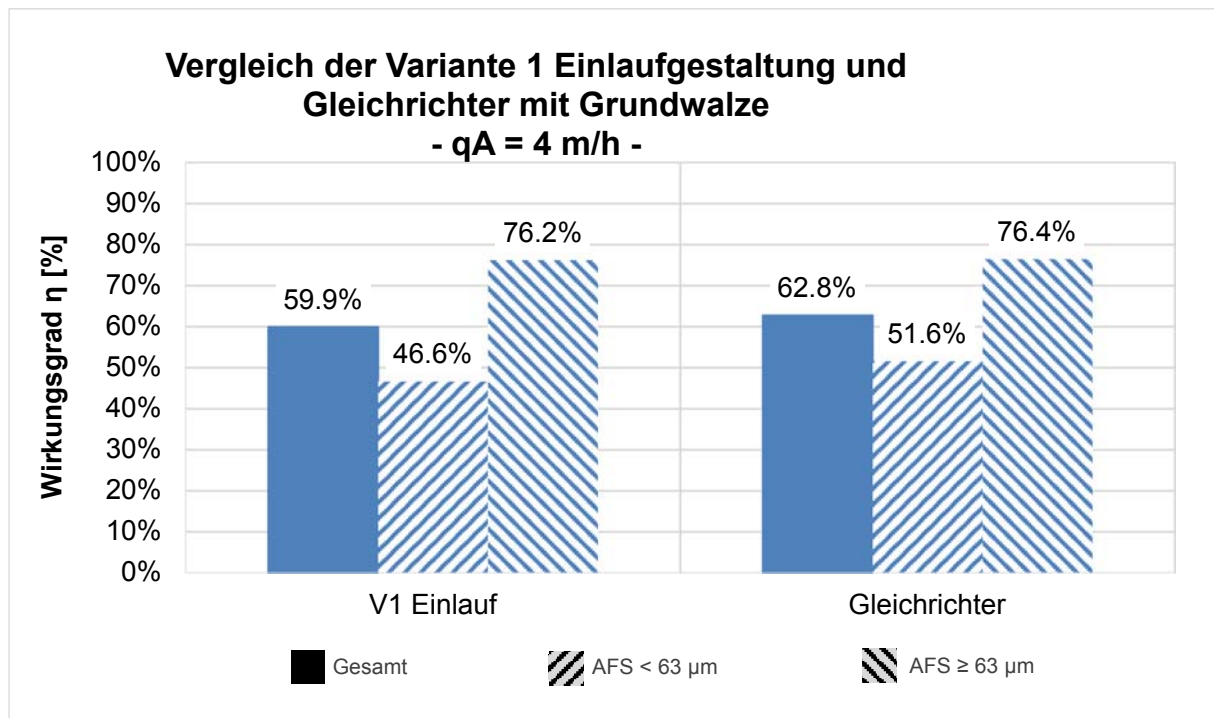


Bild 5.54: Vergleich der Fraktionswirkungsgrade zwischen der Variante 1 Einlauf und dem Gleichrichter mit Grundwalze für $q_A = 4 \text{ m/h}$

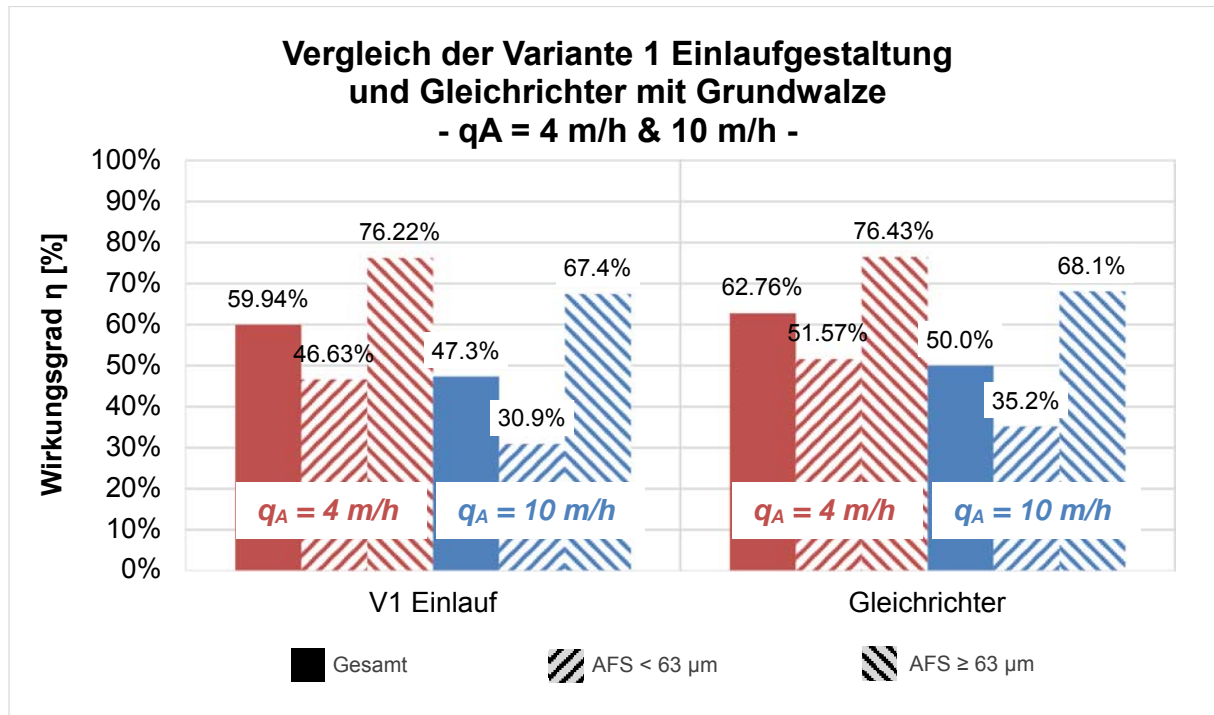


Bild 5.55: Vergleich der Fraktionswirkungsgrade zwischen der Variante 1 Einlauf und dem Gleichrichter mit Grundwalze für $q_A = 4 \text{ m/h}$ (rot) und $q_A = 10 \text{ m/h}$ (blau)

Aufbauend auf den Erkenntnissen durch die Berechnung von Wirkungsgraden wurden die Einflüsse verschiedener Sieblinien auf die massegewichteten Gesamtwirkungsgrade untersucht. Um diesen zu untersuchen, wurde in einem ersten Schritt der Anteil der Feinfraktionen deutlich erhöht und, gegensätzlich dazu, in einem zweiten Schritt der Anteil der groben Fraktionen deutlich erhöht. Die in dem Diagramm Bild 5.56 dargestellten Sieblinien mit den eingezeichneten „Grenz-Sieblinien“ grenzen die bereits aus der Literatur ermittelten Sieblinien ein.

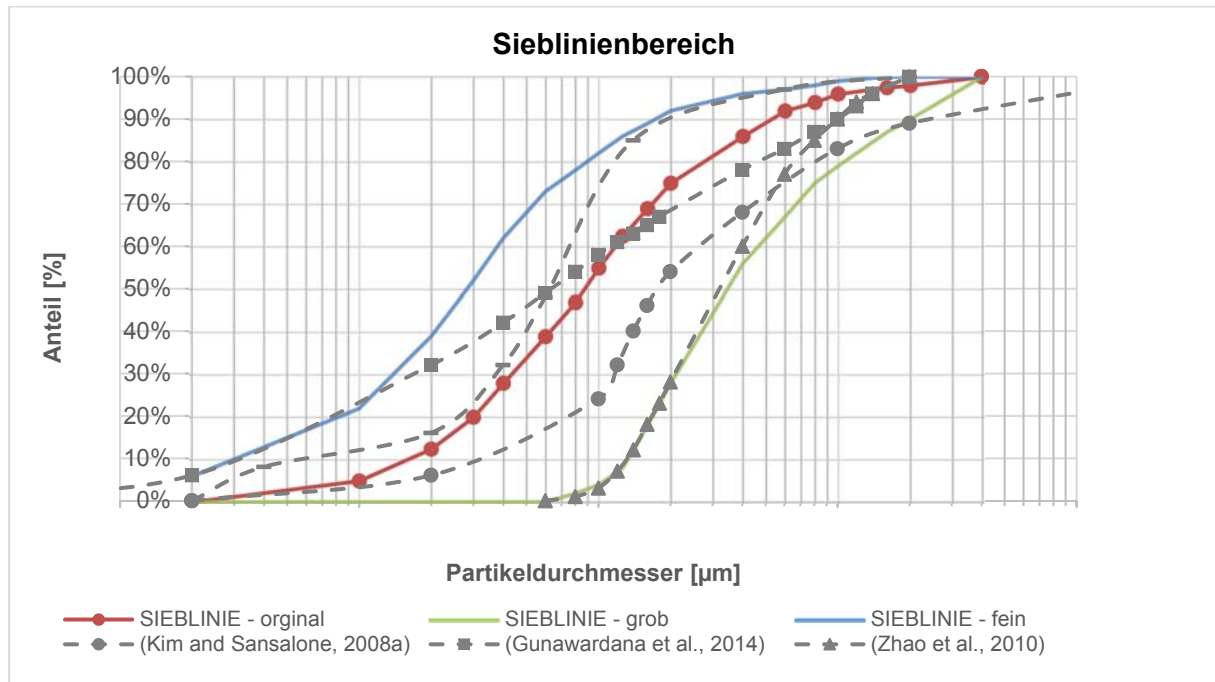


Bild 5.56: Darstellung der Sieblinie mit erhöhtem Fein- und Grobanteil

In der folgenden Tabelle 5-19 sind die zugehörig zu den im Diagramm Bild 5.56 dargestellten Summenlinien die Summenhäufigkeiten angegeben. Die „originale“ Sieblinie beschreibt das für alle Wirkungsgrade angenommene synthetische Partikelgemisch. Bei der Summenhäufigkeit der „grobten“ Sieblinie ist der Anteil der gröberen Fraktionen und bei der Summenhäufigkeit „Fein“ der Anteil der feineren Fraktionen deutlich erhöht worden. Somit können Aussagen zu den massegewichteten Gesamtwirkungsgaden gegeben werden, welche dann eine Spannweite abdecken, die alle hier ermittelten Literaturdaten umfasst.

Tabelle 5-19: Summenhäufigkeiten der Sieblinien

Durchmesser (μm)	Summenhäufigkeit	Summenhäufigkeit	Summenhäufigkeit
	original (%)	grob (%)	fein (%)
1	0,00	0,00	6,00
5	5,00	0,00	22,00
10	12,50	0,00	39,00
15	20,00	0,00	52,00
20	28,00	0,00	62,00
30	39,00	0,00	73,00
40	47,00	2,00	78,00
50	55,00	4,00	82,00
63	62,50	8,00	86,00
80	69,00	18,00	89,00
100	75,00	28,00	92,00
200	86,00	56,00	96,00
300	92,00	67,00	97,00
400	94,00	75,00	98,00
500	96,00	79,00	99,00
800	97,50	87,00	100,00
1000	98,00	90,00	100,00
2000	100,00	100,00	100,00

Bei der Auswertung der Sieblinien wurde festgestellt, dass die Abweichungen resultierend aus den verschiedenen Gewichtungen der Sieblinien einen durchaus hohen Unterschied in den resultierenden massegewichteten Wirkungsgraden haben. Im folgenden Bild 5.57 ist beispielhaft für das Höhenverhältnis $H/H = 0.25$, bei einer hydraulischen Belastung von $q_A = 10 \text{ m}^3/\text{h}$, die massegewichteten Wirkungsgrade der feinen, der originalen und der groben Sieblinie dargestellt. Zu unterscheiden sind hierbei zum einen die Wirkungsgrade der Fraktionen unter $63 \mu\text{m}$ und über $63 \mu\text{m}$ sowie der gesamten Sieblinie. Weiterhin ist nach den Wirkungsgraden der

mineralischen und organischen Dichte der Partikel zu unterscheiden. Die Unterschiede in den feinen Fraktionen liegen bei bis zu 19 % Abweichungen. Dabei haben die Wirkungsgrade der „groben“ Sieblinie nahezu kaum Abweichungen zueinander. Bei den Wirkungsgraden für die Sieblinien $\geq 63 \mu\text{m}$ belaufen sich die Abweichungen der Wirkungsgrade auf bis zu 4 %. Am größten sind die Abweichungen bei der Betrachtung der gesamten Sieblinie. Eine höhere Abweichung zur originalen Sieblinie hat die „grobe“ Sieblinie. Hier ist die Abweichung der mineralischen Partikelfraktionen von 38 %-Punkten am höchsten. Gegensätzlich dazu ist die Abweichung der „feinen“ Sieblinie lediglich für das synthetische Gemisch bei 21 %-Punkten und somit nur knapp die Hälfte der Abweichung zwischen der „originalen“ und „groben“ Sieblinie.

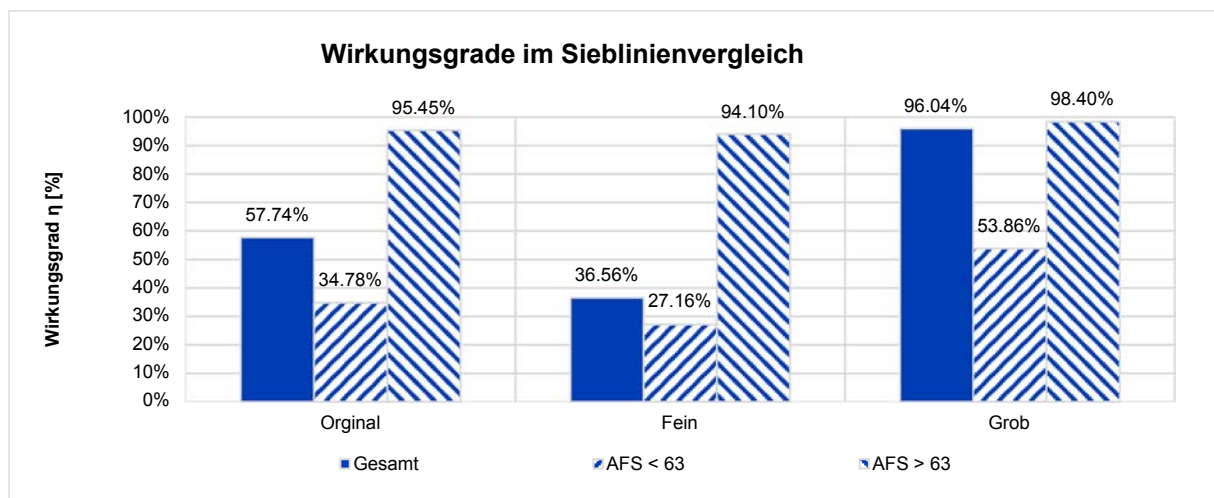


Bild 5.57: Vergleich der Fraktionswirkungsgrade bei originaler, feiner und grober Siebliniensammensetzung

Das Ergebnis dieser Betrachtung, zeigt den großen Einfluss auf den hier immer erwähnten und berechneten Wirkungsgraden durch eine veränderte Zusammensetzung der Sieblinienfraktionen.

Durch die Betrachtung einer einheitlichen Sieblinie für die hier in MEREBEN ermittelten Wirkungsgrade bleiben diese untereinander vergleichbar. Jedoch müssen diese im Kontext zu anderen Untersuchungen immer auf Basis der Zusammensetzung der Sieblinie verstanden werden.

5.5 Fazit

Auf Basis einer Literaturrecherche und einer Vielzahl hydro-numerischer Simulationen wurden sowohl über das hydraulische Verhalten als auch über die erzielbaren Reinigungsleistungen der Rechteckbecken einige neue Erkenntnisse erlangt.

Die Schlussfolgerungen werden hier in den folgenden Thesen zusammengefasst:

1. 70 % der Metallfrachten im Niederschlagsabfluss sind gebunden an die Fraktionen $\leq 44 \mu\text{m}$.
2. Eine gleichmäßige Durchströmung ist lediglich zur Abscheidung größerer Partikelfraktionen als Zielführend betrachtet.
3. Durch Rezirkulationszonen und den darauf resultierenden horizontalen Scherschichten kann der Wirkungsgrad für feinere Partikelfraktionen verbessert werden.
4. Vertikale Scherschichten, wie sie bei Rezirkulationen mit senkrechter Achse auftreten, bewirken eine Verschlechterung der Wirkungsgrade von Partikelfraktionen unter $45 \mu\text{m}$.
5. Für die feinen Fraktionen unterhalb von $45 \mu\text{m}$ sind bessere Wirkungsgrade möglich, als die Hazen-Theorie suggeriert.
6. Die gröberen Fraktionen oberhalb von ca. $45 \mu\text{m}$ erreichen die theoretischen Wirkungsgrade nach Hazen meist nicht.
7. Bei einer masse-gewichteten Auswertung von Gesamtwirkungsgrade wird das konträre Verhalten der einzelnen Fraktionswirkungsgrade nicht ersichtlich, da sich die Unterschiede gegenseitig herausmitteln.
8. Der Einfluss der Abmessungsverhältnisse auf den Wirkungsgrad eines Beckens ist bei optimaler Anströmung marginal, jedoch wird zu verhältnismäßig langen Becken geraten, da diese robuster gegenüber Mängeln in der Anströmung sind.
9. Die Verbesserung der Wirkungsgrade von optimal angeströmten Becken mittels Einbauten, insbesondere mit dem Einbau des Gleichrichters, ist bei der Betrachtung ganzer Sieblinien marginal.
10. Gegenüber einer „worst-case“-Variante erzielt ein optimal angeströmtes Becken V0 Grundvariante einen doppelt so hohen Gesamt-Wirkungsgrad.
11. Optimal angeströmte und konstruierte Becken (nach DWA-T 3 und DWA-A 166) benötigen keine Einbauten im Zulauf.
12. Nicht optimal angeströmte oder nicht optimal proportionierte Becken können durch einen Gleichrichter mit Grundwalze beste Wirkungsgrade erzielen.
13. Gegensätzlich zu den geringen Abweichungen der einzelnen geometrischen Konfigurationen zueinander, sind die Abweichungen bei veränderten Sieblinien signifikant. Somit lässt sich bei einer „Verschiebung“ der Sieblinien, sodass die gesamte Range der aus der Literatur gesammelten umschlossen ist, eine Veränderung des Wirkungsgrades von bis zu 25 %-Punkten herbeiführen.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigen, dass eine Festlegung der Zielgröße AFS_{fein} auf die Fraktion $\leq 63 \mu\text{m}$ nicht zweckmäßig ist. Besser wäre ein Durchmesser von $45 \mu\text{m}$ als Grenze geeignet. Die kleineren Partikel, welche 70 % der Metallfracht tragen, reagieren sehr gut auf Rezirkulationen mit liegender Achse, die als Grundwalze direkt hinter dem Einlauf am sinnvollsten angeordnet sind. Die größeren Partikel zwischen ca. $45 \mu\text{m}$ und $63 \mu\text{m}$ Durchmesser reagieren, gemeinsam mit den Partikeln über $63 \mu\text{m}$, besser auf gleichgerichtete, gleichmäßig verteilte Strömung im Becken. Das Vorkommen von Rezirkulationen im Becken senkt sofort deren Wirkungsgrade.

Es wird daher empfohlen, die Definition der AFS_{fein} -Fraktion diesen Erkenntnissen anzupassen.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Wirkungsgrade sehr stark auf die Zusammensetzung der Größen und Materialien (Dichten) in den AFS abhängen. Zur Beurteilung der im Einzelfall erzielbaren ökologischen Verbesserung im Gewässer wird es daher notwendig sein, die mittlere bzw. signifikante Zusammensetzung der Sedimente zu messen, um die richtige Konstruktion und Auslegung eines Regenbeckens an einem konkreten Standort zu finden.

Für den Fall, dass die Örtlichkeit nicht erlaubt, die in den DWA-Publikationen vorausgesetzten, idealen Anströmbedingungen einzuhalten und Abmessungen zu realisieren, können der hier optimierte Gleichrichter mit Grundwalze Abhilfe schaffen.

Bei einer bereits idealen Anströmung und Konzeption eines Beckens nach dem DWA-A166 (2013) und dem DWA-T3 (2013) kann ein Einbau von Einlaufkonstruktionen keine deutliche Verbesserung der massegewichteten Wirkungsgrade mehr erzielen. Dem gegenüber stehen die Becken, die auf Grund örtlicher Restriktionen nicht optimal gestaltet werden können. Bei diesen ist durch die gezielte Änderung der Durchströmungscharakteristik mittels Einbaukomponente Gleichrichter eine deutliche Verbesserung der Wirkungsgrade gegenüber der „schlechten“ Grundvariante zu verzeichnen. Über die Zweckmäßigkeit einer Grundwalze hinter dem Einlauf muss entschieden werden, wenn bekannt ist, welche Partikelfraktionen bevorzugt aus dem Zulauf abgeschieden werden sollen.

6 Neubau-Rundbecken

6.1 Einführung und Untersuchungskonzept

Neben dem Hazen-Prinzip zur Partikelabscheidung, mit seiner linearen Durchströmung der Becken, gibt es das Prinzip der Zyklonabscheider, bei dem durch tangentialer Anströmung eine spiralförmige Strömung hervorgerufen wird, die auf der Beckensohle von außen nach innen wirkt. Als Nebeneffekt werden Fliehkräfte mobilisiert, die wegen der unterschiedlichen Dichte von Partikeln und Fluid möglicherweise dazu dienen, die Partikel schneller zu konzentrieren, als dies bei reiner Schwerkraftwirkung der Fall wäre. Regenklärbecken in Rundbauweise werden als begehbare Wirbelschachtbecken mit flach geneigter Sohle oder als nicht begehbare Zyklonbecken mit stärker profilierter, selbstreinigender Sohle ausgebildet.

Nach Kemper et al. (2015) geht aus der WIBAS Datenbank eine prozentuale Verteilung der Häufigkeit für Rechteckbecken von 74 % und für Rundbecken von 26 % hervor. Nach DWA-A 166 (2013) sollte bei tangentialer Anströmung, auf etwa $\frac{2}{3}$ des Beckenradius, der Klärüberlauf im 4. Quadranten, gezählt in Drehrichtung vom Zulauf her, angeordnet werden. Der Klärüberlauf kann innen oder außenliegend sein, wobei der außen liegende Klärüberlauf v.a. für kleinere Becken in DWA-A 166 (2013) hydraulisch besser bewertet wird. Ein zentraler Zulauf mit ringförmigem Klärüberlauf über den gesamten Umfang, wie bei Nachklärbecken, wird aus Kostengründen in der Regenwasserbehandlung nicht eingesetzt.

In diesem Kapitel 6 wird ausschließlich auf die Rundbauweise eingegangen. Die klärtechnische Wirksamkeit eines Beckens ist von vielen Faktoren abhängig. Angefangen von der geometrischen Gestaltung des Beckens über die hydraulische Belastung bis hin zur Stoffzusammensetzung des zu reinigenden Niederschlagswassers. Ziel dieses Arbeitspunktes ist es, zu ermitteln, welche Kräfte und Strömungsvorgänge in Rundbecken wirksam sind und ob sie, bezogen auf das umbaute Volumen, möglicherweise grundsätzlich besser zu bewerten sind, als rechteckige Regenbecken.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise bzw. das Untersuchungskonzept näher beschreiben.

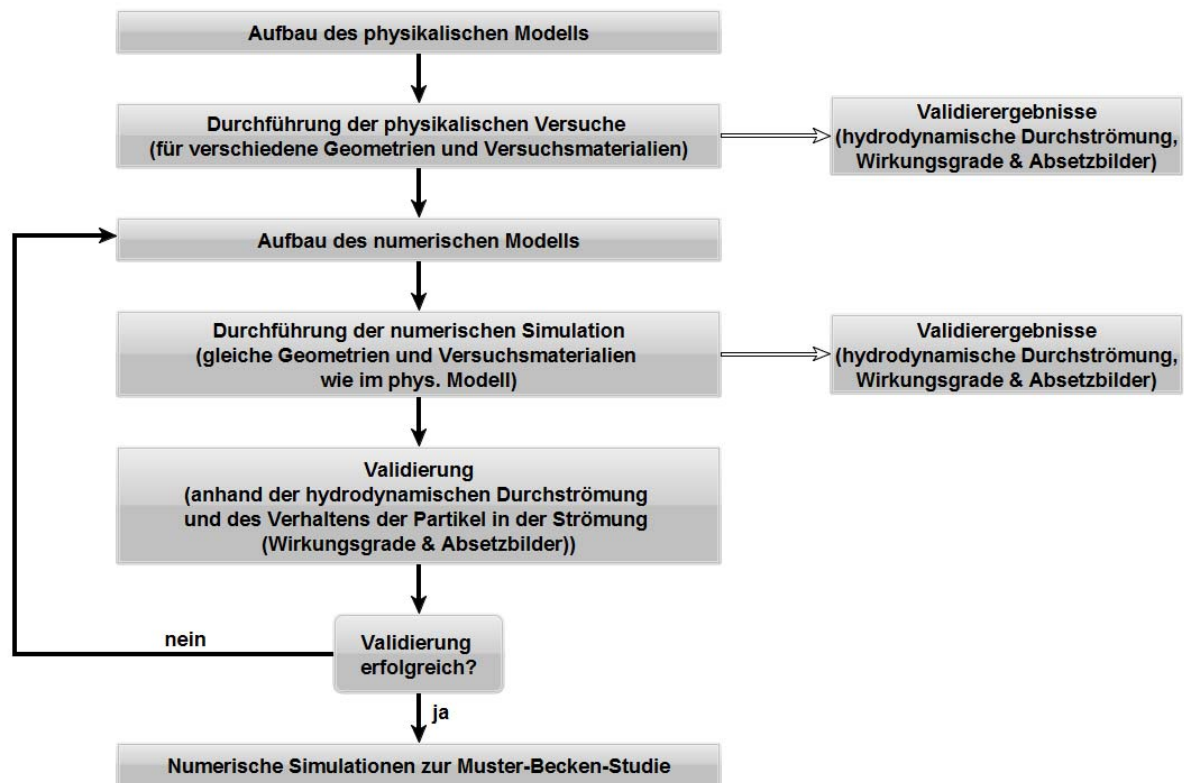


Bild 6.1: Untersuchungskonzept

Wie in Bild 6.1 beschrieben, musste für die Durchführung von physikalischen Versuchen zunächst ein physikalisches Modell entworfen und gebaut werden. Dazu sind gängige Regenklärbecken in der Praxis und Becken aus dem DWA-A 166 (2013) und DWA-T3 (2013) analysiert worden. Aus diesen „Vorlagen“ wurde dann ein Becken entworfen, welches zum einen repräsentativ für Bestandsbecken aber zum anderen auch so gestaltet ist, dass eine Anfertigung im Modellmaßstab realisierbar und wirtschaftlich ist.

Das Versuchsprogramm wurde für verschiedene Randbedingungen und mit zwei unterschiedlichen Versuchspartikel-Materialien geplant. Ziel der physikalischen Modellversuche war es, Daten zur Validierung des numerischen Modells bereitzustellen. Zu diesem Zweck sollen die hydrodynamische Durchströmung sowie das Partikel-Verhalten in Form von Absetzbildern und Absetzwirkungsgraden herangezogen werden.

Ziel der numerischen Studie war es, eine optimierte Konfiguration für den Neubau eines Regenklärbeckens in Rundbauweise zu entwickeln. Zunächst wurde der Einfluss des Zulaufrohr-Durchmessers untersucht. Anschließend wurden unterschiedliche Durchmesser-Tiefen-Verhältnisse simuliert und bewertet. Dann erfolgte mit der bis dahin besten Konfiguration eine Analyse zum Einfluss des Winkels, in dem das Zulaufrohr an das Becken anschloss. Zusätzlich wurden zwei „Sonderkonstruktionen“ betrachtet. Zum einen wurde eine Kombination aus einem tangentialen Zulauf mit einem zentralen Klärüberlauf betrachtet, zum anderen

eine Konfiguration aus einem zentralen Zulauf und einem außen umlaufenden Klärüberlauf (ähnlich wie bei Nachklärbecken von Kläranlagen, s. Bild 6.53).

Im Anschluss wurde aus den bis dahin gewonnen Erkenntnissen eine optimierte Konfiguration zusammengestellt und für dieses Becken dann das Verhalten bezüglich unterschiedlicher hydraulischer Belastungen (Oberflächenbeschickungen) untersucht. Schließlich sollen hier, auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse, zu bestimmten Bauteilen von Rundbecken Empfehlungen zur Gestaltung (z.B. Lage und Durchmesser des Zulaufs) gegeben werden.

6.2 Stand der Wissenschaft und Technik zu Rundbecken

Bajcar et al. (2009) untersuchten den Einfluss von wesentlichen Parametern auf den Prozess der Sedimentation eines industriellen Absetzbeckens. An dem in Bild 6.2 abgebildeten physikalischen Modell führten sie Experimente mit einer organischen Suspension durch. Dazu wurden die Zu- und Ablaufkonzentrationen gemessen. Es wurden unterschiedliche Zufluss-Konzentrationen, unterschiedliche Zulaufhöhen und Durchflüsse untersucht. Es hat sich gezeigt, dass das Alter der Suspension nur geringen Einfluss auf die Sedimentationsleistung hat, die Zulaufkonzentration dagegen einen starken Einfluss. Auch die Höhe des Zulaufes hat nur geringen Einfluss auf die Ablaufkonzentration. Entscheidenden Einfluss haben die Durchströmungsbedingungen im Absetzbecken, welche v.a. aus dem Zulaufstrom und der Bauweise des Absetzbeckens selbst resultieren.

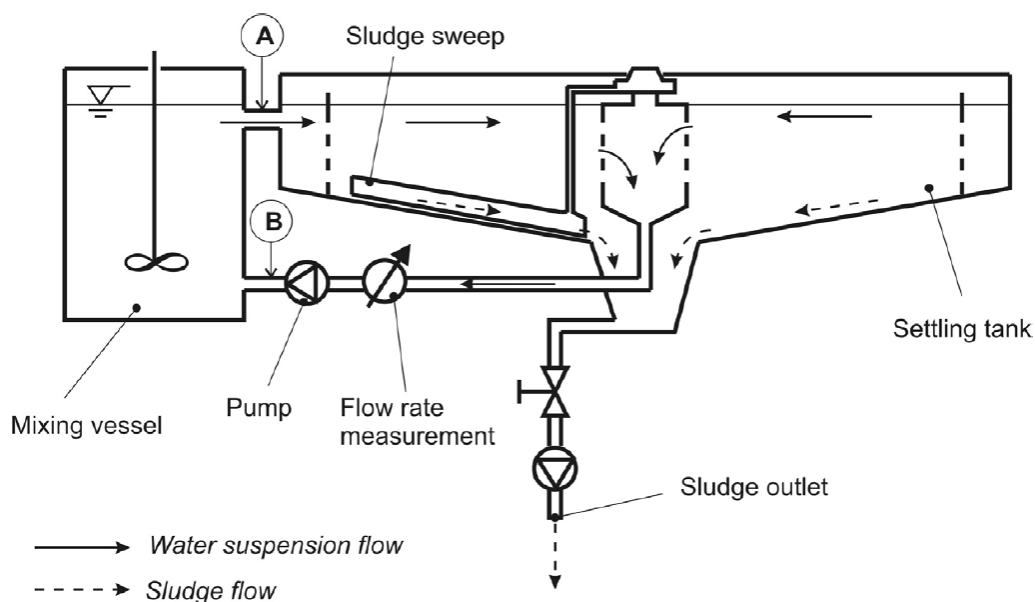


Bild 6.2: Schematische Skizze des Modellaufbaus (Bajcar et al. 2009)

Im Rahmen einer Diplomarbeit von Jörisen (2009) an der FH Münster sind Untersuchungen zum Strömungs- und Stofftransportes in Regenbecken durchgeführt worden. Untersucht wurde unter anderem ein Regenzyklonbecken mit einer mittleren Höhe von 4,45 m, einer Sohleineigung von 2 % und einem Klärüberlauf, der sich aus insgesamt 16 einzelnen Auslässen von 2,51 m Länge zusammensetzte (Bild 6.3). Das verwendete Gitternetz bestand aus rund 1,17 Mio. Zellen. Das Becken wurde mit einer Oberflächenbeschickung von 10 m/h belastet, woraus sich ein Zufluss von 1,7 m³/s ergab. Verwendet wurde das Softwarepaket FLUENT von ANSYS. Für die Simulation der partikulären Stoffe wurde der Euler-Euler-Ansatz gewählt.

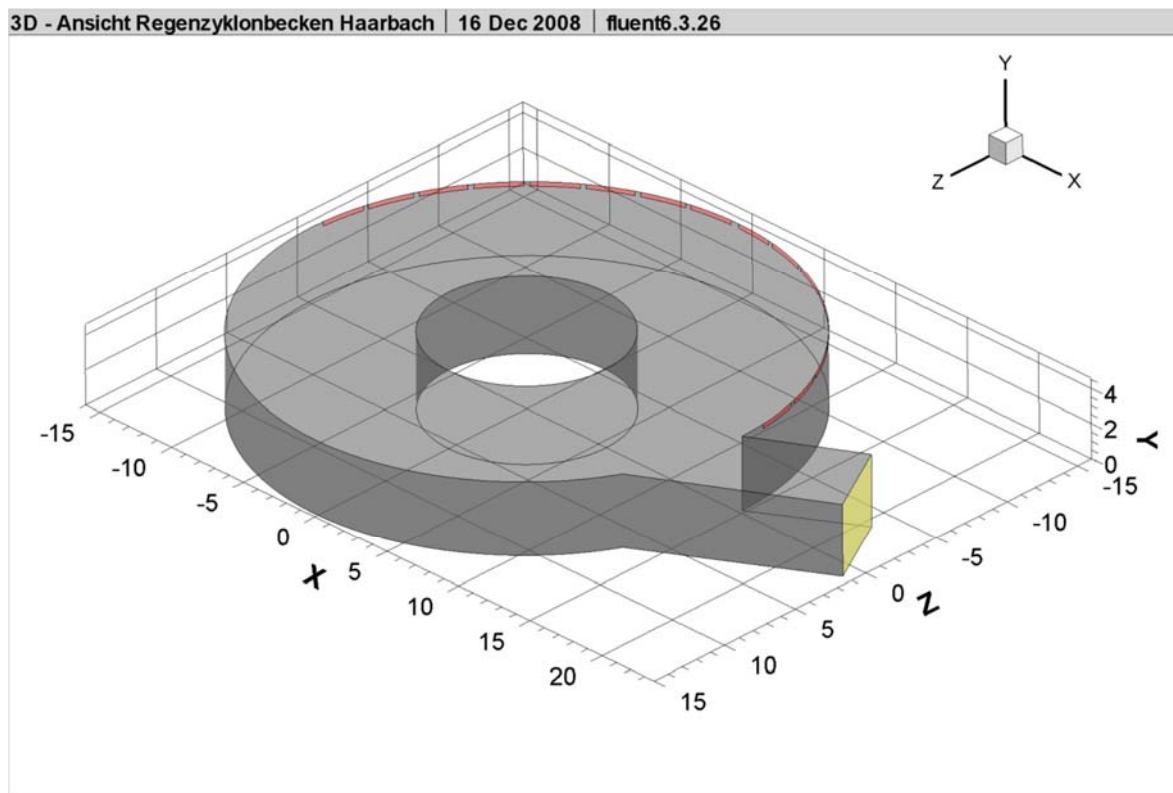


Bild 6.3: 3D-Ansicht des untersuchten Regenzyklonbeckens (Jörisen 2009)

Die Ergebnisse von Jörisen (2009) zeigten, dass Partikel mit einer Sinkgeschwindigkeit von 5 m/h einen Absetzwirkungsgrad von etwa 38 % aufwiesen (vgl. Bild 6.4). Partikel mit einer Sinkgeschwindigkeit von 10 m/h wurden zu ca. 83 % zurückgehalten. Partikel mit einer Sinkgeschwindigkeit von 15 m/h wurden durch das Becken fast vollständig zurückgehalten.

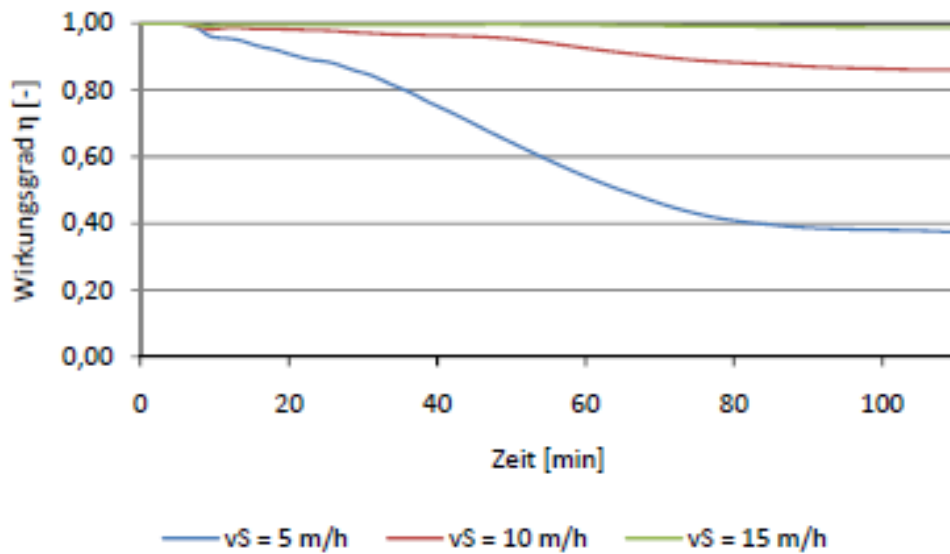


Bild 6.4: Verläufe der Absetzwirkungsgrade des untersuchten Beckens mit $q_A = 10$ m/h (Jörissen 2009)

Partikel mit einer Sinkgeschwindigkeit von 5 m/h haben bei einer Oberflächenbeschickung von 10 m/h eine Hazen-Zahl (Ha) von 0,5 und müssten nach der Hazen-Theorie in einem ideal durchströmten Becken (Pfropfenströmung) zu 50 % sedimentieren. Für $v_s = 10$ m/h ergibt sich eine Ha -Zahl von 1,0 und für $v_s = 15$ m/h resultiert eine Ha -Zahl von 1,5.

Neben dem Absetzwirkungsgrad einzelner Partikel wurde auch untersucht, in welchen Bereichen des Beckens sich welche Art von Partikeln absetzt. Partikel mit höherer Sinkgeschwindigkeit sedimentieren bevorzugt in Beckenmitte und weniger im Bereich der Außenwände. Partikel geringerer Sinkgeschwindigkeit sedimentieren erwartungsgemäß schlechter (vgl. Absetzwirkungsgrad) und bevorzugt in Bereichen gegenüber des Zulaufs (vgl. Bild 6.5).

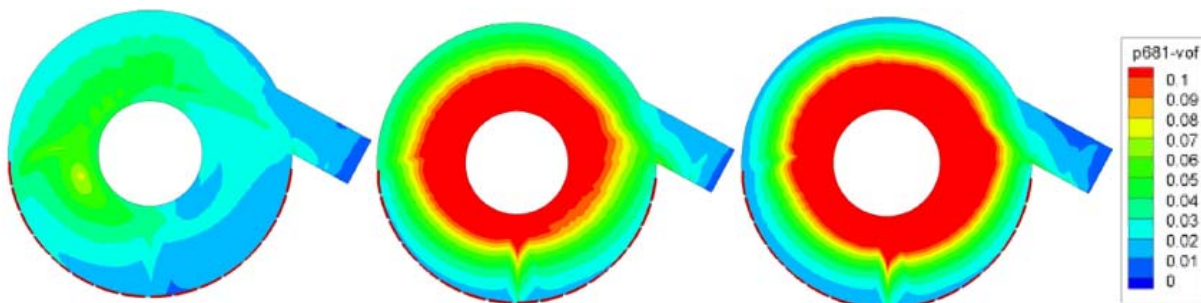


Bild 6.5: Sedimentationsbereiche mit $q_A = 10$ m/h und links: $v_s = 5$ m/h; Mitte: $v_s = 10$ m/h; rechts: $v_s = 15$ m/h (Jörissen 2009)

Huang und Jin (2011) haben ein numerisches Modell für runde Absetzbecken mit zentralem Zulauf und außen umlaufendem Klärüberlauf entwickelt und mit bisherigen Modellen vergli-

chen. Der Vergleich zeigte, dass das neu entwickelte Modell in der Lage war, zusätzliche Informationen wie z.B. Schwankungen des Wasserspiegels, Gesamt-Absetzwirkungsgrad und Schlamm Dicke am Beckenboden zu berechnen. Das untersuchte Becken und die betrachteten Partikelklassen sind in Bild 6.6 dargestellt.

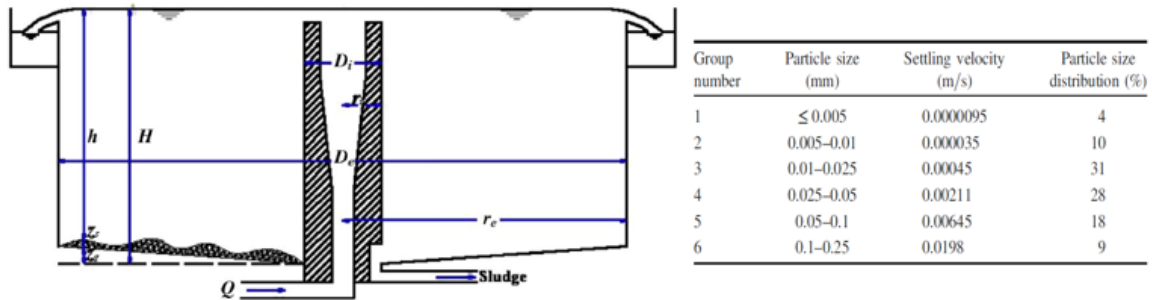


Bild 6.6: links: Untersuchtes Becken in Rundbauweise mit zentralem Zulauf; rechts: Partikel-Durchmesser und Sinkgeschwindigkeit der untersuchten Partikelklassen (Huang und Jin 2011)

Das betrachtete Becken besaß einen Durchmesser von 20 m, der Zulauf-Durchmesser betrug 3,0 m. Die Wassertiefe am Klärüberlauf belief sich auf 3,2 m. Das Becken wurde mit einem Zufluss von $Q = 0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ beschickt, was einer Oberflächenbeschickung von 1,6 m/h entsprach. Die betrachteten Partikel hatten eine Dichte von 1.300 kg/m^3 .

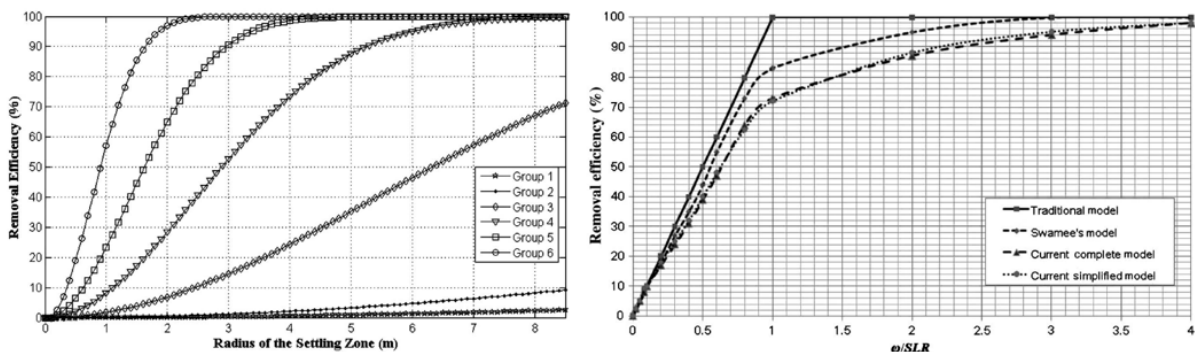


Bild 6.7: links: Absetzwirkungsgrad einzelner Partikelklassen entlang des Becken-Radius; rechts: Vergleich des Absetzwirkungsgrads verschiedener Modelle (Huang und Jin (2011))

Die Autoren stellten anhand der Ergebnisse fest, dass ihr neu entwickeltes Modell in der Lage war, weitergehende Informationen zu liefern, als es die bis dahin entwickelten Modelle konnten. In Bild 6.7 ist links der Absetzwirkungsgrad einzelner Partikelklassen entlang des Becken-Radius' dargestellt. Erwartungsgemäß sedimentierten grobe Partikelklassen (Group 6) deutlich schneller und häufiger als sehr feine Partikelklassen (Group 1). Rechts in Bild 6.7 ist der Absetzwirkungsgrad bestimmter Partikelklassen verschiedener Modelle abgebildet. Hier

zeigte sich, dass das neu entwickelte Modell der Autoren abweichende Ergebnisse zu den bisher existierenden Modellen lieferte, was hauptsächlich an dem höheren Detaillierungsgrad des Modells lag. Das Modell soll künftig als Konstruktionshilfe zur Auslegung solcher Becken dienen.

Liu et al. (2011) haben CFD-Untersuchungen zur Auslegung von Vorklärbecken durchgeführt. Dazu haben sie ein im Durchmesser etwa 47 m großes Vorklärbecken verwendet. Für dieses Becken wurden dann insgesamt acht unterschiedliche Zulauf-Konfigurationen bezüglich der Zulaufhöhe und des Zulauf-Durchmessers getestet. Je nach Zulauf-Konfiguration betrug die Beckentiefe zwischen 3,7 m und 4,6 m (Bild 6.8). Verwendet wurde die Software OpenFOAM.

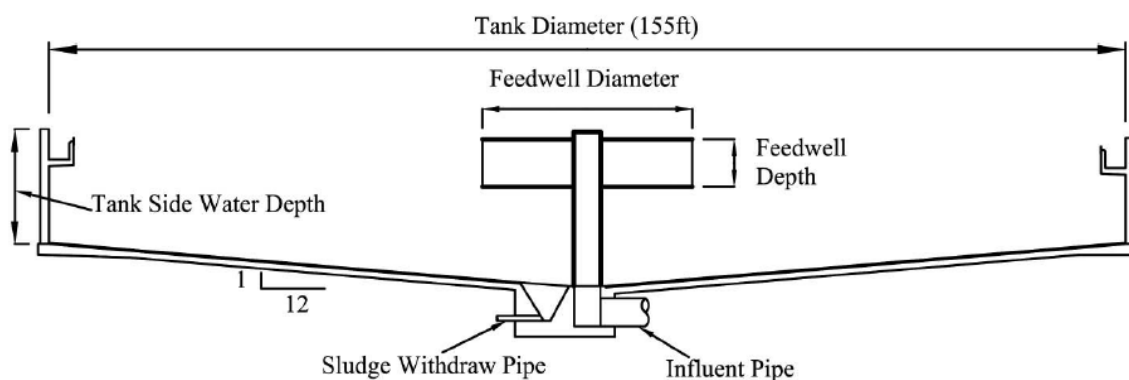


Bild 6.8: Randbedingungen für das untersuchte Vorklärbecken (Liu et al. 2011)

Für die Simulations-Studie wurde die Einlaufhöhe zwischen 1,52 m und 2,13 m unterhalb des Wasserspiegels variiert. Die Durchmesser der Zulaufkonstruktion wurden zwischen 12,2 m und 13,41 m variiert. Zunächst stellten die Autoren fest, dass die Einlaufhöhe einen größeren Einfluss auf den Wirkungsgrad hat, als der Zulauf-Durchmesser. Weiterhin wurde festgestellt, dass aus einer steigenden Höhe der Zulaufkonstruktion (Feedwell Depth) eine Verringerung des Wirkungsgrades resultierte. Die Autoren stellten fest, dass die Prallwand am äußeren Ring des Zulaufs (siehe Bild 6.9, gelber Ring) mit steigender Höhe der Konstruktion so nah zum Beckenboden gezogen wurde, dass eine Art Jet-Wirkung durch den geringen Fließquerschnitt entstand.

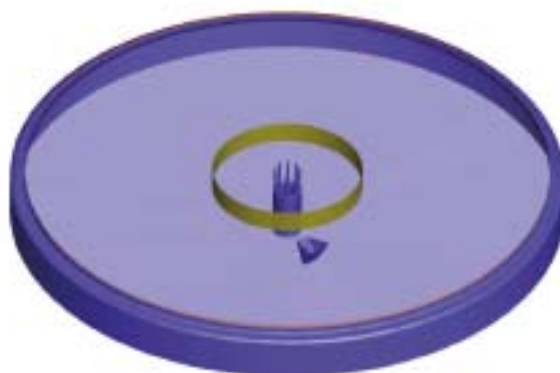


Bild 6.9: Ansicht des Vorklärbeckens (Liu et al. 2011)

Kemper et al. (2015) haben in-Situ Messungen an zwei Regenüberlaufbecken in Rundbauweise mit radialem, äußeren Zulauf und einem Klärüberlauf im vierten Quadranten durchgeführt. Die beiden Rundbecken erzielten einen mittleren Wirkungsgrad für die Feinfraktion von 46 %, dieser setzt sich aus einem Speicherwirkungsgrad von 20 % und einem Sedimentationswirkungsgrad von 21 % zusammen (vgl. Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Ermittelte Wirkungsgrade der untersuchten Rundbecken (Kemper et al. 2015)

Rundbecken	Anzahl	η	η_{Speicher}	η_{Sed}
Kuerten-Sülze	5	37 %	21 %	15 %
Grundbach	5	55 %	19 %	27 %
Median		46 %	20 %	21 %

Die Autoren stellten erwartungsgemäß fest, dass eine Reduzierung der Oberflächenbeschickung eine Steigerung des Wirkungsgrads bewirkte. Als weitere entscheidende Einflussfaktoren nennen die Autoren die Sinkgeschwindigkeit der Partikel, die Strömungsturbulenz im Becken sowie die hydraulische und stoffliche Belastungsdynamik.

Auf Grundlage der Untersuchungen und einer anschließenden Analyse schlugen die Autoren Maßnahmen vor, mit denen die Sedimentationsleistung und das Durchströmungsverhalten verbessert werden können (Bild 6.10). Allerdings ist ein Nachweis oder eine Abschätzung der erzielbaren Verbesserung des Sedimentationswirkungsgrades durch die vorgeschlagenen Maßnahmen nicht erbracht worden.

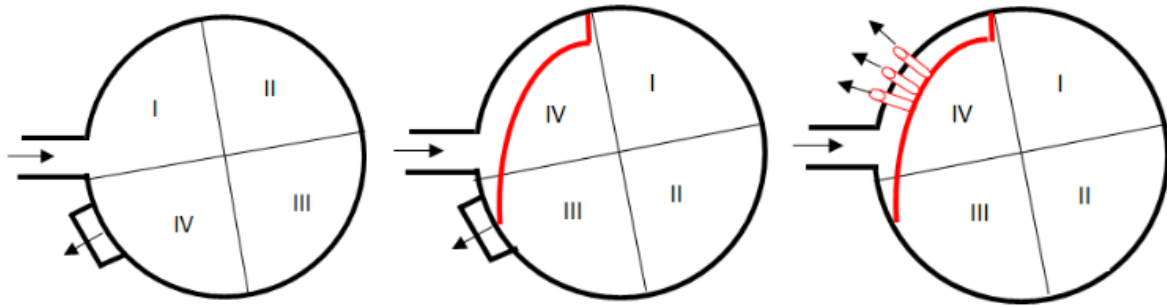


Bild 6.10: Maßnahme zur Regulierung der Strömung mit Hilfe einer Strömungsleitwand und Verlegung des Klarwasserabzugs in den empfohlenen 4ten Quadranten (Kemper et al. (2015)): Maßnahme zur Regulierung der Strömung mit Hilfe einer Strömungsleitwand und Verlegung des Klarwasserabzugs in den empfohlenen 4ten Quadranten (Kemper et al. (2015))

Patziger (2016) hat numerische Untersuchungen zu Möglichkeiten einer Verbesserung von bestehenden flachen Nachklärbecken durchgeführt. Der Autor betrachtete verschiedene Zulaufe. Durch die Optimierung der Zulauf-Gestaltung konnte das Volumen von Rezirkulationszonen um bis zu 45 % verringert werden. Mit steigender Beschickung der Becken verringerte sich erwartungsgemäß der Wirkungsgrad. Bei höheren Durchflüssen kam es wieder zur Ausbildung von größeren Rezirkulationszonen (Bild 6.11). Insgesamt kam der Autor zu dem Schluss, dass die Zulauf-Konfiguration maßgeblichen Einfluss auf die Durchströmung und damit auf den Wirkungsgrad hat.

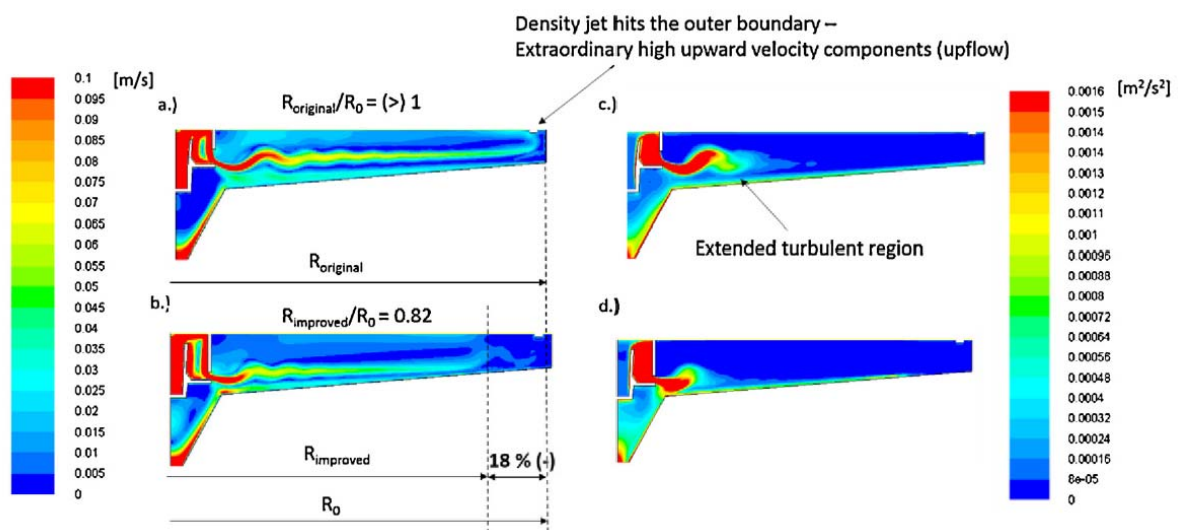


Bild 6.11: links: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten bei Regenwasserabfluss; a) originale Zulauf-Konfiguration, b) optimierte Zulauf-Konfiguration, rechts: Kontourplots der turbulenten kinetischen Energie: c) originale Zulauf-Konfiguration, d) optimierte Zulauf-Konfiguration (Patziger (2016))

Zusammenfassend kann an dieser Stelle gesagt werden, dass Regenbecken in Rundbauweise bislang nicht in dem Umfang erforscht worden sind, wie es die Rechteck-Bauweise ist. Untersuchte Bestandsbecken weisen in-situ-Sedimentationswirkungsgrade von 15 % bis 30 % und Gesamtwirkungsgrade von 37 % – 55 % auf. Dies lässt auf ein noch vorhandenes Optimierungspotential schließen. Wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad haben bestimmte Schlüssel-Parameter. Dies sind im Wesentlichen die Oberflächenbeschickung, die Sinkgeschwindigkeit der Partikel, die Strömungsturbulenz im Becken sowie die hydraulische und stoffliche Belastungsdynamik.

Bisher wurden Maßnahmen zur Optimierung von Rundbecken lediglich vorgeschlagen, jedoch wurden bislang keine Simulationsstudien zu bestimmten Einbauten durchgeführt. Auch wurden bisher keine Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss grundlegender geometrischer Abmessungen eines Beckens (Zulauf-Durchmesser, Zulauf-Winkel, Durchmesser und Tiefe des Beckens) auf den Absetzwirkungsgrad zu testen.

Aufgrund der bisher geringen Erfahrungswerte von Rundbecken, konzentrieren sich die Arbeiten hier zunächst auf Simulations-Studien zu grundlegenden Abmessungsverhältnissen sowie auf die Übertragbarkeit des Prinzips von runden Vor- und Nachklärbecken auf runde Regenklärbecken.

6.3 Material und Methoden

6.3.1 Physikalische Modellierung

Um Versuchsreihen an einem physikalischen Modellbecken durchführen zu können, wurde ein Modellbecken angefertigt. Der Beckenaufbau entspricht einem in der Praxis gängigen Wirbelschachtbecken in Rundbauweise.

6.3.1.1 Aufbau des physikalischen Modells

Bild 6.12 verdeutlicht das Funktionsschema des physikalischen Modells. Aus einem Vorlagebehälter wird der Zufluss zum Becken zunächst über eine frequenzgeregelte Pumpe in einen Zulaufbehälter befördert. Die Steuerung des Zuflusses erfolgt über ein MID. Vom Zulaufbehälter wird der Zufluss dann über ein Zulaufrohr in das Rundbecken geleitet. Über den Klärüberlauf (KÜ) wird der Ablauf über ein Rohrleitungssystem zurück in die Zisterne geleitet. Bild 6.13 zeigt das Gesamtsystem des Modellbeckens in der Ansicht.

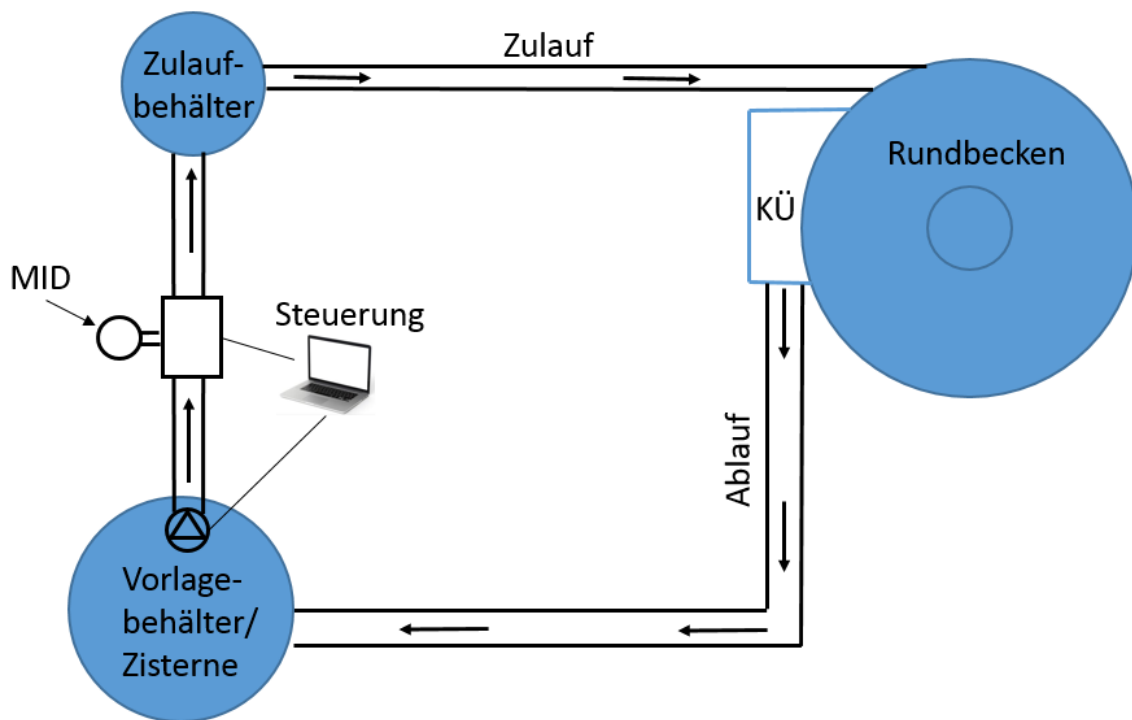


Bild 6.12: Funktionsschema des physikalischen Modells in Rundbauweise

Die Beckentiefe des Modellbeckens beträgt 0,40 m, wodurch sich ein D/T-Verhältnis von 3,75 ergibt. Tabelle 6-2 gibt eine Übersicht der wichtigsten geometrischen und hydraulischen Randbedingungen. Zur Skalierung der hydraulischen und geometrischen Parameter wurde das Froudsche Ähnlichkeitsgesetz $Fr_N = Fr_M$ nach (Strobl und Zunic (2006) im Maßstab 1:7,9 verwendet. Das Modellbecken kann über zwei separate Zuläufe beschickt werden.

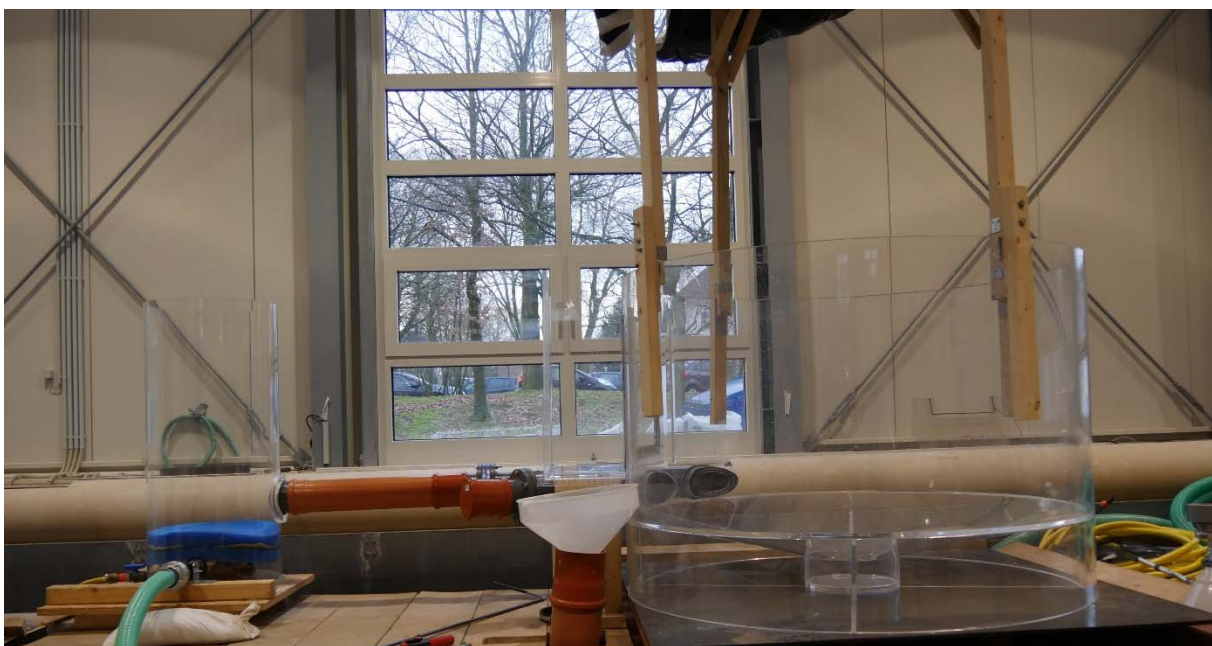


Bild 6.13: Ansicht des Gesamtsystem des Modellbeckens

Tabelle 6-2: Geometrische und hydraulische Randbedingungen des physikalischen Modells

	Parameter			Modellbecken
Geometrische RB	Modell-Maßstab	M	-	1:7,9
	Durchmesser/Tiefen-Verhältnis	D/T	-	3,75
	Durchmesser-Becken	$\varnothing_{\text{Becken}}$	(m)	1,50
	Tiefe-Becken	h_{Becken}	(m)	0,40
	Volumen	V	(m ³)	0,71
	Oberfläche	A_o	(m ²)	1,77
	Zulauf-Durchmesser	DN _{ZU}	(mm)	100
	Spez. Beckenvolumen (in Bezug auf das Referenzbecken)	V_s	(m ³ /ha)	14,14
Hydraulische RB	Fließgeschwindigkeit Einlauf	v_{Ein}	(m/s)	0,39
	Spez. Energieeintrag	p_{spez}	(W/m ³)	0,34
	Durchfluss	Q	(l/s)	3,10
	Oberflächenbeschickung	q_A	(m/h)	6,31
	Überfallhöhe am Wehr	$h_{\text{KÜ}}$	(cm)	3,02

Zulaufbehälter

Bild 6.14 zeigt den Zulaufbehälter, welcher über eine Druckrohrleitung beschickt wird. Das Turbulenzgitter sorgt dafür, dass der konzentrierte Zulaufstrom gleichmäßig und mit wenig Turbulenz in dem Behälter aufsteigen kann, sodass der Zufluss zum Becken möglichst frei von Drall- und Sekundärströmungen ist. Das verwendete Turbulenzgitter war eine gängige Filtermatte aus dem Aquarienbau.

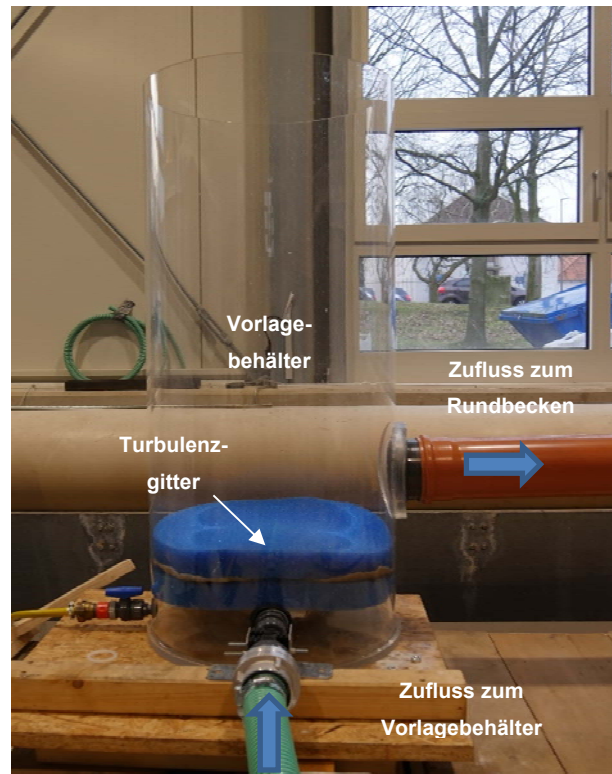


Bild 6.14: Zulaufbehälter mit Turbulenzgitter (blau)

Zulauf

Vom Zulaufbehälter gelangt der Zufluss in den Rohrzufluss des Beckens. Für das Modellbecken wurden zwei Zuläufe untersucht. Beide Zuläufe strömten tangential in das Becken ein. Zulauf 1 war so platziert, dass der Klärüberlauf im vierten Quadranten lag. Beim Zulauf 2 lag der Zulauf direkt unter dem Klärüberlauf, sodass eine möglichst lange Umlaufstrecke erzielt wurde. Voraussetzung für einen solchen Zulauf ist ein entsprechendes Platzangebot unterhalb des Klärüberlaufs. Bild 6.15 zeigt eine schematische Darstellung beider Zuläufe.

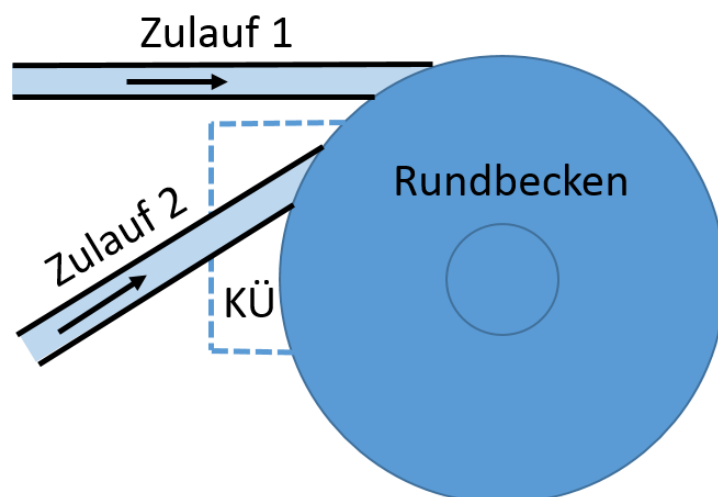


Bild 6.15: Mögliche Anschluss-Positionen des Zulaufs für das physikalische Modell

Beckenbereich

Bild 6.16 zeigt den Beckenbereich des Rundbeckens. Der obere Zylinder hat einen Durchmesser von 1,5 m, der anschließende Konus besitzt ein Gefälle von 25 %. Zentral im tiefsten Punkt liegt der Pumpensumpf, aus dem nach einem Regenereignis das Becken entleert werden kann. Der gesamte Beckenbereich ist aus transparentem Plexiglas gefertigt.



Bild 6.16: Beckenbereich des IWARU-Rundbecken-Modells (Draufsicht)

Klärüberlauf (KÜ)

Der Klärüberlauf wurde nach den Empfehlungen des DWA-A 166 (2013) als außenliegendes Bauteil konstruiert. Der KÜ ist ungedrosselt und wurde als freier Überfall ausgebildet. Für den Rückhalt von Schwimmstoffen (z.B. Öle und Fette) wurde dem Klärüberlauf eine Tauchwand vorgeschaltet. Die spezifische Schwellenbelastung des Klärüberlaufs beträgt $75 \text{ l/(s}\cdot\text{m)}$ und hält damit die Vorgabe des DWA-A 166 (2013) ein, welches eine spez. Schwellenbelastung von $\leq 75 \text{ l/(s}\cdot\text{m)}$ vorsieht.

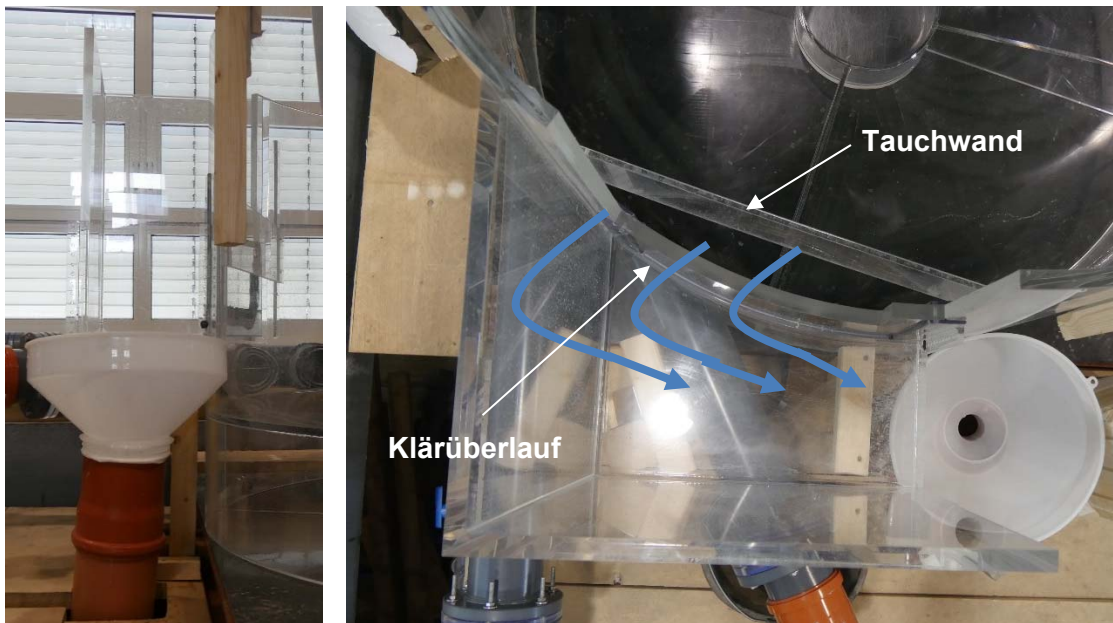


Bild 6.17: Klärüberlauf; links: Ansicht; rechts: Draufsicht

6.3.1.2 Modellgrenzen

Bild 6.18 bildet eine Übersicht der Modellgrenzen ab. Die hydraulisch relevanten Modellgrenzen liegen am Zulauf und am Auslauf (Klärüberlauf). Der Rohr-zulauf liegt mit voller Länge noch innerhalb der Modellgrenzen, d.h. die Modellgrenze liegt kurz hinter dem Zulaufbehälter. Die Modellgrenze im Auslauf bildet direkt der Klärüberlauf.

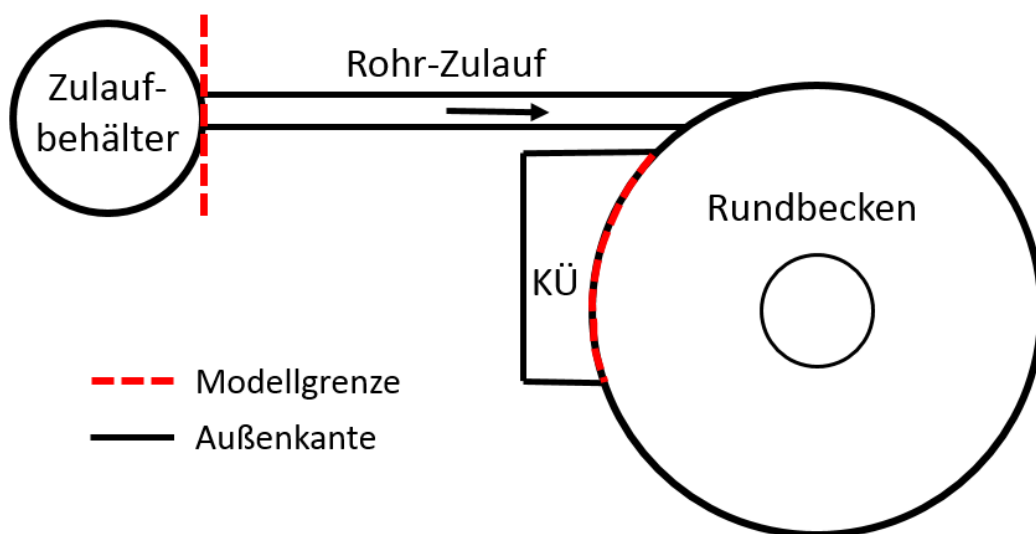


Bild 6.18: Modellgrenzen des Modellbeckens

6.3.1.3 Partikeluntersuchungen

Ziel der Partikeluntersuchungen war das Erzeugen von Gesamt-Absetzwirkungsgraden und Absetzbildern zur Bewertung verschiedener Becken-Konfigurationen.

Sämtliche der untersuchten Becken-Konfigurationen wurden mit zwei unterschiedlichen Versuchs-Materialien beprobt. Dies sind die Materialien Millisil®-W4 und SiLibeads®-Glaskugeln aus Kalknatronglas. Millisil wurde verwendet, weil dies das Standard-Material für Versuche in der Siedlungsentwässerung ist. Millisil ist gebrochenes Material, bestehend aus Quarzmehl. Die Kornverteilung liegt zwischen 0 – 400 µm, die Dichte beträgt 2650 kg/m³. Zusätzlich wurde das Material SiLibeads eingesetzt, da es eine höhere Übereinstimmung mit den im numerischen Modell zugegeben, kugelförmigen Partikeln aufweist als die gebrochenen Millisil-Partikel. Die Dichte beträgt nach eigenen Laboranalysen 2455 kg/m³, die Kornverteilung liegt zwischen 40 µm und 70 µm, zuzüglich Über- und Unterkorn. Die Sieblinien beider Materialien sind in Anhang 2 zu finden.

Ein Material mit einer Dichte im organischen Bereich (ca. 1040 kg/m³), High Impact Polystyrene (HIPS), ist in Vorversuchen ebenfalls beprobt worden, allerdings waren die zylindrischen Körner, mit ca. 3 mm Höhe und 2 mm Durchmesser, so groß, dass der Absetzwirkungsgrad dieses Materials nahezu bei allen hydraulischen Belastungen 100 % betrug. Daher wurde beschlossen, das Material nicht weiter zu untersuchen.



Bild 6.19: Versuchsmaterialien, links: Millisil®; rechts: SiLibeads®

Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Gesamt-Absetzwirkungsgrade erfolgte folgendermaßen: Zunächst wurde eine definierte Masse des Versuchs-Materials von 230 g in Suspension gebracht. Diese 230 g waren so ausgelegt, dass die Anzahl der Partikel nicht zu gering aber auch nicht zu hoch war, sodass repräsentative Absetzbilder und Wirkungsgrade ermittelt werden konnten. Zudem orientierte sich der Wert an dem im DWA-A 102 (2016) angegebenen Wert von 200 mg/l für die mittlere jährliche Verschmutzung von Niederschlagsabflüssen von

Verkehrsflächen. Die Partikelsuspension wurde mit einer Trichtervorrichtung direkt in das Zulaufrohr gegeben (vgl. Bild 6.20). Die Zugabe erfolgte über ca. drei Minuten. Erst nach Ende der Zugabe des Materials begann die eigentliche Versuchsdauer. Diese betrug das 5-fache der theoretischen hydraulischen Aufenthaltszeit. Je nach Beckenvolumen lag die Versuchsdauer zwischen 21 und 35 min.



Bild 6.20: Zugabeort des Versuchsmaterials über eine Trichter-Vorrichtung, links: Draufsicht; rechts: Ansicht

Das über den Klärüberlauf ausgetragene Material wurde mit Hilfe eines doppelagigen Filterbeutels aus Polypropylen-Vlies mit einem PP-Abdichtkragen aus dem Wasser gefiltert (vgl. Bild 6.21). Die Maschenweite lag bei 10 μm . Das technische Merkblatt zum verwendeten Filter ist in Anhang 3 beigefügt. Der Filter wurde im Vorfeld des Versuches zunächst getrocknet, anschließend wurde das Filterleergewicht durch Auswiegen des getrockneten Filters bestimmt.



Bild 6.21: links: Lage des Filters im eingebauten Zustand; rechts: Filter in der Ansicht

Nach der Trocknung konnte der Filter in einem sogenannten Exsikkator abkühlen. Dieser verhinderte die Aufnahme von Luftfeuchtigkeit während der Abkühlung. Die Durchführung mittels Exsikkator lehnte sich an die Vorgaben nach DIN EN 872 (2005) an. Danach wurde der Filter ausgewogen. Vom Gewicht des beladenen Filters wurde anschließend das Leergewicht des Filters abgezogen, sodass das reine Gewicht des ausgetragenen Materials bekannt war.

Da die Maschenweite des Filters bei $10\ \mu\text{m}$ liegt, konnte ein gewisser Anteil von Millisil ($0 - 400\ \mu\text{m}$) durch den Filter nicht zurückgehalten werden. Um diesen Anteil zu bestimmen, wurden Filter-Vorversuche durchgeführt. Dazu wurde der Filter mit einer definierten Masse von Millisil beschickt und der zurückgehaltene Anteil der Masse bestimmt. Aus den Versuchen ging hervor, dass ca. 35 % der zugegebenen Masse durch den Filter nicht zurückgehalten wurden. Dies bedeutet, dass von den 230 g der zugegebenen Masse lediglich 149,5 g (65 %) in die Berechnung des Absetzwirkungsgrades mit eingehen dürfen. Der Absetzwirkungsgrad für Millisil berechnet sich wie folgt:

$$\eta_{\text{Millisil}} = \left(1 - \frac{M_a}{M_Z * 0,65}\right) * 100 \text{ (g)} \quad (\text{Gl. 11})$$

<i>mit</i>	η_{Millisil}	<i>Absetzwirkungsgrad für Millisil (%)</i>
	M_a	<i>Ausgetragene Masse der Partikel(g)</i>
	M_Z	<i>Zugegebene Masse der Partikel = 230 g</i>

wobei

$$M_a = M_{\text{Filter}} - M_{\text{Leergewicht}} \text{ (g)} \quad (\text{Gl. 12})$$

<i>mit</i>	M_{Filter}	<i>Masse des beladenen Filters (g)</i>
	$M_{\text{Leergewicht}}$	<i>Masse des Filter-Leergewichtes (g)</i>

Filter-Vorversuche wurden ebenfalls für das Versuchsmaterial SiLibeads durchgeführt. Daraus ging hervor, dass die zugegebene Masse nahezu vollständig durch den Filter zurückgehalten wurde (über 96 %). Deshalb wurde für das Versuchsmaterial SiLibeads keine Abminderung vorgenommen. Der Absetzwirkungsgrad für SiLibeads berechnete sich daher nach (Gl. 13).

$$\eta_{\text{SiLibeads}} = \left(1 - \frac{M_a}{M_Z}\right) * 100 \text{ (g)} \quad (\text{Gl. 13})$$

6.3.1.4 Visualisierung der Durchströmung

Die Durchströmung wurde mit Hilfe des Fluoreszenztracer Uranin visualisiert. Tracer-Untersuchungen können zum einen der Visualisierung der Durchströmung dienen, zum anderen können anhand von Verweilzeitverteilungen (siehe Phase 1 Kapitel 4.3.2) Rückschlüsse auf bestimmte hydraulische Phänomene gezogen werden.

Im Gegensatz zu Phase 1 wurde für die Rundbecken keine direkte Tracermessung durchgeführt. Es sollte lediglich die Durchströmungscharakteristik sichtbar gemacht werden, sodass diese mit numerischen Tracer-Simulationen verglichen werden konnten.

6.3.2 Numerische Simulation

6.3.2.1 CFD-Modell Setup

Im Rahmen der Validierung des numerischen Modells (siehe Kapitel 6.4.2) wurden die Ergebnisse des k- ϵ Turbulenzmodells und des Reynolds-Stress-Models (RSM) systematisch verglichen. Das RSM wurde zusätzlich zum deutlich einfacheren und schnelleren k- ϵ RNG Modell verwendet, da in Rundbecken mit ausgeprägten Drallströmungen gerechnet werden muss, zu deren numerischer Abbildung die Berücksichtigung der Anisotropie der Turbulenz notwendig war.

Die Wandrauheit der Großausführung wurde mit 5 mm angesetzt. Als Fluid wurde Wasser mit einer Temperatur von 10 °C verwendet, mit einer Dichte von 999,70 kg/m³ und einer dynamischen Viskosität von 0,001307 kg/(m·s).

6.3.2.2 Geometrische und hydraulische Randbedingungen

Im Folgenden werden die wichtigsten geometrischen und hydraulischen Randbedingung dargestellt. Die grundlegenden Beckenmerkmale (Volumen, Oberfläche) sowie die hydraulische Belastung (Oberflächenbeschickung) waren identisch zu den in Phase 1 definierten Werten (siehe Phase 1 Kapitel 4.4.2), um einen Vergleich zwischen Rechteck- und Rundbecken zu ermöglichen, welcher in Kapitel 7 ausgewertet wird.

Der Einfluss des Zulauf-Durchmessers auf den Absetzwirkungsgrad wurde mit einer Studie untersucht, deren Simulationsplan mit den wichtigsten geometrischen Randbedingungen und hydraulischen Belastungen der Becken in der folgenden Tabelle 6-3 dargestellt ist.

Tabelle 6-4 beschreibt die definierten Randbedingungen der Becken zur Untersuchung des Einflusses des Durchmesser-Tiefen-Verhältnisses.

Die Randbedingungen der Untersuchung des für die Sedimentationsprozesse optimalen Zulauf-Winkels sind in Tabelle 6-5 zusammengefasst.

In Tabelle 6-6 sind die Randbedingungen für Becken-Konstruktionen dargestellt, die von der klassischen Bauweise abweichen. Dies ist zum einen eine Variante, in der der Klärüberlauf nicht außen liegend angeordnet ist, sondern zentral in Beckenmitte. Zum anderen wird eine Konfiguration simuliert, in welcher der Zulauf in Beckenmitte liegt, ähnlich wie bei Vor- und Nachklärbecken von Kläranlagen, der Klärüberlauf ist außen liegend.

Tabelle 6-5: Geometrische und hydraulische Randbedingungen der Becken zur Untersuchung des Zulauf-Winkels

	Parameter		Schnittpunkt Einlaufachse mit Becken-Radius			
			0,85*r	0,50*r	0,00*r	
Geometrische RB	Zulauf-Konfiguration	-	-	Rohrzulauf	Rohrzulauf	Rohrzulauf
	Zulauf-Durchmesser	DN _{Zu}	(mm)	800	800	800
	Fläche-Zulauf	A _{Zu}	(m ²)	0,20	0,20	0,20
	Durchmesser-Becken	∅ _{Becken}	(m)	15,45	15,45	15,45
	Tiefe-Becken	h _{Becken}	(m)	0,83	0,83	0,83
	Volumen	V	(m ³)	155,00	155,00	155,00
	Oberfläche	A _o	(m ²)	187,50	187,50	187,50
Hydraulische RB	Fließgeschwindigkeit Einlauf	v _{Ein}	(m/s)	1,06	1,06	1,06
	Spez. Energieeintrag	p _{spez}	(W/m ³)	0,756	0,756	0,756
	Durchfluss	Q	(m ³ /s)	0,20833	0,20833	0,20833
	Oberflächenbeschickung	q _A	(m/h)	4,00	4,00	4,0
	Überfallhöhe am Wehr	h KÜ	(m)	0,12	0,12	0,12

Tabelle 6-6: Geometrische und hydraulische Randbedingungen der Sonderkonstruktionen

	Parameter		Zentraler KÜ	Zentraler Zulauf
Geometrische RB	Zulauf-Konfiguration	- -	Rohrzulauf	Rohrzulauf
	Zulauf-Durchmesser	DN _{Zu} (mm)	800	2000
	Fläche-Zulauf	A _{Zu} (m ²)	0,20	2,08
	Durchmesser-Becken	∅ _{Becken} (m)	15,45	15,45
	Tiefe-Becken	h _{Becken} (m)	0,83	0,83
	Volumen	V (m ³)	155,00	155,00
	Oberfläche	A _O (m ²)	187,50	187,50
Hydraulische RB	Fließgeschwindigkeit Einlauf	v _{Ein} (m/s)	1,06	0,10
	Spez. Energieeintrag	p _{spez} (W/m ³)	0,756	0,007
	Durchfluss	Q (m ³ /s)	0,20833	0,20833
	Oberflächenbeschickung	q _A (m/h)	4,00	4,00
	Überfallhöhe am Wehr	h KÜ (m)	0,07	0,02

6.4 Ergebnisse und Diskussion

6.4.1 Physikalische Modell-Ergebnisse

Die physikalischen Modellversuche sollten hauptsächlich dem Verständnis der Durchströmungscharakteristik und der Bereitstellung von Validierungsdaten für das numerische Modell dienen. Anhand der physikalischen Versuche können nur indirekt Rückschlüsse auf bestimmte Einflussfaktoren zur Verbesserung der Sedimentationsleistung gezogen werden, da das Sedimentsubstrat nicht auf den Modellmaßstab skaliert werden konnte. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für die in Tabelle 6-2 beschriebenen Randbedingungen dargelegt, welche im Nachhinein als Validierungsdaten genutzt werden. In Anhang 4 sind ergänzende Ergebnisse physikalischer Untersuchungen dargelegt, die jedoch für das weitere Verständnis nicht relevant sind.

Interpretation der Wirkungsgrade

Eine wichtige Folge davon ist, dass die Sedimentations-Wirkungsgrade hier unnatürlich hoch ausfallen. Sie sind nicht ohne Weiteres mit in-situ-Messungen vergleichbar.

Im Rahmen der physikalischen Modellierung sind die geometrischen und hydraulischen Randbedingungen zwar maßstäblich skaliert worden, das Versuchsmaterial an sich konnte jedoch nicht skaliert werden, da so feine Partikel zum einen nicht mit geeigneter Dichte erworben werden konnten. Zum anderen müssten so kleine Partikel-Durchmesser verwendet werden, die im physikalischen Modell mit einem Mindestmaß an Genauigkeit nicht mehr zu handhaben wären. Deshalb sind die hier im physikalischen Modell erzielten Wirkungsgrade nicht mit Hilfe eines Modellgesetzes auf die Großausführung übertragbar. Sie würden in der Großausführung deutlich schlechter ausfallen.

Aus den physikalischen Versuchen lässt sich die in Bild 6.22 dargestellte grundlegende Durchströmungscharakteristik für das untersuchte Rundbecken ableiten. In dem Dunkelblau schattierten Bereich im Außenbereich des Beckens bzw. in Wandnähe, liegt eine schnell fließende Rotationsströmung vor. Im zentralen Bereich (Hellblau) befindet sich eine in gleicher Richtung, jedoch deutlich langsamer rotierende Rotationsströmung. In der Scherschicht zwischen beiden Rotationsströmungen können großräumige, kohärente Strukturen auftreten. Der zuvor erwartete „Teetasseneffekt“, also der Transport von Partikeln durch zur Beckenmitte gerichtete Sekundärströmungen, tritt wegen der sehr hohen Fließgeschwindigkeiten in der Primärströmung nur in geringem Maße auf und erlangt keine Bedeutung.

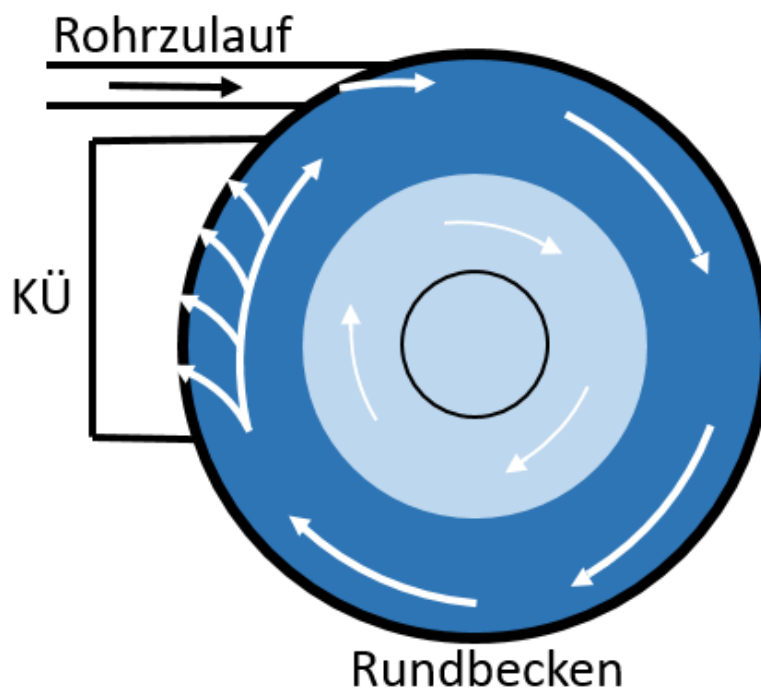


Bild 6.22: Prinzipielle Durchströmungscharakteristik des untersuchten Modellbeckens

Durchströmungscharakteristik – Tracerversuche

Die Tracerversuche wurden für das Modellbecken mit dem Zulauf 2 (direkt unter dem Klärüberlauf) durchgeführt. Sämtliche Randbedingungen entsprachen den in Tabelle 6-2 aufgeführten Werten.

In Bild 6.23 und Bild 6.24 sind die Tracerverteilungen für unterschiedliche Zeitschritte dargestellt. Die Zeitangaben beziehen sich auf den Eintrittspunkt ins Becken ($t = 0,0 \text{ sec}$). Die rot gestrichelte Linie stellt den Bereich des Klärüberlaufs dar, die blau gestrichelte Linie den des Zulaufs.

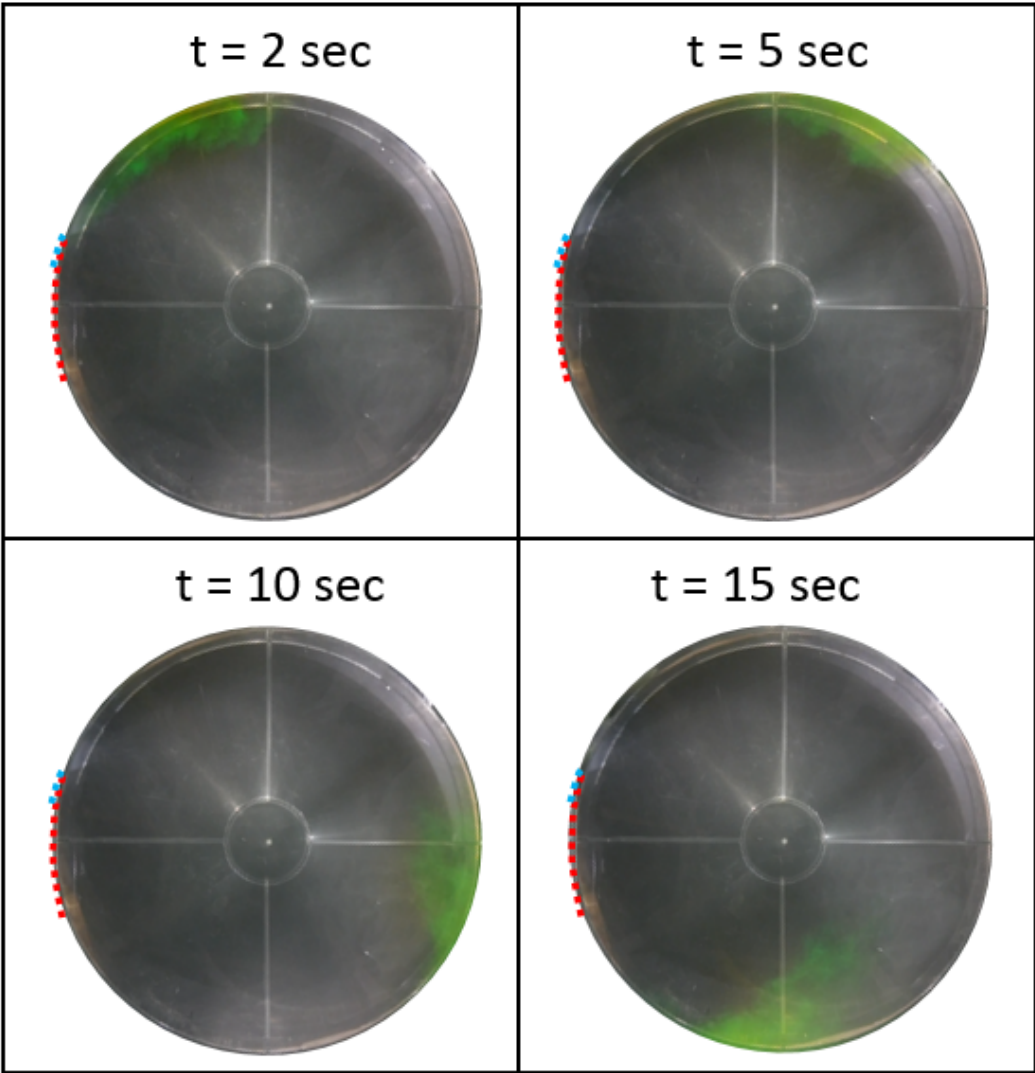


Bild 6.23: Tracerverteilung für das Modellbecken und Zulauf 2 von $t = 2 - 15 \text{ sec}$ in der Draufsicht

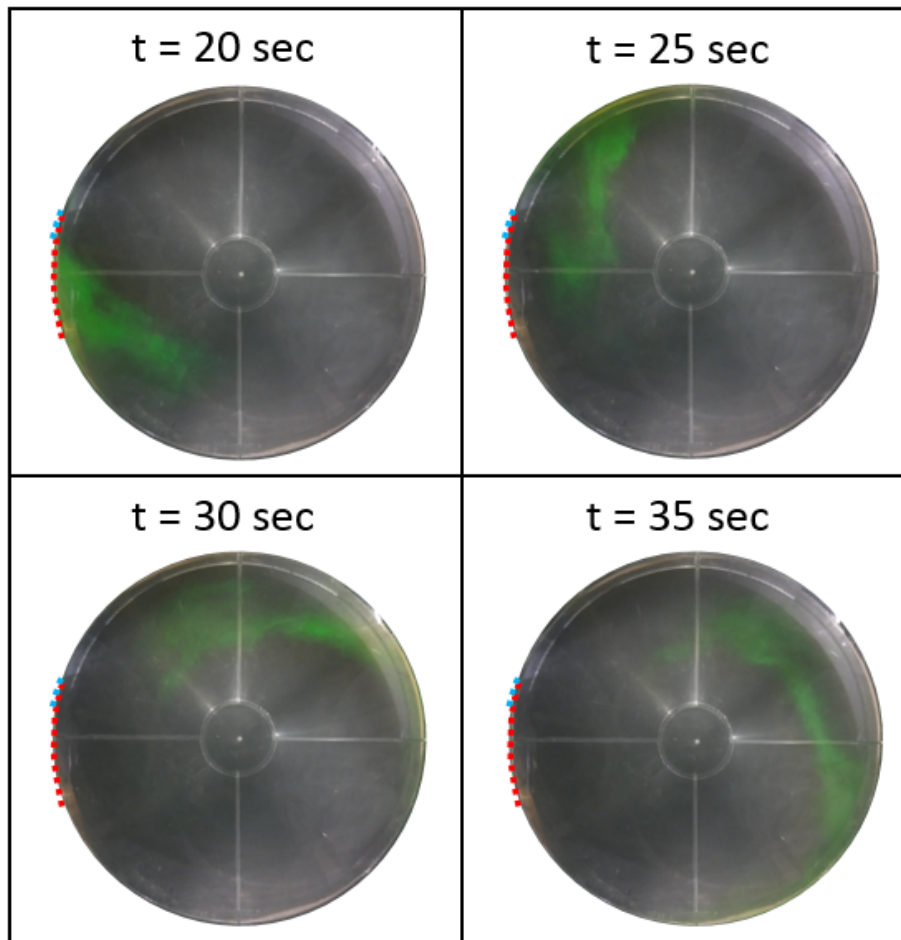


Bild 6.24: Tracerverteilung für das Modellbecken und Zulauf 2 von $t = 20 - 35$ sec in der Draufsicht

Durch die Visualisierung der Durchströmung ist zu erkennen, dass zunächst nur der äußere Bereich in Wandnähe aktiv durchströmt wird. Erst am Ende des dritten Quadranten (der Zulauf befindet sich im ersten Quadranten) fächert sich der aktiv durchströmte Bereich etwas in Richtung Beckenmitte hin auf. Der Tracer diffundiert erst im vierten Quadranten in Richtung des deutlich langsamer rotierenden zentralen Bereichs. Diese Bewegung ist eindeutig nicht auf die schwach ausgeprägte Sekundärströmung (Teetasseneffekt) zurückzuführen.

Absetzwirkungsgrade und Absetzbilder

Aus den in Tabelle 6-7 dargestellten Absetzwirkungsgraden des Modellbeckens ist ersichtlich, dass die unterschiedliche Position des Zulaufes keinen signifikanten Einfluss auf den Absetzwirkungsgrad hat, wobei der Zulauf direkt unter dem Klärüberlauf (Zulauf 2) leicht bessere Absetzwirkungsgrade erzielt, was unter anderem auf die verlängerte Fließstrecke zurückzuführen ist.

Tabelle 6-7: Übersicht der Absetzwirkungsgrade der physikalischen Experimente

	Modellbecken	
	Zulauf 1 (%)	Zulauf 2 (%)
Wirkungsgrad für Millisil η	70	71
Wirkungsgrad für SiLibeads η	67	67

In einem weiteren Schritt wurden für das Modellbecken mit dem Zulauf 2 drei unterschiedliche Zulauf-Durchmesser (DN 80, DN 100 und DN 110) untersucht. Aus Tabelle 6-8 ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Zulauf-DN der Absetzwirkungsgrad positiv beeinflusst wird.

Tabelle 6-8: Übersicht der Absetzwirkungsgrade bei unterschiedlichen Zulauf-Durchmessern des Modellbeckens mit Zulauf 2

	Modellbecken mit Zulauf 2		
	Zulauf-DN 80 (%)	Zulauf-DN 100 (%)	Zulauf-DN 110 (%)
Wirkungsgrad für Millisil η	66	71	75
Wirkungsgrad für SiLibeads η	63	67	72

In den nachfolgenden Bildern Bild 6.25 und Bild 6.26 sind die Absetzbilder nach Ende der Versuchsdauer der entsprechenden Versuche abgebildet. Zu erkennen ist, dass bei dem Versuchsmaterial Millisil auf Grund der höheren Feinanteile in der Sieblinie mehr Partikel in Beckenmitte sedimentieren. Insgesamt haben die Partikel, aufgrund geringer Schubspannungen auf der Sohle, die Möglichkeit, in einem großen Bereich des Beckens zu sedimentieren.

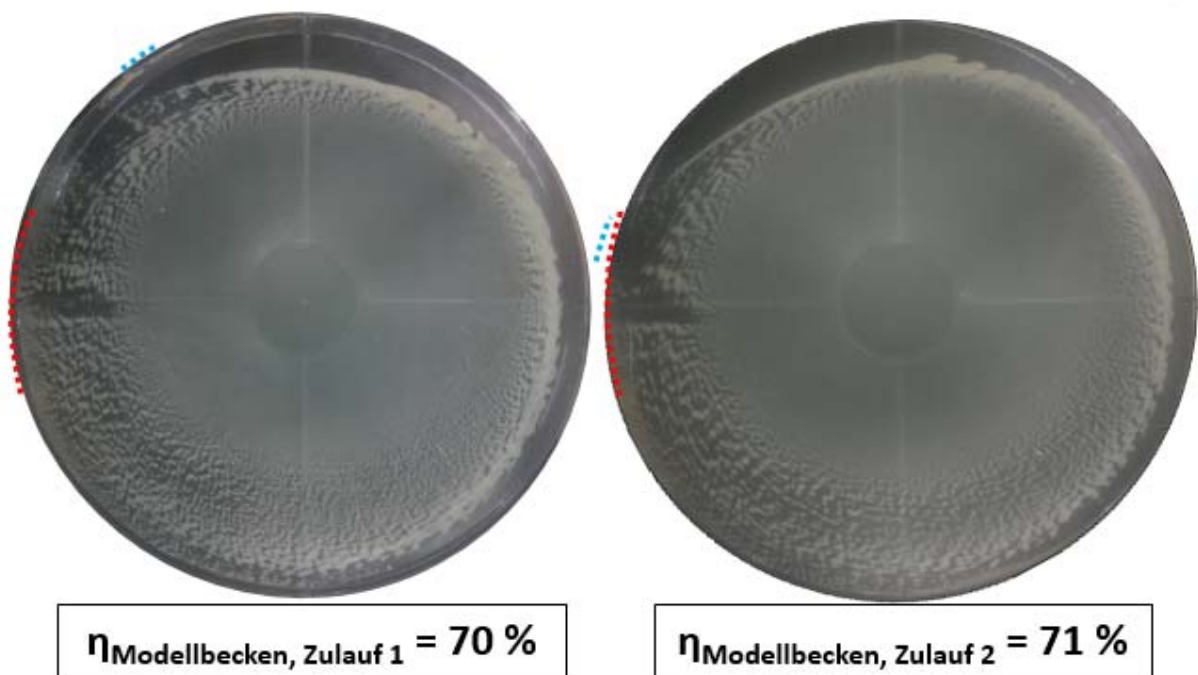


Bild 6.25: Absetzwirkungsgrad und Absetzbild für das Modellbecken und Versuchsmaterial Mililil; links: Zulauf 1; rechts Zulauf 2

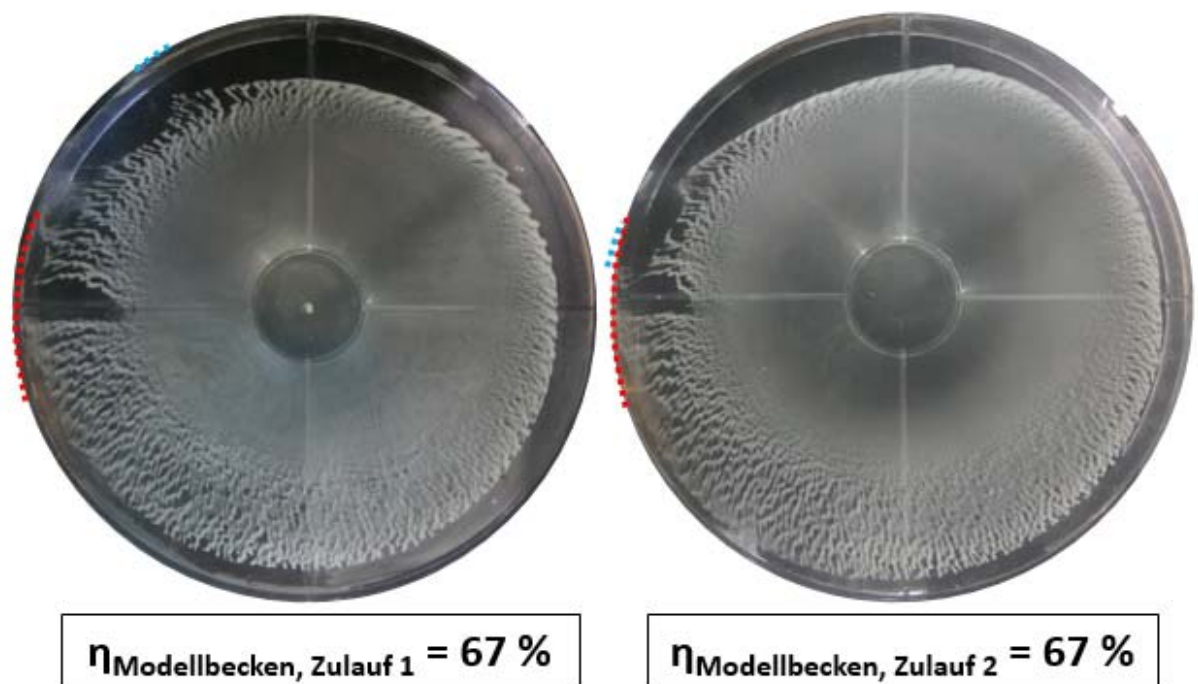


Bild 6.26: Absetzwirkungsgrad und Absetzbild für das Modellbecken und Versuchsmaterial Silibeads; links: Zulauf 1; rechts Zulauf 2

Aus den physikalischen Versuchen können folgende Erkenntnisse für die Gestaltung eines Rundbeckens gewonnen werden:

Falls es bautechnisch realisierbar ist, kann durch die Ausnutzung der vollständigen Umlaufstrecke eine leichte Verbesserung des Absetzwirkungsgrades erreicht werden, indem der Zulauf direkt unter dem Klärüberlauf angeordnet wird. Außerdem kann der Partikelrückhalt durch möglichst große Zulauf-Durchmesser positiv beeinflusst werden.

Neben den gewonnenen Erkenntnissen bezüglich bestimmter Einflussfaktoren auf die Absetzleistung von Rundbecken hatte die physikalische Modellierung vor allem das Ziel, experimentelle Ergebnisse zur Validierung eines numerischen Modells bereitzustellen.

6.4.2 Validierung des numerischen Modells

Das numerische Modell wird anhand der experimentellen Ergebnisse des Modellbeckens und des Versuchsmaterials Millisil validiert. Die geometrischen und hydraulischen Randbedingungen des numerisch simulierten Beckens entsprechen denen des Modellbeckens, d.h. das numerische Becken wird im Modellmaßstab simuliert und validiert (vgl. Tabelle 6-2). Die Validierung wird sowohl anhand des Partikel-Verhaltens als auch anhand des Durchströmungs-Verhaltens vorgenommen. Die Eigenschaften (z.B. Sieblinie und Dichte) der Versuchsmaterialien entsprechen denen aus dem physikalischen Experiment.

6.4.2.1 Validierung anhand des Partikel-Verhaltens

Im Rahmen der Validierung durch das Partikel-Verhalten werden insgesamt vier Einfluss-Parameter betrachtet. Diese sind die Gitternetzauflösung, das Turbulenzmodell, das Random-Walk-Modell der Partikelbewegung im Lagrange'schen Bezugssystem (CL-Zahl) und die kritische Schubspannung τ_{krit} der Partikel nach van Rijn (1984).

Einfluss des Gitternetzes

Im ersten Schritt wird der Einfluss der Gitternetz-Auflösung auf die Durchströmung und den Absetzwirkungsgrad untersucht. Dazu werden insgesamt drei unterschiedlich fein aufgelöste Gitternetze verglichen (Tabelle 6-9). Das „grobe“ Netz mit insgesamt ca. 835.000 Zellen erzielt einen Absetzwirkungsgrad von 78 %. Die nächst feinere Stufe ist das „mittlere“ Netz. Dieses besitzt etwa 1,2 Mio. Zellen, der Absetzwirkungsgrad liegt bei 72 %. Das „feine“ Netz bewirkt einen Absetzwirkungsgrad von 70 % bei insgesamt rund 3,26 Mio. Zellen.

Tabelle 6-9: Einfluss des Gitternetzes auf den Absetzwirkungsgrad

Grob	Mittel	Fein
835.000 Zellen	1.200.000 Zellen	3.260.000 Zellen
$\eta = 78 \%$	$\eta = 72 \%$	$\eta = 70 \%$

Auf Grund des deutlichen Unterschieds des Absetzwirkungsgrades zwischen dem groben und dem mittleren Gitternetz ($\Delta = 6 \%$) sowie dem nur geringen Unterschied vom mittleren zum feinen Gitternetz ($\Delta = 2 \%$) wird für die weiteren Untersuchungen das mittlere Netz mit etwa 1,2 Mio. Zellen verwendet. Auch der Vergleich mit dem Absetzwirkungsgrad des physikalischen Experiments ($\eta = 71 \%$) zeigt, dass das mittlere Netz in der Lage ist, die Realität ausreichend genau abzubilden.

Die Gitternetzstudie wurde für das RSM-Turbulenzmodell (beste Modellierung der Sekundärströmungseffekte) und eine CL-Zahl von 0,15 (Standardwert in FLUENT) durchgeführt.

Einfluss des Turbulenzmodells

Im nächsten Schritt wird mit dem „mittleren“ Netz der Einfluss des Turbulenzmodells untersucht. Dazu werden das k- ϵ RNG-Turbulenzmodell, welches in der Literatur überwiegend Anwendung findet, und das Reynolds-Stress-Modell (RSM) miteinander verglichen.

In Bild 6.27 sind die Absetzbilder der beiden untersuchten Turbulenzmodelle abgebildet. Zunächst ist auffällig, dass sich die beiden Absetzbilder prinzipiell sehr ähneln. Allerdings sedimentieren beim RSM deutlich mehr Partikel im zentralen Beckenbereich, während sich beim k- ϵ RNG Modell relativ wenig Partikel im zentralen Bereich ablagern. Weiterhin unterscheidet sich der Absetzwirkungsgrad beider Modelle um 3 %, wobei beide Turbulenzmodelle den gleichen Abstand zum physikalischen Modell ($\eta = 71 \%$) aufweisen. Auf Grund der theoretisch genaueren Abbildung der Turbulenz und der Tatsache, dass das RSM den Transport von Partikeln in Beckenmitte besser abbildet, wird dieses Modell für die weiteren Untersuchungen eingesetzt.

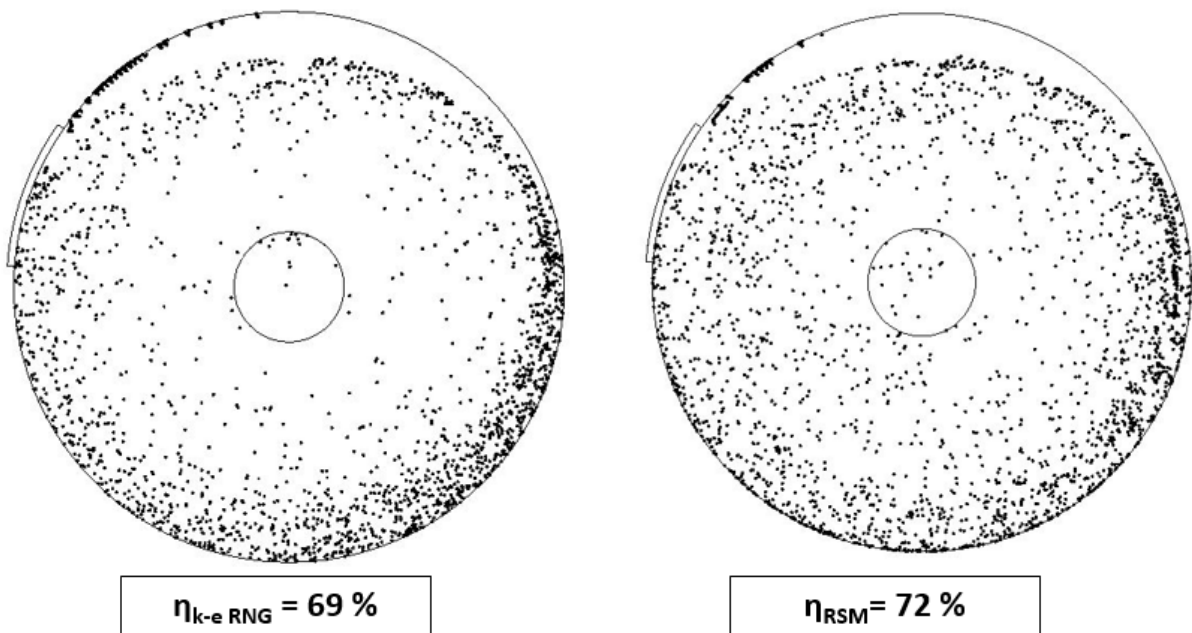


Bild 6.27: Wirkungsgrad und Absetzbild; links: k- ϵ RNG Turbulenzmodell, rechts: Reynolds-Stress Modell (RSM)

Einfluss der CL-Zahl

Da die Ergebnisse aus dem physikalischen Modell ($\eta = 71 \%$) und dem numerischen Modell ($\eta = 72 \%$) noch geringe Abweichungen aufweisen, wird im nächsten Schritt die sog. CL-Zahl validiert. Die CL-Zahl ist ein Parameter, der die turbulente Diffusion von Partikeln darstellt. Je höher die CL-Zahl definiert wird, desto größer ist die mögliche turbulente Diffusion.

In Tabelle 6-10 sind die entsprechenden Absetzwirkungsgrade für die untersuchten CL-Zahlen dargestellt. Es wird deutlich, dass mit ansteigender CL-Zahl der Absetzwirkungsgrad zunimmt.

Tabelle 6-10: Gesamtwirkungsgrade in Abhängigkeit der CL-Zahl

CL-Zahl	0,00	0,05	0,10	0,15	0,30	1,00
Wirkungsgrad η	71 %	72 %	72 %	72 %	75 %	80 %

In Bild 6.28 sind die einzelnen Partikel-Wirkungsgrade in Abhängigkeit der CL-Zahl abgebildet. An den Kurven ist zu erkennen, dass die CL-Zahl vor allem einen großen Einfluss auf sehr kleine Partikel ($Ha = 0,01-0,80$) hat, jedoch vergleichsweise geringe Auswirkungen auf größere Partikel ($Ha > 1,5$). Aus Absetzbildern ist ersichtlich, dass durch Erhöhung der CL-Zahl mehr Partikel in Beckenmitte sedimentieren.

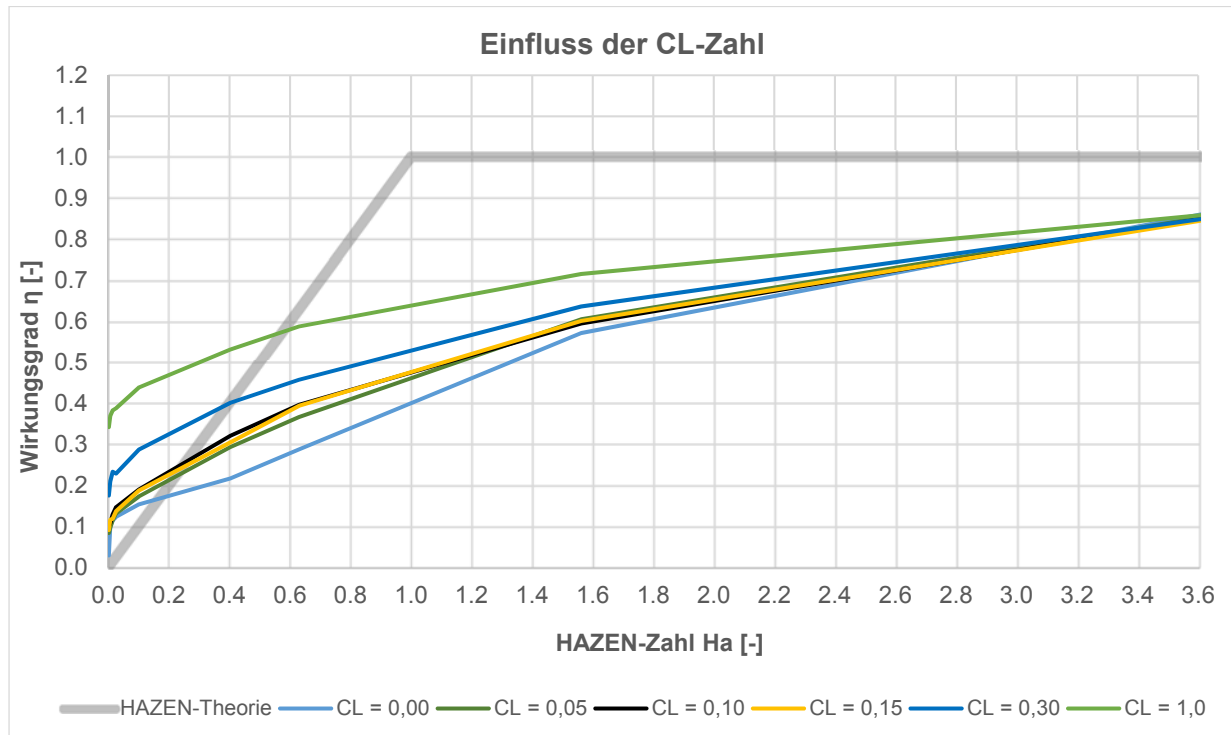


Bild 6.28: Einfluss der CL-Zahl auf einzelne Partikel

Unter allen untersuchten CL-Zahlen weist die CL-Zahl von 0,15 die am besten übereinstimmenden Ergebnisse auf, weshalb im Folgenden mit diesem Wert weiter simuliert wird. Nach Literaturangaben sind CL-Zahlen von 0,0 bis 2,0 üblich (z.B. Dufresne et al. (2009)), wobei der Wert von 0,15 als „Standardwert“ angesehen werden kann, der auch von ANSYS (2017) für das k- ϵ Turbulenzmodell empfohlen wird. Für das RSM Turbulenzmodell empfiehlt ANSYS (2017) allerdings eine CL-Zahl von 0,30.

Mit diesem Schritt ist die Validierung des Absetzwirkungsgrades erfolgreich abgeschlossen. Die Unterschiede der Absetzwirkungsgrade liegen bei etwa 1 %. Im nächsten und letzten Schritt wird das Absetzbild validiert.

Einfluss der kritischen Schubspannung eines Partikels (τ_{krit})

Zur Validierung des Absetzbildes wird die kritische Schubspannung τ_{krit} der Partikel nach van Rijn (1984) berechnet und dann variiert, genauer gesagt, abgemindert. Die bisherigen Validierungs-Ergebnisse sind mit einer nicht abgemindert kritischen Schubspannung simuliert worden.

Bild 6.29 zeigt den Vergleich zwischen physikalischem und numerischem Modell. Das numerische Ergebnis ist mit einer nicht abgeminderten kritischen Schubspannung, dem RSM Turbulenzmodell und einer CL-Zahl von 0,15 generiert worden. Es zeigen sich folgende markante Unterschiede:

- Deutliche Unterschiede in Bereichen mit hoher Schubspannung auf der Sohle (weiß bzw. schwarz markierter Bereich)
- Im zentralen Bereich weist das physikalische Experiment mehr sedimentierte Partikel auf als das numerische Modell.

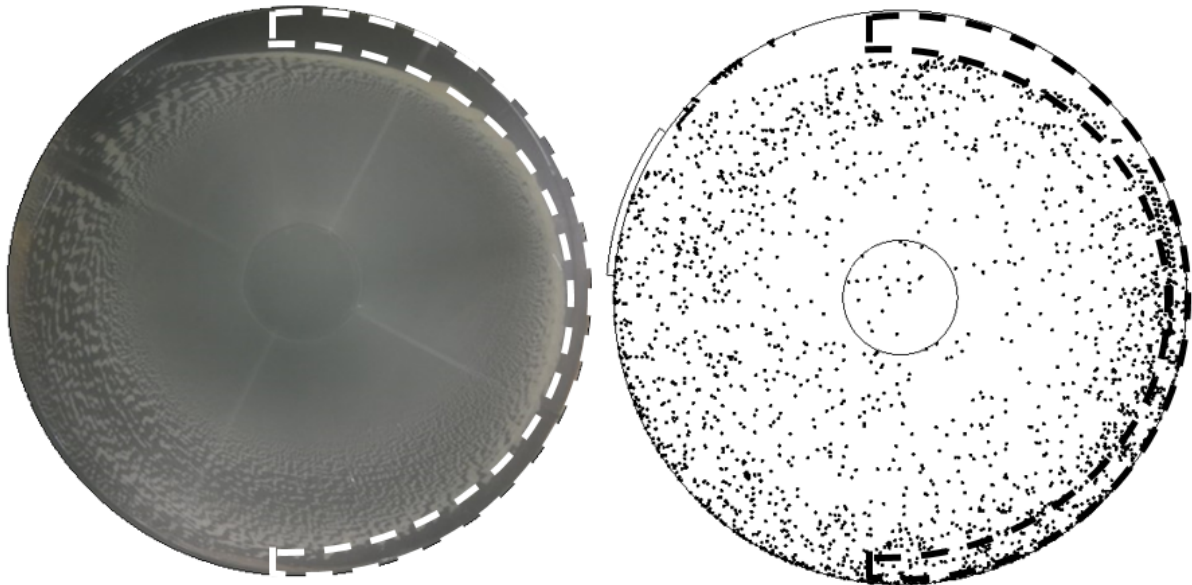


Bild 6.29: Vergleich der Absetzbilder des physikalischen (links) und des numerischen (rechts) Modells; markiert ist der am äußeren Rand frei bleibende Bereich, der durch Abminderung der kritischen Schubspannung reproduziert werden sollte

Wegen der Unterschiede in den Absetzbildern zwischen physikalischem und numerischem Modell wird die kritische Schubspannung nach van Rijn (1984) schrittweise abgemindert. Bild 6.30 zeigt deutlich, dass aus der Abminderung der kritischen Schubspannung eine Änderung des Absetzbildes resultiert. Der Gesamtwirkungsgrad weist nur sehr geringe Veränderungen auf. Eine Abminderung von τ_{krit} auf 80 % ist noch zu gering, wobei eine Abminderung auf 60 % schon zu hoch ist. Deshalb wird eine Abminderung der kritischen Schubspannungen nach van Rijn (1984) um 30 % auf 70 % ($0,7 \cdot \tau_{krit}$) gewählt. D.h. die kritische Schubspannung berechnet sich nun wie folgt:

$$\tau_{crit} = \frac{\tau_{dim}}{(\rho_s - \rho_{fluid}) * g * d} * 0,70 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad \text{(Gl. 14)}$$

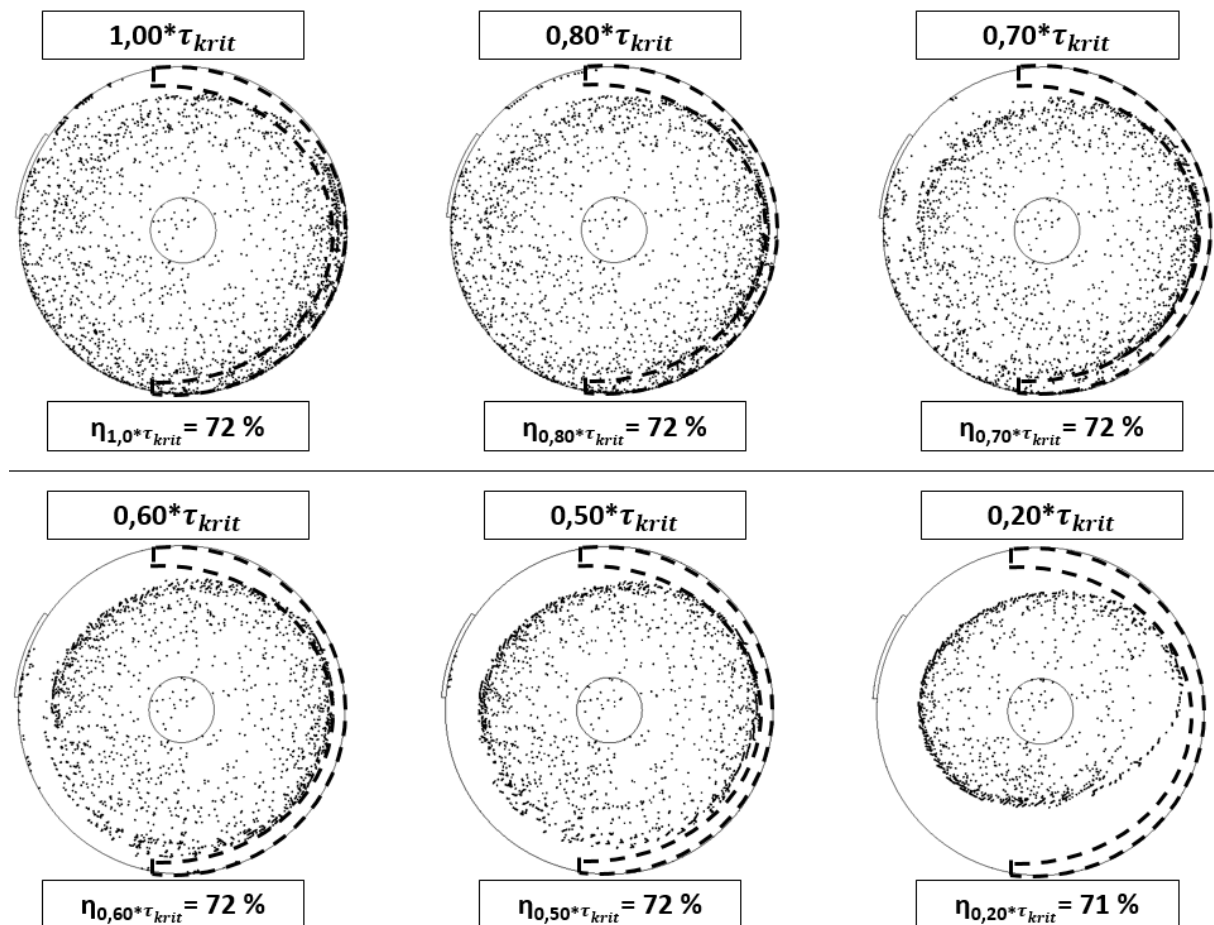


Bild 6.30: Schrittweise Abminderung der kritischen Schubspannung nach van Rijn und dessen Einfluss auf das Absetzbild

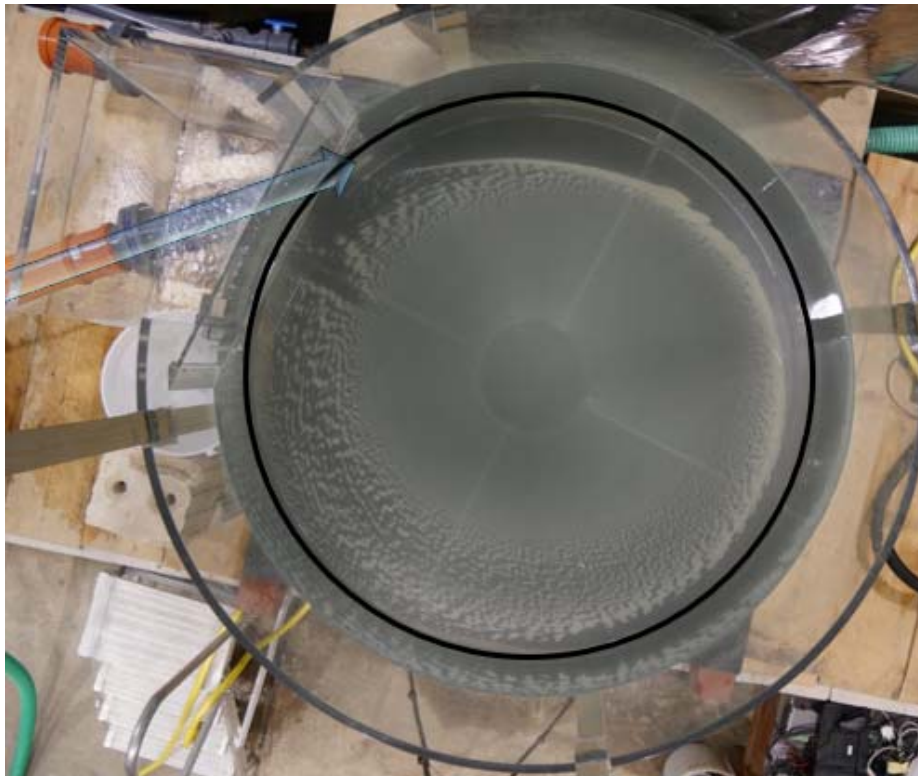
Durch die Abminderung von τ_{krit} ist auch die Validierung des Absetzbildes erfolgreich abgeschlossen.

Endergebnis der Validierung

Auf Grundlage der Validierungs-Ergebnisse kann das numerische Modell die Gegebenheiten aus dem physikalischen Modell mit den folgenden angepassten Parametern ausreichend genau abbilden:

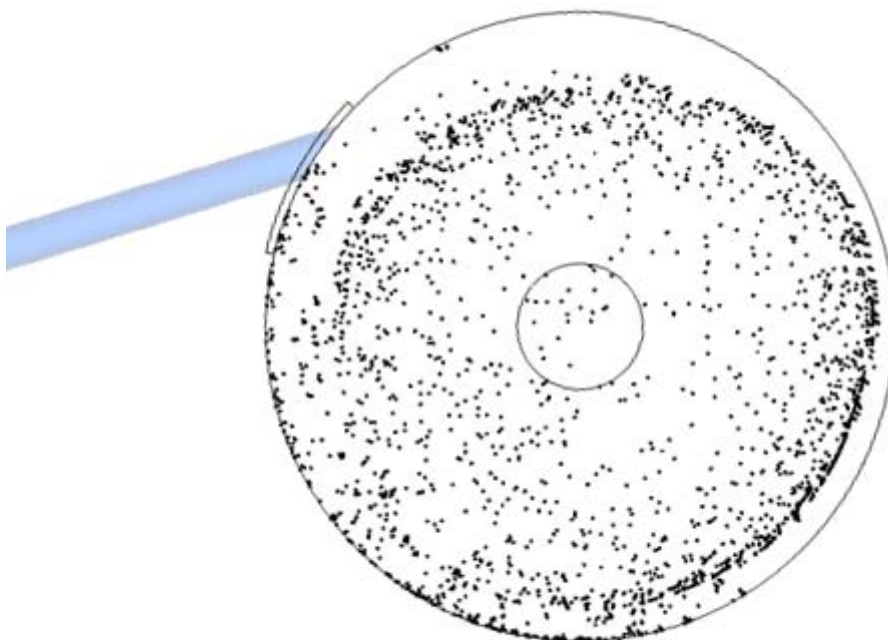
- Zellanzahl von 1,2 Mio. („mittleres Netz“)
- RSM-Turbulenzmodell
- CL-Zahl = 0,15
- kritische Schubspannung nach van Rijn (1984) mit Abminderung: $70 \% * \tau_{krit}$

In Bild 6.31 und Bild 6.32 können die beiden Absetzbilder und Wirkungsgrade noch einmal verglichen werden.



$\eta_{\text{Modellbecken}} = 71\%$

Bild 6.31: Wirkungsgrad und Absetzbild des physikalischen Modells



$\eta_{\text{Numerik}} = 72\%$

Bild 6.32: Wirkungsgrad und Absetzbild des validierten numerischen Modells

Sedimentations-Bereiche von unterschiedlichen Partikelklassen

In diesem Abschnitt wird verglichen, in wieweit sich die Absetzbereiche von bestimmten Partikelklassen im physikalischen und numerischen Modell ähneln. Es wird davon ausgegangen, dass grobe Partikel bevorzugt in der Scherschicht zwischen der schnell und der langsam drehenden Rotationsströmung sedimentieren. Bei den feinen Partikeln wird von einer Sedimentation im zentralen Bereich des Beckens (in der langsam fließenden Rotationsströmung) ausgegangen. Für den Vergleich wird nicht wie bei der bisherigen Validierung das Versuchsmaterial Millisil verwendet, sondern SiLibeads, welches eine runde Form besitzen. Da im numerischen Modell ebenfalls runde Partikel betrachtet werden, besteht eine höhere Ähnlichkeit der Partikel-Form im Vergleich zu Millisil. Außerdem kann der Durchmesser für eine rundliche Form besser unter dem Mikroskop bestimmt werden. Die Bestimmung der Durchmesser einzelner SiLibeads-Partikel wird unter einem 200-fach vergrößernden Mikroskop durchgeführt. Bild 6.33 zeigt den Bereich im Becken, an dem die Proben entnommen wurden. Die ausgewerteten Ergebnisse sind in Bild 6.34 dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass die zuvor angenommene Aussage, dass gröbere Partikel im Außenbereich sedimentieren, bestätigt werden kann, denn der Anteil der groben Fraktionen (100 bis 250 μm) ist in Probenahmestelle 1 mit ca. 8 % der gezählten Partikel höher als in Probenahmestelle 3, wo unter 1 % der Partikel der groben Fraktion angehörten. Auch die Annahme, dass feine Partikel im strömungsberuhigten Bereich sedimentieren wird belegt, denn Probenahmestelle 1 hat mit 48 % der Fraktion 15-31 μm einen deutlich geringeren Anteil der feinen Fraktion die als Probenahmestelle 3 mit etwa 61 %.

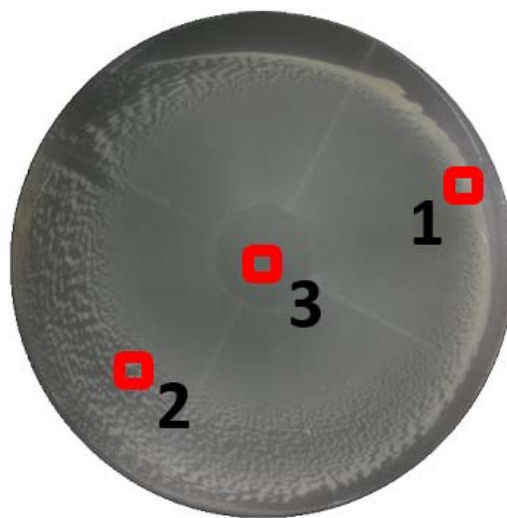


Bild 6.33: Ort der Probenahme-Stellen aus dem physikalischen Versuch

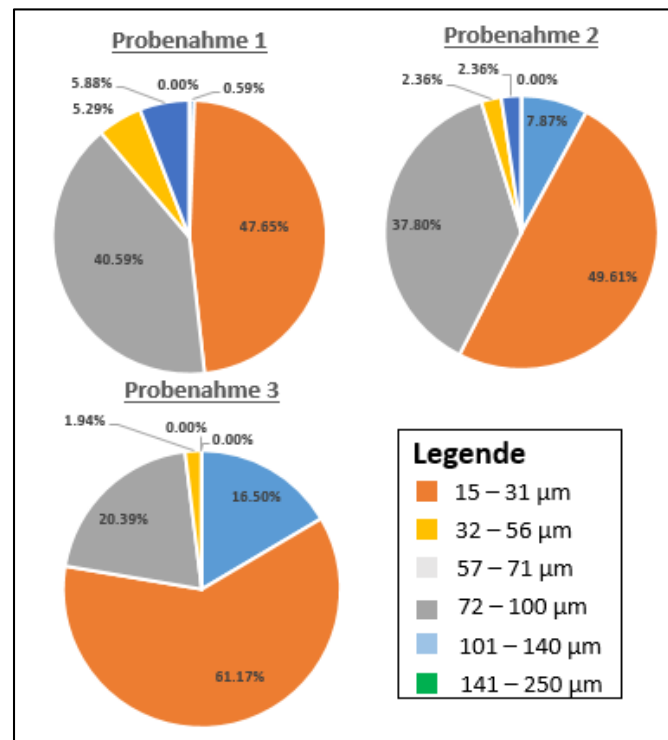


Bild 6.34: Prozentualer Anteil je Partikelklasse für unterschiedliche Sedimentationsbereiche; Versuchsmaterial: SiLibeads

Bild 6.35 zeigt die Sedimentationsbereiche einzelner Partikelfractionen aus dem validierten numerischen Modell. Diese stimmen mit den physikalischen Ergebnissen qualitativ gut überein. Die hier betrachteten Fraktionen von 32-56 µm und 57-71 µm decken einen Bereich an Ha-Zahlen von $Ha = 0,35$ bis $Ha = 1,75$ ab.

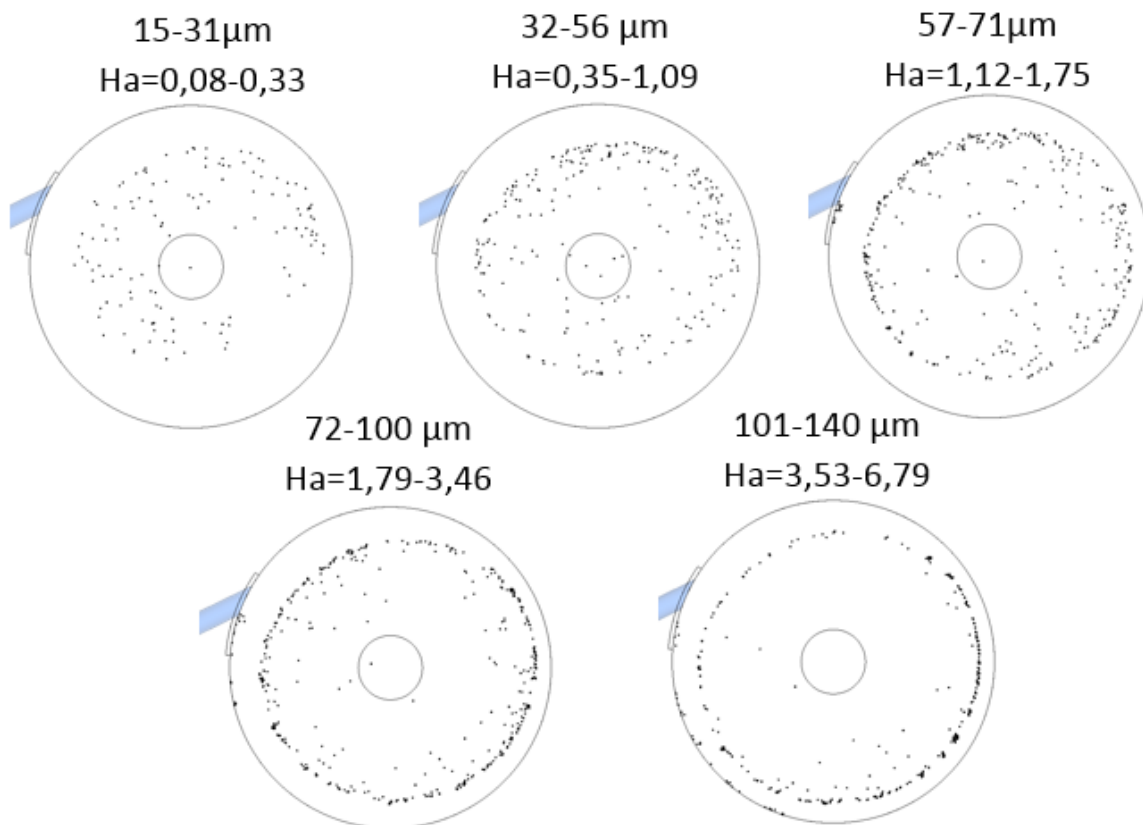


Bild 6.35: Sedimentations-Bereich einzelner Partikelfractionen aus dem validierten numerischen Modell

Im Vergleich mit den Ergebnissen aus der Arbeit von Jörissen (2009), deren Partikel mit Ha-Zahlen von 0,5 bis 1,5 eher im zentralen Bereich des Beckens sedimentieren, kann hier eine weitgehende Übereinstimmung der simulierten Ergebnisse festgestellt werden.

6.4.2.2 Validierung anhand des Durchströmungs-Verhaltens

Neben der bisherigen Validierung anhand des Partikel-Verhaltens wird in diesem Kapitel das Durchströmungsverhalten beider Modelle verglichen. Zur Visualisierung der Strömung wurde im physikalischen Modell der Fluoreszenztracer Uranin verwendet. Im numerischen Modell wurden die Randbedingungen und Solver-Einstellungen gewählt, die bei der bisherigen Validierung festgelegt wurden.

In Bild 6.36 ist die Tracerverteilung im physikalischen und numerischen Modell jeweils für zwei Zeitschritte ($t = 5 \text{ sec}$ und 20 sec) gegenübergestellt. Für den Zeitschritt $t = 5 \text{ sec}$ ist eine gute Übereinstimmung der Tracerverteilung sowohl in der Länge als auch in der Breite der „Tracer-Wolke“ zu erkennen. Im Zeitschritt $t = 20 \text{ sec}$ ähnelt die Tracerverteilung aus dem numerischen

Modell immer noch der aus dem physikalischen Modell, wobei Unterschiede in der Längenausbreitung der „Tracer-Wolke“ zu verzeichnen sind.

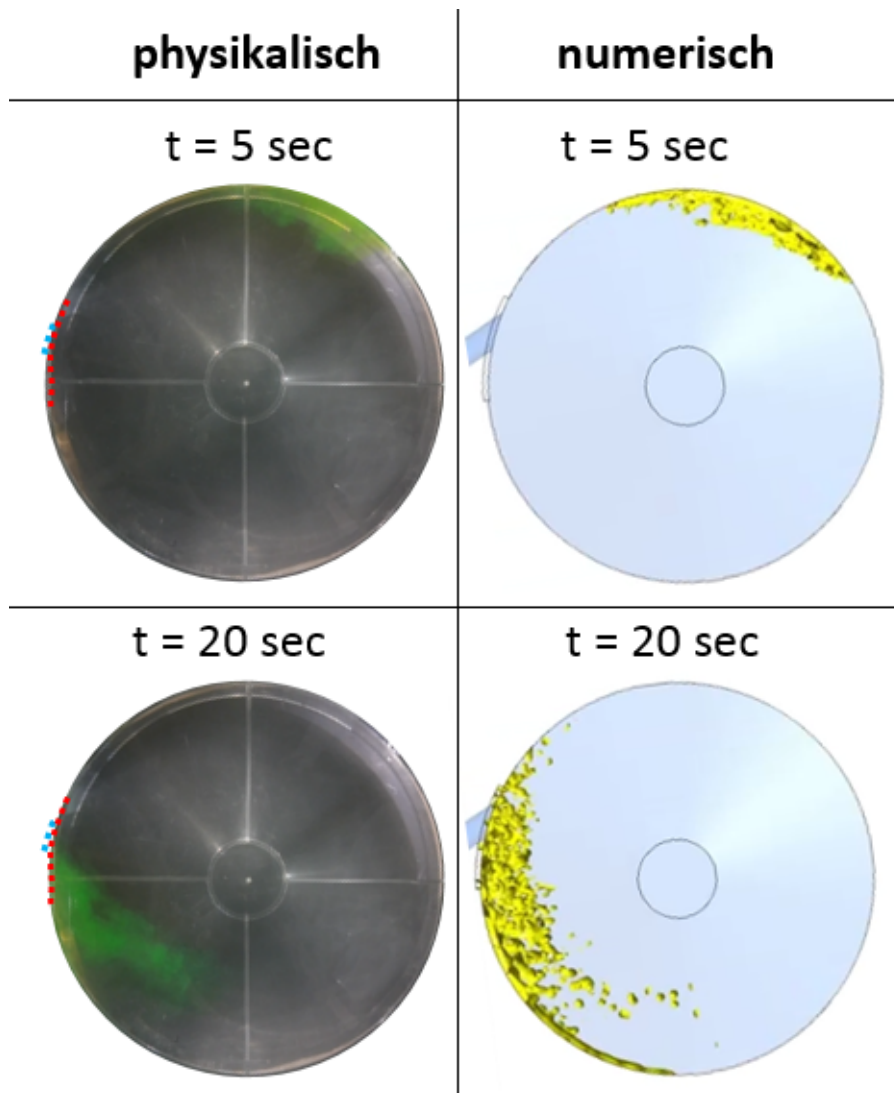


Bild 6.36: Gegenüberstellung der Tracerverteilung nach $t = 5$ und 20 sec für das physikalische Modell (links) und das numerische Modell (rechts)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Validierung des numerischen Modells durch die Ergebnisse aus den physikalischen Experimenten erfolgreich durchgeführt wurde, vor allem die Validierung anhand des Partikel-Verhaltens.

6.4.3 Numerische Simulations-Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden nun, aufbauend auf den festgelegten Solver-Einstellungen aus der Validierung, Untersuchungen an einem Becken im Maßstab 1:1 zur Definition eines optimierten Rundbeckens für den Neubau durchgeführt. Das hier untersuchte Naturbecken wird nicht aus dem physikalischen Modellbecken skaliert, sondern an die Beckenparameter des in

Phase 1 untersuchten Regenklärbeckens in Rechteckbauweise angepasst, sodass im Nachhinein ein Vergleich zwischen der Rechteck- und der Rundbauweise möglich wird.

6.4.3.1 Grundlegende Untersuchungen

Nach DWA-A 166 (2013) wird bei Regenklärbecken in Rundbauweise zwischen Wirbelschachtbecken (WSB) und Regenzyklonbecken (RZB) unterschieden. Rundbecken bis zu einem Durchmesser von 15 m werden üblicherweise als Wirbelschachtbecken ausgebildet. Diese haben einen tangentialen Zulauf und eine flach geneigte Sohle (2 - 5 %). Größere Becken (ab ca. 10 m) werden als Regenzyklonbecken ausgelegt, welche einen exzentrischen Zulauf, der an eine gedachte Innenkreisbahn von vorzugsweise $\frac{2}{3}r$ führt, haben. Die Sohle ist in einen flachen Außenkreisring, einen steil geneigten Mitteltrichter und einen steilen Innenkegel mit einer Mittelstütze gegliedert.

Neben werden jedoch keine Angaben zu bestimmten Abmessungsverhältnissen vorgegeben, wie es bei der Rechteckbauweise z.B. mit dem Verhältnis von Länge zu Breite der Fall ist. Daher werden in diesem Kapitel grundlegende Abmessungsverhältnisse untersucht und jeweils ein Optimum festgelegt. Dazu wurde zunächst der Einfluss des Zulauf-Durchmessers in sechs unterschiedlichen Größen simuliert. Daraufhin wird analysiert, ob kleine, aber dafür tiefe Becken bessere Absetzeigenschaften aufweisen als große Becken, die aber dafür sehr flach sind. Im letzten Schritt wird untersucht, welchen Einfluss der Zulauf-Winkel hat, in dem das Becken angeströmt wird.

Die Randbedingungen für die untersuchten Becken sind in Kapitel 6.3.2.2 tabellarisch zusammengefasst.

Einfluss des Zulauf-DN

Im ersten Schritt wird untersucht, welchen Einfluss der Durchmesser des Zulaufs (bzw. das Verhältnis zwischen dem Zulauf-Durchmesser und der Tiefe des Beckens) auf die Durchströmung des Beckens und damit auch auf den Absetzwirkungsgrad hat. Untersucht werden die Zulauf-Durchmesser DN 500 ($h_{zu}/h_{ges} = 0,25$), DN 800 ($h_{zu}/h_{ges} = 0,40$), DN 1000 ($h_{zu}/h_{ges} = 0,50$), DN 1200 ($h_{zu}/h_{ges} = 0,60$), DN 1600 ($h_{zu}/h_{ges} = 0,80$) und DN 2000 ($h_{zu}/h_{ges} = 1,00$) bei einer Beckentiefe von 2,0 m. Die Oberflächenbeschickung des Beckens beträgt 10 m/h. Alle Randbedingungen, so auch das Volumen und der Zufluss, sind für die Simulationen identisch, es ändert sich lediglich der Durchmesser des Zulaufs.

Bild 6.37 zeigt die isometrische Darstellung des untersuchten Beckens. Wesentliche Randbedingungen sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst.

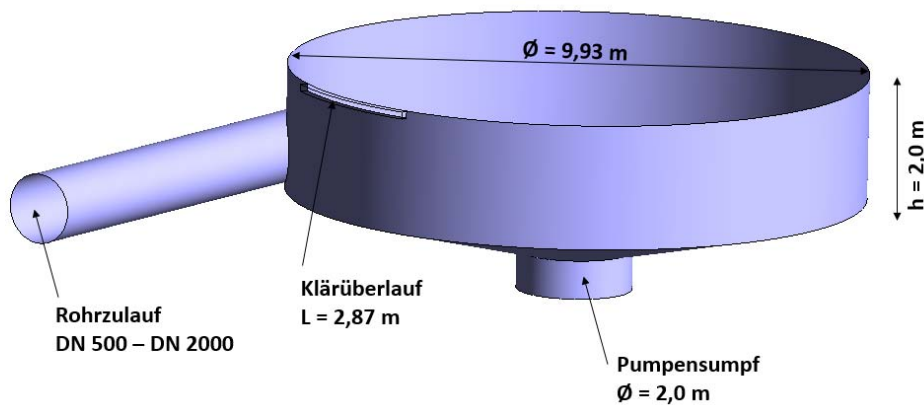


Bild 6.37: Isometrische Darstellung der Becken-Konfiguration zur Untersuchung des Einflusses des Zulauf-DN

Durch die Erhöhung des Zulauf-Durchmessers wird die Zulauf-Fließgeschwindigkeit reduziert. Folglich ist auch die Fläche größer, in der das Becken angeströmt wird. Dies reduziert den spezifischen Energieeintrag und führt zu einer größeren aktiv durchströmten Zone sowie zu insgesamt geringeren Fließgeschwindigkeiten (vgl. Bild 6.38). In der Abbildung ist beispielhaft die Durchströmung anhand von Konturplots der Fließgeschwindigkeiten für zwei Zulauf-Durchmesser (DN 500 und DN 2000) dargestellt.

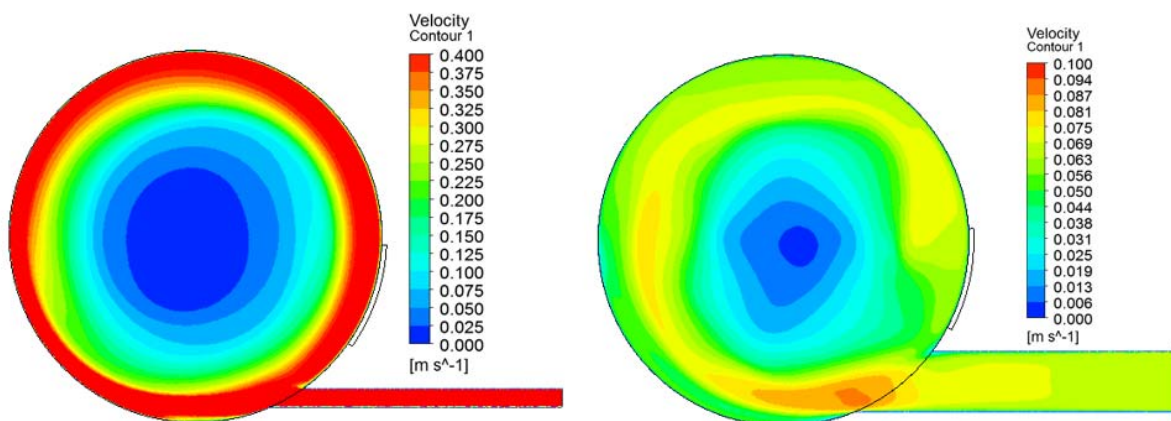


Bild 6.38: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten verschiedener Zulauf-Durchmesser, links: DN 500; rechts: DN 2000;

In Bild 6.39 wird deutlich, dass, je größer das Verhältnis von Zulauf-DN und Beckentiefe ist, desto höher auch der Absetzwirkungsgrad einzelner Partikel wird. Dies ist hauptsächlich auf die durch den größeren Zulauf-Querschnitt resultierende geringere Fließgeschwindigkeiten und damit auch geringeren Energieeintrag zurückzuführen.

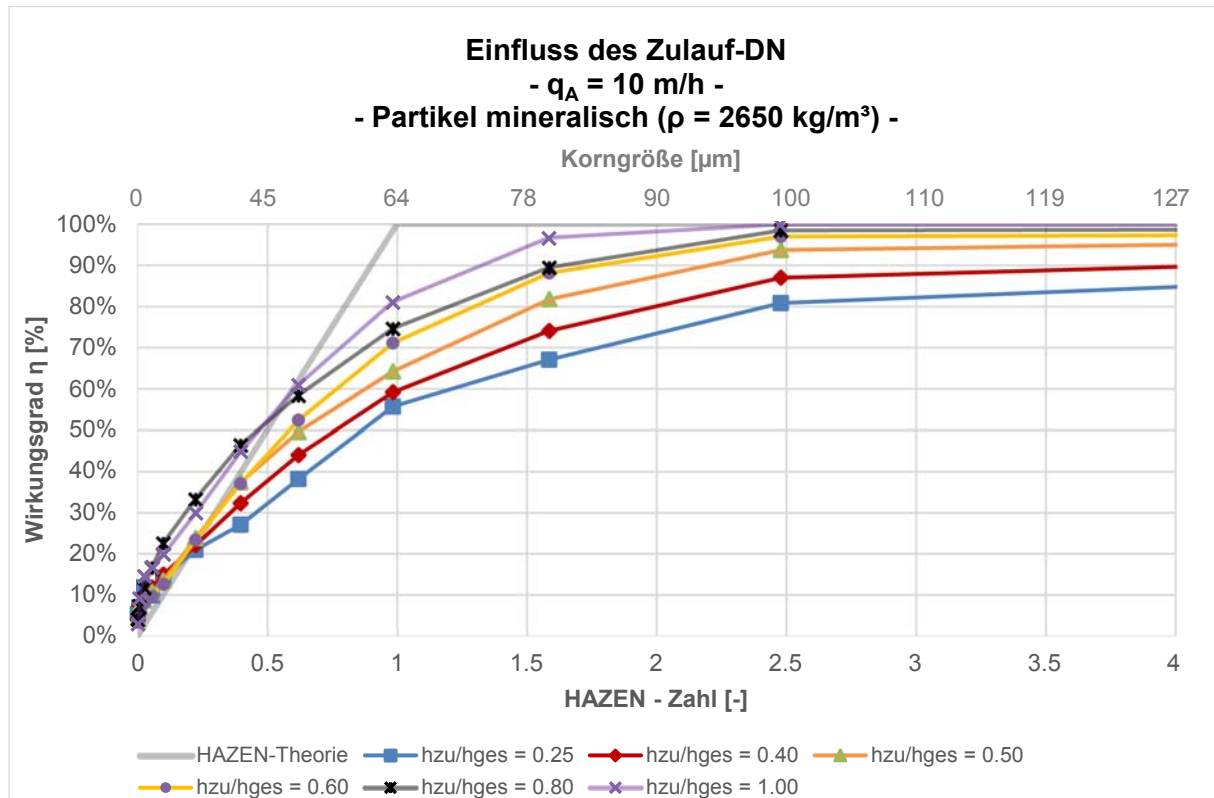


Bild 6.39: Einfluss des Verhältnisses von Zulauf-Durchmesser zur Beckentiefe auf den Absetzwirkungsgrad einzelner Partikel

Bezogen auf den massegewichteten Gesamt-Absetzwirkungsgrad gilt ebenfalls, je größer das Verhältnis zwischen Zulauf-DN und Beckentiefe, desto höher ist der Absetzwirkungsgrad (vgl. Bild 6.40 und Bild 6.41). Darüber hinaus zeigt die Abbildung, dass durch die Verringerung der Zulaufgeschwindigkeit der Absetzwirkungsgrad von AFS $> 63 \mu\text{m}$ positiv beeinflusst wird, wohingegen AFS $< 63 \mu\text{m}$ kaum auf diesen Einfluss reagieren.

Nach (DWA 2013S. 166) sollte der Abstand zwischen dem Scheitel des Zulaufrohrs und dem Klärüberlauf mindestens $0,80 \text{ m}$ betragen. Auf Grundlage der durchgeführten Simulationen, bei denen dieser Grenzwert von $0,80 \text{ m}$ zum Teil nicht eingehalten wird (bei $h_{zu}/h_{ges} = 0,80$ und $1,00$), kann nicht bestätigt werden, dass bei Unterschreitung des Grenzwertes Kurzschlussströmungen auftreten.

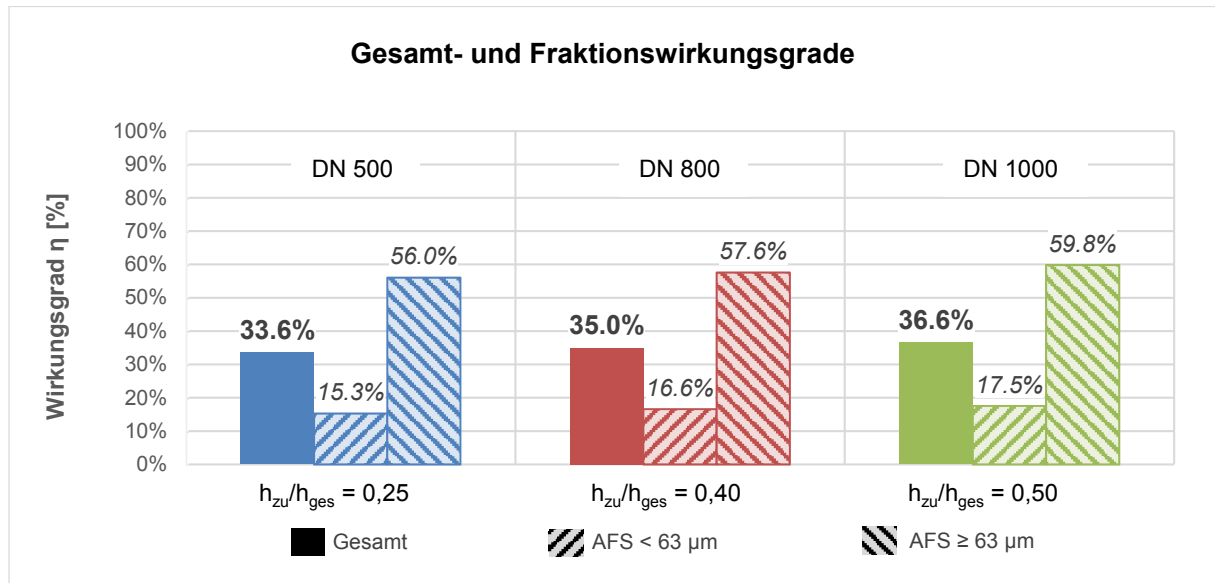


Bild 6.40: Einfluss des Verhältnisses von Zulauf-Durchmesser zur Beckentiefe auf Gesamt- und Fraktions-Absetzwirkungsgrade (DN 500 – 1000)

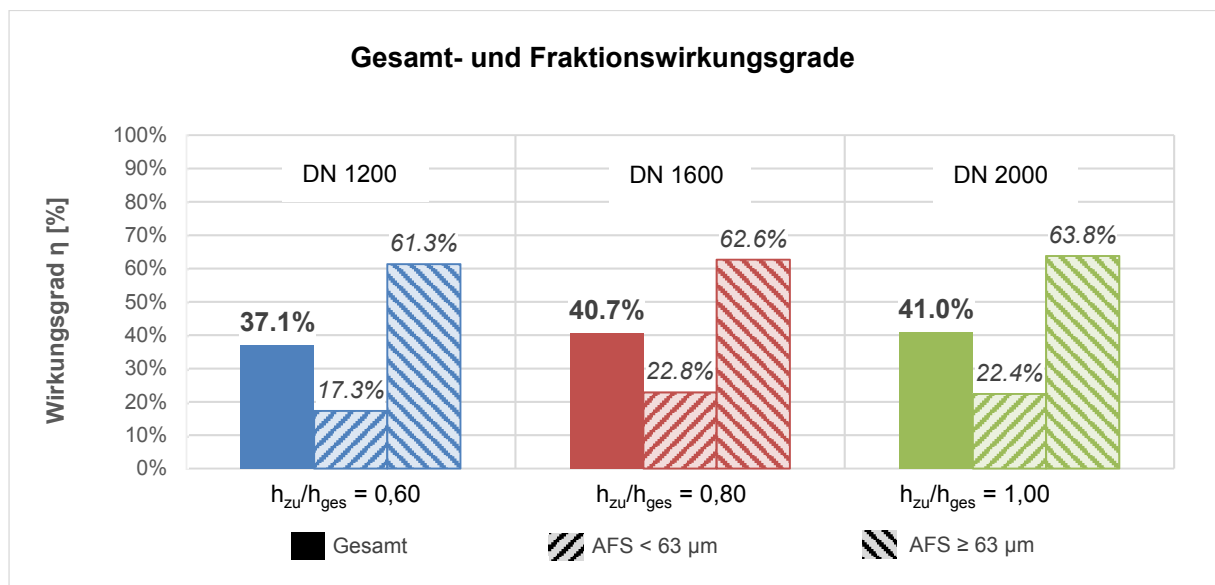


Bild 6.41: Einfluss des Verhältnisses von Zulauf-Durchmesser zur Beckentiefe auf Gesamt- und Fraktions-Absetzwirkungsgrade (DN 1200 – 2000)

Einfluss des Durchmesser-Tiefen-Verhältnisses

Im nächsten Schritt wird das Durchmesser-Tiefen-Verhältnis (D/T-Verhältnis) in der Großausführung numerisch untersucht. Dazu wurden das Volumen und der Zufluss konstant gehalten. Dadurch ergeben sich bei der Veränderung des D/T-Verhältnisses unterschiedliche Oberflächen und bei gleicher hydraulischer Belastung somit auch unterschiedliche Oberflächenbeschickungen. Bei einem geringen D/T-Verhältnis liegt ein schmales aber dafür tiefes Becken vor. Bei einem hohen D/T-Verhältnis hat das Becken bei gleichem Volumen eine geringe Tiefe,

dafür ist es deutlich größer im Durchmesser. Bei der gleichen hydraulischen Belastung, hat ein geringes D/T -Verhältnis eine höhere Oberflächenbeschickung als ein hohes D/T -Verhältnis. Insgesamt werden vier unterschiedliche D/T -Verhältnisse untersucht (siehe Bild 6.42).

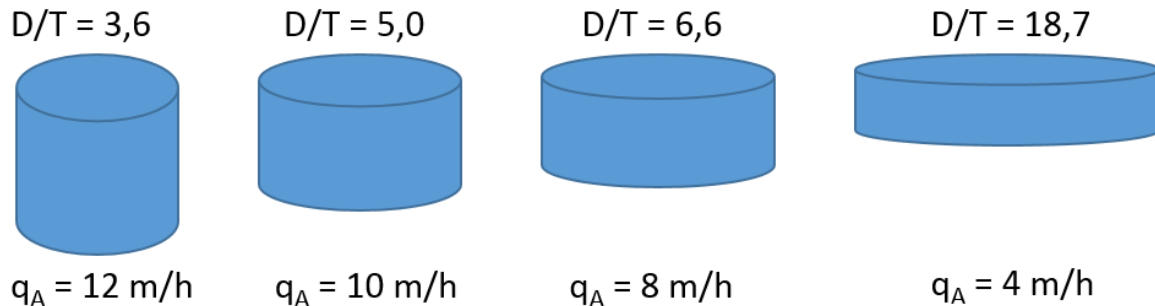


Bild 6.42: Schematische Darstellung der untersuchten Durchmesser-Tiefen-Verhältnisse bei gleichbleibendem Volumen von $V = 150 \text{ m}^3$

Für jedes D/T -Verhältnis werden zwei unterschiedliche Zulauf-Durchmesser getestet, dies sind die beiden in der Praxis häufigen Rohrzuläufe DN 800 und DN 1200 mit Zulauf-Höhenverhältnissen von $h_{zu}/h_{ges} = 0,40$ bzw. $0,60$. Bei dem Rohrzulauf von $h_{zu}/h_{ges} = 0,60$ konnte das D/T -Verhältnis von 18,7 jedoch nicht realisiert werden, da der Durchmesser des Zulaufs die Beckentiefe deutlich überschreiten würde.

In Bild 6.43 sind die Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel in Abhängigkeit des D/T -Verhältnisses jeweils für die beiden Rohrzuläufe abgebildet. Die kontinuierlichen Linien zeigen die Absetzwirkungsgrade für ein Verhältnis h_{zu}/h_{ges} von 0,40, die gestrichelten ein Verhältnis h_{zu}/h_{ges} von 0,60.

Zunächst können auch diese Simulationen die zuvor getroffene Aussage stützen, dass mit steigendem h_{zu}/h_{ges} ebenfalls der Absetzwirkungsgrad steigt. Bei größeren Partikeln (ϕ von 40 bis $100 \mu\text{m}$) ist deutlich zu erkennen, dass mit einem steigenden Verhältnis von D/T auch der Absetzwirkungsgrad steigt. Beispielsweise steigt bei einem Partikeldurchmesser $d_K = 63 \mu\text{m}$ der Absetzwirkungsgrad von 52,1 % bei $D/T = 3,6$ auf 58,0 % bei $D/T = 5,0$ und 76,7 % bei $D/T = 18,7$.

Im Bereich der feinen Partikel ($\phi = 5$ und $15 \mu\text{m}$) ist der Einfluss der D/T -Verhältnisses eher gering, aber teilweise sogar gegenläufig zum Verhalten der gröberen Partikel. So liegt der Absetzwirkungsgrad eines $15 \mu\text{m}$ kleinen Partikels für $D/T = 3,6$ und $h_{zu}/h_{ges} = 0,40$ (DN 800) bei 13,2 %. Durch die Erhöhung des D/T -Verhältnisses auf 18,7 liegt der Absetzwirkungsgrad bei nur noch 11,5 %. Dazwischen liegt ein relatives Minimum mit 8,9 % Wirkungsgrad bei $D/T = 6,6$ vor. Bei einem Partikel der Größe $5 \mu\text{m}$ ist mit steigendem D/T -Verhältnis eine minimale, aber kontinuierliche Verschlechterung der Absetzwirkungsgrade zu erkennen.

In Bild 6.44 sind die Gesamt- und Fraktionswirkungsgrade der einzelnen D/T-Verhältnisse für die Konfiguration mit dem Zulauf von $h_{zu}/h_{ges} = 0,40$ abgebildet. Es ist ersichtlich, dass das D/T-Verhältnis vor allem Einfluss auf die AFS $\geq 63 \mu\text{m}$ Fraktion hat und nur minimalen Einfluss auf die Fraktion AFS $< 63 \mu\text{m}$.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, dass die Erhöhung des Durchmesser-Tiefen-Verhältnisses den Absetzwirkungsgrad größerer Partikel positiv beeinflusst, kleinere Partikel reagieren kaum auf das D/T-Verhältnis. Insgesamt kann der Gesamt-Absetzwirkungsgrad bei einer Erhöhung des D/T-Verhältnis von 3,6 auf 18,7 um etwa 6 % verbessert werden. Hauptgrund dafür ist die reduzierte Oberflächenbeschickung von 12 m/h auf 4 m/h.

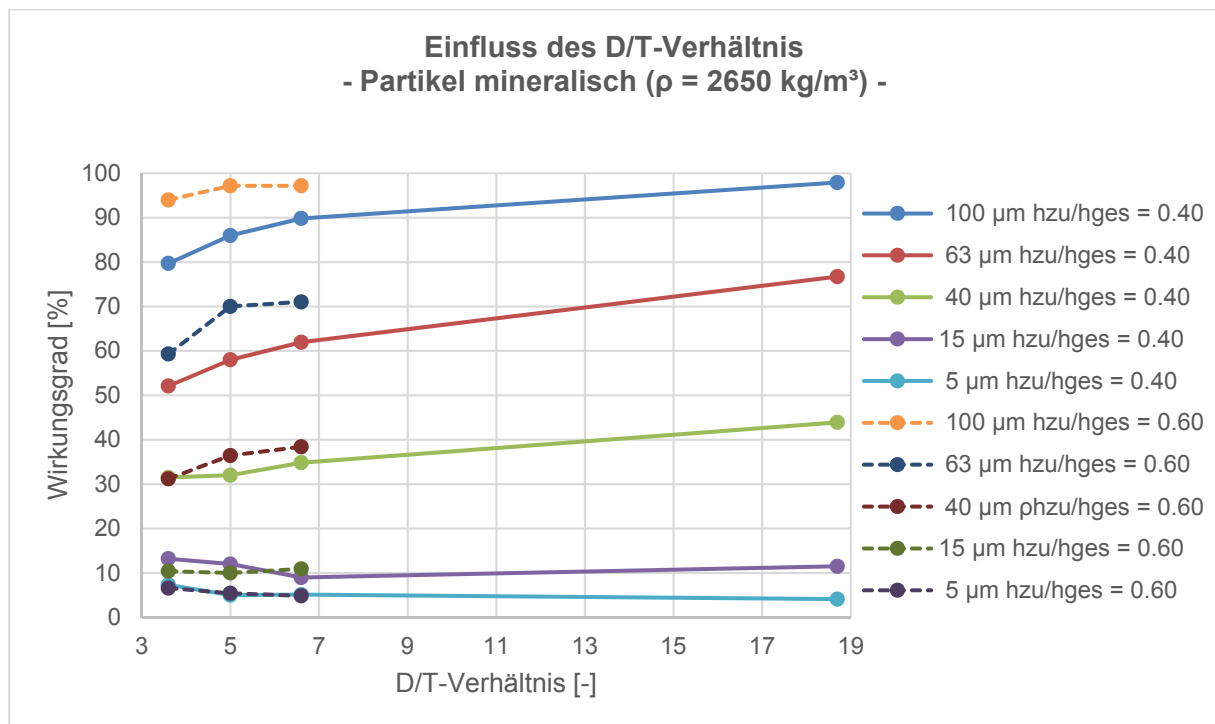


Bild 6.43: Einfluss des Durchmesser/Tiefen-Verhältnisses bzw. der Oberflächenbeschickung in Abhängigkeit des Zulauf-DN auf den Absetzwirkungsgrad ausgewählter Partikel

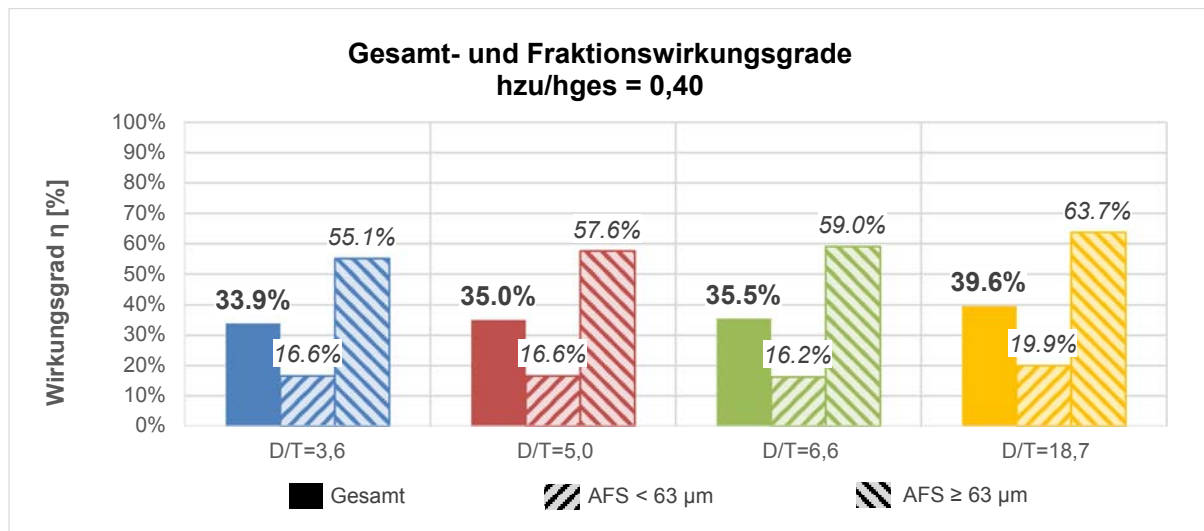


Bild 6.44: Einfluss des Durchmesser/Tiefen-Verhältnisses auf den Gesamt-Absetzwirkungsgrad für $h_{zu}/h_{ges} = 0,40$ (DN 800)

Einfluss des Zulauf-Winkels

Nach der Untersuchung der Zulauf-Durchmessers und der Durchmesser/Tiefen-Verhältnisse wurde im nächsten Schritt der Einfluss des Winkels untersucht, in dem in das Becken eingeleitet wird. Diese Untersuchungen sind für ein D/T-Verhältnis von 18,7 und einen Zulauf-DN von 800 mm durchgeführt worden, was für dieses Becken einem Zulauf-Höhenverhältnis von $h_{zu}/h_{ges} = 0,85$ entspricht. Es wurden insgesamt drei verschiedene Zulauf-Winkel untersucht. Der Winkel wird so definiert, dass die Achse des Zulaufs den Radius des Beckens auf einer bestimmten Strecke schneidet. Die Achse des ersten Zulauf-Winkels schneiden den Radius bei $0,85 \cdot r$, der zweite Zulauf-Winkel bei der Hälfte des Radius ($0,50 \cdot r$). Der dritte Zulauf leitet direkt auf den Mittelpunkt ($0,00 \cdot r$) des Beckens ein (siehe Bild 6.45).

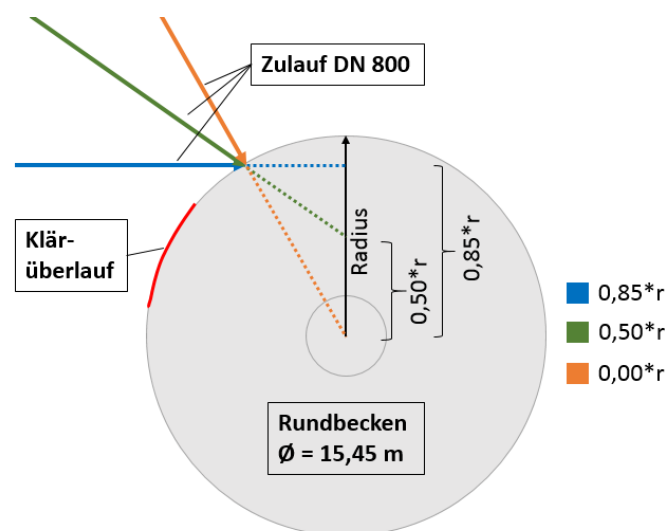


Bild 6.45: Schematische Darstellung der untersuchten Zulauf-Winkel

In Bild 6.46 und in Bild 6.47 wird die Durchströmungscharakteristik infolge des Zulauf-Winkels deutlich. Ein Becken mit einem Zulauf, der auf $0,85\cdot r$ einleitet, bildet die für Rundbecken typische Rotationsströmung aus. Beim Zulauf, der auf der Hälfte des Radius einleitet, bilden sich zwei Rotationsströmungen aus, wobei die in Richtung des Zulaufs rechte Rotationsströmung einen größeren Bereich des Beckens einnimmt. Bei der Einleitung in Beckenmitte legt sich der konzentrierte Zulaufstrom an die Beckenaußenwand an, ähnlich wie beim Zulauf mit $0,85\cdot r$. Es entsteht eine Rotationsströmung, die jedoch eine größere Breite besitzt als diejenige beim Zulauf von $0,85\cdot r$. Daraus resultieren insgesamt geringere Fließgeschwindigkeiten. In Bild 6.47 wird deutlich, dass bei einer Einleitung in Beckenmitte und einem direkt neben dem Zulauf liegenden Klärüberlauf Kurzschlussströmungen begünstigt werden.

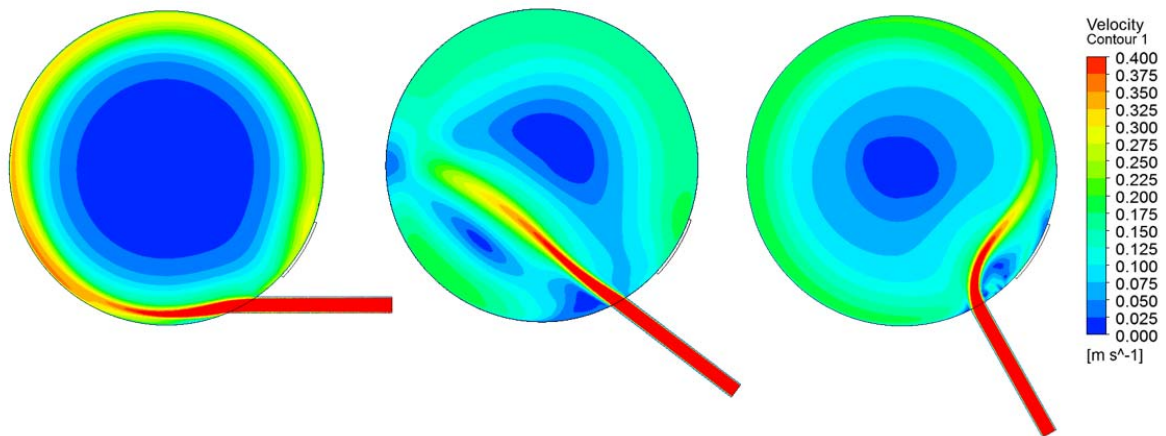


Bild 6.46: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten verschiedener Zulauf-Winkel, links: $0,85\cdot r$; Mitte: $0,50\cdot r$; rechts: $0,00\cdot r$;

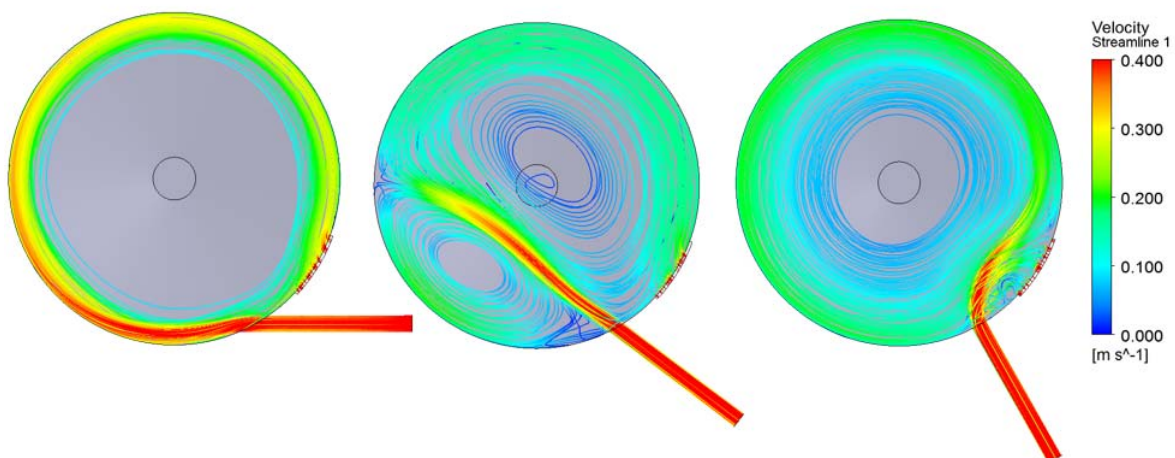


Bild 6.47: Stromlinien mit Start im Einlauf verschiedener Zulauf-Winkel, links: $0,85\cdot r$; Mitte: $0,50\cdot r$; rechts: $0,00\cdot r$;

Aus den Ergebnissen in Bild 6.48 ist ersichtlich, dass, bezogen auf mineralische Partikel, der Zulauf, welcher auf die Hälfte des Radius' gerichtet ist, auf der gesamten Bandbreite von Hazen-Zahlen die mit Abstand besten Absetzwirkungsgrade erzielt.

Der auf den Mittelpunkt des Beckens einleitende Zulauf weist deutliche Defizite im Bereich von größeren Ha-Zahlen auf. So liegt der Absetzwirkungsgrad bei einem Partikel mit einer Ha-Zahl = 1,0 beim Zulauf mit 0,0·r bei ca. 45 % (Bild 6.48), der Zulauf mit 0,50·r erzielt für denselben Partikel einen Rückhalt von ca. 65 %. Dies kann unter anderem auf die Kurzschlussströmung zurückgeführt werden.

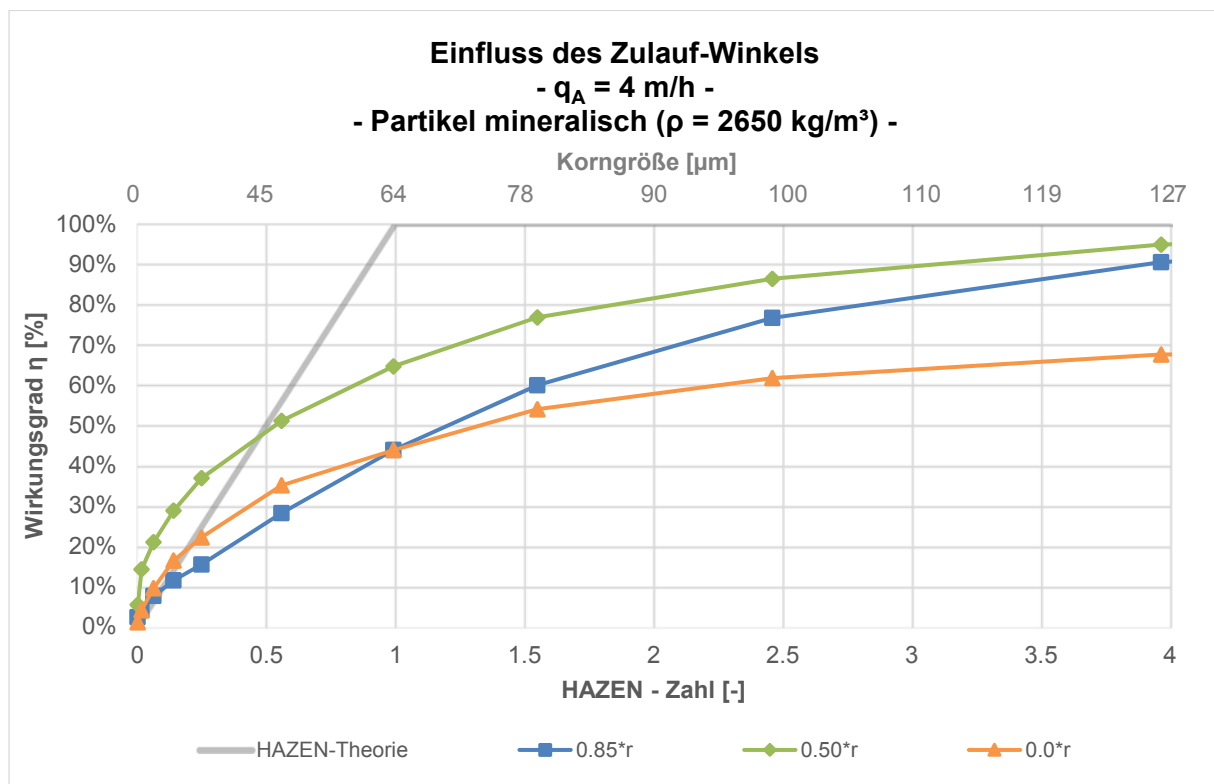


Bild 6.48: Einfluss des Zulauf-Winkels auf den Absetzwirkungsgrad einzelner Partikel (mineralisch, $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$)

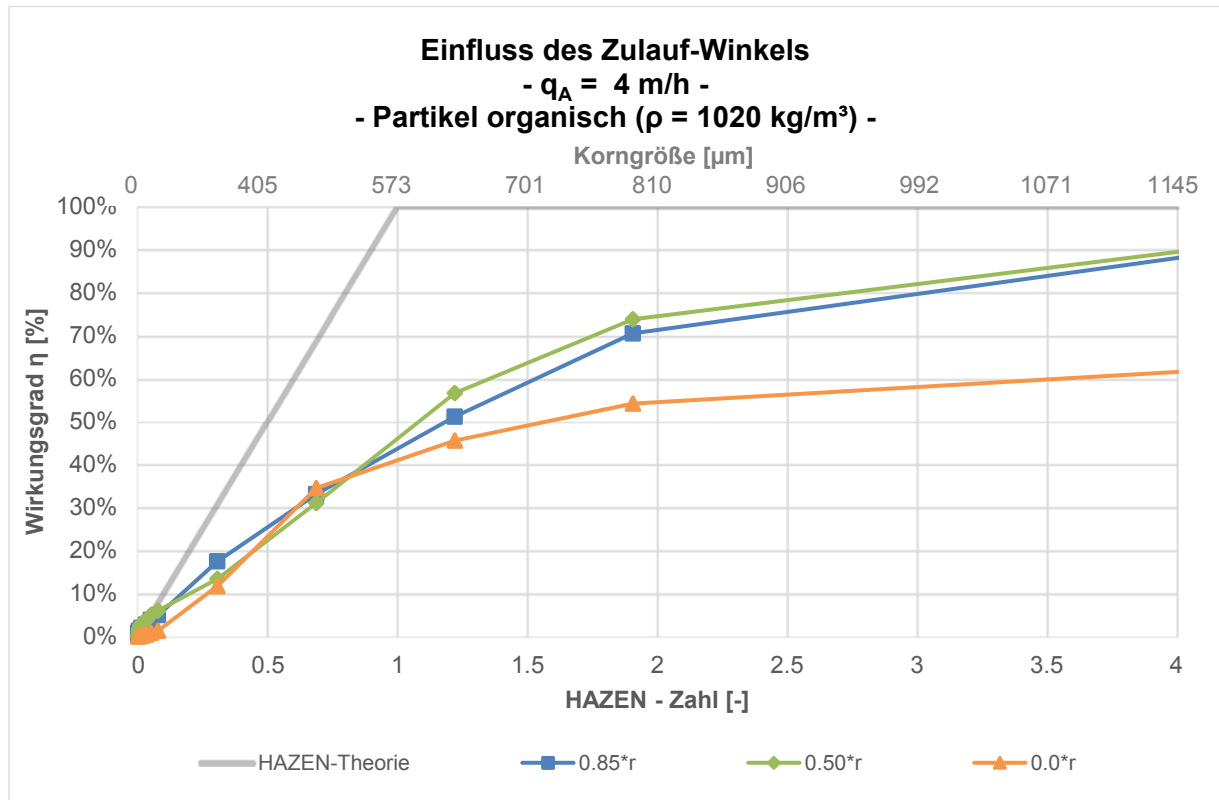


Bild 6.49: Einfluss des Zulauf-Winkels auf den Absetzwirkungsgrad einzelner Partikel (organisch, $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$)

Bezüglich organischer Partikel unterscheiden sich die Zulauf-Winkel mit 0,85-r und 0,50-r nur geringfügig. Auch der Zulauf-Winkel mit 0,00-r deckt sich im Bereich der feineren Partikel (bis $H_a = 0,75$) mit den beiden anderen Zulaufwinkeln. Darüber hinaus, bei Hazen-Zahlen über 0,75, weist diese Anordnung deutlich geringere Partikel-Absetzwirkungsgrade auf als die anderen Konfigurationen (Bild 6.49).

Bild 6.50 zeigt den Einfluss des Zulauf-Winkels auf die Gesamt- und Fraktionswirkungsgrade. Der Zulauf-Winkel mit 0,50-r hat mit rund 48 % den höchsten Gesamt-Absetzwirkungsgrad. Mit ca. 40 % liegt der Zulauf-Winkel mit 0,85-r deutlich darunter, dies liegt hauptsächlich an dem geringeren Rückhalt an AFS < 63 μm . Der Zulauf, welcher zentral in Beckenmitte einleitet, hat mit Abstand den geringsten Gesamt-Absetzwirkungsgrad ($\eta_{\text{ges}} = 36 \%$).

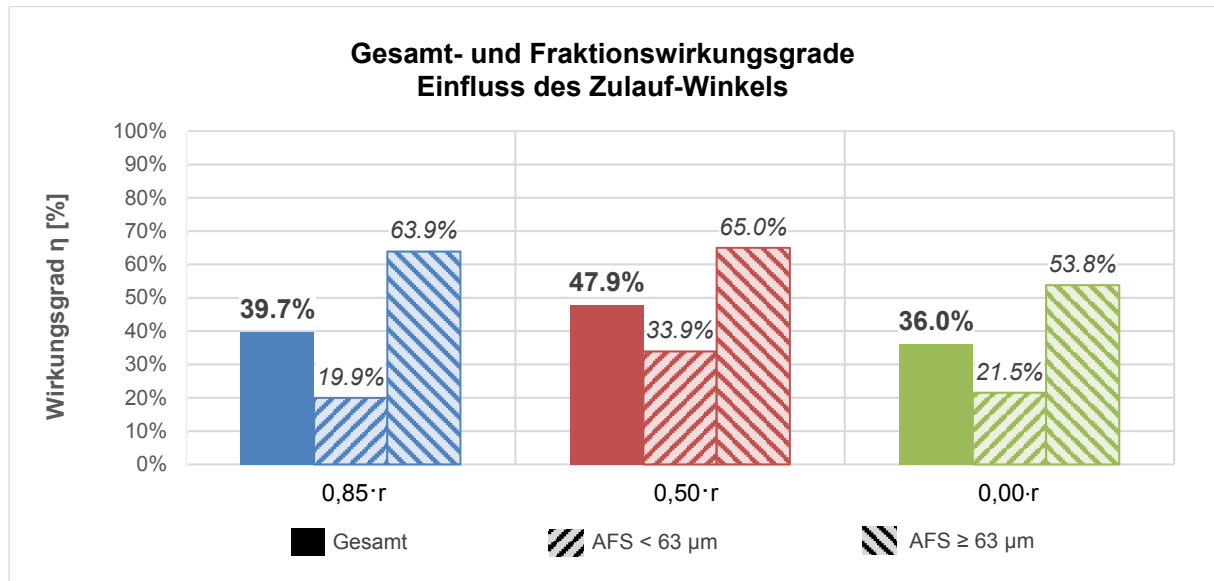


Bild 6.50: Einfluss des Zulauf-Winkels auf Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade

6.4.3.2 Sonderkonstruktionen

In diesem Kapitel werden zwei Sonderkonfigurationen untersucht. Dies ist zum einen ein Becken, welches über einen tangentialen Zulauf (0,85·r) beschickt wird, dessen Klärüberlauf jedoch nicht außen, sondern zentral in der Beckenmitte liegt. Zum anderen wird eine Konfiguration aus einem zentralen Zulauf und einem die ganze Beckenaußenwand umlaufenden Klärüberlauf untersucht, sodass das Becken radial von innen nach außen durchströmt wird.

Zentraler Klärüberlauf & tangentialer Zulauf

Die Becken-Konfiguration aus zentralem Klärüberlauf und tangentialem Zulauf bewirkt eine Durchströmungscharakteristik die insgesamt sehr hohe Fließgeschwindigkeiten aufweist. Im Gegensatz zur charakteristischen Durchströmung ist hier durch die Anordnung des Klärüberlaufs in Beckenmitte keine langsam strömende Rotationsströmung vorzufinden. Durch den Sog des Klärüberlaufs in Beckenmitte entsteht im zentralen Bereich eine sehr schnell fließende Rotationsströmung, die etwa genauso hohe Fließgeschwindigkeiten wie der Rohrzulauf aufweist. Die insgesamt hohen Fließgeschwindigkeiten führen zu vergleichsweise hohen Schubspannungen auf der Sohle, sodass vor allem feine Partikel sich nicht absetzen können. Dies wird durch den in Bild 6.52 abgebildeten Gesamt-Absetzwirkungsgrad deutlich, der lediglich bei 6,0 % liegt.

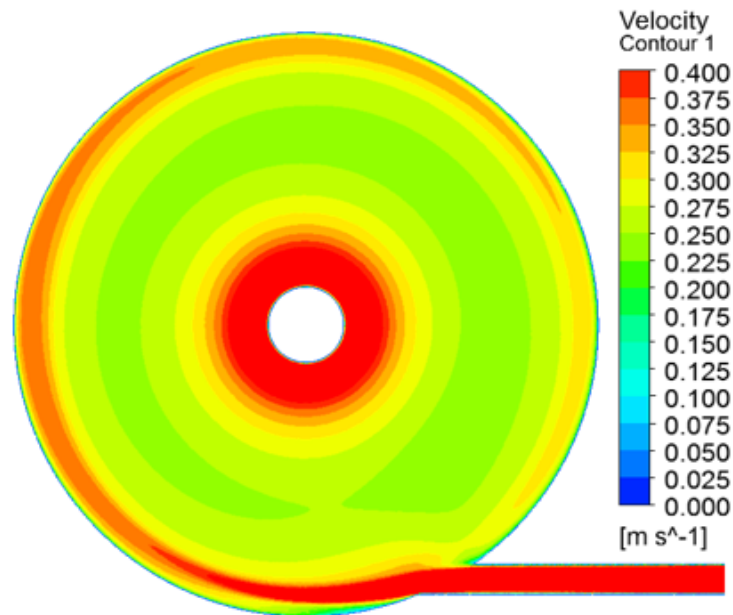


Bild 6.51: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten der Variante mit zentralem Klärüberlauf und tangenialem Zulauf

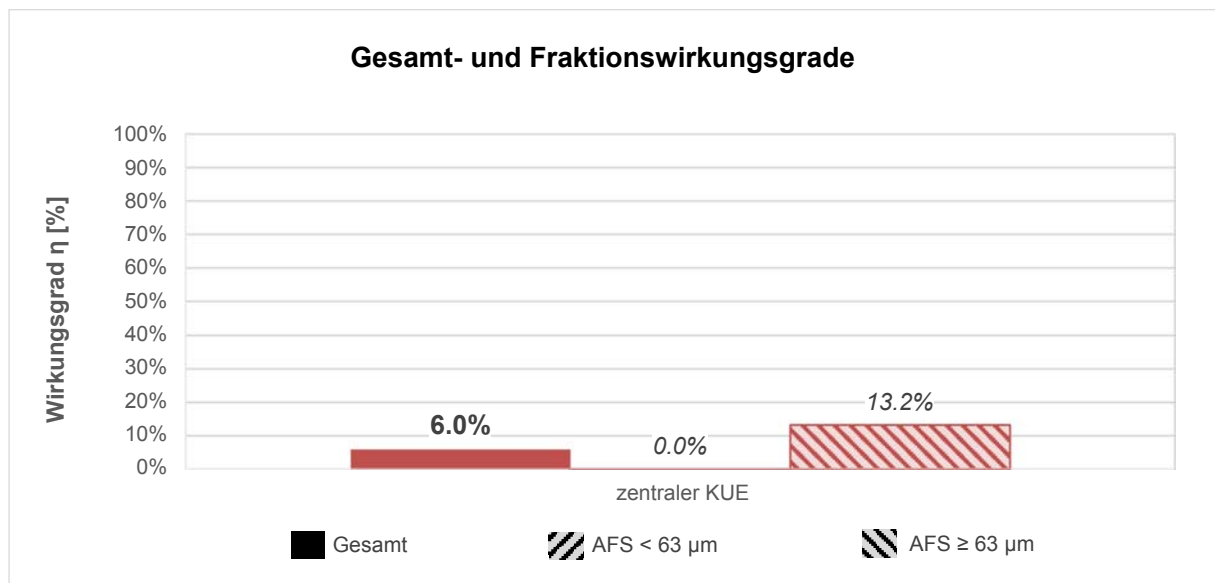


Bild 6.52: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade für die Konfiguration aus zentralem Klärüberlauf und tangenialem Zulauf

Zentraler Zulauf & außen umlaufender Klärüberlauf

Nach DWA-A 166 (2013) kommen auch Rundbecken mit zentraler Beschickung, radialer Durchströmung von innen nach außen, und einem die ganze Beckenaußenwand umlaufenden Klärüberlauf in Frage. Die Becken-Konfiguration ist in Bild 6.53 dargestellt, diese ähnelt vom Aufbau und Durchströmung her Vor- und Nachklärbecken von Kläranlagen.

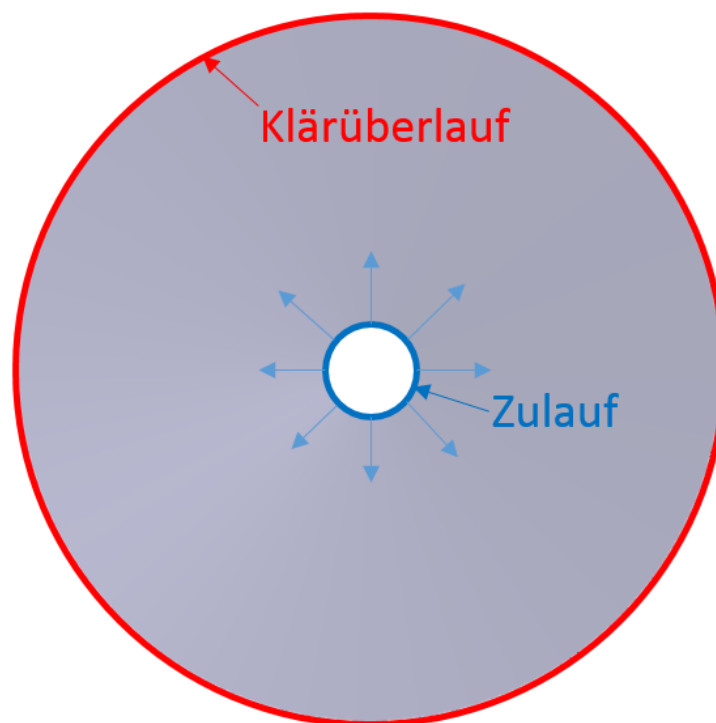


Bild 6.53: Lage des Zu- und Ablaufs der Becken-Konfiguration mit zentraler Beschickung und außen umlaufendem Klärüberlauf

Die Durchströmungscharakteristik für einen Beckenausschnitt (Radius) ist in Bild 6.54 dargestellt. Infolge des hochliegenden Zulaufs bildet sich ein schnell fließender Bereich nahe des Wasserspiegels aus. Der untere Beckenteil wird nicht aktiv durchströmt, dort liegt eine Walze mit horizontaler Achse. Der wesentliche Unterschied zu den bisherigen Becken ist, dass durch die Zulauf-Konfiguration ein deutlich größerer Zulaufquerschnitt realisiert werden kann, sodass der spez. Energieeintrag deutlich reduziert wird. Dieser liegt bei $0,07 \text{ W/m}^3$, bei gleichem Becken mit einem Zulauf über die gesamte Beckentiefe liegt der spez. Energieeintrag bei $0,75 \text{ W/m}^3$. Voraussetzung für das hier gezeigte Strömungsprofil ist ein ideal angeströmter Zulauf.

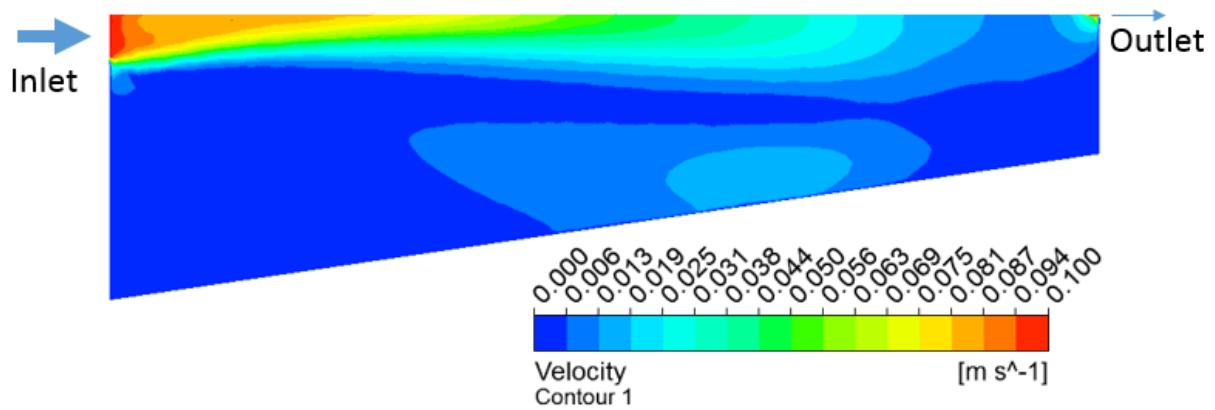


Bild 6.54: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten der Variante mit zentralem Zulauf und außen umlaufendem Klärüberlauf

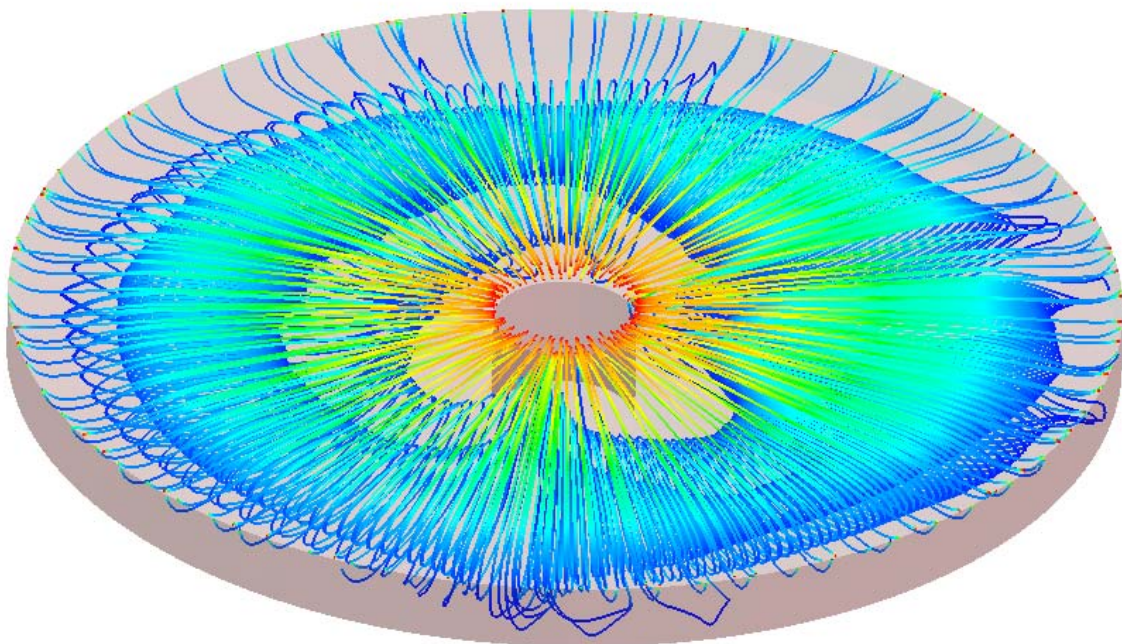


Bild 6.55: 3D-Ansicht der Stromlinien der Variante mit zentralem Zulauf und außen umlaufendem Klärüberlauf

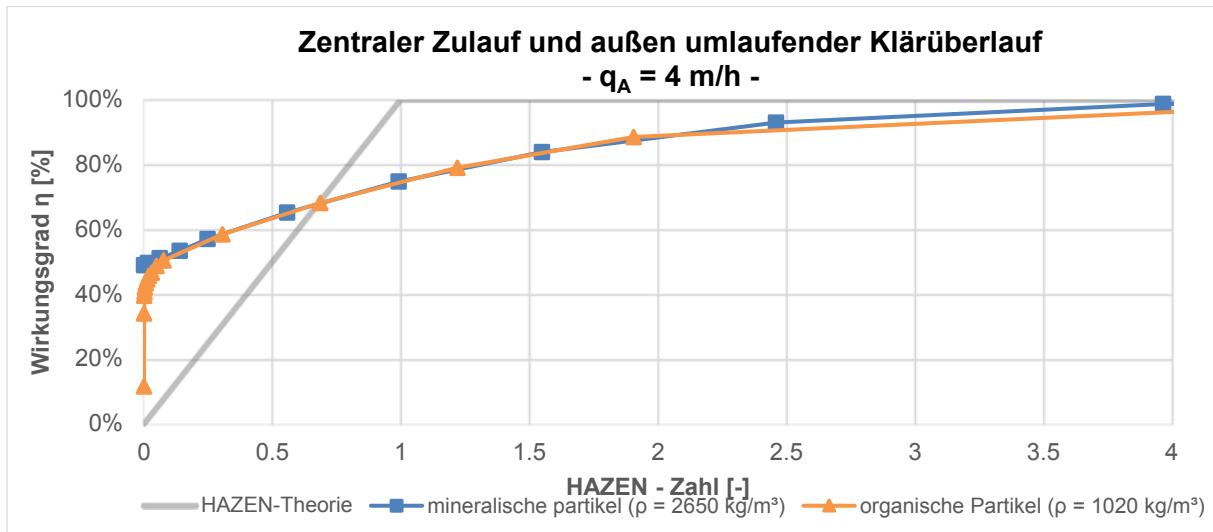


Bild 6.56: Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel für die Konfiguration aus zentralem Zulauf und außen umlaufendem Klärüberlauf

Durch Bild 6.56 wird deutlich, dass die Konfiguration einen besonders hohen Absetzwirkungsgrad im Bereich von feinen Partikeln aufweist. Teilweise wird ein um nahezu 50 % höherer Wirkungsgrad erzielt, als dies nach der Theorie von Hazen möglich ist.

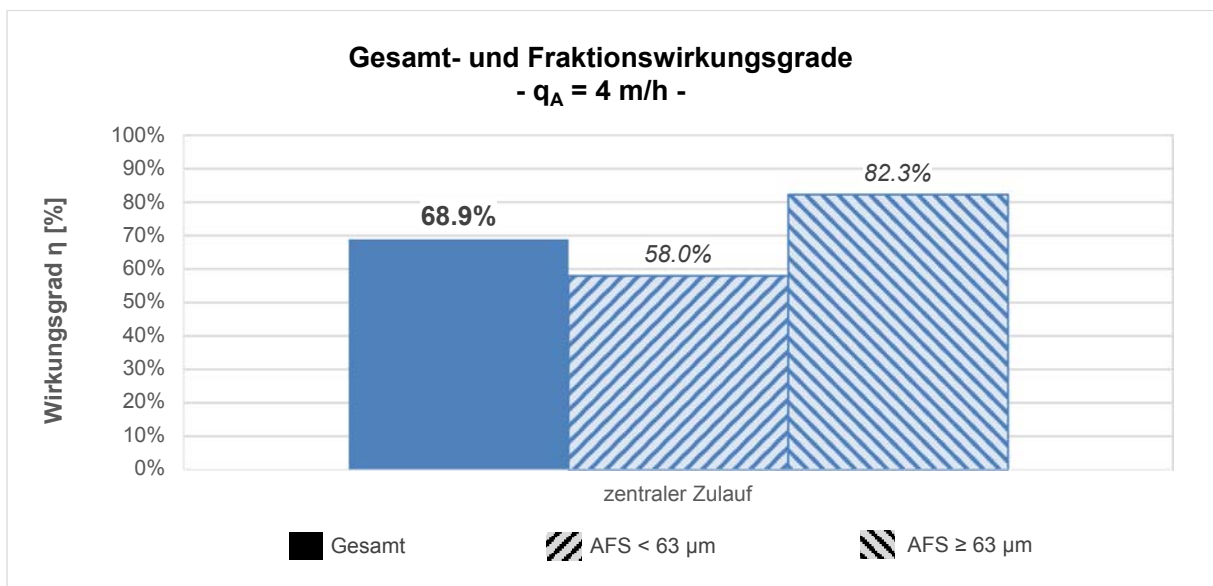


Bild 6.57: Gesamt- und Fraktionswirkungsgrade für die Konfiguration aus zentralem Zulauf und außen umlaufendem Klärüberlauf

Der Absetzwirkungsgrad für die Fraktion AFS ≥ 63 μm liegt bei etwa 82 %, die Fraktion AFS < 63 μm wird zu 58 % zurückgehalten. Insgesamt ist das Becken in der Lage ca. 69 % der zugegebenen Partikel zurückzuhalten.

6.4.3.3 Auswahl einer optimierten Becken-Konfiguration

Auf Grund der sehr guten Performanz sowohl für feine als auch für grobe Partikel der Becken-Konfiguration mit zentralem Zulauf und außen umlaufenden Klärüberlauf wird diese als optimierte-Becken-Konfiguration vorgeschlagen.

6.4.3.4 Studie der optimierten Becken-Konfiguration

Im letzten Schritt der numerischen Simulations-Studie wird für das optimierte-Becken eine Studie durchgeführt, die das Verhalten des Beckens bei unterschiedlichen hydraulischen Belastungen aufzeigt. Dazu wird das Becken mit insgesamt sechs Oberflächenbeschickungen simuliert, diese liegen in einem Bereich von 2 bis 12 m/h.

Durch die nachfolgenden Abbildungen wird deutlich, dass die Oberflächenbeschickung eines Beckens deutlichen Einfluss auf dessen Absetzleistung hat. So zeigt das Diagramm in Bild 6.58, wie die verschiedenen Partikelfractionen auf die Oberflächenbeschickung reagieren. Interessant ist, dass die feineren Partikelfractionen mit 5 μm und 15 μm , bei insgesamt guten Wirkungsgraden um 50 %, nur sehr schwach auf eine Steigerung der Oberflächenbeschickung reagieren. Deutlicher fällt dagegen der Abfall der Wirkungsgrade für die gröberen Partikel ab 40 μm aus, die bis zu 30 % verlieren.

Weiterhin verringert sich der Gesamt-Absetzwirkungsgrad von 74,0 % bei $q_A = 2 \text{ m/h}$ in Bild 6.59 um etwa 16 % auf 57,9 % bei einem $q_A = 12 \text{ m/h}$ in Bild 6.60. Bei Betrachtung der Fraktion $\text{AFS} < 63 \mu\text{m}$ wird deutlich, dass der Einfluss der Oberflächenbeschickung etwas größer ist. Der Absetzwirkungsgrad verringert sich bei einer Steigerung der Oberflächenbeschickung von $q_A = 2 \text{ m/h}$ auf $q_A = 12 \text{ m/h}$ um 18,4 %. Für die Fraktion $\geq 63 \mu\text{m}$ liegt dieser Wert bei 13,4 %.

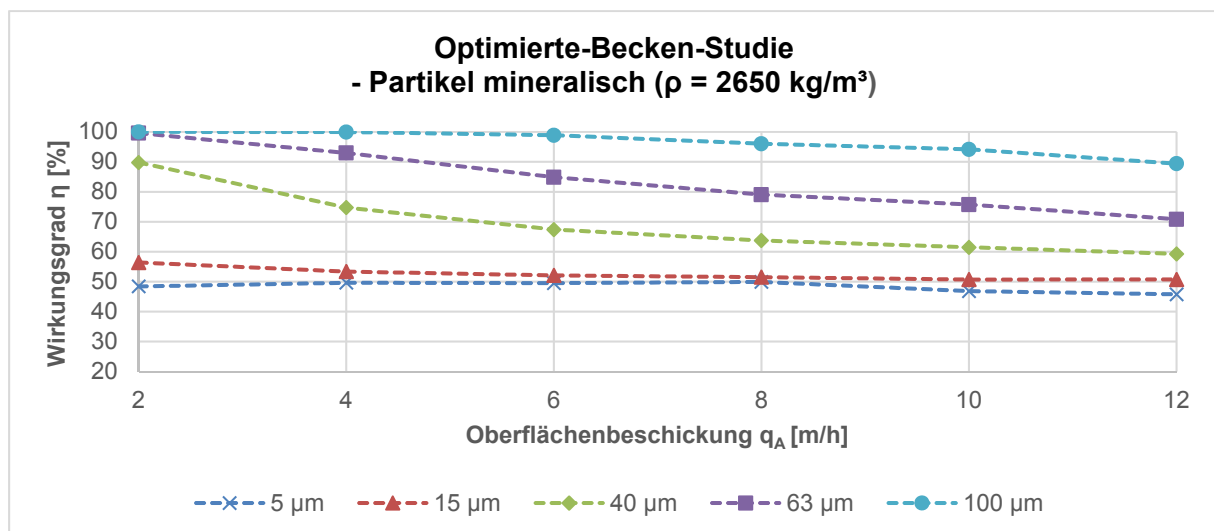


Bild 6.58: Absetzwirkungsgrade der Partikelfractionen in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschickung für das optimierte Becken

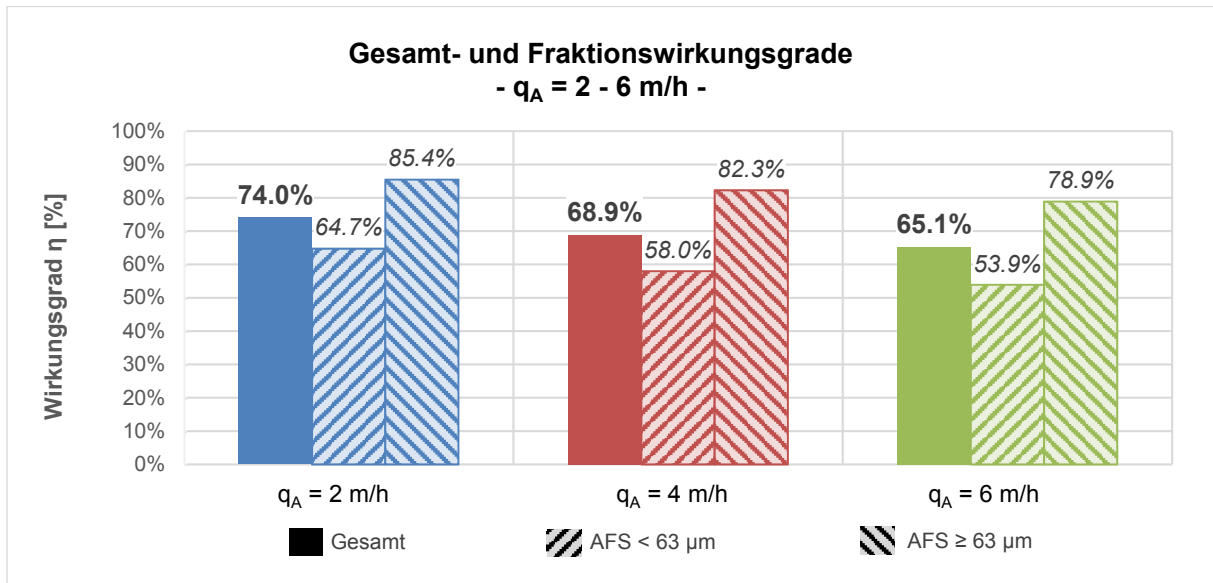


Bild 6.59: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade für das optimierte Becken und $q_A = 2-6 \text{ m/h}$

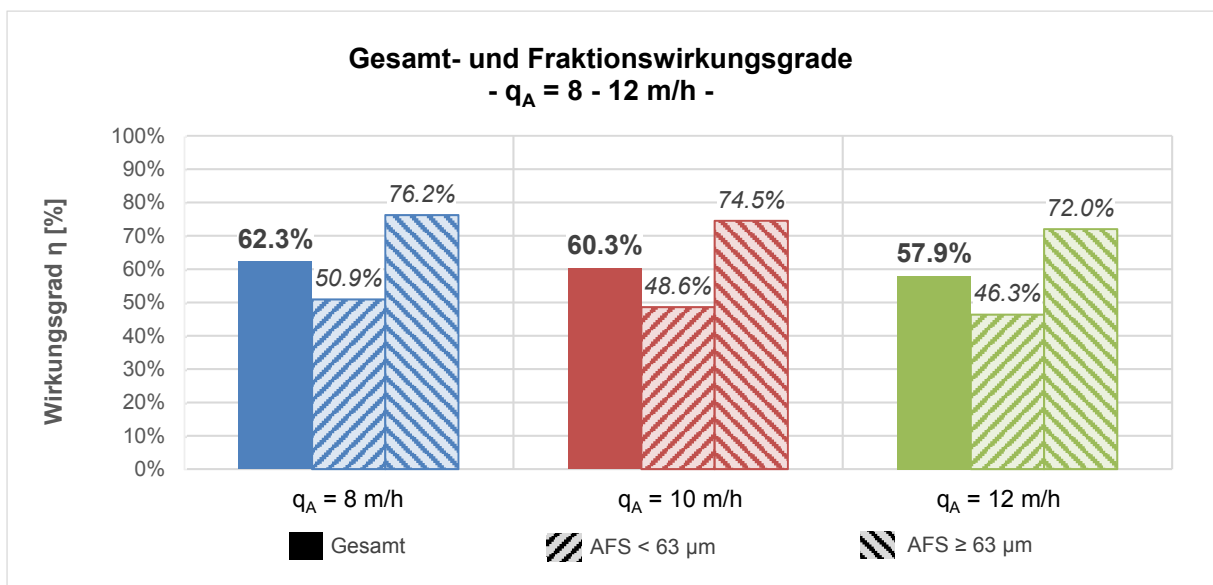


Bild 6.60: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade für das optimierte Becken und $q_A = 8-12 \text{ m/h}$

6.5 Empfehlungen zur Dimensionierung von Rundbecken im Neubau

Zentraler Zulauf und außen umlaufender Klärüberlauf

Eine Becken-Konfiguration bestehend aus einem **zentralen Zulauf und einem außen umlaufenden Klärüberlauf** wird als **besonders empfehlenswert** eingeschätzt, da diese Konfiguration die mit Abstand besten Absetzwirkungsgrade (bis zu $\eta_{\text{ges}} = 69\%$) erzielt. Für den Neubau wird ausdrücklich, sofern dies möglich ist, diese Konfiguration mit zentraler Anströmung empfohlen. Weiterhin wird eine Oberflächenbeschickung q_A von 4 m/h vorgeschlagen.

Wenn der Bau eines Rundbeckens mit zentraler Anströmung nicht möglich sein sollte, gelten die nachfolgenden Dimensionierungs-Empfehlungen:

Zulauf-Durchmesser

Bei Regenklärbecken in Rundbauweise mit tangentialer Anströmung sollte der **Zulauf-Durchmesser möglichst groß** sein. Die Untersuchungen zeigen, dass mit zunehmendem Zulauf-Durchmesser der Absetzwirkungsgrad verbessert wird, dies gilt für feine und grobe Partikel gleichermaßen. Realisiert werden kann dies, indem z.B. der Regenwasserkanal bis zur letzten Haltung gegen einen neuen, größeren Durchmesser ersetzt wird.

Durchmesser-Tiefen-Verhältnis

Die Untersuchungen zum Einfluss des Durchmesser-Tiefen-Verhältnisses haben gezeigt, dass die höchsten Absetzwirkungsgrade bei einem großen Durchmesser-Tiefen-Verhältnis erzielt werden. Dieses Verhalten ist bei groben Partikeln ausgeprägter als bei feinen Partikeln. Dies legt nahe, dass Rundbecken eine **möglichst große Oberfläche** besitzen sollten, sodass eine **geringe Oberflächenbeschickung** q_A resultiert (Empfehlung: $q_A = 4$ m/h). Die Ergebnisse für unterschiedliche Oberflächenbeschickungen bestätigen dies.

Zulauf-Winkel

Der Zulauf-Winkel, in dem in das Becken eingeleitet wird, weist nach Untersuchungen ein Optimum bei einer **Einleitung auf die Hälfte des Radius** auf, sodass diese **als besonders empfehlenswert** gilt. Hier wird vor allem bei feinen Partikeln ein vergleichsweise hoher Absetzwirkungsgrad erzielt. Eine Einleitung auf etwa **85 % des Radius wird nur bedingt empfohlen**. Eine **Einleitung in Richtung Beckenmitte (radiale Anströmung) wird nicht empfohlen**.

Tangentialer Zulauf & Zentraler Klärüberlauf

Eine Becken-Konfiguration bestehend aus einem **tangentialen Zulauf und zentralen Klärüberlauf** kann auf Grund der Untersuchungen **nicht empfohlen** werden.

7 Systematischer Vergleich zwischen rechteckigen und runden Regenklärbecken

7.1 Einführung und Untersuchungskonzept

Auch im Hinblick auf die Zielerreichung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) können in der Siedlungsentwässerung u.a. Regenklärbecken in Rechteck- und Rundbauweise zur Reinigung von Niederschlagsabflüsse im Trennsystem eingesetzt werden.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Fragestellung, welche Bauweise von Regenklärbecken, sei es eine rechteckige oder runde, bessere Bedingungen zur Sedimentation von absetzbaren Partikeln bietet. Um diese Fragestellung beantworten zu können, wird zunächst ein Vergleich zwischen der Grundvarianten beider Becken-Geometrien angestellt. Zudem wird die jeweilige optimierte-Becken-Konfiguration gegenübergestellt und bewertet. Auf Grundlage der gegenübergestellten Ergebnisse werden abschließend die Auswirkungen der Becken-Geometrien auf die Sedimentationsleistung beschrieben und Empfehlungen gegeben, in welchen Situationen welche Becken-Geometrie besser geeignet ist.

Das für den Vergleich herangezogene rechteckige und runde Regenklärbecken weisen nahezu identische Randbedingungen auf, sodass ein Vergleich beider Becken möglich ist. Alle Becken sind mit dem kommerziellen Softwarepaket FLUENT von ANSYS Inc. in der Version 19.0 simuliert.

7.2 Vergleich der Grundvarianten

Die sich in einem Rechteckbecken mit mittigem Gerinneinlauf ausbildende Durchströmung weist eine deutliche Kurzschlussströmung nahe des Wasserspiegels auf. Die Kurzschlussströmung resultiert maßgeblich infolge der Einlaufkonstruktion. Im Bereich der Beckenaußenwände befinden sich zwei, fast über die gesamte Beckenlänge reichende, großräumige Rezirkulationszonen. Eine annähernde Gleichverteilung der Geschwindigkeiten über die Beckenhöhe gelingt nur im hinteren Teil des Beckens (vgl. Bild 7.1).

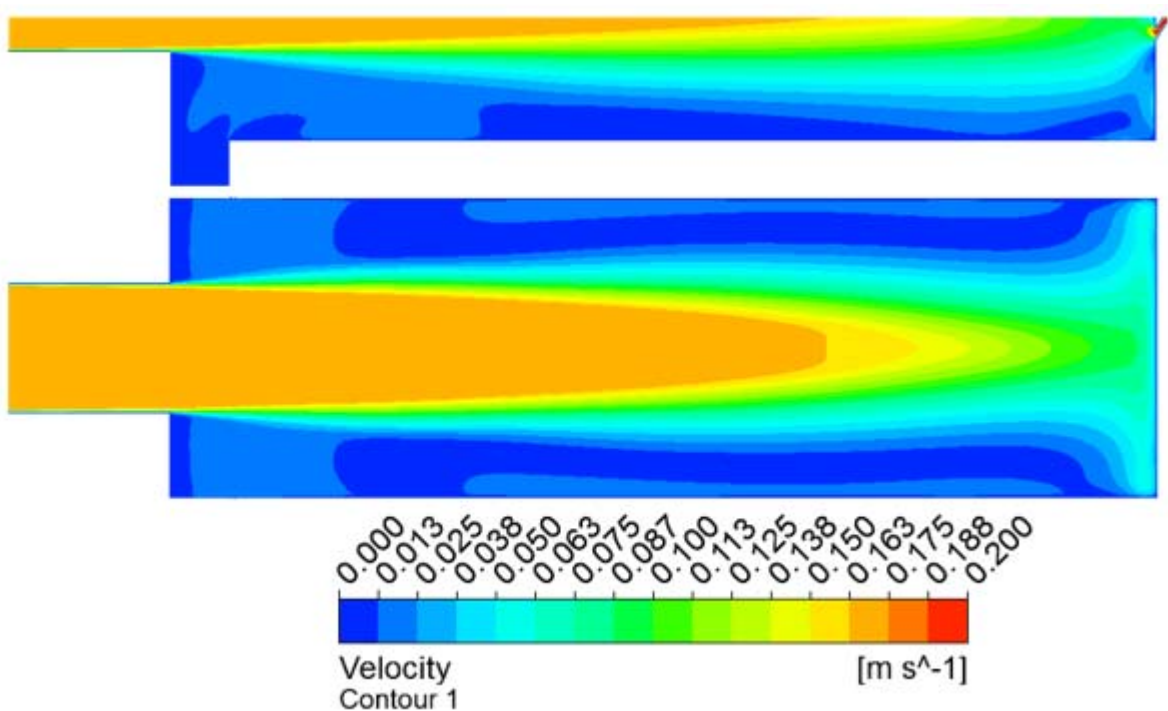


Bild 7.1: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten der Grundvariante in rechteckiger Bauweise

In Bild 7.2 ist die Durchströmungscharakteristik der Grundvariante in runder Bauweise dargestellt. Im Außenbereich des Beckens bzw. in Wandnähe liegt eine schnell fließende Rotationsströmung vor. Im zentralen Bereich (Hell- und Dunkelblau) befindet sich eine in gleicher Richtung rotierende, jedoch deutlich langsamer fließende Rotationsströmung. In der Scherschicht zwischen beiden Rotationsströmungen können großräumige kohärente Strukturen auftreten.

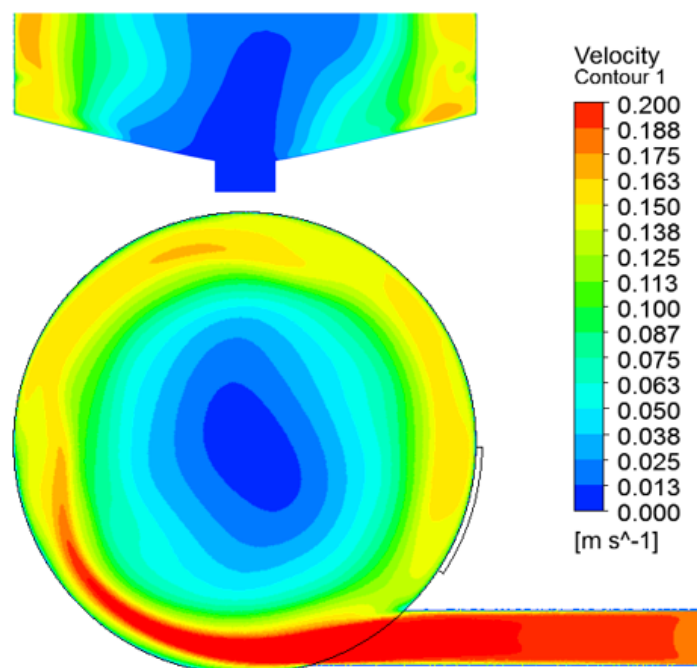


Bild 7.2: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten der Grundvariante in runder Bauweise

Die grundlegenden Durchströmungen von Rechteck- und Rundbecken unterscheiden sich durchaus signifikant. Infolge der Geometrie bildet sich bei Rechteckbecken eine vorwärts gerichtete Hauptströmung aus, während für Rundbecken eine Rotationsströmung typisch ist. In beiden Becken-Konfigurationen sind ausgedehnte Rezirkulationszonen vorhanden, wobei diese im Rechteckbecken ausgeprägter sind.

Beim Vergleich von Partikel-Absetzwirkungsgraden für mineralische Partikel (Bild 7.3) wird deutlich, dass das Rechteckbecken bis zu einer Ha-Zahl von ca. 0,75 z.T. deutlich besser abschneidet (bis zu 20 %). Das Rundbecken orientiert sich in diesen Bereichen sehr nahe der Theorie von Hazen. Bei Ha-Zahlen $> 0,75$ liefert das Rundbecken bessere Absetzwirkungsgrade als das Rechteckbecken, auch wenn diese nur geringfügig besser sind. Im Bereich von sehr hohen Ha-Zahlen weisen beide Becken-Geometrien die gleichen Absetzwirkungsgrade auf.

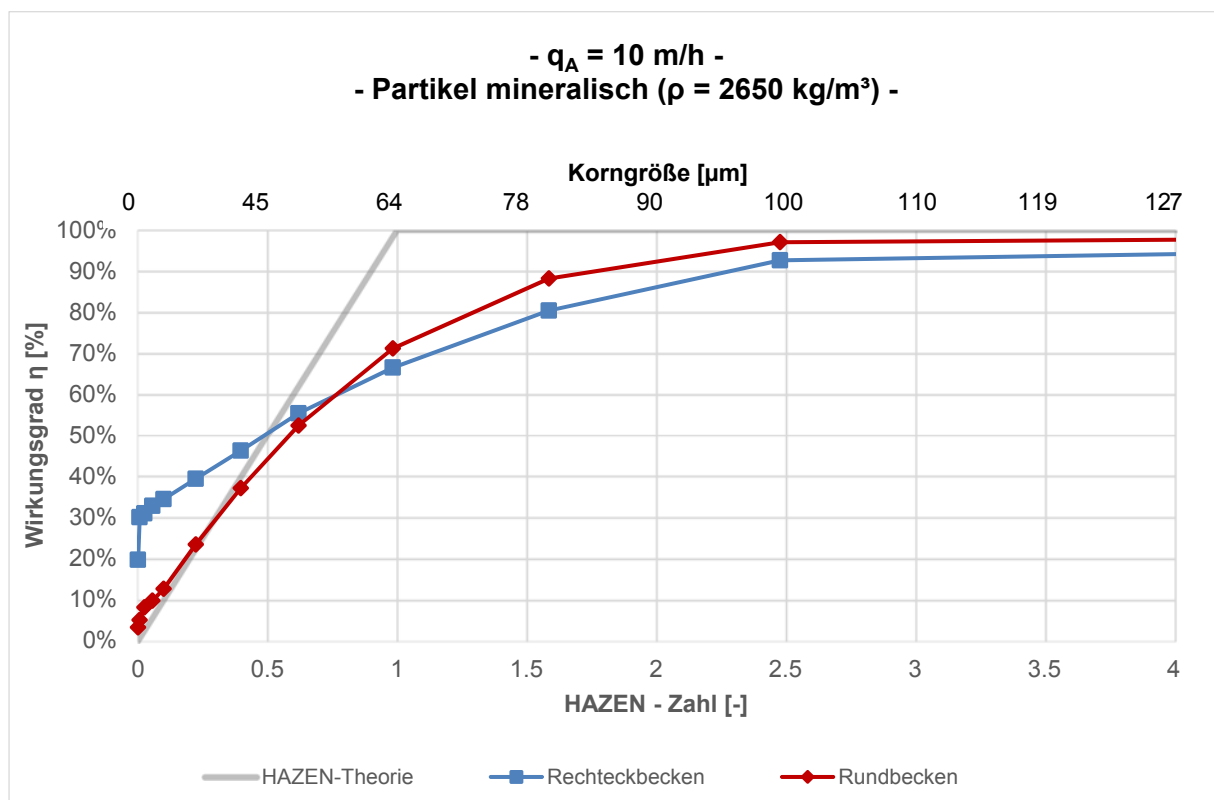


Bild 7.3: Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel für mineralische Partikel der Grundvarianten

Für Absetzwirkungsgrade von organischen Partikeln gilt das Gleiche wie für mineralische Partikel, wobei der Umschlagspunkt hier bei einer Ha-Zahl von ca. 0,60 liegt (vgl. Bild 7.4).

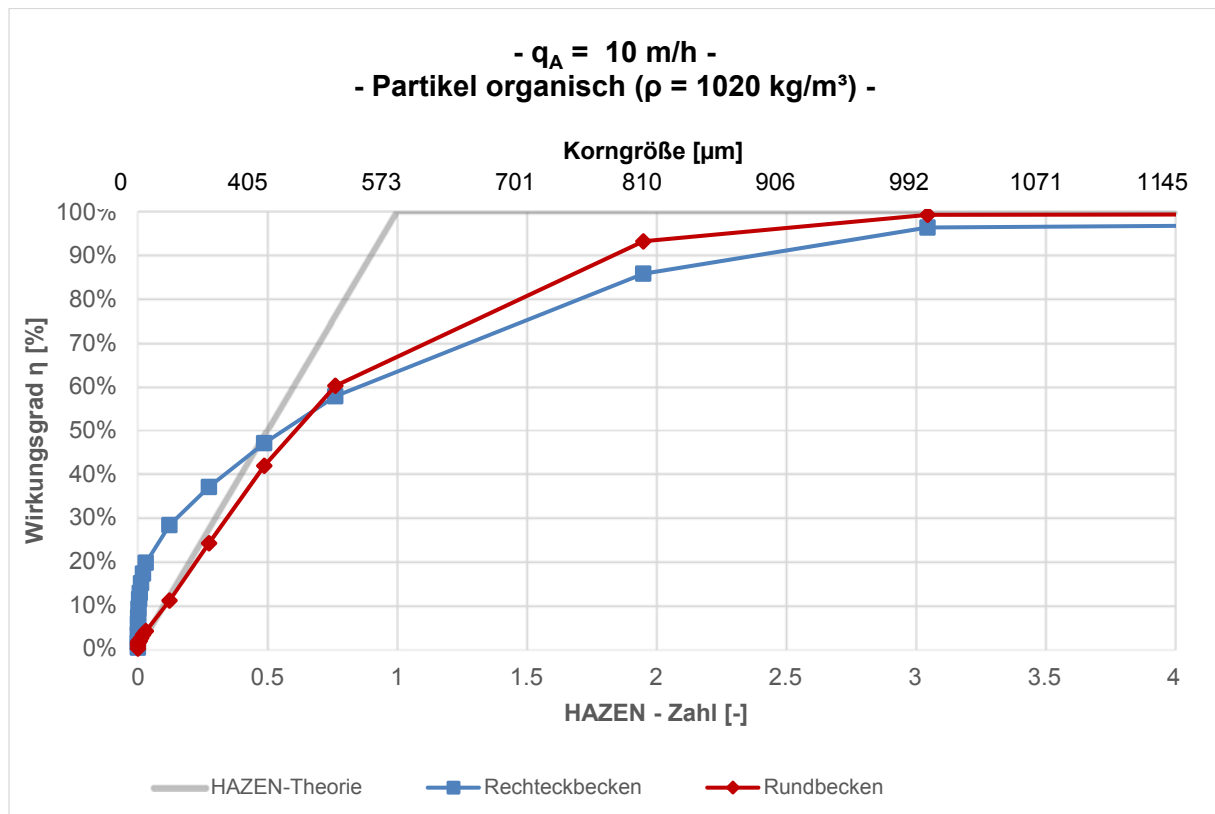


Bild 7.4: Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel für organische Partikel der Grundvarianten

Auch die Gesamt- und Fraktionswirkungsgrade legen nahe, dass die Grundvariante in Rechteckbauweise bessere Absetzbedingungen aufweist als die in Rundbauweise. Der Gesamt-Absetzwirkungsgrad des Rechteckbeckens liegt mit 46,6 % rund 10 % über dem des Rundbeckens ($\eta_{\text{ges}} = 37,1 \%$).

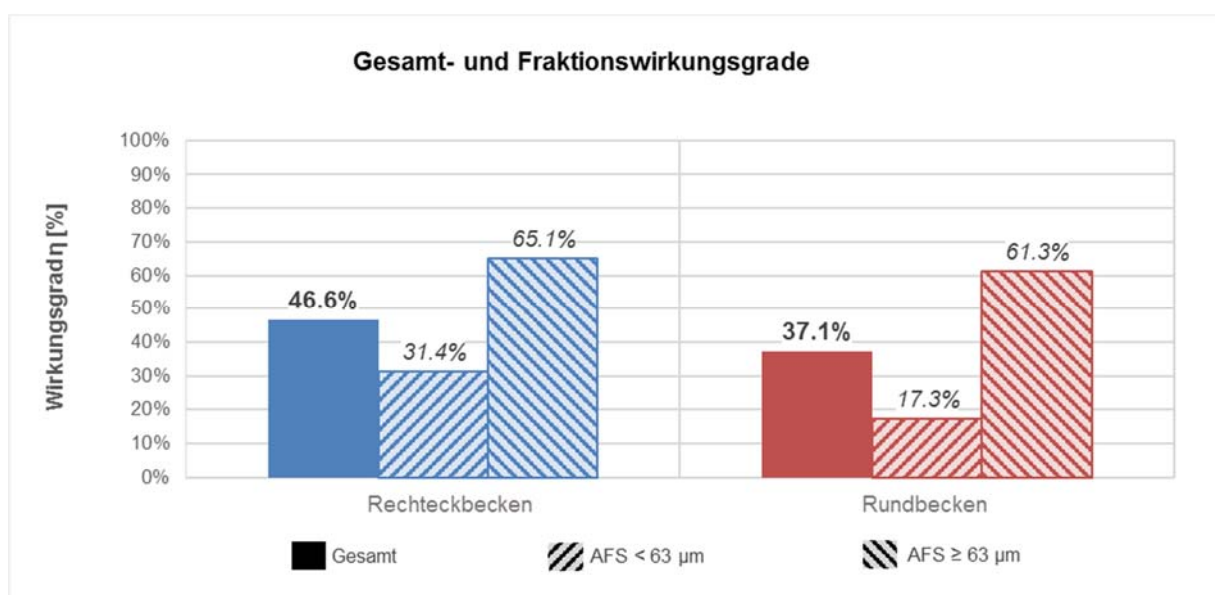


Bild 7.5: Gesamt- und Fraktionswirkungsgrade der Grundvarianten mit $q_A = 10 \text{ m/h}$

7.3 Vergleich der optimierten-Becken

In diesem Kapitel wird das jeweilige optimierte-Becken beider Becken-Geometrien anhand der Durchströmungscharakteristik und der Absetzwirkungsgrade verglichen. Der Gleichrichter, der als optimiertes-Becken für die Rechteckbauweise vorgeschlagen wird, zeigt eine Vergleichmäßigung der Fließgeschwindigkeiten über den Fließquerschnitt ab etwa der Beckenmitte. Zudem wird durch die Ausblockung eines Teils der Zulaufhöhe eine Rezirkulationszone im Unterstrom des Einbaus induziert.

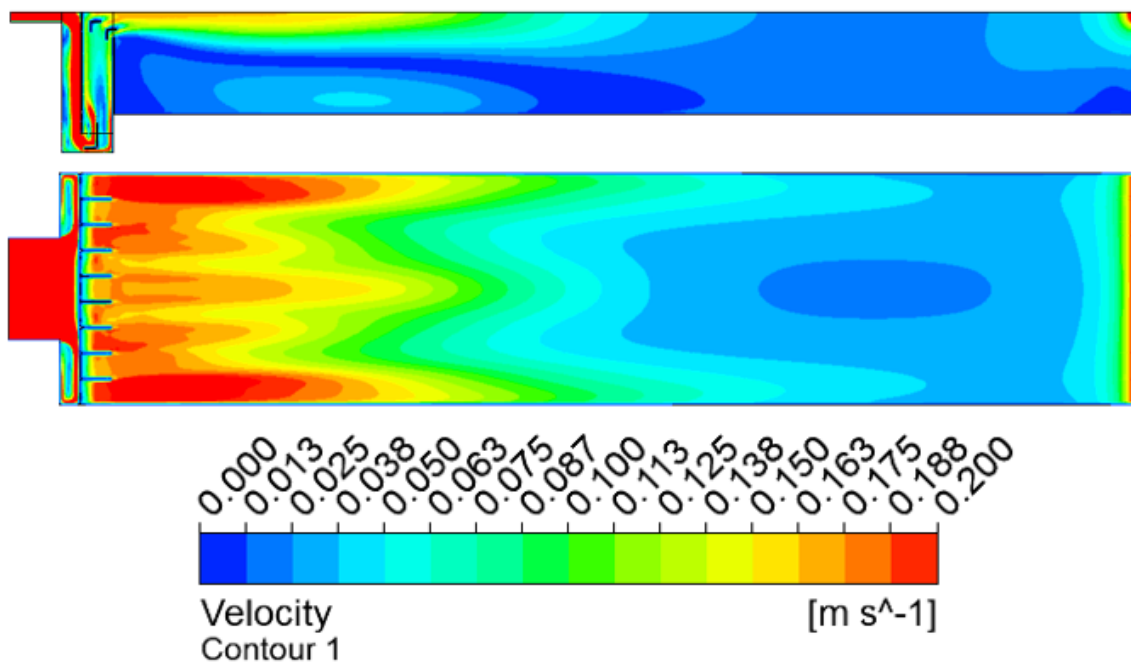


Bild 7.6: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten für das optimierte-Becken in rechteckiger Bauweise

Das optimierte-Becken in runder Bauweise wird zentral beschickt und radial von innen nach außen durchströmt. Der Klärüberlauf umläuft die gesamte Beckenaußenwand. Die Durchströmungscharakteristik ähnelt vom Prinzip her sehr der des optimierten Beckens der rechteckigen Bauweise. Im unteren Bereich des vertikalen Schnitts befindet sich eine Rezirkulationszone, darüber liegt eine Kurzschlussströmung nahe des Wasserspiegels. Im Falle des Rundbeckens gelingt die Gleichverteilung der Fließgeschwindigkeiten über die Beckenbreite deutlich besser, was sich in den Absetzwirkungsgraden bemerkbar macht.

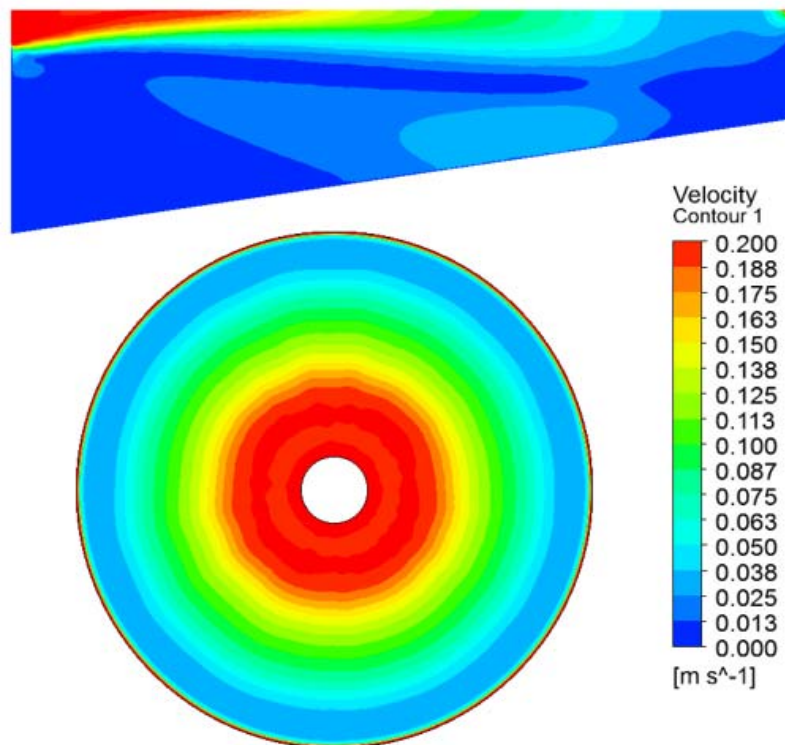


Bild 7.7: Isolinien der Fließgeschwindigkeiten für das optimierte-Becken in runder Bauweise

Die Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel zeigen, dass das Rundbecken im Bereich von geringen Ha-Zahlen sowohl für mineralische als auch für organische Partikel effizienter ist. Im Bereich höherer Ha-Zahlen weist das Rechteckbecken allerdings leicht bessere Absetzwirkungsgrade auf.

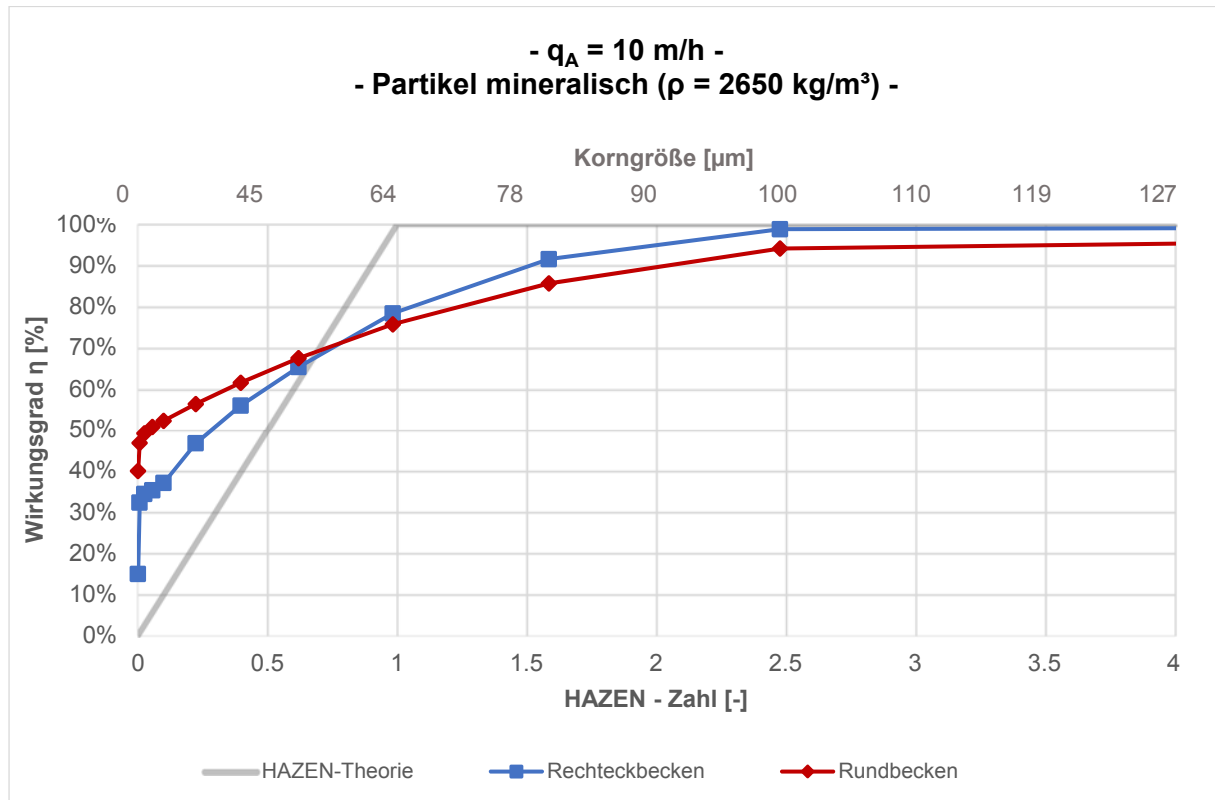


Bild 7.8: Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel für mineralische Partikel der optimierten-Becken

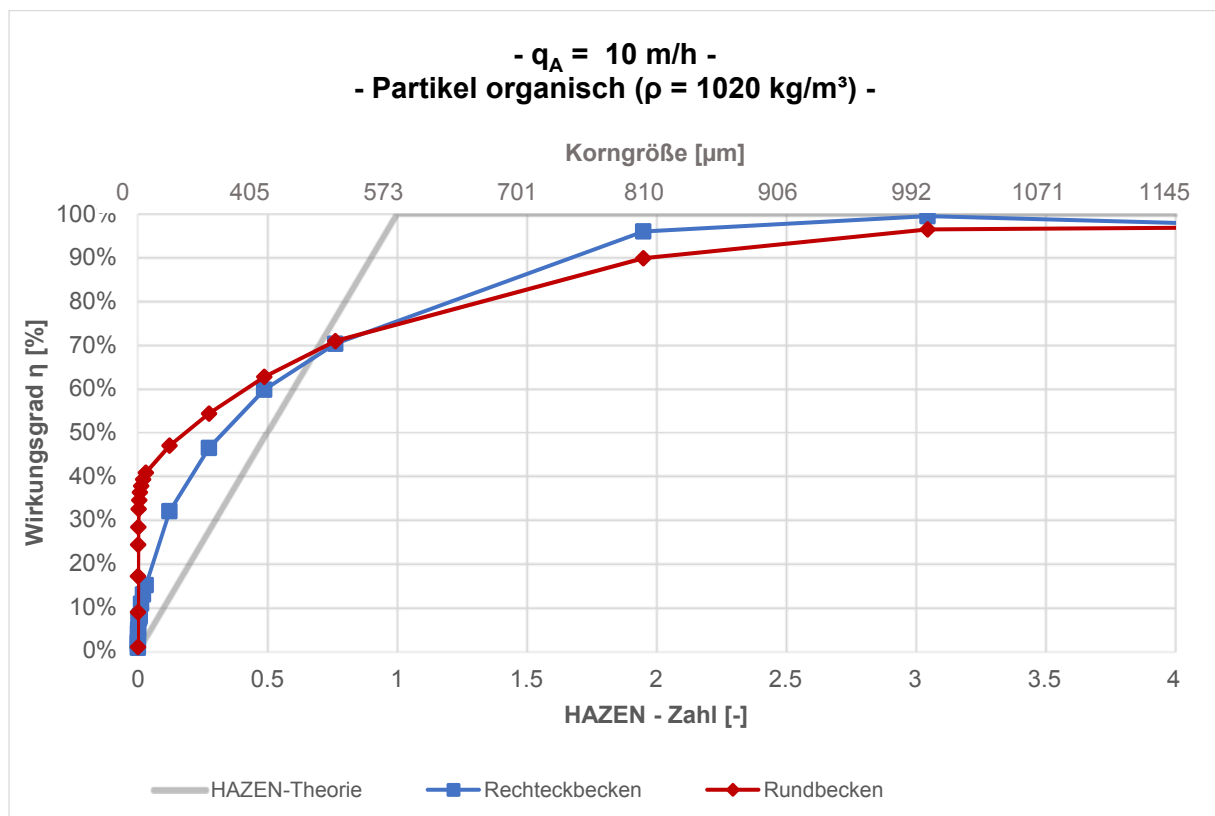


Bild 7.9: Absetzwirkungsgrade einzelner Partikel für organische Partikel der optimierten-Becken

Für die massegewichteten Gesamt- und die Fraktionswirkungsgrade ergeben sich für das Rundbecken deutliche Vorteile, denn dieses liegt mit einem Gesamt-Absetzwirkungsgrad von 60,3 % rund 10 % über dem des Rechteckbeckens ($\eta_{\text{ges}} = 50,0 \%$).

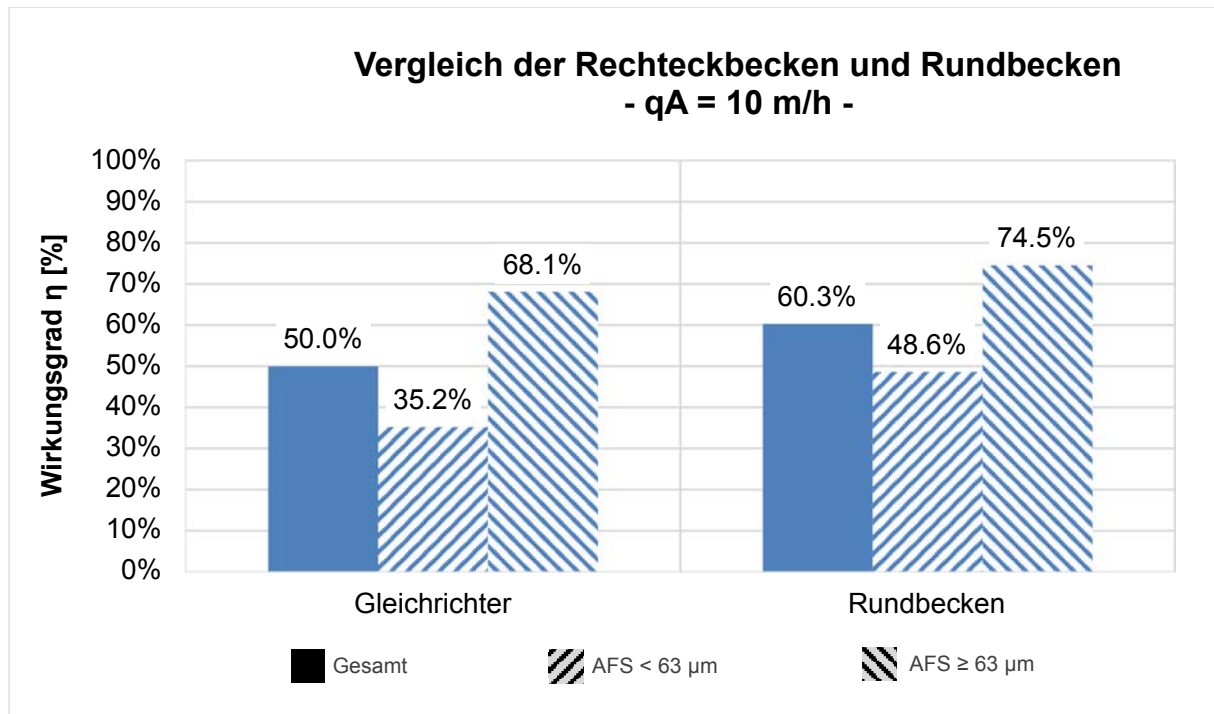


Bild 7.10: Gesamt- und Fraktionswirkungsgrade der optimierten-Becken mit $q_A = 10 \text{ m/h}$

7.4 Auswirkung der Beckengrundform auf den Absetzwirkungsgrad

Sofern bei einem Neubau eines Regenklärbeckens nur eine einfache Beckengeometrie (Grundvariante) vorgesehen ist, zeigen die Untersuchungen einen klaren Vorteil in Bezug auf den Gesamt-Absetzwirkungsgrad von Rechtecken-Becken gegenüber Rundbecken. Auch wenn im Einzugsgebiet die Fraktion AFS < 63 µm dominiert, bieten Rechteckbecken in ihrer Grundform bessere Absetzbedingungen. Sobald die Fraktion AFS ≥ 63 µm dominierend vertreten ist, weisen beide Becken-Geometrien einen nur geringen Unterschied auf, sodass die Beckengrundform auf den Absetzwirkungsgrad keinen entscheidenden Einfluss hat. In diesem Fall sind anderen Einflussfaktoren (z.B. hydraulische Belastung) ausschlaggebender.

Sobald durch das Regenklärbecken eine erhöhte Reinigungsleistung zu erfolgen hat, ist eine Grundvariante i.d.R. nicht mehr ausreichend. In diesem Fall ist eines der optimierten-Becken vorzusehen. Die Durchströmungscharakteristik beider Becken ist sehr ähnlich. Die Untersuchungen bezüglich der Reinigungsleistung haben ergeben, dass die Rundbauweise mit einer

radialen Durchströmung von innen nach außen klare Vorteile bezüglich der Absetzleitung gegenüber der Rechteck-Bauweise hat. Dies bezieht sich sowohl auf die Fraktion $AFS < 63 \mu\text{m}$ als auch auf $AFS \geq 63 \mu\text{m}$.

Für geringere Oberflächenbeschickungen treffen die oben getroffenen Aussagen ebenfalls zu, wobei der Unterschied im Gesamt-Absetzwirkungsgrad geringer wird. Wo dieser bei $q_A = 10 \text{ m/h}$ noch bei ca. 12 % lag, so liegt dieser bei einem $q_A = 4 \text{ m/h}$ nur noch bei ca. 6 % (Bild 7.11). Dies deutet darauf hin, dass der Einfluss der Beckengrundform oder allgemein der Geometrie in Bezug auf hohe hydraulische Belastungen einen durchaus entscheidenden Einfluss haben kann, für geringe hydraulische Belastungen hingegen, scheint die Beckengrundform bzw. die Geometrie keinen signifikanten Einfluss auf den Absetzwirkungsgrad zu haben.

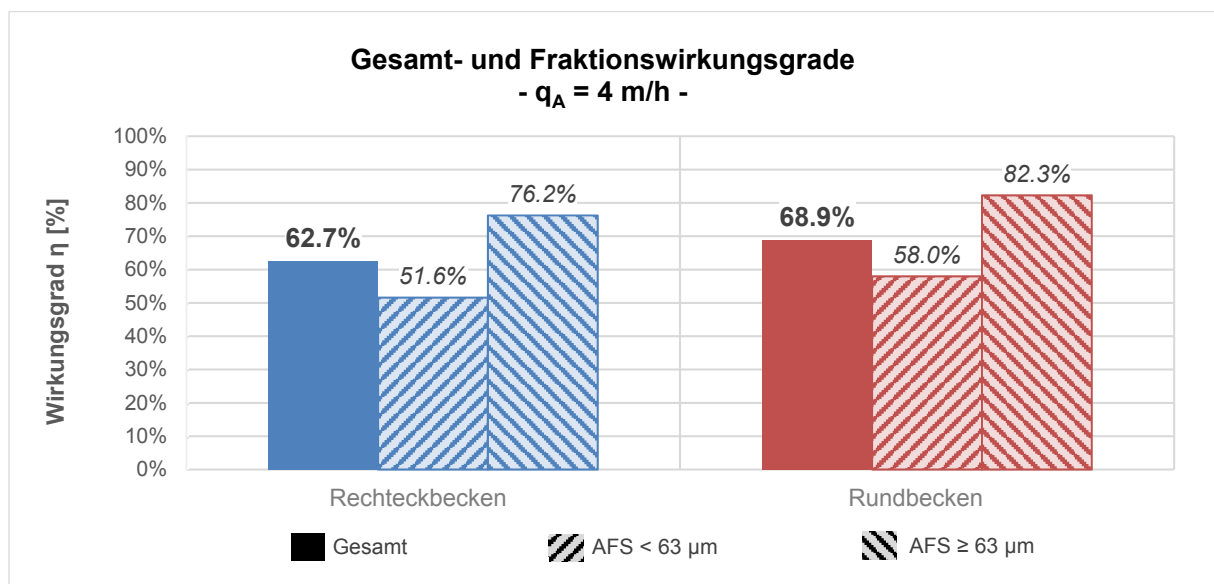


Bild 7.11: Gesamt-und Fraktionswirkungsgrade der optimierten-Becken mit $q_A = 4 \text{ m/h}$

8 Untersuchung einer der Filtration vorgeschalteten Sedimentationsstufe

8.1 Einführung und Untersuchungskonzept

Die Ergebnisse in diesem Bericht zum Leistungsvermögen von zentralen rechteckigen und runden Regenklärbecken weisen darauf hin, dass eine wesentliche Verbesserung des Rückhaltes von feinputikulären Stoffen insbesondere durch eine Reduktion der Oberflächenbeschickung eines Beckens erzielt werden kann. Nicht immer steht jedoch der Platz für diese – bei gleichem angeschlossenen Einzugsgebiet und damit gleichem Zufluss [m^3/s] – deutliche größeren Anlagen zur Verfügung. Alternativ zur Vergrößerung des Beckens bieten sich unter anderem Filtereinheiten an, deren Platzbedarf (ausgenommen sind hier Retentionsbodenfilter) vergleichsweise deutlich geringer ist. Noch befinden sich diese technischen Filteranlagen und deren Auslegung jedoch in den Kinderschuhen. Zwar zeigen einige wenige derzeit betriebene Testanlagen erste Erfolge, als problematisch erweist sich jedoch bislang die Prognose von Standzeiten des Filters und deren Beeinflussung durch die Zuflussmatrix. Insbesondere grobe Partikel im Zulauf des Filters können eine Kolmation begünstigen und auf diese Weise die Standzeit des Filters deutlich verkürzen. Welche Partikelfractionen jedoch im Vorfeld zu entfernen sind, hängt direkt von der verwendeten Filtermethode ab. Genaue Vorgaben hierzu finden sich in der Literatur jedoch bislang nicht. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass eine der Filtration vorgeschaltete Sedimentationsstufe vorgesehen werden sollte. Definierte Abmessungsverhältnisse dieser Vorstufe oder Abscheideleistungen für definierte Partikelgrößen werden (noch) nicht definiert.

Ziel dieser Untersuchung ist die Entwicklung von Bemessungsdiagramme für eine der Filtration vorgeschaltete Sedimentationsstufe. Aus diesen Diagrammen kann im Rahmen der Bemessung von Anlagen, welche aus einer Kombination von Filtration und Sedimentation bestehen, das benötigte Volumen der Sedimentationsstufe für eine (jeweils vom gewählten Filter abhängige) Korngröße abgelesen werden. Zusätzlich erhalten diese Diagramme ergänzende Informationen zum erwarteten Rückhalt weiterer Korngrößen.

Die Untersuchung gliedert sich in drei Schritte:

Stufe 1

Für ein auf Basis der Erkenntnisse der ersten Phase dieses Forschungsvorhabens wird ein geometrisch einfaches Becken (sog. „Stammbecken“) mit möglichst gleichmäßiger Durchströmung konfiguriert. Das Längen-/Breitenverhältnis (fortan L/B-Verhältnis) wird bei jeweils konstanten Werten des Volumen V , der Tiefe h sowie auch der Oberflächenbeschickung q_A systematisch variiert. Untersucht wird der Einfluss der unterschiedlichen Abmessungsverhältnisse auf den Absetzwirkungsgrad eines Partikels mit dem Durchmesser von $100\ \mu\text{m}$.

Stufe 2

Für ein Becken mit den in Stufe 1 ermitteltem L/B-Verhältnis wird die Beckentiefe H systematisch variiert. Das L/B-Verhältnis, das Volumen V des Beckens sowie die hydraulische Belastung Q werden konstant gehalten. Bei Einhaltung dieser Bedingungen bedeutet dies jedoch direkt, dass sich die Oberflächenbeschickung q_A durch eine Variation der Beckentiefe ändert. Wie in Stufe 1 wird wiederum der Einfluss auf den Absetzwirkungsgrad eines Partikels mit dem Durchmesser von $100\ \mu\text{m}$ untersucht.

Stufe 3

Anhand der Erkenntnisse aus Stufe 1 und Stufe 2 wird ein optimiertes Becken definiert. Das Volumen V der Sedimentationskammer wird systematisch reduziert. Der Einfluss auf den Absetzwirkungsgrad eines Korngemisches aus organischen, anorganischen sowie einer Misch-Dichte (ermittelt für die Feststoffe im Mischwasser) wird untersucht. Mit Hilfe dieser Untersuchungen werden Bemessungsdiagramme entwickelt.

8.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Eine detaillierte Konstruktionsvorschrift für eine der Filtration vorgeschalteten Sedimentationsstufe gibt es in den deutschen Regelwerken nicht. Tabelle 8-1 gibt eine Übersicht über Hinweise zur Dimensionierung von Sedimentationsanlagen im Allgemeinen aus deutschen Regelwerken. Diese könnten für eine Dimensionierung herangezogen werden und werden im Folgenden kurz beschrieben.

Empfehlungen zur Konstruktion von Regenklärbecken finden sich in den Regelwerken „*Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung – Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung (November 2013)*“ (DWA, 2013) und „*Hinweise zur konstruktiven Gestaltung und Ausrüstung von Bauwerken der zentralen Regenwasserbehandlung (November 2013)*“ (DWA-M 176, 2013). Abweichend zu der dort empfohlenen Oberflächenbeschickung von $10\ \text{m/h}$ für RKB aus den DWA-Regelwerken wird in „*Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten*“ (LfU (2005)) eine geringere Oberflächenbeschickung von $7,5\ \text{m/h}$ empfohlen.

Für die Errichtung von belüfteten Sandfängen auf Abwasserreinigungsanlagen zur Abscheidung grober, mineralischer Partikelfractionen im Misch- und Schmutzwasser verweist das Regelwerk DWA-A 226 (2009) „*Grundsätze für die Abwasserbehandlung in Belebungsanlagen mit gemeinsamer aerober Schlammstabilisierung ab 1.000 Einwohnerwerte (August 2009)*“

auf eine Veröffentlichungen in einer Fachzeitschriften: KA-5 (2008) „KA Korrespondenz Abwasser“: „Sandfänge – Anforderungen, Systeme und Bemessung: Arbeitsbericht des DWA-Fachausschusses KA-5 „Absetzverfahren““ (2008).

Darüber hinaus werden konstruktive Empfehlungen für Geröll- und Sandfänge im Einlaufbereich von Bauwerken in der Kanalisation in „Bauwerke der Kanalisation“ (ATV-DVWK-A 157 (2000), Kapitel 5.7) gegeben.

Kenngößen für Absetzteiche finden sich in „Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Abwasserteichanlagen (August 2005)“ (DWA-A 201 (2005)).

Der Einsatz von Geschiebeschächten (vgl. Bild 8.1) in der öffentlichen Kanalisation dient der Abtrennung von groben Stoffen zum Schutz der baulichen Anlagen. Solche Geschiebeschächte wurden in „Hinweise zur konstruktiven Gestaltung und Ausrüstung von Bauwerken der zentralen Regenwasserbehandlung und –rückhaltung (November 2013)“ DWA-M 176 (2013) näher beschrieben.

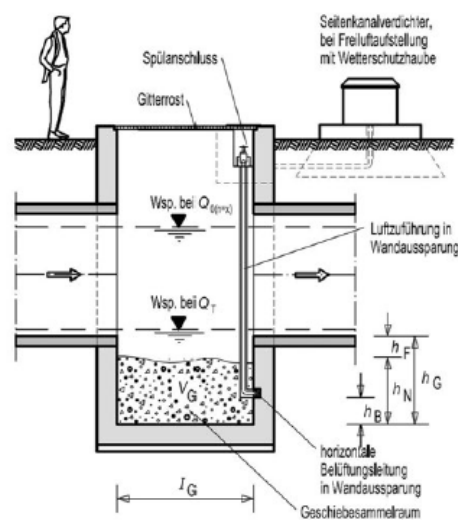


Bild 8.1: Schematische Darstellung eines Geschiebeschachts ohne Sammeleinsatz (DWA-M 176, Bild 64)

Tabelle 8-1: Zusammenfassung der Empfehlungen für unterschiedliche Sedimentationsbauwerke in aktuellen, deutschen Regelwerken

Bauwerk	RKB	RKB	Sandfang (bel.)	Geröll- & Sandfang	Abwasser- teich-Anlagen	Geschiebe- schächte
Quelle	DWA-A 166, DWA-M 176	LfU (2006)	KA 5-2008, nach DWA-A 226	ATV-DVWK-A-157	DWA-A 201	DWA-M 176
B (m)				> 1		> 1,7 ⁽¹⁾
H (m)	> 2			> 0,5	1,5; 1; 2	>= 1,2
L (m)				> 3		1,8 – 2,5
L/H-Verhältnis	6 – 15					
B/H-Verhältnis	2 – 4		0,8 – 1			
L/B-Verhältnis	3 – 4,5		> 10		> 3	
v_{m, x} (m/s)	< 0,05		< 0,2		< 0,05	
t_R [s]			300			
Schwellen-belastung (Auslauf) (m³/(s*m))	0,3 & 0,075					
q_A (m/h)	< 10	< 7,5				
⁽¹⁾ >1,7 (für <DN1000), sonst DN+0,8						

Das Forschungsprojekt „*WEREBE - Weitergehende Regenwasserbehandlung im Trennsystem*“ (Mohn et al. 2013) untersuchte die Filtration und Sedimentation von Regenwasser anhand von physikalischen Modellen und numerischer Simulation. Einige Einlaufvarianten aus dem Entwurf des Arbeitsblatts DWA-A 116 (DWA-A 116, 2013) werden im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Becken-Durchströmung und das Absetzverhalten gegenübergestellt. Außerdem wurden in diesem Bericht die Auswirkung von verschiedenen Abmessungsverhältnissen beschrieben. Der Einsatzbereich sind Regenklärbecken. In diesem Bericht wird auch die Kombination von Sedimentation und anschließender Filtration als weitergehende Regenwasserbehandlung vorgeschlagen. Außerdem werden in dem Forschungsprojekt „*MEREBEN - Maßnahmen zur Ertüchtigung von Regenklärbecken und Hinweise zu deren Neubau*“ (Mohn

(2017), Vorabzug, nicht veröffentlicht) weitere Einlaufvarianten und Einbauten untersucht und für Regenklärbecken empfohlen.

Im Zeitraum 2007-2013 untersuchte die Firma UFT bereits den Einsatz von Filtern zur Regenwasserbehandlung im Feldtest. Dabei wurde das bestehende RKB „Im Abelt“ in Bad Mergentheim durch Filteranlagen aufgerüstet. Das RKB fungierte als Speicher- und Absetzbecken. Dabei wurden Oberflächenfilter (vgl. Weiß und Brombach, 2007), Anthrazit-Volumenfilter (vgl. IWARU 2013, Anhang 5) und Fuzzy-Raumfilter (vgl. IWARU 2013, Anhang 6). Im Vergleich erzielte der Fuzzy-Filter die besten Ergebnisse.

In Hagen befindet sich ein zentrales Filterklärbecken zur Reinigung von Regenwasser, welches von den Wirtschaftsbetriebe Hagen zuerst als Modell und anschließend als Prototyp gebaut und betrieben wurde (vgl. WBH, 2015). WBH Hagen (2015) Das Filterklärbecken hat in etwa die Größe eines Regenklärbeckens und ist mit einem Sandfang ausgerüstet, welcher aufwärts durchströmt wird. Der Filter ist überbaubar und reicht aus, um Flächen der Kategorie III zu reinigen. Das Filtersystem ist zweistufig (Filterfließ und Mineralfilter). Eine größere Variante wird zurzeit geplant.

Das von der PECHER TECHNIK GMBH entwickelte System FiltaPex besteht aus einem gestuften Mineralfilter im Schachtsystem, welches von unten nach oben durchströmt wird (vgl. Dr. Pecher AG, 2016). Pecher (2016) Die Anströmfläche unter der Filterschicht fungiert gleichzeitig als Sedimentationsraum. Das System wurde zuerst in kleineren Größen entwickelt. Es wurde bereits in Wuppertal im Industriegebiet „in der Fleute“ eingesetzt (Grüning et al., 2015). Grüning et al. (2015) Die Anlage besteht aus drei Filterstraßen, die zusammen einen Durchfluss von 127 l/s bewältigen können. Das Aufteilungsbauwerk fungiert auch als Sandfang.

Weitere, komplexere Sedimentationssysteme (z.B. Lamellenabscheider) wurde in dieser Arbeit wegen ihrem technischen Aufwand nicht berücksichtigt.

Da es noch keine Empfehlungen für Sedimentationsbecken als Vorstufe zu Filterbecken gibt, waren die Angaben aus den Regelwerken nur zur groben Orientierung geeignet. Bei der Konzeptionierung des Ausgangsbeckens wurde der Fokus daher auf die Projekte der zentralen Anlagen und auf die Forschungsergebnisse gelegt: RFB in Hagen und Wuppertal, WEREBE, MEREBEN.

8.3 Material und Methoden

8.3.1 Geometrische Randbedingungen des ausgewählten Stammbeckens

Im Folgenden werden die einzelnen Beckenkomponenten für das definierte Stammbecken kurz erläutert: Darstellungen der Geometrie finden sich in Bild 8.2 und Bild 8.3.

Einlaufkomponente

Es ist ein untenliegender, symmetrischer Einlauf für das optimierte Becken ausgewählt. Zur Vereinfachung des Simulationsnetzes weist der Einlauf einen rechteckigen Querschnitt mit einer Höhe von 0,40 m auf. Es ist eine Vorlaufstrecke von 2,50 m gewählt (Länge des Einlaufs).

Im Zulauf des Beckens ist eine teilweise geblockte Lamellenwand eingesetzt. Sie dient der Vergleichmäßigung des einströmenden Wassers in der Einlaufkomponente. Diese Variante hat sich als baulich einfache und dennoch effektive Einlaufgestaltung zur Erreichung einer pfropfenartigen Durchströmungscharakteristik in der MEREBEN Phase 1 erwiesen. Die Pfropfenströmung wird hierbei als sinnvoll angesehen, da diese für grobe Feststoffe ($AFS > 63 \mu\text{m}$) ideale Sedimentationsbedingungen aufweist.

Die Geometrie der teilweise geblockten Lamellenwand ist wie folgt definiert:

$$b \text{ (Prallwand)} = 1,33 \text{ m}$$

$$b \text{ (Prallwand)} / b \text{ (Einlauf)} = 0,62$$

$$\text{Abstand zum Einlauf} = 1,00 \text{ m}$$

$$\text{Breite einer freien Lamelle} = 0,273 = \text{Breite einer geschlossenen Lamelle}$$

Aus der Breite des Einlaufs (0,80 m) ergibt sich eine Breite der Prallwand von ca. 0,50 m. Der Abstand zum Einlauf beträgt 0,75 m. Weiterhin ist angenommen, dass die freie Lamellenbreite (= Abstand der freien Lamellen) keine wesentlichen Auswirkungen auf die Vergleichmäßigung der Strömung hat, solange diese nur gering ist. Die Lamellen-Breite beträgt 0,15 m, was gleichzeitig der Tiefe der Lamellenwand entspricht. Die Höhe der teilweise geblockten Lamellenwand entspricht der Beckenhöhe. Weiterhin ist ein Abstand zwischen Beckenwand und Lamelle von einer Lamellenbreite berücksichtigt.

Die Geometrie der teilweise geblockten Lamellenwand ist für alle simulierten Becken unverändert.

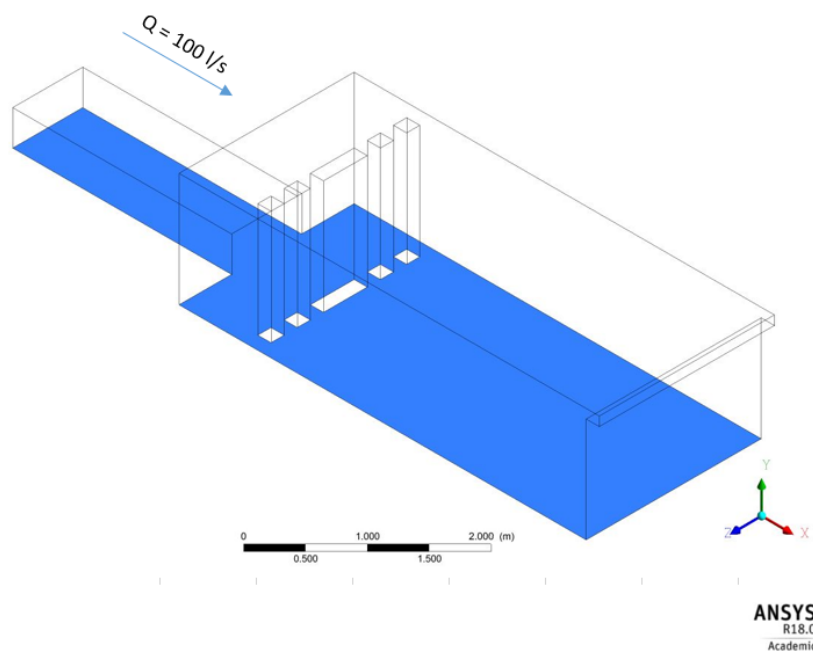


Bild 8.2: Geometrie des ausgewählten optimierten Beckens mit teilweise geblockter Lamellenwand (die Sohle ist blau eingefärbt); 3D-Ansicht

Sedimentationskammer

Die Sedimentationskammer ist rechteckig ausgeführt. Die Abmessungen des Beckens sind aus den Ergebnissen der MEREKEN Phase 1 abgeleitet: $b = 2,15$, $h = 0,58$ (für $Q = 208$ l/s). Die gewählte Beckenbreite entspricht den Empfehlungen aus DWA-M 176 (2013) an Geschiebeschächte: Breite $> 1,7$ m (für $DN < 1000$). Die Höhe des Beckens beträgt $1,30$ m. Diese ergibt sich aus den hydraulischen Randbedingungen (siehe unten). Die Beckenlänge bezieht sich auf die Länge der Sedimentationskammer und ergibt sich aus einer festgelegten Durchflusszeit ($t_R = 97$ s, siehe hydraulische Randbedingungen) und der Fließgeschwindigkeit ($v_{M,X} = 0,031$ m/s), die aus der Bemessung des Sandfangs in Hagen abgeleitet wurden. Es ergeben sich folgende Abmessungsverhältnisse (bezogen auf die Sedimentationskammer):

- $L/H = 2,30$
- $B/H = 1,90$
- $L/B = 1,20$

Auslaufkomponente

Der Auslauf wird durch ein einfaches Überfallwehr über die gesamte Beckenbreite gebildet. Die Einfachheit der Bauweise war hier ausschlaggebend. Außerdem kann ein solches Wehr leicht durch eine Tauchwand aufgerüstet werden, um Schwimmstoffe zurückzuhalten.

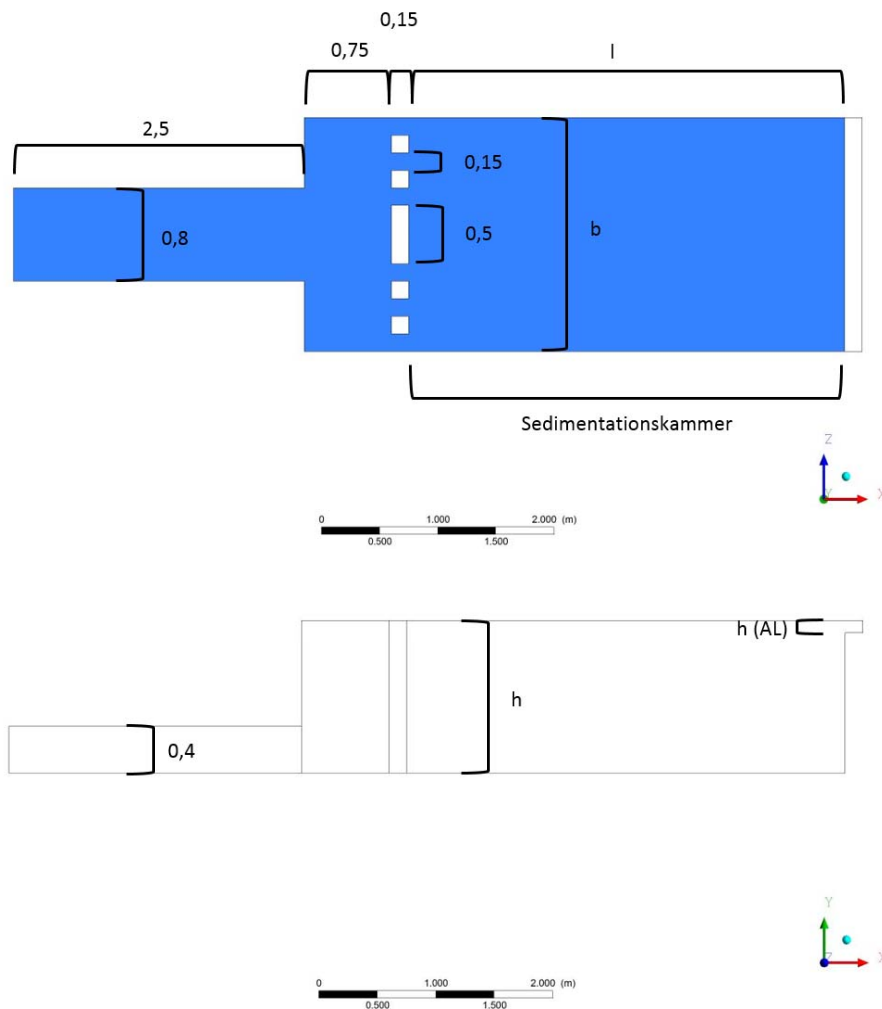


Bild 8.3: Gewählte Grundform des optimierten Beckens: oben: Draufsicht; unten: Längsschnitt

8.3.2 Hydraulische Randbedingungen des ausgewählten optimierten Beckens

Die Wahl der hydraulischen Randbedingungen basiert im Wesentlichen auf der Auswertung existierender Filteranlagen:

Durchfluss $Q = 100 \text{ l/s}$

Die Systemfamilie FiltaPex der Dr. Pecher AG sind Filterschächte als Fertigteilbauwerk. Der größte Filter ist für einen Durchfluss von $52,5 \text{ l/s}$ ausgelegt. Es kann angenommen werden, dass diese Bauwerke eher als dezentrale Filtersysteme eingesetzt oder an kleinere Einzugsgebiete angeschlossen werden. Deshalb wurde der maßgebliche Durchfluss in der Simulationsstudie größer $52,5 \text{ l/s}$ gewählt.

Das zentrale RFB in Hagen ist ein Prototyp. Eine größere Anlage ist bereits in Planung. Der Prototyp wurde auf einen Durchfluss von $37,8 \text{ l/s}$ ausgelegt. (vgl. WBH Hagen (2015))

Eine weitere großtechnische Filteranlage zur Reinigung von Niederschlagswasser befindet sich in Wuppertal, Einzugsgebiet „In der Fleute“. Die Behandlung erfolgt in drei Filterstraßen mit dem System FiltaPex der Dr. Pecher AG. Die Anlage wurde für einen Durchfluss von 127,1 l/s dimensioniert. (Grüning et al., 2015)

Unter Berücksichtigung der realisierbaren Größenordnung von bereits vorhandenen Filteranlagen in Deutschland ($Q = 37,8 - 127,1$ l/s) wird somit ein Durchfluss von $Q = 100$ l/s definiert. Der Durchfluss bleibt für alle betrachteten Becken dieser Simulationsstudie konstant.

Mittlere, horizontale Fließgeschwindigkeit $v_{M,X} = 0,031$ m/s

Beim zentralen RFB in Wuppertal erfolgte keine Dimensionierung des vorgeschalteten Sandfanges. Die Größe des Sandfanges ergab sich direkt aus der Größe des Verteilerbauwerks. Deshalb wurde diese Anlage nicht für die Wahl der Fließgeschwindigkeit berücksichtigt.

Das zentrale RFB in Hagen hat hingegen einen dimensionierten Sandfang. Der Sandfang wurde nach dem Gegenstromprinzip gebaut. Die maximale, mittlere, vertikale Fließgeschwindigkeit $v_{m,M,V}$ beträgt 0,032 m/s WBH Hagen (2015). Das entspricht einer Oberflächenbeschickung von 115 m/h, was wiederum einer Sinkgeschwindigkeit v_s eines Partikels des Durchmessers 200 μm ($\rho = 2650$ kg/m³) entspricht. Diese Größe wurde vereinfachend nun für die mittlere, horizontale Fließgeschwindigkeit $v_{M,X}$ gewählt.

Durchflusszeit $t_R = 97$ s

Das RFB Hagen ist die einzige zentrale Filteranlage, die bei der Literaturrecherche in Deutschland gefunden wurde, für die ein Sandfang dimensioniert wurde. Deshalb erfolgte auch eine starke Orientierung an die hydraulischen Werte dieser Anlage. Der Sandfang des RFBs Hagens hat eine Durchflusszeit $t_R = 91,9$ s WBH Hagen (2015).

Die gewählte Durchflusszeit bezieht sich auf die Sedimentationskammer.

Oberflächenbeschickung $q_A = 48$ m/h

Die Oberflächenbeschickung q_A von 48 m/h ergibt sich aus der gewählten Fließgeschwindigkeit $v_{M,X}$, der Durchflusszeit t_R , dem Durchfluss Q sowie den weiteren geometrischen Randbedingungen (Beckenoberfläche). Die gewählte Oberflächenbeschickung entspricht einer Sinkgeschwindigkeit v_s eines Partikels des Durchmessers 139 μm ($\rho = 2650$ kg/m³).

8.3.3 Eigenschaften des numerischen Gitternetzes

Das numerische Gitternetz wurde – abweichend zu den übrigen Gitternetzen in diesem Forschungsvorhaben - mit der sog. Cut-Cell-Methode erstellt. Dabei wird das Fluid überwiegend in Zellen (für diesen Fall: Hexaeder) mit konstanter Größe eingeteilt. Eventuell entstehende

Lücken werden durch wenige, schmalere Zellschichten ausgefüllt. Diese können im Einzelfall von der Hexaeder-Form abweichen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, das Gitternetz in ausgewählten Zonen zu verfeinern. Diese Methode zeichnet sich durch eine einfache und sehr schnelle Anwendung aus, ist jedoch für komplexer Geometrien, als die hier verwendete, nicht geeignet. Die Auflösung des Gitternetzes wurde im Rahmen einer vorangegangenen Gitternetzstudie ermittelt. Insgesamt besteht das Netz aus rund 1 Mio. Zellen. In Bild 8.4 ist das Gitternetz einschließlich der selektiven Gitternetzverfeinerungen dargestellt.

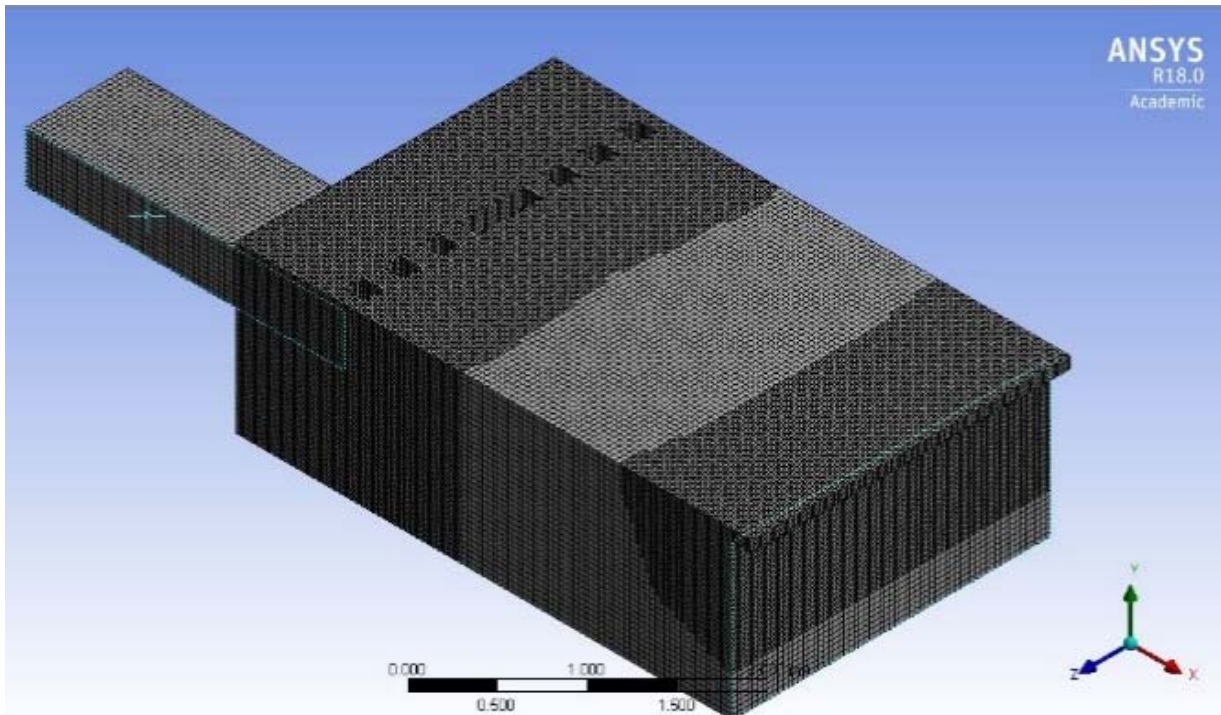


Bild 8.4: Auflösung des numerischen Gitternetzes und Darstellung der selektiven Verfeinerungen

8.3.4 Einstellungen im numerischen Modell

Im Folgenden werden die wesentlichen Einstellungen im numerischen Modell beschrieben:

Einlauf:	100 kg/s (Mass Flow Rate)
Auslauf:	Pressure-Outlet
Wasserspiegel:	Symmetrie-Ebene
Wandrauheit:	1,5 mm (Beton)
Fluid:	Wasser, bei 10 °C
Zeitl. Diskretisierung:	instationär ¹
Zeitschritt:	0,05 s

Turbulenzmodell:	k-Epsilon RNG
Wandfunktion:	Skalierbare Wandfunktion
Partikelberechnung:	Discrete Phase Model, Post-Processing
Kritische Schubspannung:	berechnet nach Van Rijn

¹ Eine instationäre Berechnungsmethode war für die hier durchgeführten Simulationen auf Grund der hohen hydraulischen Belastungen der Becken notwendig. Je höher die hydraulische Belastung, desto stärker zeigten sich instationäre Strömungsphänomene, die zu einer Divergenz der numerischen Lösung bei stationärer Berechnungsmethode führen können. Die in der folgenden Untersuchung dargestellten Absetzwirkungsgrade sind über einen Simulationszeitraumes von insgesamt 60 Sekunden für jeweils 12 Stützstellen gemittelt.

8.3.5 Verwendete Partikel im numerischen Modell

Im Rahmen der Untersuchungen zu den Abmessungsverhältnissen (Kapitel 8.4) wird lediglich ein Partikel mit mineralischer Dichte (2650 kg/m^3) und einem Durchmesser von $100 \text{ }\mu\text{m}$ betrachtet (sog. Untersuchungspartikel). Im Rahmen der systematischen Variation des Beckenvolumens (Kapitel 8.5) wird ein Partikelgemisch verwendet, welches sich aus mineralischen ($\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$) und organischen ($\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$) Partikeln sowie auch aus Partikeln mit einer für Mischwasser repräsentativen Mischdichte von 1460 kg/m^3 zusammensetzt. Die folgende Tabelle 8-2 gibt einen Überblick über die verwendeten Partikel.

Tabelle 8-2: Übersicht über die Eigenschaften des verwendeten Partikelgemisches

	d = 63 μm	d = 125 μm	d = 200 μm	d = 400 μm	d = 750 μm	d = 1000 μm	d = 2000 μm
Dichte	organisch - $1020 \text{ (kg/m}^3\text{)}$						
	mittel - $1460 \text{ (kg/m}^3\text{)}$						
	mineralisch - $2650 \text{ (kg/m}^3\text{)}$						
	Grenze Schluff/Sand	Feinsand	Grenze Fein-Mittelsand	Mittelsand	Grobsand		

8.4 Untersuchungen zu den Abmessungsverhältnissen einer Sedimentationsstufe

8.4.1 Stufe 1: Untersuchungen zum Einfluss des Längen-/Breitenverhältnisses L/B

In der ersten Stufe wird das Längen-/Breitenverhältnis (L/B-Verhältnis) des Beckens schrittweise verändert. Es wird die Auswirkung des L/B-Verhältnisses auf den Absetzwirkungsgrad des Untersuchungspartikels mit der Dichte von 2650 kg/m^3 und einem Durchmesser von $10 \text{ }\mu\text{m}$ des Beckens untersucht. Die Parameter „Oberflächenbeschickung q_A “ und das „Volumen V “ der Sedimentationskammer sind für alle Becken konstant. Hierdurch ergibt sich ebenfalls eine konstante Tiefe aller untersuchten Becken. Alle Simulationsläufe zur Untersuchung des L/B-Verhältnisses werden im Folgenden mit „QAV“ bezeichnet. Je höher der L/B-Wert, desto länger und schmaler ist das Becken. Je kleiner der Wert ist, desto breiter und kürzer ist das Becken. Der Durchfluss Q beträgt für alle Simulationen $Q = 100 \text{ l/s}$. Der Abstand sowie die grundsätzliche Geometrie der teilweise geblockten Lamellenwand bleibt unverändert. Es wird lediglich die Anzahl der Lamellen über die Breite des Beckens angepasst. Bezieht man lediglich die Sedimentationskammer in die Berechnung des L/B-Verhältnisses ein, so erfüllt keines der Becken die Anforderungen aus dem Regelwerk DWA-A 166 (2013) von $3 < L/B < 4,50$.

In Bild 8.5 sind die Geometrien der untersuchten Becken der Simulationsstufe „QAV“ einschließlich der verwendeten Gitternetzstruktur dargestellt.

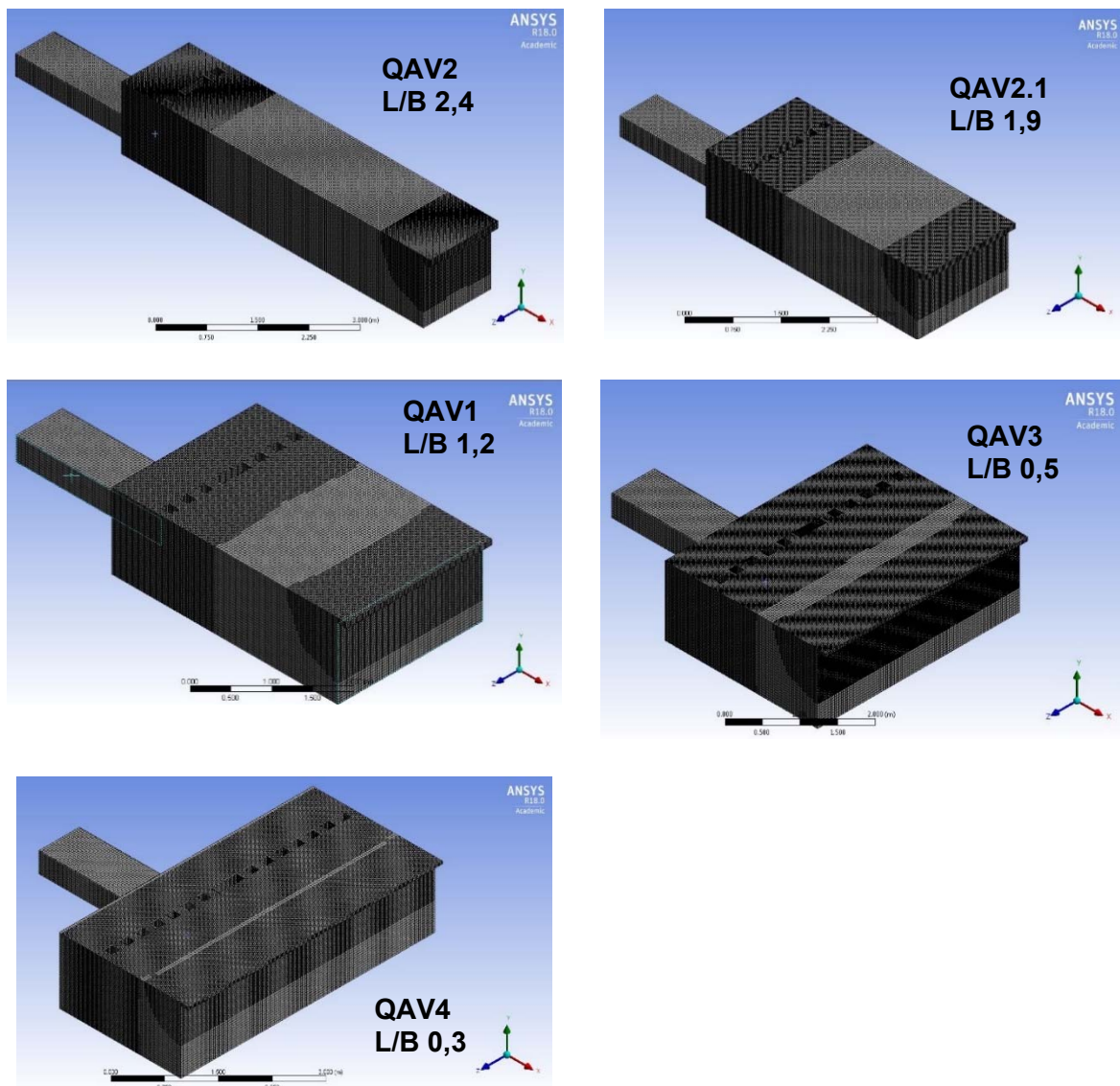


Bild 8.5: Darstellung der unterschiedlichen Beckengeometrien der simulierten Becken der Stufe 2 "QAV"

Folgende Tabelle 8-3 gibt eine Übersicht über die unterschiedlichen untersuchten Varianten. Das Ausgangsbecken ist mit „Stamm QAV1“ gekennzeichnet.

Tabelle 8-3: Oben: Übersicht über die hydraulischen und geometrischen Randbedingungen der fünf simulierten Becken der Simulationsstufe "QAV"; Unten: Empfehlungen aus dem DWA-A 166 (2013) zu den Abmessungsverhältnissen; in Rot markiert sind solche Abmessungsverhältnisse, die außerhalb der Empfehlungen des DWA-A 166 (2013) liegen (sind unten angefügt)

Name	Q _x (kg/s)	q _A (m/h)	V (m ³)	H (m)	B (m)	L (m)	L/B (-)
QAV2	0,1	48	9,75	1,30	1,40	5,36	3,8
QAV2.1	0,1	48	9,75	1,30	2,00	3,75	1,9
QAV1 (STAMM)	0,1	48	9,75	1,30	2,50	3,00	1,2
QAV3	0,1	48	9,75	1,30	3,80	1,97	0,5
QAV4	0,1	48	9,75	1,30	5,00	1,50	0,3

Abmessungsverhältnisse aus DWA A-166	
L/H-Verhältnis	6 - 15
B/H-Verhältnis	2 - 4
L/B-Verhältnis	3 - 4,5

In Bild 8.6 ist die Durchströmungscharakteristik (dargestellt ist der Geschwindigkeitsbetrag) im Becken auf einem horizontalen Schnitt 20 cm oberhalb der Beckensohle abgebildet. Die im numerischen Modell ermittelten Absetzwirkungsgrade der fünf unterschiedlichen Becken sind in Bild 8.7 in Abhängigkeit vom L/B-Verhältnis dargestellt.

Da sich die Abmessungen der teilweise geblockten Lamellenwand nicht mit der Beckenbreite skalieren, wird die Strömung in den Lamellenzwischenräumen im langen, schmalen Becken (Becken QAV2 L/B 3,8) deutlich beschleunigt. Eine beruhigte, sedimentationswirksame Strömung ist erst nach ca. einer halben Beckenlänge erkennbar. Dies spiegelt sich in den vergleichsweise schlechteren Wirkungsgraden dieser Variante wider. Diese Variante erzielt den niedrigste Absetzwirkungsgrad von 52,8 % für den ausgewählten Untersuchungspartikel.

Das Becken QAV2.1 mit einem L/B-Verhältnis von 1,9 erzielt hingegen den höchsten Absetzwirkungsgrad von 60,5 %. Die Durchströmungscharakteristik zeigt, dass die teilweise geblockte Lamellenwand bei diesen Abmessungsverhältnissen die gleichmäßigste Anströmung der Sedimentationskammer erzielt und dementsprechend die höchsten Wirkungsgrade. Die anderen Becken mit kleineren L/B-Verhältnissen weisen nur marginal schlechtere Absetzwirkungsgrade von ca. 57 % auf. Mit zunehmender Breite und gleichzeitiger Verringerung der

Länge des Beckens verschlechtert sich der Absetzwirkungsgrad eines Beckens. Eine gleichmäßige Verteilung der Strömung auf den gesamten Beckenquerschnitt kann bei derart kleinen L/B-Verhältnissen durch eine teilweise geblockte Lamellenwand nicht erreicht werden.

Für die anschließenden Untersuchungen zum Einfluss der Beckentiefe wird das Becken QAV 2.1 mit einem L/B-Verhältnis von 1,9 ausgewählt.

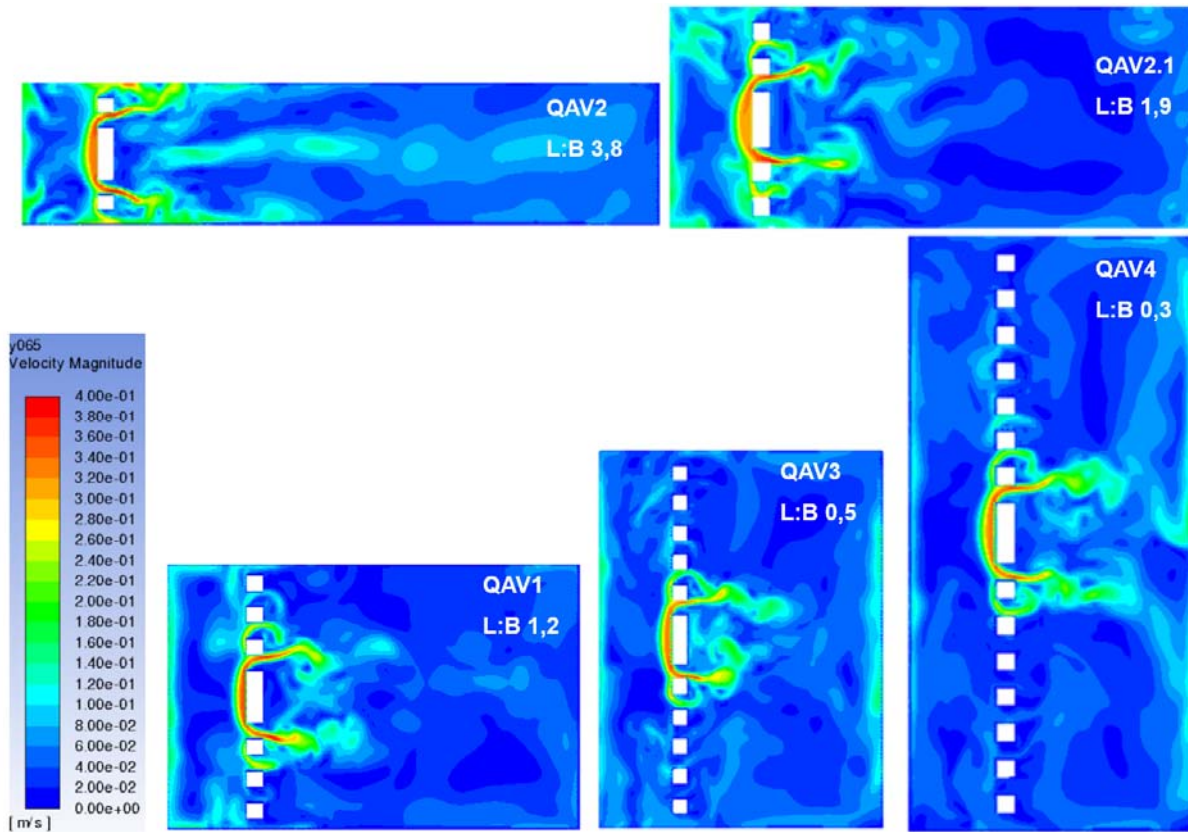


Bild 8.6: Durchströmungscharakteristik in den fünf unterschiedlichen Becken; dargestellt sind die Geschwindigkeitsbeträge (velocity-magnitude) auf einem horizontalen Schnitt 20 cm oberhalb der Sohle

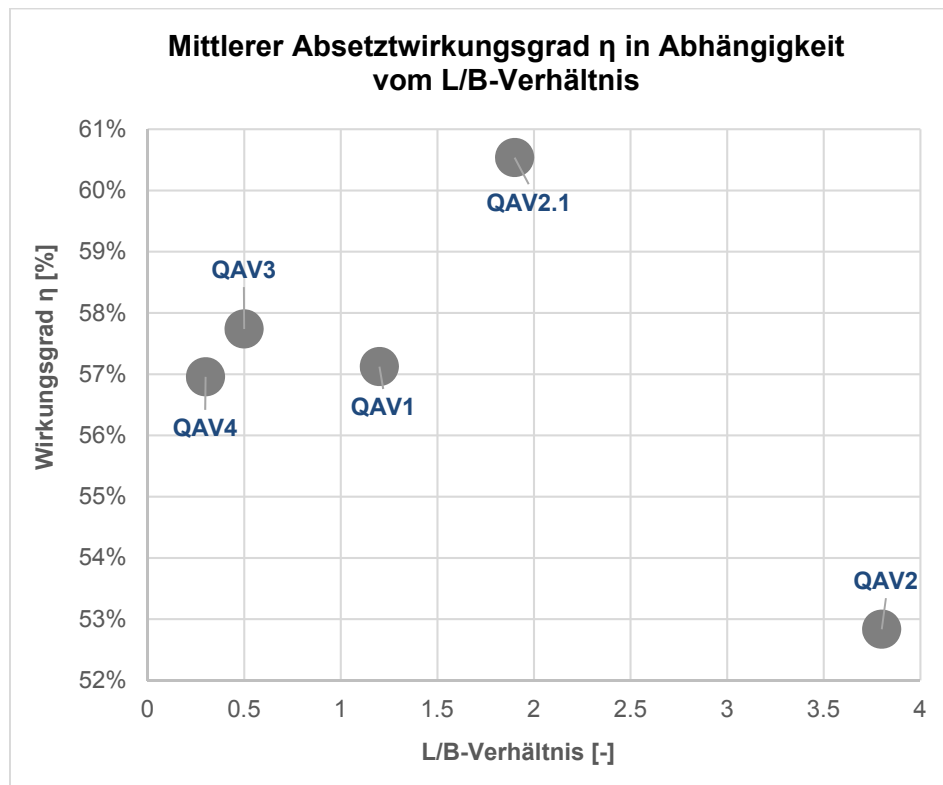


Bild 8.7: Im numerischen Modell ermittelte Absetzwirkungsgrade für die in der Simulationsstudie „QAV“ untersuchten Becken für einen Partikel mit einer Dichte von 2650 kg/m^3 und einem Durchmesser von $100 \text{ }\mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom L/B-Verhältnis der Becken; $q_A = 48 \text{ m/h}$, $V = 9,75 \text{ m}^3$

8.4.2 Stufe 2: Untersuchungen zum Einfluss der Beckentiefe H

In der Stufe 2 wird die Beckentiefe H schrittweise verändert. Als Bewertungskriterium wird wiederum der Absetzwirkungsgrad eines Partikels mit der Dichte 2650 kg/m^3 und einem Durchmesser von $100 \text{ }\mu\text{m}$ herangezogen. Das L/B-Verhältnis = 1,9, das Volumen der Sedimentationskammer $V = 9,75 \text{ m}^3$ sowie die hydraulische Belastung $Q = 0,1 \text{ kg/s}$ sind bei allen Becken konstant. Dies bedeutet jedoch, dass sich die Oberflächenbeschickungen q_A der Becken teils deutlich voneinander unterscheiden ($28 \text{ m/h} < q_A < 97 \text{ m/h}$).

Die Becken dieser Stufe 2 werden im Folgenden mit „VLB“ benannt. Ausgangsbecken stellt das Becken aus Stufe 1 QAV2.1 dar, welches im Folgenden nun mit „VLB3.QVA“ benannt ist. Bild 8.8 gibt eine Übersicht über die in der Stufe 3 untersuchten Beckengeometrien sowie die verwendeten numerischen Gitternetze. Tabelle 8-4 enthält die für die jeweiligen Becken definierten hydraulischen und geometrischen Randbedingungen. Zusätzlich sind die im DWA-A 166 (2013) empfohlenen Abmessungsverhältnisse aufgeführt. Keines der hier konzipierten Becken erfüllt alle Kriterien der Abmessungsverhältnisse. Das Becken VLB4 erfüllt zumindest die Kriterien für das L/H- und das B/H-Verhältnis. Dieses Becken weist im Vergleich zu den

anderen Becken die geringste Oberflächenbeschickung auf, bei sonst gleichem Zufluss, Volumen und L/B Verhältnis. Alle übrigen Becken (VLB1, VLB2 und VLB3.QAV) sind relativ gesehen zu kurz und zu tief.

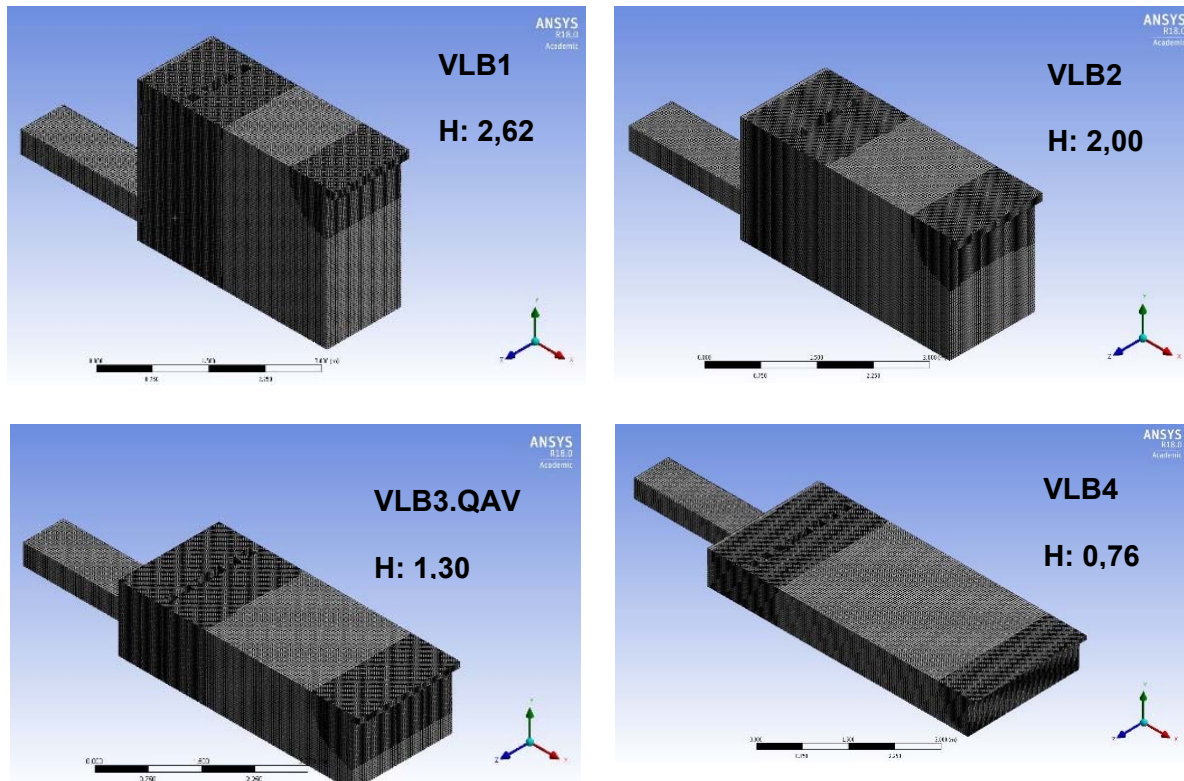


Bild 8.8: Darstellung der unterschiedlichen Beckengeometrien der simulierten Becken der Stufe 3 „VLB“

Tabelle 8-4: Übersicht der simulierten Becken der Stufe 2 "VLB" (Abmessungen beziehen sich auf die Sedimentationskammer); Unten: Empfehlungen aus dem DWA-A 166 (2013) zu den Abmessungsverhältnissen; in Rot markiert sind solche Abmessungsverhältnisse, die außerhalb der Empfehlungen des DWA-A 166 (2013) liegen (sind unten angefügt)

Name	Q _x (kg/s)	q _A (m/h)	V (m ³)	H (m)	B (m)	L (m)	L/B (-)	L/H (-)	B/H (-)
VLB1	0,1	96,7	9,75	2,62	1,40	2,66	1,90	1,02	0,53
VLB2	0,1	74,0	9,75	2,00	1,60	3,04	1,90	1,52	0,80
VLB3.QAV	0,1	48,0	9,75	1,30	2,00	3,75	1,90	2,88	1,53
VLB4	0,1	28,0	9,75	0,76	2,60	4,94	1,90	6,51	3,40

L/H-Verhältnis Abmessungsverhältnisse DWA A-166	6 - 15
B/H-Verhältnis	2 - 4
L/B-Verhältnis	3 - 4,5

Bild 8.9 zeigt die Ergebnisse zu den im numerischen Modell ermittelten Absetzwirkungsgraden der unterschiedlichen Becken in Abhängigkeit zur Tiefe H (links) sowie auch zum B/H-Verhältnis. Die auf diese Weise dargestellten Ergebnisse weisen deutlich darauf hin, dass der Absetzwirkungsgrad steigt, je flacher ein Becken ist. Demnach erzielt das flachste Becken VLB4 die besten Absetzwirkungsgrade.

Dieser Vergleich vernachlässigt jedoch, dass eben genau dieses Becken einer deutlich geringeren Oberflächenbeschickung ausgesetzt wird (28 m/h im Vergleich zu Becken VLB1 mit 96 m/h). Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass dieses Becken auf Grund seiner großen Oberfläche deutlich mehr Baufläche benötigt, der jedoch oftmals örtlich nicht zur Verfügung steht. Aus diesen genannten Gründen werden zwei weitere Auswertungsschritte durchgeführt:

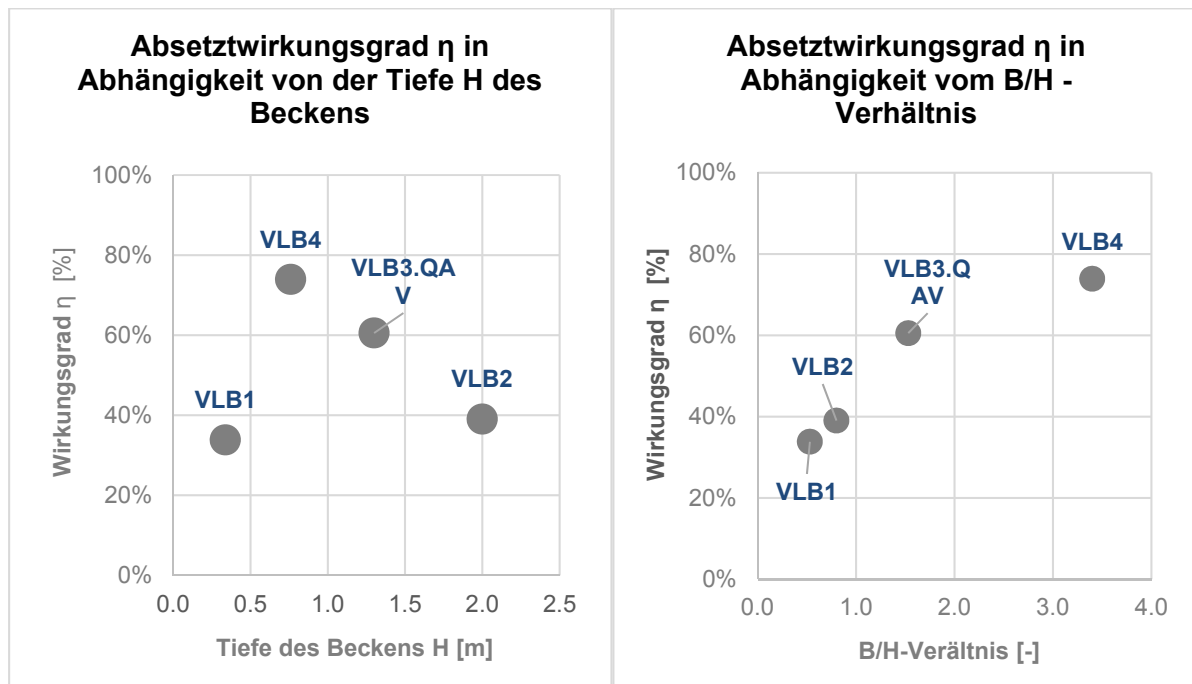


Bild 8.9: Im numerischen Modell ermittelte Absetzwirkungsgrade für die in der Simulationsstudie „VLB“ untersuchten Becken für einen Partikel mit einer Dichte von 2650 kg/m^3 und einem Durchmesser von $100 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit von der Tiefe des Beckens (links) und dem B/H Verhältnis der Becken (rechts); $Q = 0,1 \text{ kg/s}$, $V = 9,75 \text{ m}^3$

Vergleich der Becken unabhängig von der spezifischen Oberflächenbeschickung

Zum einen erfolgt ein Vergleich der Wirkungsgrade auf Basis der Hazen-Theorie (siehe hierzu Kapitel: 3.1). Die Hazen-Theorie definiert, welcher Wirkungsgrad, unter Annahme einer Pfropfenströmung, bei unterschiedlichen Oberflächenbeschickungen theoretisch erreichbar ist. Für jedes der hier untersuchten Becken wird jeweils die Differenz zum theoretisch möglichen Wirkungsgrad gemäß Hazen-Theorie berechnet. Hierzu wurden ergänzend zu dem Partikel mit einer Größe von $100 \mu\text{m}$, ein Partikel mit einem konstanten Durchmesser von $63 \mu\text{m}$ definiert. Weiterhin sind zwei Partikel definiert, deren Hazen-Zahlen konstant $Ha = 0,50$ bzw. $Ha = 1$ betragen. Das bedeutet, dass sich der Durchmesser dieser Partikel gemäß der jeweiligen Oberflächenbeschickung des Beckens neu berechnet. Die Dichte alle Partikel beträgt weiterhin 2650 kg/m^3 . Eine Zusammenfassung der Partikel-Eigenschaften findet sich in der Tabelle 8-5.

Tabelle 8-5: Übersicht über die verwendeten Partikel in der weitergehenden Untersuchung zum Einfluss der Beckentiefe H auf den Absetzwirkungsgrad

Name	Partikel (μm)	Hazen-Zahl (-)
VLB1	100	0.26
VLB2		0.33
VLB3.QAV		0.52
VLB4		0.88
VLB1	63	0.11
VLB2		0.14
VLB3.QAV		0.21
VLB4		0.36
VLB1	140	0.5
VLB2	120	
VLB3.QAV	100	
VLB4	75	
VLB1	200	1
VLB2	170	
VLB3.QAV	140	
VLB4	105	

Bild 8.10 zeigt die berechneten Differenzen zwischen den numerisch modellierten Absetzwirkungsgraden und den theoretischen Wirkungsgraden gemäß Hazen-Theorie für die unterschiedlichen Becken bzw. Beckentiefen H. Suggestierten die Ergebnisse in den Darstellungen in Bild 8.9 noch einen deutlich verbesserten Absetzwirkungsgrad im Falle des Becken VLB4, so zeigen die Ergebnisse in Bild 8.10 nun, dass dieses Becken bei Berücksichtigung der deutlich verringerten Oberflächenbeschickung schlechtere Wirkungsgrade erzielt, als die übrigen untersuchten Becken. Gemäß dieser Auswertung wäre ein Becken mit einer Tiefe von 2,62 m oder 1,3 m zu wählen.

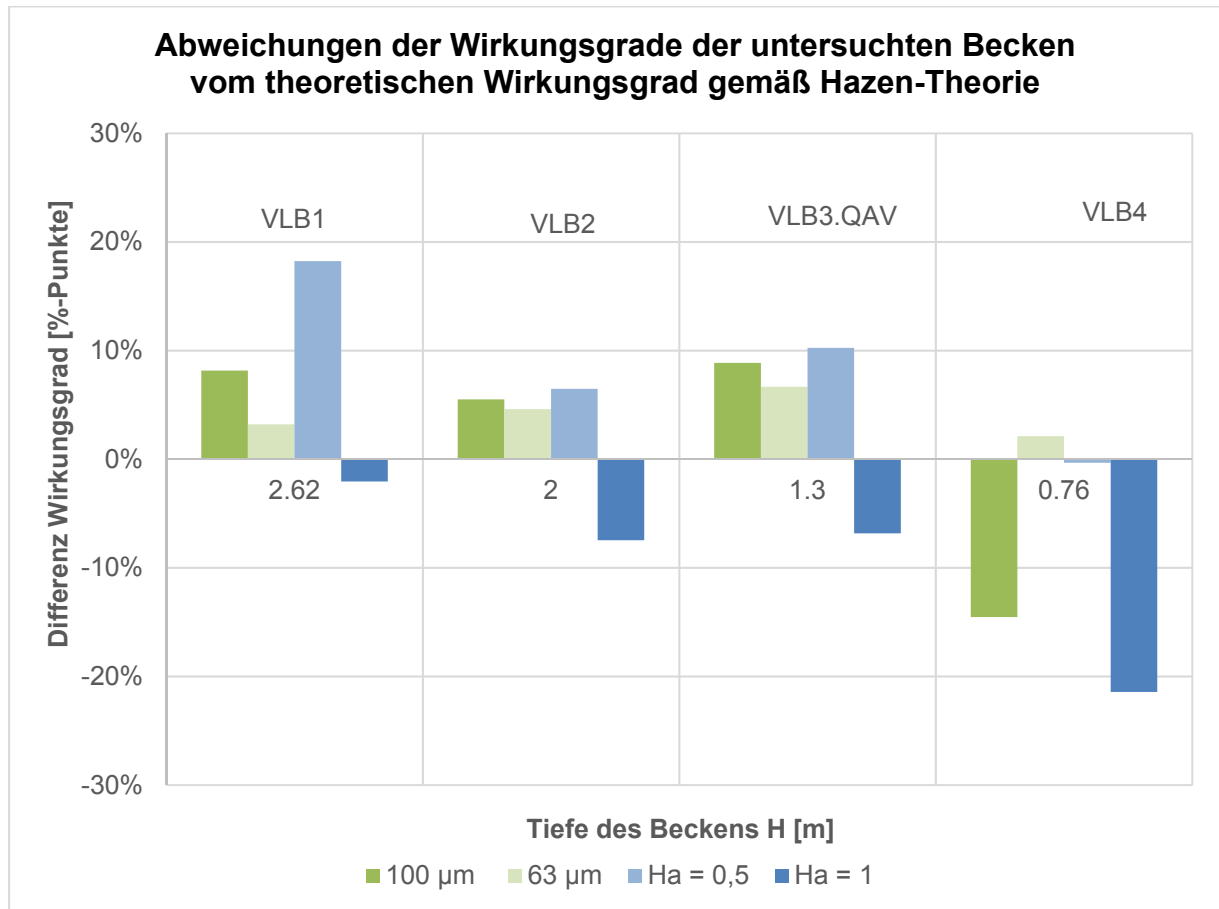


Bild 8.10: Differenzen der im numerischen Modell ermittelten Wirkungsgrade zum theoretischen Wirkungsgrad gemäß Hazen-Theorie für die unterschiedlichen Becken bzw. Beckentiefen H

Vergleich der Becken auf Basis des Platzbedarfes

Ergänzend zum Vergleich der Becken auf Basis der Hazen-Theorie wird der ermittelte Absetzwirkungsgrad ins Verhältnis zum notwendigen Flächenbedarf des jeweiligen Beckens gesetzt. Es wird ein Indikator I_{Becken} definiert, welcher den Wirkungsgrad η (%) zur bebauten Fläche A (m^2) ins Verhältnis setzt und somit ein Maß für die Effektivität der Becken in Bezug auf den Platzbedarf darstellt.

Dieser Indikator besagt: Je höher der Indikator, desto mehr Partikel setzen sich pro Quadratmeter Beckenfläche ab.

Die Darstellung des Indikators I_{Becken} in Bild 8.11 zeigt, dass die Flächenausnutzung (bezogen auf einen Partikel mit einem Durchmesser von 100 µm sowie von 63 µm im Falle des flachsten Beckens ($H = 0,76$ m) am schlechtesten ist. Die übrigen Becken zeigen nur geringfügige Unterschiede.

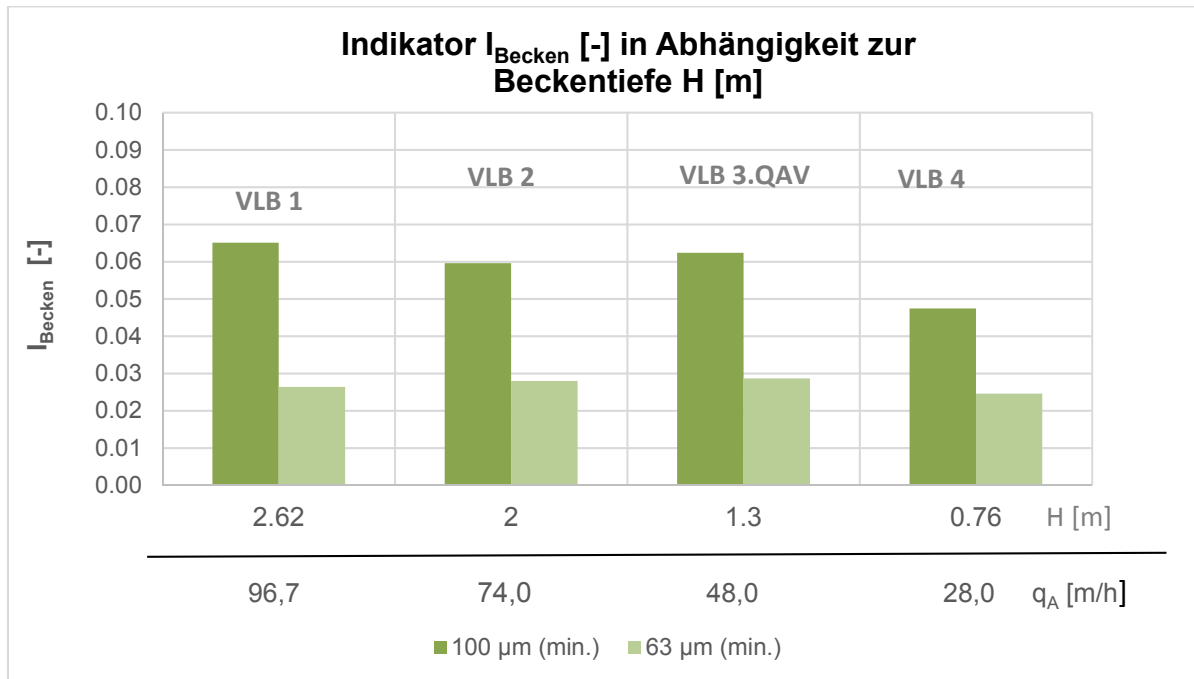


Bild 8.11: Bewertung des Platzbedarfes der untersuchten Beckentiefen H [m] mit Hilfe des Indikators I_{Becken} [-]

Auf Basis der Ergebnisse aus den drei unterschiedlichen Methoden zum Vergleich der Becken (Bild 8.9 bis Bild 8.11) wird für die weitere Untersuchung zum Einfluss des Beckenvolumens auf den Wirkungsgraden das Becken „VLB3.QAV“ mit den folgenden Abmessungsverhältnissen in Tabelle 8-6.

Tabelle 8-6: Auf Basis der Ergebnisse in diesem Kapitel gewählte Abmessungsverhältnisse im Vergleich zu den im DWA A-166 definierten Abmessungsverhältnissen

	Abmessungsverhältnisse aus DWA A-166 [-]	Gewählte Abmessungen [-]
L/H-Verhältnis	6 - 15	2,9
B/H-Verhältnis	2 - 4	1,5
L/B-Verhältnis	3 - 4,5	1,9

Es ist dabei zu berücksichtigen, dass gezielt kompakt gestaltete Becken untersucht wurden.

8.5 Stufe 3: Entwurf von Bemessungsdiagrammen auf Basis einer systematischen Volumenreduktion der Beckenkammer

In Stufe 3 wird das Volumen der Beckenkammer systematisch variiert und der Einfluss auf den Absetzwirkungsgrad unterschiedlicher Partikel beschrieben. Diese Volumenvariation stellt die Grundlage für die zu entwickelnden Bemessungsdiagramme. Diese können im Rahmen einer Dimensionierung einer der Filtration vorgeschalteten Sedimentationsstufe verwendet werden. Aus ihnen ist ablesbar, welches Beckenvolumen in der Sedimentationsstufe vorzusehen ist, um eine bestimmte Partikelfraktion im Becken zurückzuhalten. Auf diese Weise kann eine Sedimentationsstufe passend für einen Filter ausgelegt werden.

Die Becken dieser Stufe 3 werden im Folgenden mit „V“ benannt. Ausgangsbecken stellt das Becken aus Stufe 2 VLB3.QVA dar, welches im Folgenden nun mit „V3.VLB3.QAV“ benannt ist. Tabelle 8-7 enthält die für die jeweiligen Becken definierten hydraulischen und geometrischen Randbedingungen. Zusätzlich sind die im DWA A-166 empfohlenen Abmessungsverhältnisse aufgeführt. Es ist zu erwähnen, dass keines der hier verwendeten Becken die Kriterien der Abmessungsverhältnisse in DWA-A166 erfüllt.

Tabelle 8-7: Übersicht der simulierten Becken der Stufe 3 "V" (Abmessungen beziehen sich auf die Sedimentationskammer);

Name	Q _x (kg/s)	q _A (m/h)	V (m ³)	H (m)	B (m)	L (m)	L/B (-)	L/H (-)	B/H (-)
V1	0,1	95,67	3,50	0,93	1,40	2,70	1,9	2,9	1,5
V2	0,1	63,32	6,50	1,14	1,71	3,32	1,9	2,9	1,5
V3.VBL3. QAV	0,1	47,37	9,88	1,30	2,00	3,80	1,9	2,9	1,5
V4	0,1	36,26	15,00	1,51	2,27	4,38	1,9	2,9	1,5
V5	0,1	27,27	23,00	1,74	2,61	5,05	1,9	2,9	1,5

Als Bewertungskriterium werden die Absetzwirkungsgrade von Partikeln mit einem Größenspektrum von 63 µm bis 1000 µm im Durchmesser herangezogen. Jedes Partikel wird mit einer mineralischen Dichte von 2650 kg/m³, einer organischen Dichte von 1020 kg/m³ und einer Mischdichte von 1460 kg/m³ verwendet. Die Abmessungsverhältnisse (L/B, L/H, B/H) sowie die hydraulische Belastung $Q = 0,1 \text{ kg/s}$ sind bei allen Becken konstant. Durch die z.T. deutlichen Unterschiede bezüglich des Beckenvolumens variiert dementsprechend auch die Oberflächenbeschickung q_A ($27 \text{ m/h} < q_A < 96 \text{ m/h}$).

Bild 8.12 bis Bild 8.14 zeigen die Ergebnisse zu den im numerischen Modell ermittelten Absetzwirkungsgraden in Abhängigkeit vom Beckenvolumen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Absetzwirkungsgrad mit zunehmender Oberflächenbeschickung bzw. geringer werdendem Beckenvolumen sinkt und zwar für alle untersuchten Dichten. Insbesondere im Bereich von Beckenvolumina zwischen $V = 3,50 \text{ m}^3$ und $V = 10,00 \text{ m}^3$ ist dieser Effekt deutlich erkennbar.

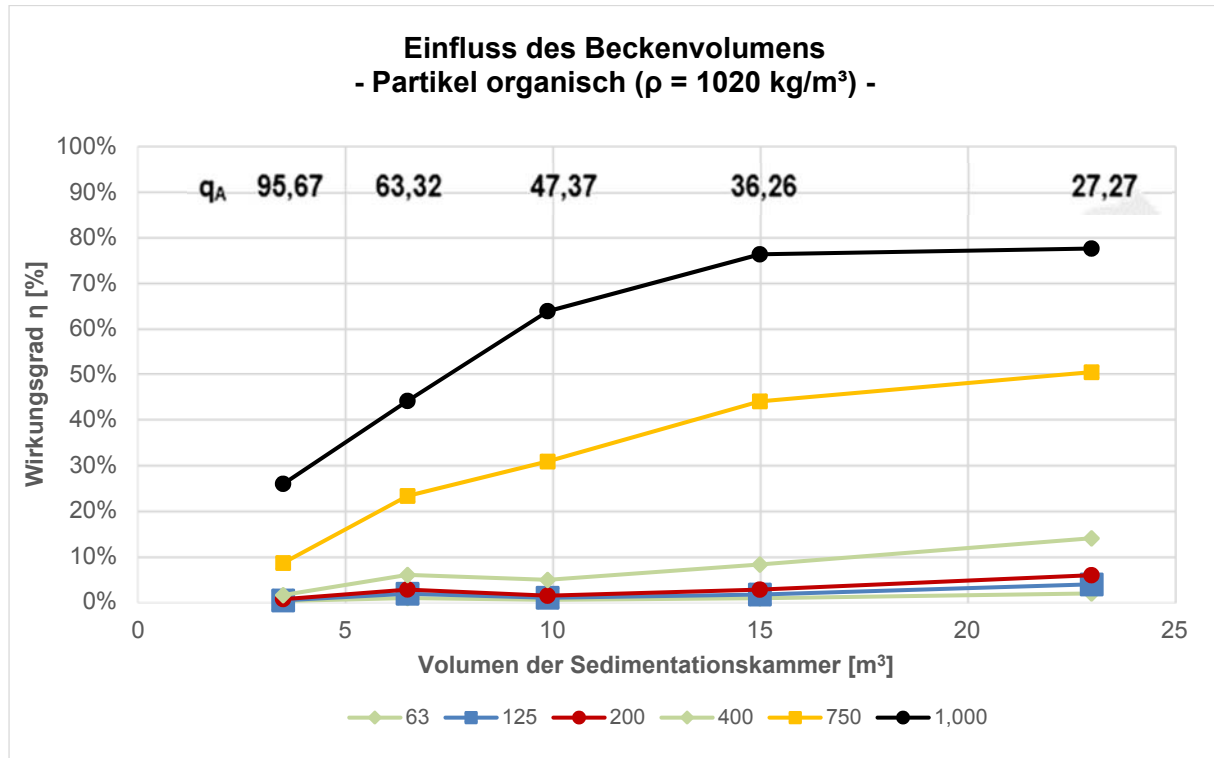


Bild 8.12: Bemessungsdiagramm zum Einfluss des Volumens der Sedimentationskammer auf den Absetzwirkungsgrad einzelner organischer Partikel

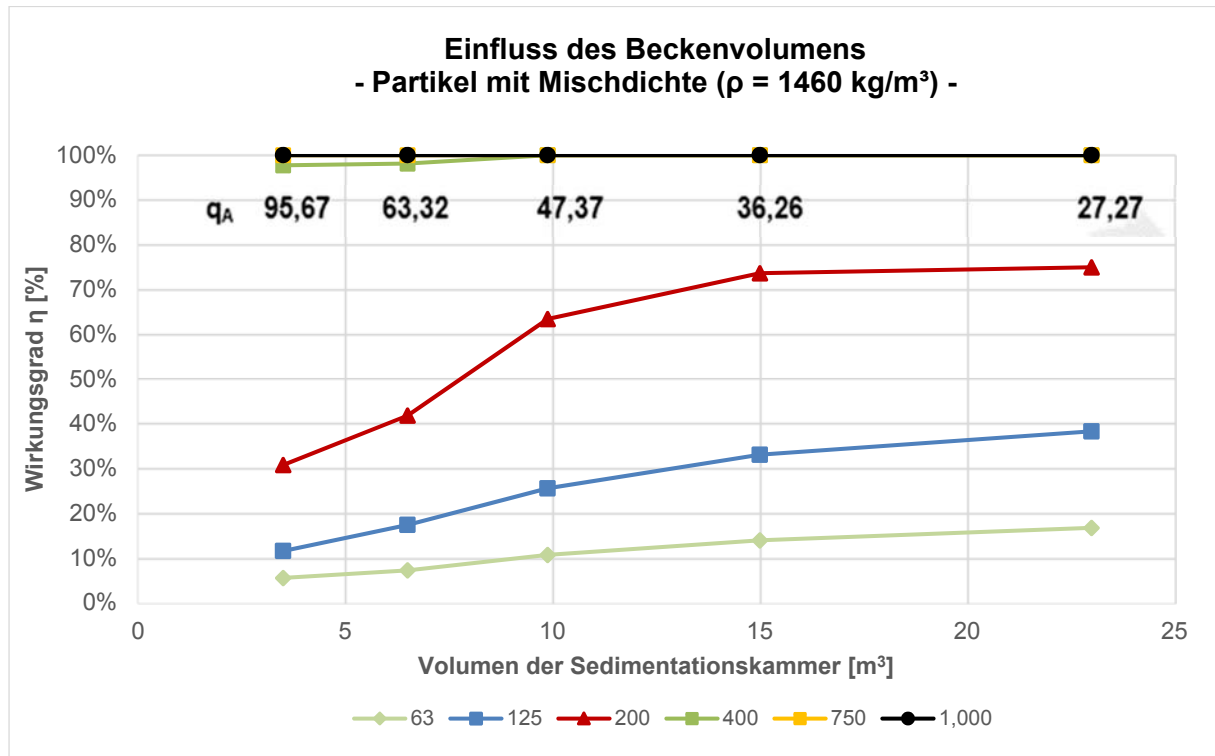


Bild 8.13: Bemessungsdiagramm zum Einfluss des Volumens der Sedimentationskammer auf den Absetzwirkungsgrad einzelner Partikel mit einer repräsentativen Mischdichte für Mischwasser

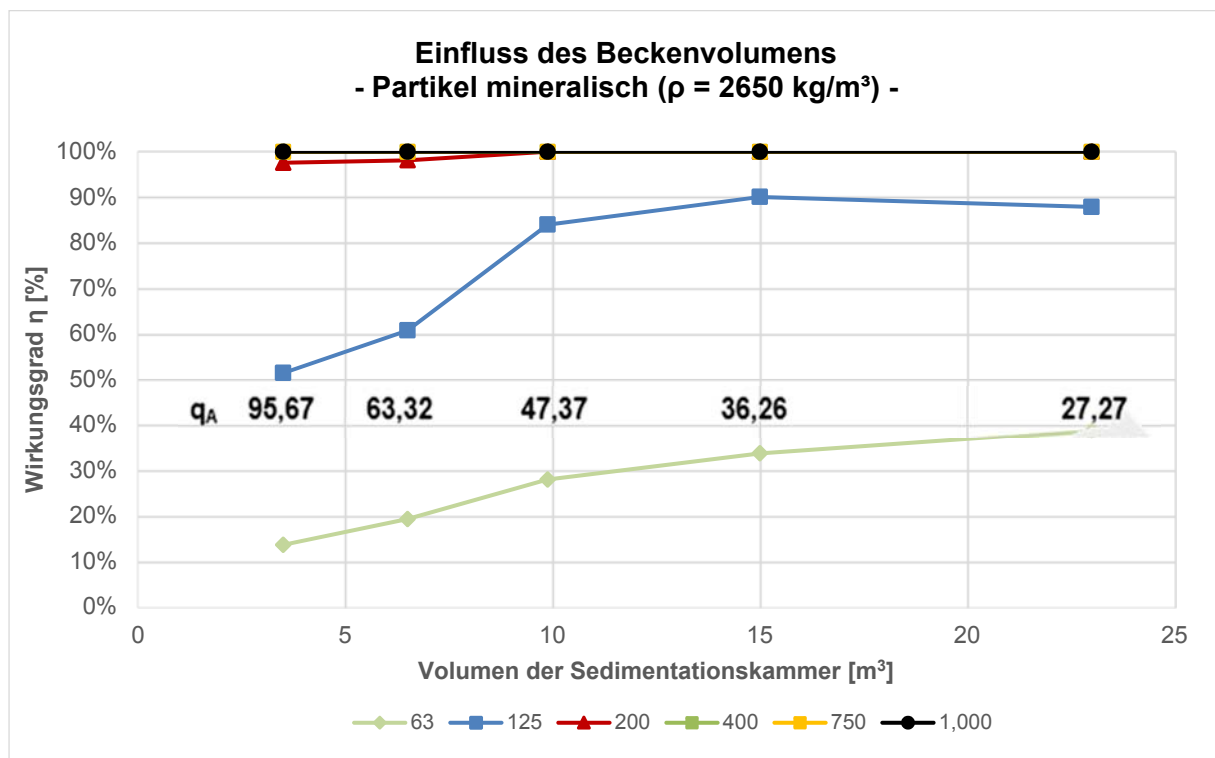


Bild 8.14: Bemessungsdiagramm zum Einfluss des Volumens der Sedimentationskammer auf den Absetzwirkungsgrad einzelner mineralischer Partikel

Beispielhafte Anwendung der Bemessungsdiagramme

Die Anwendung der Bemessungsdiagramme erfolgt nach folgender Vorgehensweise (siehe Bild 8.15):

- Im Rahmen eines Vorhabens ist ein technischer Filter zur Niederschlagswasserbehandlung vorgesehen.
- Filter-Vorversuche des Herstellers haben gezeigt, dass das Risiko einer Kolmation des Filters durch das Vorhandensein von Partikeln mit einem Durchmesser von größer 125 μm deutlich erhöht wird.
- Deshalb soll dem Filter eine Sedimentationskammer vorgeschaltet werden, in der alle Partikel $\geq 125 \mu\text{m}$ zu mindestens 80 % aus dem Niederschlagswasser abgetrennt werden.
- Das Niederschlagswasser setzt sich größtenteils aus mineralischen Partikeln zusammen.
- Das Bemessungsdiagramm in Bild 8.15 für mineralische Partikel wird herangezogen.
- Für einen Ziel-Absetzwirkungsgrad von 80 % und einen Partikeldurchmesser von 125 μm wird das benötigte Beckenvolumen herausgelesen (hier ca. 9 m^3).
- Weiterhin können Absetzwirkungsgrade für andere mineralische Partikel als auch für Partikel mit anderer Dichte für das ausgewählte Beckenvolumen von 9 m^3 abgelesen werden.

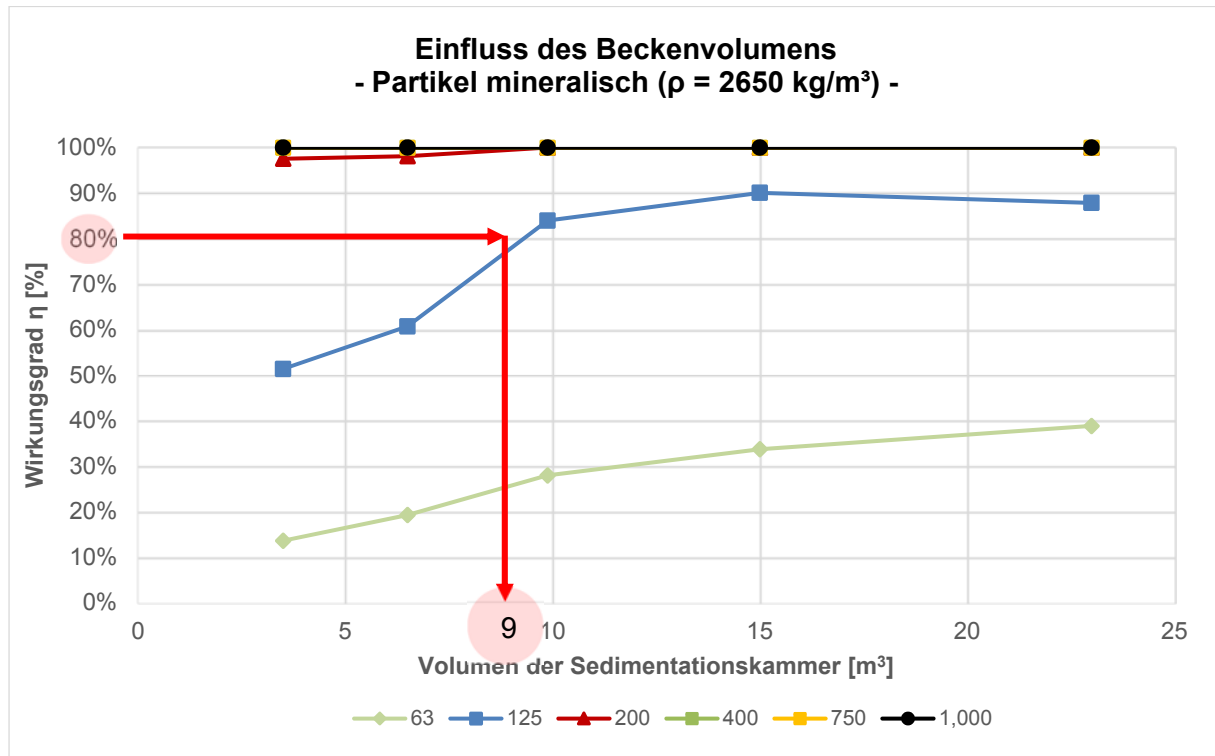


Bild 8.15: Anwendung des Bemessungsdiagrammes für mineralische Partikel. Die Zielvorgaben sind: Absetzwirkungsgrad mindestens 80 % für Partikel des Durchmessers 125 μm und größer. Das Ergebnis ist das erforderliche Beckenvolumen $V = 9 \text{ m}^3$ der Sedimentationskammer und bei einem Durchfluss von $Q = 100 \text{ l/s}$.

9 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Im Forschungsvorhaben „Maßnahmen zur Ertüchtigung von Regenklärbecken und Hinweise zu deren Neubau (MEREBEN)“ wurde im Rahmen der Phase 2 „Neubau von Regenklärbecken“ untersucht, wie neue RKB baulich gestaltet werden sollten. Die Phase 2 schließt an die Phase 1 - Ertüchtigung des Bestandes - an. Darüber hinaus wurden außer rechteckigen auch runde Becken-Bauformen untersucht. Weiterhin wurde für ein Sedimentationsbecken, das einer Filtration vorgeschaltet wird, untersucht, welche Abmessungen und welches Volumen gewählt werden sollten. Die hier als optimierte Becken dargestellten Konfigurationen für den Neubau sind nicht als „Musterbecken“ zu verstehen. Sie sind vielmehr als Schritt in die richtige Richtung zu verstehen, denn im Rahmen dieses Forschungsvorhabens war eine allumfassende und erschöpfende Untersuchung nicht möglich.

Für die Konfiguration eines optimierten Regenbeckens in Rechteck-Bauweise ist zunächst eine intensive Literaturstudie durchgeführt worden, von deren Ergebnissen die vielversprechendsten Varianten numerisch nachgerechnet und bewertet wurden. Auf Grundlage der ermittelten Absetzwirkungsgrade wurde ein „optimiertes Becken aus der Literatur“ definiert. Dieses Becken wurde dann mit dem besten Becken der hier, in diesem Projekt, durchgeführten Optimierungsstudie verglichen. Diese Untersuchungen wurden ausschließlich mit Hilfe von numerischen Simulationen durchgeführt. Bei der Interpretation der im numerischen Modell berechneten Absetzwirkungsgrade ist zu berücksichtigen, dass diese für kontrollierte Randbedingungen definiert wurden. Eine eventuelle Beeinflussung der Wirkungsgrade durch Feststoffe, die sich auf Grund von vorhergehenden Ereignissen (Becken im Dauerstau) oder aufgrund eines engen zeitlichen Bezuges mit vorhergehenden Ereignissen (Ereignisabfolge bei Becken ohne Dauerstau) noch im Becken befinden, wurde hier bewusst nicht betrachtet. Weiterhin wurde die simulierte Ereignislänge so kontrolliert, dass es den Partikeln zeitlich möglich war, sich entweder auf der Sohle abzusetzen oder über den Klärüberlauf das Becken zu verlassen. Diese Vorgehensweise im Rahmen der Modellierung hatte das Ziel, aufzuzeigen, wie hoch der „theoretisch maximal mögliche Wirkungsgrad“ der Becken sein kann.

Das aus diesem Projekt hervorgegangene, optimierte Becken ist ein modifizierter Gleichrichter mit Grundwalze, welcher gegenüber der Phase 1 in dieser Phase 2 noch einmal grundlegend überarbeitet wurde. Der Vergleich beider Becken zeigt, dass der modifizierte Gleichrichter für ein synthetisches Gemisch (Partikel-Durchmesser von 1 µm bis 2000 µm, bestehend aus mineralischen (2650 kg/m³) und organischen (1020 kg/m³) Anteilen) und einer Oberflächenbeschickung $q_A = 10 \text{ m/h}$ mit einem Gesamt-Absetzwirkungsgrad von $\eta_{\text{ges}} = 50 \%$ um etwa 3 % über dem Wirkungsgrad des optimierten Beckens aus der Literatur ($\eta_{\text{ges}} = 47 \%$) liegt. Die

Modifikation zielte dabei auf die feineren Fraktionen der Partikelfraktion AFS_{63} , welche den Erkenntnissen dieses Vorhabens entsprechend besonders positiv auf eine kontrollierte Grundwalze reagieren. Für das Becken mit dem besten Wirkungsgrad wurde anschließend eine zusätzliche Untersuchung mit einer hydraulischen Belastung von $q_A = 4$ m/h durchgeführt. Es zeigt sich, dass durch eine Reduktion der hydraulischen Belastung von 10 m/h auf 4 m/h eine Steigerung des Wirkungsgrades um ca. 13 %-Punkte von 50,00 % auf 62,70 % erreicht werden kann.

Im Zuge des Entwurfes eines optimierten runden Regenklärbeckens sind zunächst Untersuchungen an einem physikalischen Modell durchgeführt worden, um erste Erkenntnisse bezüglich der Durchströmungscharakteristik und des Absetzverhaltens zu erhalten. Mit den physikalischen Ergebnissen konnte dann ein numerisches Modell validiert werden. An diesem Modell wurden unterschiedliche Komponenten des Rundbeckens numerisch untersucht, sodass am Ende ein optimiertes Becken definiert werden konnte. Das optimierte runde Regenklärbecken hat einen zentralen Zulauf, einen außen umlaufenden Klärüberlauf und wird von innen nach außen radial durchströmt. Auch für das optimierte runde Becken wurde dessen Verhalten bei unterschiedlicher hydraulischer Belastung untersucht. Der Gesamt-Absetzwirkungsgrad des Rundbeckens liegt für ein Partikel-Gemisch aus mineralischen (2650 kg/m³) und organischen (1020 kg/m³) Anteilen und einer Oberflächenbeschickung $q_A = 10$ m/h bei $\eta_{ges} = 60,30$ %. Damit liegt der Wirkungsgrad des in dieser Untersuchung optimierten Rundbeckens deutlich über dem des optimierten Rechteckbeckens ($\eta_{ges} = 50,00$ %). Dieser Vorteil kann evtl. noch vergrößert werden, wenn das Rundbecken weiteren Optimierungsläufen unterzogen wird, für die in diesem Vorhaben keine Mittel mehr zur Verfügung standen.

Bei der Planung eines neuen Rechteckbeckens ist es elementar wichtig, dass eine möglichst symmetrische Anströmung über einen möglichst großen Querschnitt gleichmäßig dem Becken zugeführt wird. Gelingt dies, sind weiter keine Einbauten in ein solches Becken nötig. Die Oberflächenbeschickung sollte so gering wie möglich gewählt werden. Es genügt, das Becken so lang und so flach wie möglich zu konstruieren, allerdings nicht flacher als die Höhe des Zulaufkanals und mit einem angemessenen Abstand der Beckensohle zur Sohle des Zulaufkanals. Kann Symmetrie und Gleichmäßigkeit der Anströmung nicht gewährleistet werden, sollte Abhilfe geschaffen werden, am Besten mit einem Gleichrichter, weil dieser sogar ein Ergebnis erreichen kann, das im Wirkungsgrad um einige Prozente besser ist, als bei einem Becken mit symmetrischer, nicht gleichmäßig verteilter Anströmung. Wird dies unterlassen, droht bei $q_A = 10$ m/h im Extremfall ein bis zu 28 % schlechterer Wirkungsgrad. Noch besser wäre es dagegen, die Grundstücksoptionen noch einmal zu überprüfen, denn mit einem Rundbecken könnte der Wirkungsgrad bei $q_A = 10$ m/h sogar gegenüber einem gut funktionierenden

Rechteckbecken um 14 % verbessert werden. Diese Wirkungsgrade sind alle massegewichtet mit einer synthetischen Sieblinie mit mineralischen und organischen Anteilen berechnet.

Durch den Einsatz eines optimierten Regenklärbeckens kann also der stoffliche Eintrag in die Gewässer erheblich reduziert werden. Allerdings haben diese Becken einen entsprechenden Platzbedarf, der vor allem in urbanen Gebieten nicht immer vorhanden ist. Deshalb wurden in einem weiteren Schritt Bemessungsdiagramme entworfen, mit denen ein Sedimentationsbecken entworfen werden kann, welches einer Filtration vorgeschaltet ist, um diese vor einer frühzeitigen Kolmation zu schützen. Hierzu wurde ein kompaktes Sedimentationsbecken mit vergleichsweise einfacher Einlaufgestaltung (Lamellenwand – basierend auf Phase 1 MERE-BEN) entworfen. Die Abmessungsverhältnisse dieses Beckens weichen deutlich von den im Arbeitsblatt DWA-A166 definierten ab. In drei Stufen wurden der Einfluss des Längen-/Breitenverhältnisses L/B, der Einfluss der Beckentiefe H sowie der Einfluss des Beckenvolumens auf den Rückhalt spezifischer Feststoffe untersucht. Aus den hieraus resultierenden Bemessungsdiagrammen ist ablesbar, welches Beckenvolumen in einer der Filtration vorgeschalteten Sedimentationsstufe vorzusehen ist, um einen bestimmte Partikelfraktionen im Becken zurückzuhalten.

Zusammenfassende Schlussfolgerungen und Empfehlungen aus der Phase 2 in Stichworten:

Allgemeingültig:

- Es konnte bestätigt werden, dass die Oberflächenbeschickung ein sinnvoll gewählter, unabhängiger Parameter der Funktionsbeschreibung von Regenbecken ist
- Eine Reduzierung der Oberflächenbeschickung von 10 m/h auf 4 m/h ist für alle Stoffdichten und Partikel-Korngrößenfraktionen sehr sinnvoll. Bei den hier untersuchten Becken konnte durch eine Reduktion von 10 m/h auf 4 m/h eine Steigerung des Wirkungsgrades um ca. 13 %-Punkte erreicht werden.
- Vor allem feine mineralische Fraktionen ($< 44 \mu\text{m}$) sind wichtig, da diese einen Großteil der Schadstoffe binden.
- Eine von Kurzschlussströmungen freie Pfropfenströmung bietet für gröbere Partikel optimale Absetzbedingungen, nicht jedoch für die feineren Fraktionen (i.a. $< 44 \mu\text{m}$), für diese wirken sich vermutlich kontrollierte Rezirkulationen mit horizontaler Achse positiv auf den Absetzwirkungsgrad aus.
- Aufgrund dieser Charakteristik sollte erwogen werden, die Zielfraktion der weitergehenden Abscheidung für mineralische Partikel auf einen Grenz-Durchmesser von $d = 44 \mu\text{m}$ festzulegen.

- Für kleine Oberflächenbeschickungen reagieren die Wirkungsgrade nur mäßig stark auf Änderungen der hydraulischen Belastung. Die Sensitivität wird stärker mit Zunahme der hydraulischen Belastung.

Rechteckbecken:

- Wenn ein symmetrisch angeordneter Zulauf mit gleichmäßiger, blockförmiger Geschwindigkeitsverteilung vorhanden ist, dann kann eine Optimierung durch weitere Einbauten keine wesentliche Verbesserung bewirken. In diesem Falle ist jedoch darauf zu achten, dass eine Fließgeschwindigkeit von $v_{\text{Ein}} = 0,2 \text{ m/s}$ im Zulauf nicht überschritten wird.
- Wenn absehbar ist, dass Unregelmäßigkeiten im Zulauf eine symmetrische Anströmung des Beckens verhindern werden, dann ist ein zusätzlicher Einbau, z.B. ein Gleichrichter, sinnvoll.
- Wenn der Gewässerschutz nahelegt, dass die Zielgröße der Abscheidung die feineren, mineralischen Partikel $< 45 \mu\text{m}$ sein sollen, dann ist ein Rechteckbecken mit einer kontrollierten Grundwalze auszustatten, wie sie der modifizierte Gleichrichter bietet.

Rundbecken:

- Ein zentraler Klärüberlauf (mit tangentialer Anströmung) ist grundsätzlich zu vermeiden.
- Ein zentraler Einlauf mit gleichmäßiger, punktsymmetrischer Anströmung und radialer Durchströmung von innen nach außen ist gegenüber einer klassischen, tangentialen Anströmung mit Rotationsströmung zu bevorzugen.
- Wenn der Gewässerschutz nahelegt, dass die Zielgröße der Abscheidung die feineren, mineralischen Partikel $< 45 \mu\text{m}$ sein sollen, dann ist ein Rundbecken mit zentraler Anströmung allen anderen Konfigurationen, auch Rechteckbecken mit kontrollierter Grundwalze, überlegen.
- Bei einem Neubau von Regenklärbecken liefern optimierte Rundbecken um rund 10 %-Punkte bessere Absetzwirkungsgrade als Rechteckbecken.

10 Weiterer Forschungsbedarf

Der hier formulierte, zukünftige Forschungsbedarf bezieht sich einerseits auf die hier verwendeten Randbedingungen und Zielgrößen und andererseits auf die Absicherung und Vertiefung der hier gewonnenen Erkenntnisse.

Zunächst fällt hier auf, dass weder für uns, noch für einen Beckenbetreiber, klar ist, auf welche Partikel-Korngrößenfraktionen die Absetzwirkung ausgerichtet werden soll. Die Bindungsfähigkeit für Schwermetalle ist möglicherweise nicht die einzige Eigenschaft, welche die Gewässerökologie beeinträchtigt. Außerdem ist sie auch nicht auf die feineren Fraktionen beschränkt. Es gibt durchaus Autoren, die, wie oben zitiert, gröbere Kornfraktionen, auch größer als die aktuelle Grenz-Fraktion $63\ \mu\text{m}$, als Träger von Schwermetallen identifiziert haben. Weiterhin ist nicht klar, wie die organischen Bestandteile auf die ökologische Gewässergüte wirken. Möglicherweise sind organische Partikel als solche weitgehend unproblematisch, da sie im Prinzip zu den natürlichen Bestandteilen der Nahrung der Saprobien gehören. Eine eventuelle Befrachtung dieser Partikel mit anthropogen in den Stoffkreislauf eingebrachten.

Investitionen in Becken-Technologien wären effizienter steuerbar, wenn die Schädlichkeit der einzelnen Bestandteile der AFS besser bekannt wäre. Zusätzlich sollten vor dem Entwurf einer Reinigungslösung grundsätzlich Messungen der stofflichen Belastungen in aussagekräftiger Differenzierung von Messparametern verpflichtend werden. Nach bisherigem Kenntnisstand ist die in-situ eingesetzte Messtechnik noch nicht so ausgereift, die notwendigen Aussagen zu produzieren, es sei denn, mit einem enormen finanziellen Aufwand. Auch hier ist eine Weiterentwicklung anzustreben.

Auf der anderen Seite erfordern die hier gefundenen Ansätze eine weitere experimentelle Bestätigung. Dies kann im Labor oder in-situ erfolgen, letzteres allerdings nur, wenn die eingesetzte Messtechnik den Aufgaben angemessen ist, das heißt, für diesen Zweck weiterentwickelt werden kann. Es fehlt zunächst die (qualitative) Visualisierungstechnik und die (quantitative) Messtechnik zur Bewertung der Durchströmung eines in-situ-Beckens. Darüber hinaus muss eine ereignisspezifische Messung der Wirkungsgrade möglich gemacht werden. Die Messung an der Originalbefrachtung bringt das Problem mit sich, dass in den Messergebnissen nicht differenziert werden kann, welche Durchmesser mit welchen Dichte verknüpft sind und wo die Partikelfraktionen im Einzelnen verblieben sind. Diesem Umstand kann nur mit dem Einsatz von Tracern mit definierten, bekannten Eigenschaften und mit ausreichender Chance auf Wiederfindung abgeholfen werden. Zu den ersten Untersuchungsgegenständen sollte gehören, welche grundlegenden Phasen und Prozesse die Absetzwirkung ausmachen.

Beispielsweise sei hier die ereignisspezifische Trennung von Absetz- und Speicherwirkungsgrad genannt. Weiterhin muss die Wirkung der Remobilisierung quantifiziert werden können, und zwar nicht nur über mehrere Ereignisse, sondern, da RKB zukünftig nicht mehr im Dauerstau betrieben werden, auch Remobilisierungsprozesse durch Turbulenzen und Abflussspitzen während eines Ereignisses.

Die Untersuchungen im Labor sind notwendig zur Validierung der numerischen Simulationen. Sie sind allerdings aus physikalischen Gründen nur eingeschränkt in der Lage, die tatsächlich in-situ ablaufenden Prozesse abzubilden, da eine Skalierung der abzuscheidenden Partikel nicht möglich. Dennoch können in grundlegenden Untersuchungen die Detailprozesse der Abtrennung, Ablagerung und ggf. Remobilisierung von Partikeln im Labor untersucht werden. Hierfür ist jedoch der Einsatz ausgefeilter Messtechnik erforderlich, was in diesem Vorhaben aus Kostengründen nicht realisiert werden konnte.

Schließlich ist die numerische Simulation der Vorgänge immer noch die flexibelste Möglichkeit zur Untersuchung von verschiedenen Parametern und verschiedenen Strömungskonfigurationen. Allerdings sind die Rechnerkapazitäten, trotz enormer Expansion in den letzten Jahren, nicht ausreichend, um die instationären Vorgänge beim Füllen und beim Betrieb der Becken vollständig und mit ausreichender Genauigkeit zu untersuchen. Auf der Basis der hier gewonnenen Erkenntnisse müssten mit höchster Priorität die Rundbecken mit zentraler Einströmung und umlaufendem Klärüberlauf näher untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- Adachi, K. und Tainosho, Y. (2005): *Single particle characterization of size-fractionated road sediments*. In: *Applied Geochemistry*, 20(5), S. 849–859.
- ATV-A 128 (1992): *Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hrsg. | Hennef.
- ATV-DVWK-A 157 (2000): *Bauwerke der Kanalisation*. In: *ATV-DVWK-Arbeitsblatt 157*, , S. 31.
- Bajcar, T., Gosar, L., Steinman, F., und Sirok, B. (2009): *Phenomenological Sedimentation Model for an Industrial Circular Settling Tank*. In: *Journal of Mechanical Engineering*, 55(5), S. 1–8.
- Boller, M. (2005): *Vortrag vom 01. Nov. 05 zur Straßenabwasserbehandlung und Bankettbelastung im Bereich von Kantons- und Nationalstrassen*. : EAWAG.
- Brombach, H. (2007): *Technische Filterung von Oberflächenabflüssen aus Siedlungsgebieten*. Forschungsbericht. , S. 68,.
- Carlston, J. S. (2015): *Impact of geometric design of hydraulic contact tanks on residence time distributions*. Colorado State University, Colorado.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Hrsg.) (2009): *Grundsätze für die Abwasserbehandlung in Belebungsanlagen mit gemeinsamer aerober Schlammstabilisierung ab 1.000 Einwohnerwerte*. Stand: August 2009, Hennef: DWA.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Hrsg.) (2013): *Besondere Entwässerungsverfahren. Teil 3: Druckluftgespülte Abwassertransportleitungen*. Mai 2013, Hennef: DWA.
- Dierschke, M. (2014): *Methodischer Ansatz zur Quantifizierung von Feinpartikeln (PM63) in Niederschlagsabflüssen in Abhängigkeit von der Herkunftsfläche*.
- Dierschke, M. und Welker, A. (2015): *Bestimmung von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen*. In: *gwf - Wasser|Abwasser*, 156(04), S. 440–446.
- DIN EN 872 *Wasserbeschaffenheit – Bestimmung suspendierter Stoffe – Verfahren durch Abtrennung mittels Glasfaserfilter*. (2005).
- Dufresne, M., Vazquez, J., Terfous, A., Ghenaim, A., und Poulet, J. B. (2009): *CFD Modeling of Solid Separation in Three Combined Sewer Overflow Chamber*. In: *Journal of Environmental Engineering*, 2009(Vol. 135, Nr. 9), S. 776–787.
- DWA (Hrsg.) (2013): *Arbeitsblatt DWA-A 166 Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung – Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung*. : Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- DWA-A 102 (2016): *Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer (Entwurf, Stand Oktober 2016)*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hrsg. | Hennef.
- DWA-A 166 (2013): *Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung - Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung*. In: *Arbeitsblatt*, , S. 78.
- DWA-A 201 (2005): *Arbeitsblatt DWA-A 201 Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Abwasserteichanlagen*.

- DWA-Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft *Arbeitsblatt DWA-A 102/BWK-A 3 DWA-Regelwerk Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer.* (2016).
- DWA-M 176 (2013): *Hinweise zur konstruktiven Gestaltung und Ausrüstung von Bauwerken der zentralen Regenwasserbehandlung.* In: *Merkblatt*, , S. 105.
- DWA-T3/2013 (2013): *Beispiele zur Gestaltung von Regenbecken.* In: *Themenblatt*, , S. 78.
- Eyckmanns-Wolters, R., Fuchs, S., Maus, C., Sommer, M., Voßwinkel, N., Mohn, R., und Uhl, M. (2013): *REFENI - Reduktion des Feststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen Phase 1.* : unveröffentlicht.
- Feldhaus, R. (1993): *Zur hydrodynamisch-numerischen Simulation von Mischwasserspeichern.* Sankt Augustin.
- Furumai, H., Balmer, H., und Boller, M. (2002): *Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff.* In: *Water Science and Technology*, 46(11–12), S. 413–418.
- Gasperi, J., Gromaire, M.-C., Kafi, M., Moilleron, R., und Chebbo, G. (2010): *Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems.* In: *Water research*, 44, S. 5875–86.
- Geiger, W. F., Hübner, M., und v. d. Woldenberg, L. (1998a): *Vergleichende Modelluntersuchungen zur Wirkungsweise von Regenentlastungsanlagen.* Forschungsbericht. Ge 459/12-1 , S. 13, Essen: Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft der Universität-GH Essen.
- Geiger, W. F., Hübner, M., und v. d. Woldenberg, L. (1998b): *Vergleichende Modelluntersuchungen zur Wirkungsweise von Regenentlastungsanlagen.* Forschungsbericht. Ge 459/12-1 , S. 13, Essen: Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft der Universität-GH Essen.
- Grüning, H., Schmidt, C., und Schmitz, T. (2015): *Chemisch-physikalisch wirksame Regenwasserfiltration.* In: *Tagungsunterlagen.* Hamburg: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- Gujer, W. (2007): *Siedlungswasserwirtschaft.* Berlin, Heidelberg.
- Gunawardana, C., Egodawatta, P., und Goonetilleke, A. (2014): *Role of particle size and composition in metal adsorption by solids deposited on urban road surfaces.* In: *Environmental Pollution*, 184(Supplement C), S. 44–53.
- Hazen, A. (1904): *On Sedimentation.* In: *ASCE Transaction*, 53(980), S. 45–71.
- He, C. (2008): *Advanced Hydraulic Studies on Enhancing Particle Removal.* Denmark, Europe.
- Herwig, H. (2006): *Strömungsmechanik: Eine Einführung in die Physik und die mathematische Modellierung von Strömungen.* 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Huang, J. A. und Jin, Y. C. (2011): *Numerical Modeling of Type I Circular Sedimentation Tank.* In: *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 137(3), S. 196–204.
- Jörissen, D. (2009): *Untersuchung des Strömungs- und Stofftransportes in Regenbecken mit Hilfe von numerischen Simulationsstudien.* Diplomarbeit (unveröffentlicht). Fachhochschule Münster, Münster.
- Karlsson, K., Viklander, M., Scholes, L., und Revitt, M. (2010): *Heavy metal concentrations and toxicity in water and sediment from stormwater ponds and sedimentation tanks.* In: *Journal of Hazardous Materials*, 178(1), S. 612–618.
- Kattinig, J. J. (2014): *Use of innovative techniques to optimize the residence time distribution of drinking water contact tanks.* Masterthesis. Colorado State University, Colorado.

- Kemper, M., Fuchs, S., Ebbert, S., Uhl, M., Nichler, T., und Gillar, M. (2015): *Analyse der Leistungsfähigkeit von Regenüberlaufbecken und Überwachung durch Online Messtechnik*. In: *Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben im Auftrag des Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen*.
- Kim, J.-Y. und Sansalone, J. J. (2008): *Event-based size distributions of particulate matter transported during urban rainfall-runoff events*. In: *Water Research*, 42(10), S. 2756–2768.
- Kutzner, R. (Hrsg.) (2005): *Prozessorientierte Beschreibung von Niederschlagswasserbehandlungsanlagen - Möglichkeiten und Grenzen*. Essen: Universität Gesamthochschule Essen.
- (LfU), L. für U. B.-W. (2005): *- Regenrückhaltung -*. Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser. , S. 19, Baden-Württemberg: Landesanstalt für Umweltschutz.
- Liu, X., ASCE, A. M., Garcia, M. H., und ASCE, M. (2011): *Computational Fluid Dynamics Modeling for the Design of Large Primary Settling Tanks*. In: *Journal of Hydraulic Engineering*, 137, S. 343–355.
- Mohn, R. (2017): *NRW MEREBEN - Maßnahmen zur Ertüchtigung von Regenklärbecken und Hinweise zu deren Neubau (Phase 1: Ertüchtigung des Bestandes)*. : IWARU.
- Mohn, R., Uhl, M., Maus, C., Schnieders, A., Sommer, M., Voßwinkel, N., Ebbert, S., und Tenbeitel, J.-G. (2013): *WEREBE - Weitergehende Regenwasserbehandlung im Trennsystem*. : unveröffentlicht.
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Rothmayer, A. P., und Huebsch, W. W. (2014): *Fundamentals of fluid mechanics*. : John Wiley & Sons.
- Patziger, M. (2016): *Computational fluid dynamics investigation of shallow circular secondary settling tanks: Inlet geometry and performance indicators*. In: *Chemical Engineering Research and Design*, 112, S. 122–131.
- Pecher, K. (2016): *DEZENTRALE REGENWASSERBEHANDLUNG MIT DEM SYSTEM FIL-TAPEX®*. Abgerufen 15. Juni 2018, von http://www.pecher-technik.com/images/downloads/EB_160210_KHP_Systembeschreibung_standard.pdf.
- Pyliouras, S. (2011): *Auswirkungen der Magerverbrennung auf die Turbinenaerodynamik*. Darmstadt.
- Roger, S., Montrejaud-Vignoles, M., Andral, M. C., Herremans, L., und Fortune, J. P. (1998): *Mineral, physical and chemical analysis of the solid matter carried by motorway runoff water*. In: *Water Research*, 32(4), S. 1119–1125.
- Sandfänge – Anforderungen, Systeme und Bemessung*. (2008): , (5).
- Schröder, P.-M. (1997): *Zur numerischen Simulation turbulenter Freispiegelströmungen mit ausgeprägt dreidimensionaler Charakteristik*. Dissertation. Rheinisch -Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- Shields, A. (1936): *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung*. Dissertation. TU Berlin, Berlin.
- Statistisches Bundesamt (2015): *Anzahl der Regenentlastungsanlagen in Deutschland nach Anlagenart im Jahr 2013*.
- Strobl, T. und Zunic, F. (2006): *Wasserbau*. 1., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Uhl, M., Mohn, R., Fuchs, S., und Schmitt, T. G. (2012): *Reduktion des Feststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen - NRW RKB*.

-
- van Rijn, L. C. (1984): *Sediment Transport, Part 1: Bed Load Transport*. In: *Journal of hydraulic engineering/ American Societs of Civil Engineers, Hydraulics Division*. Bd. Vol. 110 (1984), 10, , S. 1431–1456, Reston, Va.: American Society of Civil Engineers.
- van Rijn, L. C. (2007): *Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves 2, Suspended Transport*. In: *Journal of hydraulic engineering/ American Societs of Civil Engineers, Hydraulics Division*. Bd. 133, 6, , S. 668–689, Reston, Va.: American Society of Civil Engineers.
- van Rijn, L. C. (2016a): *Initiation of motion and suspension of mud-sand mixtures*.
- van Rijn, L. C. (2016b): *Initiation of motion and suspension of mud-sand mixtures*.
- Wang, X. L., Li, T., Lang, J., Zhou, S. S., Zhang, L. L., und Chen, M. X. (2010): *Numerical Analysis of Solid-Liquid Two-Phase Flow on Sandstone Wastewater of Hydropower Stations in a Rectangular Sedimentation Tank*. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(22), S. 11714–11723.
- WBH Hagen (2015): *Entwicklung eines Filterklärbeckens (FKB) zur zentralen Behandlung von belastetem Niederschlagswasser*. Forschungsbericht. .
- Yan, H. (2013): *Experiments and 3D modelling of hydrodynamics, sediment transport, settling and resuspension under unsteady conditions in an urban stormwater detention basin*. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon.
- Zhao, H., Li, X., Wang, X., und Tian, D. (2010): *Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China*. In: *Journal of Hazardous Materials*, 183(1), S. 203–210.
- Zhou, T., Li, M., Li, Q., Lei, B., Chenn, Q., und Zhou, J. (2014): *Numerical simulation of flow regions in red mud separation thickener's feedwell by analysis of residence-time distribution*. In: *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24, S. 1117–1124.

Anhangsverzeichnis

Anhang 1	Zusammenstellung aller Partikel	206
Anhang 2	Sieblinien für Millisil und SiLibeads	208
Anhang 3	Technisches Datenblatt Filterbeutel.....	212
Anhang 4	Weitere physikalische Modellergebnisse.....	213

Anhang 1 Zusammenstellung aller Partikel

Partikeldurchmesser	d_p	m	0.000001	0.000005	0.000010	0.000015	0.000020	0.000030	0.000040	0.000050	0.000063
		mm	0.001	0.005	0.010	0.015	0.020	0.030	0.040	0.050	0.063
Partikeldichte	ρ_p	μm^3	1	5	10	15	20	30	40	50	63
Sinkgeschwindigkeit	v_s	kg/m^3	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650
Fluidichte (Wasser 20°)	ρ_w	m/h	0.00	0.06	0.25	0.56	0.99	2.23	3.97	6.20	9.84
dynamische Viskosität (Wasser 20°)	ν_w	kg/m^3	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70
Erdbeschleunigung	g	$\text{kg}/(\text{s}^*\text{m})$	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03
granulometrische Korn-Reynolds-Zahl	Re_s	m/s^2	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
sedimentologischer Korndurchmesser	D_m^*	-	0.003	0.034	0.097	0.179	0.275	0.506	0.779	1.089	1.540
Dimensionless Bed Shear Stress	τ_{dim}	-	0.021	0.106	0.212	0.317	0.423	0.635	0.847	1.058	1.333
Bed Shear Stress	τ	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.294	0.271	0.248	0.228	0.211	0.184	0.163	0.147	0.130
Abminderung auf 15%	$\tau_{0,15}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.005	0.022	0.040	0.055	0.068	0.089	0.106	0.119	0.133
Abminderung auf 50%	$\tau_{0,5}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.001	0.003	0.006	0.008	0.010	0.013	0.016	0.018	0.020
Abminderung auf 70%	$\tau_{0,7}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.002	0.011	0.020	0.028	0.034	0.045	0.053	0.059	0.066
sedimentologische Korn-Reynolds-Zahl	Re_*	-	0.003	0.0154	0.0281	0.0388	0.0479	0.0626	0.0741	0.0832	0.0928
			0.002	0.018	0.048	0.085	0.127	0.217	0.315	0.417	0.555

Partikeldurchmesser	d_p	m	0.000080	0.000100	0.000200	0.000300	0.000400	0.000500	0.000800	0.001000	0.002000
		mm	0.080	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.800	1.000	2.000
Partikeldichte	ρ_p	μm^3	80	100	200	300	400	500	800	1000	2000
Sinkgeschwindigkeit	v_s	kg/m^3	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650
Fluidichte (Wasser 20°)	ρ_w	m/h	15.86	24.78	99.14	223.06	396.56	619.62	1586.23	2478.48	9913.93
dynamische Viskosität (Wasser 20°)	ν_w	kg/m^3	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70
Erdbeschleunigung	g	$\text{kg}/(\text{s}^*\text{m})$	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03
granulometrische Korn-Reynolds-Zahl	Re_s	m/s^2	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
sedimentologischer Korndurchmesser	D_m^*	-	2.203	3.079	8.710	16.001	24.636	34.429	69.680	97.381	275.435
Dimensionless Bed Shear Stress	τ_{dim}	-	1.693	2.117	4.233	6.350	8.467	10.583	16.933	21.167	42.333
Bed Shear Stress	τ	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.113	0.099	0.062	0.047	0.040	0.036	0.033	0.033	0.038
Abminderung auf 15%	$\tau_{0,15}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.147	0.160	0.200	0.230	0.261	0.295	0.421	0.526	1.241
Abminderung auf 50%	$\tau_{0,5}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.022	0.024	0.030	0.035	0.039	0.044	0.063	0.079	0.186
Abminderung auf 70%	$\tau_{0,7}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.073	0.080	0.100	0.115	0.130	0.147	0.211	0.263	0.621
sedimentologische Korn-Reynolds-Zahl	Re_*	-	0.1026	0.1117	0.1400	0.1611	0.1825	0.2062	0.2949	0.3685	0.8689
			0.741	0.967	2.165	3.483	4.943	6.568	12.567	17.560	53.930

Partikeldurchmesser		m	0.000001	0.000005	0.000010	0.000015	0.000020	0.000030	0.000040	0.000050	0.000063
	d_p	mm	0.001	0.005	0.010	0.015	0.020	0.030	0.040	0.050	0.063
Partikeldichte		μm	1	5	10	15	20	30	40	50	63
Sinkgeschwindigkeit		kg/m^3	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020
Fluidichte (Wasser 20°)	v_s	m/h	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.05	0.08	0.12
dynamische Viskosität (Wasser 20°)	ρ_w	kg/m^3	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70
Erbeschleunigung	v_w	$\text{kg}/(\text{s}^*\text{m})$	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03
granulometrische Korn-Reynolds-Zahl	g	m/s^2	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
sedimentologischer Korndurchmesser	Re_s	-	0.000	0.004	0.011	0.020	0.031	0.056	0.086	0.121	0.171
Dimensionless Bed Shear Stress	D_m^*	-	0.005	0.024	0.049	0.073	0.098	0.147	0.195	0.244	0.308
Bed Shear Stress	τ_{dim}	-	0.299	0.293	0.286	0.280	0.273	0.262	0.251	0.241	0.230
Abminderung auf 15%	τ	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.00006	0.00029	0.00057	0.00084	0.00109	0.00156	0.00200	0.00240	0.00288
Abminderung auf 50%	$\tau_{0,15}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.00001	0.00004	0.00009	0.00013	0.00016	0.00023	0.00030	0.00036	0.00043
Abminderung auf 70%	$\tau_{0,5}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.00003	0.00015	0.00028	0.00042	0.00054	0.00078	0.00100	0.00120	0.00144
sedimentologische Korn-Reynolds-Zahl	$\tau_{0,7}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.00004	0.00020	0.00040	0.00058	0.00076	0.00109	0.00140	0.00168	0.00202
	Re_*	-	0.00019	0.00207	0.00578	0.01049	0.01597	0.02872	0.04330	0.05932	0.08186

Partikeldurchmesser		m	0.000080	0.000100	0.000200	0.000300	0.000400	0.000500	0.000800	0.001000	0.002000
	d_p	mm	0.080	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.800	1.000	2.000
Partikeldichte		μm	80	100	200	300	400	500	800	1000	2000
Sinkgeschwindigkeit		kg/m^3	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020
Fluidichte (Wasser 20°)	v_s	m/h	0.20	0.30	1.22	2.74	4.88	7.62	19.51	30.49	121.95
dynamische Viskosität (Wasser 20°)	ρ_w	kg/m^3	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70	999.70
Erbeschleunigung	v_w	$\text{kg}/(\text{s}^*\text{m})$	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03	1.306E-03
granulometrische Korn-Reynolds-Zahl	g	m/s^2	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
sedimentologischer Korndurchmesser	Re_s	-	0.244	0.342	0.966	1.775	2.732	3.819	7.728	10.800	30.548
Dimensionless Bed Shear Stress	D_m^*	-	0.391	0.489	0.977	1.466	1.954	2.443	3.909	4.886	9.772
Bed Shear Stress	τ_{dim}	-	0.216	0.202	0.153	0.123	0.104	0.090	0.065	0.056	0.038
Abminderung auf 15%	τ	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.00344	0.00402	0.00609	0.00736	0.00826	0.00894	0.01040	0.01117	0.01498
Abminderung auf 50%	$\tau_{0,15}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.00052	0.00060	0.00091	0.00110	0.00124	0.00134	0.00156	0.00168	0.00225
Abminderung auf 70%	$\tau_{0,5}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.00172	0.00201	0.00304	0.00368	0.00413	0.00447	0.00520	0.00558	0.00749
sedimentologische Korn-Reynolds-Zahl	$\tau_{0,7}$	$\text{kg}/\text{m}^*\text{s}^2$	0.00241	0.00282	0.00426	0.00515	0.00578	0.00626	0.00728	0.00782	0.01049
	Re_*	-	0.11361	0.15353	0.37761	0.62305	0.87967	1.14400	1.97409	2.55786	5.92460

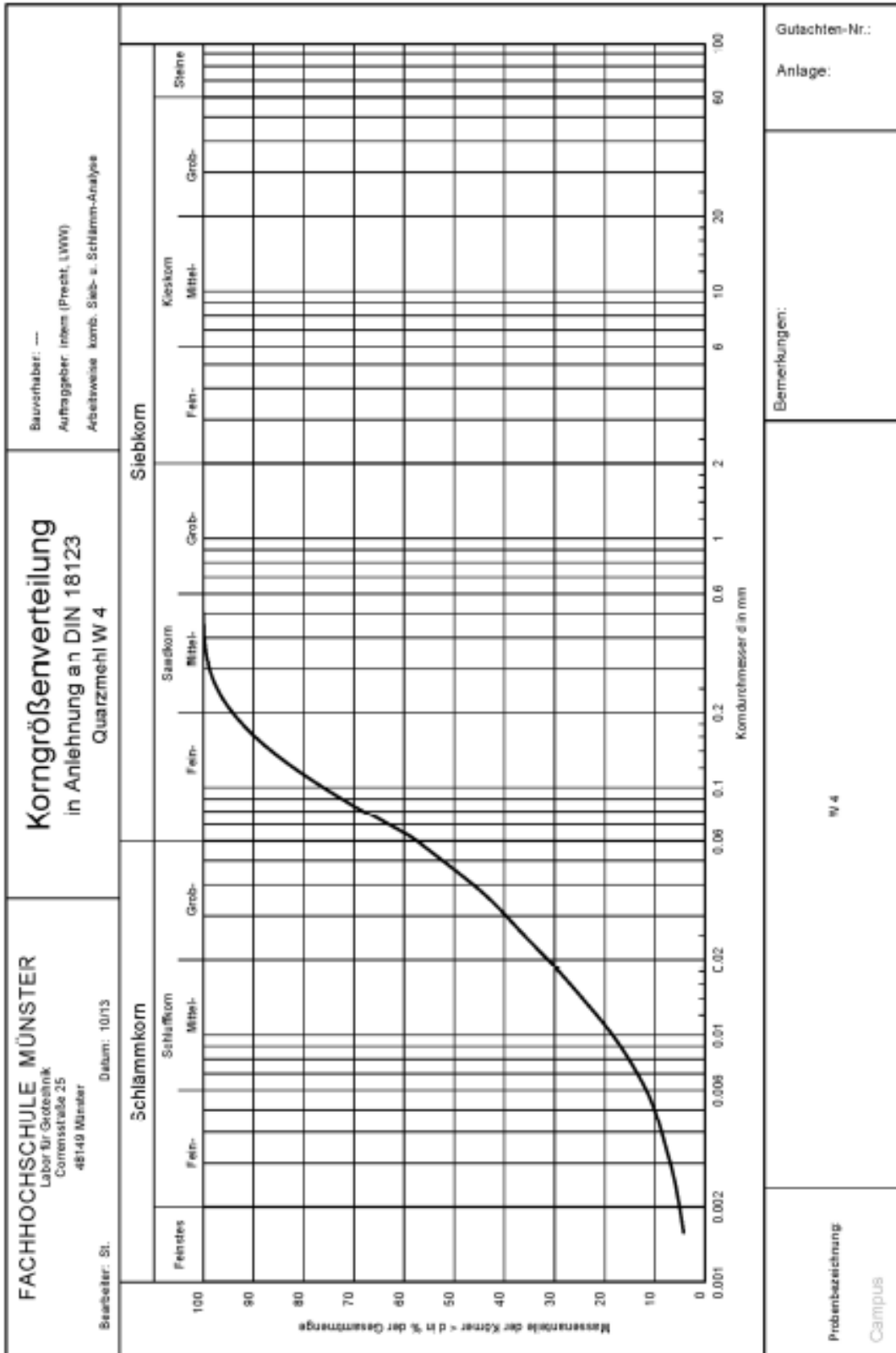
Anhang 2 Sieblinien für Millisil und SiLibeads

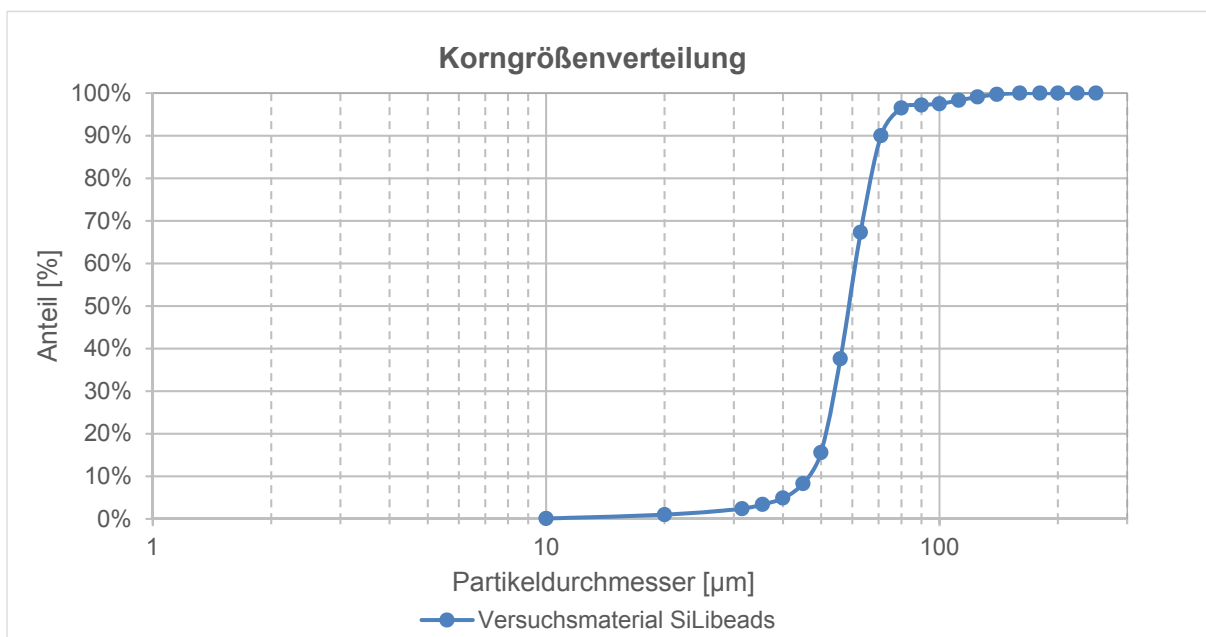
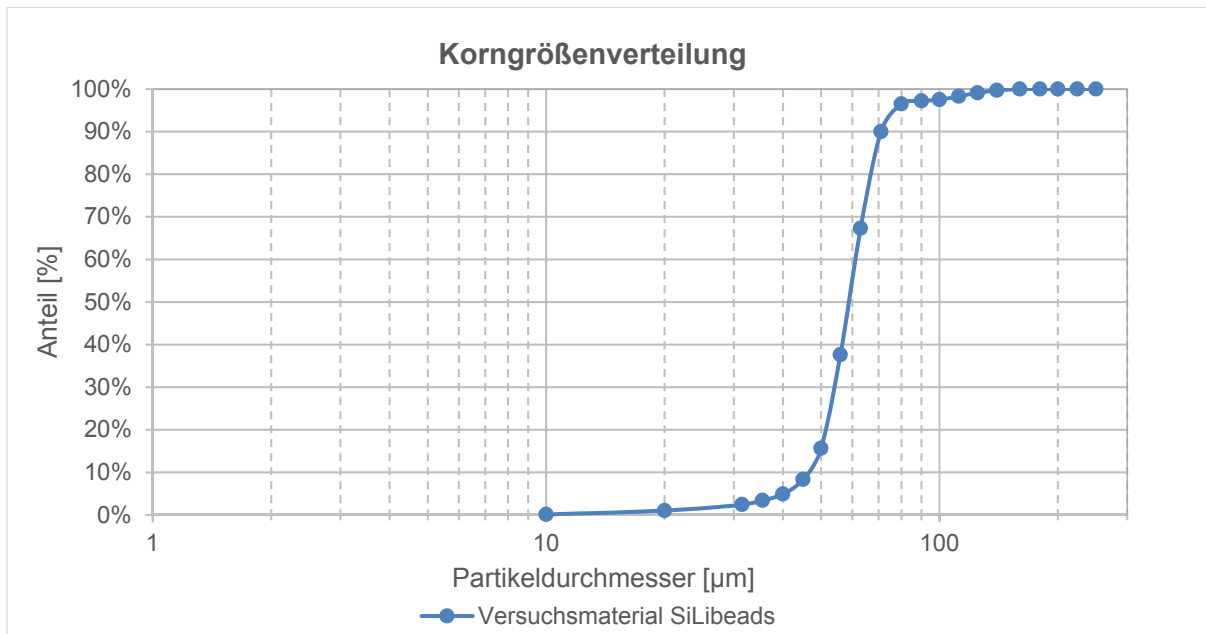
Millisil

Typische Korngrößenverteilung und Körnungswerte | *Typical grain size and grain characteristics*

			MILLISIL® Haltern <i>MILLISIL® Haltern</i>				
			W 3	W 4	W 6	W 8	W 11
Obere Korngröße	<i>Upper grain size</i>	$d_{95\%}$ in μm	220	190	120	90	55
Mittlere Korngröße	<i>Average grain size</i>	$d_{50\%}$ in μm	90	65	40	30	22
Lichte Maschenweite Alpine Luftstrahlsieb	<i>Mesh size</i> <i>Alpine air jet sieve</i>	in μm	Rückstand in Gew.-% <i>Residue in weight-%</i>				
	400		0,1	0,1			
	315		0,3	0,2	0,1		
	200		7	4	0,5	0,1	
	160		18	10	1	0,5	
	125		32	22	4	1	0,1
	100		42	30	7	3	0,5
	63		62	51	28	15	3
	40		75	66	49	34	18
Korndurchmesser Cilas Granulometer	<i>Grain diameter</i> <i>Cilas Granulometer</i>	in μm	Rückstand in Vol.-% <i>Residue in Vol.-%</i>				
	32		71	70	52	48	33
	16		82	80	71	68	62
	8		90	88	81	80	76
	6		92	91	85	83	80
	4		94	93	88	87	85
	2		97	96	94	93	91

CampusLizenz zur nicht kommerziellen Nutzung für Forschung und Lehre



SiLibeads

Korndurchmesser [μm]	Rückstand in Vol-%
250	0,1
224	1,0
200	2,4
180	3,4
160	4,9
140	8,3
125	15,6
112	37,6
100	67,3
90	90,0
80	96,5
71	97,2
63	97,5
56	98,3
50	99,1
45	99,7
40	100,0
35,5	100,0
31,5	100,0
20	100,0
10	100,0

Anhang 3 Technisches Datenblatt Filterbeutel

WFB-2IP Filterbeutel, gefaltet

- Anwendung**
- Vorfilter für Trinkwasser und Wasseraufbereitung
 - Klärifikation von Softdrinks, Fruchtsäften und Lebensmitteln
 - Kreislauffilter für Spül- und Waschwasser
 - Grobfilter für Rohstoffanlieferung
 - Schutzfilter für Düsen
 - Prozessfilter für Chemikalien, Farben und Lacke
 - Endfilter für Abfüllung in Gebinde

- Merkmale und Vorteile**
- Doppellagiges Filtermedium
 - Innen gefaltet
 - 0,5 m² bzw. 1.0 m² Filterfläche
 - Doppelte Filterfläche
 - Exklusiv in Größe 1 und Größe 2
 - Längere Filterstandzeit
 - Polypropylen-Vlies mit Polypropylen-Abdichtkragen
 - Polyester-Vlies mit Polyester-Abdichtkragen
 - Abdichtkragen und Boden ultraschallgeschweißt
 - Lebensmittel-Konformitätserklärung
 - ROHS-Konformitätserklärung
 - REACH-Konformitätserklärung

Technische Daten

Filterbeutel	Größe 1	Größe 2
Filtermedium	PO-Vlies: Polypropylen PE-Vlies: Polyester	PO-Vlies: Polypropylen PE-Vlies: Polyester
Abdichtkragen:	P: Polypropylen PE: Polyester L: Edelstahl AISI304	P: Polypropylen PE: Polyester L: Edelstahl AISI304
Inhalt:	8l	17l
Filterfeinheiten:	1 - 100 µm	1 - 100 µm
Filterfläche:	0,5 m ²	1.0 m ²
Temperatur:	PO: max. 75°C PE: max. 100°C	PO: max. 75°C PE: max. 100°C
Differenzdruck:	max. 3 bar bei 20°C Filterwechsel bei 1,5 bar empfohlen	max. 3 bar bei 20°C Filterwechsel bei 1,5 bar empfohlen
Abmessungen:	Ø180mm x 432mm	Ø180mm x 813mm
Durchsatzleistung:	max. 10m ³ /h bezogen auf Wasser	max. 20m ³ /h bezogen auf Wasser

Für die physikalischen Versuche wurde der Filter in **Größe 2** verwendet.

Anhang 4 Weitere physikalische Modellergebnisse

Neben den im Haupttext dargestellten physikalischen Ergebnissen sind weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Wassertiefen durchgeführt worden. Diese werden im Folgenden vorgestellt. Allerdings können aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen der Becken keine Vergleiche untereinander aufgestellt werden.

Zunächst werden die Randbedingungen und Ergebnisse gezeigt, welches eine geringe Wassertiefe aufweist. Die nachfolgende Tabelle führt die geometrischen und hydraulischen Randbedingungen dieser Variante auf.

	Parameter			Modellbecken (flach)
	Durchmesser/Tiefen-Verhältnis	D/T	-	7,50
	Durchmesser-Becken	$\varnothing_{\text{Becken}}$	(m)	1,50
	Tiefe-Becken	h_{Becken}	(m)	0,20
	Volumen	V	(m ³)	0,35
	Oberfläche	A _O	(m ²)	1,77
	Zulauf-Durchmesser	DN _{ZU}	(mm)	80
Hydraulische RB	Fließgeschwindigkeit Einlauf	v_{Ein}	(m/s)	0,37
	Spez. Energieeintrag	ρ_{spez}	(W/m ³)	0,35
	Durchfluss	Q	(l/s)	1,85
	Oberflächenbeschickung	q_A	(m/h)	3,44
	Überfallhöhe am Wehr	$h_{\text{KÜ}}$	(cm)	2,43

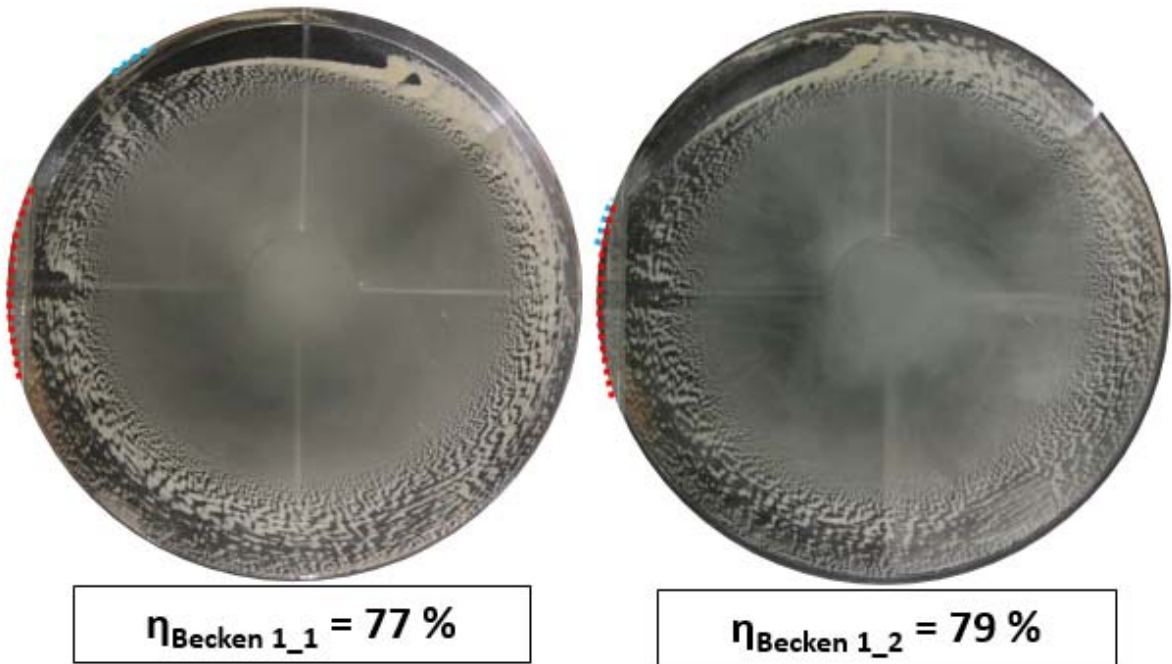
Die nachfolgende Tabelle beschreibt die ermittelten Absetzwirkungsgrade für das flache Modellbecken.

	Modellbecken (flach)	
	Zulauf 1 (Becken1_1) (%)	Zulauf 2 (Becken 1_2) (%)
Wirkungsgrad für Millisil η	76	79
Wirkungsgrad für SiLibeads η	83	82

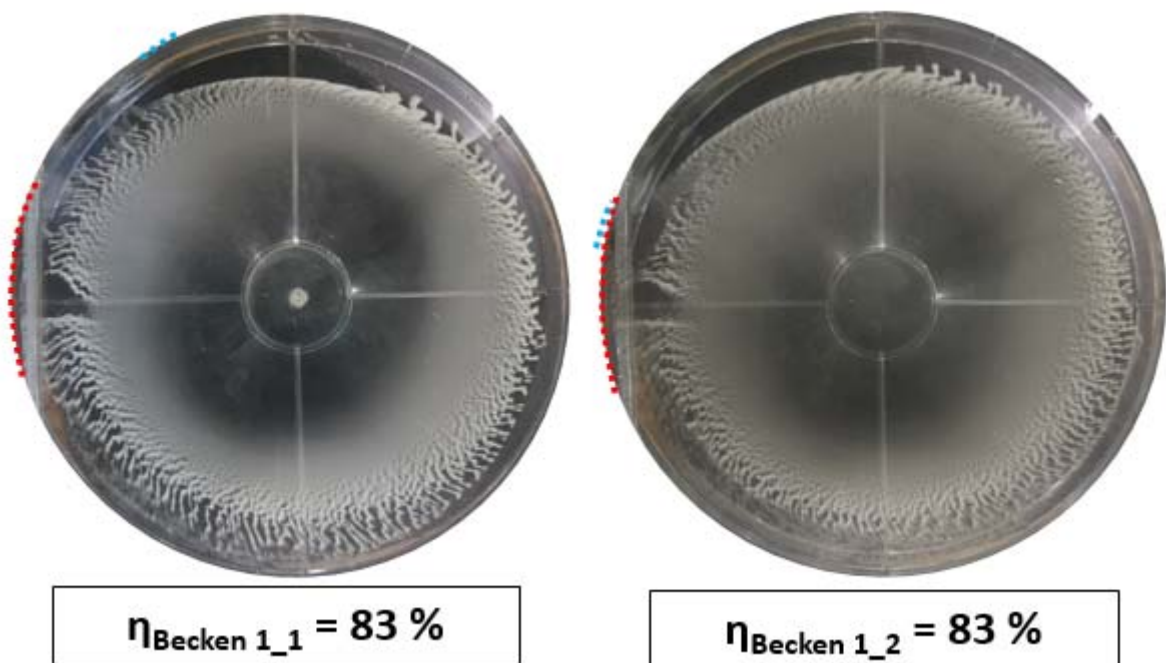
In der nachfolgenden Tabelle ist der Einfluss des Zulauf-Durchmessers auf den Absetzwirkungsgrad dargestellt. Ähnlich zu den im Haupttext dargestellten Ergebnissen, nimmt auch hier der Absetzwirkungsgrad mit steigendem Zulaufdurchmesser zu.

	Modellbecken (flach)		
	Zulauf-DN 80 (%)	Zulauf-DN 100 (%)	Zulauf-DN 110 (%)
Wirkungsgrad für Millisil η	79	87	92
Wirkungsgrad für SiLibeads η	82	86	90

Weiterhin sind in dem nachstehenden Bild das Absetzbild und der zugehörige Absetzwirkungsgrad für das Versuchsmaterial Millisil abgebildet.



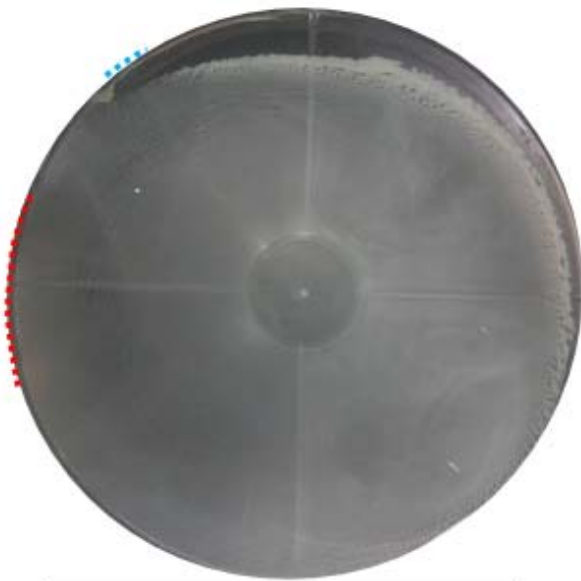
Außerdem sind in dem nachstehenden Bild das Absetzbild und der zugehörige Absetzwirkungsgrad für das Versuchsmaterial SiLibeads abgebildet.



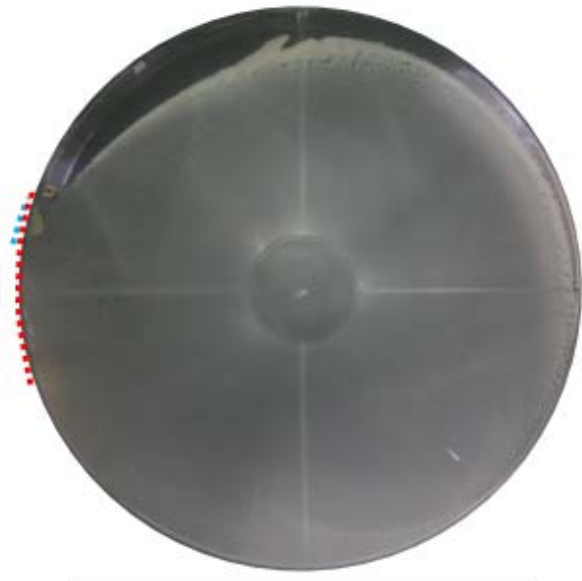
Neben der zuvor beschriebenen Modellvariante mit geringer Wassertiefe und der im Haupttext dargestellten Modellvariante mit mittlerer Wassertiefe, wurde eine Modellvariante mit großer Wassertiefe physikalisch untersucht. In der nachfolgenden Tabelle sind die geometrischen und hydraulischen Randbedingungen dieser Variante aufgeführt.

	Parameter			Modellbecken (tief)
	Durchmesser/Tiefen-Verhältnis	D/T	-	2,17
	Durchmesser-Becken	$\varnothing_{\text{Becken}}$	(m)	1,50
	Tiefe-Becken	h_{Becken}	(m)	0,69
	Volumen	V	(m ³)	1,22
	Oberfläche	A _o	(m ²)	1,77
	Zulauf-Durchmesser	DN _{ZU}	(mm)	110
Hydraulische RB	Fließgeschwindigkeit Einlauf	v _{Ein}	(m/s)	0,33
	Spez. Energieeintrag	ρ_{spez}	(W/m ³)	0,14
	Durchfluss	Q	(l/s)	3,10
	Oberflächenbeschickung	q _A	(m/h)	6,31
	Überfallhöhe am Wehr	h _{KÜ}	(cm)	2,71

Im unten stehenden Bild sind das Absetzbild und der Absetzwirkungsgrad für das Versuchsmaterial Millisil dargestellt. Links im Bild sind die Ergebnisse für den Zulauf 1 dargestellt, rechts im Bild für Zulauf 2.

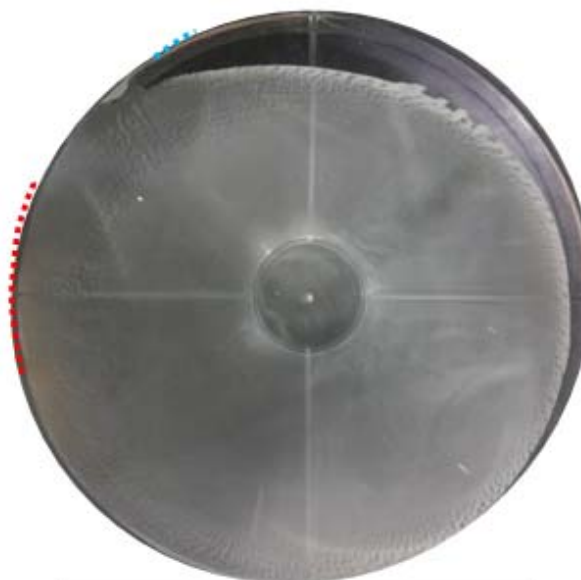


$$\eta_{\text{Becken 3}_1} = 79 \%$$

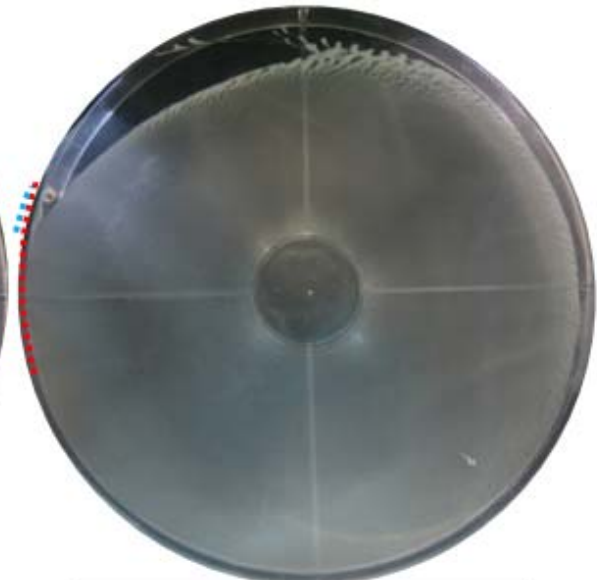


$$\eta_{\text{Becken 3}_2} = 80 \%$$

Weiterhin sind im Folgenden Bild das Absetzbild und der Absetzwirkungsgrad für das Versuchsmaterial SiLibeads abgebildet. Links im Bild sind die Ergebnisse für den Zulauf 1 dargestellt, rechts im Bild für Zulauf 2.



$$\eta_{\text{Becken 3}_1} = 77 \%$$



$$\eta_{\text{Becken 3}_2} = 82 \%$$



Anlage 01 zum Abschlussbericht

„Stand der Wissenschaft und Technik“

NRW MEREBEN

Maßnahmen zur Ertüchtigung von Regen- klärbecken und Hinweise zu deren Neubau

**des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und
Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
– Phase 2: Neubau von Regenklärbecken –**

Förderprogramm: ResA II

Juni 2018

Fachbereich Bauingenieurwesen

Prof. Dr.-Ing R. Mohn

Prof. Dr.-Ing M. Uhl

Prof. Dr.-Ing H. Grüning

Corrensstraße 25

48149 Münster



Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>I</i>
<i>Verzeichnis der Tabellen</i>	<i>III</i>
<i>Verzeichnis der Bilder</i>	<i>IV</i>
<i>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</i>	<i>VI</i>
1 Einleitung und Problemdefinition	1
2 Kenntnisstand und Forschungsansatz	2
2.1 Einsatz und Funktion von Regenklärbecken	2
2.1.1 Grundlagen	2
2.1.2 Sedimentation.....	3
2.1.3 Wirkungsgrad von Regenklärbecken.....	5
2.1.3.1 Idealisierte Beckendurchströmung	5
2.1.3.2 Abhängigkeit von den Strömungsverhältnissen	7
2.1.4 Kritische Schubspannung.....	10
2.1.5 Bemessung und Konstruktion.....	11
2.2 Wasserbauliche Untersuchungsmethoden	13
2.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	15
3 Material und Methoden	17
3.1 Klassifizierung der betrachteten Komponenten	17
3.1.1 Becken-Funktions-Komponenten	17
3.1.2 Optimierungs-Komponenten.....	20
3.2 Vorgehen der Literaturerhebung	23
3.3 Bewertungs-Methodik der Literatursynthese	25
4 Ergebnisse und Diskussion	26
4.1 Erhebung bisheriger Forschungsergebnisse zur Bauweise von Regenklärbecken	26
4.1.1 Hinweise zur Literaturstudie	26
4.1.2 Literaturstudie	26
4.2 Aufstellung der Literatursynthese	53
4.2.1 Einlauf.....	53
4.2.1.1 Konstruktion.....	53
4.2.1.2 Leitelemente – quer	56
4.2.1.3 Einbauten.....	59
4.2.2 Sedimentationskammer	60
4.2.2.1 Konstruktion.....	60
4.2.2.2 Leitelemente – quer	61
4.2.2.3 Leitelemente – längs.....	64

4.2.2.4	Einbauten.....	65
4.2.3	Klärüberlauf	66
4.2.4	Becken gesamt	67
5	<i>Empfehlungen</i>	69
6	<i>Zusammenfassung</i>	71
	<i>Literaturverzeichnis</i>	72

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1: Geforderte Abmessungsverhältnisse nach (DWA-A 166 2013)	11
Tabelle 2.2: Weitere Bemessungsgrundlagen (DWA-A 166 2013)	12
Tabelle 4.1: Überblick Bewertung Literatursynthese – HÖHENLAGE	53
Tabelle 4.2: Überblick Bewertung Literatursynthese – Fläche Anströmung	54
Tabelle 4.3: Überblick Bewertung Literatursynthese – ANZAHL STRÖME	54
Tabelle 4.4: Überblick Bewertung Literatursynthese – AUSFÜHRUNG	55
Tabelle 4.5: Überblick Bewertung Literatursynthese – ANSTRÖMWINKEL	55
Tabelle 4.6: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-UNTERSTRÖMT	56
Tabelle 4.7: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-ÜBERSTRÖMT	57
Tabelle 4.8: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-PERFORIERT	57
Tabelle 4.9: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLTELLER	57
Tabelle 4.10: Überblick Bewertung Literatursynthese – LAMELLENWAND	58
Tabelle 4.11: Überblick Bewertung Literatursynthese – DIFFUSOR	58
Tabelle 4.12: Überblick Bewertung Literatursynthese – EINBAUTEN	59
Tabelle 4.13: Überblick Bewertung Literatursynthese – BECKENABMESSUNGEN	60
Tabelle 4.14: Überblick Bewertung Literatursynthese – SOHLGESTALTUNG	60
Tabelle 4.15: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-UNTERSTRÖMT	61
Tabelle 4.16: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-ÜBERSTRÖMT	62
Tabelle 4.17: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-PERFORIERT	62
Tabelle 4.18: Überblick Bewertung Literatursynthese – LAMELLENWAND	63
Tabelle 4.19: Überblick Bewertung Literatursynthese – LEITWÄNDE-ALTERNIEREND - QUER	63
Tabelle 4.20: Überblick Bewertung Literatursynthese – LEITWÄNDE-ALTERNIEREND – LÄNGS	64
Tabelle 4.21: Überblick Bewertung Literatursynthese – TRENNWÄNDE	64
Tabelle 4.22: Überblick Bewertung Literatursynthese – EINBAUTEN	65
Tabelle 4.23: Überblick Bewertung Literatursynthese – ÜBERLAUFWEHR	66
Tabelle 4.24: Überblick Bewertung Literatursynthese – ÜBERLAUFFRINNE	66
Tabelle 4.25: Überblick Bewertung Literatursynthese – POSITION EINLAUF/ AUSLAUF	67
Tabelle 4.26: Überblick Bewertung Literatursynthese – HÖHENLAGE EINLAUF/ AUSLAUF	68

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1: Schematische Darstellung eines als Durchlaufbecken ausgebildeten Regenklärbeckens im Dauerstau (DWA-A 166 2013)	2
Bild 2.2: Absetzvorgang in einem Rechteckbecken mit laminarer Strömung und gleichmäßiger Fließgeschwindigkeit v (Gujer 2007)	3
Bild 2.3: Wirkungsgrade idealer Beckendurchströmungen in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit und der Oberflächenbeschickung	6
Bild 2.4: Prinzip der Kurzschlussströmung: Kurzschlussströmung reduziert die Aufenthaltszeit im Becken (Khan 2012)	8
Bild 2.5: Stärken und Schwächen wasserbaulicher Untersuchungsmethoden (nach Schütttrumpf 2014)	13
Bild 2.6: Vorgehensweise	15
Bild 3.1: Prinzipskizze Becken-Funktions-Komponenten (nach Mohn 2017)	17
Bild 3.2: Klassifizierung der Einlaufbauwerke	18
Bild 3.3: Klassifizierung Optimierungs-Komponenten: Einlauf	20
Bild 3.4: Klassifizierung Optimierungs-Komponenten: Sedimentationskammer	21
Bild 3.5: Klassifizierung Optimierungs-Komponenten: Klärüberlauf	21
Bild 3.6: Klassifizierung Optimierungs-Komponenten: Becken gesamt	22
Bild 3.7: Definitionen einer Prallwand; links= nach (Mohn 2017), rechts=Definition dieses Projektes	22
Bild 3.8: Schema Bewertungs-Methodik Literatursynthese	25
Bild 4.1: Geschwindigkeitsprofile der Becken mit einem tiefen (a) und hohen (b) Blech im Bereich der Sedimentationskammer (Bretscher et al. 1992)	27
Bild 4.2 Einfluss des Verhältnisses L:B auf die Rückhalteleistung; links=Auswertung der Sohlschubspannungen, recht=Auswertung der Partikelbahnen (Stovin und Saul 1996)	29
Bild 4.3: Vektorfelder der Fließgeschwindigkeiten für unterschiedliche Einbringungen von Leitwänden (Vega et al. 2003)	30
Bild 4.4: Konturplot der Feststoffkonzentration mit Geschwindigkeitsprofilen (nach McCorquodale et al. 2006)	33
Bild 4.5: Stromlinien für einen obenliegenden, mittig liegenden sowie tiefliegenden Einlauf (Tamayol et al. 2008)	35
Bild 4.6: Partikel-Bahnen in einem Becken mit drei und vier Prallwänden (Al-Sammarraee et al. 2009)	36

Bild 4.7: Mögliche Strömungsmuster aus Dufresne et al. (2010c). S0=Symmetrisches Verhalten, A1=Asymmetrisches Verhalten - einmalige Wandberührung, A2=Asymmetrisches Verhalten - zweimalige Wandberührung	38
Bild 4.8: Modellaufbau mit Sohltrichtern und Prallwänden; oben: Konstruktion, Mitte: Partikelbahnen, unten: Geschwindigkeitsvektoren (Wang et al. 2010).....	40
Bild 4.9: Stromlinien für null (a), ein (b), zwei (c) und drei (d) Leitbleche im Becken (Shahrokhi et al. 2012).....	43
Bild 4.10: Volumenanteil der Partikel im Fließmedium über die Beckenlänge; Darstellung zweier Längsschnitte - je mit und ohne Lamellenwand im Sedimentationsbecken (Xanthos et al. 2011)	44
Bild 4.11: Geschwindigkeitsprofile entlang der Beckenlänge; (a)=mit Prallwand, (b)=ohne Prallwand (Radaei et al. 2013).....	45
Bild 4.12: Normalisierte Kontur-Plots der Resultierenden der Fließgeschwindigkeit ($v / v_{average}$) (Kattwig 2014)	47
Bild 4.13: PVC-Formstücke; A=90° Umlenkung oben/unten/links/rechts, B=T-Stück, C=rückwärtige Lenkung, D=3-Wege-Passstück (Carlston und Venayagamoorthy 2015).....	49
Bild 4.14: Konturplot der Feststoffkonzentrationen (a) originale Einlaufkonstruktion und (b) optimierte Variante sowie Konturplot der Feststoffkonzentrationen feiner Partikel (c) originale Einlaufkonstruktion und (d) optimierte Variante (Patziger et al. 2016).....	51

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A_{Sed}	m^2	Sedimentationsoberfläche
b	m	Breite Einlauf
B	m	Breite des Beckens
BÜ	-	Beckenüberlauf
CFD	-	computational fluid dynamics
D^*	-	Sedimentologischer Korndurchmesser
d	mm	Korndurchmesser
EBW	-	Einlaufbauwerk
e	-	Effektiv-Volumen-Rate
g	kg/s^2	Erdbeschleunigung = $9,81 \text{ kg/s}^2$
H	m	Tiefe des Beckens
KÜ	-	Klärüberlauf
k	mm	Technische Rauheit
L	m	Länge des Beckens (Lichte Weite des Beckens)
Q	m^3/s	Durchfluss
Q_{Dr}	m^3/s	Drosselabfluss
Q_{krit}	m^3/s	kritischer Mischwasserabfluss
q_A	m/h	Oberflächenbeschickung
$q_{\text{Ü}}$	$\text{l}/(\text{s} \cdot \text{m})$	Spezifische Schwellenbelastung
S	-	Faktor Kurzschlussströmung
Seka	-	Sedimentationskammer
t_{16}	s	Zeitpunkt 16. Perzentil der Tracerkonzentration am Überlauf
t_{50}	s	Median Aufenthaltszeit des Tracers im Becken
t_{r}	s	Zeitpunkt der ersten Konzentrationsänderung am Überlauf
t_{mean}	s	mittlere Aufenthaltszeit aus der Verweilzeitverteilung
t_{n}	s	nominale Aufenthaltszeit des Tracers im Becken
t_{R}	s	Durchflusszeit/ Aufenthaltszeit
t_{s}	s	Sinkzeit
V_{effektiv}	m^3	effektives Absetzvolumen
V_{ges}	m^3	gesamtes Absetzvolumen
v	m/s	Fließgeschwindigkeit
v_{h}	m/s	Horizontale Fließgeschwindigkeit
v_{s}	m/s	Sinkgeschwindigkeit
η	-	Wirkungsgrad

Symbol	Einheit	Bezeichnung
η_{Pf}	-	Wirkungsgrad einer Pfropfenströmung nach Hazen
η_{Pf}	-	Wirkungsgrad voll durchmischten Reaktors
ν_d	kg/(s·m)	dynamische Viskosität
ρ_{Fluid}	kg/m ³	Dichte Fluid
ρ_s	kg/m ³	Korndichte
T_{crit}	N/m ²	kritische Schubspannung
T_{dim}	-	dimensionslose Schubspannung

1 Einleitung und Problemdefinition

Regenklärbecken werden innerhalb der Kanalisation zur zentralen Behandlung des Niederschlagswassers eingesetzt und bedienen sich dem Prinzip der Sedimentation. Durch ausreichend große Aufenthaltszeiten im Becken können sich Partikel absetzen und gelangen so nicht in das nachgeschaltete Gewässer. Für den Fall, dass die zufließenden Wassermengen den Bemessungszufluss überschreiten, wird ein Teil unbehandelt in das Gewässer abgeschlagen. Die Emissionen, die von einem solchen Regenklärbecken ausgehen, stellen somit für das Gewässer eine erhebliche stoffliche sowie hydraulische Belastung dar.

Infolge hydraulischer Mängel ist bei vielen Becken eine Minderung der Absetzleistung zu beobachten, die oft auch mit einer Remobilisierung der bereits akkumulierten Feststoffe einhergeht. Verschiedene Forschungsvorhaben haben in den letzten Jahrzehnten die direkte Abhängigkeit des hydraulischen Verhaltens von der Beckengeometrie bestätigt und zahlreiche Optimierungsvorschläge untersucht.

Schwerpunkt dieses Projekt ist die bestmögliche Durchströmung eines rechteckigen Sedimentationsbeckens mit dem Ziel einer maximalen Abscheidung partikulärer Stoffe. Dabei liegt der Fokus auf der optimierten konstruktiven Beckengestaltung. Eine übersichtliche Aufarbeitung der bisherigen Forschungsergebnisse besteht noch nicht, obwohl sie Planern und Genehmigungsbehörden eine hilfreiche und praktisch anwendbare Arbeitshilfe wäre. Aus diesem Grund soll der heutige Kenntnisstand erhoben und in einem Katalog zusammengetragen werden

2 Kenntnisstand und Forschungsansatz

2.1 Einsatz und Funktion von Regenklärbecken

Regenklärbecken werden an vielen Stellen als zentrale Behandlungsanlagen der Trennkanalisation eingesetzt. In den folgenden Kapiteln wird die Funktionsweise solcher Anlagen erläutert sowie ein Einblick in die maßgeblichen Parameter der Leistungsfähigkeit sowie der Bemessung gegeben.

2.1.1 Grundlagen

Regenklärbecken werden innerhalb der Trennkanalisation dann eingesetzt, wenn das Niederschlagswasser vor der Einleitung in das Gewässer einer Behandlung bedarf. Sie dienen der Rückhaltung absetzbarer Stoffe durch Sedimentationsprozesse und tragen zumindest zur groben Entschlammung des Wassers bei. Je nach Konstruktion kommt es ebenfalls zur Abscheidung von Schwimmstoffen sowie Leicht- und Schwerflüssigkeiten. Das gereinigte Wasser wird dann über einen Klärüberlauf in das Gewässer abgeschlagen.

Man unterscheidet Regenklärbecken mit und ohne Dauerstau, also ständig und nicht ständig gefüllte Becken. Sie können als Fang- oder Durchlaufbecken konzipiert werden. Fangbecken werden bei kurzen Fließzeiten im Kanalnetz für die Aufnahme des stark verschmutzten Spülstoßes gewählt. Durchlaufbecken dagegen werden präferiert eingesetzt und bilden den Schwerpunkt dieses Projekt. Sie bestehen in der Regel aus der Sedimentationskammer (SeKa) mit Einlaufbauwerk (EBw), dem Klärüberlauf (KÜ) mit Tauchwand sowie dem Beckenüberlauf (BÜ), über den die Beckenkapazität übersteigenden Zuflüsse ohne Behandlung ins Gewässer abgeschlagen werden. Außerdem ist meistens eine Entleerungsvorrichtung in die Schmutz- oder Mischwasserkanalisation vorgesehen. Im folgenden Bild 2.1 sind alle Bauwerkskomponenten schematisch dargestellt (DWA-A 166 2013).

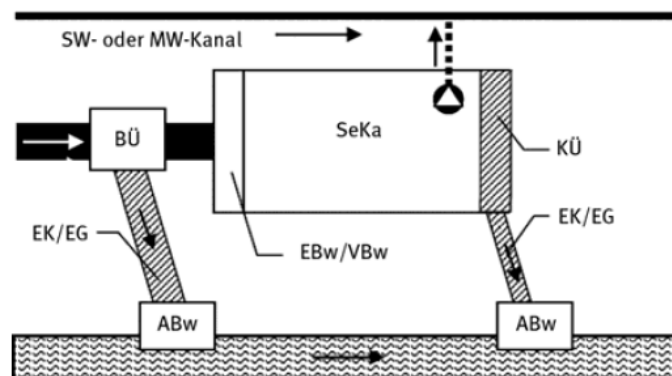


Bild 2.1: Schematische Darstellung eines als Durchlaufbecken ausgebildeten Regenklärbeckens im Dauerstau (DWA-A 166 2013)

2.1.2 Sedimentation

Regenklärbecken liegt das Prinzip von Sedimentationsprozessen zugrunde. Diese beschreiben das Absinken von Feststoffen aufgrund von Dichteunterschieden (Gujer 2007) und wirken sich maßgeblich auf die Qualität des überlaufenden Volumenstroms aus. Einen ersten Beitrag zur Sedimentationswirkung von Rechteckbecken leistete Hazen (1904), der die Modellvorstellung eines ideal durchströmten Absetzbeckens entwickelte. Die maßgebenden geometrischen Größen sind dazu in Bild 2.2 dargestellt.

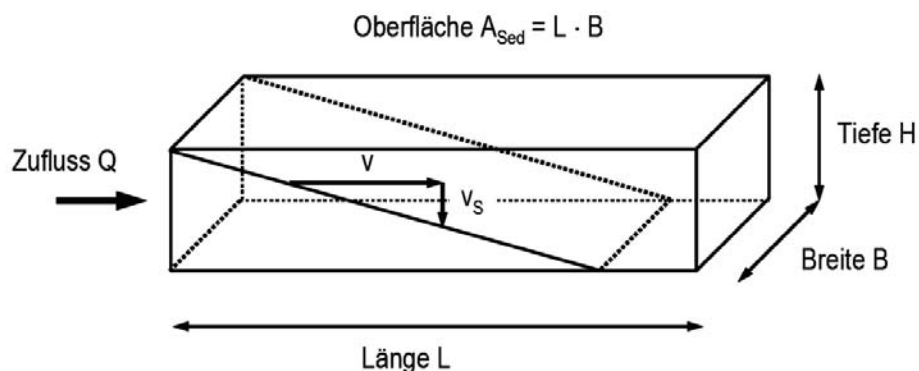


Bild 2.2: Absetzvorgang in einem Rechteckbecken mit laminarer Strömung und gleichmäßiger Fließgeschwindigkeit v (Gujer 2007)

Nach Hazens Annahmen erfolgt die Durchströmung laminar, stationär sowie gleichförmig. Benachbarte Stromlinien vermischen sich nicht und es liegt eine s.g. „Pfropfenströmung“ vor (siehe Kapitel 2.1.3.1). Die in die Strömung gelangenden Teilchen treten gleichmäßig über den Beckenquerschnitt verteilt ein und gelten als abgeschieden, sobald sie sich abgesetzt haben, bevor sie das Ende des Beckens erreicht haben.

Für diese idealen Bedingungen lässt sich die Fließgeschwindigkeit v wie folgt definieren:

$$v = \frac{Q}{B * H} \quad (m/s) \quad \text{(Gl. 1)}$$

mit v Fließgeschwindigkeit (m/s)

Q Durchfluss (m^3/s)

B Beckenbreite (B)

H Fließtiefe (m)

Nach Hazens Theorie werden alle Partikel abgeschieden, deren Durchflusszeit bzw. Aufenthaltszeit t_R im Becken größer oder gleich der Sinkzeit t_s ist. Somit lässt sich für die Sinkgeschwindigkeit aufstellen:

$$\frac{L}{v} = \frac{H}{v_s} \quad \rightarrow \quad \frac{L}{\frac{Q}{B * H}} = \frac{H}{v_s} \quad \rightarrow \quad \frac{V}{Q} = \frac{H}{v_s}$$

$$v_s = \frac{Q}{A} \quad (\text{m/s}) \quad \text{(Gl. 2)}$$

mit v_s Sinkgeschwindigkeit (m/s)

Q Durchfluss (m^3/s)

A Beckenoberfläche (m^2)

Es wird ersichtlich, dass die Sinkgeschwindigkeit des Partikels unabhängig ist von der Fließtiefe H und nur vom Durchfluss Q und der Oberfläche A abhängt. Anstelle der Sinkgeschwindigkeit wird deshalb die Oberflächenbeschickung q_A eingeführt, die nach ATV-A 128 (1992) bzw. DWA-A 102 (2016) eine wichtige Dimensionierungsgröße für Sedimentationsbecken ist. Es sei anzumerken, dass sich Abweichungen vom theoretischen Idealfall stets aufgrund der punktuellen Strömungsverhältnisse ergeben.

Geiger et al. (1998) führen Hazens Überlegungen weiter fort und definieren die so genannte Hazenzahl:

$$Ha = \frac{v_s}{q_A} \quad (-) \quad \text{(Gl. 3)}$$

mit Ha Hazen-Zahl (-)

v_s Sinkgeschwindigkeit (m/h)

q_A Oberflächenbeschickung (m/h)

Sie besagt, dass sich ein Partikel vor dem Austritt aus dem Becken abgesetzt hat, sobald seine Sinkgeschwindigkeit mindestens der Oberflächenbeschickung entspricht.

2.1.3 Wirkungsgrad von Regenklärbecken

Der Wirkungsgrad eines Regenklärbeckens ist ein wichtiger Parameter, der die Rückhalteleistung des Beckens beschreibt. Im Allgemeinen kann er nach (Kemper 2016) definiert werden durch:

$$\eta = \left(1 - \frac{\text{Ablauf (Konzentration bzw. Fracht)}}{\text{Zulauf (Konzentration bzw. Fracht)}} \right) * 100 \text{ (\%)} \quad (\text{Gl. 4})$$

mit η Wirkungsgrad (%)

Der Wirkungsgrad η stellt demnach den prozentualen Anteil des Feststoffrückhalts dar. Benötigt werden dazu die Zu- und Ablaufkonzentrationen, die durch Messungen an physikalischen Modellen oder durch in situ-Versuchen ermittelt werden können. Auch eine Berechnung mit numerischen Modellen ist möglich.

2.1.3.1 Idealisierte Beckendurchströmung

Die Wirksamkeit eines Sedimentationsprozesses hängt weiterhin von verschiedensten hydraulischen und partikulären Parametern ab. Hierzu existieren zwei Grenzfälle, die im Folgenden näher beschrieben werden sollen:

Pfropfenströmung

Eine Pfropfenströmung kann nur in einem laminar durchströmten Reaktor vorliegen. Die Stoffkonzentration sowie die Strömungsgeschwindigkeiten sind über den gesamten Querschnitt homogen verteilt. Lediglich in Grenzbereichen kommt es zu einem sprunghaften Geschwindigkeitsabfall. Charakteristisch ist außerdem, dass in Längsrichtung keine Vermischungsvorgänge auftreten. Kommt es bei der Pfropfenströmung zu einem Konzentrationsimpuls, tritt dieser unverändert, lediglich zeitlich versetzt, im Ablauf auf (Munson et al. 2014).

Für ein idealisiertes Becken mit Pfropfendurchströmung gilt nach Hazen (1904):

$$\eta_{Pf} = \begin{cases} v_s/q_A & \text{für } v_s/q_A \leq 1 \\ 1 & \text{für } v_s/q_A > 1 \end{cases} \quad (-) \quad (\text{Gl. 5})$$

mit η_{Pf} Wirkungsgrad einer Pfropfenströmung nach Hazen (-)

v_s Sinkgeschwindigkeit (m/h)

q_A Oberflächenbeschickung (m/h)

Vollständige Durchmischung

Anders als bei der Pfropfenströmung liegt bei einer vollständigen Durchmischung zu jeder Zeit im gesamten Becken die Konzentration des Auslaufstroms vor. Es herrscht unendliche, isotrope Turbulenz. Bei einem Konzentrationsimpuls, ist ein exponentieller Abfall des Konzentrationsverlaufs zu beobachten (Munson et al. 2014).

Den Wirkungsgrad für voll durchmischte Reaktoren beschreibt Feldhaus (1993) wie folgt:

$$\eta_{vd} = \frac{1}{1 + \frac{1}{v_s/q_A}} \quad (-) \tag{Gl. 6}$$

mit η_{vd} Wirkungsgrad voll durchmischten Reaktor (-)
 v_s Sinkgeschwindigkeit (m/h)
 q_A Oberflächenbeschickung (m/h)

Beide Theorien beruhen auf der Annahme, dass Phänomene wie Resuspension oder Partikelagglomeration ausgeschlossen werden. In Bild 2.3 sind die o.g. Wirkungsgrade der beiden Modelle dargestellt. Es wird deutlich, dass Becken, in denen eine Pfropfenströmung vorliegt, den besten Wirkungsgrad aufweisen und demnach als optimal zu werten sind. Voll durchmischte Becken dagegen zeigen die schlechteste Rückhalteleistung.

Im Becken finden an verschiedensten Stellen Störungen der Strömung statt. Diese können beispielsweise Querschnittsänderungen am Einlauf oder bei Einbauten sein. Die Idealvorstellung einer Pfropfenströmung kann laut Kutzner (2005) daher nicht erreicht werde. Vielmehr stelle die Strömung im Becken eine Hybridlösung dar.

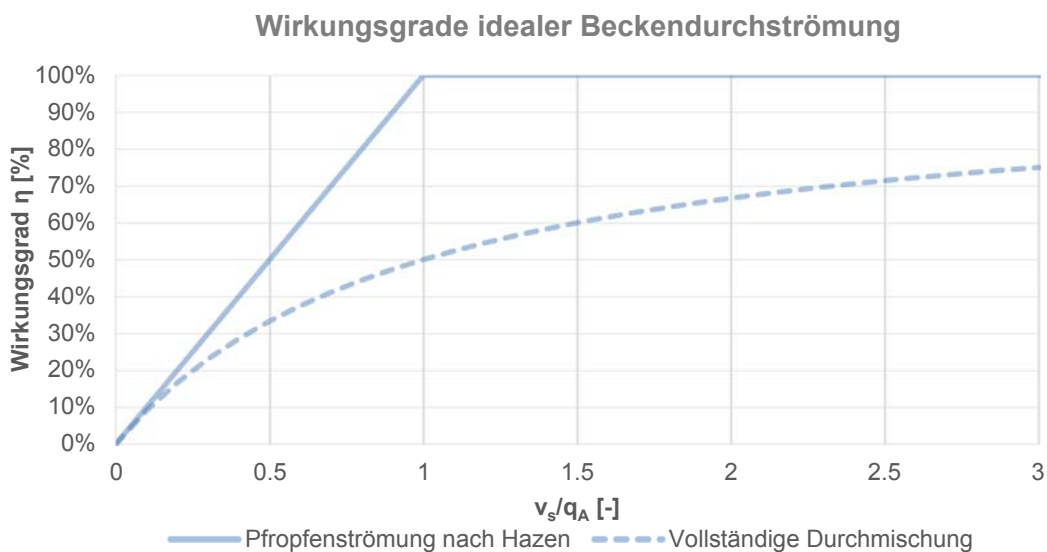


Bild 2.3: Wirkungsgrade idealer Beckendurchströmungen in Abhängigkeit von der Sinkgeschwindigkeit und der Oberflächenbeschickung

2.1.3.2 Abhängigkeit von den Strömungsverhältnissen

Hazens (1904) Theorie einer idealen Durchströmung beruht auf dem Prinzip einer laminaren, gleichförmigen Strömung. Demnach sinkt der Wirkungsgrad eines Beckens, je mehr dies von einer idealen Beckendurchströmung abweicht. Wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert, können ideale Strömungsverhältnisse nicht über das gesamte Beckenvolumen erreicht werden. Vielmehr gilt es, Sedimentationsbecken so zu konstruieren, dass in möglichst großen Bereichen Strömungsverhältnisse vorliegen, die eine Sedimentation von Partikeln begünstigen.

Nach Shilton und Harrison (2003) können folgende Parameter das hydraulische Verhalten des Beckens beeinflussen:

- Durchfluss bzw. Oberflächenbeschickung** ▶ Je größer der Durchfluss (die Oberflächenbeschickung), desto größer ist der Impuls, der vom Einlauf ausgeht.
- Größe Einlauf** ▶ Je kleiner der Einlauf, desto größer ist der Impuls, der vom Einlauf ausgeht.
- Einlaufposition und -orientierung** ▶ Beeinflusst das Fließbild des Beckens.
- Position Überlauf** ▶ Beeinflusst die Aufenthaltszeit im Becken.
- Geometrie des Beckens sowie Leitelemente etc.** ▶ Beeinflusst das Fließbild des Beckens.

Es zeigt sich, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Geometrie des Beckens und der Rückhalteleistung vorliegt. Es besteht eine komplexe Interaktion verschiedenster Parameter, was für jedes Becken ein vollkommen individuelles Fließbild entstehen lässt. Dabei kann eine große Sensitivität zu den o.g. Eigenschaften beobachtet werden (Khan 2012). Weder im pfpfenartig durchströmten noch im voll durchmischten Becken sind Strömungsphänomene zu beobachten, die bei der Analyse hinsichtlich des Wirkungsgrades eines Beckens zu beachten sind:

Kurzschlussströmung

Das Prinzip einer Kurzschlussströmung ist in Bild 2.4 dargestellt. Herrschen ideale Bedingungen, fließt eine Partikelfraktion mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit v durch ein Becken und nutzt dabei das gesamte Beckenvolumen aus. Die inhomogenen Zustände, die in der Realität vorliegen, führen dazu, dass die Aufenthaltszeit einiger Partikel geringer als die anderer ist. Teile des Zulaufstroms verlassen das Becken mit nur anteiliger Behandlung (Persson und Wittgren 2003).

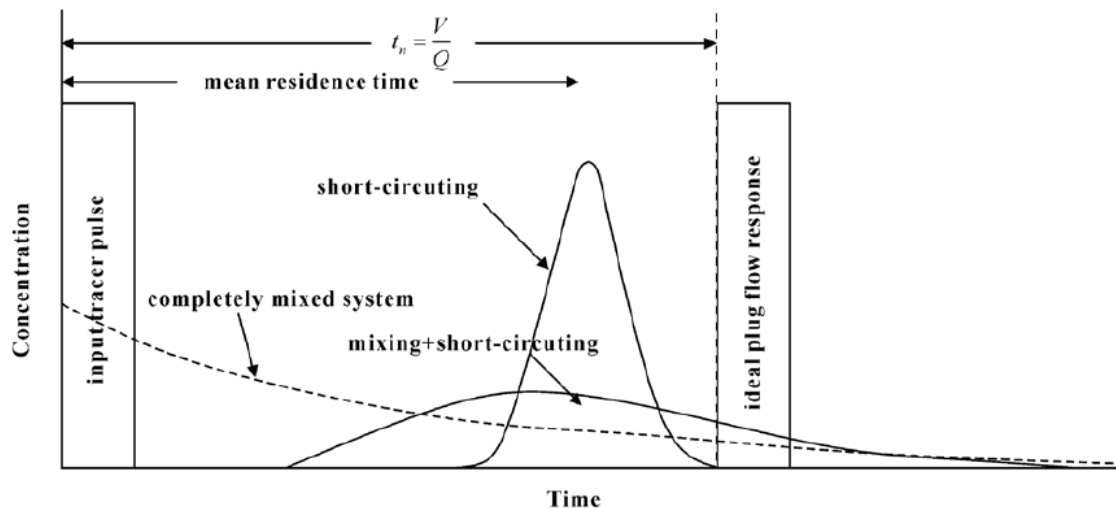


Bild 2.4: Prinzip der Kurzschlussströmung: Kurzschlussströmung reduziert die Aufenthaltszeit im Becken (Khan 2012)

Nach der Theorie der „Kinetik erster Ordnung“, die Shilton und Harrison (2003) beschreiben, existiert ein nicht-linearer Zusammenhang zwischen der Aufenthaltszeit einer Partikelfraktion und der Rückhalteleistung, da gleichzeitig ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Rate der Rückhaltung und der Partikelkonzentration zu diesem Zeitpunkt besteht. Folglich umgeht ein Partikel, der das Becken in weniger als der idealen Aufenthaltszeit verlässt, einen überproportional großen Anteil an Behandlung. Gleichzeitig erfährt ein Partikel, der sehr lange im Becken bleibt, keine entsprechend stärkere Behandlung, da mit steigender Aufenthaltszeit eine geringere Konzentration vorliegt.

In der Literatur bestehen verschiedene Ansätze, den Grad der Kurzschlussströmung zu quantifizieren. Diese werden oft bei der Betrachtung verschiedener Beckenkomponenten hinsichtlich ihrer Wirkung herangezogen. Ein häufig angewendeter Parameter ist der Kurzschlussströmungsfaktor S . Er wird zwar nicht immer gleich definiert, jedoch gibt er stets ein Verhältnis zweier Zeitpunkte an, zu denen signifikante Konzentrationen am Überlauf beobachtet wurden. Je geringer der Faktor S ist, desto größer ist der Anteil der Kurzschlussströmung.

Definition nach Persson (2000):

$$S = \frac{t_{16}}{t_n} \quad (-) \quad (\text{Gl. 7})$$

mit S Faktor Kurzschlussströmung (-)

t_{16} Zeitpunkt 16. Perzentil der Tracerkonzentration am Überlauf (s)

t_n Nominale Aufenthaltszeit (s)

Definition nach Quarini et al. (1996):

$$S = \frac{t_f}{t_n} \quad (-) \quad (\text{Gl. 8})$$

mit S Faktor Kurzschlussströmung (-)
 t_f Zeitpunkt der ersten Konzentrationsänderung am Überlauf (s)
 t_n Nominale Aufenthaltszeit (s)

Definition nach Ta und Brignal (1998):

$$S = \frac{t_{16}}{t_{50}} \quad (-) \quad (\text{Gl. 9})$$

mit S Faktor Kurzschlussströmung (-)
 t_{16} Zeitpunkt 16. Perzentil der Tracerkonzentration am Überlauf (s)
 t_{50} Median Aufenthaltszeit (s)

Rezirkulation/ Totzonen

Rezirkulationszonen, auch Totzonen genannt, bilden sich aufgrund ungleichmäßiger Durchströmung. Häufig sind sie in Ecken eines Bauwerks oder hinter Bauwerkskanten/ hinter Einbauten zu beobachten. Sie vermindern das Volumen, das effektiv zur Sedimentation genutzt werden kann. Folglich wird der Wirkungsgrad gemindert. Durch die Verminderung des effektiven Volumens können sich Zonen höherer Geschwindigkeiten bilden. Wenn diese die Sinkgeschwindigkeiten der Partikel übersteigen (Kapitel 2.1.2), wird ein Absetzen verhindert und das Weitertragen des Partikels bis hin zur Kurzschlussströmung gefördert (Shahrokhi et al. 2012). Rezirkulationszonen können darüber hinaus potentiell zur Resuspension bereits auf der Sohle akkumulierter Partikel führen (Razmi et al. 2013). Dieses Phänomen ist insbesondere dann zu beobachten, wenn eine instationäre Strömung vorliegt, deren Strömungsmuster sich über die Zeit räumlich im Becken verlagern (Kantoush et al. 2010).

Ziel einer jeden Beckenoptimierung oder -bemessung sollte stets sein, das effektive Volumen so groß wie möglich und folglich das Rezirkulationsvolumen so gering wie möglich zu halten. Dies kann u.a. durch Beckeneinbauten wie Prallwänden erreicht werden. Das effektive Sedimentationsvolumen wird an vielen Stellen herangezogen, um den Grad des „aktiven Volumens“ zu bestimmen und Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad des Beckens zu ziehen. Hierdurch kann nach Persson (2000) auch die Effektiv-Volumen-Rate e bestimmt werden:

$$e = \frac{t_{mean}}{t_n} = \frac{V_{effektiv}}{V_{ges}} (-) \quad (\text{Gl. 10})$$

mit	e	Effektiv-Volumen-Rate (-)
	t_{mean}	Mittlere Aufenthaltszeit aus der Verweilzeitverteilung (s)
	t_n	Nominale Aufenthaltszeit (s)
	$V_{effektiv}$	Effektives Absatzvolumen (m ³)
	V_{ges}	Gesamtes Absatzvolumen (m ³)

2.1.4 Kritische Schubspannung

Der Sedimenttransport auf der Beckensohle beginnt, sobald die Strömungskraft der Fluids die Widerstandskraft des Partikels übersteigt. Die zu diesem Zeitpunkt auftretende Schubspannung wird kritische Schubspannung τ_{crit} genannt.

Nach Shields (1936) ist die kritische Schubspannung von verschiedensten Parametern abhängig:

- Gefälle der Sohle
- Gewicht des Partikels
- Kornform
- u.ä.

Die kritische Schubspannung wird nach van Rijn (2016) wie folgt definiert:

$$\tau_{crit} = \frac{\tau_{dim}}{(\rho_s - \rho_{fluid}) * g * d} (N/m^2) \quad (\text{Gl. 11})$$

mit	τ_{crit}	Kritische Schubspannung (N/m ²)
	ρ_s	Dichte Partikel (kg/m ³)
	ρ_{fluid}	Dichte Fluid (kg/m ³)
	g	Erdbeschleunigung = 9,81 kg/s ²
	d	Korndurchmesser (mm)

wobei

$$\tau_{dim} = \frac{0,3}{(1 + D_*)} + 0,055 * [1 - e^{(-0,02 * D_*)}] \text{ für } D_* > 0,1 (-) \quad (\text{Gl. 12})$$

mit	τ_{dim}	Dimensionslose Schubspannung (-)
	D_*	Sedimentologischer Korndurchmesser (-)

und

$$D_* = d * \left[\frac{(\rho_s / \rho_{Fluid} - 1) * g}{\nu_d^2} \right]^{1/3} \quad (-) \quad (\text{Gl. 13})$$

mit

D_*	Sedimentologischer Korndurchmesser (-)
d	Korndurchmesser (mm)
ρ_s	Dichte Partikel (kg/m^3)
ρ_{Fluid}	Dichte Fluid (kg/m^3)
g	Erdbeschleunigung = $9,81 \text{ kg}/\text{s}^2$
ν_d	Dynamische Viskosität ($\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$)

2.1.5 Bemessung und Konstruktion

Aus den vorherigen Kapiteln geht hervor, dass die Bemessung eines Sedimentationsbeckens mit größter Sorgfalt durchgeführt werden muss. Dabei ergeben sich verschiedenste Anforderungen auf nationalen sowie internationalen Ebene.

Nationaler Standard

In Deutschland wird die Gestaltung wasserwirtschaftlicher Anlagen maßgeblich durch die Regelwerke der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) definiert. Ob eine Behandlung von Niederschlagsabflüssen vor Einleitung in das Gewässer überhaupt durchgeführt werden muss, regelt in Zukunft das Arbeitsblatt „Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer“, (DWA-A 102 2016), das die aktuell geltenden „Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser“, (DWA-M 153 2005), ablöst.

Entscheidende Handreichungen zur konstruktiven Gestaltung von Regenklärbecken werden in (DWA-A 166 2013) aufgestellt. Dabei werden die verschiedenen Bauwerkskomponenten näher definiert. Die folgende Eingrenzung der Abmessungsverhältnisse stellt dabei einen zentralen Bestandteil der Vorgaben dar:

Tabelle 2.1: Geforderte Abmessungsverhältnisse nach (DWA-A 166 2013)

$6 \leq$	L : H	≤ 15
$3 \leq$	L : B	$\leq 4,5$
$2 \leq$	B : H	≤ 4

Die Grenzwerte betreffen s.g. Durchlaufbecken, die im Rahmen dieses Projektes betrachtet werden. Weitere Bemessungsgrundlagen werden wie folgt angegeben:

Tabelle 2.2: Weitere Bemessungsgrundlagen (DWA-A 166 2013)

q_A	=	Oberflächenbeschickung	\leq	10 m/h bei Q_{krit}
v_h	=	Horizontale Fließgeschwindigkeit	\leq	0,05 m/s bei Q_{krit}
$q_{\dot{u}}$	=	Spezifische Schwellenbelastung	\leq	75 l/(s·m) bei $Q_{krit} - Q_{Dr}$
Q_{krit}	=	Kritischer Mischwasserabfluss	=	15 l/(s·ha) (Normalfall)

Internationaler Standard

Ein allgemeiner internationaler Standard existiert nicht. Vielmehr werden ähnlich dem DWA-A 166 (2013) nationale Standards durch Regelwerke definiert. Im Zuge der Erstellung dieses Projektes erfolgt keine genauere Analyse dieser Handlungsanweisungen. Hinzu kommen Studien, die in größerem Rahmen Empfehlung zur Konstruktion von Sedimentationsbecken geben. Beispielfähig können für Regelwerke und Handlungsempfehlungen angeführt werden:

- Khan (2012)
- Shilton und Harrison (2003)
- Standard (2002)
- Tchobanoglous (2014)
- Tchobanoglous und Schroeder (1985)
- Voutchkov (2005)
- Zech et al. (2014)
- u.v.m.

2.2 Wasserbauliche Untersuchungsmethoden

Mithilfe von wasserbaulichen Untersuchungsmethoden können verschiedene Fragestellungen genauer beleuchtet werden. Will man die Leistungsfähigkeit eines Beckens genauer untersuchen, kann dies grundsätzlich auf drei verschiedene Weisen geschehen:

- Beobachtungen und Messungen in situ (Naturmessungen)
- Beobachtungen und Messungen am physikalischen Modell
- Berechnung und Analyse eines numerischen Modells

In allen Fällen lassen sich verschiedene Methoden wählen. Die Methoden sowie ihre Vor- und Nachteile sind in Bild 2.5 dargestellt.

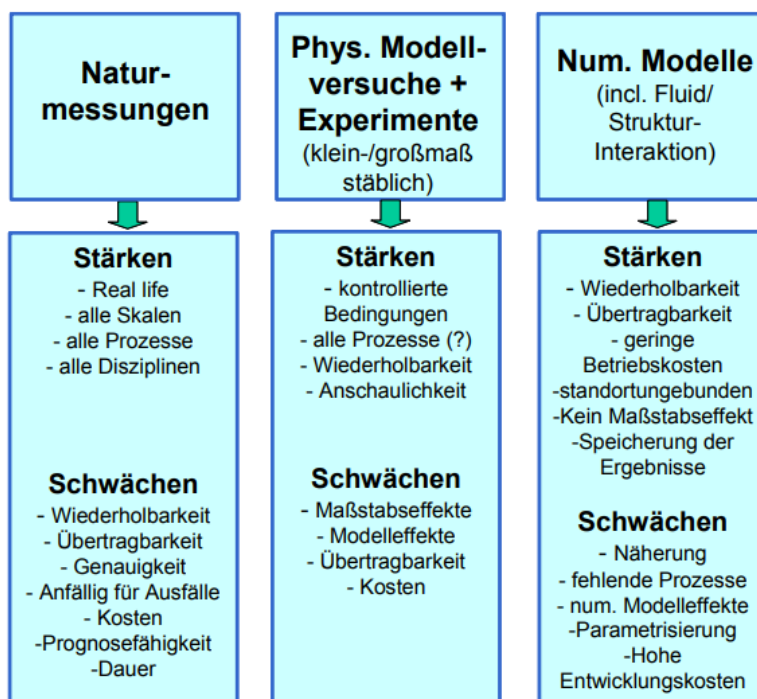


Bild 2.5: Stärken und Schwächen wasserbaulicher Untersuchungsmethoden (nach Schütttrumpf 2014)

Wird eine Analyse des bestehenden Beckens (*in situ*) durchgeführt, kann zunächst einmal das grundsätzliche Durchströmungsverhalten untersucht werden. Dies kann optisch, oft auch durch Zuhilfenahme von kleinskaligen Videoaufnahmen und durch Zugabe von Tracern erfolgen. Eine weitere Möglichkeit ist die Beprobung der zu- und abfließenden Wassermengen. Durch Messung und Analyse verschiedenster Parameter (z.B. Trockenrückstand oder Glühverlust) können Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad des Beckens gezogen werden (Uhl et al. 2013). Der Vorteil der Messung vor Ort ist, dass alle Phänomene ohne jegliche Maßstabeffekte etc. beobachtet werden können. Sichtbar bzw. messbar sind alle Phänomene in ihren realen Zusammenhängen.

Probleme bereiten jedoch die Reproduzierbarkeit sowie die Übertragbarkeit, da die Ergebnisse immer nur eine Momentaufnahme darstellen.

Ein **physikalisches Modell** stellt die maßstäbliche Nachbildung einer bestehenden oder fiktiven Anlage dar. Sie dient dazu Strömungsprozesse genauer zu verstehen und Rückschlüsse auf die natürlich vorkommenden Phänomene zu ziehen. Zugrunde liegen die fundamentalen physikalischen Grundgleichungen (Massenerhaltung, Impulserhaltung, Energieerhaltung), die maßstäblich umgerechnet werden. Versuche können ähnlich wie bei den Messungen vor Ort optisch oder durch nähere Beprobung stattfinden (Kobus und Abraham 1984). Im Gegensatz zur Analyse in situ sind alle Ergebnisse reproduzierbar und wiederholbar. Ferner können sie sehr anschaulich sein und zum besseren Verständnis beitragen. Negativ anzumerken sei die Frage, inwiefern physikalische Modelle die realen Bedingungen widerspiegeln. Stets sind Maßstabseffekte zu beachten. Außerdem kann durch das Ansetzen falscher Randbedingungen das Ergebnis verzerrt sein oder nur einen Teil des tatsächlichen Verhaltens darstellen.

Unter einem **numerischen Modell** versteht man die mathematische Darstellung realer Zusammenhänge. Dabei werden die physikalischen Grundgleichungen mithilfe von numerischen Lösungsverfahren gelöst. Es werden verschiedene Anfangs- und Randbedingungen definiert sowie Vereinfachungen vorgenommen (Laurien und Oertel 2011). Numerische Modelle sind aufgrund der Standort-Unabhängigkeit sehr flexibel und bieten gleichzeitig eine komplette Reproduzierbarkeit. Hinzu kommt, dass verschiedene Varianten sehr unkompliziert überprüft werden können. Maßstabseffekte wie bei physikalischen Effekten liegen nicht vor. Probleme können die Näherungen bereiten, die an vielen Stellen angesetzt werden, um die physikalischen Grundgleichungen zu lösen. Je nach angesetzten Randbedingungen und Zielsetzung der Analyse können sich Verzerrungen ergeben. Die numerischen Modelle ziehen oftmals hohe Rechenkapazitäten mit sich, so dass sie nicht für alle Fragestellungen zielführend sind.

Keiner der Untersuchungsmethoden stellt eine optimale Möglichkeit zur Beantwortung wasserbaulicher Fragestellungen dar. Bei allen Vorhaben muss im Detail betrachtet werden, welcher Grad der Komplexität vorliegt, welche Detailschärfe erwünscht ist und ob die spezifische Fragestellung mit ausreichender Genauigkeit beantwortet werden kann. In vielen Fällen bietet sich eine Kombination der Methoden an („Composite Modelling“), so dass Synergieeffekt genutzt und Rückschlüsse auf die Plausibilität der Ergebnisse gezogen werden können (Schütttrumpf 2014).

2.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

In Regenklärbecken kommen komplexe Wirkzusammenhänge zum Tragen, die die Rückhalteleistung entscheidend beeinflussen. Die konstruktive Gestaltung der Beckenanlage hat dabei große Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse im Becken.

Zahlreiche Studien haben sich in den vergangenen Jahrzehnten mit der optimalen Gestaltung von Sedimentationsanlagen beschäftigt. Dabei wurde eine Vielzahl von möglichen Ausführungen der einzelnen Beckenkomponenten untersucht. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse besteht bis heute jedoch nicht, obwohl eine solche eine äußerst nützliche Handreichung bei Planungsprozessen darstellen würde.

Der Schwerpunkt des Projektes ist die übersichtliche Aufarbeitung der bisherigen Erkenntnisse zur Optimierung der Durchströmung durch die konstruktive Gestaltung des Beckens. Dabei lassen sich zwei Phasen definieren, die im folgenden Bild 2.6 dargestellt werden.

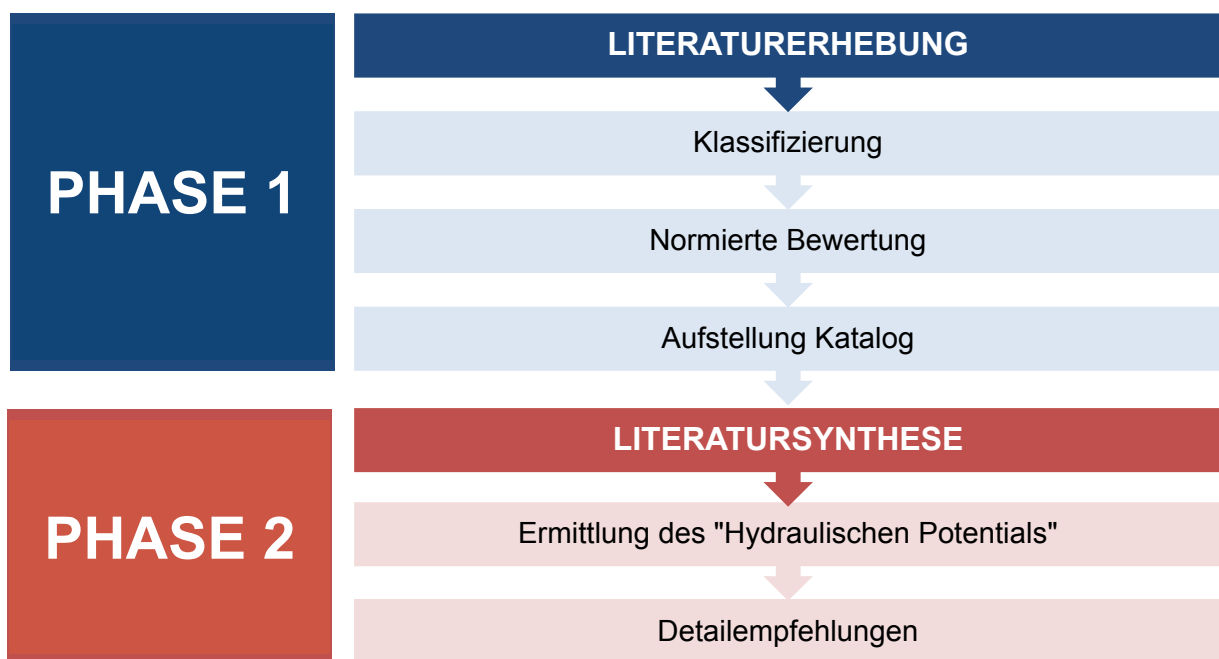


Bild 2.6: Vorgehensweise

In **Phase 1** wird die vorhandene Literatur zum Thema zusammengetragen und auf eine normierte, vergleichbare Ebene gebracht. Dazu erfolgt zunächst eine einheitliche Klassifizierung der Beckenkonstruktion sowie des Optimierungs-Ansatzes (Kapitel 3.1). Auf Grundlage der Bewertung der Autoren werden die Ergebnisse in ein einheitliches Bewertungsschema übersetzt (Kapitel 3.2). Mit diesen Ergebnissen erfolgt die Aufstellung eines Katalogs, der die Ergebnisse der betrachteten Literaturstellen übersichtlich zusammenträgt (Kapitel 4.1).

In **Phase 2** wird ausgehend von den einzelnen Ergebnissen eine Literatursynthese aufgestellt. Dabei werden die einzelnen Ergebnisse miteinander verglichen, hinsichtlich Besonderheiten in der Bewertungsfindung analysiert und daraus folgend eine gemeinsame Empfehlung abgegeben. Ferner werden, falls vorhanden, Anregungen zur detaillierteren Ausführung gegeben (Kapitel 4.2).

Mit diesem Vorgehen soll ein Werkzeug erarbeitet werden, das Planer und Genehmigungsbehörden in der Auslegung von Regenklärbecken unterstützt und ihnen **Gestaltungsempfehlungen** an die Hand gibt. Die Synthese hat **nicht** zum Ziel **allgemeingültige Aussagen** zur Anwendbarkeit und Wirkung verschiedener Maßnahmen zu treffen. Vielmehr soll sie **Ausgangspunkt** für die detailliertere Planung von Regenklärbecken sein und zum **Verständnis** der Wirkung verschiedener Maßnahmen beitragen.

3 Material und Methoden

3.1 Klassifizierung der betrachteten Komponenten

Wie in Kapitel 4.1 ersichtlich, wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl verschiedener Optimierungsmaßnahmen untersucht. Für eine übersichtliche Katalogisierung müssen die betrachteten Komponenten klassifiziert werden. Dazu werden zunächst Becken-Funktions-Komponenten definiert, die in jedem Bauwerk vorhanden sind und denen jede Optimierung zugeordnet werden kann (Kapitel 3.1.1). Zusätzlich werden die Optimierungskomponenten klassifiziert, um klare Abgrenzungen zueinander zu schaffen.

3.1.1 Becken-Funktions-Komponenten

Um eine bessere Übersicht zu geben und die einzelnen Komponenten hinsichtlich ihres Einbringungsortes voneinander abzugrenzen, werden zunächst angelehnt an Mohn (2017) drei Becken-Funktions-Komponenten definiert: Einlaufbauwerk, Sedimentationskammer und Klärüberlauf (Bild 3.1). Die folgenden Abschnitte beschreiben die drei Komponenten-Gruppen genauer und definieren die gewählte weitere Klassifizierung.

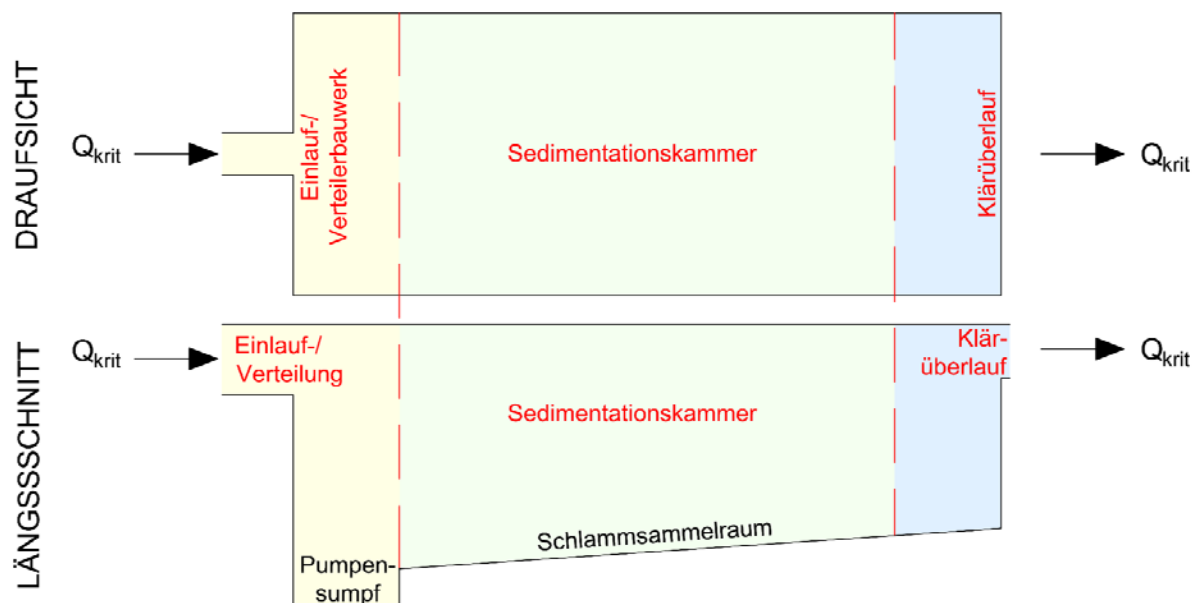


Bild 3.1: Prinzipskizze Becken-Funktions-Komponenten (nach Mohn 2017)

Einlaufbauwerk

Über das Einlaufbauwerk wird das Wasser dem Becken zugeführt. Dabei sollte das Bauwerk so konstruiert sein, dass eine gleichmäßige Verteilung sowie Ausrichtung der Strömung gewährleistet wird (DWA-A 166 2013). In dem hier vorliegenden Projekt wird als Einlaufbauwerk die Gesamtheit der dem Becken zufließenden Fließwege (Rohr, Gerinne oder Wehr) inklusive aller das Einlaufgeschehen direkt beeinflussenden Komponenten verstanden (z.B. Prallteller und Reflektoren im Einlaufbereich).

Angelehnt an Mohn (2017) wurden die Einlaufbauwerke klassifiziert. Eine genauere Übersicht bietet Bild 3.2. Unterschieden wird zwischen Gerinneeinläufen, Rohreinläufen sowie transversalen (seitlichen) Einläufen. Dabei können Rohreinläufe und Gerinneeinläufe mit einem einzelnen sowie mit mehreren Einlaufströmen ausgebildet werden. Der Zufluss aus transversalen Einläufen erfolgt meist über Wehre, die entweder über die gesamte Beckenbreite oder lediglich als schmale Wehr-Öffnungen ausgeführt werden. Auch Varianten mit transversalen Rohr- und Gerinneeinläufen wurden untersucht.

Eine weitere Unterteilung wird bezüglich der Symmetrie (mittig/ außermittig) vorgenommen. Gerinne- und Rohreinläufe können in der vertikalen mittig oder außermittig ausgebildet werden. Darüber hinaus erfolgt eine Unterscheidung der Höhenlage des Einlaufs (unten = untere Hälfte der Beckentiefe, Mitte = ca. Mitte der Beckentiefe, oben = obere Hälfte der Beckentiefe).

Insgesamt ist es erstrebenswert, dass der Einlaufbereich möglichst kurz ausgebildet wird, um möglichst wenig Volumen der Sedimentationskammern einzunehmen. Eine klare Definition über das Ende Einlaufbauwerk/ Beginn Sedimentationskammer besteht nicht.

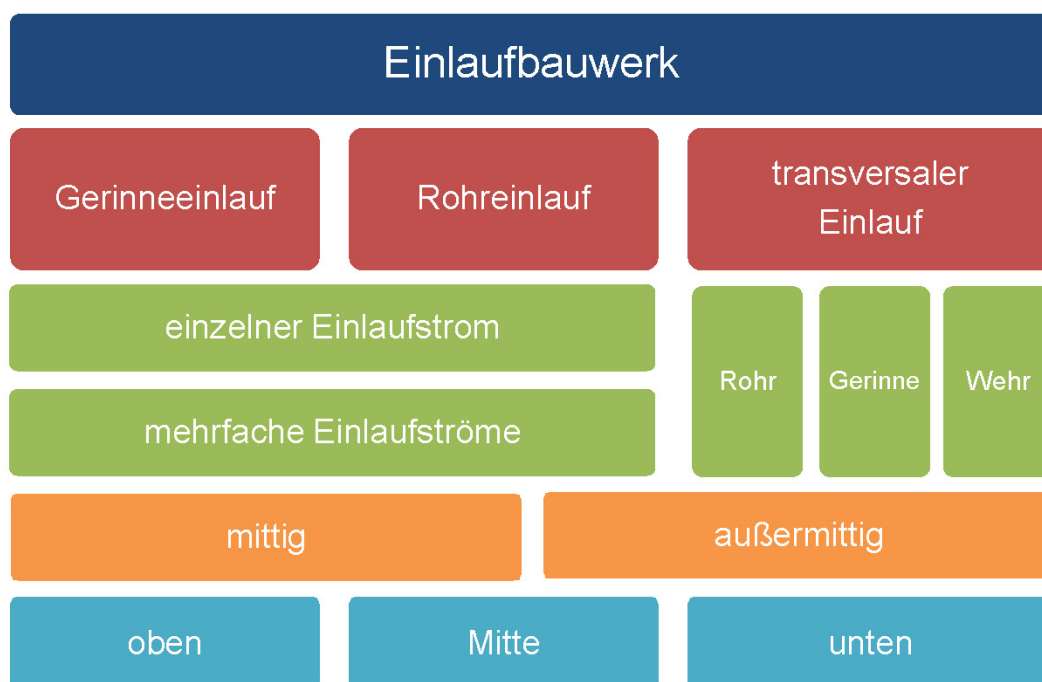


Bild 3.2: Klassifizierung der Einlaufbauwerke

Sedimentationskammer

Die Sedimentationskammer wird im Anschluss an das Einlaufbauwerk durchströmt. Ziel sollte dabei eine möglichst gleichmäßige („pfropfenartige“, Kapitel 2.1.3) Durchströmung sein, so dass ein Maximum des Beckenvolumens effektiv zur Sedimentation genutzt werden kann. Im Bereich der Sohle befindet sich der nur wenig durchströmte Schlammraum, in dem die sedimentierten Partikel akkumulieren (DWA-A 166 2013).

Klärüberlauf

Über den Klärüberlauf wird das aufgrund der Sedimentation feststoffärmere Wasser abgezogen. Er folgt auf die Sedimentationskammer. Der in der Theorie innerhalb der Sedimentationskammer optimal ausgebildete Fließquerschnitt wird am Klärüberlauf wieder verringert, so dass die Fließgeschwindigkeit erneut ansteigt. Ähnlich den Überlegungen zum Einlaufbauwerk sollte auch der Klärüberlauf den Sedimentationsraum möglichst wenig mindern.

Im Rahmen der Literaturstudie wurden lediglich Untersuchungen zu zwei verschiedenen Ausführungen des Klärüberlaufs zusammengetragen: klassische Überlaufwehre sowie Überlaufrinnen. Sonstige Varianten, wie sie in Mohn (2017) definiert werden, wurden nicht in der bestehenden Literatur gefunden und erfahren deshalb im weiteren Verlauf dieses Projekt keine Betrachtung.

3.1.2 Optimierungs-Komponenten

Die untersuchten Optimierungsansätze der Literaturstudie liegen in vielfältigen Ausführungen vor. Zur Katalogisierung werden sie, wie in den folgenden Abschnitten ausgeführt, eingeteilt:

Einlaufbauwerk

Die Optimierungs-Komponenten, die im Einlaufbereich angewendet werden, sind in Bild 3.3 dargestellt. Die Grafik ist optisch in 3 Stufen aufgebaut: Die erste Stufe (blau) zeigt die **Becken-Funktions-Komponente**. In der nächsten Stufe (rot) wird der grundsätzliche **Optimierungs-Ansatz** definiert. Für das Einlaufbauwerk lässt sich eine Einteilung in die konstruktive Gestaltung, quer zur Fließrichtung eingebrachte Leitelemente sowie Einbauten finden.

In der dritten Stufe (grün) erfolgt die Festlegung der **Optimierungs-Komponenten**. Zur konstruktiven Gestaltung gehören dabei Bewertungen der Höhenlage des Einlaufs, der Anzahl der Ströme bzw. die Anströmfläche, die generelle Gestaltung („Ausführung“) der Einlauföffnung sowie der Anströmwinkel.

Leitelemente können im Einlaufbereich sehr vielfältig angewendet werden. Möglich sind unter- und überströmte Prallwände, die sich über die gesamte Beckenbreite ziehen sowie perforierte Prallwände, die meist über den gesamten Querschnitt angebracht werden und Öffnungen verschiedenster Art aufweisen. Hinzu kommen Prallteller, die im Gegensatz zu Prallwänden nur einen kleinen Teil des Querschnitts einnehmen. Lamellenwände tragen durch ihre vielfachen Lamellenelemente zur Brechung der Strömung bei. Ähnlich fungieren Diffusoren, die jedoch gleichzeitig richtungsweisende Funktionskomponenten beinhalten.

Zuletzt sind die Einbauten zu nennen. Sie beinhalten alle weiteren Konstruktionen, die im Bereich des Einlaufs eingebracht werden.

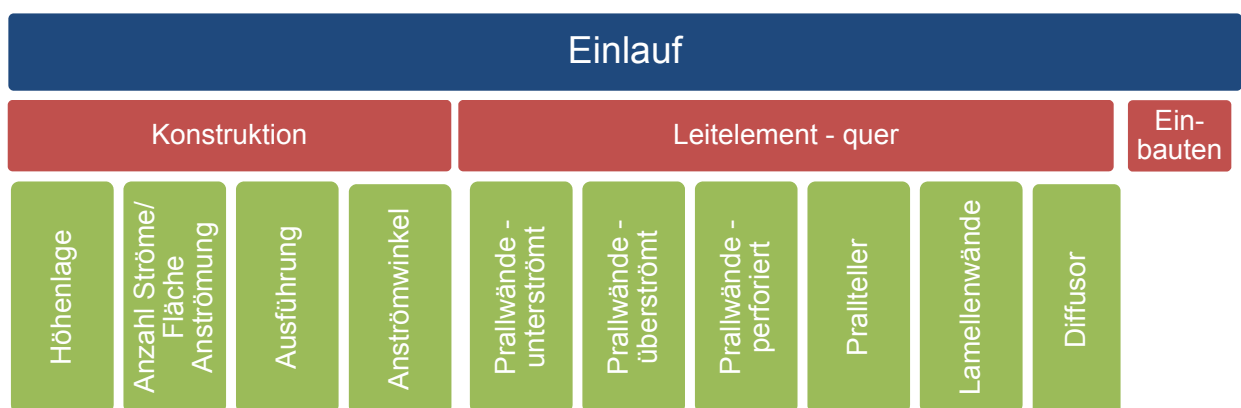


Bild 3.3: Klassifizierung Optimierungs-Komponenten: Einlauf

Sedimentationskammer

Die grundsätzliche Aufteilung der Optimierungs-Komponenten der Sedimentationskammer (Bild 3.4) entspricht der des Einlaufsbauwerk. Zum Feld der Konstruktion werden hier zunächst die Beckenabmessungen (oftmals Verhältnis Länge zu Breite L:B) gezählt. Darüber hinaus können Maßnahmen im Bereich der Sohle durchgeführt werden. Bei den quer zur Fließrichtung ausgerichteten Leitelementen entsprechen die über- und unterströmten sowie die perforierten Prallwände denen des Einlaufsbauwerk. Im Gegensatz dazu befinden sie sich jedoch nicht mehr im direkten Einlaufbereich. Neu definiert werden alternierende Leitwände, durch deren versetzte Einbringung sich ein mäandrierender Fließweg ergibt. Eben solche alternierenden Leitwände lassen sich auch längs der Fließrichtung anbringen. Zur weiterhin verbleibenden Kategorie der Einbauten werden hier Inseln oder Schwellen gezählt.

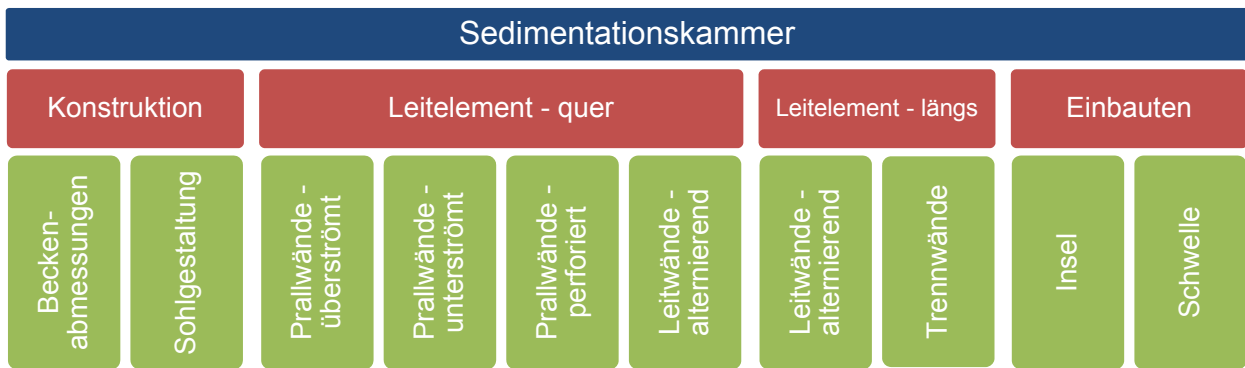


Bild 3.4: Klassifizierung Optimierungs-Komponenten: Sedimentationskammer

Klärüberlauf

Die betrachteten Komponenten des Klärüberlaufs sind in Bild 3.5 dargestellt. Grundsätzlich wird im Rahmen dieses Projektes nur zwischen Überlaufwehren und Überlaufrinnen unterschieden. Diese können jeweils frontal oder seitlich platziert werden.



Bild 3.5: Klassifizierung Optimierungs-Komponenten: Klärüberlauf

Becken gesamt

Die Literatursynthese beinhaltet auch Kategorien, die das gesamte Becken betreffen und nicht einer der vorherigen Kategorien klar zugeordnet werden konnten (Bild 3.6). Hierzu zählen die Positionierungen von Einlauf und Klärüberlauf zueinander sowie deren Höhenlage. Außerdem werden Kombinationen von Leitelementen betrachtet, die im gesamten Becken positioniert werden.

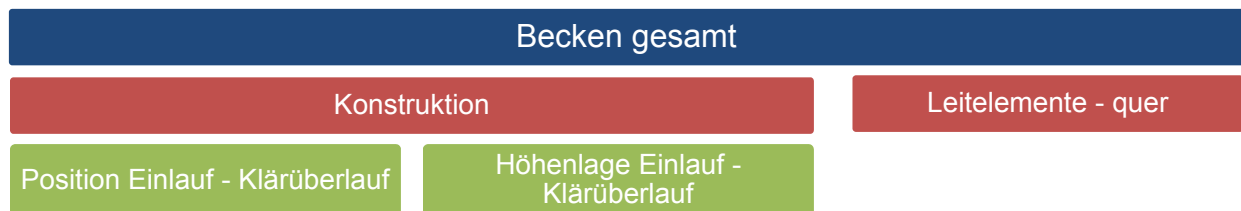


Bild 3.6: Klassifizierung Optimierungs-Komponenten: Becken gesamt

Hinweis

Die Definition der Optimierungs-Komponenten erfolgt angelehnt an Mohn (2017). Zu einer unterschiedlichen Definition, auf die an dieser Stelle hingewiesen sei, kommt es bei den dem Begriff der „Prallwände“. Wie in Bild 3.7 dargestellt, definiert (Mohn 2017) eine Prallwand als ein Objekt, das bis zur Sohle reicht und umströmt werden kann. Die hier genutzte Definition legt die Prallwand als ein über die gesamte Beckenbreite reichendes Leitelement fest. Dabei kann es je nach Ausführung unter- oder überströmt werden. Ferner ist eine Positionierung in allen Becken-Funktions-Komponenten möglich.

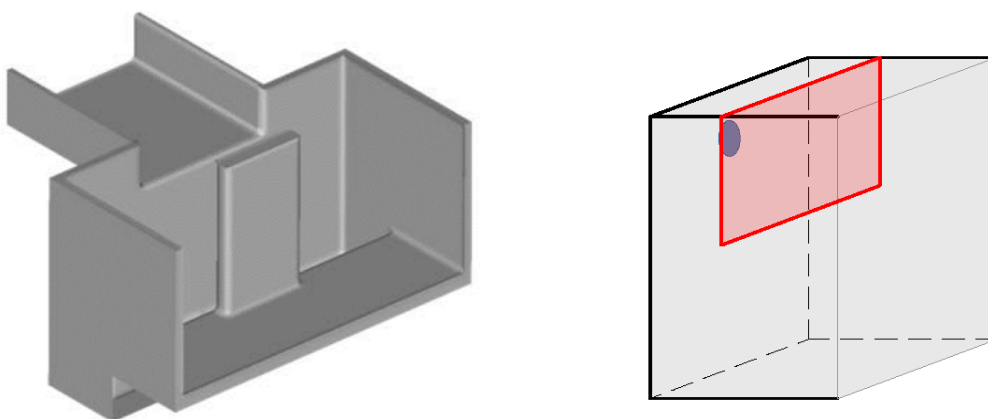


Bild 3.7: Definitionen einer Prallwand; links= nach (Mohn 2017), rechts=Definition dieses Projektes

3.2 Vorgehen der Literaturerhebung

Im Zuge der Literaturerhebung werden zahlreiche Studien zusammengetragen, die die Verbesserung der Durchströmungscharakteristik eines Sedimentationsbeckens untersuchen. Für alle Varianten erfolgt eine Klassifizierung in die im Kapitel 3.1 vorgestellten Becken-Funktions-Komponenten sowie Optimierungs-Komponenten.

In den Untersuchungen werden für die zahlreichen vorgestellten Verbesserungsmöglichkeiten Bewertungen auf Grundlage verschiedener Analysen gestellt:

- Wirkungsgrade und Rückhalteleistungen
 - absolut oder
 - relativ zu einer Ausgangsvariante
- Indikatoren der Durchströmung, beispielsweise
 - Kurzschlussströmungs-Faktor
 - Effektiv-Volumen-Rate
 - Effektives Volumen bzw. Rezirkulationsvolumen
 - Aufenthaltszeit
 - Verweilzeitverteilung
 - u.v.m.
- Strömungsbild
 - Optische Bewertung (Vorliegen von Kurzschlussströmung, Rezirkulationszonen, Turbulenzen u.v.m.)
 - Optischer Vergleich zwischen verschiedenen Varianten
 - u.v.m.

Diese nicht abschließende Aufzählung zeigt, dass es sich um Analysen verschiedenster Art und Güte handelt. Hinzu kommen die teils stark divergierenden Randbedingungen, die angesetzt wurden:

- Partikelfraktionen
- Oberflächenbeschickungen
- Beckengeometrien
- u.v.m.

Ferner können die entsprechend Kapitel 2.2 die analysierten Werte unterschiedlich ermittelt werden:

- Messung in-situ
- Messung am physikalischen Modell
- Berechnung eines numerischen Modells

Da die Indikatoren nicht direkt miteinander zu vergleichen sind und die reine Aufzählung der ermittelten Indikatoren vielmehr falsche Annahmen zur Folge haben könnten, wird im Rahmen dieses Projektes bewusst darauf verzichtet, die einzelnen Ergebnisse in den Katalog einzutragen. Hingegen werden die Resultate der Studien in ein normiertes Bewertungsschema übersetzt:

- ++ sehr gut geeignet
- + gut geeignet
- o ohne größere Effekte
- eingeschränkt geeignet
- nicht geeignet

Diese Angaben drücken jeweils die **Bewertung der Autoren** innerhalb der Studien aus und beinhalten **noch keine Wichtung** über die einzelnen Untersuchungen hinaus.

3.3 Bewertungs-Methodik der Literatursynthese

Die Literatursynthese hat zum Ziel eine möglichst allgemeine Aussage über die Wirksamkeit verschiedener Optimierungs-Komponenten abzugeben. Wie bereits erwähnt, beruhen die zahlreichen Forschungsergebnisse, die in Kapitel 4.1 zusammengetragen werden, auf Untersuchungen unterschiedlicher Art und Güte. Diese Diskrepanzen in wichtigen Parametern sollten auch weiterhin beachtet und die Ergebnisse differenziert betrachtet werden. So führten beispielsweise Stovin und Saul (1996) an, dass es nur aufgrund der Auswertemethodik zu konträren Ergebnissen kommen könne. In Bild 3.8 ist die resultierende Bewertungs-Methodik für die Literatursynthese dargestellt.

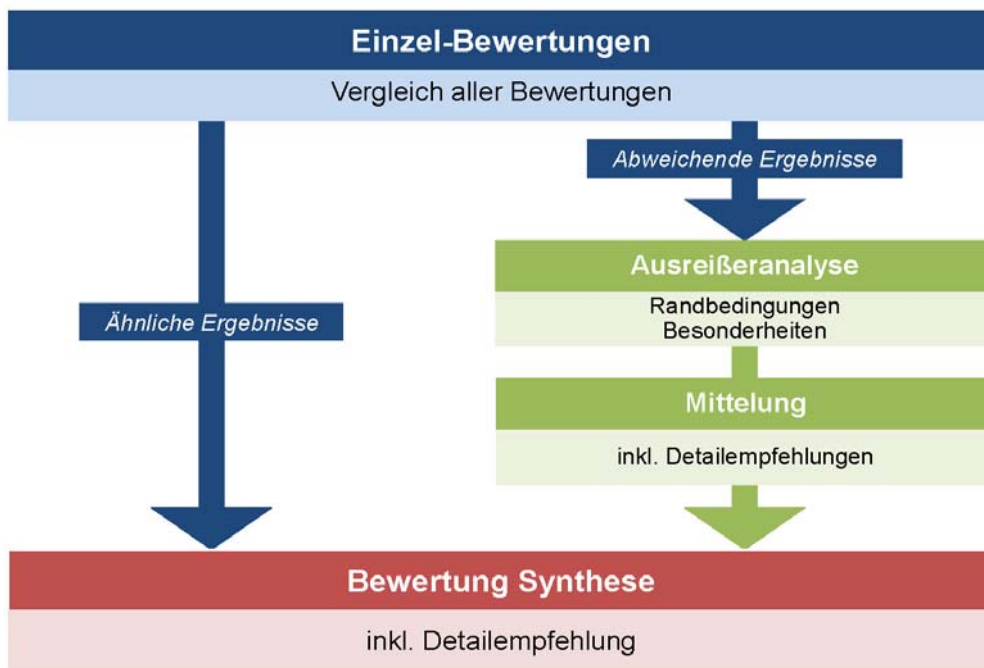


Bild 3.8: Schema Bewertungs-Methodik Literatursynthese

Alle Ergebnisse, die zu einer Optimierungs-Komponente erhoben wurden, werden miteinander verglichen. Liegen ähnliche Bewertungen in allen Literaturstellen vor, kann daraus direkt die Bewertung für die Synthese ermittelt werden. Ist dies nicht der Fall, muss zunächst eine mehrschichtige Analyse erfolgen. Dabei werden die Ausreißer nochmals genauer hinterfragt. Beispielsweise können hier andere Randbedingungen vorgelegen haben oder sonstige Besonderheiten eingeflossen sein. Ist dies erfolgt, wird eine Mittlung der verbleibenden Ergebnisse durchgeführt, die zur letztendlichen Bewertung führt.

Angegeben wird zunächst das so genannte „**Hydraulisches Potential**“. Es beinhaltet einerseits die hydraulische Eignung der jeweiligen Komponente. Andererseits soll sie jedoch auch eine Aussage dazu treffen, inwiefern die Durchströmungscharakteristik durch die Anwendung der jeweiligen Komponente grundlegend beeinflusst werden kann und wie sensibel die Bemessung dieser Komponente durchgeführt werden sollte. Falls vorhanden, werden darüber hinaus **Detailempfehlungen** gegeben, die die Anwendung näher definieren.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Erhebung bisheriger Forschungsergebnisse zur Bauweise von Regenklärbecken

4.1.1 Hinweise zur Literaturstudie

Zur besseren Übersicht werden zusätzlich zu den Erläuterungen des folgenden Kapitels 4.1.2 alle Ansätze in einem zentralen Katalog zusammengefasst (Anlage 1 und 2). Der Katalog liegt in zweierlei Darstellung vor. In Anlage 1 erfolgt die Sortierung chronologisch und entspricht der Reihenfolge der folgenden Erläuterungen. Die Spalten B und C nehmen die Autoren sowie das Erscheinungsjahr der jeweiligen Forschungsarbeit auf. In den Spalten D bis H erfolgt die genauere Einordnung der Einlaufkonstruktion, da diese einen erheblichen Einfluss auf das grundsätzliche Fließbild im Becken hat. Im zweiten Block (Spalten I-M) wird der Optimierungsansatz genauer definiert. Dazu erfolgt die Klassifizierung der Optimierungsvariante inklusive einer genaueren Beschreibung des spezifischen Beispiels. Im letzten Teil des Katalogs (Spalten O-S) erfolgt die Bewertung zur hydraulischen Eignung, die von den Autoren festgestellt wurde. In der zweiten Darstellung des Katalogs (Anlage 2) wird die Sortierung auf Grundlage der Optimierungsansätze durchgeführt und soll zum besseren Überblick für die spätere Literatursynthese dienen.

4.1.2 Literaturstudie

Kawamura und Lang (1986) stellten einen Vergleich zweier Klärüberläufe an. Zum einen untersuchten sie ein Überlaufwehr an der Stirnseite eines Rechteckbeckens. Zum anderen überprüften sie die Wirksamkeit von in das Becken ragenden Überlaufrinnen. Die Versuche wurden in situ durchgeführt. Becken mit Überlaufrinnen wiesen einen bis zu 15 % besseren Partikelrückhalt der in den Bereich des Klärüberlaufs gelangenden Partikel auf. Außerdem konnte ein etwas gleichmäßigeres Fließbild im Bereich des Überfalls festgestellt werden. Durch Wind verursachte Wellenbewegungen wurden reduziert. Dagegen führten die Autoren an, dass der Kostenaufwand für eine solche Konstruktion maßgeblich höher sei, als für einfache Überlaufwehre. Bezogen auf den Gesamtwirkungsgrad stellten sie keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Varianten fest und folgerten, dass Klärüberläufe dieser Art nicht entscheidend für die Wirksamkeit eines Sedimentationsbeckens seien.

Bretscher et al. (1992) nahmen in ihrer Arbeit die Ideen vorhergehender Studien auf und untersuchten den Einsatz von Leitelementen im Einlaufbereich sowie in der Sedimentationskammer.

Dabei betrachteten sie einerseits eine unterströmte Prallwand nach einem hochliegenden Gerinneinlauf. Zwar wurden keine konkreten Wirkungsgrade angegeben, jedoch stellten sie heraus, dass die Einlaufkonstruktion einen erheblichen Einfluss auf das Strömungsverhalten innerhalb des Beckens hätte. Dabei bestünde außerdem eine hohe Sensitivität gegenüber der Eintauchtiefe bzw. der Öffnungshöhe unter der Prallwand. Diese wären so zu wählen, dass sich keine zusätzlichen Turbulenzen bildeten. Insgesamt verwiesen die Autoren jedoch darauf, dass eine solche Wand sehr zu empfehlen wäre.

In einem weiteren Schritt untersuchten sie die Wirkung von Leitelementen in der Mitte der Sedimentationskammer in zwei verschiedenen Höhen ($H = 0,16 \times H$ und $H = 0,63 \times H$). Die Auswertung der Fließbilder (Bild 4.1) ergab, dass sich ein niedriges Blech nicht zwingend positiv auswirkte, da im Anschluss die Fließgeschwindigkeiten an der Sohle leicht erhöht waren. Der Einsatz des hohen Blechs ergab dagegen eine komplett andere Strömungscharakteristik. Hier entwickelten sich zwei separierte Kammern: ein hoch konzentriertes erstes Becken und ein niedrig konzentriertes zweites Becken, in dem niedrige Geschwindigkeiten herrschten und die Gefahr von Resuspension sehr niedrig war. Die Autoren werteten diese Variante als sehr positiv, sprachen sich jedoch für weiteren Forschungsbedarf bezüglich optimaler Höhe und Position aus.

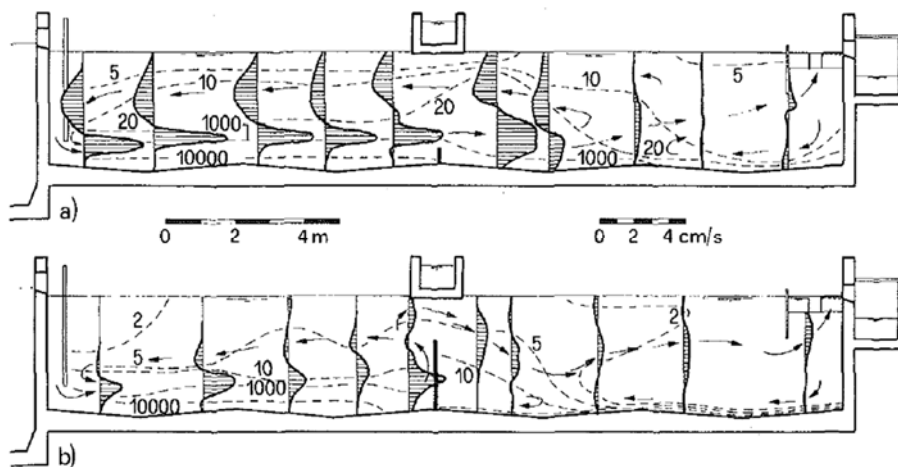


Bild 4.1: Geschwindigkeitsprofile der Becken mit einem tiefen (a) und hohen (b) Blech im Bereich der Sedimentationskammer (Bretscher et al. 1992)

Eine Betrachtung von zweierlei möglichen Fragestellungen führten Stamou und Noutsopoulos (1994) durch. Einerseits stellten sie Untersuchungen zur optimalen Höhenlage des Einlaufes an. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die ungünstigste Position in der Mitte der Beckentiefe liegt. Je weiter entfernt der Einlauf angebracht wurde, desto mehr verbesserten sich die Wirkungsgrade. Dabei kam die Anordnung in der unteren Hälfte zu den besten Ergebnissen. Gleichzeitig müsse bei dieser Konstruktion die Gefahr der Remobilisierung von bereits abgesetzten Partikeln berücksichtigt werden. Eine Anordnung im oberen Bereich sei auch möglich, jedoch müsse dann

eine Prallwand im Einlaufbereich installiert werden, um ungünstige Rezirkulationszonen zu vermeiden. Darüber hinaus betrachtete die Studie die Wirkung von Prallplatten im Einlaufbereich von hochliegenden Einlaufkonstruktionen. Laut Stamou und Noutsopoulos (1994) haben weder der Abstand noch die Eintauchtiefe einen maßgebenden Einfluss auf den Wirkungsgrad. Allerdings wurde empfohlen die Bleche mindestens so tief, wie die Unterkante des Einlaufs zu konstruieren. Gleichzeitig müsse genügend Abstand zwischen Sohle und Blech erhalten bleiben, damit hohe Geschwindigkeiten verhindert würden. Nähere Angaben zur Konstruktion des Einlaufs werden nicht gemacht.

Ahmed et al. (1996) führten Versuche mit einem physikalischen Modell durch. Sie variierten die Eintauchtiefe ihrer Prallwand zwischen 33 und 83 % sowie die Lage zwischen 5 und 60% der Beckenlänge. Auch hier war bei größerem Abstand zum Einlauf die Abnahme der Rückhalteleistung zu beobachten. Bei sehr großen Abständen (60% Beckenlänge) konnten sowohl vor als auch nach dem Blech große Rezirkulationen festgestellt werden. Mit sinkender Öffnung unter dem Blech kam es bei allen untersuchten Positionierungen zu einer Abnahme der Rückhalteeffizienz. Die schlechteste Konfiguration (83% Eintauchtiefe, 60% Beckenlänge) konnte somit keinerlei Verbesserung zeigen, sondern vielmehr eine Erhöhung der Rezirkulationsvolumina. Die von den Autoren präferierte Variante hatte nur 5% der Beckenlänge Abstand vom Einlauf und nur 33% Eintauchtiefe. Auch bei einer Positionierung bei 15% der Beckenlänge ergaben sich noch gute Leistungen.

Stovin und Saul (1996) stellten Untersuchungen an, um den Wirkungsgrad von Becken mit verschiedenen Beckenabmessungen L:B zu bestimmen. Dabei wählten sie zwei verschiedene Methoden der Wirkungsgrad-Bestimmung, die jeweils auf einer CFD-Simulation beruhte: 1. Projizieren von Sohl-Schubspannungen auf die mögliche Absetzwirkung; 2. Stochastische Bahnverfolgung von Partikeln. Insgesamt war zu erkennen, dass längere Becken auch bessere Wirkungsgrade mit sich zogen, jedoch ergaben sich im Rahmen der Auswertung teils konträre Ergebnisse (Bild 4.2), so dass eine Empfehlung allein anhand der Wirkungsgrade nicht möglich war. Die Autoren führten an, dass dies darauf zurückzuführen wäre, dass die Wirkungsgrade unterschiedliche Phänomene beinhalteten und keine allumfassende Aussage gäben. Sie rieten deshalb stets zur mehrschichtigen Betrachtung mit zusätzlichen physikalischen oder in situ-Versuchen.

In einer folgenden Veröffentlichung (Stovin und Saul 2000) bekräftigten die Autoren diese Empfehlung. Zusätzlich untersuchten sie die Wirkung von Quer- und Längsneigung der Beckensohle mit den gleichen Methoden. Es konnte zwar keine eindeutige Wirkung dieses Optimierungsansatzes beobachtet werden, jedoch wurde auf die betrieblichen Vorteile verwiesen.

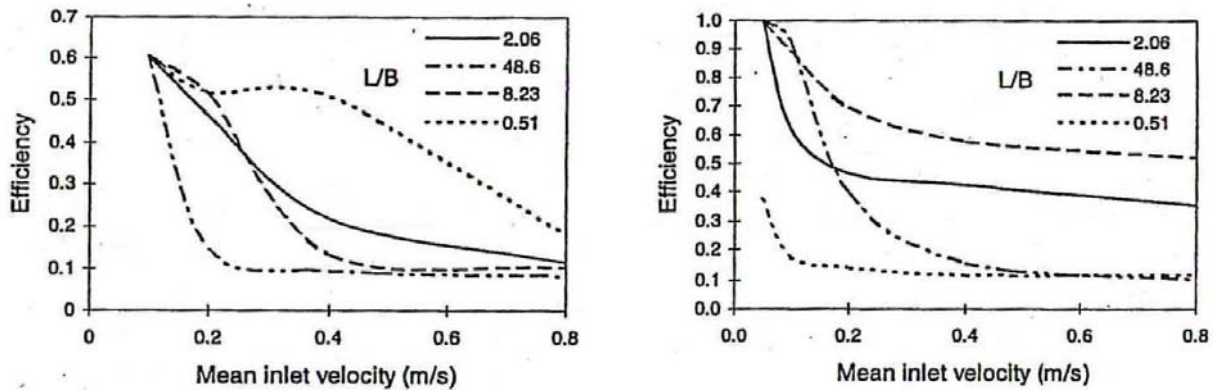


Bild 4.2 Einfluss des Verhältnisses L:B auf die Rückhalteleistung; links=Auswertung der Sohl Schubspannungen, recht=Auswertung der Partikelbahnen (Stovin und Saul 1996)

Zhou et al. (1997) überprüften die Wirksamkeit von Modifikationen in allen Beckenbereichen mithilfe von in situ-Versuchen sowie mithilfe eines numerischen Modells. Der Einlauf in das bestehende Becken erfolgte über zehn hochliegende Öffnungen. Die erste Variante sah die Positionierung einer unterströmten Prallwand vor. Diese bewerteten die Autoren als besonders wichtig und effektiv, um die kinetische Energie der Einlaufströmung zu verringern. In einem weiteren Schritt wurden verschiedene Möglichkeiten von Prallwänden im Bereich der Sedimentationskammer überprüft. Es stellte sich heraus, dass sowohl undurchlässige, als auch perforierte Elemente zu empfehlen wären. Es war jedoch zu beobachten, dass insbesondere bei höheren Beschickungen die perforierten Bleche ein geringeres Maß an Turbulenz und Kurzschlussströmung aufwiesen. Die Modifikation im Bereich des Klärüberlaufs sah die Installation von vier Überlaufrinnen längs des Beckens auf einem Drittel der Beckenlänge vor. Zwar konnte aufgrund der geringeren Schwellenbeschickung eine Verbesserung der Rückhalteleistung beobachtet werden, jedoch werteten die Autoren diese Variante als nicht zwingend notwendig, da insbesondere die Wirksamkeit eher gering wäre in Hinblick auf den hohen Kostenaufwand.

In einer weiteren Studie (Persson et al. 1999, Persson 2000, Persson und Wittgren 2003) wurden zahlreiche Beckenkonstruktionen bezüglich ihrer Strömungscharakteristik untersucht. Dabei wurden der Anteil von Kurzschlussströmung, das effektive Sedimentationsvolumen sowie die Entwicklung einer Pfropfenströmung bewertet. Die Auswertung erfolgte mit numerischen Modellen. Die Autoren folgerten, dass insbesondere das Verhältnis von Länge zu Breite (L:B) sowie die Einlaufkonstruktionen einen deutlichen Einfluss auf das Rückhaltevermögen eines Beckens haben. So konnte beobachtet werden, dass Becken mit einem hohen Verhältnis L:B einen geringen Anteil an Kurzschlussströmung aufwiesen, das effektive Volumen recht hoch war und in weiten Teilen sich eine pfropfenähnliche Strömung ausbildete. Becken mit einem geringen Verhältnis L:B zeigten insbesondere im Anteil der Kurzschlussströmung hohe Werte. Des Weiteren wurde die Positionierung von Einlauf und Auslauf variiert. Es zeigte sich, dass Komponenten

möglichst weit voneinander entfernt positioniert werden sollten. Unpassende Kombinationen, beispielsweise ein seitlicher Auslauf o.ä., würden den Wirkungsgrad sogar maßgeblich herabsetzen. Besonders positiv wurde außerdem die Anströmung über die gesamte Beckenbreite mithilfe eines Wehrs bewertet. Durch die gleichmäßige Verteilung über den Fließquerschnitt konnte in weiten Teilen des Beckens eine Pfropfenströmung festgestellt werden. Die Anteile von Kurzschlussströmung waren gering. Zuletzt überprüften die Autoren die Positionierung verschiedener Beckeneinbauten und Leitelemente. Zum einen wurde das Becken mit alternierenden Leitwänden ausgestattet, durch die der Fließweg deutlich verlängert wurde. Hier konnten in allen Bereichen sehr gute Werte festgestellt werden. Auch die Implementierung von Schwellen oder Inseln ist laut der Autoren zu empfehlen. Dabei sollte jedoch auf eine mittige Platzierung geachtet werden. Die Höhenlage der gewählten Zu- und Abläufe konnte nicht genauer identifiziert werden.

Fornshell (2000) veröffentlichte einen Leitfaden zur Bemessung von Sedimentationsbecken in der Fischeinzucht. Für die Einlaufkonstruktion empfahl er die Wahl eines Wehrüberfalls, um die Eintrittsfläche möglichst groß zu halten. Fornshell war der Ansicht, dass eine Wehrlänge von 85% der Beckentiefe am effektivsten wäre. Kleine Einlauföffnungen (z.B. Rohre) wären zu vermeiden.

Der Eignung einer unterströmten Prallwand widmeten sich Yoon und Lee (2000). Sie kamen zu dem Ergebnis, dass im Anschluss an einen Gerinneeinlauf eine Prallwand im Abstand von 35 bis 40% der Beckenlänge die besten Wirkungsgrade mit sich bringt. Bei Positionen von minimal 7% bis maximal 50% der Beckenlänge könnte man von Verbesserungen gegenüber dem Zustand ohne Einbauten rechnen. Es lag jeweils eine Eintauchtiefe von 40 bis 50% vor.

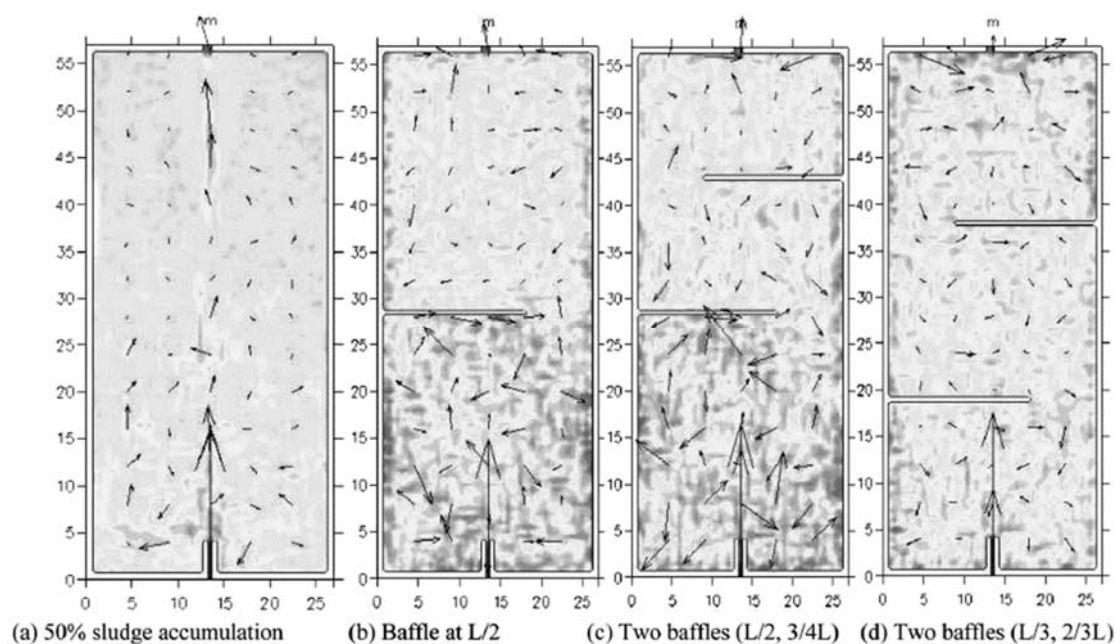


Bild 4.3: Vektorfelder der Fließgeschwindigkeiten für unterschiedliche Einbringungen von Leitwänden (Vega et al. 2003)

Vega et al. (2003) untersuchten die Güte des Einsatzes von CFD-Modellen zur Analyse von hydrodynamischen Prozessen im Becken. Dazu stellten sie eine Reihe von Beckenvarianten auf und analysierten sie hinsichtlich der Aufenthaltszeit und der Rückhalteleistung. Die Beckenvarianten sahen verschiedene Verhältnisse L:B, verschiedene Positionierungen von Ein- und Auslauf sowie den Einsatz von quer zur Fließrichtung ausgerichteten Leitblechen vor. Alle Ergebnisse wurden mit Messergebnissen von (Sánchez 2001) verglichen. Die Auswertungen zeigten, dass alle drei Optimierungsansätze bei richtiger Anwendung positive Auswirkungen auf das Beckenverhalten haben könnten. So wiesen die Becken mit einem Seitenverhältnis L:B = 2:1 deutlich bessere Wirkungsgrade als quadratische Becken auf. Würde man hier jedoch ein Leitblech in der Beckenmitte implementieren, könnte die Rückhalteleistung zusätzlich verbessert werden. Dieser Effekt war noch klarer zu erkennen, wenn zwei alternierende Leitbleche in den Becken (L:B = 2:1) angebracht wurden. Hier erwies sich der gleichmäßige Abstand der Leitbleche (Positionierung bei 1/3 und 2/3 der Beckenlänge) als beste Variante. In Bild 4.3 sind die zugehörigen Vektorfelder der Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die gleichmäßige Anordnung der Leitwände (d) das gleichmäßigste Strömungsbild mit sich bringt. Im Gegensatz zum Zustand ohne Einbauten (a) ist mit deutlich weniger Kurzschlussströmung zu rechnen. Darüber hinaus stellten die Autoren fest, dass die Rückhalteleistung der Becken durch die Positionierung von Ein- und Auslauf in entgegengesetzten Ecken gesteigert werden konnte.

In einer weiteren Studie, die Oca et al. (2004) führten, wurden transversale Einläufe mit schmalen Wehröffnungen in zwei Konfigurationen mit einem mittig angeordneten Rohrzulauf verglichen. Dieser zeigte in der Auswertung der numerischen Simulation die schlechtesten Ergebnisse. Es entwickelten sich große Rezirkulationszonen. Die beiden Varianten der Wehröffnungen (ein und drei Öffnungen) ergaben insgesamt bessere Wirkungsgrade. Dabei erwies sich die Lösung mit drei Öffnungen als die beste. Es bildete sich in großen Bereichen des Beckens eine Pfropfenströmung. Das Fließbild mit steigender Zahl der zufließenden Öffnungen konnte sich gleichmäßiger entwickeln.

In der Studie, die Huggins et al. (2005) durchführten, wurde die Optimierung von Fischzuchtbecken untersucht. Sie besitzen im hinteren Bereich ebenfalls Zonen, in denen es zur Akkumulation von Partikeln kommen soll. Sie werden durch Rechenapparaturen vom restlichen Becken getrennt, so dass auch keine Fische anzutreffen sind. Es ist davon auszugehen, dass diese Rechen ähnlich einer Lamellenwand fungieren. Die Anströmung zum beruhigten Bereich erfolgte über den gesamten Querschnitt. Die Autoren entwarfen mehrere Varianten der Ausgestaltung des Klärüberlaufs sowie strömungsberuhigender Leitwände. Eine erste Möglichkeit sah die Anordnung einer unterströmten Prallwand vor, der mit etwas Abstand der Rechen folgte.

Diese Möglichkeit ergab nur geringfügige Verbesserungen des Stoffrückhalts gegenüber der Ausgangssituation, was auf recht hohe Fließgeschwindigkeiten unter dem Blech zurückzuführen war. Wurde diese Konstruktion in Verbindung mit seitlich angeordneten Überlaufwehren angewendet, die fast bis an die Prallwand heranreichten, waren sogar sehr schlechte Wirkungsgrade zu beobachten. Diese wurden für die seitlichen Überlaufwehre deutlich besser, wenn die Anströmung des Abschnitts des Klärüberlaufs lediglich eine Öffnung auf der Beckensohle vorsah. Hier kam es zu den besten Ergebnissen. Die Varianten mit frontaler Positionierung der Überlaufwehre konnten insgesamt nur mittelmäßige Rückhalteleistungen erbringen. Ähnliches war bei der Integration des Rechens in den unterströmten Querschnitt zu beobachten.

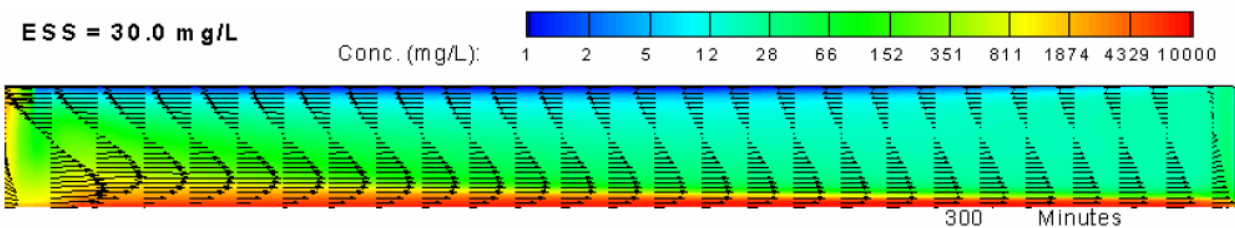
Auch Thaxton und McLaughlin (2004, 2005) implementierten in ihrer Studie ein Leitelement quer zur Fließrichtung über den gesamten Querschnitt. Dazu nutzten sie durchlässige Materialien (ein Geotextil, ein mehrfach gefalteter PVC-Baumschutz und Jute-Stoff) und brachten diese in drei Lagen mit etwa einem Meter Abstand in der Mitte des Beckens an. Bei allen Varianten konnten die Autoren eine deutlich gleichmäßigere Strömung, weniger Turbulenz sowie höhere Absetzgrade im Gegensatz zum Ausgangszustand erkennen. Insgesamt erbrachte dabei der Jute-Stoff die besten Ergebnisse, da er den geringsten Anteil an Rezirkulationsvolumen aufwies. Eher schlecht dagegen fungierte das Geotextil aufgrund recht großer turbulenter Zonen.

Agunwamba (2006) untersuchte eine ähnliche Fragestellung. Auch er variierte die Höhenlage des Rohrein- und -auslaufs. Dabei konzentrierte er sich insbesondere auf den Anteil von Kurzschlussströmung. Die Untersuchung erfolgte am physikalischen Modell. Dieses lag in drei verschiedenen Verhältnissen L:B vor (2:1, 3:1 und 4:1) vor. Zunächst einmal erkannte der Autor einen Zusammenhang von abnehmender Kurzschlussströmung bei zunehmendem Verhältnis L:B. Außerdem stellte er bei zunehmender Geschwindigkeit im Becken höhere Anteile an Kurzschlussströmung fest. Bei dem Vergleich verschiedener Höhenlagen der Ein- und Auslaufkonstruktionen kam er zu ähnlichen Ergebnissen wie Wang et al. (2014). Je größer der Abstand zwischen den Komponenten war, desto weniger Kurzschlussströmung konnte beobachtet werden. Auch er wertete die Kombination Einlauf unten/ Auslauf oben am positivsten. Von einer Anordnung auf der gleichen Ebene riet er ebenfalls ab.

McCorquodale et al. (2006) variierten die Gestaltung von Einlauf, Sedimentationskammer und Klärüberlauf. Die Auswertung erfolgte mithilfe einer CFD-Simulation. Im Einlaufbereich wurde eine unterströmte Prallwand positioniert. Deren Wirkung bewerteten die Autoren als allgemein positiv. Der Einbau einer unterströmten Prallwand bei etwa 40% der Beckenlänge mit zusätzlicher Perforation ergab zwar eine Vergleichmäßigung der Strömung gegenüber dem Becken ohne Einbauten, jedoch waren aufgrund der geringen Öffnungshöhe unter dem Blech teils hohe

Geschwindigkeiten zu messen. Die Gefahr einer Resuspension der abgesetzten Partikel wuchs. Die größte Effizienzsteigerung war durch den Einsatz von seitlichen Überlaufrinnen zu beobachten, die fast bis zur Mitte des Beckens geführt wurden. Alle drei Varianten wurden einzeln sowie in Kombination ausgewertet. Einen guten Überblick über die entstehende Durchströmungskarakteristik gibt Bild 4.4. Dargestellt sind die Konturplots der Feststoffkonzentration sowie die Strömungsprofile. Deutlich zu erkennen ist die Minderung der Geschwindigkeiten, die insbesondere aufgrund der unterströmten Prallwand und der perforierten Prallwand entsteht.

Ausgangszustand:



Unterströmte Prallwand Einlauf perforiertes Blech SediKammer, seitliche Überlaufrinnen:

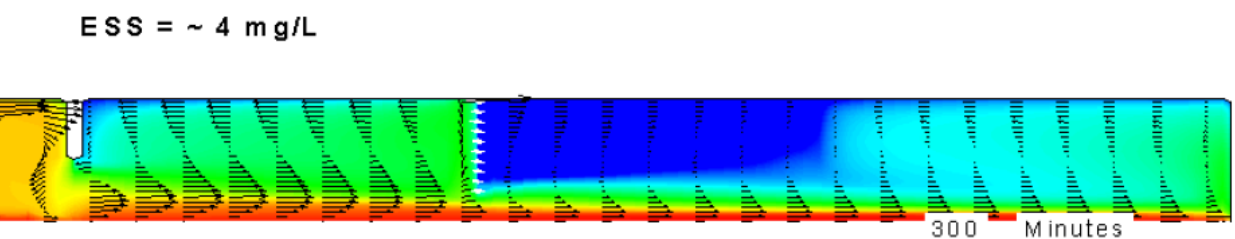


Bild 4.4: Konturplot der Feststoffkonzentration mit Geschwindigkeitsprofilen (nach McCorquodale et al. 2006)

In ihrer Studie untersuchten Kris und Ghawi (2007) zum Einen den Einfluss einer unterströmten Prallwand auf das Strömungsbild eines Sedimentationsbeckens der Trinkwasserbehandlung. Die Prallplatte wurde im Einlaufbereich installiert. Der Zufluss erfolgte durch Öffnungen eines über die Beckenbreite installierten Rohres. Als Ergebnis waren über 50% geringere Abflusskonzentrationen zu beobachten. Darüber hinaus tauschten die Autoren den Wehrüberfall an der Stirnseite durch drei längs des Beckens ausgerichtete Überlaufrinnen aus. Diese brachten eine signifikante Verbesserung der hydraulischen Effizienz des Beckens, die die Wirkung der Prallwand sogar überstieg. Die Auswertung erfolgte durch Messungen vor Ort sowie mit einem numerischen Modell.

In einer Folgestudie (Ghawi und Kris 2008, 2009) implementierten die Autoren zusätzliche Prallwände im Bereich der Sedimentationskammer. Zum einen wurden perforierte Bleche untersucht. Diese konnten laut der Untersuchungen zu einer weiteren Vergleichmäßigung der Strömung beitragen und den Wirkungsgrad verbessern. Noch größere Effizienz wiesen jedoch konventionelle Stahlbleche auf, die als unterströmte Leitelemente im Becken positioniert wurden und auch bei hohen Durchflüssen den Wirkungsgrad halten konnten.

Den Ansatz einer unterströmten Prallwand zur Verbesserung der Absetzeigenschaften eines Regenklärbeckens verfolgten auch Wang et al. (2007, 2008). Sie variierten die Eintauchtiefe der Platten zwischen 0,6 und 1,4 m. Das Becken besaß insgesamt vier Zulauföffnungen und hatte eine Tiefe von 2,4 m. Der Abstand Prallwand/Einlauf betrug 0,5 m ($1/40 \times L$). Die besten Ergebnisse waren bei einer Eintauchtiefe von 0,8 m ($0,33 \times H$) erkennbar. Auch eine Eintauchtiefe von 0,6 m ($0,25 \times H$) erbrachte gute Ergebnisse. Im Vergleich dazu konnten bei den Varianten mit 1,0 und 1,2 m Eintauchtiefe ($0,4-0,5 \times H$) die geringsten Rückhalteleistungen beobachtet werden.

In seiner Studie nutzte He (2008) ein CFD-Modell, um ein ursprünglich als Lamellenklärer konzipiertes Becken zu optimieren. Dazu entfernte er die Lamellen und verglich den ursprünglichen Wirkungsgrad mit vier Optimierungsvarianten des Einlaufbereichs. Die erste Variante sah eine unterströmte Prallwand vor, die als U-Profil ausgebildet, die Strömung hinter der Prallwand vertikal nach oben führte. Die Wirkung war nur bedingt zufriedenstellend, da sich im oberen Bereich des Beckens eine Rezirkulationszone bildete und somit das Beckenvolumen unzureichend ausgenutzt wurde. Die zweite Lösung – Öffnungen in der unteren Hälfte der Prallwand – brachte zwar bessere Ergebnisse, jedoch waren auch diese nicht als zufriedenstellend zu betrachten. Die dritte Variante fügte hinter den Öffnungen horizontale Leibleche hinzu. Diese hatten zur Folge, dass sich das Fließbild sehr viel gleichmäßiger im Becken entwickelte, so dass die Rezirkulationen minimal waren. Nur die vierte Variante, die die Anordnung eines Abscheidetrichters für grobe Partikel im Einlaufbereich vorsah, wies noch bessere Absetzleistungen auf. Diese wären sogar mit der ursprünglichen Ausbildung als Lamellenklärer zu vergleichen.

Die Studie von López et al. (2008) fokussierte sich ebenfalls auf die Einlaufgestaltung. Mithilfe von Tracer-Versuchen und der Auswertung der Verweilzeitverteilung untersuchten die Autoren einerseits die Höhenlage eines Rohreinlaufs (oben/ Mitte/ unten). Bei einem hochliegenden Einlauf wurden sehr große Anteile einer Kurzschlussströmung beobachtet. Diese war bei einem mittig angeordneten Einlauf zwar deutlich geringer, jedoch entwickelten sich hier große Turbulenzen, die ein effektives Absetzen verhinderten. Ein tiefliegender Einlauf ergab die besten Ergebnisse hinsichtlich der Beckenausnutzung und der Verweilzeiten und wurde von den Autoren deshalb empfohlen. Andererseits wurde der Ansatz einer perforierten Prallwand mit 15 Öffnungen näher untersucht. Mit ihm konnten jedoch nicht die gewünschten Ergebnisse erreicht werden aufgrund geringerer kinetischer Energie. Stattdessen waren große Rezirkulationszonen zu erkennen.

Die Bewertung, die Tamayol et al. (2008) bezüglich der Höhenlage des Rohreinlaufs trafen, beruhte auf einer numerischen Simulation, die mit den Ergebnissen eines physikalischen Versuchs

von Stamou et al. (1990) verglichen wurde. Demnach ergab sich die größte hydraulische Effizienz – geringer Anteil an Rezirkulation und Kurzschlussströmung – für einen mittig angeordneten Einlauf. Hoch- und tiefliegende Einläufe erbrachten dagegen deutlich geringere Wirkungsgrade, wobei die schlechtesten Werte bei einem hochliegenden Einlauf beobachtet wurden. Die Stromlinien der drei möglichen Konstruktionen sind in Bild 4.5 dargestellt. Rezirkulationszonen sind deutlich erkennbar.

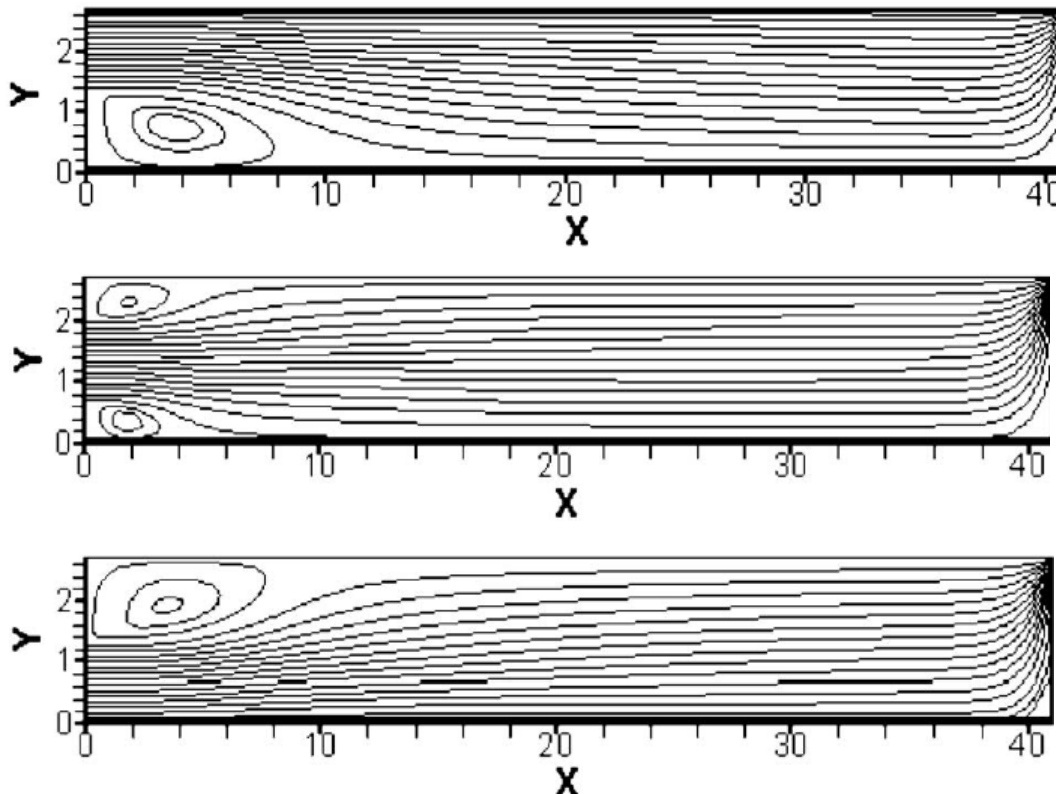


Bild 4.5: Stromlinien für einen obenliegenden, mittig liegenden sowie tiefliegenden Einlauf (Tamayol et al. 2008)

Tamayol et al. (2008) variierten in einem zweiten Teil ihrer Studie die Position von quer ausgerichteten Prallwänden: Nähe Einlauf/ etwa Mitte Becken/ Nähe Klärüberlauf, jeweils oben und unten. Die Höhe der Bleche lag bei $0,33-0,5 \times H$. Der Zulauf des Beckens war hochliegend. Die Auswertung erfolgte mithilfe einer CFD-Simulation. Die Autoren merkten an, dass die Einbringung von Leitelementen stets sorgfältig gewählt werden sollte. Optimal sei demnach eine Platzierung in der Mitte einer Rezirkulationszone, da somit das Sedimentationsvolumen am effektivsten ausgenutzt werden könne. Die Untersuchungen ergaben, dass sich nicht alle Positionen positiv auf die Absetzleistung auswirkten. So hatten insbesondere die Bleche, die in der Nähe des Klärüberlaufs angeordnet wurden, eine Vergrößerung des Rezirkulationsvolumens zur Folge. Lediglich die beiden Bleche im Einlaufbereich brachten deutlich positive Auswirkungen mit sich. Eine Platzierung in der Beckenmitte könne laut der Autoren im unteren Bereich positiv

sein, bei Anbringung oben müsse man jedoch in den meisten Fällen ebenfalls von einer Minderung des effektiven Volumens ausgehen.

Einen weiteren Beitrag zum Einsatz mehrerer Leitelemente im Becken leisteten Al-Sammarraee et al. (2009). Sie platzierten zwei, drei oder vier unterströmte Prallwände in einem Becken und untersuchten das Fließbild sowie die Partikelrückhalteleistung im Rahmen einer numerischen Simulation. Ihrer Beobachtungen nach agieren die einzelnen Bleche als Barriere, die die Horizontalströmungen unterbrechen, Horizontalgeschwindigkeiten mindern und damit die Sedimentationsgeschwindigkeiten erhöhen. Es zeigte sich, dass eine zunehmende Zahl eingesetzter Bleche zu besseren Ergebnissen führte. Bei 4 Blechen beispielsweise konnte eine Verbesserung von 9% zum Zustand ohne Bleche erreicht werden. In Bild 4.6 sind die Partikel-Bahnen für ein Becken mit drei und vier Prallwänden dargestellt. Es wird deutlich, dass sich bei dem Einbringen einer höheren Zahl von Prallwänden weniger Turbulenzen ergeben.

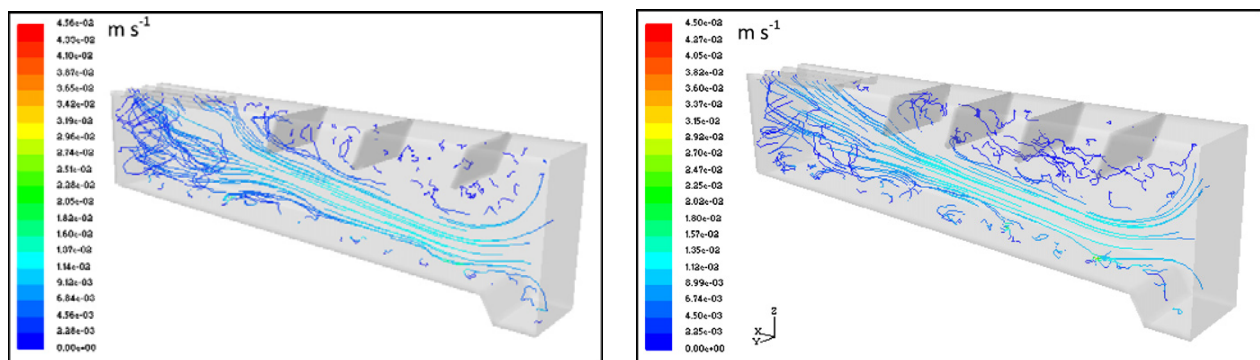


Bild 4.6: Partikel-Bahnen in einem Becken mit drei und vier Prallwänden (Al-Sammarraee et al. 2009)

He und Marsalek (2009) optimierten im Rahmen ihrer Untersuchung ein bestehendes Regenbecken, das längs der Fließrichtung mit Trennwänden ausgestattet war. Die erste Variante sah den Umbau des Einlaufs zu einem transversal anströmenden Gerinne vor. Die Analyse des Strömungsbildes aus einer CFD-Simulation ergab, dass sich die Strömung nicht gleichmäßig auf die drei Stränge aufteilte, sondern vornehmlich in den hintersten Strang führte, in dem folglich ein hohes Maß an Turbulenz herrschte. Zur Optimierung wurden quer zur Fließrichtung schräg angeordnete Leitbleche in den Einlaufbereich implementiert. Dies führte zu einer deutlich gleichmäßigeren Aufteilung in die drei Stränge. In einer zweiten Variante positionierten die Autoren den Einlauf am anderen Ende des Beckens und beschickten damit einen der drei Stränge. Am Ende dieses Strangs kam es zur Umkehrung der Fließrichtung und zur Aufteilung der Strömung auf die beiden weiteren Stränge. Probleme bereiteten in diesem Fall stark ausgeprägte Wirbel, die sich im zweiten Gerinne entwickelten. Um ebendiese zu verhindern implementierten die Autoren erneut Leitbleche zur Strömungslenkung. Im Rahmen der Studie wurden damit zwar

gleichmäßigere Fließbilder erbracht, jedoch sahen die Autoren darin weiteres Verbesserungspotential.

Eine einfache Untersuchung zur Gestaltung von Ein- und Auslauf führte Janssen (2009) durch. Ähnlich Carlston (2015) beschrieb er, dass die Einlaufkonstruktion über ein möglichst breites Feld reichen solle, im besten Fall über die gesamte Beckenbreite. Folglich wären Roheinläufe ungeeignet. Wehre über die gesamte Breite wären stattdessen zu empfehlen. Gleiches empfahl der Autor für den Auslaufbereich.

Einen weiteren Beitrag zur Wirkung von überströmten Prallwänden leisteten Razmi et al. (2009). Sie veränderten den Abstand des Blechs zum tiefliegenden Rohreinlauf. Die besten Ergebnisse der physikalischen und numerischen Untersuchungen ergaben sich für ein Blech im Abstand von $0,125 \times L$ zum Einlauf. Insgesamt lagen Verbesserungen zum Ausgangszustand bei Abständen zwischen $0,1-0,15 \times L$ vor. Im Vergleich dazu wurde der Wirkungsgrad bei fehlerhafter Positionierung negativ beeinflusst. Eine Ursache könnte beispielsweise ein Leitblech sein, das sich in der Mitte des Beckens befindet. Im Optimalfall solle man die Position so wählen, dass das Blech in der Mitte der Rezirkulationszone sei.

In einer Folgestudie positionierten Razmi et al. (2013) zunächst eine unterströmte Prallwand hinter einem hochliegenden Rohreinlauf. Dieser folgte wiederum ein auf der Sohle befestigtes Blech in verschiedenen untersuchten Ausführungen. Die besten Ergebnisse wurden bei einer Höhe von $0,32 \times H$ und einem Abstand von der unterströmten Prallwand von $0,15 \times L$ erzielt. Positive Ergebnisse wären auch bei einer Positionierung von $0,1-0,2 \times L$ und Höhen von $0,25-0,3 \times H$ zu beobachten. Ein Blech von $0,5 \times L$ konnte den Wirkungsgrad des Beckens allerdings nicht positiv beeinflussen.

Stamou et al. (2009) belegten den Nutzen einer unterströmten Prallwand im Einlaufbereich eines hochliegenden Rohreinlaufs. Sie empfahlen eine Öffnungshöhe unterhalb des Blechs von etwa $1/6$ der Beckenhöhe. Damit würde sichergestellt, dass durch die Einengung des Fließquerschnitts keine kritischen Turbulenzen erzeugt würden, die eine Resuspension bereits sedimentierter Partikel zur Folge hätten. Gleichzeitig könnte aber die kinetische Energie so weit reduziert werden, dass eine effektive Partikelakkumulation im Schlammraum möglich wäre. Darüber hinaus wurde die Position eines zweiten quer angeordneten Leitblechs untersucht, das etwa in der Beckenmitte die Strömung erneut stabilisieren sollte. Auf Anraten der Autoren sollte dieses Blech etwa $1/4$ der Beckentiefe von der Beckenoberkante entfernt und $1/18$ von der Sohle über die gesamte Beckenbreite installiert werden.

Einen weiteren Beitrag zur Bewertung verschiedener Abmessungsverhältnisse L:B von Regenbecken leisteten Dufresne et al. (2010a, 2010b, 2010c, 2012). Sie variierten die Beckenlänge und analysierten die entstehenden Strömungsmuster. Dabei konnten sie die Unterscheidung zwischen symmetrischen und asymmetrischen Strömungsmustern herausarbeiten (Bild 4.7), die sich maßgeblich auf das Absetzverhalten auswirkten. Demnach wäre ein asymmetrisches Fließbild deutlich positiver zu bewerten, als ein symmetrisches. Diese Annahme begründeten die Autoren u.a. damit, dass bei asymmetrischen Fließbild die Zonen, in denen Sedimentation möglich sei, entsprechend der großen strömungsberuhigten Bereiche ebenfalls größer wären. Darüber hinaus ordneten sie die Fließbilder den Abmessungsverhältnissen zu und definierten einen Formparameter:

Dieser ähnelt dem einfachen Verhältnis L:B, setzt es jedoch noch in eine Beziehung zu den geometrischen Abmessungen im Einlaufbereich. Die Autoren stellten fest, dass Becken mit einem Formparameter kleiner 6,2 ein nur sehr geringfügiges Maß an Sedimentationswirkung aufwiesen. Becken mit einem Wert größer 6,8 dagegen würden sich gut als Absetzbecken eignen.

In Dufresne et al. (2011) führten die Autoren die Untersuchungen weiter fort und konzentrierten sich auf die numerische Auswertung verschiedener Beckenvarianten. Dabei untersuchten sie u.a. verschiedene Einlaufkonstellationen $\Delta B/b$. Sie stellten noch einmal die Bedeutung der Einlaufkonstruktion auf den Gesamtwirkungsgrad eines Sedimentationsbeckens heraus. In diesem Zuge untersuchten sie, inwiefern ihre vormals aufgestellte These auch für größere Werte $\Delta B/b$ galt. Sie testeten Varianten bis zu $\Delta B/b = 10$ und somit potentiell recht große Becken. Die empfohlenen Grenzwerte für ihren Formparameter entsprachen in etwa den vorherigen.

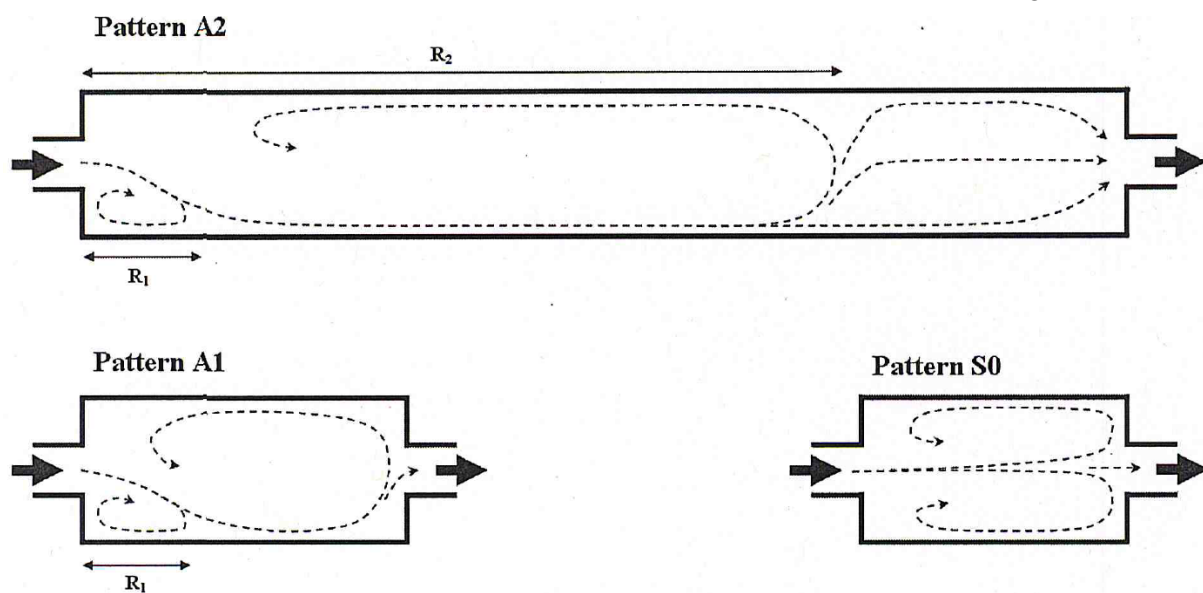


Bild 4.7: Mögliche Strömungsmuster aus Dufresne et al. (2010c). S0=Symmetrisches Verhalten, A1=Asymmetrisches Verhalten - einmalige Wandberührung, A2=Asymmetrisches Verhalten - zweimalige Wandberührung

Jamshidnia und Firoozabadi (2010) installierten im Rahmen ihrer Forschungsarbeit ebenfalls überströmte Prallwände in einem Rechteckbecken. Der Einlaufbereich war dabei als tiefliegender Gerinneeinlauf gestaltet. Es wurde eine Positionierung bei 15% sowie bei 50% der Beckenlänge untersucht. Demnach konnte durch beide Optimierungsansätze der Sedimentationsgrad maßgeblich erhöht werden. Das Anbringen in der Mitte des Beckens führte zu einer Verbesserung des Strömungsbildes unterstrom. Ein Blech im Einlaufbereich hatte insbesondere bei niedrigen Reynolds-Zahlen positive Auswirkungen.

Das physikalische Modell, mit dem Liu et al. (2010) die Prozesse in einem Rechteckbecken untersuchten, konnte hinsichtlich der Höhe des tiefliegenden Einlaufs sowie des Verhältnisses L:H variiert werden. Die Öffnungshöhe sollte so eingestellt werden, dass die Rezirkulationszone, die sich oberhalb des Einlaufs bildete, möglichst gering ausfiel. Somit ergab sich eine optimale Höhe zwischen $0,2-0,5 \times H$. Je geringer die Öffnungshöhe, desto geringer fiel der Energie-Dissipationseffekt aus, der durch die Einlaufkonstruktion gewünscht war. Gleichzeitig stieg die Gefahr von Resuspensionen und Kurzschlussströmung an. Wurde die Öffnung zu groß, ergaben sich Rezirkulationszonen im hinteren Bereich des Beckens, die die Absetzwirkung des Beckens ebenfalls minderten. Allgemein wurde festgestellt, dass das Strömungsverhalten maßgeblich von dem Durchfluss abhängig war. Dieser tatbestand galt auch für das Verhältnis L:H. Hier wurde ein optimaler Bereich von $L:H = 8 \dots 12$ angegeben.

Takamatsu et al. (2010) entwickelten im Rahmen ihrer Studie ein mathematisches Modell zur Vorhersage von Wirkungsgraden. Sie legten ideale hydraulische Randbedingungen zugrunde und definierten Berechnungsansätze zur Absetzleistung. Zusätzlich führten sie für verschiedene Beckenkonfigurationen Vergleichsmessungen durch. Dabei wurden u.a. auch die Beckenabmessungen L:B variiert. Die Ergebnisse zeigten auch hier, dass eine höhere Effizienz bei den länglichen Becken zu erwarten war. So zeigten die Varianten mit einem Verhältnis $L:B = \text{rd. } 8,5$ bei ähnlichen Durchflüssen insgesamt einen besseren Wirkungsgrad als die Varianten mit $L:B = \text{rd. } 5,7$.

Eine außergewöhnlich Konstruktion untersuchten Wang et al. (2010). Ihr Becken sah eine Trichterkonstruktion der Sohle vor (Bild 4.8). Zusätzlich wurde das Becken durch eine überströmte Wand in zwei Kammern geteilt. Im Rahmen der Studie wurde dann der Einsatz zweier unterströmter Prallwände überprüft, jeweils hinter dem Einlauf und der Trennwand. Es zeigte sich, dass damit der Wirkungsgrad um bis zu 45% gesteigert werden konnte. Die effektivste Konstruktion entsprach dabei einer Eintauchtiefe von 85 Prozent der Beckenhöhe. Größere Eintauchtiefen ergaben einen rapiden Abfall der Rückhalteleistung, geringere dagegen hatten nur leichte Minderungen im Wirkungsgrad zur Folge.

Die Wirkung der Trichterkonstruktion sowie der Trennwand wurde nicht weiter im Rahmen dieser Studie untersucht bzw. bewertet.

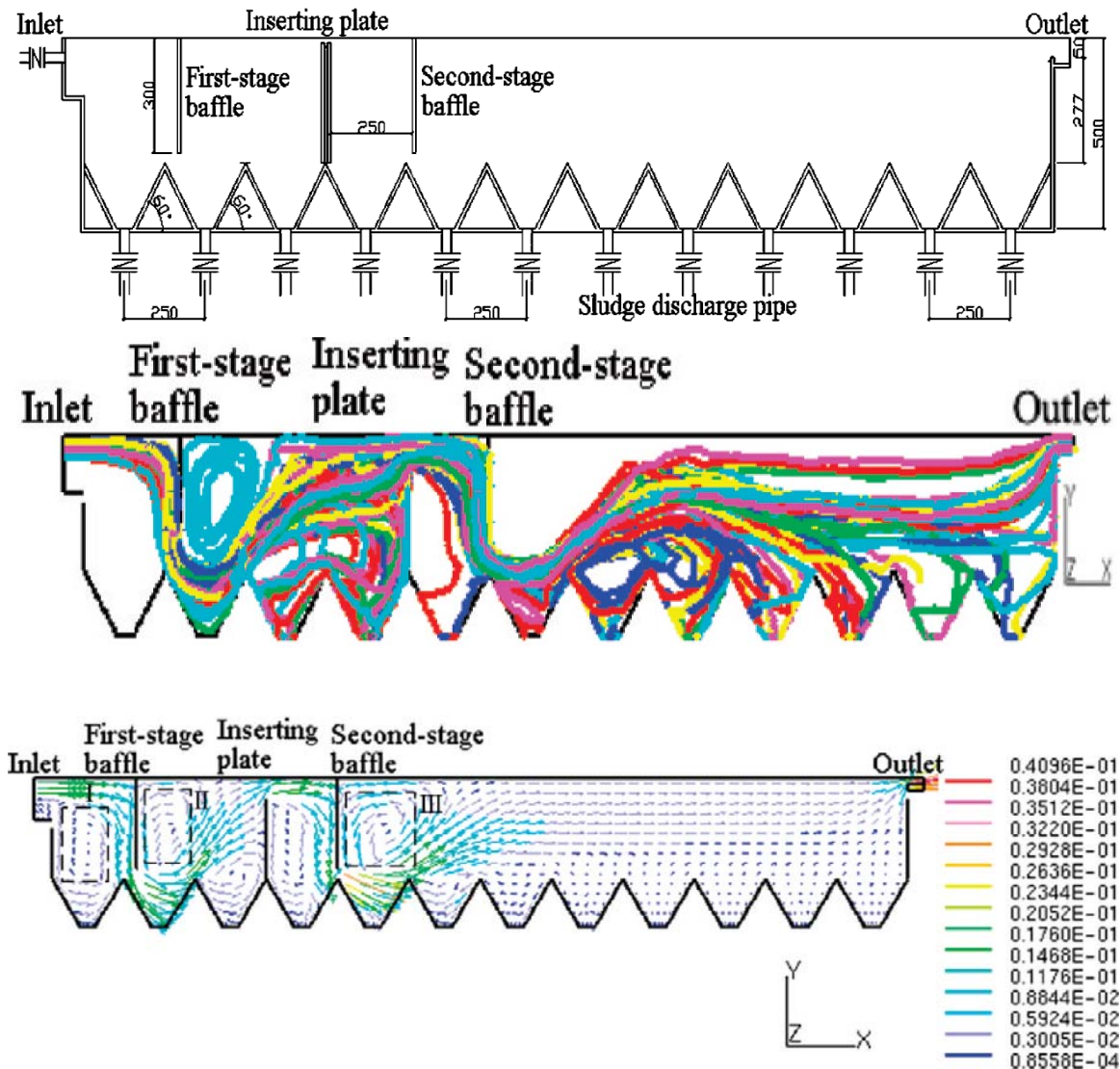


Bild 4.8: Modellaufbau mit Sohltrichtern und Prallwänden; oben: Konstruktion, Mitte: Partikelbahnen, unten: Geschwindigkeitsvektoren (Wang et al. 2010)

Im Rahmen ihrer Studie überprüften Asgharzadeh et al. (2011), inwiefern die Platzierung von zwei überströmten Leitblechen im Sedimentationsraum Einfluss auf Fließbild und Sedimentation hat. Die Bleche wurden bei 0,32 sowie 0,5 x L montiert. Die Auswertung erfolgt mithilfe einer CFD-Simulation. Die Variation der Blech-Höhen ergab, dass es Kombinationen gibt, die sich sogar negativ auswirken. So bilde sich eine Jet-Strömung, die Resuspension des Sediments zur Folge habe, wenn das erste Blech niedriger als das zweite Blech sei. Bei gleicher Höhe der beiden Bleche bilde sich ein großer Totkörper, der das effektive Absetzvolumen vermindere. Gute Ergebnisse dagegen waren zu beobachten, als das erste Blech (0,5 x H) höher war, als das zweite Blech (0,3 x H). Bei nur einem Blech empfehle es sich laut der Autoren das Blech in

der Mitte des Beckens zu platzieren, da bis dahin etwa 75% der Feststoffe sedimentiert wären und so eine Barriere für die Weiterbewegung des Sediments entstünde. Generell merkten die Autoren jedoch an, dass die Ergebnisse individuell abhängig von der Einlaufkonzentration wären und stark variieren könnten.

Camnasio et al. (2011, 2013) analysierten in ihrer Studie den Einfluss der Positionen von Einlauf und Auslauf auf die Geschwindigkeitsverteilung und das Absetzbild. Mithilfe eines numerischen sowie physikalischen Modells betrachteten sie vier Varianten: beides in der Mitte der Stirnseiten, beide auf derselben Seite, auf den entgegengesetzten Seiten, Einlauf mittig und Auslauf seitlich. Sie stellten fest, dass sich das Sedimentationsverhalten deutlich zwischen den Varianten unterschied. Hinzu kam, dass sich die Durchströmung der Becken mit zunehmender Akkumulation auf der Sohle veränderte. Die Autoren gaben keine endgültigen Empfehlungen, jedoch beobachteten sie, dass die meisten Partikel im Bereich der Haupt-Strömung sedimentierten. Folglich konnten die Varianten, in denen Ein- und Auslauf weit voneinander entfernt lagen, das Beckenvolumen besser ausnutzen, als die Varianten, bei denen durch direkte Durchströmung zusätzlich die Gefahr einer Kurzschlussströmung gegeben war.

Ebenfalls eine Modifikation mithilfe einer unterströmten Prallwand untersuchten Howard et al. (2011). Sie variierten die Höhe des freien Querschnitts unter der Platte. Außerdem testeten sie den Einsatz von Lochblechen anstelle von undurchlässigen Stahlplatten sowie deren Winkel. Die Versuche erfolgten im physikalischen Modell sowie in situ. Die beste Rückhalteleistung und damit eine Steigerung von 10 bis 15% zum Zustand ohne Blech erbrachte ein Lochblech mit einem Öffnungsanteil von 46 %. Das schlechteste Ergebnis war dagegen bei der undurchlässigen Prallplatte festzustellen. Es wäre deshalb zu vermuten, dass diese unter der Platte eine zu geringe Öffnung aufwies, so dass aufgrund zu hoher Geschwindigkeiten bereits sedimentierte Partikel resuspendierten. Bei allen weiteren getesteten Lochblechvarianten (Öffnungsanteil 33-51% sowie Winkel von +/- 20°) waren Verbesserungen zum Ausgangszustand erkennbar, jedoch entsprachen diese nicht den o.g. guten Ergebnissen.

Einen Beitrag zum Einsatz von alternierenden Wänden erbrachten Olukanni und Ducoste (2011) bzw. Olukanni (2011). Sie setzten Leitwände längs und quer zur langen Beckenseite ein und variierten ihre Anzahl und Länge. Die Analyse erfolgte mit Hilfe einer numerischen Simulation. Ausgewertet wurde die Aufenthaltszeit und da es sich um ein Stabilisierungsbecken handelte, auch die Konzentration von Coliform-Bakterien. Dies wird im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht weiter betrachtet. Unterschieden wurden Elementlängen von 60 bis 90 % der Beckenlänge bzw. -breite sowie der Einsatz von zwei, vier oder sechs Blechen. Die Auswertungen ergaben,

dass die Ergebnisse deutlich sensitiver gegenüber einer Längenänderung der quer ausgerichteten Elemente waren. Dies wäre auf die generell beruhigtere Strömung aufgrund der längeren Fließwege innerhalb eines Gerinnes bei längs ausgeführten Leitwänden zurückzuführen. Bei quer ausgerichteten Blechen solle man besser auf eine höhere Anzahl zurückgreifen (vier oder mehr Bleche). Dies wäre bei den längs ausgerichteten Blechen nicht zwingend notwendig. Hier konnte man mit Elementlängen von 80 bis 90% sehr gute Ergebnisse erzielen. Jedoch merkten die Autoren an, dass in diesem Falle auch mögliche Turbulenzen aufgrund der starken Einschnürung des Fließquerschnitts auftreten könnten. Dieser Fragestellung wurde jedoch nicht weiter nachgegangen.

Auch Rostami et al. (2011) führten Untersuchungen bezüglich der Höhenlage sowie zur Anzahl der Zulauföffnungen durch. Mithilfe einer CFD-Simulation (computational fluid dynamics) betrachteten sie fünf Varianten für den Einlauf des rechteckigen Vorklärbeckens: eine Öffnung oben/ Mitte/ unten sowie zwei und drei horizontal verteilte Öffnungen. Auf Grundlage des Vergleichs von Stromlinien, Geschwindigkeitsprofilen und Konturplots der kinetischen Energie folgerten sie, dass sich der Wirkungsgrad mit einer steigenden Anzahl von Öffnungen erhöhe. Im Gegensatz zu Stamou und Noutsopoulos (1994) werteten sie einen Einlauf in der Mitte der Fließtiefe als beste Höhenlage. Am schlechtesten schnitt ein hochliegender Zulauf ab.

Im Rahmen der Studie von Shahrokhi et al. (2011a) wurden scharfkantige Rohreinläufe durch Abschrägungen innerhalb der Betonwand verändert, so dass bereits bei Eintritt in das Becken die Fließgeschwindigkeit leicht reduziert war. Außerdem konnte durch die schrägen Kanten das Beckenvolumen effektiver ausgenutzt werden. Die Autoren gaben keine Empfehlung hinsichtlich der genauen Konstruktion, jedoch entwickelten sich bei allen untersuchten Varianten bessere Rückhalteleistungen des Beckens, als bei der Ausgangsvariante.

In einer weiteren Studie Shahrokhi et al. (2011b, 2012) wurde die Zahl der eingesetzten überströmten Prallbleche auf verschiedenen Positionen variiert. Das erste Blech direkt hinter dem Einlauf lag dabei entsprechend Shahrokhi et al. (2013a, 2013b, 2013c) stets bei 12,5% der Beckenlänge, die weiteren Bleche innerhalb der Sedimentationskammer zwischen 25 und 55%. Ausgewertet wurde auf Grundlage einer numerischen Simulation das Rezirkulationsvolumen sowie der kinetischen Energie an verschiedenen Stellen. Als beste Kombinationen empfohlen wurden zwei Bleche bei 12,5 und etwa 40%, sowie drei Bleche bei 12,5, 30 und etwa 40%. Alle anderen Anordnungen konnten auch gegenüber dem Einbau nur eines Bleches eine Optimierung hervorbringen. Dies zeigt sich deutlich in Bild 4.7, in dem die Stromlinien für null bis vier Prallwände dargestellt sind. Demnach kann man erkennen, wie geschickt positionierte Leitelemente das Rezirkulationsvolumen mindern können. Jedoch merkten die Autoren an, dass die

richtige Position wichtiger sei als die Zahl der Bleche, unabhängig davon, wie viele Bleche im Becken implementiert würden.

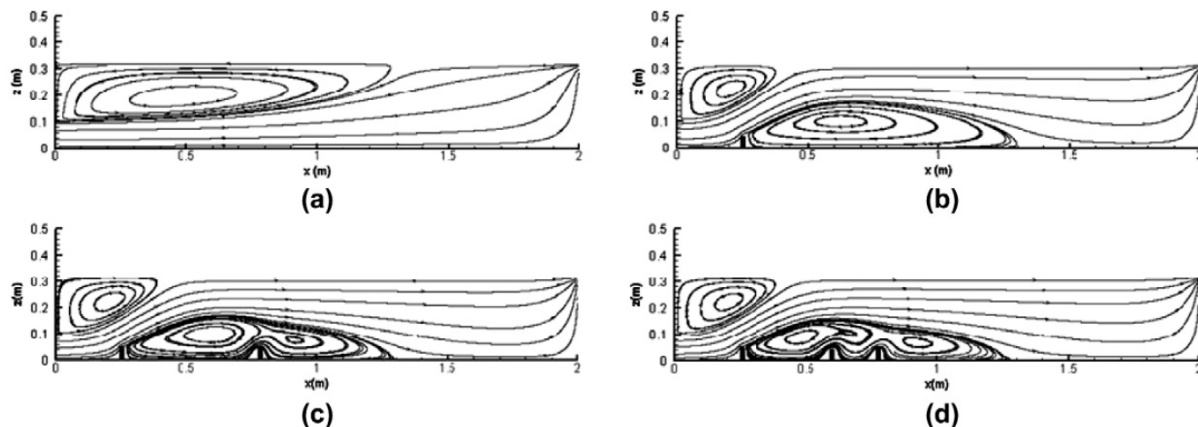


Bild 4.9: Stromlinien für null (a), ein (b), zwei (c) und drei (d) Leitbleche im Becken (Shahroghi et al. 2012)

Im Gegensatz zu vielen vorangegangenen Studien nutzten Xanthos et al. (2011) eine perforierte Prallwand, die sich im Einlaufbereich eines mittig angeordneten Rohreinlaufs über den gesamten Querschnitt erstreckte. Die erste untersuchte Variante sah dabei eine Holzkonstruktion vor, die in regelmäßigen Abständen gelocht war und deren untere Planke entfernt wurde. Das daraus entstehende Fließbild war sehr unregelmäßig und von vielen Turbulenzen geprägt, so dass die Autoren von dieser Einlaufgestaltung absahen. Die zweite Variante war ein Gitter, bei dem mit jeweils 30 cm Abstand der Holzplanken quadratische Öffnungen entstanden. Sie ergab ein sehr gleichmäßiges Fließbild über den gesamten Querschnitt und stellte gleichzeitig die beste Konstruktion eines vorher durchgeführten Optimierungsprozesses dar (Variation in der Öffnungsgröße, Variation der horizontal und vertikal entnommenen Planken).

In einem weiteren Schritt setzten die Autoren quer zur Fließrichtung eine Lamellenwand bei etwa 1/8 der Gesamtlänge in ihr Becken ein. Die Ergebnisse bewerteten sie als durchweg positiv, da durch die Konstruktion im Sedimentationsraum eine weitere Beruhigung und Vergleichmäßigung der Strömung erwirkt werden konnte. Dieser Tatbestand zeigte sich auch deutlich in der Partikelverteilung über die Fließlänge (Bild 4.10). Dadurch, dass die Strömung insgesamt beruhigter war und weniger Rezirkulationszonen vorlagen, setzten sich deutlich mehr Partikel ab.

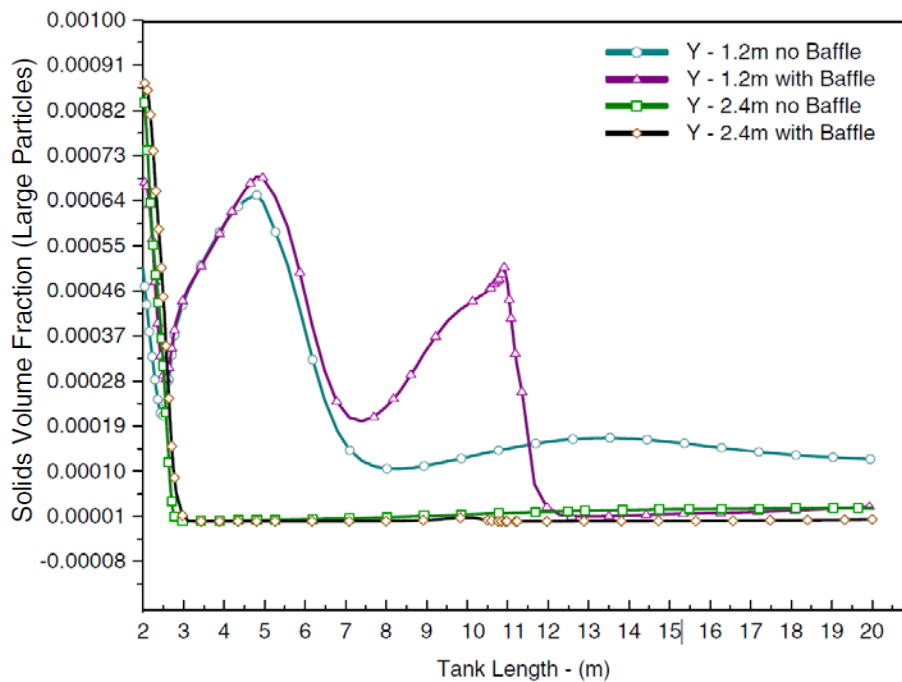


Bild 4.10: Volumenanteil der Partikel im Fließmedium über die Beckenlänge; Darstellung zweier Längsschnitte - je mit und ohne Lamellenwand im Sedimentationsbecken (Xanthos et al. 2011)

Eine Optimierung des Beckens in allen Bereichen setzten Dong et al. (2013) um. Sie verglichen die Anordnung von über- und unterströmten Prallwänden mit der Installation von mit Öffnungen ausgestatteten Trennwänden. Es handelte sich jeweils um drei Elemente im Einlaufbereich, in der Sedimentationskammer sowie vor dem Klärüberlauf. Der Zulauf erfolgte von oben. Die Autoren beobachten bei der Variante mit Prallwänden große Rezirkulationszonen sowie insgesamt hohe Geschwindigkeiten. Sie folgerten, dass in Teilbereichen die Absetzfähigkeit der Partikel gemindert wäre. Dagegen ergaben sich bei der zweiten Variante, bei der die Durchströmung über den gesamten Querschnitt möglich war, deutlich weniger Turbulenzen und Rezirkulationszonen sowie geringere Geschwindigkeiten. Es wäre demnach von einer Verbesserung der Rückhalteleistung auszugehen. Die Auswertung erfolgte mit einem numerischen Modell.

Heydari et al. (2013a, 2013b, 2014) platzierten in die Mitte eines Rechteckbeckens eine überströmte Prallwand, bei der sie den Anströmwinkel variierten. Die Anströmung des Versuchsaufbaus erfolgte gleichmäßig über den gesamten Querschnitt. Laut Aussagen der Autoren ergibt ein um 60° geneigtes Blech die höchsten Rückhalteleistungen. Auch bei Winkeln von 45° und 90° konnten Verbesserungen gegenüber dem Zustand ohne Beckeneinbauten beobachtet werden. Es war allerdings auch festzustellen, dass je nach Winkel auch Verminderungen der Reinigungsleistung möglich sind, welches bei Winkeln von 30° und insbesondere 150° deutlich wurde. Darüber hinaus zeigte sich eine starke Abhängigkeit von der Froude-Zahl. Je höher die Froude-Zahl, desto größer war der beobachtete Effekt.

Eine hydronumerische Simulation unter Auswertung der Aufenthaltszeit führten Li et al. (2013) durch. Dabei variierten sie einerseits das Verhältnis L:B, die Höhenlage, die Position der Ein- und Auslaufkonstruktionen sowie den Winkel der Anströmung im Einlauf. Sie kamen zu der Erkenntnis, dass nicht alle Parameter maßgeblichen Einfluss auf die Aufenthaltszeit hätten. So beobachteten sie zunächst eine Korrelation zwischen Aufenthaltszeit und Beckenabmessungen: Je größer L:B war, desto höher war die Aufenthaltszeit. Die untersuchten Varianten entsprachen dabei den Abmessungen L:B = 10 bis L:B = 0,1. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen erkannten sie keine signifikante Einflussnahme von Position, Höhenlage und Winkel der Ein- und Auslaufkonstruktionen. Die Betrachtungen wurden dabei bei Abmessungen von L:B = 2,5 durchgeführt.

Eine ähnliche Konstruktion betrachteten Liu et al. (2013). Sie nutzten ein numerisches sowie ein mathematisches Modell zur Ermittlung der Rückhalteleistungen und griffen auf die Beckenkonstruktion von Cai et al. (2005) zurück (Gerinneeinlauf, hochliegend). Angesetzt wurde die unterströmte Prallwand mit einer Eintauchtiefe von etwa $0,25 \times H$. Die Variation der Position des Einbaus ergab unterschiedliche Wirkungsgrade. Demnach empfahlen die Autoren eine Positionierung bei $0,05 \times L$. Die geringste Rückhalteleistung zeigte sich bei einer Positionierung direkt am Einlauf und bei Abständen größer als $0,08 \times L$.

Die Studie von Radaei et al. (2013) variierte die Position einer überströmten Prallwand im Einlaufbereich. Die Ergebnisse zeigten, dass die Prallwand inmitten der Rezirkulationszone angeordnet sein sollte. Dabei waren mit zunehmenden Abstand zum Einlauf schlechtere Wirkungsgrade zu messen. Die optimale Position definierten die Autoren bei 12,5% der Beckenlänge. Ein Element bei 10% erreichte leicht schlechtere Werte. Alle Varianten bis zu einem Abstand von $0,25 \times L$ zeigten Verbesserungen verglichen mit dem Ausgangszustand ohne Blech. Eine grundsätzlich wichtige Beobachtung lässt sich dabei gut in Bild 4.11 erkennen. Durch die Einbringung des Blechs sind die Geschwindigkeiten an der Beckensohle deutlich geringer. Ein zusätzlicher Untersuchungsgang beschäftigte sich mit der Neigung der Prallwand gegen die Fließrichtung. Dabei stellte sich ein Winkel von 90° zur Sohle als beste Variante heraus.

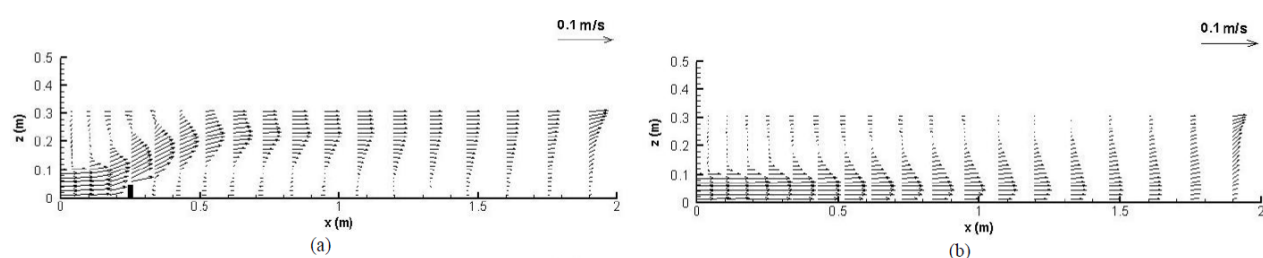


Bild 4.11: Geschwindigkeitsprofile entlang der Beckenlänge; (a)=mit Prallwand, (b)=ohne Prallwand (Radaei et al. 2013)

In ihrer Studie untersuchten Shahrokhi et al. (2013a, 2013b, 2013c) überströmte Prallwände im Einlaufbereich. Mithilfe eines physikalischen sowie numerischen Modells bewerteten sie die optimale Position sowie die Höhe des Blechs. Demnach konnten die besten Ergebnisse mit einem Blech erreicht werden, das bei 12,5% der Beckenlänge und mit einer Höhe von 17,6% der Beckenhöhe montiert war. Davon abweichend wären bei dieser Position Verbesserungen gegenüber dem Ausgangszustand ohne Blech bis zu einer Höhe von 22% der Beckenhöhe festzustellen gewesen. Über diese Höhe hinausgehend beobachteten die Autoren sogar größere Rezirkulationszonen als ohne Einbauten. Bei Elementhöhen von etwa 39% der Beckenhöhe empfahlen die Autoren, das Blech bei etwa ein Drittel der Beckenlänge anzubringen.

Die Studie von Zhou et al. (1997) führten Xanthos et al. (2013) fort. Mithilfe eines CFD-Modells überprüften sie eines der Becken, das aus der Optimierungsstudie von Zhou et al. (1997) entstanden war. Dabei handelte es sich um ein mit Lamellenwänden dreigeteiltes Becken, das im hinteren Bereich mit den Überlaufwannen ausgestattet war. Zum Vergleich entwickelten sie eine Beckenkonfiguration, die mit insgesamt 45% mehr Überfallrinnen ausgestattet war. Die CFD-Simulation zeigte deutlich, dass dadurch eine weitere Vergleichmäßigung der Strömung umzusetzen war, auch wenn diese letztendlich nicht maßgeblich den Wirkungsgrad beeinflussen würde.

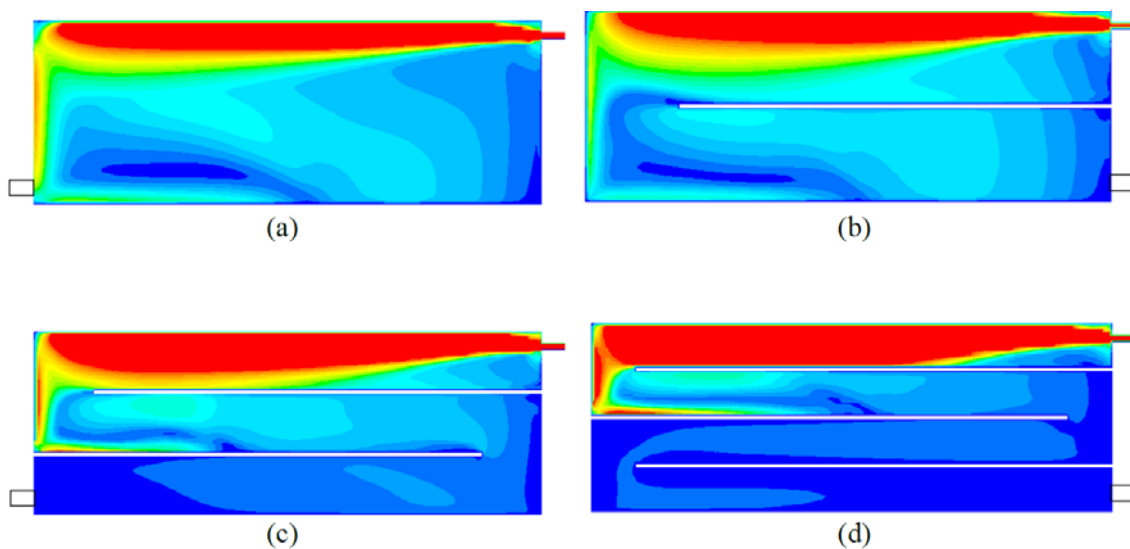
Kattinig (2014) setzte in einem Kontaktbecken der Trinkwasserdesinfektion alternierende Leitwände ein, die längs der langen Beckenseite ausgerichtet waren. In dem so künstlich erzeugten langen Gerinne mit einem sehr hohen Verhältnis L:B herrschte im Allgemeinen eine gleichmäßigere Durchströmung, wie in Bild 4.12 zu erkennen ist. Um die starke Jet-Strömung, die vom Einlauf ausging, zu minimieren, empfahl der Autor zusätzliche Maßnahmen im Einlaufbereich (z.B. Prallwände). Die Wirkung ebensolcher lässt sich sehr gut in (e) und (f) erkennen.

Die besten Ergebnisse hinsichtlich der Fließgeschwindigkeiten sowie der Größe der Rezirkulationszonen erhielt er, wenn die Breite in den Kurvenbereichen der Gerinnebreite entsprach. Darüber hinaus führte die erhöhte Zahl an Leitwänden aufgrund von starken Turbulenzen in den Kurvenbereichen nicht zwingend zur Verbesserung des Wirkungsgrades und sei deshalb auf ein Minimum zu reduzieren. Auch dies ist in den o.g. Bildern zu erkennen. Einerseits findet keine gleichmäßige Beckendurchströmung mehr statt, wenn die Breite in den Kurvenbereichen zu groß wird. Ferner ergeben sich größere Fließgeschwindigkeiten in den einzelnen Gerinnen. Insgesamt stellte der Autor jedoch heraus, dass es sich bei alternierenden Leitwänden im Becken um eine sehr positive Möglichkeit handele, die Aufenthaltszeit im Becken zu erhöhen. Insbesondere Kurzschlussströmung könne durch diesen Ansatz erheblich reduziert werden.

In einer weiteren Untersuchung wählte der Autor einen eher außergewöhnlichen Weg. Er platzierte eine Box, gefüllt mit Dichtungs- und Verpackungsmaterial, direkt vor den tiefliegenden

Rohreinlauf. Damit wies er nach, dass mit dieser Möglichkeit die kinetische Energie im Zulaufbereich stark reduziert werden könne und aufgrund der gleichmäßigen Durchströmung insgesamt geringere Fließgeschwindigkeiten vorlägen. Jedoch merkte er an, dass je nach Beckenkonstellation durch die Box auch zusätzliche Rezirkulationszonen entstehen könnten, die wiederum den Sedimentationsprozess hemmen könnten. Aus diesem Grund empfahl er diese Form der Einlaufgestaltung nur für Becken mit hohem Verhältnis L:B. Eine weitere Möglichkeit die Boxen zu verwenden wäre die Platzierung in Beckenbereichen mit hohen Geschwindigkeiten. Die genaue Wirkung untersuchte er allerdings im Rahmen seiner Studie nicht weiter.

Ohne Einlaufoptimierung, Kurvenbreite = Gerinnebreite



Mit Einlaufoptimierung, Kurvenbreite \gg Gerinnebreite

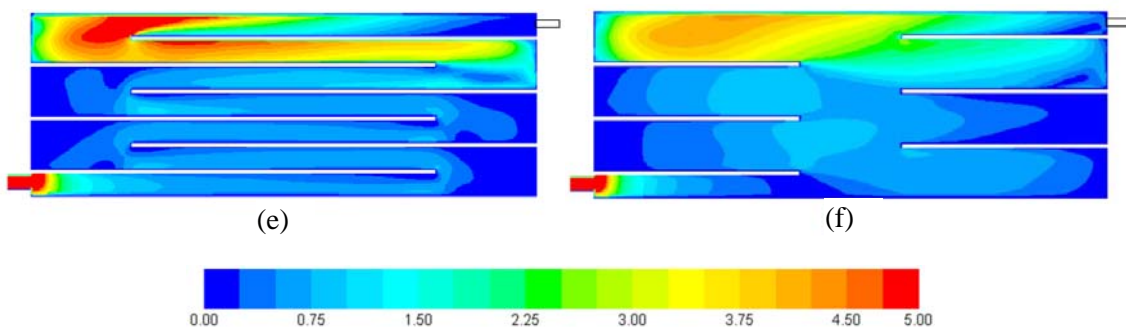


Bild 4.12: Normalisierte Kontur-Plots der Resultierenden der Fließgeschwindigkeit (v / v_{average}) (Kattinig 2014)

Park et al. (2014) bildeten durch eine längs angeordnete Trennwand zwei getrennte Kammern, die somit ein größeres Verhältnis L:B aufweisen. Mithilfe einer numerischen Simulation stellten sie Steigerungen des Wirkungsgrads um bis zu 18% fest. Unter diskontinuierlichen Zuflussbedingungen waren sogar Steigerungen um bis zu 38% zu erkennen. Es ergaben sich insgesamt

deutlich gleichmäßigere Strömungsbilder, die außerdem mit einer geringeren Fließgeschwindigkeit einhergingen.

Die Auswirkung verschiedenster konstruktiver und betrieblicher Parameter auf das Durchströmungsverhalten untersuchten Wang et al. (2014). Dabei variierten sie u.a. die Höhenlage von Ein- und Auslauf, die jeweils als Rohre realisiert wurden. Die Versuche erfolgten mit einem physikalischen Modell und beinhalteten eine Betrachtung von möglicher Kurzschlussströmung, dem effektiven Absetzvolumen/ Totzonen, der Ausprägung einer Pfropfenströmung und hydraulischer Effizienz. Die Ergebnisse deuteten einerseits darauf hin, dass der Wirkungsgrad sich mit steigendem Abstand Einlauf/ Auslauf verbessert. So zeigten sich die schlechtesten Ergebnisse bei den Varianten, bei denen die Komponenten in der gleichen Höhenlage positioniert waren. Führte der Fließweg entgegen der Gravitationskraft (Einlauf unten/ Auslauf oben), konnten die besten Wirkungsgrade ermittelt werden. Insgesamt ließ sich feststellen, dass neben dem Durchfluss die Ein- und Auslauf-Positionierung den größten Einfluss auf das Beckenverhalten hatte.

Auch Zhang (2014) untersuchte die Strömungsfelder eines Rechteckbeckens mithilfe einer numerischen Simulation. Er positionierte unterströmte Prallwände hinter zwei hochliegenden Einlauföffnungen. Die Auswertung zeigte, dass sich eine Prallwand bei ca. 14% der Beckenlänge zwar positiv auf die Absetzleistung auswirkte, jedoch insbesondere hinsichtlich des Fließbildes (Rezirkulationszonen u.ä.) Verbesserungsbedarf bestand. Die Anordnung einer Prallplatte bei 7% der Beckenlänge ergab deutlich bessere Ergebnisse. Des Weiteren überprüfte Zhang die Implementierung eines Pumpensumpfs unterhalb des Einlaufs. Diesen bewertete er als sehr positiv. Zum einen könnte ein Teil der Partikel bereits im Zulaufbereich abgefangen werden, zum anderen würde hier das Sediment gesammelt ohne die Resuspension zu steigern. Ein letzter Versuchsteil beinhaltete die Neigung der Sohle. Der Autor beobachtete, dass die auf der Sohle akkumulierten Partikel bei ausreichender Neigung selbstständig in Richtung des Pumpensumpfes rutschen konnten. Demnach käme es in deutlich geringerer Intensität zur Resuspension, insbesondere im Bereich des Klärüberlaufs.

Ähnlich wie Kattinig (2014) setzte auch Carlston (2015) alternierende Leitwände in Kontakt-Becken der Trinkwasserbehandlung ein, um die Aufenthaltszeit im Becken zu vergrößern. Er verglich ebenfalls längs und quer ausgerichtete Leitwände mit verschiedenen Kurvenbreiten. Die Ergebnisse zeigten zum einen, dass die längs ausgerichteten Konfigurationen den quer ausgerichteten vorzuziehen wären. Dies begründete er damit, dass die strömungsberuhigteren Bereiche sich nur auf längeren geraden Fließwegen entwickeln würden, da von hoher Turbulenz in und nach der Fließumkehr auszugehen wäre.

Eine weitere Empfehlung sprach er hinsichtlich der Einlaufgestaltung solcher Becken aus. Demnach sei es sehr wichtig die Anströmung zum Becken über möglichst große Flächenanteile zu erbringen. Rohreinläufe seien demnach ungeeignet.

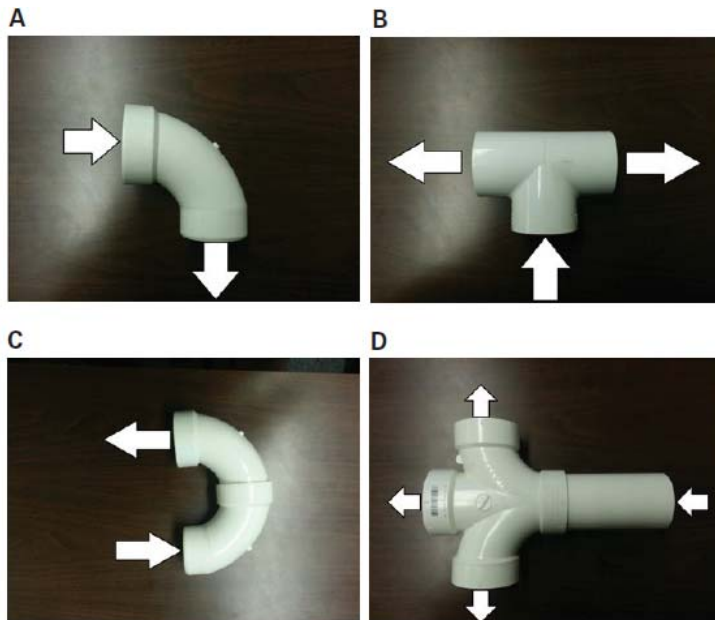


Bild 4.13: PVC-Formstücke; A=90° Umlenkung oben/unten/links/rechts, B=T-Stück, C=rückwärtige Lenkung, D=3-Wege-Passstück (Carlston und Venayagamoorthy 2015)

Der Fragestellung einer Optimierung eines tiefliegenden Rohreinlaufs mit möglichst geringem Kostenaufwand gingen Carlston (2015) bzw. Carlston und Venayagamoorthy (2015) nach. Sie veränderten die Ausrichtung des Einlaufs mit einfachen Rohrverbindungen (Bild 4.13) und werteten den Versuch mithilfe eines physikalischen sowie CFD-Modells aus. Diesbezüglich wurden die besten Ergebnisse durch die Modifizierung mithilfe eines T-Stückes erzielt. Die rückwärtige Ausrichtung sowie eine Umlenkung nach oben/ unten/ links und rechts hatten allesamt leichte Verbesserungen zur Folge. Der Einsatz eines Drei-Wege-Passstücks wäre allerdings nicht zu empfehlen. Hier ergeben sich sogar schlechtere Absetzleistungen, als bei der Ausgangsvariante.

Das Becken, das He et al. (2015) untersuchten, verfügte über einen transversalen Rohrzulauf. Auswertungen des numerischen Modells ergaben große Rezirkulationszonen, die das effektive Sedimentationsvolumen deutlich minderten. Eine erste mögliche Modifizierung mit alternierenden Leitelementen erzielte einen deutlich längeren Fließweg durch das Becken. Zwar waren in den Kurvenbereichen auf der stromabgewandten Seite stets kleinere Rezirkulationszonen, jedoch wäre aufgrund des durch die Leitelemente erzeugten sehr großen Verhältnisses L:B eine insgesamt gleichmäßigere Strömung zu erwarten. Eine noch deutlichere Verbesserung im Strömungsbild konnten die Autoren mit dem Einbau eines Diffusors erreichen, der in einer schräg verlaufenen Flucht orthogonal zum Rohreinlauf angeordnet war.

Lutfy et al. (2015) bedienten sich in ihrer Studie der Einlaufoptimierung mittels Reflektoren. Dabei setzten sie rechteckige und halbkreisförmige Elemente ein und untersuchten das Strömungsbild mithilfe einer CFD-Simulation. Es handelte sich um ein Becken mit kleinem Verhältnis L:B (L:B = 1:1). Insgesamt konnten alle Konfigurationen im Gegensatz zur Ausgangssituation ohne Einbauten überzeugen. Die besten Ergebnisse waren bei der rechteckigen Variante sowie bei halbkreisförmigen Reflektoren mit einem hydraulischen Radius zwischen 18 und 25 Prozent die geringsten Fließgeschwindigkeiten zu messen.

Die Studie, die Al-Saadi et al. (2016) veröffentlichten, untersuchte die Wirkung einer unterströmten Prallwand nach einem Wehr-Einlauf über die gesamte Breite. Als Bewertungsmaßstab setzten sie dabei die Entwicklung einer Pfropfenströmung an, deren Ausbildung sie anhand des Morris-Dispersions-Indexes maßen. Dieser stellt den Quotienten aus den Zeitpunkten dar, an denen 90 bzw. 10 Prozent der gesamten Tracer-Zugabe im Auslauf gemessen wird. Je näher der Wert gegen 1 geht, desto eher entspricht er einer Propfenströmung. Indizes über 22 implizieren eine Kurzschlussströmung (Foster et al. 2006). Die Autoren untersuchten Positionen des Blechs zwischen 0,12 und 0,37 x L, sowie Eintauchtiefen zwischen 0,33 und 0,66 x H. Sie beobachteten eine weniger ausgeprägte Pfropfenströmung je weiter sie das Blech vom Einlauf wegbewegten und je weniger sie es eintauchten.

Patziger et al. (2016) setzten verschiedenste Überlegungen bei der Optimierung eines bestehenden Rechteckbeckens um. Dieses war vormals im Bereich des hochliegenden Einlaufs mit einer Lamellenwand zur Energiedissipation ausgestattet. Es wurde deutlich, dass sich große Rezirkulationszonen im Becken bildeten, so dass sogar der Schlammraum gestört war. In einem ersten Optimierungsversuch konstruierten die Autoren eine Box um den Einlauf herum. Die Lamellenwand wurde entnommen. Das Strömungsbild der numerischen Simulation zeigte hier je nach Durchfluss um bis zu 45% verminderte Rezirkulationsvolumina. Bei höherer Beschickung verminderte sich der Wirkungsgrad. Für die letzte Variante wurde die Einlaufbox so umstrukturiert, dass die Beckeneinströmung tiefliegend erfolgte. Für geringe Durchflüsse konnten hier ähnlich gute Ergebnisse wie bei der vorherigen Variante festgestellt werden. Kam es allerdings zur höheren Beckenbeschickung, zeigten sich erneut große Turbulenzbereiche und Rezirkulationen. Es musste mit Remobilisierung gerechnet werden, die gut in Bild 4.14 (a) und (c) erkennbar ist. Insgesamt zogen die Wissenschaftler den Schluss, dass einerseits die Einlaufkonstruktion maßgeblichen Einfluss auf das Durchströmungsverhalten hätte, andererseits aber auch eine große Sensitivität gegenüber Randbedingungen, wie dem Durchfluss bestünde.

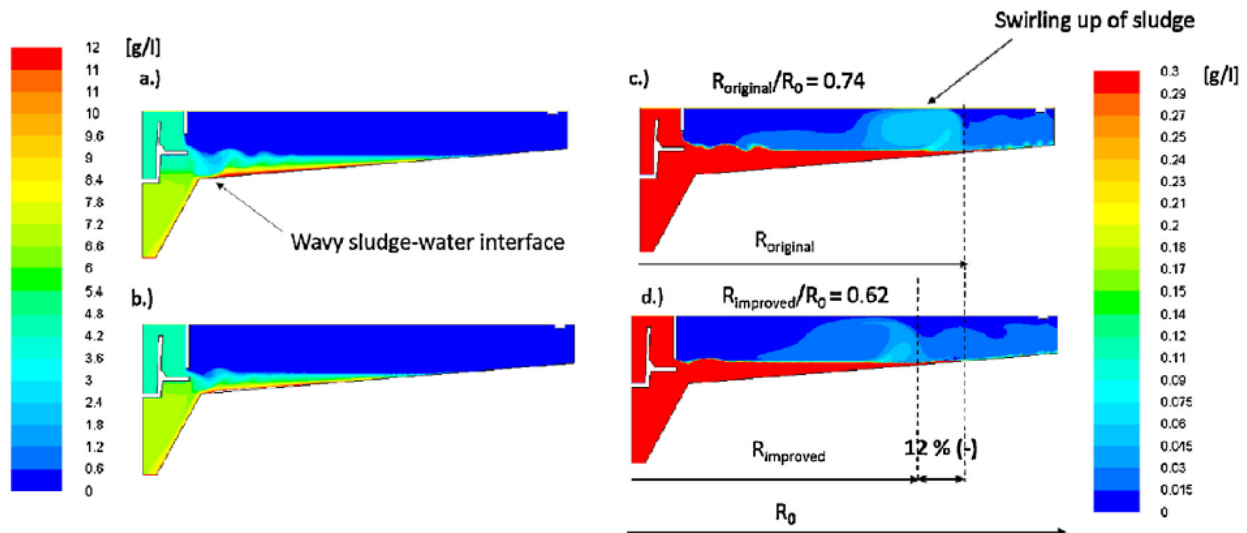


Bild 4.14: Konturplot der Feststoffkonzentrationen (a) originale Einlaufkonstruktion und (b) optimierte Variante sowie Konturplot der Feststoffkonzentrationen feiner Partikel (c) originale Einlaufkonstruktion und (d) optimierte Variante (Patziger et al. 2016)

Ghawi (2017) untersuchte im Zuge einer CFD-Simulation das Fließbild eines bestehenden Sedimentationsbeckens und schlug mögliche Modifikationen der Beckenkonstruktion vor. In der bestehenden Beckenkonstruktion waren Prallteller direkt in den Übergangsbereich Einlaufgerinne/ Becken konstruiert. Entgegen der Annahme, dass sie die Strömung gleichmäßig über die Beckenbreite verteilten, waren einzelne Strömungsspitzen zu erkennen, die in Richtung des Pumpensumpfes und der Beckensohle führten und dort akkumulierte Partikel resuspendierten. Dieser Effekt wurde nochmals durch eine unterströmte Lamellenwand unterstützt, die ebenfalls im Einlaufbereich angeordnet war. Ghawis Modifizierung sah eine Entnahme der Prallteller vor. Darüber hinaus wurde eine horizontale Konstruktion als eine Art Sohle bis zur Lamellenwand implementiert. Die Strömung wurde somit horizontal ins Becken geleitet und die Gefahr der Resuspension an der Sohle war stark vermindert. Als Klärüberlauf fungierten drei in das Becken ragende Rohre, deren genaue Gestaltung und Wirkung nicht näher beschrieben wurde. Er ersetzte sie mit Überlaufrinnen. Sie wurden nicht weiter bewertet.

Lee (2017) führten Untersuchungen in situ sowie mit einer numerischen Simulation durch. Es handelte sich um Nachklärbecken, die im Einlauf mit einem perforierten Blech mit 58% Öffnungsanteil ausgestattet waren. Es war zu erkennen, dass eine solche Konstruktion bereits zu einer Minderung der kinetischen Energie führte, so dass eine gleichmäßige Durchströmung des Beckens entstand. Im zweiten Untersuchungsteil wurde dem Becken bei einem Drittel der Beckenlänge eine weitere perforierte Konstruktion zweier Bleche mit zueinander versetzten Schlitzern hinzugefügt. Es zeigte sich erneut eine Verbesserung des Strömungsbildes, das einer

Pfropfenströmung gleichkam. Die positiven Ergebnisse waren darüber hinaus weitestgehend unabhängig von den untersuchten Zuflüssen.

Zhang (2017) untersuchte ebenfalls die Wirkung einer unterströmten Prallwand. Dabei positionierte er das Blech nach einem Wehrüberfall bei etwa 7 % der Beckenlänge und ein Drittel der Höhe als Eintauchtiefe. Die Ergebnisse wurden mithilfe einer CFD-Simulation ermittelt. Im Gegensatz zum Zustand ohne Blech konnte eine deutliche Steigerung der Effektivität des Beckens beobachtet werden. Auch die zweite Möglichkeit, eine Verlegung des Einlaufs als Rohreinlauf in die Mitte der Becken, wurde positiv bewertet. Jedoch wurde hier angemerkt, dass im Rahmen eines Umbaus diese Variante nur mit hohem Kostenaufwand realisierbar wäre. Außerdem sei davon auszugehen, dass sich diese Positionierung des Einlaufs nicht unbedingt positiv auf die Strömungsverhältnisse im Schlammraum auswirken würde. Je nach Konstellation bestünde die Gefahr der Resuspension bereits an der Sohle akkumulierter Partikel.

In einem letzten Versuchsteil untersuchte der Autor die Wirkung eines zweiten unterströmten Leitblechs im Bereich der Sedimentationskammer. Auch er kam zu dem Ergebnis, dass eine Prallwand nach einer ersten im Einlaufbereich angebrachten unterströmten Prallwand durchaus positive Wirkungen auf den Sedimentationsgrad haben könnte.

4.2 Aufstellung der Literatursynthese

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Literatursynthese vorgestellt. Die Einteilung erfolgt nach der vormals gestellten Klassifizierung (Kapitel 3.1). Für alle Optimierungs-Komponenten werden die wichtigsten Aussagen erläutert und falls vorhanden, einige Hinweise zur detaillierten Gestaltung gegeben. Zum besseren Überblick wird für jede Komponente ein kurzer tabellarischer Überblick gegeben. Hier enthalten ist neben einer schematischen Skizze die Bewertung des vormals erläuterten „Hydraulischen Potentials“. Außerdem werden Gestaltungsparameter angegeben, von denen neben betrieblichen Aspekten (z.B. Oberflächenbeschickung) die Wirksamkeit dieser Komponente maßgeblich abhängt. Diese kurze Darstellung dient lediglich zum kurzen Überblick. Die ausführliche Übersicht ist in Anlage 3 hinterlegt.

4.2.1 Einlauf

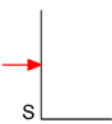
4.2.1.1 Konstruktion

Höhenlage

Die Höhenlage des Einlaufs wirkt sich entscheidend auf die Strömungsmuster im Becken aus. Zum einen sollte darauf geachtet werden, dass sich keine großen Rezirkulationen bilden, die das aktive Volumen mindern, zum anderen sind zu kurze Aufenthaltszeiten zu verhindern. Die Recherche ergab, dass bei einem obenliegenden Einlauf mit einem hohen Grad eben solcher Kurzschlussströmung zu rechnen ist. Die durchgehende Jet-Strömung kann demnach einen erheblichen Teil des Durchflusses direkt zum Überlauf leiten, ohne dass das gesamte Volumen ausgenutzt wird. Eine mittlere Höhenlage des Einlaufs wird laut der Autoren weitestgehend empfohlen. Zwar müsse man darauf achten, dass nicht zu große Turbulenzen entstünden, jedoch wurden bei dieser Positionierung die kleinsten Totzonen beobachtet. Das Fließbild tiefliegender Einläufe wurde zwar grundsätzlich als positiv bewertet, jedoch geht von dieser Variante bei zu hoher Beschickung oder zu tiefer Positionierung die Gefahr der Remobilisierung akkumulierter Feststoffe aus, so dass die Bemessung an dieser Stelle sehr sensibel durchgeführt werden sollte (u.a. López et al. 2008, Tamayol et al. 2008, Rostami et al. 2011).

Eine Unterscheidung zwischen den drei verschiedenen Einlaufklassen (Rohreinlauf/ Gerinneinlauf/ transversaler Einlauf) wird an dieser Stelle nicht angeführt, da sich die Ergebnisse der Literatur deckten.

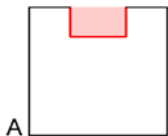
Tabelle 4.1: Überblick Bewertung Literatursynthese – HÖHENLAGE

Skizze: 	Bewertung hydraulisches Potential				
		--	-	o	+
	Gestaltungsparameter				
	■ Durchmesser/ Öffnungsfläche				

Fläche Anströmung

Die Wahl der anströmenden Fläche birgt ein großes hydraulisches Potential. Damit sich die Strömung über ein breites Feld gleichmäßig entwickeln kann, sollte die Fläche der Anströmung möglichst groß sein (Liu et al. 2010). Demnach ist ein einfacher Rohreinlauf als sehr ungeeignet zu werten. Vielmehr entsteht hier ein durchgehender Strom, dessen Energie nur in einem sehr geringen Maße dissipiert. Je nach Höhenlage besteht die Gefahr der übermäßigen Kurzschlussströmung oder der Resuspension sedimentierter Feststoffe. Deshalb gilt, dass Gerinneeinläufe sowie Wehrüberfälle sich möglichst auf die gesamte Breite erstrecken sollten, da so allein durch die Geometrie des Einlaufs das Maximum an Energiedissipation erreicht werden könne (z.B. Persson 2000). Für den Fall eines tiefliegenden Gerinneeinlaufs ergeben sich optimale Öffnungshöhen von 20 bis 50 Prozent der Beckenhöhe. Insbesondere bei Öffnungen, die weniger als 20 Prozent der Beckenhöhe entsprechen, kann es zu starken Verwirbelungen auf der Beckensohle kommen (Liu et al. 2010).

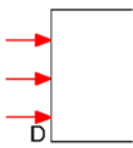
Tabelle 4.2: Überblick Bewertung Literatursynthese – Fläche Anströmung

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
Gestaltungsparameter					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Breite ▪ Höhe 					

Anzahl Ströme

Für die Anzahl der Einlaufströme gilt ebenfalls das Prinzip der größtmöglichen Anströmfläche. Mehrere über die Stirnseite des Beckens verteilte Öffnungen ermöglichen eine gleichmäßigere Entwicklung des Strömungsbildes (u.a. Rostami et al. 2011). Da in der Auswertung die Anzahl der Ströme jedoch nicht immer einen großen Einfluss auf die Ergebnisse hatte (z.B. unterströmte Prallwände), wird das hydraulische Potential hier nur mit „gut“ angegeben.

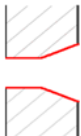
Tabelle 4.3: Überblick Bewertung Literatursynthese – ANZAHL STRÖME

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
Gestaltungsparameter					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anzahl ▪ Durchmesser/ Öffnungsfläche 					

Ausführung

Im Bereich der genauen konstruktiven Ausbildung besteht bei scharfkantigen Rohreinläufen die Möglichkeit die Kanten zum Becken hin abzuschrägen. So ergibt sich ein größerer Öffnungswinkel und das Beckenvolumen kann effektiver ausgenutzt werden (Shahrokhi et al. 2011a). Zwar stellt diese Komponente eine Verbesserung der Durchströmung dar, jedoch wird das hydraulische Potential hier nur eingeschränkt geeignet eingeschätzt, da allgemein von der Anordnung eines Rohreinlaufs abgesehen werden sollte (s.o.).

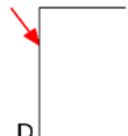
Tabelle 4.4: Überblick Bewertung Literatursynthese – AUSFÜHRUNG

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maß der Ausweitung ▪ Durchmesser 				

Anströmwinkel

Innerhalb der Literatur wurden u.a. verschiedene Anströmwinkel des Beckens überprüft. Hier kam man zu dem Ergebnis, dass der Anströmwinkel keinen maßgeblichen Einfluss auf die Beckenleistung habe (Li et al. 2013). Hier sei jedoch angemerkt, dass sich je nach Beckengeometrie und Anströmwinkel sehr unterschiedliche Fließbilder im Becken ergeben. Da die oben vorgestellten Empfehlungen lediglich auf einer Quelle beruhen (Li et al. 2013), sei deshalb in Frage gestellt, inwiefern sie auf andere Randbedingungen anzuwenden sind.

Tabelle 4.5: Überblick Bewertung Literatursynthese – ANSTRÖMWINKEL

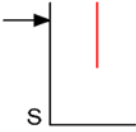
Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beckenabmessungen (L:B) ▪ Winkel ▪ Durchmesser 				

4.2.1.2 Leitelemente – quer

Prallwände – unterströmt

Unterströmte Leitwände im Einlaufbereich dienen dazu kinetische Energie aufzunehmen und eine Jet-Strömung zu verhindern. Dabei sollte stets beachtet werden, die Position und Eintauchtiefe so zu wählen, dass der Fließquerschnitt nicht zusätzlich eingeschnürt wird und aufgrund dessen höhere Geschwindigkeiten entstehen. Gleichzeitig darf die Konstruktion nicht so weit entfernt positioniert werden, dass sich ungünstige Turbulenzen ergeben. Diese Art von Leitelementen wird i.d.R bei hochliegenden Einläufen eingesetzt. Die Synthese der Ergebnisse der verschiedenen Studien ergibt, dass unterströmte Prallwände grundsätzlich als positiv zu werden sind, so lange die o.g. Randbedingungen beachtet werden. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die erhobenen Ergebnisse hinsichtlich des Verhältnisses Eintauchtiefe : Position zu normiert. Dabei sind leichte Unterschiede zwischen Rohreinläufen, Gerinneeinläufen und transversalen Einläufen ersichtlich. Demnach kann die Eintauchtiefe bei Rohr- und Gerinneeinläufen tiefer angesetzt werden als bei transversalen Einläufen. Insgesamt ist in den Ergebnissen kein Unterschied aufgrund der Anzahl der Einlaufströme festzustellen.

Tabelle 4.6: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-UNTERSTRÖMT

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eintauchtiefe ▪ Position ▪ Winkel 				

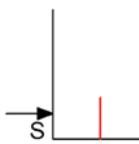
Prallwände – überströmt

Auch überströmte Prallwände sollen die kinetische Energie, die vom Einlauf ausgeht, mindern. Die Konstruktion wird bei tiefliegenden Einläufen angewendet. Es empfiehlt sich eine Positionierung im Bereich oder kurz vor der Rezirkulationszone, die sich an der Sohle bildet (Radaei et al. 2013).

Die Auswertung der erhobenen Literatur ergibt einen Unterschied zwischen tiefliegenden Rohreinläufen sowie Gerinneeinläufen. Auch hier wird eine Normierung auf das Verhältnis Höhe : Position vorgenommen. Demnach dürfen die Elemente bei Rohreinläufen etwas höher sein (Höhe:Position=2-3), als bei Gerinneeinläufen (Höhe:Position=1,5-2,5). Darüber hinaus wurde für Gerinneeinläufe eine Untersuchung bzgl. der Winkel der Prallwände vorgenommen (Radaei et al. 2013). Sie hatte jedoch zum Ergebnis, dass eine Neigung der Konstruktion keinen positiven Effekt bringt.

Das allgemeine hydraulische Potential wird ähnlich wie bei den unterströmten Prallwänden als „gut“ eingestuft.

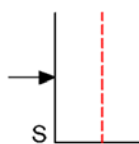
Tabelle 4.7: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-ÜBERSTRÖMT

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Höhe ▪ Position ▪ Winkel 				

Prallwände – perforiert

Perforationen können auf sehr unterschiedliche Art und Weise in eine Prallwand eingearbeitet sein. Das hier vorliegende Projekt berücksichtigt sowohl Lochbleche mit kleinen Öffnungen als auch gröber gearbeitete Elemente, die eher einer Gitterstruktur ähneln. Diese Variationsbreite macht eine allgemeingültige Aussage schwierig. Grob zusammengefasst kann aber gesagt werden, dass Elemente, deren Öffnungsanteil größer als 50 Prozent ist, eine gute Wirkung auf das Strömungsbild haben. Dagegen kann es bei geringerem Öffnungsanteil in vielen Fällen zu zusätzlichen Turbulenzen kommen. Insgesamt sind hier jedoch stets die individuellen Randbedingungen des Beckenstandortes zu beachten. Sind sehr grobe Feststoffe zu erwarten, kann es beispielsweise zum Festsetzen der Öffnungen kommen. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Ergebnisse wird das hydraulische Potential nur als „eingeschränkt geeignet“ bewertet.

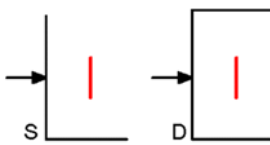
Tabelle 4.8: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-PERFORIERT

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Position ▪ Öffnungsanteil ▪ Winkel 				

Prallteller

Im Rahmen der erhobenen Literatur wurden Prallteller nur durch (Ghawi 2017) bewertet. Da der Prallteller hier an falscher Stelle angeordnet war (direkter Übergang Einlauf-Becken), kam es zu sehr schlechten Ergebnissen, die allerdings möglicherweise nicht repräsentativ für die Wirkung von Pralltellern sind.

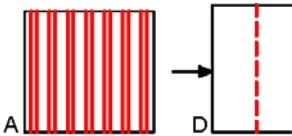
Tabelle 4.9: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLTELLER

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Größe ▪ Position 				

Lamellenwände

Aus den Ergebnissen der Literaturerhebung zeigt sich, dass Lamellenwände stets sorgfältig durchdacht werden sollten. So wurde beispielsweise festgestellt, dass bei einem hochliegenden Einlauf die Lamellenwand möglichst bis zur Beckensohle hinuntergeführt werden sollte, da so die Gefahr der Unterströmung und damit einer verfehlten Wirkung gemindert würde (Ghawi 2017). Eine bessere Alternative könnte eine Sohlkonstruktion auf Höhe der Unterkante der Lamellenwand sein. Da auf Grundlage der erhobenen Literatur nur eingeschränkt weitere Aussagen zur Eignung von Lamellenwänden getroffen werden können, wird das hydraulische Potential hier lediglich mit „eingeschränkt geeignet“ bewertet. Jedoch sollten für eine tiefergehende Einschätzung weitere Untersuchungen herangezogen werden.

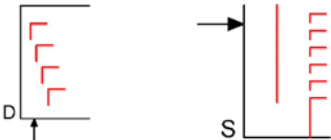
Tabelle 4.10: Überblick Bewertung Literatursynthese – LAMELLENWAND

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stababstand ▪ Stabbreite ▪ Position 				

Diffusor

Ein Diffusor erfüllt zweierlei Funktionen: Energiedissipation sowie Strömungsleitung. Im Falle einer transversalen Anströmung durch ein Rohr oder ein Gerinne kann ein orthogonal angeströmter Diffusor dafür sorgen, dass die Strömung in die entsprechende Fließrichtung geleitet wird. Laut He et al. (2015) kann mit einer sehr guten Wirkung des Elements gerechnet werden. Ohne eine solche Konstruktion würden sich aufgrund der seitlichen Anströmung sehr große Rezirkulationen bilden. Eine weitere Möglichkeit ist die unterströmte Leitwand, der ein Diffusor nachgeschaltet ist. Dieser sollte mit ausreichend großen Öffnungen sowie horizontalen Leitwänden ausgestattet sein. Wie He (2008) ausführt, kann es darüber hinaus hilfreich sein unter der Prallwand einen Grobpartikelfang zu installieren. Der Einsatz eines Diffusors bietet eine sehr gute Möglichkeit eine gleichmäßige Beckendurchströmung zu erzeugen. Wird er durchdacht bemessen, kann er maßgeblich zur Steigerung des Wirkungsgrades beitragen. Das hydraulische Potential wird deshalb als sehr hoch eingeschätzt.

Tabelle 4.11: Überblick Bewertung Literatursynthese – DIFFUSOR

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Position ▪ Leitbleche ▪ Versetzte Positionierung 				

4.2.1.3 Einbauten

Einbauten im Einlaufbereich, die über die bisher betrachteten Komponenten hinausgehen, können vielfältig gestaltet sein. Beispielsweise besteht die Möglichkeit durch die Umlenkung des Einlaufstroms aus einem Rohreinlauf die typische Jet Strömung, die sonst vom Einlauf ausgehen würde, zu vermeiden. Insbesondere sei in diesem Zuge die Anbringung eines T-Stücks erwähnt, das die Strömung in zwei Richtungen lenken würde (Links/rechts). Hier konnten sehr große Steigerungen der Rückhalteleistung im Gegensatz zum Ausgangszustand erzielt werden. Ebenfalls eine Möglichkeit stellt die Anbringung eines 90°-Passstückes dar. Lediglich bei der Lenkung nach unten kann es hier zu ungünstigen Strömungszuständen an der Sohle kommen. Nicht zu empfehlen dagegen ist die Anbringung eines Drei-Wege-Passstückes, da hier die starke Jet-Strömung nach vorne erhalten bleibt, es aber gleichzeitig zu ungünstigen Turbulenzen durch die zusätzliche Leitung nach links und rechts kommen kann (Carlston 2015). Generell ist der geringe Kostenaufwand der Einbringung eines einfachen Formstücks hervorzuheben. Da es sich jedoch um eine Konstruktion mit Rohreinlauf handelt, wird das hydraulische Potential abschließend lediglich als „eingeschränkt geeignet“ bewertet.

Die Anbringung einer Einlaufbox kann ebenfalls die kinetische Energie der zufließenden Strömung mindern. Insgesamt sollte die Einlaufbox so konzipiert sein, dass sie die ankommende Strömungsenergie dissipiert ohne zusätzliche Turbulenzen zu erzeugen und die Öffnung nicht in einer Lage gesetzt wird, die den Schlammraum gefährden könnte. Auch eine Füllung der Box mit einem Material (beispielsweise Verpackungsmaterial, Kattinig 2014) kann gleichmäßige Strömungsverhältnisse fördern. Hier sollte allerdings die Gefahr zusätzlicher Turbulenzen sowie die Wahrscheinlichkeit des Verstopfens der Box beachtet werden. Einlaufboxen können in zahlreicher Ausführung eingebracht werden und können sowohl positive als auch negative Einflüsse mit sich ziehen, weshalb diese Art der Einbauten nur eingeschränkt zu empfehlen sind.

Eine letzte hier betrachtete Option von Beckeneinbauten stellt die Einbringung eines Reflektors dar. Er kann eckig oder auch rund ausgeführt werden und verhindert die konzentrierte Einströmung ins Becken. Insgesamt wird er als positiv bewertet. Die Anwendung erfolgt vorzüglich bei Rohr- oder Gerinneinläufen. Der Einsatz eines Reflektors ist als empfehlenswert einzustufen.

Tabelle 4.12: Überblick Bewertung Literatursynthese – EINBAUTEN

Skizze:			Bewertung hydraulisches Potential				
			--	-	o	+	++
Gestaltungsparameter							
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausführung ▪ Position 							

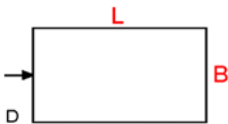
4.2.2 Sedimentationskammer

4.2.2.1 Konstruktion

Beckenabmessungen

Laut zahlreicher Studien (u.a. Persson 2000, Agunwamba 2006, Dufresne et al. 2010c) wirkt sich die Beckengeometrie und damit das Verhältnis L:B maßgeblich auf die Durchströmung und die Absetzleistung eines Sedimentationsbeckens aus. Aufgrund dessen ist das hydraulische Potential sehr hoch und die Wahl der Beckenabmessungen sollte mit Bedacht durchgeführt werden. Es konnte in allen Untersuchungen festgestellt werden, dass mit steigendem Verhältnis L:B auch die Leistungsfähigkeit des Beckens zunimmt. In diesem Fall kann von einem geringeren Anteil an Kurzschlussströmung, einem hohen effektiven Sedimentationsvolumen sowie der Bildung einer pfropfenähnlichen Strömung ausgegangen werden. Die besten Ergebnisse waren bei Becken mit $L:B > 10$ zu beobachten. Becken mit Verhältnissen $L:B = 4-10$ wurden als positiv eingestuft. Die schlechteste Leistungsfähigkeit wird bei einem quadratischen Becken erwartet und ist demnach nicht zu empfehlen. Eine Grenze nach oben hin, die sicherlich besteht, wurde nicht weiter untersucht.

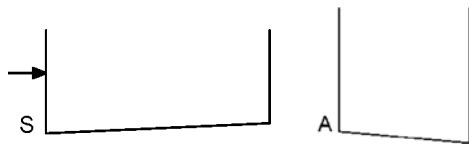
Tabelle 4.13: Überblick Bewertung Literatursynthese – BECKENABMESSUNGEN

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
Gestaltungsparameter					
▪ Abmessungen					

Sohlgestaltung

Die Sohlgestaltung stellt zwar keinen zentralen Bestandteil der optimierten Beckenkonstruktion dar, jedoch kann sie eine gute Sedimentationsleistung unterstützen. Demnach ist es förderlich, eine Längs- oder Querneigung der Beckensohle vorzusehen (Stovin und Saul 2000, Zhang 2014). Die sedimentierten Feststoffe können sich in diesem Fall selbstständig in Richtung eines Pumpensumpfes bewegen. Die Gefahr der Resuspension könnte so deutlich gemindert werden. Da die Sohlgestaltung nur unterstützend wirkt, wird das hydraulische Potential lediglich als „eingeschränkt geeignet“ gewertet.

Tabelle 4.14: Überblick Bewertung Literatursynthese – SOHLGESTALTUNG


Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
Gestaltungsparameter					
▪ Gefälle/ Neigung					

4.2.2.2 Leitelemente – quer

Prallwände – unterströmt

Unterströmte Prallwände haben im Bereich der Sedimentationskammer die Aufgabe Rezirkulationszonen zu minimieren. Dabei erbringt die Positionierung inmitten einer Rezirkulationszone die besten Ergebnisse (Radaei et al. 2013). In der Auswertung der zusammengetragenen Literatur wurden Prallwände mit einer Eintauchtiefe von zumeist 30 bis 50 Prozent der Beckenhöhe zwischen 30 und 90 Prozent der Beckenlänge positioniert. Es ist zu erkennen, dass von dem Einbringen kurz vor dem Klärüberlauf abzuraten ist (Tamayol et al. 2008). Außerdem ist eine positive Wirkung bei mehreren Elementen zu beobachten. Darüber hinaus konnte jedoch kein gleichwertiger Trend festgestellt werden. Dies ist damit zu erklären, dass die passende Positionierung der Prallwand deutlich sensibler gegenüber der genauen Beckenkonfiguration bzw. der daraus entstehenden Durchströmung ist, als beispielsweise Prallwände im Einlaufbereich. Finden keine Analysen der genauen Durchströmung statt, kann das Element sehr leicht an falscher Stelle positioniert werden und sogar negative Auswirkungen mit sich ziehen. Ist eine unterströmte Prallwand gut positioniert, kann sie das Rezirkualtionsvolumen mindern und zur Erhöhung des Wirkungsgrades beitragen. Unterströmte Prallwände im Bereich der Sedimentationskammer werden vornehmlich bei hochliegenden Einläufen eingesetzt. Da der passende Einsatz einer Prallwand im Bereich der Sedimentationskammer solch genaue Kenntnisse über die Durchströmungscharakteristik erfordert und somit das Risiko einer falschen Anbringung erhöht ist, werden Prallwände in der Sedimentationskammer nur als „eingeschränkt geeignet“ bewertet.

Tabelle 4.15: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-UNTERSTRÖMT

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eintauchtiefe ▪ Position ▪ Winkel ▪ Anzahl 				


Prallwände – überströmt

Für überströmte Prallwände gibt sich ein ähnliches Bild wie bei den unterströmten Komponenten, weshalb eine Anwendung nur eingeschränkt empfohlen wird. Die Aussagen der bisherigen Forschungsergebnisse lassen zwar keine allgemeingültige Empfehlung zu, jedoch kann auch hier beobachtet werden, dass von einer Positionierung im Bereich des Klärüberlaufs abzuraten ist (Tamayol et al. 2008). Eine gut wahrnehmbare Reduktion der Rezirkulationen ergibt sich bei einer Positionierung bei etwa der Beckenhälfte. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass dort in den meisten Fällen eine Rezirkulation vorliegt (Heydari et al. 2013b). Entsprechend der

Erkenntnisse für unterströmte Prallwände erhöht sich die Leistungsfähigkeit ebenfalls durch Einbringen mehrerer Bleche. Der Anströmwinkel für die Bleche sollte zwischen 60 und 90° liegen. Winkel von 30 oder 150° ergeben sogar eine Verschlechterung in Bezug auf die Ausgangssituation und sind zu vermeiden.

Da sich diese Optimierungskomponente sehr sensibel im Zusammenwirken mit anderen Beckenparametern zeigt, wird sie insgesamt nur eingeschränkt empfohlen.


Tabelle 4.16: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-ÜBERSTRÖMT

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Höhe ▪ Position ▪ Winkel ▪ Anzahl 				

Prallwände – perforiert

Perforierte Prallwände können auch innerhalb der Sedimentationskammer dafür eingesetzt werden die Strömung zu vergleichmäßigen. Dafür werden Positionen zwischen ein Drittel und zwei Drittel der Beckenlänge empfohlen. Öffnungsanteile von 55 bis 65 Prozent stellen dabei eine wirksame Bandbreite dar. Diese können beispielsweise gut durch eine Gitterkonstruktion umgesetzt werden (Xanthos et al. 2011). Auch eine Umsetzung mit Naturmaterialien (z.B. Jute) ist möglich, jedoch wird davon aufgrund der hohen Störanfälligkeit abgeraten. Insgesamt sollte bei der Wahl der Öffnungen und der genaueren Konstruktion darauf geachtet werden, dass sie sich für die beckenspezifische Feststoffzusammensetzung eignet. Werden diese Grundsätze beachtet, stellen perforierte Prallwände eine gute Möglichkeit dar die Strömung im Bereich der Sedimentationskammer zu beruhigen.

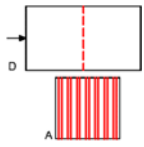
Tabelle 4.17: Überblick Bewertung Literatursynthese – PRALLWAND-PERFORIERT

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Position ▪ Öffnungsanteil ▪ Winkel ▪ Anzahl 				

Lamellenwand

Ähnlich der perforierten Prallwand, kann auch eine Lamellenwand in verschiedenster Ausführung angewendet werden. Hier lassen sich gute Ergebnisse erwarten (u.a. Lee 2017). Es kommt zu einer weiteren Regulierung der Strömung und gleichmäßigen Verteilung auf den Fließquerschnitt. Rezirkulationszonen können gemindert werden. Insgesamt ist der Einsatz dieser Optimierungs-Komponente als positiv zu werten.


Tabelle 4.18: Überblick Bewertung Literatursynthese – LAMELLENWAND

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stababstand ▪ Stabbreite ▪ Position 				

Leitwände – alternierend

Die Idee der alternierenden Leitwände wird oftmals im Bereich der Trinkwasserbehandlung umgesetzt. Durch abwechselnd angeordnete Leitwände entsteht ein längerer Fließweg (= höheres Verhältnis L:B). Dies wirkt sich positiv auf die Aufenthaltszeit im Becken aus. Werden diese Leitwände quer zur langen Beckenseite angeordnet, entstehen mehrere Gerinneeinheiten mit jeweils recht kurzen Längen. Die Elemente müssen so angeordnet sein, dass einerseits die Fließweg möglichst lang wird und dass andererseits keine übermäßige Turbulenzbildung in den Kurvenbereichen entsteht. Es sind deshalb je Becken 4 und mehr Elemente anzubringen. Weniger Elemente sind zwar auch möglich, bilden dann aber nicht den erwünschten Gerinnecharakter, sondern neigen zu Rezirkulationszonen. Alle Elemente sollten in gleichmäßigem Abstand voneinander angeordnet werden. Die Länge sollte so bemessen sein, dass sie etwa 70 bis 80 Prozent der Beckenbreite einnimmt, insgesamt sollte sie aber in etwa der Gerinnebreite entsprechen, um nicht durch eine Einschnürung des Fließquerschnitts zusätzliche Turbulenzen zu provozieren (u.a.Vega et al. 2003, Olukanni und Ducoste 2011, Carlston 2015). Alles in allem kann bei richtiger Umsetzung durch den Einbau solcher Elemente eine deutliche Steigerung der Aufenthaltszeit erwirkt werden, deshalb sind sie zu empfehlen.

Tabelle 4.19: Überblick Bewertung Literatursynthese – LEITWÄNDE-ALTERNIEREND - QUER

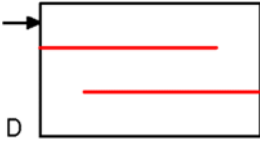
Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anzahl ▪ Länge ▪ Gerinnebreite ▪ Kurvenbreite 				

4.2.2.3 Leitelemente – längs

Leitwände – alternierend

Längs angeordnete alternierende Leitwände beruhen auf dem gleichen Prinzip, wie die oben beschriebenen quer angeordneten. Der Unterschied beruht insbesondere in der Länge der Gerinneeinheiten, die sich bilden. Aufgrund der längeren Fließwege in den einzelnen Gerinnen kann sich ein gleichmäßigeres Durchströmungsprofil entwickeln als bei quer angeordneten Varianten (u.a. Olukanni 2011, Olukanni und Ducoste 2011). Aus diesem Grund sind sie diesen vorzuziehen. Grundsätzlich gelten für beide Ausführungen die gleichen Prinzipien. Durch die Kurven sollte keine zusätzliche Einschnürung des Fließquerschnittes erfolgen. Die Kurvenbreite sollte also der Gerinnebreite entsprechen. Die Länge der Elemente kann aber auf bis zu 80 bis 90 Prozent der Beckenlänge erweitert werden. Da eine hohe Zahl an Leitwänden zu deutlich erhöhten Geschwindigkeiten führt, ist hier im Gegensatz zu den quer angeordneten Wänden die Anzahl auf zwei zu beschränken. Werden all diese Parameter eingehalten, gehört diese Optimierungskomponente zu den effizientesten Möglichkeiten einer Beckenoptimierung und birgt ein sehr hohes hydraulisches Potential.

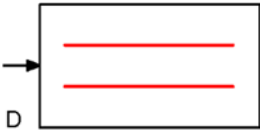
Tabelle 4.20: Überblick Bewertung Literatursynthese – LEITWÄNDE-ALTERNIEREND – LÄNGS

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anzahl ▪ Länge ▪ Gerinnebreite ▪ Kurvenbreite 				

Trennwände

Trennwände längs des Beckens dienen dazu das Becken in zwei voneinander abgekoppelte Systeme zu verteilen. Das Verhältnis L:B ist recht hoch, so dass erwartet wird, dass weniger Turbulenzen auftreten und damit die Leistungsfähigkeit des Sedimentationsbeckens steigt (He und Marsalek 2009). Das hydraulische Potential wird als hoch eingeschätzt.



Tabelle 4.21: Überblick Bewertung Literatursynthese – TRENNWÄNDE

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Länge ▪ Anzahl 				

4.2.2.4 Einbauten

Eine weitere Möglichkeit der Strömungsregulation bilden Einbauten im Bereich der Sedimentationskammer. Im Rahmen dieses Projektes wurden Ergebnisse zu mittig und seitlich angeordneten Inseln sowie zu einer über die gesamte Breite reichende Schwelle erhoben. Seitliche Elemente sind demnach nicht zu empfehlen, da sie zu verstärkter Turbulenzbildung beitragen. Schwellen oder mittig angeordnete Inseln hingegen werden als positiv bewertet (Persson 2000). Zusammenfassend ist jedoch zu sagen, dass die sedimentationsfördernde Wirkung so gering ist, dass andere Varianten eher für die Optimierung der Durchströmung angeraten werden.

Tabelle 4.22: Überblick Bewertung Literatursynthese – EINBAUTEN

Skizze:		Bewertung hydraulisches Potential				
		--	-	o	+	++
Gestaltungsparameter						
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Position ▪ Ausführung 						


4.2.3 Klärüberlauf

Überlaufwehr

Überlaufwehre sind die am häufigsten umgesetzte Gestaltung des Klärüberlaufs. Zumeist werden sie in der Stirnseite des Beckens angeordnet. Die erhobenen Studien unterstreichen, dass die Ausführung des Klärüberlaufs keinen maßgeblichen Einfluss auf den Sedimentationswirkungsgrad hat, weshalb das hydraulische Potential als „eingeschränkt“ bewertet wird. Er sollte lediglich so ausgeführt sein, dass die Strömungsverhältnisse im Becken nicht grundsätzlich gestört werden. Aufgrund des geringen Einflusses werden die Überlaufkonstruktionen generell nicht als sehr empfehlenswert eingeordnet.

Grundsätzlich zeigten sich bei allen Untersuchungen, dass durch eine geringe Schwellenbeschickung der Einfluss des Klärüberlaufs auf die Beckendurchströmung gemindert werden kann (Kawamura und Lang 1986). Da dies insbesondere durch eine seitliche Positionierung umgesetzt werden kann, ist diese Anordnung der rein frontalen Anordnung vorzuziehen.


Tabelle 4.23: Überblick Bewertung Literatursynthese – ÜBERLAUFWEHR

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Länge ▪ Position ▪ Ausführung 				

Überlaufrinne

Die gleichen Prinzipien gelten ebenfalls für die Überlaufrinnen. Jedoch wurde festgestellt, dass insbesondere die beidseitige Beschickung, die bei Überlaufrinnen möglich ist, im Gegensatz zu den Überlaufwehren, die am Beckenrand angeordnet werden, zu einer gleichmäßigeren Strömung im Bereich des Klärüberlaufs führt (u.a. McCorquodale et al. 2006)

Tabelle 4.24: Überblick Bewertung Literatursynthese – ÜBERLAUFRINNE


Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anzahl ▪ Länge ▪ Position ▪ Ausführung 				

4.2.4 Becken gesamt

Position Einlauf-Auslauf

Neben der reinen Gestaltung des Einlaufbauwerks, dessen Bedeutung bereits ausgeführt wurde, spielt auch die Positionierung von Ein- und Auslauf zueinander eine entscheidende Rolle. Dabei wird insbesondere der Anteil der Kurzschlussströmung beeinflusst. Alle Studien betonen, dass Ein- und Auslauf möglichst weit voneinander entfernt sein sollten (u.a. Persson 2000, Camnasio et al. 2011, Li et al. 2013). Das bedeutet, dass die beste Kombination die Anordnung in den jeweils entgegengesetzten Ecken ist. Je weiter die beiden Komponenten zusammenrücken, desto größer wird der Anteil, der mit zu geringer Aufenthaltszeit das Becken verlässt. Bei einer außermittigen Anordnung beider Komponenten auf der gleichen Seite kommt zusätzlich hinzu, dass aufgrund der ungünstigen Lage die geringsten Anteile des Beckenvolumens aktiv genutzt werden. Da die Positionierung von Ein- und Auslauf maßgeblichen Einfluss auf die Durchströmungscharakteristik eines Beckens hat, wird die Optimierungs-Komponente hier als „sehr geeignet“ eingestuft, was anders als bei den konkreten Gestaltungsansätzen darauf auf die zu erreichenden Effekte abzielt.

Tabelle 4.25: Überblick Bewertung Literatursynthese – POSITION EINLAUF/ AUSLAUF


Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Position ▪ Durchmesser/ Öffnungsfläche 				

Höhenlage Einlauf-Auslauf

Ähnliche Grundsätze wie für die Position Einlauf/Auslauf gelten für die Höhenlage. Auch hier sind die besten Ergebnisse zu beobachten, wenn die beiden Komponenten möglichst weit voneinander entfernt angeordnet werden (Einlauf oben/Auslauf unten bzw. Einlauf unten/Auslauf oben). Dabei ist eine Strömunglenkung entgegen der Gravitationskraft positiver zu werten, als mit der Gravitationskraft. Anordnungen auf gleicher Ebene führen zu einem hohen Maß an Kurzschlussströmung (u.a. Agunwamba 2006, Li et al. 2013, Wang et al. 2014). Insgesamt ist an dieser Stelle jedoch anzumerken, dass die Ausläufe von Regenklärbecken unter normalen Umständen als Überfallkonstruktionen und dementsprechend hochliegend ausgeführt werden. Ferner besteht bei tiefliegenden Ausläufen ein erhöhtes Risiko der Resuspension. Sie sind deswegen allgemein nicht zu empfehlen.

Auch diese Optimierungs-Komponente wird aufgrund ihrer Einflussnahme als „sehr geeignet“ bewertet.

Tabelle 4.26: Überblick Bewertung Literatursynthese – HÖHENLAGE EINLAUF/ AUSLAUF

Skizze:	Bewertung hydraulisches Potential				
	--	-	o	+	++
	Gestaltungsparameter				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Position ▪ Durchmesser/ Öffnungsfläche 				

5 Empfehlungen

Empfehlungen für die Optimierung der Durchströmungscharakteristik eines Regenklärbeckens können in vielerlei Hinsicht gegeben werden und sind je nach individueller Beckenkonstruktion unterschiedlich.

Einige Grundsätze, die für alle Konstruktionen gelten, konnten jedoch innerhalb dieses Projektes herausgearbeitet werden:

1. *Jedes Becken hat ein individuelles Strömungsbild.*

Das Strömungsbild hängt von den verschiedenen betrieblichen und konstruktiven Parametern eines Beckens ab. Kein Becken gleicht exakt dem anderen. Bei der Wahl von Optimierungs-Komponenten sollte deshalb stets auf die spezifische Charakteristik des Beckens geachtet werden. Allein die Änderung der Oberflächenbeschickung kann die Wirkung der verschiedenen Komponenten erheblich verändern.

2. *Die Einlaufgestaltung hat maßgeblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Beckens.*

Die Konstruktion des Einlaufs bildet die Grundlage für das Auftreten verschiedener Phänomene innerhalb des Beckens (v.a. Kurzschlussströmung, Turbulenzen, Rezirkulationen, Resuspension). Ihr sollte innerhalb der Bemessung die größte Aufmerksamkeit gewidmet werden.

3. *Die Anströmfläche sollte so groß wie möglich sein.*

Je größer die Anströmfläche, desto gleichmäßiger kann das Becken durchströmt werden. Totzonen, die sich in den Eckbereichen des Einlaufs bilden, werden reduziert und maximieren das aktive Sedimentationsvolumen. Mehrfache Einlaufströme sind einfachen zu bevorzugen.

4. *Rohreinläufe sind, soweit dies möglich ist, zu vermeiden.*

Rohreinläufe bilden eine gebündelte Jet-Strömung mit hoher kinetischer Energie. Innerhalb dieser Strömung sind die Fließgeschwindigkeiten oftmals höher, als die Sinkgeschwindigkeiten der Partikel, so dass die Sedimentation gestört wird. Der Anteil der Kurzschlussströmung ist hoch. Außerhalb der Strömung bilden sich große inaktive Volumenanteile.

5. *Je länger der Fließweg ist, desto höher ist die Rückhalteleistung.*

Eine Verlängerung des Fließwegs mindert den Anteil von Kurzschlussströmung. Durch geschickte Positionierung von Leitelementen innerhalb des Beckens kann die Rückhalteleistung demnach gesteigert werden. Dabei sollten zusätzliche Turbulenzen oder erhöhte Geschwindigkeiten vermieden werden.

6. *Optimierungs-Komponenten innerhalb der Sedimentationskammer erfordern ein höheres Verständnis der Durchströmungscharakteristik des Beckens.*

Die Wirksamkeit von Elementen, die in der Sedimentationskammer angebracht werden, hängt sehr von der richtigen Positionierung ab. Eine solche ist nur möglich, wenn genauere Kenntnis über das Verhalten des Beckens vorliegen. Falsche Positionierungen können vielmehr zur Minderung der Rückhalteleistung beitragen.

7. *Klärüberläufe tragen nicht entscheidend zum Wirkungsgrad eines Regenklärbeckens bei.*

Zwar kann eine Vergleichmäßigung der Strömung beispielsweise durch Überlaufrinnen erreicht werden, jedoch ist keine deutliche Einflussnahme auf den Wirkungsgrad zu erkennen.

Alle darüber hinaus reichenden Detailfragen müssen individuell auf das Becken abgestimmt werden. Hinweise gibt die aufgestellte Literatursynthese (Kapitel 4.2 sowie Anlage 3).

6 Zusammenfassung

Regenklärbecken stellen als wasserwirtschaftliche Anlage eine entscheidende Emissionsquelle für die Gewässer dar. Dabei tragen sie durch Sedimentationsprozesse zumindest zur groben Entschlammung des Wassers bei. Infolge hydraulischer Mängel muss bei einer Vielzahl der eingesetzten Becken davon ausgegangen werden, dass die Rückhalteleistung gemindert ist. Im Rahmen verschiedenster Forschungsvorhaben der letzten Jahrzehnte wurde die Abhängigkeit des hydraulischen Verhaltens von der Beckengeometrie untersucht. Dabei konnten zahlreiche Optimierungsvorschläge ermittelt werden. Ziel dieses Projektes war die systematische Aufarbeitung dieser Erkenntnisse sowie die Synthese in einem übersichtlichen Katalog. In diesem Zuge sollte eine normierte Bewertung der verschiedenen Komponenten aufgestellt werden.

Der entstandene Katalog soll als übersichtliche Handreichung für Planungsprozesse dienen. Dabei wird keine allgemeingültige Aussage getroffen, sondern ein Hinweis auf ein mögliches hydraulisches Potential der Komponente gegeben. Für den Fall, dass dies möglich ist, werden darüber hinaus weitere Detailempfehlungen angesetzt. Es ist anzumerken, dass alle gelisteten Bewertungen und Empfehlungen lediglich die Ergebnisse aus der erhobenen Literatur widerspiegeln und keine eigenen Erkenntnisse sind.

Ausgehend von dem Katalog können erste Rückschlüsse auf die Wirksamkeit verschiedener Komponenten gezogen werden. Die daraus folgende Aufgabe des Planers ist dann die genaue Ausgestaltung der Beckenkonstruktion.

Wichtig ist, dass die Durchströmungscharakteristik eines Beckens stets als flexibles und individuell zu wertendes System aufgefasst wird. Aus diesem Grund bedarf jeder Optimierungsschritt ein hohes Maß an Verständnis für das Beckenverhalten. Andernfalls können bei falscher Ausführung gute Optimierungs-Ansätze zu einer Minderung der Sedimentationsleistung beitragen. Grundsätzlich gilt: Je größer die Kenntnis über das Durchströmungsverhalten, desto effektiver können Optimierungen umgesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- Agunwamba, J. C. (2006): Effect of the location of the inlet and outlet structures on short-circuiting: experimental investigation. In: *Water environment research*, 78(6), S. 580–589.
- Ahmed, F. H., Kamel, A., und Jawad, S. A. (1996): Experimental determination of the optimal location and contraction of sedimentation tank baffles. In: *Water, Air, and Soil Pollution*, 92(3–4), S. 251–271.
- Al-Saadi, S., Al-Yaqoubi, S., Al-Moharbi, N., Al-Rusheid, S., Al-Ajmi, R., Al-Dallal, A., und Natrajan, R. (2016): Study on Flow Behaviour in Rectangular Sedimentation Tank. In: *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(9), S. 301–305.
- Al-Sammarraee, M., Chan, A., Salim, S. M., und Mahabaleswar, U. S. (2009): Part II: Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part II: The effects of baffles. In: *Chemical Engineering Journal*, 152(2–3), S. 315–321.
- Asgharzadeh, H., Firoozabadi, B., und Afshin, H. (2011): Experimental investigation of effects of baffle configurations on the performance of a secondary sedimentation tank. In: *Scientia Iranica*, 18(4), S. 938–949.
- ATV-A 128 (1992): Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hrsg. | Hennef.
- Bretscher, U., Krebs, P., und Hager, W. H. (1992): Improvement of flow in final settling tanks. In: *Journal of Environmental Engineering*, 118(3), S. 307–321.
- Cai, J. B., Zhu, L., und Duan, X. B. (2005): Study on Optimum Design of rectangular Sedimentation Tanks. In: *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 27(6), S. 67–70.
- Camnasio, E., Erpicum, S., Orsi, E., Piroton, M., Schleiss, A. J., und Dewals, B. (2013): Coupling between flow and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. In: *Journal of Hydraulic Research*, 51(5), S. 535–547.
- Camnasio, E., Orsi, E., und Schleiss, A. (2011): Experimental study of velocity fields in rectangular shallow reservoirs. In: *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), S. 6.
- Carlston, J. S. (2015): Impact of geometric design of hydraulic contact tanks on residence time distributions. Colorado State University, Colorado.
- Carlston, J. S. und Venayagamoorthy, S. K. (2015): Impact of Modified Inlets on Residence Times in Baffled Tanks. In: *Journal: American Water Works Association*, 107(6).
- Dong, J. F., Zhang, Y., Zhang, W. Y., und Bahaj, A. (2013): Hydraulic Behaviors of Settling Tanks under Two Kinds of Configurations. In: *Advanced Materials Research*, 610(PART 3), S. 2493–2496.
- Dufresne, M., Dewals, B. J., Erpicum, S., Archambeau, P., und Piroton, M. (2010a): Classification of flow patterns in rectangular shallow reservoirs. In: *Journal of Hydraulic Research*, 48(2), S. 197–204.
- Dufresne, M., Dewals, B. J., Erpicum, S., Archambeau, P., und Piroton, M. (2010b): Experimental investigation of flow pattern and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. In: *International Journal of Sediment Research*, 25(3), S. 258–270.

- Dufresne, M., Dewals, B. J., Erpicum, S., Archambeau, P., und Piroton, M. (2010c): Flow and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. Lyon.
- Dufresne, M., Dewals, B. J., Erpicum, S., Archambeau, P., und Piroton, M. (2011): Numerical investigations of flow patterns in rectangular shallow reservoirs. In: Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 5(2), S. 247–258.
- Dufresne, M., Dewals, B. J., Erpicum, S., Archambeau, P., und Piroton, M. (2012): Flow patterns and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. In: Water and Environment Journal, 2012(4), S. 7.
- DWA-A 102 (2016): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer (Entwurf, Stand Oktober 2016). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hrsg. | Hennef.
- DWA-A 166 (2013): Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung - Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hrsg. | Hennef.
- DWA-M 153 (2005): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hrsg. | Hennef.
- Feldhaus, R. (1993): Zur hydrodynamisch-numerischen Simulation von Mischwasserspeichern. Sankt Augustin.
- Fornshell, G. (2000): Settling Basin Design. 106 Idaho: WRAC (Western Regional Aquaculture Center).
- Foster, M. H., Guidotti, B., Talley, T., und Agosta, C. (2006): Comprehensive Aerated Stabilization Basin Evaluation. Pulp and Paper Mill Southeastern United States Mandeville, LA: Environmental Business Specialists, LLC.
- Geiger, W. F., Hübner, M., und v. d. Woldenberg, L. (1998): Vergleichende Modelluntersuchungen zur Wirkungsweise von Regenentlastungsanlagen. Forschungsbericht. Ge 459/12-1, S. 13, Essen: Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft der Universität-GH Essen.
- Ghawi, A. H. (2017): Application of computational fluid dynamics modelling to a horizontal sedimentation tank in Iraq. In: International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 6(4).
- Ghawi, A. H. und Kris, J. (2008): Design and optimization of settling tanks performances in Slovakia. Gehalten auf der XX-th Jubilee-National, VIII-Th International Scientific and Technical Conference Water Supply and Water Quality Water 2008, Poznan.
- Ghawi, A. H. und Kris, J. (2009): A CFD methodology for the design of rectangular sedimentation tanks in potable water treatment plants. In: Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua, 58(3), S. 212–220.
- Gujer, W. (2007): Siedlungswasserwirtschaft. Berlin, Heidelberg.
- Hazen, A. (1904): On Sedimentation. In: ASCE Transaction, 53(980), S. 45–71.
- He, C. (2008): Advanced Hydraulic Studies on Enhancing Particle Removal. Denmark, Europe.
- He, C. und Marsalek, J. (2009): Hydraulic optimization of a combined sewer overflow (CSO) storage facility using numerical and physical modeling. In: Canadian Journal of Civil Engineering, 36(2), S. 363–373.
- He, C., Scott, E., und Rochfort, Q. (2015): Enhancing sedimentation by improving flow conditions using parallel retrofit baffles. In: Journal of Environmental Management, 160, S. 1–6.

- Heydari, M., Bajestan, M. S., Kashkuli, H. A., und Sedghi, H. (2013a): The Effect Angle of Baffle on the Performance of Settling Basin. In: *World Applied Sciences Journal*, 21(6), S. 829–837.
- Heydari, M. M., Shafai-Bajestan, M., Kashkuli, H. A., und Sedghi, H. (2014): Experimental and Numerical Investigations of Baffle Effect on the Removal Efficiency of Sedimentation Basin. In: *Advances in Environmental Biology*, 8(10), S. 1015–1021.
- Heydari, M., Shafai-Bajestan, M., Kashkuli, H. A., und Sedghi, H. (2013b): Experimental study of baffle angle effect on the removal efficiency of sedimentation basin. In: *Advances in Environmental Biology*, , S. 2209–2218.
- Howard, A., Mohseni, O., Gulliver, J., und Stefan, H. (2011): SAFL Baffle retrofit for suspended sediment removal in storm sewer sumps. In: *Water Research*, 45(18), S. 5895–5904.
- Huggins, D. L., Piedrahita, R. H., und Rumsey, T. (2005): Use of computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceway design to increase settling effectiveness. In: *Aquacultural Engineering*, 33(3), S. 167–180.
- Jamshidnia, H. und Firoozabadi, B. (2010): Experimental Investigation of Baffle Effect on the Flow in a Rectangular Primary Sedimentation Tank. In: *Scientia Iranica Transaction B-Mechanical Engineering*, 17(4), S. 241–252.
- Janssen, R. H. (2009): Efficiency of Sediment Settling Basins. In: *Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*. , S. 2025–2030,.
- Kantoush, S. A., Sumi, T., und Schleiss, A. (2010): Geometry effect on Flow and sediment deposition patterns in shallow basins. In: *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 54, S. 133–138.
- Kattnig, J. J. (2014): Use of innovative techniques to optimize the residence time distribution of drinking water contact tanks. Masterthesis. Colorado State University, Colorado.
- Kawamura, S. und Lang, J. (1986): Re-Evaluation of Launderers in Rectangular Sedimentation Basins. In: *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 58(12), S. 1124.
- Kemper, M. (2016): *Strömungsverhalten und Sedimentationswirksamkeit in Regenbecken mit Schrägklärer-Einbauten*. Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Khan, S. (2012): *Hydrodynamics of sediment retention ponds*. Dissertation. New Zealand, Australia/Oceania.
- Kobus, H. [Hrsg. . und Abraham, G. [Mitverf. . (1984): *Wasserbauliches Versuchswesen*. Hamburg, Berlin.
- Kris, J. und Ghawi, A. H. (2007): Design And Optimization Of Sedimentation Tank In Slovakia With CFD Modeling. Gehalten auf der 10 th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Sibenik, Kroatien.
- Kutzner, R. (Hrsg.) (2005): *Prozessorientierte Beschreibung von Niederschlagswasserbehandlungsanlagen - Möglichkeiten und Grenzen*. Essen: Universität Gesamthochschule Essen.
- Laurien, E. und Oertel, H. (2011): *Numerische Strömungsmechanik: Grundgleichungen und Modelle - Lösungsmethoden - Qualität und Genauigkeit*. 4., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Lee, B. (2017): Evaluation of Double Perforated Baffles Installed in Rectangular Secondary Clarifiers. In: *Water*, 9(6), S. 407.
- Li, M., Zhang, H., Lemckert, C. J., Lu, Z., Lei, L.-M., und Stratton, H. M. et. al. (2013): Three-dimensional Investigation of Retention Time Distribution of Waste Stabilisation Ponds.

- In: Proceedings of 20th International Congress on Modelling and Simulation: Adapting to change: the multiple roles of modelling. Adelaide, Australia.
- Liu, B., Ma, J., Luo, L., Bai, Y., Wang, S., und Zhang, J. (2010): Two-Dimensional LDV Measurement, Modeling, and Optimal Design of Rectangular Primary Settling Tanks. In: *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 136(5), S. 501–507.
- Liu, X., Xue, H., Hua, Z., Yao, Q., und Hu, J. (2013): Inverse calculation model for optimal design of rectangular sedimentation tanks. In: *Journal of Environmental Engineering*, 139(3), S. 455–458.
- López, P. R., Lavin, A. G., Lopez, M. M. M., und de las Heras, J. L. B. (2008): Flow models for rectangular sedimentation tanks. In: *Chemical Engineering and Processing*, 47(9–10), S. 1705–1716.
- Lutfy, M., El-Nahhas, K., und Safwat, M. (2015): Performance optimization of rectangular settling tanks in small water treatment plants by numerical approach. In: Proceedings of the 18th International Water Technology Conference (IWTC18). Sharm el sheikh.
- McCorquodale, J. A., Griborio, A., und Georgiou, I. (2006): Application of a CFD Model to improve the Performance of Rectangular Clarifiers. In: Proceedings of the Water Environment Federation. Bd. 2006, , S. 310–320, Dallas.
- Mohn, R. (2017): NRW MEREBEN - Maßnahmen zur Ertüchtigung von Regenklärbecken und Hinweise zu deren Neubau (Phase 1: Ertüchtigung des Bestandes). : IWARU.
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Rothmayer, A. P., und Huebsch, W. W. (2014): Fundamentals of fluid mechanics. : John Wiley & Sons.
- Oca, J., Masalo, I., und Reig, L. (2004): Comparative analysis of flow patterns in aquaculture rectangular tanks with different water inlet characteristics. In: *Aquacultural Engineering*, 31(3–4), S. 221–236.
- Olukanni, D. O. (2011): Hydraulic Modeling and Optimization of Waste Stabilization Pond Design for Developing Nations. PhD Thesis. Covenant University, Ota, Nigeria.
- Olukanni, D. O. und Ducoste, J. J. (2011): Optimization of waste stabilization pond design for developing nations using computational fluid dynamics. In: *Ecological Engineering*, 37(11), S. 1878–1888.
- Park, N. S., Kim, S. S., Lee, Y. J., und Wang, C. K. (2014): Effects of longitudinal baffles on particles settling in a sedimentation basin. In: *Water Science and Technology*, 69(6), S. 1212–1218.
- Patziger, M., Günthert, F. W., Jardin, N., Kainz, H., und Londong, J. (2016): On the design and operation of primary settling tanks in state of the art wastewater treatment and water resources recovery. In: *Water Science & Technology*, 74(9), S. 2060–2067.
- Persson, J. (2000): The hydraulic performance of ponds of various layouts. In: *Urban Water*, 2(3), S. 243–250.
- Persson, J., Somes, N. L. G., und Wong, T. H. F. (1999): Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. In: *Water science and technology*, 40(3), S. 291–300.
- Persson, J. und Wittgren, H. B. (2003): How hydrological and hydraulic conditions affect performance of ponds. In: *Ecological Engineering*, 21(4–5), S. 259–269.
- Quarini, G., Innes, H., Smith, M., und Wise, D. (1996): Hydrodynamic modelling of sedimentation tanks. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 210(2), S. 83–92.

- Radaei, E., Nikbinb, S., und Shahrokhi, M. (2013): Numerical investigation of angled baffle on the flow pattern in a rectangular primary sedimentation tank. In: *Research in Civil and Environmental Engineering*, 1, S. 79–91.
- Razmi, A., Firoozabadi, B., und Ahmadi, G. (2009): Experimental and numerical approach to enlargement of performance of primary settling tanks. In: *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2(1).
- Razmi, A. M., Bakhtyar, R., Firoozabadi, B., und Barry, D. A. (2013): Experiments and numerical modeling of baffle configuration effects on the performance of sedimentation tanks. In: *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(2), S. 140–150.
- Rostami, F., Shahrokhi, M., Said, M. A., Abdullah, R., und Syafalni (2011): Numerical modeling on inlet aperture effects on flow pattern in primary settling tanks. In: *Applied Mathematical Modelling*, 35(6), S. 3012–3020.
- Sánchez, A. (2001): Estudios de Dispersión en Lagunas Anaerobias para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas. (Masterthesis). rthesis. Instituto Cinara, Universidad del Valle, Cali.
- Schütttrumpf, H. (2014): Möglichkeiten und Perspektiven wasserbaulicher Modellversuche. In: *Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2014*. Aachen.
- Shahrokhi, M., Rostami, F., Md Said, M. A., und Syafalni, S. (2011a): Numerical simulation of influence of inlet configuration on flow pattern in primary rectangular sedimentation tanks. In: *World Applied Sciences Journal*, 15(7), S. 1024–1031.
- Shahrokhi, M., Rostami, F., Md Said, M. A., Yazdi, S. R. S., und Syafalni (2012): The effect of number of baffles on the improvement efficiency of primary sedimentation tanks. In: *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), S. 3725–3735.
- Shahrokhi, M., Rostami, F., Said, M. A. M., und Syafalni (2013a): Numerical modeling of baffle location effects on the flow pattern of primary sedimentation tanks. In: *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), S. 4486–4496.
- Shahrokhi, M., Rostami, F., Said, M. A. M., Yazdi, S. R. S., und Syafalni (2013b): Experimental Investigation of the Influence of Baffle Position on the Flow Field, Sediment Concentration, and Efficiency of Rectangular Primary Sedimentation Tanks. In: *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 139(1), S. 88–94.
- Shahrokhi, M., Rostami, F., Said, M. A. M., Yazdi, S. R. S., und Syafalni, S. (2013c): Computational investigations of baffle configuration effects on the performance of primary sedimentation tanks. In: *Water and Environment Journal*, 27(4), S. 484–494.
- Shahrokhi, M., Said, M., Rostami, F., und Syafalni (2011b): The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks. Bd. 6, , S. 392–396, Gehalten auf der 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, Singapur: IACSIT.
- Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Dissertation. TU Berlin, Berlin.
- Shilton, A. und Harrison, J. (2003): Guidelines for the hydraulic design of waste stabilization ponds. Institute of Technology and Engineering, Massey University, Hrsg. | Palmerston North, New Zealand: IWA.
- Stamou, A. I., Adams, E. W., und Rodi, W. (1990): Numerical modeling of flow and settling in primary rectangular clarifiers. In: *Journal of hydraulic research*, 27(5), S. 665–682.
- Stamou, A. I. und Noutsopoulos, G. (1994): Evaluating the effect of inlet arrangement in settling tanks using the hydraulic efficiency diagram. In: *Water S. A.*, 20(1), S. 77–84.

- Stamou, A. I., Theodoridis, G., und Xanthopoulos, K. (2009): Design of Secondary Settling Tanks Using a CFD Model. In: *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 135(7), S. 551–561.
- Standard, A. (2002): *Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- Stovin, V. und Saul, A. (1996): Efficiency Prediction for Storage Chambers Using Computational Fluid Dynamics. In: *Water Science and Technology*, Vol. 33, Nr. 9, S. 163–170.
- Stovin, V. und Saul, A. J. (2000): Computational fluid dynamics and the design of sewage storage chambers. In: *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management*, 14(2), S. 103–110.
- Ta, C. T. und Brignal, W. J. (1998): Application of computational fluid dynamics technique to storage reservoir studies. In: *Water Science and Technology*, 37(2), S. 219.
- Takamatsu, M., Barrett, M., und Charbeneau, R. J. (2010): Hydraulic Model for Sedimentation in Storm-Water Detention Basins. In: *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 136(5), S. 527–534.
- Tamayol, A., Firoozabadi, B., und Ahmadi, G. (2008): Effects of inlet position and baffle configuration on hydraulic performance of primary settling tanks. In: *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 134(7), S. 1004–1009.
- Tchobanoglous, G. (2014): *Wastewater engineering: treatment and reuse*. Boston.
- Tchobanoglous, G. und Schroeder, E. D. (1985): *Water quality*. : Pearson Custom Pub.
- Thaxton, C. S. und McLaughlin, R. A. (2004): Hydrodynamic and Sediment Capture Assessment of Various Baffles in a Sediment Retention Pond. Gehalten auf der 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting, Ottawa, Canada.
- Thaxton, C. S. und McLaughlin, R. A. (2005): Sediment capture effectiveness of various baffle types in a sediment retention pond. In: *Transactions of the ASAE*, 48(5), S. 1795–1802.
- Uhl, M., Mohn, R., Maus, C., Schnieders, A., Sommer, M., Voßwinkel, N., Ebbert, S., und Tenbeitel, J.-G. (2013): WEREBE Weitergende Regenwasserbehandlung im Trennsystem -Projektbericht-. BMBF Programm FHProfUnt Förderkennzeichen 1765X09.
- van Rijn, L. C. (2016): *Initiation of motion and suspension of mud-sand mixtures*.
- Vega, G., Peña, M., Ramírez, C., und Mara, D. (2003): Application of CFD modelling to study the hydrodynamics of various anaerobic pond configurations. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 48, S. 163–71.
- Voutchkov, N. (2005): Settling Tanks. In: J. H. Lehr und J. Keeley (Hrsg.): *Water Encyclopedia*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Wang, X. L., Li, T., Lang, J., Zhou, S. S., Zhang, L. L., und Chen, M. X. (2010): Numerical Analysis of Solid-Liquid Two-Phase Flow on Sandstone Wastewater of Hydropower Stations in a Rectangular Sedimentation Tank. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(22), S. 11714–11723.
- Wang, X. L., Yang, L. L., Sun, Y. F., Song, L. G., Zhang, M. X., und Cao, Y. B. (2008): Three-Dimensional Simulation on the Water Flow Field and Suspended Solids Concentration in the Rectangular Sedimentation Tank. In: *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 134(11), S. 902–911.
- Wang, X., Yang, C. Y., Zhang, L., und Cao, Y. (2007): Three-dimensional CFD simulation of flow field in rectangular sedimentation tanks. In: *Journal of Tianjin University*, 2007(08), S. 921–930.

- Wang, Y., Song, X., Liao, W., Niu, R., Wang, W., Ding, Y., Wang, Y., und Yan, D. (2014): Impacts of inlet–outlet configuration, flow rate and filter size on hydraulic behavior of quasi-2-dimensional horizontal constructed wetland: NaCl and dye tracer test. In: *Ecological Engineering*, 69, S. 177–185.
- Wood, M. G., Greenfield, P. F., Howes, T., Johns, M. R., und Keller, J. (1995): Computational fluid dynamic modelling of wastewater ponds to improve design. In: *Waste Stabilisation Ponds and the Reuse of Pond Effluents*, 31(12), S. 111–118.
- Xanthos, S., Gong, M. W., Ramalingam, K., Fillos, J., Deur, A., Beckmann, K., und McCorquodale, J. A. (2011): Performance Assessment of Secondary Settling Tanks Using CFD Modeling. In: *Water Resources Management*, 25(4), S. 1169–1182.
- Xanthos, S., Ramalingam, K., Lipke, S., McKenna, B., und Fillos, J. (2013): Implementation of CFD modeling in the performance assessment and optimization of secondary clarifiers: the PVSC case study. In: *Water Science and Technology*, 68(9), S. 1901–1913.
- Yoon, T. H. und Lee, S. O. (2000): Numerical modeling of sedimentation basins with a baffle. In: *KSCE Journal of Civil Engineering*, 4(4), S. 227–232.
- Zech, W. C., Logan, C. P., und Fang, X. (2014): State of the practice: Evaluation of sediment basin design, construction, maintenance, and inspection procedures. In: *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 19(2), S. 04014006.
- Zhang, A. (2017): CFD Modeling and Optimization of Primary sedimentation tank. Masterthesis. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Zhang, D. (2014): Optimize sedimentation tank and lab flocculation unit by CFD. Masterthesis. Norwegian University of Life Sciences, As, Norway.
- Zhou, S., Vitasovic, C., McCorquodale, J. A., Lipke, S., DeNicola, M., und Saurer, P. (1997): Improving performance of large rectangular secondary clarifiers. In: *Proceedings of the 70th Annual WEF Conference and Exposition, Chicago*. Bd. 1, , S. 721–730, Chicago.



Katalog zur Anlage 01

NRW MEREBEN

Maßnahmen zur Ertüchtigung von Regenklärbecken und Hinweise zu deren Neubau

des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und
Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

– Phase 2: Neubau von Regenklärbecken –

Förderprogramm: ResA II

Juni 2018

Fachbereich Bauingenieurwesen

Prof. Dr.-Ing R. Mohn

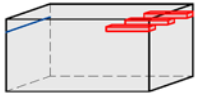
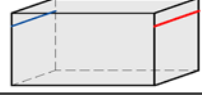
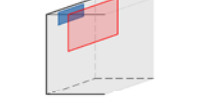


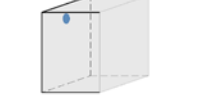
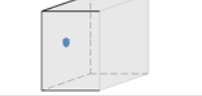

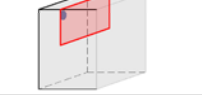
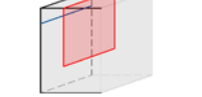
Prof. Dr.-Ing M. Uhl

Prof. Dr.-Ing H. Grüning

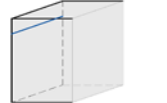
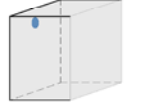




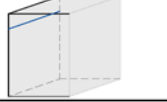
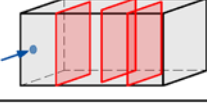
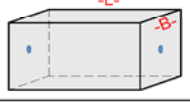
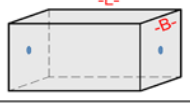
Corrensstraße 25

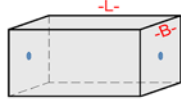
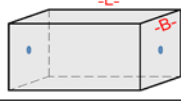
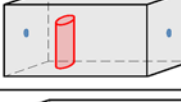
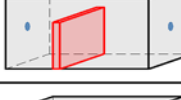
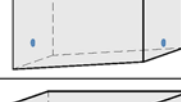


48149 Münster

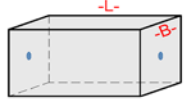

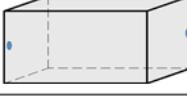
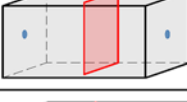

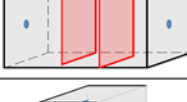


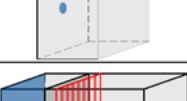



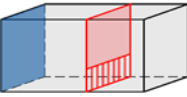
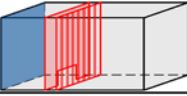

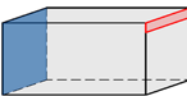
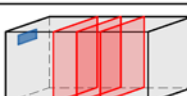
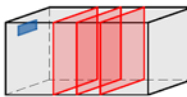
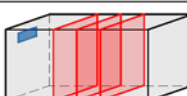

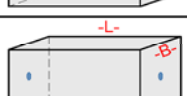

Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++	
1	Kawamura und Lang	1986	transversaler Einlauf	-	einzel	mittig	-	Klärbelauflauf	seitliche Positionierung	Überlaufrinne	Eignung	Länge unbekannt, Beschickung 2,9 l/(sxm)					X	
2	Kawamura und Lang	1986	transversaler Einlauf	-	einzel	mittig	-	Klärbelauflauf	frontale Positionierung	Überlaufwehr	Eignung	über gesamte Breite, Beschickung 72 l/(sxm)				X		
3	Bretscher et al.	1992	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	k.A.					X	
4	Bretscher et al.	1992	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Höhen	Höhe = 0,16 x H, Position = ca. 0,5 x L			X			
5	Bretscher et al.	1992	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Höhenlage	Höhe = 0,63 x H, Position = ca. 0,5 x L					X	
6	Stamou & Noutsopoulos	1994	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf oben				X		
7	Stamou & Noutsopoulos	1994	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte			X			
8	Stamou & Noutsopoulos	1994	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf unten					X	
9	Stamou & Noutsopoulos	1994	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Eintauchtiefe > UK Einlauf					X	
10	Ahmed et al.	1996	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,05 x L, Eintauchtiefe = 0,33 x H						X

Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung				Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Wehr-gesamte Breite	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung		Kurzbeschreibung	--	-	o	+	++
11	Ahmed et al.	1996	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,15 x L, Eintauchtiefe = 0,33 x H					X	
12	Ahmed et al.	1996	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,6 x L, Eintauchtiefe = 0,83 x H			X			
13	Stovin und Saul	1996	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	hoch					X	
14	Stovin und Saul	1996	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	niedrig			X			
15	Zhou et al.	1997	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,06 x L, Eintauchtiefe = 0,60 x H						X
16	Zhou et al.	1997	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,33 x L, Öffnungsanteil 58%					X	
17	Zhou et al.	1997	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,66 x L, Öffnungsanteil 65%					X	
18	Zhou et al.	1997	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Eignung	Position = 0,33 x L, Höhe = 0,42 x H				X		
19	Zhou et al.	1997	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = 0,66 x L, Eintauchtiefe = 0,33 x H				X		
20	Zhou et al.	1997	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Klärüberlauf	seitliche Positionierung	Überlaufrinne	Eignung	Länge = 0,33 x L, Installation von 4 Rinnen			X			


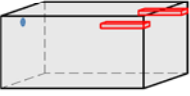
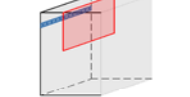

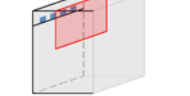
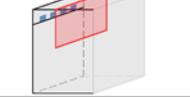
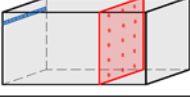

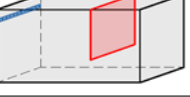
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Wehr-gesamte Breite	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++
21	Fomshell	2000	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall gesamte Breite	Fläche Anströmung	Wehr, gesamte Breite, auf 85% der Höhe					X	
22	Fomshell	2000	Rohreinlauf	-	einzel	-	-	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Fläche Anströmung	einfacher Rohreinlauf		X				
23	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	-	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite					X	
24	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf mittig, Auslauf mittig				X		
25	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	-	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf seitlich		X				
26	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	-	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - gleiche Seite			X			
27	Persson	2000	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	-	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall gesamte Breite	Fläche Anströmung	Wehrüberfall über die gesamte Breite						X
28	Persson	2000	transversaler Einlauf	Rohr	einzel	außermittig	-	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Eignung	Leitwände quer zur langen Seite						X
29	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 1:1		X				
30	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 2:1				X		

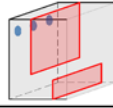
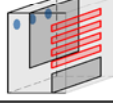
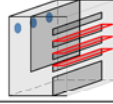
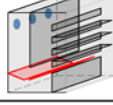

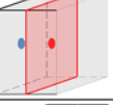

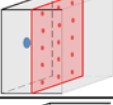


Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++		
31	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 4:1						X	
32	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 12:1							X
33	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Sedimentationskammer	Beckeneinbauten	Insel	Eignung	Insel seitlich			X				
34	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Sedimentationskammer	Beckeneinbauten	Insel	Eignung	Insel mittig						X	
35	Persson	2000	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Sedimentationskammer	Beckeneinbauten	Schwelle	Eignung	Schwelle über die gesamte Breite, Höhe = 0,7 x H						X	
36	Stovin und Saul	2000	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Konstruktion	Sohle	Neigung	Längsneigung				(X)	X		
37	Stovin und Saul	2000	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Konstruktion	Sohle	Neigung	Querneigung				(X)	X		
38	Yoon and Lee	2000	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,35-0,4 x L, Eintauchtiefe = 0,4-0,5 x H							X
39	Yoon and Lee	2000	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,15-0,5 x L, Eintauchtiefe = 0,4-0,5 x H						X	
40	Vega et al.	2003	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 2:1						X	

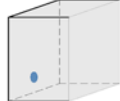
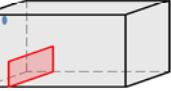
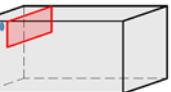



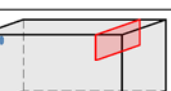

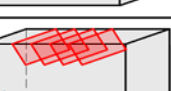
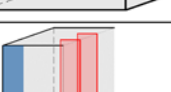
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++	
41	Vega et al.	2003	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 1:1		X				
42	Vega et al.	2003	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf mittig, Auslauf mittig				X		
43	Vega et al.	2003	Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	Mitte	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite					X	
44	Vega et al.	2003	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwand	Eignung	einzelne Leitwand - seitlich, Position = 0,5 x L, Breite = 2/3 x B			X			
45	Vega et al.	2003	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Eignung, Position	zwei Leitwände - alternierend., Position = 0,5 x L und 0,75 x L, Breite = 2/3 x B					X	
46	Vega et al.	2003	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Eignung, Position	zwei Leitwände - alternierend., Position = 0,33 x L und 0,67 x L, Breite = 2/3 x B						X
47	Oca et al.	2004	transversaler Einlauf	Wehr - Öffnung	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall Öffnung	Anzahl, Art	ein Einlauf, Wehr					X	
48	Oca et al.	2004	transversaler Einlauf	Wehr - Öffnung	mehrfach	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall Öffnung	Anzahl, Art	drei Einläufe, horizontal verteilt, Wehr						X
49	Oca et al.	2004	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Art	ein Einlauf, Rohreinlauf				X		
50	Huggins et al.	2005	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = 0,32 x L, Eintauchtiefe = 0,89 x H, dahinter Installation Rechens				X		

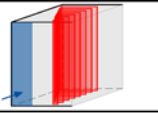
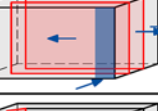
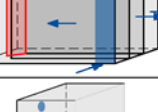
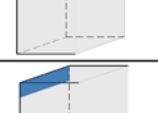
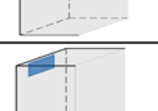
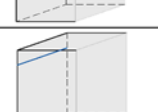

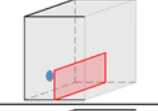


Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung				Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	
51	Huggins et al.	2005	Sonderfall: Anströmung gesamler Querschnitt	-			Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = $0,62 \times L$, Eintauchtiefe = $0,68 \times H$, Öffnung mit Rechenstäben					X		
52	Huggins et al.	2005	Sonderfall: Anströmung gesamler Querschnitt	-			Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = $0,32 \times L$, rechteckige Öffnung an Sohle mit Höhe = $0,32 \times H$ und Breite = $0,30 \times B$, dahinter Installation des Rechens						X	
53	Huggins et al.	2005	Sonderfall: Anströmung gesamler Querschnitt	-			Klärbelauf	seitliche Positionierung	Überlaufwehr	Eignung	Länge = $0,45 \times L$, beidseitig					X		
54	Huggins et al.	2005	Sonderfall: Anströmung gesamler Querschnitt	-			Klärbelauf	frontale Positionierung	Überlaufwehr	Eignung	über gesamte Breite				X			
55	Thaxton und McLaughlin	2005	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Material	gesamter Querschnitt, 3 Lagen, Material: Jute-Stoff						X
56	Thaxton und McLaughlin	2005	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Material	gesamter Querschnitt, 3 Lagen, Material: PVC-Baumschutz					X	
57	Thaxton und McLaughlin	2005	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Material	gesamter Querschnitt, 3 Lagen, Material: Geotextil				X		
58	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 2:1			X			
59	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 3:1				X		
60	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 4:1					X	

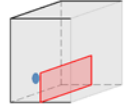
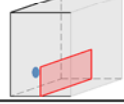


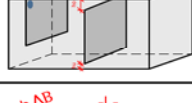
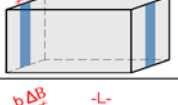

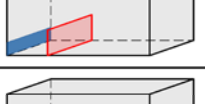


Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++	
61	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf oben			X			
62	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf Mitte				X		
63	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf unten					X	
64	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf oben				X		
65	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf Mitte			X			
66	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf unten				X		
67	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf oben						X
68	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf Mitte				X		
69	Agunwamba	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf unten		X				
70	McCorquodale et al.	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = $0,075 \times L$, Eintauchtiefe = $0,50 \times H$					X	

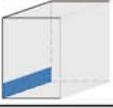

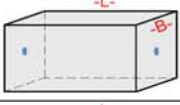
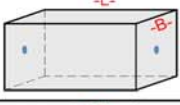

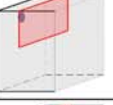

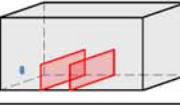
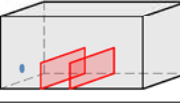
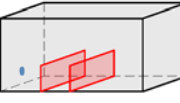
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++	
71	McCorquodale et al.	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt, perforiert	Eignung	Position = 0,4 x L, Eintauchtiefe = 0,75 x H Öffnungsanteil 50%				X		
72	McCorquodale et al.	2006	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Kläüberlauf	seitliche Positionierung	Überlaufrinne	Eignung	Länge = 0,45 x L						X
73	Kris und Ghawi	2007	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	k.A.					X	
74	Kris und Ghawi	2007	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Kläüberlauf	seitliche Positionierung	Überlaufrinne	Eignung	Installation von 4 Rinnen						X
75	Wang et al.	2007	Gerinneinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Position = 0,025 x L, Eintauchtiefe = 0,25...0,33 x H					X	
76	Wang et al.	2007	Gerinneinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Position = 0,025 x L, Eintauchtiefe = 0,4...0,5 x H			X			
77	Ghawi und Kris	2008	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,33 x L, Öffnungsanteil 52%					X	
78	Ghawi und Kris	2008	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,66 x L, Öffnungsanteil 65%					X	
79	Ghawi und Kris	2008	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = 0,33 x L, Eintauchtiefe = 0,5 x H				X		
80	Ghawi und Kris	2008	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = 0,66 x L, Eintauchtiefe = 0,4 x H				X		

Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++	
81	He	2008	Rohreinlauf	-	mehrfach	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Ausbildung als U-Profil			X			
82	He	2008	Rohreinlauf	-	mehrfach	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Diffusor	Eignung	Ausbildung als U-Profil, Diffusor				X		
83	He	2008	Rohreinlauf	-	mehrfach	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Diffusor	Eignung	Ausbildung als U-Profil, Diffusor, horizontale Bleche					X	
84	He	2008	Rohreinlauf	-	mehrfach	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Diffusor	Eignung	Ausbildung als U-Profil, Diffusor, horizontale Bleche, Sammelraum für grobe Partikel						X
85	Lopez et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	oben	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf oben			X			
86	López et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	Mitte	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte				X		
87	López et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	unten	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf unten					X	
88	López et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	Mitte	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,12 x L, 15 Öffnungen à Ø 6 cm			X			
89	Tamayol et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	oben	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf oben			X			
90	Tamayol et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	Mitte	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte					X	

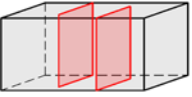
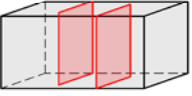
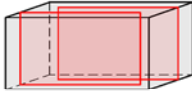
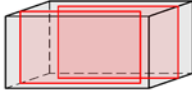



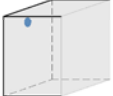
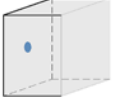
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++		
91	Tamayol et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf unten					X		
92	Tamayol et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Position = 0,15 x L, Höhe = 0,33-0,5 x H							X
93	Tamayol et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,15 x L, Eintauchtiefe = 0,33-0,5 x H						X	
94	Tamayol et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Anbringung unten, Nähe Beckenmitte, Position = 0,5 x L, Höhe = 0,33-0,5 x H					X		
95	Tamayol et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Anbringung oben, Nähe Beckenmitte, Position = 0,5 x L, Höhe = 0,33-0,5 x H			X				
96	Tamayol et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Anbringung unten, Nähe KÜ, Position = 0,9 x L, Höhe = 0,33-0,5 x H		X					
97	Tamayol et al.	2008	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überstromt	Position	Anbringung unten, Nähe KÜ, Position = 0,9 x L, Höhe = 0,33-0,5 x H		X					
98	Al-Sammarraee et al.	2009	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Anzahl	2 Prallwände, Anströmwinkel 110°						X	
99	Al-Sammarraee et al.	2009	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Anzahl	4 Prallwände, Anströmwinkel 110°							X
100	He und Marsalek	2009	transversaler Einlauf	Gerinne	einzel	außermittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Trennwände	Eignung	transversale Anströmung dreier Stränge			X				

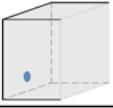
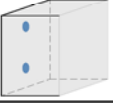
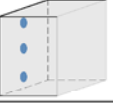
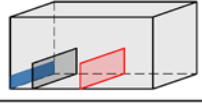
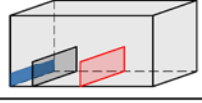
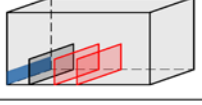
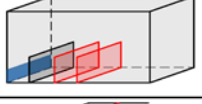

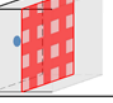
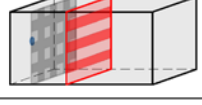
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Gerinne	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++
101	He und Marsalek	2009	transversaler Einlauf	Gerinne	einzel	außermittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallplatten	Eignung	transversale Anströmung dreier Stränge, Einbau schräg angeordneter Prallplatten						X
102	He und Marsalek	2009	transversaler Einlauf	Gerinne	einzel	außermittig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Eignung	Umkehr der Fließrichtung ohne Leitelemente			X			
103	He und Marsalek	2009	transversaler Einlauf	Gerinne	einzel	außermittig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Eignung	Umkehr der Fließrichtung mit Leitelementen					X	
104	Janssen	2009	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Fläche Anströmung	einfacher Rohreinlauf		X				
105	Janssen	2009	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Gerinneeinlauf	Fläche Anströmung	über gesamte Breite					X	
106	Janssen	2009	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Gerinneeinlauf	Fläche Anströmung	nicht über gesamte Breite				X		
107	Janssen	2009	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall gesamte Breite	Fläche Anströmung	Wehrüberfall über die gesamte Breite					X	
108	Razmi et al.	2009	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = $0,1-0,15 \times L$, Höhe = $0,25 \times H$					X	
109	Razmi et al.	2009	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhenlage	Position = $0,5 \times L$, Höhe = $0,25 \times H$		X				
110	Razmi et al.	2009	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = $0,125 \times L$, Höhe = $0,25 \times H$						X

Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++		
111	Razmi et al.	2009	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,15 x L, Höhe = 0,32 x H							X
112	Razmi et al.	2009	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhenlage	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,32 x H				X			
113	Razmi et al.	2009	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,1-0,2 x L, Höhe = 0,25-0,30 x H						X	
114	Stamou et al.	2009	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Eintauchtiefe = 0,8 x H						X	
115	Stamou et al.	2009	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Eignung	gesamte Breite, Position = ca. 0,5 x L						X	
116	Dufresne et al.	2010	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	Formparameter Dufresne < 6,2			X				
117	Dufresne et al.	2010	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	Formparameter Dufresne > 6,8						X	
118	Jamshidnia und Firoozabadi	2010	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,15 x L, Höhe = 0,32 x H						X	
119	Jamshidnia und Firoozabadi	2010	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhenlage	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,32 x H						X	
120	Liu et al.	2010	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Konstruktion	Einlauf	Fläche Anströmung	Öffnungshöhe = 0,2...0,5 x H							X

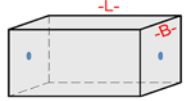
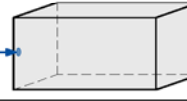



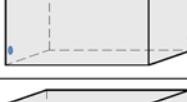


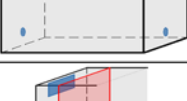

Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	-		o	+	++		
121	Liu et al.	2010	Gerinneinlauf	-	einzel	mitig	unten	Einlauf	Konstruktion	Einlauf	Fläche Anströmung	Öffnungshöhe = 0,67 x H			X			
122	Liu et al.	2010	Gerinneinlauf	-	einzel	mitig	unten	Einlauf	Konstruktion	Einlauf	Fläche Anströmung	Öffnungshöhe < 0,2 x H		X				
123	Takamatsu et al.	2010	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	unten	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 8,5					X	
124	Takamatsu et al.	2010	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	unten	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 5,7				X		
125	Wang et al.	2010	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Position = 0,08 x L, Eintauchtiefe = 0,85 x H						X
126	Wang et al.	2010	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Position = 0,08 x L, Eintauchtiefe > 0,85 x H			X			
127	Wang et al.	2010	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Position = 0,08 x L, Eintauchtiefe = 0,55...0,85 x H					X	
128	Asgharzadeh et al.	2011	Gerinneinlauf	-	einzel	mitig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position, Höhenlage	2 Bleche, Position = 0,32 und 0,5 x L, Höhe Blech 1 < Höhe Blech 2		X				
129	Asgharzadeh et al.	2011	Gerinneinlauf	-	einzel	mitig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position, Höhenlage	2 Bleche, Position = 0,32 und 0,5 x L, Höhe Blech 1 = Höhe Blech 2			X			
130	Asgharzadeh et al.	2011	Gerinneinlauf	-	einzel	mitig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position, Höhenlage	2 Bleche, Position = 0,32 und 0,5 x L, Höhe Blech 1 > Höhe Blech 2						X

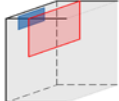
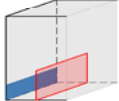
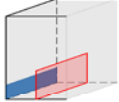
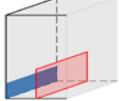


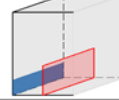
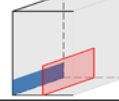
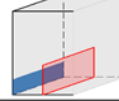
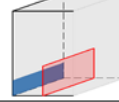
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++		
131	Asgharzadeh et al.	2011	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position, Höhenlage	1 Blech, Position = 0,5 x L						X	
132	Camnasio et al.	2011	Gerinneeinlauf	-	einzel	außermittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite							X
133	Camnasio et al.	2011	Gerinneeinlauf	-	einzel	außermittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - gleiche Seite			X				
134	Camnasio et al.	2011	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf mittig, Auslauf mittig				X			
135	Camnasio et al.	2011	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf mittig, Auslauf außermittig						X	
136	Howard et al.	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	k.A.		X					
137	Howard et al.	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Öffnungsanteil	Lochblech, Öffnung = 46-51%						X	
138	Howard et al.	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Öffnungsanteil	Lochblech, Öffnung = 33-40%					X		
139	Howard et al.	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Winkel	Lochblech, Öffnung = 33%, Winkel = +/- 20°					X		
140	Okukanni und Ducoste	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 2 Elemente			X				




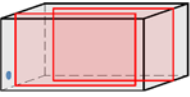
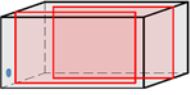

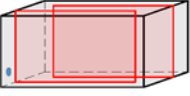
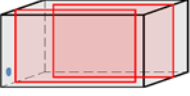


Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++	
141	Okukanni und Ducoste	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 4 Elemente				X		
142	Okukanni und Ducoste	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 6 Elemente						X
143	Okukanni und Ducoste	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 2 Elemente						X
144	Okukanni und Ducoste	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 4 Elemente				X		
145	Okukanni und Ducoste	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Länge	Länge = 0,5 x B			X			
146	Okukanni und Ducoste	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Länge	Länge = 0,7-0,8 x B						X
147	Okukanni und Ducoste	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Länge	Länge = 0,6 x B			X			
148	Okukanni und Ducoste	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Länge	Länge = 0,8-0,9 x B						X
149	Rostami et al.	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf oben			X			
150	Rostami et al.	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte						X

Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++	
151	Rostami et al.	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf unten					X	
152	Rostami et al.	2011	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	-	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Anzahl	zwei Einläufe, vertikal verteilt						X
153	Rostami et al.	2011	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	-	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Anzahl	drei Einläufe, vertikal verteilt						X
154	Shahrokhi et al.	2011	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position	zwei Leitwände, Positionen = 0,125 und 0,4 x L						X
155	Shahrokhi et al.	2011	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position	zwei Leitwände, Positionen = 0,125 x L und 0,25-0,55 x L						X
156	Shahrokhi et al.	2011	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position	drei Leitwände, Positionen = 0,125, 0,30 und 0,4 x L						X
157	Shahrokhi et al.	2011	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position	drei Leitwände, Positionen = 0,125 x L und 0,25-0,4 x L						X
158	Xanthos et al.	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	gesamter Querschnitt, oben: Löcher unten: 1 fehlende Planke			X			
159	Xanthos et al.	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	gesamter Querschnitt, Ausbildung als Gitter, Abstände: 30 cm offen, 30 cm geschlossen						X
160	Xanthos et al.	2011	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Lamellenwand	Eignung	gesamter Querschnitt, horizontale Planken, Position = 1/8 x L						X

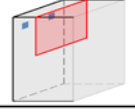

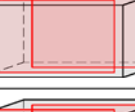

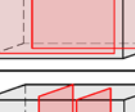
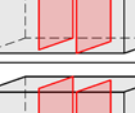
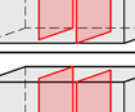

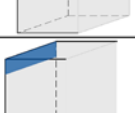

Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Zulauf von oben	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	
161	Dong et al.	2013	Gerinneeinlauf	Zulauf von oben	einzel	mitig	oben	Becken gesamt	Leitelement - quer	Prallwände - unter- und überströmt	Eignung	Einlaufbereich: unterströmt, Mitte Becken: überströmt, Klärüberlauf: unterströmt			X				
162	Dong et al.	2013	Gerinneeinlauf	Zulauf von oben	einzel	mitig	oben	Becken gesamt	Leitelement - quer	Prallwände - perforiert	Eignung	alle Elemente sind massive Wände mit Öffnungen						X	
163	Heydari et al.	2013	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 30°			X				
164	Heydari et al.	2013	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 45°						X	
165	Heydari et al.	2013	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 60°							X
166	Heydari et al.	2013	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 90°						X	
167	Heydari et al.	2013	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 120°				X			
168	Heydari et al.	2013	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 150°		X					
169	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	Mitte	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 0,1:1		X					
170	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	Mitte	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 2,5:1				X			

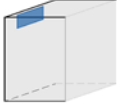
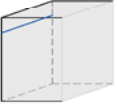
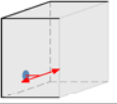
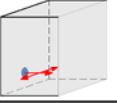
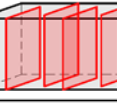
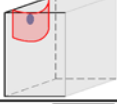
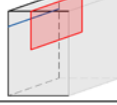
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++		
171	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 10:1							x
172	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	Mitte	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Anströmwinkel	Winkel = 0° (zur langen Seite), L:B = 2,5							(x)
173	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	Mitte	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Anströmwinkel	Winkel = 90° (zur langen Seite), L:B = 2,5							(x)
174	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	oben	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite, beides Höhenlage = oben							x
175	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	Mitte	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite, beides Höhenlage = Mitte							x
176	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite, beides Höhenlage = unten							x
177	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf mittig, Auslauf mittig, beides Höhenlage = oben							x
178	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf mittig, Auslauf mittig, beides Höhenlage = Mitte							x
179	Li et al.	2013	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf mittig, Auslauf mittig, beides Höhenlage = unten							x
180	Liu et al.	2013	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,01 x L und 0,1 x L, Eintauchtiefe = 0,25 x H							x

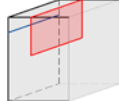
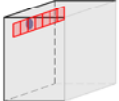
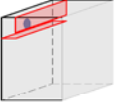
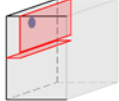
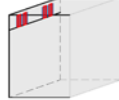
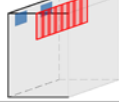
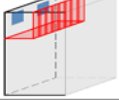



Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++		
181	Liu et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,05 x L, Eintauchtiefe = 0,25 x H							X
182	Radaei et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Position = 0,1 x L, Höhe = 0,11 x H						X	
183	Radaei et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Position = 0,125 x L, Höhe = 0,11 x H						X	
184	Radaei et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Position = 0,25 x L, Höhe = 0,11 x H					X		
185	Radaei et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,125 x L, Höhe = 0,11 x H, Winkel = 30-60°						X	
186	Radaei et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,125 x L, Höhe = 0,11 x H, Winkel = 90°						X	
187	Shahrokhi et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,125 x L, Höhe = 0,176 x H						X	
188	Shahrokhi et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,125 x L, Höhe < 0,22 x H					X		
189	Shahrokhi et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,125 x L, Höhe > 0,22 x H		X					
190	Shahrokhi et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,3 x L, Höhe < 0,39 x H					X		

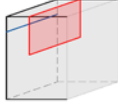
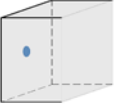
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++		
191	Shahrokhi et al. a	2013	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Einlauf	Konstruktion	Ausführung Einlauf		Abschrägung der Kanten						X	
192	Xanthos et al.	2013	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Kläüberlauf	seitliche Positionierung	Überlaufrinne	Eignung	Länge = 0,33 x L, Installation von 8 Rinnen					X		
193	Katnig	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Beckeneinbauten	Einlaufbox - gefüllt	Eignung	Füllung: Verpackung- & Dichtungsmaterial					X		
194	Katnig	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 1 Element					X		
195	Katnig	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 2 Elemente							X
196	Katnig	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 6 Elemente			X				
197	Katnig	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite = Breite Gerinne						X	
198	Katnig	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite > Breite Gerinne			X				
199	Katnig	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite < Breite Gerinne			X				
200	Park et al.	2014	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Trennwände	Eignung	Trennung über gesamte Länge, 2 Kammern						X	


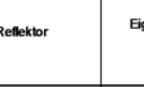
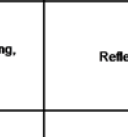

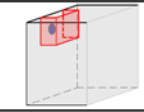
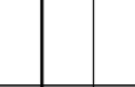
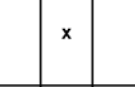
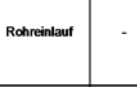
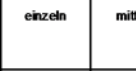
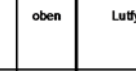
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++	
201	Wang et al.	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf oben			X			
202	Wang et al.	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf Mitte				X		
203	Wang et al.	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf unten					X	
204	Wang et al.	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf oben				X		
205	Wang et al.	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf Mitte			X			
206	Wang et al.	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf unten				X		
207	Wang et al.	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf oben						X
208	Wang et al.	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf Mitte				X		
209	Wang et al.	2014	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf unten		X				
210	Zhang	2014	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,14 x L, Eintauchtiefe = ca. 0,4 x H				X		

Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++		
211	Zhang	2014	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,07 x L, Eintauchtiefe = ca. 0,4 x H						x	
212	Zhang	2014	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Sedimentationskammer	Konstruktion	Sohle	Neigung	Position = 0,07 x L, Eintauchtiefe = ca. 0,4 x H, & geneigter Sohle inkl. Pumpensumpf						x	
213	Carlston	2015	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite = Breite Gerinne							x
214	Carlston	2015	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite > Breite Gerinne					x		
215	Carlston	2015	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite < Breite Gerinne					x		
216	Carlston	2015	transversaler Einlauf	Rohreinlauf	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite = Breite Gerinne							x
217	Carlston	2015	transversaler Einlauf	Rohreinlauf	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite > Breite Gerinne			x				
218	Carlston	2015	transversaler Einlauf	Rohreinlauf	einzel	mittig	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite < Breite Gerinne			x				
219	Carlston	2015	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Fläche Anströmung	einfacher Rohreinlauf		x					
220	Carlston	2015	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Gerinneeinlauf	Fläche Anströmung	über gesamte Breite						x	

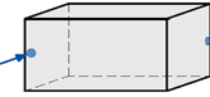
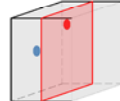
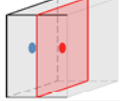
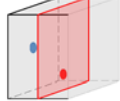
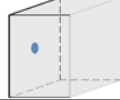
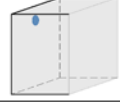


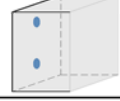
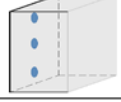
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung	--		-	o	+	++	
221	Carlston	2015	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Gerinneeinlauf	Fläche Anströmung	nicht über gesamte Breite				X		
222	Carlston	2015	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	mittig	oben	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall gesamte Breite	Fläche Anströmung	Wehrüberfall über die gesamte Breite					X	
223	Carlston & Venayagamoorthy	2015	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Beckeneinbauten	Umlenkung	Eignung	T-Stück						X
224	Carlston & Venayagamoorthy	2015	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Beckeneinbauten	Umlenkung	Eignung	oben/ unten/ links/ rechts/ zurück					X	
225	Carlston & Venayagamoorthy	2015	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Einlauf	Beckeneinbauten	Umlenkung	Eignung	Drei-Wege-Passstück		X				
226	He et al.	2015	transversaler Einlauf	Rohr	einzel	außermittig	-	Einlauf	Leitelement - quer	Diffusor	Eignung	orthogonal angeströmter Diffusor						X
227	He et al.	2015	transversaler Einlauf	Rohr	einzel	außermittig	-	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Eignung	Anzahl = 4 Elemente					X	
228	Lutfy et al.	2015	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Beckeneinbauten	Reflektor	Eignung, Art	Reflektor - rund					X	
229	Lutfy et al.	2015	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Einlauf	Beckeneinbauten	Reflektor	Eignung, Art	Reflektor - rechteckig					X	
230	Al-Saadi et al.	2016	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,37 x L, Eintauchtiefe = 0,33 x H			X			

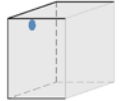
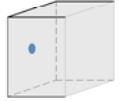
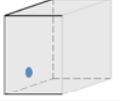
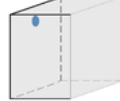
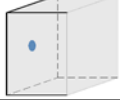

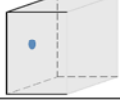
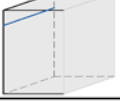
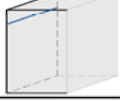
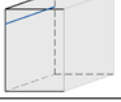
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse	Wehr-gesamte Breite	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++
231	Al-Saadi et al.	2016	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,12 x L, Eintauchtiefe = 0,66 x H					X	
232	Patziger et al.	2016	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Lamellenwand	Eignung	Lamellenwand hinter Einlauf			X			
233	Patziger et al.	2016	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	oben	Einlauf	Beckeneinbauten	Einlaufbox	Eignung, Höhenlage	Einlauf oben					X	
234	Patziger et al.	2016	Rohreinlauf	-	einzel	mitig	oben	Einlauf	Beckeneinbauten	Einlaufbox	Eignung, Höhenlage	Einlauf Mitte			X			
235	Ghawi	2017	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallteller	Eignung	Positionierung am Übergang Gerinne/ Becken		X				
236	Ghawi	2017	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Lamellenwand	Eignung	unterströmt, nicht bis zur Beckensohle			X			
237	Ghawi	2017	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mitig	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Lamellenwand	Eignung	mit Sohle ausgestattet					X	
238	Lee	2017	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = direkt am Einlauf, 270 Öffnungen à Ø 15 cm, Öffnungsanteil 58%					X	
239	Lee	2017	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,33 x L, 2 Platten mit versetzten Schlitzen						X
240	Zhang	2017	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,07 x L, Eintauchtiefe = 0,33 x H						X

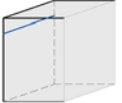
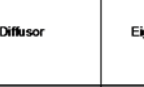
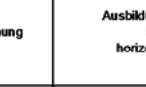
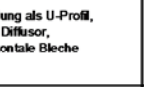
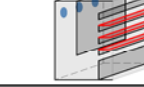
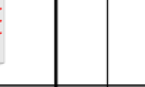
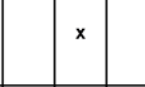

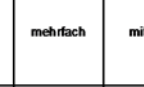
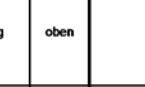
Nr.	Quelle		Einlaufgestaltung					Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor				
	Autor	Jahr	Klasse		Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++
241	Zhang	2017	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	gesamte Breite, Position = 0,14 x L				x		
242	Zhang	2017	Rohreinlauf	-	einzel	mäßig	Mitte	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte					x	

Nr.	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierung		Kurzbeschreibung	Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
			Optimierungs-Komponente	Frage-stellung			--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
1	Einlauf	Beckeneinbauten	Einlaufbox	Eignung, Höhenlage	Einlauf oben					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Patziger et al.	2016
2	Einlauf	Beckeneinbauten	Einlaufbox	Eignung, Höhenlage	Einlauf Mitte			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Patziger et al.	2016
3	Einlauf	Beckeneinbauten	Einlaufbox - gefüllt	Eignung	Füllung: Verpackung- & Dichtungsmaterial				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Katnig	2014
4	Einlauf	Beckeneinbauten	Reflektor	Eignung, Art	Reflektor - rund					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Lufy et al.	2015
5	Einlauf	Beckeneinbauten	Reflektor	Eignung, Art	Reflektor - rechteckig					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Lufy et al.	2015
6	Einlauf	Beckeneinbauten	Umlenkung	Eignung	T-Stück						X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Carlston & Venayagamoorthy	2015
7	Einlauf	Beckeneinbauten	Umlenkung	Eignung	oben/ unten/ links/ rechts/ zurück					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Carlston & Venayagamoorthy	2015
8	Einlauf	Beckeneinbauten	Umlenkung	Eignung	Drei-Wege-Passstück		X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Carlston & Venayagamoorthy	2015
9	Einlauf	Konstruktion	Ausführung Einlauf		Abschrägung der Kanten					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Shahrothi et al. a	2013
10	Einlauf	Konstruktion	Einlauf	Fläche Anströmung	Öffnungshöhe = 0,2...0,5 x H						X	Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	unten	Liu et al.	2010

Nr.	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierung		Kurzbeschreibung	Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle			
			Optimierungs-Komponente	Frage-stellung			--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr		
11	Einlauf	Konstruktion	Einlauf	Fläche Anströmung	Öffnungshöhe = 0,67 x H			X					Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Liu et al.	2010
12	Einlauf	Konstruktion	Einlauf	Fläche Anströmung	Öffnungshöhe < 0,2 x H		X						Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Liu et al.	2010
13	Einlauf	Konstruktion	Gerinneeinlauf	Fläche Anströmung	über gesamte Breite						X		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Carlston	2015
14	Einlauf	Konstruktion	Gerinneeinlauf	Fläche Anströmung	nicht über gesamte Breite						X		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Carlston	2015
15	Einlauf	Konstruktion	Gerinneeinlauf	Fläche Anströmung	über gesamte Breite						X		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Janssen	2009
16	Einlauf	Konstruktion	Gerinneeinlauf	Fläche Anströmung	nicht über gesamte Breite						X		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Janssen	2009
17	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Fläche Anströmung	einfacher Rohreinlauf		X						Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Carlston	2015
18	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Fläche Anströmung	einfacher Rohreinlauf		X						Rohreinlauf	-	einzel	-	-	Fomshell	2000
19	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Fläche Anströmung	einfacher Rohreinlauf		X						Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Janssen	2009
20	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Anströmwinkel	Winkel = 0° (zur langen Seite), L:B = 2,5								Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	Mitte	Li et al.	2013

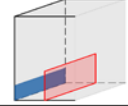
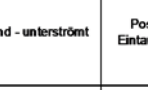
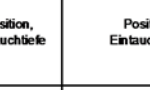
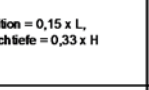


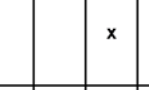
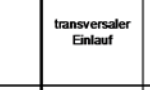
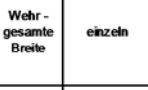
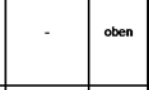
Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
21	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Anströmwinkel	Winkel = 90° (zur langen Seite), L:B = 2,5				(x)			Rohreinlauf	-	einzel	außer-mittig	Mitte	Li et al.	2013
22	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf oben			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Lopez et al.	2008
23	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	López et al.	2008
24	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf unten					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	López et al.	2008
25	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Art	ein Einlauf, Rohreinlauf				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Oca et al.	2004
26	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf oben			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Rostami et al.	2011
27	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Rostami et al.	2011
28	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf unten				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Rostami et al.	2011
29	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Anzahl	zwei Einläufe, vertikal verteilt					X		Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	-	Rostami et al.	2011
30	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Anzahl	drei Einläufe, vertikal verteilt						X	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	-	Rostami et al.	2011

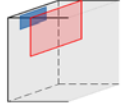

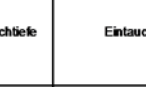
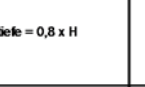

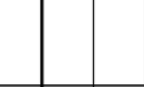
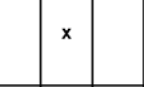
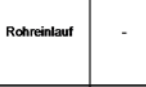
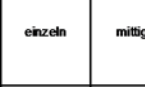
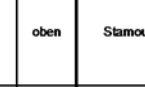
Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
31	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf oben				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Stamou & Noutsopoulos	1994
32	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Stamou & Noutsopoulos	1994
33	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf unten					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Stamou & Noutsopoulos	1994
34	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf oben			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Tamayol et al.	2008
35	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Tamayol et al.	2008
36	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf unten				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Tamayol et al.	2008
37	Einlauf	Konstruktion	Rohreinlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Zhang	2017
38	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall gesamte Breite	Fläche Anströmung	Wehrüberfall über die gesamte Breite					X		transversaler Einlauf	Wehr - gesamte Breite	einzel	mittig	oben	Carlston	2015
39	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall gesamte Breite	Fläche Anströmung	Wehr, gesamte Breite, auf 85% der Höhe					X		transversaler Einlauf	Wehr - gesamte Breite	einzel	-	oben	Fomshell	2000
40	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall gesamte Breite	Fläche Anströmung	Wehrüberfall über die gesamte Breite					X		transversaler Einlauf	Wehr - gesamte Breite	einzel	mittig	oben	Janssen	2009

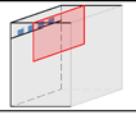
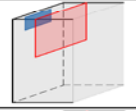
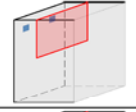

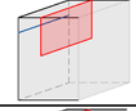
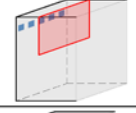
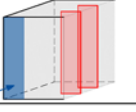
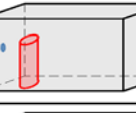
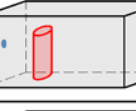
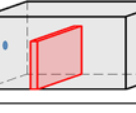
Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
41	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall gesamte Breite	Fläche Anströmung	Wehrüberfall über die gesamte Breite						X	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	-	Persson	2000
42	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall Öffnung	Anzahl, Art	ein Einlauf, Wehr						X	transversaler Einlauf	Wehr-Öffnung	einzel	mittig	oben	Oca et al.	2004
43	Einlauf	Konstruktion	Wehrüberfall Öffnung	Anzahl, Art	drei Einläufe, horizontal verteilt, Wehr						X	transversaler Einlauf	Wehr-Öffnung	mehrfach	mittig	oben	Oca et al.	2004
44	Einlauf	Leitelement - quer	Diffusor	Eignung	Ausbildung als U-Profil, Diffusor				X			Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	He	2008
45	Einlauf	Leitelement - quer	Diffusor	Eignung	Ausbildung als U-Profil, Diffusor, horizontale Bleche					X		Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	He	2008
46	Einlauf	Leitelement - quer	Diffusor	Eignung	Ausbildung als U-Profil, Diffusor, horizontale Bleche, Sammelraum für grobe Partikel						X	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	He	2008
47	Einlauf	Leitelement - quer	Diffusor	Eignung	orthogonal angeströmter Diffusor						X	transversaler Einlauf	Rohr	einzel	außermittig	-	He et al.	2015
48	Einlauf	Leitelement - quer	Lamellenwand	Eignung	unterströmt, nicht bis zur Beckensohle			X				Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Ghawi	2017
49	Einlauf	Leitelement - quer	Lamellenwand	Eignung	mit Sohle ausgestattet					X		Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Ghawi	2017
50	Einlauf	Leitelement - quer	Lamellenwand	Eignung	Lamellenwand hinter Einlauf			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Patziger et al.	2016

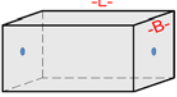

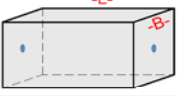
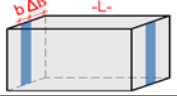
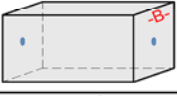

Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
51	Einlauf	Leitelement - quer	Prallplatten	Eignung	transversale Anströmung dreier Stränge, Einbau schräg angeordneter Prallplatten						X	transversaler Einlauf	Gerinne	einzel	außer-mittig	unten	He und Marsalek	2009
52	Einlauf	Leitelement - quer	Prallteller	Eignung	Positionierung am Übergang Gerinne/Becken		X					Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Ghawī	2017
53	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Öffnungsanteil	Lochblech, Öffnung = 46-51%					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Howard et al.	2011
54	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Öffnungsanteil	Lochblech, Öffnung = 33-40%					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Howard et al.	2011
55	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Winkel	Lochblech, Öffnung = 33%, Winkel = +/- 20°					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Howard et al.	2011
56	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = direkt am Einlauf, 270 Öffnungen à Ø 15 cm, Öffnungsanteil 58%					X		Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Lee	2017
57	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,12 x L, 15 Öffnungen à Ø 6 cm			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	López et al.	2008
58	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	gesamter Querschnitt, oben: Löcher unten: 1 fehlende Planke			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Xanthos et al.	2011
59	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	gesamter Querschnitt, Ausbildung als Gitter, Abstände: 30 cm offen, 30 cm geschlossen					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Xanthos et al.	2011
60	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,15 x L, Höhe = 0,32 x H					X		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Jamshidnia und Firoozabadi	2010

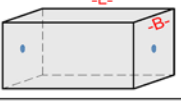
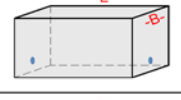
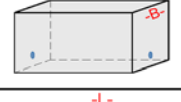
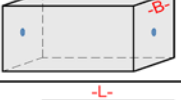




Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
61	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Position = 0,1 x L, Höhe = 0,11 x H					x		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Radaei et al.	2013
62	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Position = 0,125 x L, Höhe = 0,11 x H						x	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Radaei et al.	2013
63	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Position = 0,25 x L, Höhe = 0,11 x H				x			Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Radaei et al.	2013
64	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,125 x L, Höhe = 0,11 x H, Winkel = 30-60°					x		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Radaei et al.	2013
65	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,125 x L, Höhe = 0,11 x H, Winkel = 90°						x	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Radaei et al.	2013
66	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,1-0,15 x L, Höhe = 0,25 x H						x	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Razmi et al.	2009
67	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,125 x L, Höhe = 0,25 x H						x	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Razmi et al.	2009
68	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,15 x L, Höhe = 0,32 x H						x	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Razmi et al.	2009
69	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,1-0,2 x L, Höhe = 0,25-0,30 x H					x		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Razmi et al.	2009
70	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,125 x L, Höhe = 0,176 x H						x	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Shahrokhii et al.	2013



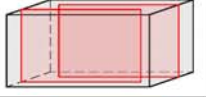

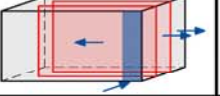
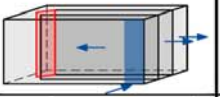
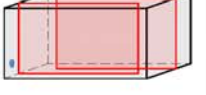
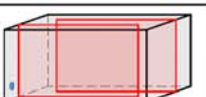


Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
71	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,125 x L, Höhe < 0,22 x H				X			Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Shahrokhi et al.	2013
72	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,125 x L, Höhe > 0,22 x H		X					Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Shahrokhi et al.	2013
73	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhe	Position = 0,3 x L, Höhe < 0,39 x H				X			Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Shahrokhi et al.	2013
74	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,05 x L, Eintauchtiefe = 0,33 x H						X	transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Ahmed et al.	1996
75	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,15 x L, Eintauchtiefe = 0,33 x H					X		transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Ahmed et al.	1996
76	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,12 x L, Eintauchtiefe = 0,66 x H					X		transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Al-Saadi et al.	2016
77	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	k.A.					X		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Bretscher et al.	1992
78	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Ausbildung als U-Profil			X				Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	He	2008
79	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	k.A.		X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Howard et al.	2011
80	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	k.A.					X		Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Kris und Ghawi	2007

Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
81	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = $0,01 \times L$ und $0,1 \times L$, Eintauchtiefe = $0,25 \times H$				X			Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Liu et al.	2013
82	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = $0,05 \times L$, Eintauchtiefe = $0,25 \times H$						X	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Liu et al.	2013
83	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = $0,075 \times L$, Eintauchtiefe = $0,50 \times H$					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	McCorquodale et al.	2006
84	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Eintauchtiefe > UK Einlauf					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Stamou & Noutsopoulos	1994
85	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Eintauchtiefe = $0,8 \times H$					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Stamou et al.	2009
86	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = $0,15 \times L$, Eintauchtiefe = $0,33-0,5 \times H$					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Tamayol et al.	2008
87	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Position = $0,08 \times L$, Eintauchtiefe = $0,85 \times H$						X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Wang et al.	2010
88	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Position = $0,08 \times L$, Eintauchtiefe > $0,85 \times H$			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Wang et al.	2010
89	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Position = $0,08 \times L$, Eintauchtiefe = $0,55...0,85 \times H$					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Wang et al.	2010
90	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Position = $0,025 \times L$, Eintauchtiefe = $0,25...0,33 \times H$					X		Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Wang et al.	2007

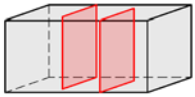
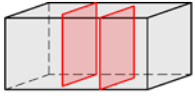
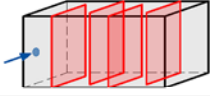
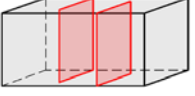
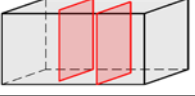
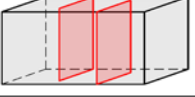


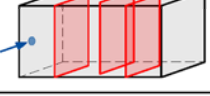
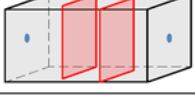
Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle			
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr		
91	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eintauchtiefe	Position = 0,025 x L, Eintauchtiefe = 0,4...0,5 x H			X					Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Wang et al.	2007
92	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,15-0,5 x L, Eintauchtiefe = 0,4-0,5 x H							X	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Yoon and Lee	2000
93	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,14 x L, Eintauchtiefe = ca. 0,4 x H							X	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Zhang	2014
94	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,07 x L, Eintauchtiefe = ca. 0,4 x H							X	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Zhang	2014
95	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	gesamte Breite, Position = 0,14 x L							X	transversaler Einlauf	Wehr - gesamte Breite	einzel	-	oben	Zhang	2017
96	Einlauf	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,06 x L, Eintauchtiefe = 0,60 x H							X	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Zhou et al.	1997
97	Einlauf	Leitelement - quer	Trennwände	Eignung	transversale Anströmung dreier Stränge			X					transversaler Einlauf	Genne	einzel	außermittig	unten	He und Marsalek	2009
98	Sedimentationskammer	Beckeneinbauten	Insel	Eignung	Insel seitlich			X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Persson	2000
99	Sedimentationskammer	Beckeneinbauten	Insel	Eignung	Insel mittig							X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Persson	2000
100	Sedimentationskammer	Beckeneinbauten	Schwelle	Eignung	Schwelle über die gesamte Breite, Höhe = 0,7 x H							X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Persson	2000

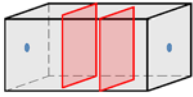
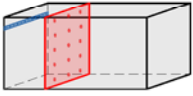


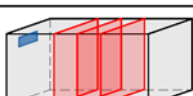
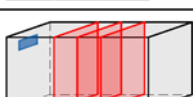
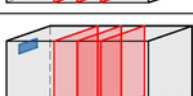
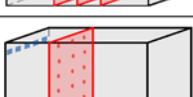

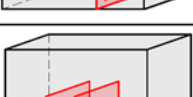
Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
101	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 2:1			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Agunwamba	2006
102	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 3:1				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Agunwamba	2006
103	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 4:1					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Agunwamba	2006
104	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	Formparameter Dufresne < 6,2			X				Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	unten	Dufresne et al.	2010
105	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	Formparameter Dufresne > 6,8					X		Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	unten	Dufresne et al.	2010
106	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 0,1:1		X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Li et al.	2013
107	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 2,5:1				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Li et al.	2013
108	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 10:1					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Li et al.	2013
109	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 1:1		X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Persson	2000
110	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 2:1				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Persson	2000

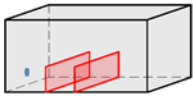
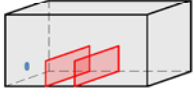








Nr.	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierung		Kurzbeschreibung	Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
			Optimierungs-Komponente	Frage-stellung			--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
111	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 4:1					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Persson	2000
112	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 12:1						X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Persson	2000
113	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	hoch					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Stovin und Saul	1996
114	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	niedrig			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Stovin und Saul	1996
115	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 8,5					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Takamatsu et al.	2010
116	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 5,7				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Takamatsu et al.	2010
117	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 2:1					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Vega et al.	2003
118	Sedimentationskammer	Konstruktion	Beckenabmessungen	Verhältnis L:B	L:B = 1:1		X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Vega et al.	2003
119	Sedimentationskammer	Konstruktion	Sohle	Neigung	Längsneigung				(X)	X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Stovin und Saul	2000
120	Sedimentationskammer	Konstruktion	Sohle	Neigung	Querneigung				(X)	X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Stovin und Saul	2000

Nr.	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierung		Kurzbeschreibung	Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
			Optimierungs-Komponente	Frage-stellung			-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr		
121	Sedimentationskammer	Konstruktion	Sohle	Neigung	Position = 0,07 x L, Eintauchtiefe = ca. 0,4 x H, & geneigter Sohle inkl. Pumpensumpf					X		Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Zhang	2014
122	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite = Breite Gerinne						X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Carlston	2015
123	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite > Breite Gerinne					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Carlston	2015
124	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite < Breite Gerinne					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Carlston	2015
125	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Eignung	Umkehr der Fließrichtung ohne Leitelemente			X				transversaler Einlauf	Gerinne	einzel	außermittig	unten	He und Marsalek	2009
126	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Eignung	Umkehr der Fließrichtung mit Leitelementen					X		transversaler Einlauf	Gerinne	einzel	außermittig	unten	He und Marsalek	2009
127	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 1 Element					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Kattnig	2014
128	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 2 Elemente						X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Kattnig	2014
129	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 6 Elemente			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Kattnig	2014
130	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite = Breite Gerinne					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Kattnig	2014

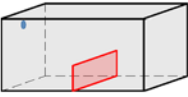

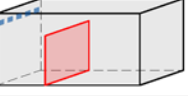
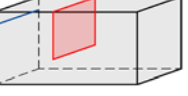
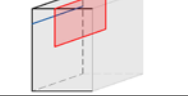
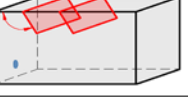

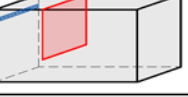
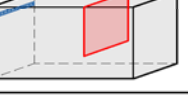
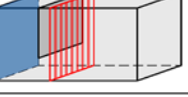
Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Fragestellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
131	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite > Breite Gerinne			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Kattnig	2014
132	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite < Breite Gerinne			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Kattnig	2014
133	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 2 Elemente					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Olukanni und Ducoste	2011
134	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 4 Elemente					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Olukanni und Ducoste	2011
135	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Länge	Länge = 0,6 x B			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Olukanni und Ducoste	2011
136	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Leitwände - alternierend	Länge	Länge = 0,8-0,9 x B					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Olukanni und Ducoste	2011
137	Sedimentationskammer	Leitelement - längs	Trennwände	Eignung	Trennung über gesamte Länge. 2 Kammern					X		transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Park et al.	2014
138	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Lamellenwand	Eignung	gesamter Querschnitt, horizontale Flanken, Position = 1/8 x L						X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Xanthos et al.	2011
139	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwand	Eignung	einzelne Leitwand - seitlich, Position = 0,5 x L, Breite = 2/3 x B			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Vega et al.	2003
140	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite = Breite Gerinne					X		transversaler Einlauf	Rohreinlauf	einzel	mittig	oben	Carlston	2015

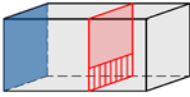
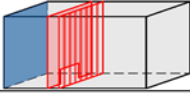


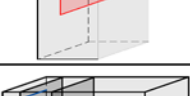

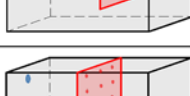

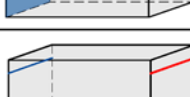

Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
141	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite > Breite Gerinne			X				transversaler Einlauf	Rohreinlauf	einzel	mittig	oben	Carlson	2015
142	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Breite Kurvenbereich	Breite < Breite Gerinne			X				transversaler Einlauf	Rohreinlauf	einzel	mittig	oben	Carlson	2015
143	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Eignung	Anzahl = 4 Elemente					X		transversaler Einlauf	Rohr	einzel	außermittig	-	He et al.	2015
144	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 2 Elemente			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Okkanni und Ducoste	2011
145	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 4 Elemente				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Okkanni und Ducoste	2011
146	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Anzahl	Anzahl = 6 Elemente					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Okkanni und Ducoste	2011
147	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Länge	Länge = 0,5 x B			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Okkanni und Ducoste	2011
148	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Länge	Länge = 0,7-0,8 x B					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Okkanni und Ducoste	2011
149	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Eignung	Leitwände quer zur langen Seite						X	transversaler Einlauf	Rohr	einzel	außermittig	-	Persson	2000
150	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Eignung, Position	zwei Leitwände - alternierend,, Position = 0,5 x L und 0,75 x L, Breite = 2/3 x B					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Vega et al.	2003

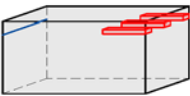

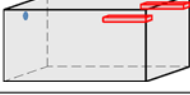

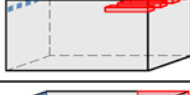
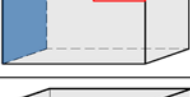
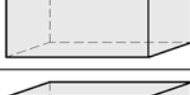

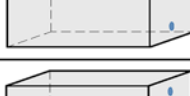

Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
151	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Leitwände - alternierend	Eignung, Position	zwei Leitwände - alternierend, Position = 0,33 x L und 0,67 x L, Breite = 2/3 x B						X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Vega et al.	2003
152	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,33 x L, Öffnungsanteil 52%						X	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Ghawi und Kris	2008
153	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,66 x L, Öffnungsanteil 65%						X	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Ghawi und Kris	2008
154	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,33 x L, 2 Platten mit versetzten Schlitzen						X	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Lee	2017
155	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Material	gesamter Querschnitt, 3 Lagen, Material: Jute-Stoff						X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Thaxton und McLaughlin	2005
156	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Material	gesamter Querschnitt, 3 Lagen, Material: PVC-Baumschutz						X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Thaxton und McLaughlin	2005
157	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Material	gesamter Querschnitt, 3 Lagen, Material: Geotextil				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Thaxton und McLaughlin	2005
158	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,33 x L, Öffnungsanteil 58%						X	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Zhou et al.	1997
159	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - perforiert	Eignung	Position = 0,66 x L, Öffnungsanteil 65%						X	Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Zhou et al.	1997
160	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position, Höhenlage	2 Bleche, Position = 0,32 und 0,5 x L, Höhe Blech 1 < Höhe Blech 2		X					Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Asgharzadeh et al.	2011






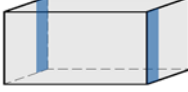


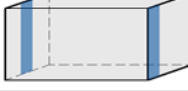

Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
161	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position, Höhenlage	2 Bleche, Position = 0,32 und 0,5 x L, Höhe Blech 1 = Höhe Blech 2			X				Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Asgharzadeh et al.	2011
162	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position, Höhenlage	2 Bleche, Position = 0,32 und 0,5 x L, Höhe Blech 1 > Höhe Blech 2						X	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Asgharzadeh et al.	2011
163	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position, Höhenlage	1 Blech, Position = 0,5 x L					X		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Asgharzadeh et al.	2011
164	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Höhen	Höhe = 0,16 x H, Position = ca. 0,5 x L			X				Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Bretscher et al.	1992
165	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Höhenlage	Höhe = 0,63 x H, Position = ca. 0,5 x L					X		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Bretscher et al.	1992
166	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 30°			X				Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Heydari et al.	2013
167	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 45°					X		Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Heydan et al.	2013
168	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 60°						X	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Heydari et al.	2013
169	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 90°					X		Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Heydari et al.	2013
170	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 120°				X			Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Heydari et al.	2013







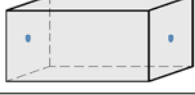



Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle				
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr			
171	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Winkel	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,40 x H, Winkel = 150°		X							Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Heydari et al.	2013
172	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhenlage	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,32 x H							X		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Jamshidnia und Firoozabadi	2010
173	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhenlage	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,25 x H		X							Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Razmi et al.	2009
174	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position, Höhenlage	Position = 0,5 x L, Höhe = 0,32 x H							X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Razmi et al.	2009
175	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position	zwei Leitwände, Positionen = 0,125 und 0,4 x L								X	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Shahrokhi et al.	2011
176	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position	zwei Leitwände, Positionen = 0,125 x L und 0,25-0,55 x L							X		Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Shahrokhi et al.	2011
177	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position	drei Leitwände, Positionen = 0,125, 0,30 und 0,4 x L								X	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Shahrokhi et al.	2011
178	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Anzahl, Position	drei Leitwände, Positionen = 0,125 x L und 0,25-0,4 x L								X	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	unten	Shahrokhi et al.	2011
179	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Eignung	gesamte Breite, Position = ca. 0,5 x L								X	Gerinneeinlauf	-	einzel	mittig	oben	Stamou et al.	2009
180	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Position = 0,15 x L, Höhe = 0,33-0,5 x H								X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Tamayol et al.	2008











Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
181	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Anbringung unten, Nähe Beckenmitte, Position = 0,5 x L, Höhe = 0,33-0,5 x H				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Tamayol et al.	2008
182	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Position	Anbringung unten, Nähe KÜ, Position = 0,9 x L, Höhe = 0,33-0,5 x H		X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Tamayol et al.	2008
183	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - überströmt	Eignung	Position = 0,33 x L, Höhe = 0,42 x H				X			Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Zhou et al.	1997
184	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,6 x L, Eintauchtiefe = 0,83 x H			X				transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Ahmed et al.	1996
185	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,37 x L, Eintauchtiefe = 0,33 x H			X				transversaler Einlauf	Wehr-gesamte Breite	einzel	-	oben	Al-Saadi et al.	2016
186	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Anzahl	2 Prallwände, Anströmwinkel 110°				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Al-Sammarraee et al.	2009
187	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Anzahl	4 Prallwände, Anströmwinkel 110°					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Al-Sammarraee et al.	2009
188	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = 0,33 x L, Eintauchtiefe = 0,5 x H				X			Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Ghawí und Kris	2008
189	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = 0,66 x L, Eintauchtiefe = 0,4 x H				X			Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Ghawí und Kris	2008
190	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = 0,32 x L, Eintauchtiefe = 0,89 x H, dahinter Installation Rechens				X			Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Huggins et al.	2005

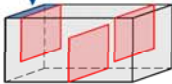
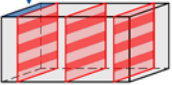
Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle				
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr			
191	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = 0,62 x L, Eintauchtiefe = 0,68 x H, Öffnung mit Rechenstäben					X				Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Huggins et al.	2005
192	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = 0,32 x L, rechteckige Öffnung an Sohle mit Höhe = 0,32 x H und Breite = 0,30 x B, dahinter Installation des Rechens								X	Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Huggins et al.	2005
193	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Anbringung oben, Nähe Beckenmitte, Position = 0,5 x L, Höhe = 0,33-0,5 x H			X						Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Tamayol et al.	2008
194	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Anbringung unten, Nähe KÜ, Position = 0,9 x L, Höhe = 0,33-0,5 x H		X							Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Tamayol et al.	2008
195	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position	Position = 0,35-0,4 x L, Eintauchtiefe = 0,4-0,5 x H						X			Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	oben	Yoon and Lee	2000
196	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Position, Eintauchtiefe	Position = 0,07 x L, Eintauchtiefe = 0,33 x H								X	transversaler Einlauf	Wehr - gesamte Breite	einzel	-	oben	Zhang	2017
197	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt	Eignung	Position = 0,66 x L, Eintauchtiefe = 0,33 x H				X					Gerinneinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Zhou et al.	1997
198	Sedimentationskammer	Leitelement - quer	Prallwand - unterströmt, perforiert	Eignung	Position = 0,4 x L, Eintauchtiefe = 0,75 x H Öffnungsanteil 50%				X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	McCorquodale et al.	2006
199	Klärüberlauf	frontale Positionierung	Überlaufwehr	Eignung	über gesamte Breite				X					Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Huggins et al.	2005
200	Klärüberlauf	frontale Positionierung	Überlaufwehr	Eignung	über gesamte Breite, Beschickung 72 l/(sxn)				X					transversaler Einlauf	-	einzel	mittig	-	Kawamura und Lang	1986

Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
201	Kläüberlauf	seitliche Positionierung	Überlaufrinne	Eignung	Länge unbekannt, Beschickung 2,9 V/(sxm)					X		transversaler Einlauf	-	einzel	mittig	-	Kawamura und Lang	1986
202	Kläüberlauf	seitliche Positionierung	Überlaufrinne	Eignung	Installation von 4 Rinnen						X	Rohreinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Kris und Ghawi	2007
203	Kläüberlauf	seitliche Positionierung	Überlaufrinne	Eignung	Länge = 0,45 x L						X	Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	McCorquodale et al.	2006
204	Kläüberlauf	seitliche Positionierung	Überlaufrinne	Eignung	Länge = 0,33 x L, Installation von 8 Rinnen				X			Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Xanthos et al.	2013
205	Kläüberlauf	seitliche Positionierung	Überlaufrinne	Eignung	Länge = 0,33 x L, Installation von 4 Rinnen			X				Gerinneeinlauf	-	mehrfach	mittig	oben	Zhou et al.	1997
206	Kläüberlauf	seitliche Positionierung	Überlaufwehr	Eignung	Länge = 0,45 x L, beidseitig					X		Sonderfall: Anströmung gesamter Querschnitt	-				Huggins et al.	2005
207	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf oben			X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Agunwamba	2006
208	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf Mitte				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Agunwamba	2006
209	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf unten					X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Agunwamba	2006
210	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf oben				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Agunwamba	2006

Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle			
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr		
211	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf Mitte			X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Agunwamba	2006
212	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf unten					X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Agunwamba	2006
213	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf oben						X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Agunwamba	2006
214	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf Mitte					X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Agunwamba	2006
215	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf unten		X						Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Agunwamba	2006
216	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite						X		Gerinneinlauf	-	einzel	außermittig	unten	Camnasio et al.	2011
217	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - gleiche Seite			X					Gerinneinlauf	-	einzel	außermittig	unten	Camnasio et al.	2011
218	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf mittig, Auslauf mittig					X			Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	unten	Camnasio et al.	2011
219	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf mittig, Auslauf außermittig					X			Gerinneinlauf	-	einzel	mittig	unten	Camnasio et al.	2011
220	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite, beides Höhenlage = oben					X			Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	oben	Li et al.	2013

Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
221	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite, beides Höhenlage = Mitte				X			Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	Mitte	Li et al.	2013
222	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite, beides Höhenlage = unten				X			Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	unten	Li et al.	2013
223	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf mittig, Auslauf mittig, beides Höhenlage = oben				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Li et al.	2013
224	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf mittig, Auslauf mittig, beides Höhenlage = Mitte				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Li et al.	2013
225	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position, Höhenlage	Einlauf mittig, Auslauf mittig, beides Höhenlage = unten				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Li et al.	2013
226	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite					X		Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	-	Persson	2000
227	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf mittig, Auslauf mittig				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	-	Persson	2000
228	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf seitlich		X					Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	-	Persson	2000
229	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - gleiche Seite			X				Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	-	Persson	2000
230	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf mittig, Auslauf mittig				X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Vega et al.	2003

Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle			
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		--	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr		
231	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Position	Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite					X			Rohreinlauf	-	einzel	außermittig	Mitte	Vega et al.	2003
232	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf oben			X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Wang et al.	2014
233	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf Mitte				X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Wang et al.	2014
234	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf oben, Auslauf unten					X			Rohreinlauf	-	einzel	mittig	oben	Wang et al.	2014
235	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf oben				X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Wang et al.	2014
236	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf Mitte			X					Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Wang et al.	2014
237	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf Mitte, Auslauf unten				X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	Mitte	Wang et al.	2014
238	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf oben						X		Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Wang et al.	2014
239	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf Mitte				X				Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Wang et al.	2014
240	Becken gesamt	Konstruktion	Einlauf, Klärüberlauf	Höhenlage	Einlauf unten, Auslauf unten		X						Rohreinlauf	-	einzel	mittig	unten	Wang et al.	2014

Nr.	Optimierung					Schematische Skizze	Hydraulische Eignung lt. Autor					Einlaufgestaltung				Quelle		
	Becken-Funktions-Komponente	Ansatz	Optimierungs-Komponente	Frage-stellung	Kurzbeschreibung		~	-	o	+	++	Klasse	Anzahl Einlauf-ströme	Außer-mittigkeit	Höhen-lage Einlauf	Autor	Jahr	
241	Becken gesamt	Leitelement - quer	Prallwände - unter- und überströmt	Eignung	Einlaufbereich: unterströmt, Mitte Becken: überströmt, Klärüberlauf: unterströmt			X				Gerinneeinlauf	Zulauf von oben	einzel	mittig	oben	Dong et al.	2013
242	Becken gesamt	Leitelement - quer	Prallwände - perforiert	Eignung	alle Elemente sind massive Wände mit Öffnungen					X		Gerinneeinlauf	Zulauf von oben	einzel	mittig	oben	Dong et al.	2013

Optimierungs-Komponente	Klassifizierung			Kurzbeschreibung	Eignung					Schematische Skizze
	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Höhenlage Einlauf		-	-	o	+	++	
	Rohr Gerinne Transversal	Einzel Mehrfach	Oben Mitte Unten							

EINLAUF												
Konstruktion												
Höhenlage	-	-	-	Hydraulisches Potential						X		
			O	Einlauf oben		X						
			M	Einlauf Mitte				X				
			U	Einlauf unten			X	X				
Fläche Anströmung	-	-	-	Hydraulisches Potential						X		
			R	E	-	Rohreinlauf	X					
			G	E	-	Breite _{Gerinneeinlauf} < Breite _{Becken}			X			
					U	Breite _{Gerinneeinlauf} = Breite _{Becken}					X	
						Öffnungshöhe = 0,2...0,5 x H					X	
						Öffnungshöhe < 0,2 x H	X					
T	E	O	Breite _{Wehr} < Breite _{Becken}			X						
			Breite _{Wehr} = Breite _{Becken}						X			
Anzahl Einlaufströme	-	-	-	Hydraulisches Potential					X			
			E	-	einfacher Einlaufstrom		X					
			M	-	mehrfacher Einlaufstrom				X			
Ausführung	R	-	-	Hydraulisches Potential			X					
				Abschrägung scharfkantiger Einläufe					X			
Anströmwinkel	-	-	-	Hydraulisches Potential			(X)					
				Winkel = 0° (zur langen Seite)			X					
				Winkel = 90° (zur langen Seite)			X					

Optimierungs-Komponente	Klassifizierung			Kurzbeschreibung	Eignung					Schematische Skizze
	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Höhenlage Einlauf		---	-	o	+	++	
	Rohr Gerinne Transvers	Einzel Mehrfach	Oben Mitte Unten							Ansicht Schnitt Draufsicht

EINLAUF											
Leitelement - quer											
Prallwand - unterströmt	-	-	O	Hydraulisches Potential					X		
				Eintauchtiefe:Position = 3-10					X		
				Eintauchtiefe:Position = 10-15				X			
	R	-	O	Eintauchtiefe:Position > 15	X						
				Eintauchtiefe > 0,85 x H	X						
				Eintauchtiefe:Position = 5-10					X		
	G	-	O	Eintauchtiefe:Position = 0-5				X			
				Eintauchtiefe:Position = 10-15				X			
				Eintauchtiefe:Position > 15	X						
	T	-	O	Eintauchtiefe:Position = 4-7					X		
Eintauchtiefe:Position < 4-7							X				
Prallwand - überströmt	-	-	U	Hydraulisches Potential					X		
				Höhe:Position = 2-3					X		
	R	-	U	Höhe:Position = 1-2				X			
				Höhe:Position = 1-2				X			
	G	-	U	Höhe:Position = 0,5-1,5				X			
				Winkel gegen Fließrichtung = 90°				X			
Winkel gegen Fließrichtung = 60°				X							
Prallwand - perforiert	-	-	-	Hydraulisches Potential				X			
				Öffnungsanteil > 50%				X	X		
				Öffnungsanteil < 50%	X			X			
Prallteller	-	-	-	Hydraulisches Potential		(x)					
Lamellenwand	-	-	O	Hydraulisches Potential					(x)		
				durchgehend bis Boden					X		
				nicht durchgehend bis Boden	X						
Diffusor	-	-	-	Hydraulisches Potential					X		
				orthogonal angeströmte Diffusor-Elemente							X
	T	-	-	Diffusor-mit horizontalen Leitelementen					X		
				Diffusor-ohne horizontale Leitelemente			X				

Optimierungs-Komponente	Klassifizierung			Kurzbeschreibung	Eignung					Schematische Skizze
	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Höhenlage Einlauf		-	-	o	+	++	
	o Rohr e erinne T transversal	e einzeln M mehrfach	o oben e mitte T unten							

EINLAUF												
Beckeneinbauten												
Passstück Rohr	R	-	-	Hydraulisches Potential				X				
				T-Stück						X		
				90°-Bogen (oben/links/rechts)					X			
				90°-Bogen (unten)			X					
Einlaufbox	-	-	-	Hydraulisches Potential				X				
				Anbringung mit Strömunglenkung auf Schlammammelraum		X						
				Füllung mit Material (Beispiel: Verpackungs- und Dichtungsmaterial)			X					
Reflektor	R/ G	-	-	Hydraulisches Potential				X				
				rechteckige Ausführung					X			
				runde Ausführung					X			

SEDIMENTATIONSKAMMER												
Konstruktion												
Becken-abmessungen	-	-	-	Hydraulisches Potential						X		
				L:B > 10						X		
				L:B = 4-10					X			
				L:B = 2-3				X				
				L:B = 1	X							
Sohlgestaltung	-	-	-	Hydraulisches Potential				X				
				Längsneigung					X			
				Querneigung						X		

Optimierungs-Komponente	Klassifizierung			Kurzbeschreibung	Eignung					Schematische Skizze
	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Höhenlage Einlauf		—	-	o	+	++	
	Rohr Gerinne Transversal	Einzelfach Mehrfach	Oben Mitte Unten							

EINLAUF												
Leitelement - quer												
Prallwand - unterströmt	-	-	-	Hydraulisches Potential				x				
				Position = $0,7-0,95 \times L$	X							
				mehrere Prallwände (2-4)					X			
Prallwand - überströmt	-	-	-	Hydraulisches Potential				x				
				Position = $0,5 \times L$				x				
				Position = $0,7-0,95 \times L$	X							
				mehrere Prallwände (2-3)						X		
Prallwand - perforiert	-	-	-	Hydraulisches Potential				x				
				Position = $0,33-0,66 \times L$						x		
				Öffnungsanteil = 55-65%						x		
				Naturmaterialien (z.B. Jute)		X						
Lamellenwand	-	-	-	Hydraulisches Potential				x				
Leitwände - alternierend	-	-	-	Hydraulisches Potential				x				
				Anzahl der Elemente > 4					x			
				Anzahl der Elemente < 4		X						
				Breite Kurvenbereich = Breite Gerinne						x		
				Breite Kurvenbereich > Breite Gerinne		X						
				Breite Kurvenbereich < Breite Gerinne	X							
				Länge Elemente = $0,7-0,8 \times B$						x		
Länge Elemente > $0,8 \times B$	X											
Leitelement - längs												
Leitwände - alternierend	-	-	-	Hydraulisches Potential						x		
				Anzahl der Elemente = 2						x		
				Anzahl der Elemente > 2		X						
				Breite Kurvenbereich = Breite Gerinne						x		
				Breite Kurvenbereich > Breite Gerinne		X						
				Breite Kurvenbereich < Breite Gerinne	X							
				Länge Elemente = $0,8-0,9 \times L$						x		
Länge Elemente > $0,9 \times L$	X											
Länge Elemente < $0,6 \times L$		X										
Trennwände	-	-	-	Hydraulisches Potential				x				
Beckeneinbauten												
Insel	-	-	-	Hydraulisches Potential				x				
				mittige Anordnung						x		
				seitliche Anordnung		X						
Schwelle	-	-	-	Hydraulisches Potential				x				

Optimierungs-Komponente	Klassifizierung			Kurzbeschreibung	Eignung					Schematische Skizze
	Klasse	Anzahl Einlaufströme	Höhenlage Einlauf		-	-	o	+	++	
	Rohr Rinne Transversal	Einzelfach Mehrfach	Oben Mitte Unten		-	-	o	+	++	Ansicht Schnitt Draufsicht

EINLAUF

KLÄRÜBERLAUF										
Überlaufwehr	-	-	-	Hydraulisches Potential						
				frontale Anordnung		X				
				seitliche Anordnung						X
Überlaufrinne	-	-	-	Hydraulisches Potential						
				frontale Anordnung		X				
				seitliche Anordnung						X

BECKEN GESAMT										
Einlauf - Auslauf Position	-	E	-	Hydraulisches Potential						
				Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - entgegengesetzte Seite						X
				Einlauf außermittig, Auslauf außermittig - gleiche Seite	X					
				Einlauf mittig, Auslauf mittig			X			
Einlauf - Auslauf Höhenlage	-	-	-	Hydraulisches Potential						
				Einlauf unten, Auslauf oben						X
				Einlauf Mitte, Auslauf oben			X			
				Einlauf oben, Auslauf oben		X				
				Einlauf unten, Auslauf unten	X					