



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 1: Ertüchtigung des Bestandes –

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

S. Ebbert M.Sc.

J. Schomaker-Loth B.Eng.



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences



IWARU Institut für
Infrastruktur · Wasser ·
Ressourcen · Umwelt

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>I</i>
<i>Verzeichnis der Bilder</i>	<i>III</i>
<i>Verzeichnis der Tabellen</i>	<i>VIII</i>
<i>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</i>	<i>IX</i>
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung und Vorgehensweise	2
3 Stand der Wissenschaft und Technik	3
4 Material und Methoden	13
4.1 Bildung von Klassen repräsentativer Becken-Funktions-Komponenten	13
4.2 Erhebung repräsentativer Becken-Funktions-Komponenten	15
4.2.1 Erhebung repräsentativer Einlaufbereiche	18
4.2.2 Erhebung repräsentativer Sedimentationskammern	19
4.2.3 Erhebung repräsentativer Klärüberläufe	20
4.3 Physikalische Modellierung	21
4.3.1 Aufbau des physikalischen Modells	21
4.3.2 Methodik der Tracermessung	25
4.4 Numerische Simulation	28
4.4.1 Verwendete Software	28
4.4.2 Geometrische und hydraulische Randbedingungen der für die numerischen Optimierungsstudien ausgewählten Beckenkomponenten	28
4.5 Bewertungs-Systematik	38
4.6 Indikatoren aus Traceruntersuchungen	40
4.7 Indikatoren aus numerischer Strömungssimulation	42
4.7.1 Einlaufbauwerk und Klärüberlauf	42
4.7.2 Sedimentationskammer	44

5	<i>Ergebnisse und Diskussion</i>	46
5.1	Physikalische Modellierung	46
5.1.1	Visualisierung der Durchströmung	46
5.1.2	Auswertung der Tracerversuche	51
5.1.3	Grafische Zusammenfassung und Vergleich	60
5.2	Validierung der numerischen Simulation	62
5.3	Gitternetzstudie	63
5.4	Numerische Optimierungsstudien der ausgewählten Regenbecken	64
5.4.1	Einlaufbauwerk (beckenparallel)	65
5.4.2	Einlaufbauwerk (transversal)	85
5.4.3	Sedimentationskammer	96
5.4.4	Klärüberlauf	101
5.4.5	Gesamtbecken.....	103
6	<i>Empfehlungen</i>	112
7	<i>Zusammenfassung</i>	116
	<i>Literaturverzeichnis</i>	118
	<i>Anhangsverzeichnis</i>	123

Verzeichnis der Bilder

Bild 3.1:	Beckengeometrie; links: Grundvariante; rechts: Szenario 1 (vgl. He/Marsalek [2009]).....	6
Bild 3.2:	Beckengeometrie Szenario 2 (vgl. He/Marsalek [2009]).....	7
Bild 3.3:	Untersuchte Einlaufkonfigurationen (vgl. Rostami et al. [2011]).....	9
Bild 3.4:	Stromlinien und u-Geschwindigkeiten der untersuchten Einlaufkonfigurationen (vgl. Rostami et al. [2011])	10
Bild 3.5:	Geometrie des Modells (vgl. Razmi et al. [2013]).....	11
Bild 4.1:	Schema Beckenaufteilung in Funktionskomponenten	14
Bild 4.2:	Funktionsschema des physikalischen Modells	22
Bild 4.3:	Modellkomponenten des physikalischen Modells (Darstellung verzerrt)	22
Bild 4.4:	links: Quelltopf mit Turbulenzgitter; rechts: Einlaufgerinne mit Turbulenzgitter	23
Bild 4.5:	links: Außenansicht Glasbecken; rechts: Sedimentationskammer	24
Bild 4.6:	Klärüberlauf; links: Wehr im Querschnitt; Mitte: Überlaufschwelle in der Ansicht vom UW; rechts: Messonden	25
Bild 4.7:	Variante 1 Grundausführung; links: mittig; rechts: außermittig	31
Bild 4.8:	Geometrische und hydraulische Randbedingungen der Variante 1	31
Bild 4.9:	Variante 2 Grundausführung; links: mittig; rechts: außermittig	32
Bild 4.10:	Variante 3 Grundausführung; links: horizontales Wehr, rechts: Streichwehr	33
Bild 4.11:	Geometrische und hydraulische Randbedingungen der Variante 3	33
Bild 4.12:	Variante 4 Grundausführung; links: mittig; rechts: außermittig	34
Bild 4.13:	Relativer Vergleich der Abmessungen aller untersuchten Sedimentationskammern (SeKa 1-4) als Draufsicht	36
Bild 4.14:	Grundvarianten Klärüberlauf; links: Schlitzwand; rechts: Wehr mit vorgeschalteter Tauchwand.....	38
Bild 4.15:	Bewertungssystematik zur Ertüchtigung von Bestandsbecken	38
Bild 4.16:	Exemplarische Darstellung der Randbedingungsparameter	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Bild 4.17:	Parametrisierung der Durchströmungseigenschaften (Uhl et al. [2009]).....	41
Bild 4.18:	Durchströmungscharakteristik in einem idealisierten, rechteckigen Becken mit Pfropfenströmung; links: Konturplot der u-Geschwindigkeiten; rechts: Stromlinien beginnend im Einlauf	43
Bild 5.1:	Verweilzeitverteilung der Grundvariante	51
Bild 5.2:	Momentaufnahme des Tracerversuchs der Grundvariante in der Draufsicht	52
Bild 5.3:	Momentaufnahme des Tracerversuchs der Grundvariante im Querschnitt ..	53
Bild 5.4:	Verweilzeitverteilung der Versuchsreihe Prallteller	54
Bild 5.5:	Momentaufnahme des Tracerversuchs des Pralltellers in der Draufsicht.....	55
Bild 5.6:	Momentaufnahme des Tracerversuchs des Pralltellers im Querschnitt.....	56
Bild 5.7:	Verweilzeitverteilung der Versuchsreihe Prallwand	57
Bild 5.8:	Momentaufnahme des Tracerversuchs im Becken mit Prallwand in der Draufsicht.....	58
Bild 5.9:	Momentaufnahme des Tracerversuchs der Prallwand im Querschnitt	59
Bild 5.10:	Vergleich der Verweilzeitverteilung der Grundvariante, des Pralltellers und der Prallwand	61
Bild 5.11:	Gegenüberstellung der Verweilzeitverteilung Simulation und Experiment ...	62
Bild 5.12:	Darstellung des Gitternetzes mit einer Zellgröße von 5 cm in Flow3D	63
Bild 5.13:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten und Strömungsindikatoren für unterschiedlich fein aufgelöste Gitternetze	64
Bild 5.14:	Untersuchte Einlaufkonstruktionen	64
Bild 5.15:	Überblick der untersuchten Optimierungen für den mittigen Gerinneeinlauf	66
Bild 5.16:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Grundvariante (beckenparallel, mittig)	66
Bild 5.17:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 1 des mittigen Gerinneeinlaufs.....	67
Bild 5.18:	Übersicht aller untersuchten Pralltellerkonfigurationen.....	68
Bild 5.19:	Übersicht aller untersuchten Prallwandkonfigurationen.....	69
Bild 5.20:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 5 des mittigen Gerinneeinlaufs.....	70

Bild 5.21:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 3 (Reflektor) des mittigen Gerinneinlaufs	71
Bild 5.22:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Lamellenwand des mittigen Gerinneinlaufs.....	72
Bild 5.23:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der teilw. ausgeblockten Lamellenwand des mittigen Gerinneinlaufs	73
Bild 5.24:	Übersicht der untersuchten Lamellenwände.....	74
Bild 5.25:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 5 (liegende Leitwand) des mittigen Gerinneinlaufs	75
Bild 5.26:	Isometrische Darstellung der Strömungs-Gleichrichter Fehler! Textmarke nicht definiert.	
Bild 5.27:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des mittigen Gerinneinlaufs für $q_a=10$ m/h	78
Bild 5.28:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des mittigen Gerinneinlaufs für $q_a=4$ m/h	79
Bild 5.29:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Grundvariante des außermittigen Gerinneinlaufs.....	79
Bild 5.30:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des außermittigen Gerinneinlaufs.....	80
Bild 5.31:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Grundvariante des sohlgleichen, mittigen Rohrzulaufs	81
Bild 5.32:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des sohlgleichen, mittigen Rohrzulaufs	81
Bild 5.33:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des sohlgleichen, außermittigen Rohrzulaufs.....	82
Bild 5.34:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des sohlgleichen, außermittigen Rohrzulaufs.....	82
Bild 5.35:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des mittigen Zulaufs nach DWA T3	83
Bild 5.36:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des mittigen Zulaufs nach DWA T3	84
Bild 5.37:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des außermittigen Zulaufs nach DWA T3.....	84

Bild 5.38:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des außermittigen Zulaufs nach DWA T3.....	85
Bild 5.39:	Untersuchte Optimierungen für den transversalen Einlauf	86
Bild 5.40:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Grundvariante des transversalen Einlaufs	87
Bild 5.41:	Längsschnitt mit Längen – und Abstandsmaß der vertikalen Leitwand.....	88
Bild 5.42:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten (links: Abstand Tauchwand zum Wehr = $4 \cdot r_{hy}$; rechts = $2 \cdot r_{hy}$)	88
Bild 5.43:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten (links: Eintauchtiefe = $4 \cdot r_{hy}$; rechts = $6 \cdot r_{hy}$)	89
Bild 5.44:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten (oben: überströmbar; unten: nicht überströmbar)	90
Bild 5.45:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Lamellenwand mit einer Wehrhöhe von 1,40 m	91
Bild 5.46:	Übersicht der untersuchten Wehrhöhen in Kombination mit einer Lamellenwand.....	92
Bild 5.47:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Lamellenwand mit einer Wehrhöhe von $\sim 3 \cdot r_{hy}$	92
Bild 5.48:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Lamellenwand mit einer Wehrhöhe von 0,70 m (oben: ausgeblockte Spülschlitze; unten: Spalt zwischen Außenwand und erster Lamelle).....	94
Bild 5.49:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des schrägen Wehres	95
Bild 5.50:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des schrägen Wehres und gegenläufig angeschrägter Tauchwand	95
Bild 5.51:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 des transversalen Einlaufs	96
Bild 5.52:	Übersicht der durchgeführten Simulationen zur Sedimentationskammer.....	97
Bild 5.53:	Schubspannungsverteilung auf der Sohle (SeKa 1)	98
Bild 5.54:	Exemplarische Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung im Längsschnitt einer SeKa mit Ausblockung zum Schutz des SSR (überhöht)	98
Bild 5.55:	Schubspannungsverteilung auf der Sohle (SeKa 2)	99

Bild 5.56:	Schubspannungsverteilung auf der Sohle (SeKa 3).....	100
Bild 5.57:	Schubspannungsverteilung auf der Sohle (SeKa 4).....	100
Bild 5.58:	Geschwindigkeitsverteilung aller Varianten Klärüberlauf KÜ 1.....	102
Bild 5.59:	Geschwindigkeitsverteilung aller Varianten Klärüberlauf KÜ 2.....	102
Bild 5.60:	Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante des mittigen Gerinnezulaufs.....	103
Bild 5.61:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante des mittigen Gerinneeinlaufs	104
Bild 5.62:	Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Prallwand des mittigen Gerinneeinlaufs	104
Bild 5.63:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Prallwand des mittigen Gerinneeinlaufs.....	105
Bild 5.64:	Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Lamellenwand des mittigen Gerinneeinlaufs	106
Bild 5.65:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Lamellenwand des mittigen Gerinneeinlaufs	106
Bild 5.66:	Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante mit dem Strömungs-Gleichrichter des mittigen Gerinneeinlaufs	107
Bild 5.67:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante mit einem Strömungs-Gleichrichter des mittigen Gerinneeinlaufs	107
Bild 5.68:	Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante des transversalen Rohrzulaufs.....	108
Bild 5.69:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante des transversalen Rohrzulaufs	109
Bild 5.70:	Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Lamellenwand und optimaler Wehrhöhe des transversalen Rohrzulaufs	109
Bild 5.71:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Lamellenwand und optimaler Wehrhöhe des transversalen Rohrzulaufs	110
Bild 5.72:	Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante mit einem Strömungs-Gleichrichter des transversalen Rohrzulaufs.....	111

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 4-1: Hydraulische und geometrische Randbedingungen der in der Erhebung berücksichtigten Becken	16
Tabelle 4-2: Erhebung repräsentativer Einlaufbereich.....	19
Tabelle 4-3: Erhebung repräsentative Sedimentationskammer.....	20
Tabelle 4-4: Erhebung repräsentativer Klärüberläufe	21
Tabelle 4-5: Bemessung des physikalischen Modells	23
Tabelle 4-6: Geometrische Abmessungen und hydraulische Randbedingungen der Grundvarianten des Einlaufbauwerkes	30
Tabelle 4-7: Geometrische Abmessungen und hydraulische Randbedingungen der Grundvarianten der Sedimentationskammer	34
Tabelle 4-8: Geometrische Abmessungen und hydraulische Randbedingungen der Grundvarianten des Klärüberlaufes	37
Tabelle 4-9: Nachweise für Randbedingungsparameter aus DWA-A 166 [2013].....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Tabelle 4-10: Erweiterung der Randbedingungen aus Bestandsplänen..	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Tabelle 4-11: Erweiterung der Nachweise und Zielgrößen aus Randbedingungen....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Tabelle 5-1: Visueller Vergleich der Grundvariante und der Variante mit Prallteller im Querschnitt, Minute 0:00 bis 0:20	47
Tabelle 5-2: Visueller Vergleich der Grundvariante und der Variante mit Prallteller im Querschnitt, Minute 0:30 bis 2:35	48
Tabelle 5-3: Visueller Vergleich der Grundvariante und der Variante mit Prallteller im Querschnitt, Minute 3:15 bis 5:55	49
Tabelle 5-4: Visueller Vergleich der Grundvariante und der Variante mit Prallteller im Querschnitt, Minute 6:35 bis 9:15	50
Tabelle 5-5: Angaben zum numerischen Gitter der Netzstudie (Einlaufbauwerk)	63

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
τ_{krit}	Pa ,N/mm ²	kritische Schubspannung von AFS ₆₃
ADV		Acoustic Doppler Velocimeter
AFS ₆₃		Abfiltrierbare Stoffe (Feinanteile)
A _{ges}	m ²	durchströmter Querschnitt gesamt
A _i	m ²	durchströmter Querschnitt in Zelle i
A _M	m ²	Oberfläche
A _{neg}	m ²	negativ durchströmter Querschnitt
A _{SeKa}	m ²	Grundfläche der Sedimentationskammer
a _t		Abstand der Leitwand zum Wehr
A _u	m ²	Undurchlässige Fläche des Einzugsgebiets
b _b	m	Breite des Beckens
B _M	m	Beckenbreite
B _ü	-	Beckenüberlauf
C	mg/l	Gemessene Konzentration des Tracers im Ablauf
C'	-	normierte Konzentration
C'(θ)	-	Verweilzeitverteilung
CFD		Computational Fluid Dynamics
DPM		Discrete Phase Model
DRohrzulauf		Rohrdurchmesser
DWA-A		Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft
DWA-T		Themenheft der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft
EBw/VBwEBW		Einlauf- und Verteilungsbauwerk (Zulaufkonstruktion)Einlaufbauwerk
F(θ)	-	Summenlinie der Verweilzeit
Fr _M	-	Froude-Zahl für das Modell Becken
Fr _N	-	Froude-Zahl für das Natur Becken
hb	m	Beckentiefe
hkue	m	Höhe der Wehr-Krone
h _{M,m,T}	m	Mittlere Beckentiefe
h _ü	m	Überfallhöhe der Wehr-Krone
I	-	Strömungs-Indikator

IWARU		Institut für Infrastruktur Wasser Ressourcen Umwelt
Kü	-	Klärüberlauf
l_b	m	Länge des Beckens
L_M	m	Beckenlänge
L_M , Gesamt	m	Gesamtlänge
L_M , Zulauf	m	Länge des Zulaufes
$L_{M,PS}$	m	Länge des Pumpensumpfes
l_t		Eintauchtiefe der Leitwand
M	mg	Masse des Tracer
MID		magnetisch-induktiver Durchflussmesser
$\varnothing_{\text{Reflektor}}$		Durchmesser des Reflektors
Q	m^3/s	Durchfluss
q_a	m/h	Oberflächenbeschickung
Q_{krit}	m^3/s	Kritischer Durchfluss
$q_{M,a}$	m/h	Oberflächenbeschickung (in Bezug auf das Referenzbecken)
$Q_{M,krit}$	l/s	Kritischer Abfluss
r_{hy}	m	Hydraulischer Radius
RiStWag		Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten
RKB		Regenklärbecken
RNG		Re-Normalisation- Group Turbulenzmodell
SAS-Modell		Supervisory Attentional System
SeKa		Sedimentationskammer
SPS		Speicherprogrammierbare Steuerung
SSR		Schlammammelraum
STL		Standard Tessellation Language
t	s	Zeit seit Tracereinspeisung
u_h	m/s	Pfropfenströmungsgeschwindigkeit
u_h		Grenzwert der horizontalen Geschwindigkeit
u_i	m/s	an jedem berechneten Punkt auf dem Kontrollquerschnitt bestimmten Fließgeschwindigkeit
UV-Strahlung		Ultraviolette Strahlung
V_{Aus}	l	Abflussvolumen seit Tracereinspeisung
v_{ein}	m/s	Zulauf-Fließgeschwindigkeit
V_{ges}	m^3	Gesamtes Beckenvolumen
v_h	m/s	Mittlere horizontale Fließgeschwindigkeit
V_M	m^3	Volumen
V_{nutz}	m^3	Nutzbares Beckenvolumen
VOF-Model		Volume of Fluid Model

V_R	l	Reaktorvolumen
v_s		Grenzwert der vertikalen Geschwindigkeit
V_{SeKa}	m^3	Volumen der Sedimentationskammer
$V_{u,Tl,v}$	m^3	jeweiliges Volumen, in dem der Grenzwert unterschritten wird
v_v		vertikale Fließgeschwindigkeit
WSP		Wasserspiegel
θ_{10}		Zeit, bei der 10% des Tracers ausgetragen wurde
θ_{50}		Zeit, bei der 50% des Tracers ausgetragen wurde
$\theta_{75} - \theta_{25}$		Differenz als Maß für die Dispersion
θ_{Beginn}		Beginn des Traceraustrages
θ_{Dom}		Austrag der höchsten Tracerkonzentration
θ_{Ende}		Längste Verweilzeit
θ_{Max}		höchst gemessene Tracerkonzentration
Φ	-	dimensionslose durchflussgewichtete Zeit

1 Einleitung

Regenklärbecken werden an wesentlichen Einleitungsstellen in Oberflächen-Fließgewässer aus dem Regenwassernetz der Trennkanalisation angeordnet. Sie dienen der mechanischen Reinigung des Zuflusses von absetzbaren und schwimmfähigen Stoffen. Das gereinigte Regenwasser schlagen sie über den Klärüberlauf in ein Gewässer ab. Wird ein bestimmter Bemessungszufluss überschritten, soll der überschreitende Zufluss über einen in der Regel vorgeschalteten Beckenüberlauf unter Umgehung des Klärbeckens ohne Reinigung in das Gewässer abgeschlagen werden. Durch die Entlastung der Becken entsteht somit eine Emission ins Gewässer, die sowohl hydraulisch als auch stofflich eine erhebliche Belastung des Gewässers darstellt (vgl. Niemann [2001]). Der Schwerpunkt in diesem Vorhaben liegt auf der Klärwirkung in Bezug auf (durch Schwerkraftwirkung) absetzbare, feinputikuläre Substanzen. Hier sind vor allem die feinen, mineralischen Fraktionen mit einem Durchmesser kleiner $63\ \mu\text{m}$ (AFS_{63}) von Bedeutung, denn diese binden aufgrund ihrer proportional zum Durchmesser großen Oberfläche einen Großteil der Schadstoffe, insbesondere Schwermetalle, an sich und stellen somit eine erhebliche Belastung für Gewässer dar (z.B. Boller et al. [2005]).

Bisherige und laufende Forschungsvorhaben (u.a. Uhl et al. [2012]; Uhl et al. [2013]) zeigen, dass bestehende Regenklärbecken oftmals nur einen unzureichenden Rückhalt von feinputikulären Substanzen und den daran gebundenen Schadstoffen aufweisen. Deshalb stellt sich die Frage, ob die Funktionsweise 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 (Hazen, A. [1904])) belegen, dass ein Sedimentationsbecken, welches mit den in DWA-A 166 definierten Verhältnissen von Länge, Breite und Tiefe konzipiert wird, in der Lage ist, Partikel mit einer Dichte von $2650\ \text{kg/m}^3$ und einem Durchmesser von $63\ \mu\text{m}$ vollständig im Becken zurückzuhalten, sofern eine Oberflächenbeschickung von $10\ \text{m/h}$ 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 folglich inaktives Beckenvolumen vorhanden ist. Dies ist insbesondere auf zwei wesentliche Ursachen zurückzuführen:

Zum einen ergeben sich Einschränkungen im Rückhalt von Feststoffen durch die vorhandenen Abmessungsverhältnisse der Becken, denn lediglich etwa 40 % der Regenbecken erfüllen die

Anforderungen nach DWA-A 166 (Fuchs et al. [2016]). Die geometrischen Grenzwerte resultieren nach Untersuchungen von Muth (Muth, W. [1992]) vor allem aus dem Strahlausbreitungswinkel. Bei Einhaltung dieser Grenzwerte stellt sich eine gleichmäßige Strahlausbreitung sowie ein gleichförmiger und richtungsstabiler Abfluss ein.

Zum anderen ergeben sich nach Untersuchungen von Adamsson et al. [2003], Dufresne et al. [2009] und Kahn et al. [2013] Einschränkungen durch die Zulaufgestaltung der Becken. Die bestehenden Zulaufgestaltungen behindern zumeist eine gleichförmige Geschwindigkeitsverteilung und damit den Rückhalt von feinstpartikulären Substanzen und den daran gebundenen Schadstoffen. Auch die nach DWA-A 166 definierte maximale horizontale Fließgeschwindigkeit (v_h) von 0,05 m/s wird durch ungünstige Zulaufgestaltungen oftmals deutlich überschritten.

Angesichts des Klimawandels und der damit zu erwartenden verstärkten Belastung des Kanalnetzes sowie den Anforderungen der WRRL werden Regenbecken auch zukünftig ein zentrales Element der Niederschlagswasserbehandlung sein. Darüber hinaus ist der Bestand an Regenbecken weiterhin zu unterhalten.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus diesem Forschungsvorhaben soll die Sedimentation in Regenklärbecken und damit der Rückhalt feinpartikulärer und feinpartikulär gebundener Stoffe verbessert und damit ein entscheidender Beitrag zum Gewässerschutz geleistet werden.

Das Forschungsvorhaben setzt sich aus drei aufeinander aufbauenden Untersuchungs-Phasen zusammen:

In **Phase 1** wird das Optimierungspotenzial bestehender, rechteckiger Regenklärbecken anhand der Analyse der vorliegenden Durchströmungscharakteristik aufgezeigt. Auf dieser Basis werden unterschiedliche Optimierungsmaßnahmen als einfache und kostengünstig nachrüstbare Bauteile entwickelt und deren Wirksamkeit mit Hilfe von Strömungs-Indikatoren bewertet. Hierzu werden die Regenklärbecken in sog. Funktionskomponenten (Einlaufbauwerk, die Sedimentationskammer mit Schlammraum und der Klärüberlauf) eingeteilt. Um den Bestand an rechteckigen Regenklärbecken und somit das Optimierungspotenzial des Bestandes repräsentativ darzustellen, wird eine Bestandserhebung von Regenklärbecken und deren Funktionskomponenten durchgeführt. Hierdurch soll sichergestellt sein, dass diese Optimierungsmaßnahmen für besonders häufige und damit praxisrelevante Beckenvarianten entwickelt werden. Die Optimierungsmaßnahmen werden anhand von numerischen Simulationsstudien entwickelt. Das hierzu verwendete numerische Modell wird in einem ersten Schritt

anhand von physikalischen Modellversuchen an einem skalierten Modell eines Regenklärbeckens validiert.

In **Phase 2** soll jeweils für ein rundes sowie ein rechteckiges Regenklärbecken eine Musterkonfiguration für den Neubau von Regenbecken einschließlich Grenzwerten und Diagrammen erarbeitet werden. Es soll auf diese Weise ein Werkzeug/Katalog sowohl für Planer als auch Genehmigungsbehörden zur Verfügung gestellt werden, welches eine zuverlässige Auslegung der zur Genehmigung vorgelegten Abscheideanlagen ermöglicht. Der für nicht regelwerkskonforme bzw. nicht optimal durchströmte Bestandsbecken entwickelte Katalog mit Ertüchtigungsmaßnahmen soll ebenfalls auf neu zu bauende Becken anwendbar sein, die nicht die hier definierten Grenzwerte einhalten.

In **Phase 3** werden Konstruktionshinweise und Bemessungsgrundlagen für Sedimentationsanlagen entwickelt, die einer zweiten Reinigungsstufe (z.B. technischer Filter, Retentionsbodenfilter) vorgeschaltet werden können. Spezifisch für unterschiedliche Filtertypen sollen gezielt solche Feststoffgrößenklassen in der Vorstufe zurückgehalten werden, welche die Leistungsfähigkeit des Filters negativ beeinträchtigen können.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Forschungsergebnisse der Phase 1 „Ertüchtigung des Bestandes“.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Untersuchung der Durchströmung von Sedimentationsbecken kann im numerischen Modell, im physikalischen Modell oder aber in-Situ erfolgen. Jede Methode hat Vor- und Nachteile. In der Praxis werden diese Modelle oftmals in Kombination angewandt.

Eine Möglichkeit zur integralen Bestimmung der Durchströmung von Sedimentationsbecken ist von Werner/Kadlec [1996] entwickelt worden. Bei der Untersuchung von Regenbecken mittels Tracerversuchen und der anschließenden Bestimmung der Verweilzeitverteilung wird dem System im Zulauf ein Tracer zugegeben, der im Ablauf durch ein entsprechendes Messgerät detektiert wird. Untersuchungen an zwei in-Situ Regenbecken mit dieser Methode wurden von Maus C./Uhl M. [2009] durchgeführt. Sie haben erfolgreich die Leistung bestehender Regenbecken mit dem Verfahren bestimmt. Weitere Untersuchungen mit Tracern sind unter anderem durch Stamou [2008] erfolgt. Stamou [2008] hat von neun sanierungsbedürftigen Wasseraufbereitungsbecken der Athener Trinkwasserversorgung je ein numerisches Modell erstellt. In jedem Becken wurde numerisch für den Ist- Zustand die Verweilzeitverteilung nach Stamou/Noutsopoulos [1994] ermittelt und ausgewertet. Im Anschluss daran wurde jedes Becken im numerischen Modell optimiert (z.B. durch Leitwände), in denen dann wiederum die

Verweilzeitverteilung ermittelt wurde. Der Vergleich der Strömungsindikatoren, die u.a. Rückschlüsse auf Kurzschlussströmungen zulassen, zeigt auf, dass die Optimierung erfolgreich war und die Leistungsfähigkeit der Becken erheblich gestiegen ist. Die 3D- Simulationen wurden unter zur Hilfenahme des k- ϵ Turbulenzmodells durchgeführt. Das k- ϵ Turbulenzmodell ist für die Anwendung in freien, hochturbulenten Strömungen sowie für strömungstechnisch einfache Strömungen (z.B. keine Sekundärströmungen) entwickelt worden. Es gibt mehrere Erweiterungen des Standard k- ϵ Modells mit jeweils unterschiedlichen Anwendungsbereichen.

Stovin/Saul [1996] erarbeiten in Ihrer Studie zwei unterschiedliche Methoden, um das Sedimentationsverhalten in Absetzbecken anhand von Strömungsfeldern, die durch CFD generiert werden, abzuschätzen. Die erste Methode nutzt die Schubspannungsverteilung auf der Sohle. Es wird angenommen, dass in Bereichen, in denen eine definierte kritische Schubspannung unterschritten wird, Partikel sedimentieren. Die kritische Schubspannung wurde durch Laborversuche mit Olivenkernen als zu untersuchendes Substrat ermittelt und liegt bei 0,04 N/m². In der zweiten Methode wird das Absetzverhalten eines Beckens durch das Partikel-Tracking in FLUENT (Discrete Phase Model, DPM) beschrieben. Die Ergebnisse beider Methoden werden mit Messergebnissen aus Laborversuchen verglichen. Beide Methoden weisen darauf hin, dass das Verhältnis der Länge zur Breite eines Beckens Einfluss auf das Durchströmungsverhalten und somit auf den Absetzwirkungsgrad hat. Die Untersuchungen zeigen weiterhin, dass auch die Geschwindigkeitsverteilung im Becken einen wesentlichen Einfluss auf das Sedimentationsverhalten hat. Diese Erkenntnisse werden in der Veröffentlichung von Stovin/Saul [2000] noch einmal aufgegriffen. Ein Zusammenhang zwischen Beckendurchströmung und dem Absetzverhalten ist gegeben. Partikel sedimentieren in Bereichen mit geringen Fließgeschwindigkeiten. Die Autoren kommen auch zu der Erkenntnis, dass für die Abbildung von komplexen Strömungen, Asymmetrien und Rezirkulationen in einem Becken eine dreidimensionale Strömungssimulation notwendig ist.

Yoon/Lee [2000] haben Untersuchungen an einem physikalischen Modell eines rechteckigen Absetzbeckens mit zwei Ausläufen durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war unter anderem die Bestimmung der optimalen Position einer Prallplatte durch Tracerversuche mit Farbtracern. Nach Yoon/Lee [2000] wirkt sich die Positionierung der Prallplatte und des Ablaufes wesentlich auf die Leistung des Absetzbeckens aus.

Adamsson [2004] beschäftigt sich in seiner Dissertation, die aus sechs Veröffentlichungen besteht (Adamsson et al. [1999], Adamsson et al. [2002a], Adamsson et al. [2002b], Adamsson/Bergdahl [2003], Adamsson/Bergdahl [2004], Adamsson/Bergdahl [2006]), mit der Durchströmung von Rechteckbecken. Dazu werden das Durchströmungsverhalten, die Verweilzeit sowie das Sedimentationsverhalten im physikalischen und numerischen Modell untersucht. In

seiner Arbeit vergleicht Adamsson die Ergebnisse aus den Modellversuchen mit den Ergebnissen der Simulationsstudien.

Adamsson [2004] kommt zu der Erkenntnis, dass bei hohen Zuflussgeschwindigkeiten gute Übereinstimmungen der Ergebnisse in Bezug auf das Strömungsbild, die Verweilzeit und den Sedimenttransport erreicht werden können. Bei niedrigen Zuflüssen sind die Übereinstimmungen aus der physikalischen und numerischen Modellierung deutlich geringer. In der beschriebenen Dissertation werden auch Tracerversuche simuliert. Generell werden hierbei gute Übereinstimmungen mit den Messungen im physikalischen Modell erzielt. Allerdings verursachen auch hier die geringen Durchflüsse sowohl in der Simulation als auch im physikalischen Modell Probleme. Als Begründung für diese Diskrepanzen werden mögliche Fehler und Grenzen in den Modellierungsansätzen für Messung und Simulation genannt.

Grotehusmann et al. [2007] haben mit Hilfe von dreidimensionalen Simulationsrechnungen der Strömungs- und Sedimentationsprozesse in Absetzbecken eine optimierte Zulaufkonstruktion erarbeitet. Das Modellbecken ist nach den „Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten“, RiStWag dimensioniert worden und ist für Dauerstau ausgelegt. Als Zufluss zum Becken wurde ein real gemessenes Niederschlagsereignis gewählt, die maximale Oberflächenbeschickung beträgt 9 m/h. Für die Neuplanung von Becken hat sich als beste Lösung die Aufteilung des Zuflusses auf zwei Zulaufrohre, die unterhalb des Dauerwasserspiegels in das Becken münden, herausgestellt. Dadurch können vor allem die Zuströmgeschwindigkeiten verringert werden. Die Zulaufrohre sollten knapp unterhalb des Dauerwasserspiegels angeordnet werden, wodurch vertikale Strömungen vermieden werden können. Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass der Schlammammelraum eher ungünstige Auswirkungen auf die Durchströmung des Beckens hat. Für die Ertüchtigung von Bestandsbecken hat der Einsatz von Tauchwänden strömungsgünstige Wirkungen erzielt.

In Goula et al. [2008] wird eine Studie vorgestellt, in der der Einfluss einer Leitwand im Einlaufbereich eines Nachklärbeckens auf den Absetzwirkungsgrad mittels CFD untersucht wird. Zum einen stellen die Autoren fest, dass CFD als geeignetes Werkzeug zur Analyse von Vorgängen in Absetzbecken angesehen werden kann. Zum anderen wird festgestellt, dass sich der Einsatz einer Prallplatte hinter dem Einlauf positiv auf den Absetzwirkungsgrad auswirkt.

López et al. [2008] haben das hydraulische Verhalten eines Sedimentationsbeckens bei wechselnden Zuflüssen untersucht. Die Untersuchung erfolgte für drei unterschiedliche Zuflüsse mit je vier unterschiedlichen Zulaufbereichen sowohl qualitativ mittels Farbtracer als auch quantitativ mit Hilfe eines Salztracers. Der Tracer ist jeweils impulsartig im Zulauf des Beckens injiziert worden. Im Rahmen der qualitativen Bewertung des Systems wurde beobachtet, dass für

den hohen Durchfluss relativ ähnliche Strukturen für alle Zulaufarten auftreten, während bei geringeren Durchflüssen teilweise starke Unterschiede zwischen den einzelnen Zulaufarten auftreten. Die quantitativen Untersuchungen mit Salztracer ergaben, dass die mittlere Verweilzeit geringer ist, als die einer idealen Pfropfenströmung. Dieses Phänomen, das auf Rezirkulationszonen im Becken rückschließen lässt, nahm mit zunehmendem Durchfluss zu. Daher wird das Beckenvolumen mit zunehmendem Zufluss immer schlechter ausgenutzt. He/Marsalek [2009] führen eine hydraulische Optimierung eines Absetzbeckens im Mischwassersystem mittels numerischer und physikalischer Modellierung durch. Das physikalische Modell hat den Maßstab 1:11,6. Die Zuflüsse < 30 l/s werden mit einem Thomsonwehr dimensioniert. Zuflüsse > 30 l/s werden über ein magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) bereitgestellt. Für das numerische Modell wurde die Software STAR-CD verwendet. Es wurde das VOF-Modell zur Identifikation des freien Wasserspiegels eingesetzt. Das numerische Modell wurde durch die Messungen am physikalischen Modell validiert. Es wurden zwei konstruktiv unterschiedliche Varianten, bezüglich der Einlaufgestaltung untersucht.

Die Autoren haben festgestellt, dass die Einlaufgestaltung einen wesentlichen Einfluss auf die Durchströmung des Beckens hat. Für das erste Szenario (Bild 3.1) wurde der Einlauf an eine andere Position verlegt. Es konnte festgestellt werden, dass durch den Einsatz von Leitwänden die Strömung besser kontrolliert werden kann. Des Weiteren wurde erkannt, dass die Aufenthaltszeit durch eine bessere Beckenausnutzung erhöht wird.

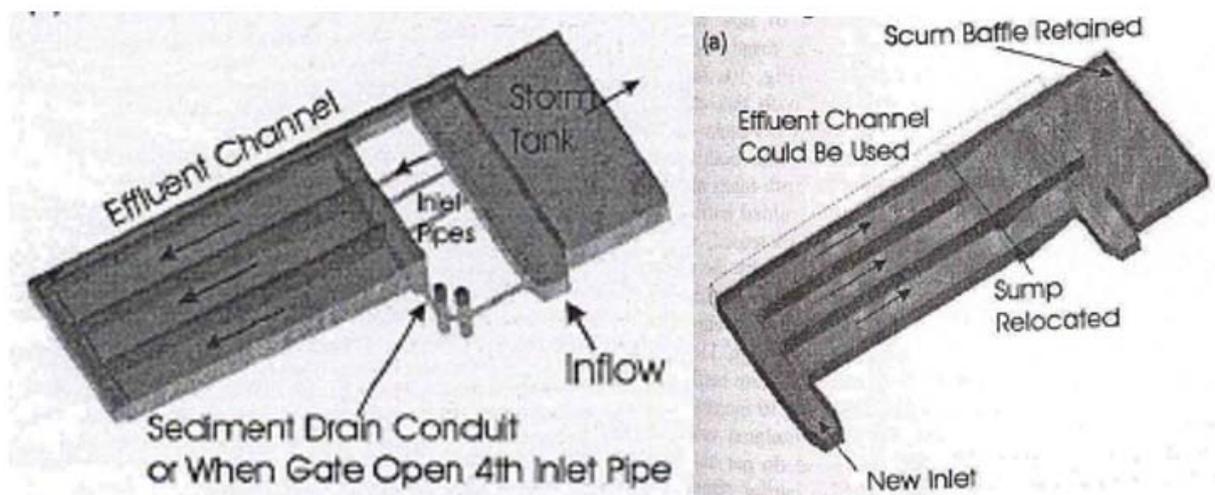


Bild 3.1: Beckengeometrie; links: Grundvariante; rechts: Szenario 1 (vgl. He/Marsalek [2009])

In Szenario 2 wurde der bestehende Einlauf konstruktiv umgestaltet (Bild 3.2). Hier sind die Kosten für die Umgestaltung wesentlich geringer, da kein neuer Einlaufbereich gebaut werden muss, sondern der bestehende Einlauf nur umgestaltet wird. Allerdings wird auch gesagt, dass

die Durchströmung beider Szenarien durch den gezielten Einbau von Leitblechen noch verbessert werden kann.



Bild 3.2: Beckengeometrie Szenario 2 (vgl. He/Marsalek [2009])

Akan [2010] präsentiert in seinem Artikel Entwurfshilfen für den Neubau von Rückhaltebecken und für die Bewertung von Bestandsbecken hinsichtlich ihres Wirkungsgrades. Dazu hat Akan Diagramme entwickelt, die auf Grundlage verschiedener Faktoren die Abscheideeffizienz angeben.

In Jamshidnia/Firoozabadi [2010] wurden experimentelle Untersuchungen zur strömungstechnischen Wirkung von Leitwänden in Vorklärbecken durchgeführt. Das physikalische Modell besteht aus einem rechteckigen, offenen Gerinne. Der Klärüberlauf ist als scharfkantiger Wehrüberfall ausgebildet. Die Fließgeschwindigkeiten werden mit dem *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) gemessen, dieses ist in der Lage auch dreidimensionale Geschwindigkeitsfelder aufzunehmen. Die Experimente wurden für zwei unterschiedliche Durchflüsse durchgeführt ($Q = 42 \text{ l/min}$ und $Q = 21 \text{ l/min}$). Für jeden Durchfluss wurden zwei unterschiedliche Positionen der Leitwand untersucht. Die erste Position befindet sich unmittelbar im Unterstrom des Zulaufes, die zweite Position in etwa der Beckenmitte. Die Höhe der Leitwand beträgt ein Viertel der Wassertiefe. Die Autoren stellen anhand der Untersuchungen fest, dass im Einlaufbereich aufgrund der negativ auftretenden u -Geschwindigkeiten ein Wirbel induziert wird. Je höher die Reynolds-Zahl, desto größer ist dieser Wirbel. Die Ausdehnung der im Unterstrom der Leitwand entstehenden Rezirkulationszone hängt stark vom Durchfluss ab. Die Rezirkulation beeinflusst die Ausbildung des Geschwindigkeitsprofils und hat somit starken Einfluss auf die Durchströmung des Beckens. Leitwände können die Voraussetzung zur Sedimentation von Partikeln durch die Beeinflussung der Geschwindigkeitsprofile verbessert. Die Positionierung der Leitwand in Beckenmitte kann die Durchströmung im Unterstrom durch die Beeinflussung des Geschwindigkeitsgradienten im Sohlbereich verbessern. Die Positionierung einer Leitwand im Einlaufbereich kann bei geringen Reynolds-Zahlen günstig sein, allerdings weisen hier die Autoren daraufhin, dass in diesem Bereich noch weitere Untersuchungen getätigt werden müssen. Oca et al. [2004], Liu et al. [2010], Liu et al. [2013] und Park et al. [2014] haben

sich ebenfalls mit der Optimierung von Vorklärbecken mittels des Einsatzes von Leitwänden beschäftigt.

Asgharzadeh et al. [2011] haben experimentelle Untersuchungen zur Optimierung von Regenbecken mittels Leitwänden durchgeführt. Dazu wurden im Experiment die Einflüsse von unterschiedlich positionierten Leitwänden auf die Fließgeschwindigkeit und Sedimentkonzentration untersucht. Das untersuchte Becken besitzt einen tiefliegenden Zulauf. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die Höhe und Position der Leitwand u.a. von der Zulaufkonzentration abhängig ist. Zudem sagen die Autoren, dass durch zwei hintereinander angeordnete Leitwände mit derselben Höhe ein Totkörper zwischen den beiden Leitwänden erzeugt wird. Zwei hintereinander angeordnete Leitwände, wobei die vordere eine geringere Höhe als die hintere besitzt, stellt die ungünstigste Kombination dar, weil durch diese Anordnung eine Jet-Wirkung erzeugt und so die Remobilisierung von bereits abgelagertem Sediment gefördert wird.

Bajcar et al. [2011] haben zwei runde Absetzbecken untersucht, die sich nur in ihrer Zu- und Ablaufkonstruktion unterscheiden. Ziel der Untersuchung ist es, den Einfluss der Durchströmung auf die Sedimentationswirkung der Absetzbecken zu ermitteln. Als Modellsubstrat sind Nusschalen verwendet worden, die zu 0,25 mm großen Partikeln zerkleinert wurden. Das Modellsubstrat ist ebenfalls als Tracer zur Beurteilung der Durchströmung eingesetzt worden, die mittels computer-unterstützter Visualisierung sowohl qualitativ, als auch quantitativ erfolgte. Die Untersuchung zeigt, dass es vorteilhaft sein kann, nicht nur Tracer einzusetzen, die die gleiche Dichte wie Wasser aufweisen, da durch diese nicht der Einfluss der Partikel auf die Strömung berücksichtigt wird.

Dufresne et al. [2011] haben numerische Untersuchungen zum Durchströmungsverhalten von rechteckigen Regenklärbecken durchgeführt. Bei ihren Untersuchungen haben Sie herausgefunden, dass die Abmessungsverhältnisse B/L einen wesentlichen Einfluss auf die Durchströmung besitzen. Auch die Anordnung des Einlaufs (symmetrisch oder asymmetrisch) hat einen großen Einfluss auf das Durchströmungsverhalten von Absetzbecken. Dass das Einlaufbauwerk einen erheblichen Einfluss auf die Durchströmung eines Beckens hat, haben auch Camnasio et al. [2013] herausgefunden. Sie haben experimentelle und numerische Untersuchungen zur Durchströmung und Sedimentation in Rechteckbecken mit unterschiedlichen, asymmetrischen Einlauf- und Auslaufkonfigurationen durchgeführt. Die Autoren konnten auch einen Einfluss der Auslaufgestaltung auf das Durchströmungsverhalten festgestellt, wobei der Einfluss des Einlaufs deutlich stärker ist.

Rostami et al. [2011] untersuchen mit Hilfe von numerischen Simulationen den Einfluss der Einlaufgestaltung von Absetzbecken auf die Durchströmung. In Bild 3.3 sind die untersuchten Einläufe schematisch abgebildet. Für die Umsetzung der numerischen Simulationen wurde

das Programm FLOW-3D verwendet. Der freie Wasserspiegel wurde mittels der VOF-Methode simuliert. Als Turbulenzmodell wurde das k- ϵ RNG-Turbulenzmodell verwendet. Die Öffnungshöhe des Einlaufes beträgt 0,1 m bei einer Einlauföffnung, 0,05 m bei zwei Einlauföffnungen und 0,04 m, 0,06 m und 0,04 m bei drei Einlauföffnungen.

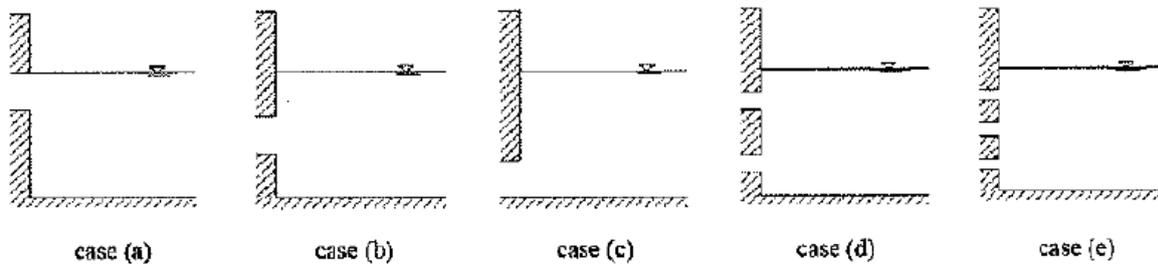


Bild 3.3: Untersuchte Einlaufkonfigurationen (vgl. Rostami et al. [2011])

Die Einlaufkonfigurationen mit nur einer Einlauföffnung (Einlauf a, b und c) haben im Vergleich zu den Einläufen mit zwei oder drei Einlauföffnungen (Einlauf d und e) weit ausgedehnte Rezirkulationszonen, wobei der auf die Höhe bezogen mittig liegende Einlauf zwei kleinere, getrennt voneinander liegende Rezirkulationen verursacht. Auch die Stromlinien verlaufen bei den Einlaufkonfigurationen mit mehreren Einlauföffnungen deutlich früher parallel als bei nur einer Einlauföffnung. Diese Erkenntnisse werden durch die Geschwindigkeitsprofile untermauert. Denn bei den Einläufen d und e sind die Profile deutlich gleichmäßiger und beinhalten geringe Maximalgeschwindigkeiten (siehe Bild 3.4). Die Form und Art der Einlaufgestaltung hat ebenfalls Einfluss auf die eingetragene kinetische Energie. So ist diese bei Zulaufen mit mehreren Zulauföffnungen deutlich geringer als bei Einläufen mit nur einer Einlauföffnung. Bei Einläufen mit einer Einlauföffnung trägt der mittig liegende Einlauf (Einlauf b) am wenigsten kinetische Energie in das Becken ein. Laut den Autoren sind mehrere Einlauföffnungen strömungstechnisch günstiger als nur eine Einlauföffnung. Bei den einzelnen Einlauföffnungen ist die mittig liegende den hochliegenden und tiefliegenden Positionen zu bevorzugen.

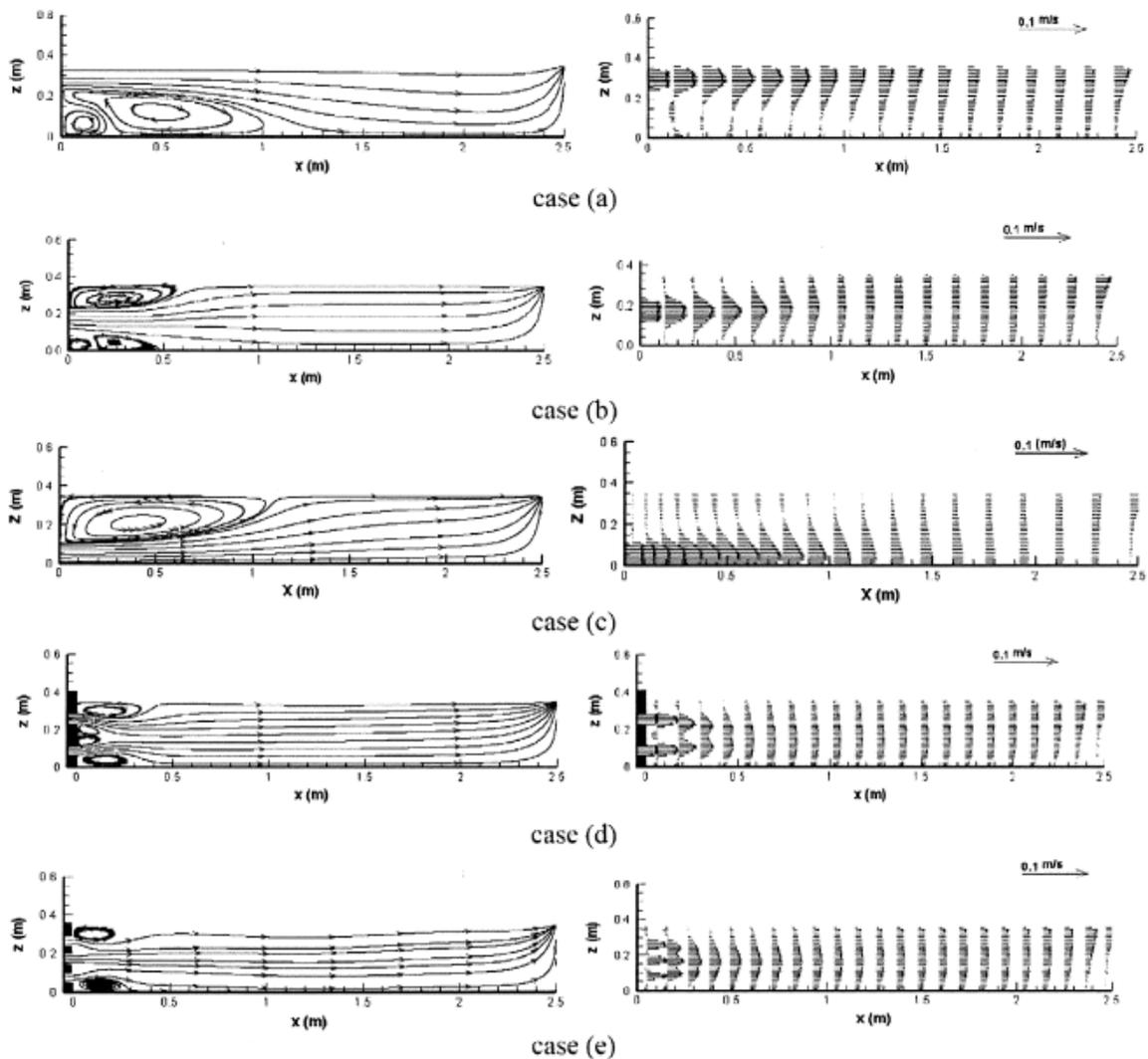


Bild 3.4: Stromlinien und u -Geschwindigkeiten der untersuchten Einlaufkonfigurationen (vgl. Rostami et al. [2011])

Razmi et al. [2013] haben physikalische und numerische Untersuchungen zu Einflüssen von Leitwänden in Absetzbecken durchgeführt. Die Autoren erkennen, dass nur bestimmte Leitwand-Positionen zu einer Verbesserung der Durchströmung führen, bei einer ungünstigen Anordnung einer Leitwand werden keine Verbesserungen erreicht. Sollte eine Optimierung mittels Leitwänden erfolgen, liegt die optimale Abmessung der Höhe bei 25 – 30 % der Wassertiefe. Die optimale Position befindet sich bei einem Abstand von $s/L = 0,15$. Die Höhe der Leitwand ist bei $h_0/H = 0,32$ optimal. In dieser Position konnten etwa 90 % der Partikel zurückgehalten werden. Des Weiteren gilt, dass die Leitwand nahe des Einlaufes positioniert werden sollte.

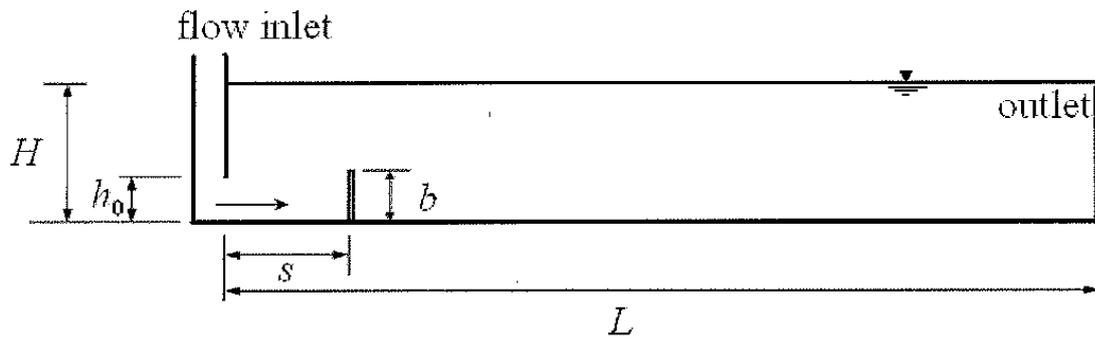


Bild 3.5: Geometrie des Modells (vgl. Razmi et al. [2013])

Marlow et al. [2014] haben die Strömungsvorgänge in einem Regenklärbecken im Dauerstau mit gängiger Geometrie parallel in einem physikalischen und einem 3D numerischen Modell untersucht. Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines abgesicherten numerischen Modells, das die komplizierten Strömungsvorgänge in Regenklärbecken unter Berücksichtigung instationärer Phänomene abbildet. Anhand des Modells sollten genauere Einblicke in die Strömungsvorgänge gewonnen werden und dadurch Ansätze zur Optimierungen bezüglich der Reinigungsleistung abgeleitet werden.

Im numerischen Modell wird die freie Wasseroberfläche als reibungsfreie feste Wand simuliert. Zur Simulation der Turbulenz werden zum einen gängige Wirbelviskositätsmodelle verwendet, zum anderen wird das SAS-Modell verwendet. Bei SAS-Modellen werden größere turbulente Strukturen, die vom verwendeten Rechengitter aufgelöst werden, direkt simuliert und nur kleine Strukturen, die nicht durch das Gitternetz erfasst werden, durch Turbulenzmodelle modelliert.

Die Autoren stellen fest, dass eine genaue Abbildung der Einlauftrandbedingung von entscheidender Bedeutung für die Reproduktion der Strömung im Becken ist. Des Weiteren stellen Sie fest, dass turbulente Fluktuationen (Schwankungen) nur durch das SAS-Modell abgebildet werden können, nicht jedoch durch die Wirbelviskositätsmodelle. Die genaue Abbildung der Turbulenz ist von Bedeutung, da diese Auswirkungen auf die Feststofftransportprozesse hat. Zum einen führt Turbulenz zu einer Durchmischung, was das Absetzverhalten beeinflusst, zum anderen können turbulente Geschwindigkeitsspitzen zur Remobilisierung von bereits abgelagerten Partikeln führen, die allein durch die mittlere Strömung nicht remobilisiert würden. Es konnten zwei wesentliche Schlüsse zur Anlagenoptimierung abgeleitet werden: Die Beckendurchströmung kann durch eine gezielte Anpassung des Zuleitungssystems positiv beeinflusst werden. Des Weiteren können Turbulenzen und deren unerwünschte Auswirkungen auf das Sedimentationsverhalten durch eine strömungsoptimierte Gestaltung des Einlaufbereichs reduziert werden.

Folgende Veröffentlichungen behandeln ebenfalls die Durchströmungscharakteristik von Absetzbecken und beschreiben interessante Ansätze sowie Vorgehensweisen für dessen Analyse und Optimierung: Chen et al. [2013], Dewals et al. [2008], Hadi/Kris [2009], Han/Mun [2007], He et al. [2008], Hsu et al. [2008], Huang et al. [2008], Jayanti/Narayanan [2004], Kris/Hadi [2010], Liu/Garcia [2011], Park et al. [2006], Shahrokhi et al. [2013], Tamayol et al. [2008], Tamayol et al. [2010], Wang et al. [2010], Xanthos et al. [2011]. An dieser Stelle werden die aufgeführten Veröffentlichungen allerdings nicht näher beschrieben, da sie keine wesentlich neuen Erkenntnisse enthalten, die für diese Arbeit relevant sind.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle gesagt werden, dass bereits diverse Untersuchungen zur Durchströmung von Absetzbecken durchgeführt wurden. Anhand der Geschwindigkeitsverteilung können Rückschlüsse auf das Sedimentationsverhalten gewonnen werden, da Fließgeschwindigkeiten den Sedimentationsprozess maßgeblich beeinflussen. Des Weiteren wurde bereits erkannt, dass die Gestaltung des Einlaufbauwerks Einfluss auf die Durchströmung des Beckens besitzt. Hier hat sich beispielsweise gezeigt, dass die Verteilung des Zuflusses auf mehrere Zuflussöffnungen zu kleineren Rezirkulationen und zu einer früheren parallelen Ausrichtung der Stromlinien führt. Außerdem wurde nachgewiesen, dass das Verhältnis von Länge zu Breite Auswirkungen auf das Absetzverhalten von Becken hat. Da viele Bestandsbecken diese Abmessungen jedoch nicht einhalten, ist bei diesen Becken mit einem Defizit zu rechnen. Des Weiteren wurden bereits Untersuchungen zur strömungstechnischen Wirkung von Leitwänden durchgeführt. Allerdings wurde hier nur die generelle Wirkung von Leitwänden untersucht.

Aus den oben beschriebenen Veröffentlichungen kann folgender Handlungsbedarf abgeleitet werden: Bisher wurden noch keine konkreten Studien (Detailbetrachtungen) zu optimalen Abmessungen und Positionen von Leitwänden durchgeführt. Zudem wurden andere Bauteile zur Optimierungen wie Lamellenwände oder Reflektoren bisher nicht näher untersucht. Des Weiteren besteht Handlungsbedarf in der strömungstechnischen Untersuchung und Optimierung von seitlichen Einläufe (transversaler Einlauf).

Die vorliegende Arbeit baut auf den bisherigen Erkenntnissen zur Durchströmung und zum Absetzverhalten von Regenbecken auf, weitergehend werden konkrete Bauteile zur Optimierung von Regenbecken anhand von numerischen Simulationen im Detail untersucht.

4 Material und Methoden

4.1 Bildung von Klassen repräsentativer Becken-Funktions-Komponenten

Um eine fundierte Beurteilung der Becken zu gewährleisten, sind die Becken in Funktionskomponenten unterteilt worden. Somit ist gewährleistet, dass die Einflüsse jeder einzelnen Beckenkomponente eindeutig identifiziert werden können und sich nicht mit denen anderer Komponenten überlagern. Die **Komponenten eines Regenklärbeckens** sind das Einlaufbauwerk, die Sedimentationskammer mit Schlammraum und der Klärüberlauf. In Bild 4.1 ist eine Schemaskizze eines Beckens dargestellt, anhand derer die Aufteilung in Funktionskomponenten aufgezeigt wird.

Die grundsätzliche **Funktion des Einlaufbauwerkes** ist es, das dem Becken zufließende Wasser gleichmäßig auf den gesamten Beckenquerschnitt zu verteilen. Es umfasst den gesamten Einlaufbereich des Beckens, beginnend am Übergang zwischen Kanal und Becken und endet hinter dem Pumpensumpf bzw. hinter dem installierten Einbau zur Optimierung. Der Bereich, in dem das zufließende Wasser gleichmäßig auf den gesamten Beckenquerschnitt aufgeteilt werden soll, sollte möglichst kurz sein, damit möglichst viel Volumen des Beckens als Sedimentationskammer zur Verfügung steht.

In Fließrichtung unterhalb des Einlaufbauwerkes schließt die **Sedimentationskammer** an. Diese soll idealerweise pfropfenartig durchströmt werden, d.h. dass über den gesamten Fließquerschnitt die gleiche, rechnerisch kleinstmögliche, mittlere Fließgeschwindigkeit vorzufinden ist, nur durch den Wandeinfluss sind die Geschwindigkeiten in Wandnähe aufgrund der Rauheit etwas geringer.

Zwischen Beckensohle und Sedimentationskammer befindet sich der **Schlammraum**, in dem sich alle partikulären Inhaltsstoffe aus dem Niederschlagswasser akkumulieren sollen. Um eine Remobilisierung von bereits abgelagertem Material zu verhindern, sollte dieser Bereich möglichst nicht durchströmt werden. Die Mindesthöhe des Schlammraumes hängt von der zu erwartenden Feststoffbelastung des Beckens ab und variiert in Abhängigkeit des Beckens und des Einzugsgebietes.

Der **Klärüberlauf** schließt sich wiederum der Sedimentationskammer an. Beginnend an der Kontrollfläche zwischen Klärüberlauf und Sedimentationskammer wird die vorliegende Pfropfenströmung wieder eingeschnürt und verlässt über das Wehr das Becken. Das dem Klärüberlauf zugeordnete Volumen sollte, analog zum Einlaufbauwerk, ebenfalls möglichst gering sein.

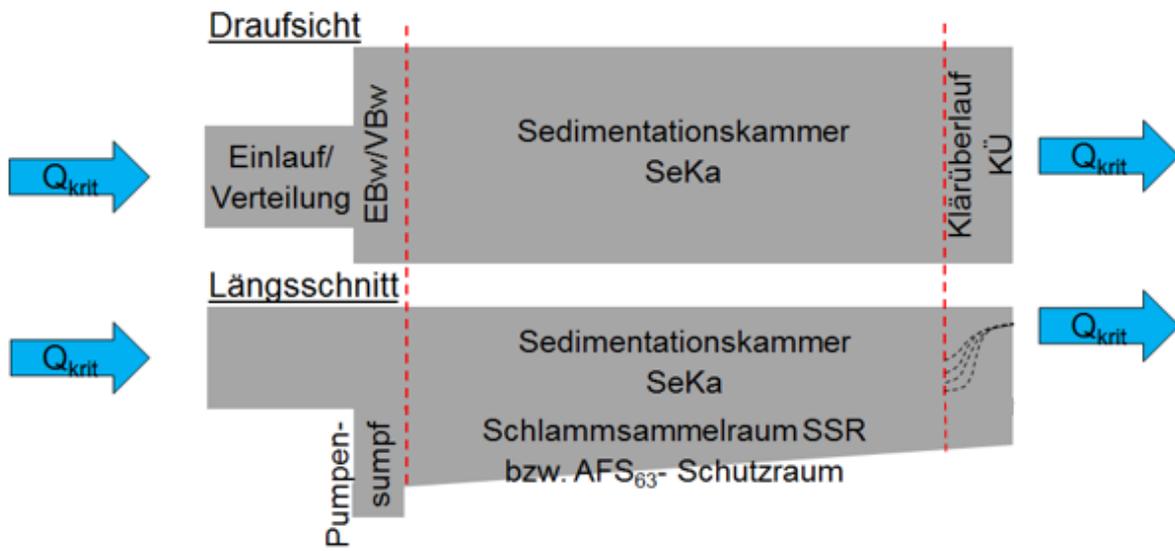


Bild 4.1: Schema Beckenaufteilung in Funktionskomponenten

4.2 Erhebung repräsentativer Becken-Funktions-Komponenten

Zur Erhebung repräsentativer Becken-Funktions-Komponenten wurde der Datenbestand (anonymisiert) der unteren Wasserbehörde Borken über rechteckige Regenklärbecken in Massivbauweise im Kreis Borken herangezogen. Anhand von Bestandsplänen sind die Funktionskomponenten (vgl. Kapitel 4.1) von 18 Becken analysiert worden. Zusätzlich wurden sechs Becken aus dem Projekt REFENI (vgl. Uhl et al. [2012]) hinzugezogen.

In den folgenden Kapiteln wird die Erhebung und Kategorisierung der einzelnen Funktionskomponenten der Becken vorgestellt. Innerhalb einer Funktionskomponente werden weitere Kategorien definiert. In den entsprechenden Tabellen sind jeweils Skizzen der Kategorien sowie die Anzahl der in die Kategorie fallenden Komponenten der erhobenen Becken dargestellt. Die Grundgesamtheit der zugeordneten Becken je Funktionskomponente ist unterschiedlich, da nicht für jedes Becken die benötigten Randbedingungen aus den Bestandsdaten bzw. -plänen hervorging.

Die folgende Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die hydraulischen und geometrischen Randbedingungen der berücksichtigten Becken.

Tabelle 4-1: Hydraulische und geometrische Randbedingungen der in der Erhebung berücksichtigten Becken

Beckennr.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Standort													
Beckeneigenschaften													
Oberfläche	[m ²]	153	212.1	25.2	143	27	71	160	126	216	127	122.4	616
mit / ohne Dauerstau	[-]	mD	oD	mD	-	oD	mD	oD	-	mD	mD	-	-
Beckenlänge	[m]	18.00	15.00	7.00	22.00	9.00	15.75	26.40	15.00	18.00	20.25	20.40	28.00
Beckenbreite	[m]	8.50	6.36	3.60	6.50	3.00	4.51	6.08	8.40	12.00	6.25	6.00	22.00
Breite Zulauföffnung	[m]	1.85	1.55	0.95	-	2.75	1.30	2.35	2.90	3.00	1.50	1.60	-
Höhe Kü	[müNN]	44.80	16.32	51.40	27.18	51.35	49.60	36.00	77.16	61.30	42.54	22.86	37.60
Höhe Bü	[müNN]	44.91	16.40	51.45	27.30	51.80	49.70	36.10	77.26	61.39	42.64	22.97	38.70
Höhe Sohle Zulauf	[müNN]	43.68	15.29	49.83	26.45	51.00	48.41	33.69	75.86	59.75	41.63	21.54	37.60
Höhe Beckensohle a	[müNN]	42.65	14.50	49.37	25.28	48.95	47.30	32.95	74.74	59.25	40.29	21.26	35.60
Höhe Beckensohle b	[müNN]	42.95	14.14	49.43	24.87	49.75	47.57	33.40	74.98	59.34	40.65	21.10	35.05
Abstand zur Beckenachse A	[m]	-0.75	-0.60	-0.60	-	-1.25	-0.65	-2.00	-	-2.00	-0.75	-	-
Abstand zur Beckenachse B	[m]	1.10	0.95	0.35	-	1.50	0.65	0.35	-	1.00	0.75	-	-
Sedimentationskammer													
L:B $3 < x < 4,5$	[-]	2.12	2.36	1.94	3.38	3.00	3.49	4.35	1.79	1.50	3.24	3.40	1.27
mittlere Beckentiefe > 2 bezogen auf Kü	[m]	2.00	2.00	2.00	2.11	2.00	2.17	2.83	2.30	2.01	2.07	1.68	2.28
mittlere Beckentiefe > 2 bezogen auf Bü	[m]	2.11	2.08	2.05	2.23	2.45	2.27	2.93	2.40	2.10	2.17	1.79	3.38
Oberflächenbeschickung $q_A < 10$	[m/h]	9.9	5.9	9.3	9.0	-	9.5	6.1	10.2	10.5	9.5	7.8	2.4
hor. Fließgeschwindigkeit $v_H < 0,05$	[m/s]	0.025	0.012	0.009	0.026	-	0.019	0.016	0.018	0.026	0.026	0.026	0.008
abflussrelevantes Einzugsgebiet A_u	[ha]	25.91	10.40	4.35	22.20	-	12.50	18.00	23.76	41.87	22.35	17.66	27.50
kritischer Regenabfluss Q_{krit}	[l/s]	420.35	156.00	65.00	357.00	-	187.50	270.00	356.40	628.05	335.30	264.90	412.50
Volumen auf Kü bezogen	[m ³]	306.0	190.8	50.4	301.0	54.0	153.7	453.1	289.8	433.1	262.0	205.6	1401.4
Volumen auf Bü bezogen	[m ³]	322.8	198.4	51.7	318.2	66.1	160.8	469.1	302.4	452.5	274.6	219.1	2079.0
Mittlere Sohlhöhe	[m]	42.80	14.32	49.40	25.08	49.35	47.44	33.18	74.86	59.30	40.47	21.18	35.33
Aussermittigkeit	[-]	0.02	0.03	-0.03	0.00	0.04	0.00	-0.14	0.00	-0.04	0.00	-	-
Hebelarm	[m]	0.35	0.35	0.25	0	0	0	0.96	0	0.5	0	0	0
relative Höhe des Zulaufes	[-]	0.42	0.47	0.21	0.62	0.67	0.43	0.18	0.42	0.22	0.53	0.20	0.67
Durchflussfläche im Zulauf A_{zu}	[m ²]	2.5	1.7	1.5	0.0	-	2.4	5.0	4.1	4.9	1.5	-	-
Fließgeschwindigkeit im Zulauf v_{zu}	[m/s]	0.17	0.09	0.04	0.00	-	0.00	0.05	0.00	0.13	0.00	-	0.00
Impulskraft F_T	[N]	71.84	14.14	2.75	0.00	-	0.00	14.56	0.00	80.17	0.00	0.00	0.00
Drehimpulskraft M_T	[Nm]	25.14	4.95	0.69	0.00	-	0.00	13.98	0.00	40.09	0.00	0.00	0.00
Leistung P	[W]	12.28	1.28	0.12	0.00	-	0.00	0.79	0.00	10.23	0.00	-	0.00
Leistungsdichte $P_{spez.}$ auf Kü bezogen	[W/m ²]	0.02	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	-	0.00
Leistungsdichte $P_{spez.}$ auf Bü bezogen	[W/m ²]	0.02	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	-	0.00
hü	[m]	0.11	0.08	0.05	0.12	0.45	0.10	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	1.10

Beckennr.		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Beckeneigenschaften													
Oberfläche	[m ²]	77	217	88.8	90	40	48	72.38	132	136.8	91	90	65
mit / ohne Dauerstau	[-]	oD	oD	mD	-	-	oD	oD	mD	mD	mD	-	-
Beckenlänge	[m]	14.00	20.90	17.95	18.00	11.50	12.00	15.40	16.50	22.80	13.00	12.00	13.00
Beckenbreite	[m]	5.50	10.40	4.95	5.00	3.50	4.00	4.70	8.00	6.00	7.00	7.50	5.00
Breite Zulauföffnung	[m]	0.50	1.99	0.00	5.00	2.25	0.80	1.00	0.60	-	-	1.75	2.10
Höhe Kü	[müNN]	35.30	77.98	49.62	19.90	48.65	64.85	101.92	35.17	45.62	44.55	49.33	52.21
Höhe Bü	[müNN]	36.05	78.10	49.70	20.00	48.70	65.35	102.13	-	-	-	49.40	52.30
Höhe Sohle Zulauf	[müNN]	35.30	76.60	48.66	18.40	47.97	64.87	99.80	35.37	45.62	44.83	47.83	50.80
Höhe Beckensohle a	[müNN]	33.50	75.24	46.40	17.65	46.80	62.75	100.04	33.17	43.11	42.35	46.73	49.80
Höhe Beckensohle b	[müNN]	33.25	75.60	46.94	17.90	47.00	62.86	99.80	33.47	42.87	42.55	46.83	50.03
Abstand zur Beckenachse A	[m]	0.35	-1.10	-	-	-1.30	-2.00	-0.50	-	-	-	-0.80	-1.50
Abstand zur Beckenachse B	[m]	0.85	0.80	-	-	0.50	2.00	0.50	-	-	-	0.95	0.60
Sedimentationskammer													
L:B $3 < x > 4,5$	[-]	2.55	2.01	3.63	3.60	3.29	3.00	3.28	2.06	3.80	1.86	1.60	2.60
mittlere Beckentiefe > 2 bezogen auf Kü	[m]	1.93	2.56	2.95	2.13	1.75	2.04	2.00	1.85	2.63	2.10	2.55	2.30
mittlere Beckentiefe > 2 bezogen auf Bü	[m]	2.68	2.68	3.03	2.23	1.80	2.54	2.21	-	-	-	2.62	2.39
Oberflächenbeschickung $q_A < 10$	[m/h]	10.5	9.6	9.6	8.5	9.1	8.7	-	9.3	7.9	9.5	9.8	9.7
hor. Fließgeschwindigkeit $v_H < 0,05$	[m/s]	0.021	0.022	0.016	0.020	0.017	0.014	-	0.023	0.019	0.016	0.013	0.015
abflussrelevantes Einzugsgebiet A_u	[ha]	15.00	38.51	16.12	-	6.80	9.61	-	22.00	20.00	16.00	16.92	11.72
kritischer Regenabfluss Q_{krit}	[l/s]	225.00	577.65	237.60	213.00	102.00	116.00	-	340.00	300.00	240.00	244.00	175.80
Volumen auf Kü bezogen	[m ³]	148.2	557.0	262.0	191.3	70.4	98.2	144.8	244.2	359.8	191.1	229.5	149.2
Volumen auf Bü bezogen	[m ³]	206.0	583.1	269.1	200.3	72.5	122.2	160.0	-	-	-	235.8	155.0
Mittlere Sohlhöhe	[m]	33.38	75.42	46.67	17.78	46.90	62.81	99.92	33.32	42.99	42.45	46.78	49.92
Ausermittigkeit	[-]	0.11	-0.01	-	-	-0.11	0.00	0.00	-	-	-	0.01	-0.09
Hebelarm	[m]	0.5	0.3	0.35	0	0.85	0	0	0	0	0	0.075	0.45
relative Höhe des Zulaufes	[-]	0.72	0.44	0.66	0.28	0.59	0.81	-0.05	-	-	-	0.40	0.37
Durchflussfläche im Zulauf A_{zu}	[m ²]	0.2	3.0	1.1	8.0	0.9	0.3	-	-	-	-	2.7	4.0
Fließgeschwindigkeit im Zulauf v_{zu}	[m/s]	1.13	0.19	0.21	0.00	0.11	0.00	0.00	-	-	0.00	0.09	0.04
Impulskraft F_T	[N]	253.13	111.79	49.35	0.00	11.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.67	7.70
Drehimpulskraft M_T	[Nm]	126.56	33.54	17.27	0.00	9.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.63	3.46
Leistung P	[W]	284.77	21.63	10.25	0.00	1.24	0.00	-	-	-	-	1.92	0.34
Leistungsdichte $P_{spez.}$ auf Kü bezogen	[W/m ²]	0.96	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	-	-	-	-	0.00	0.00
Leistungsdichte $P_{spez.}$ auf Bü bezogen	[W/m ²]	0.69	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	-	-	-	-	0.00	0.00
hü	[m]	0.75	0.12	0.08	0.10	0.05	0.50	0.21	-	-	-	0.07	0.09

4.2.1 Erhebung repräsentativer Einlaufbereiche

Die Kriterien, nach denen die Einlaufbereiche klassifiziert worden sind, sind die Außermittigkeit, die Höhenlage sowie die grundsätzliche Form des Einlaufes (vgl. Tabelle 4-2). Für diese Arten sind die Kategorien A-C gebildet worden.

Kategorie A enthält Einlaufbauwerke, in denen der angeschlossene Kanal erst in ein Rechteckgerinne mündet, bevor das Wasser dann durch dieses dem Becken zugeführt wird.

In **Kategorie B** sind Einlaufbereiche einbezogen, in denen sich der Zufluss des Beckens auf mehrere Einläufe aufteilt.

Kategorie C beinhaltet hingegen Sonderformen, die in Ausnahmefällen und daher nur selten aufgetreten sind. Dabei handelt es sich um den 90°- umgelenkten (transversalen) Einlauf, einen Rohreinlauf im Pumpensumpf sowie einen Einlauf, bei dem das Becken durch einen rechteckigen Ausschnitt in der Beckenstirnwand angeströmt wird.

Die Höhenlage der Einläufe ist dimensionslos über die Tiefe des Beckens dargestellt, wobei 0 einem sohlgleichen und 1 einem Einlauf auf Wasserspiegelhöhe entspricht.

Es zeigt sich, dass der Großteil der Becken mit einem deutlich oberhalb der Sohle liegenden Einlauf angeströmt wird. Dieser ist zumeist beckenparallel, jedoch außermittig gegenüber der Beckenlängsachse angeordnet. Das am häufigsten im Bestand auftretende Einlaufbauwerk ist ein rechteckiges Gerinne. Seitlich angeströmte Becken sind im hier untersuchten Pool an Becken eher selten und treten lediglich in zwei Becken auf.

Tabelle 4-2: Erhebung repräsentativer Einlaufbereich

Einlaufbereiche	Außermittigkeit							
Höhenlage Einlauf	0,00 – 0,40	0,41 – 1,00	0,00 – 0,40	0,41 – 1,00	0,00 – 0,40	0,41 – 1,00	0,00 – 0,40	0,41 – 1,00
Kategorie A								
	1	3	2		3	2		
Kategorie B								
		1						1
Kategorie C								
		1						
							1	
	1							
		1		1				

4.2.2 Erhebung repräsentativer Sedimentationskammern

In Tabelle 4-3 ist die Auswahl der repräsentativen Sedimentationskammern dargestellt. Diese sind in die Kategorien I-III klassifiziert, die ferner über das Längen/Breiten-Verhältnis L:B des Beckens aufgeteilt sind.

Kategorie I enthält rechteckige Sedimentationskammern ohne Einbauten. Die in den **Kategorien II und III** aufgeführten Kammern weisen jeweils Längsbauwerke auf. Dies sind in Kategorie II ein niedriger Wall sowie in Kategorie III Leitwände.

Aus Tabelle 4-3 ist ersichtlich, dass hauptsächlich Becken mit einer Sedimentationskammer ohne Einbauten im Bestand vorhanden sind. Jedoch ist nur bei etwa der Hälfte der Becken das in DWA-A 166 [2013] vorgegebene Längen/Breiten-Verhältnis ($3,0 < L/B < 4,5$) eingehalten, tendenziell weisen diese dann eine zu geringe Länge im Vergleich zur Breite auf. Der bestmögliche Bereich für das Längen/Breiten-Verhältnis von $3,0 < L/B < 4,5$ wurde durch Muth [1992] anhand von physikalischen Untersuchungen bestimmt. Die vorgegebenen Abmessungsverhältnisse resultieren im Wesentlichen aus der Strahlausbreitung, welche bei den besagten Abmessungsverhältnissen sehr gleichmäßig ist.

Tabelle 4-3: Erhebung repräsentative Sedimentationskammer

Sedimentationskammer	L : B		
	< 3,0	3,0 – 4,5	> 4,5
Kategorie I			
	7	8	
Kategorie II			
	3	1	
Kategorie III			
		2	

4.2.3 Erhebung repräsentativer Klärüberläufe

Die an den Bestandsbecken vorhandenen Klärüberläufe sind in Tabelle 4-4 dargestellt und in die Kategorien 1-4 klassifiziert. Zudem sind die Becken gemäß ihrer Tiefe in solche Becken, welche die Mindesttiefe aus DWA-A 166 [2013] von 2 m unterschreiten und solche, welche diese Tiefe einhalten, eingeteilt. Lediglich in zwei Fällen wird diese Mindesttiefe unterschritten.

Die am häufigsten vorkommenden Auslaufbauwerke sind zum einen die integrierte Bauweise, bei der die Tauchwand und das Wehr direkt in der Beckenrückwand angeordnet sind (**Kategorie 1**). Und zum anderen ein Wehr mit einer vorgeschalteten Tauchwand (**Kategorie 2**). **Kategorie 3** beinhaltet Becken mit einem selbstregulierenden Klärüberlauf. Diese werden im Vergleich zu den Varianten aus Kategorie 1 und 2 nur selten verbaut.

Tabelle 4-4: Erhebung repräsentativer Klärüberläufe

Klärüberlauf	Höhe Klärüberlauf	
	< 2,0 m	≥ 2,0 m
Kategorie 1		
	1	7
Kategorie 2		
	1	5
Kategorie 3		
		3
Kategorie 4		
		1
		1

4.3 Physikalische Modellierung

Zur physikalischen Modellierung wurde ein am IWARU rechteckiges und aus Glas im Maßstab 1:5 gefertigtes Modell eines Regenbeckens verwendet. Der Aufbau des Beckens wurden nach den in Kapitel 4.1 am häufigsten vorkommenden Beckenkomponenten gewählt. Der Einlauf ist als außermittiger, hochliegender Gerinnezufluss ausgebildet. Die Sedimentationskammer besitzt ein L/B-Verhältnis von 3,3. Der Klärüberlauf ist als integriertes Bauteil aus Wehr und Tauchwand in der Beckenrückwand ausgebildet.

Im Folgenden werden der Aufbau sowie die einzelnen untersuchten Komponenten näher beschrieben.

4.3.1 Aufbau des physikalischen Modells

Bild 4.2 zeigt ein Funktionsschema des physikalischen Modells. Dieses ist in die Peripherie des wasserbaulichen Labors des IWARU eingebunden und wird über eine frequenz-geregelte Pumpe beschickt. Die Steuerung des Zuflusses erfolgt über ein MID im Zulauf des Beckens.

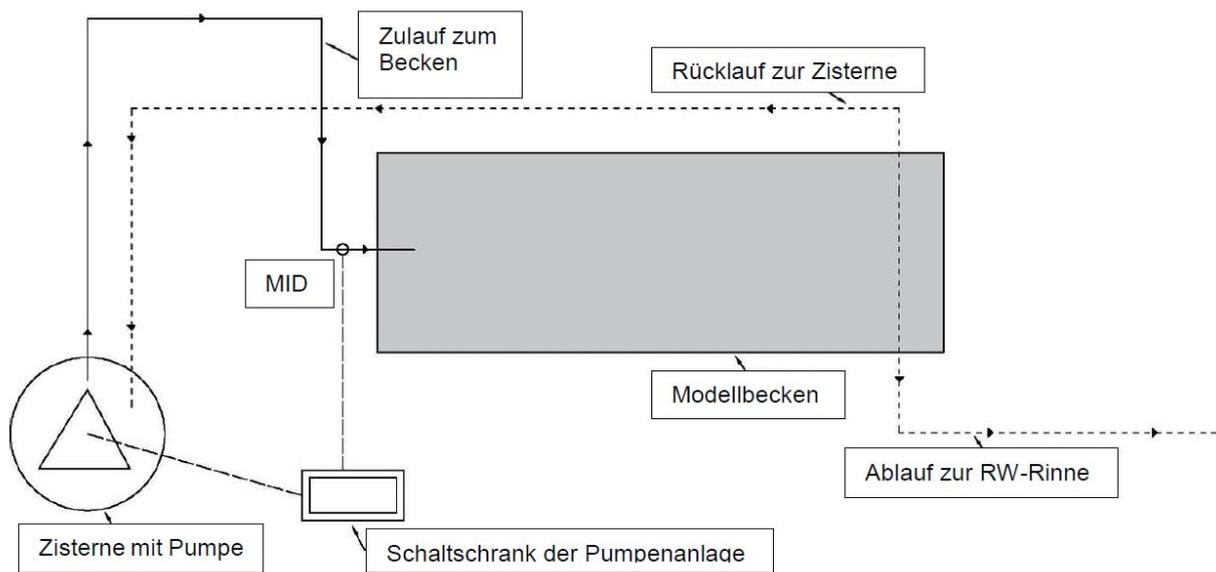


Bild 4.2: Funktionsschema des physikalischen Modells

Das in Bild 4.2 dargestellte Modellbecken ist in Bild 4.3 detaillierter dargestellt. Das Becken ist in die Funktionskomponenten Zulaufbereich, Beckenbereich und Ablaufbereich unterteilt.

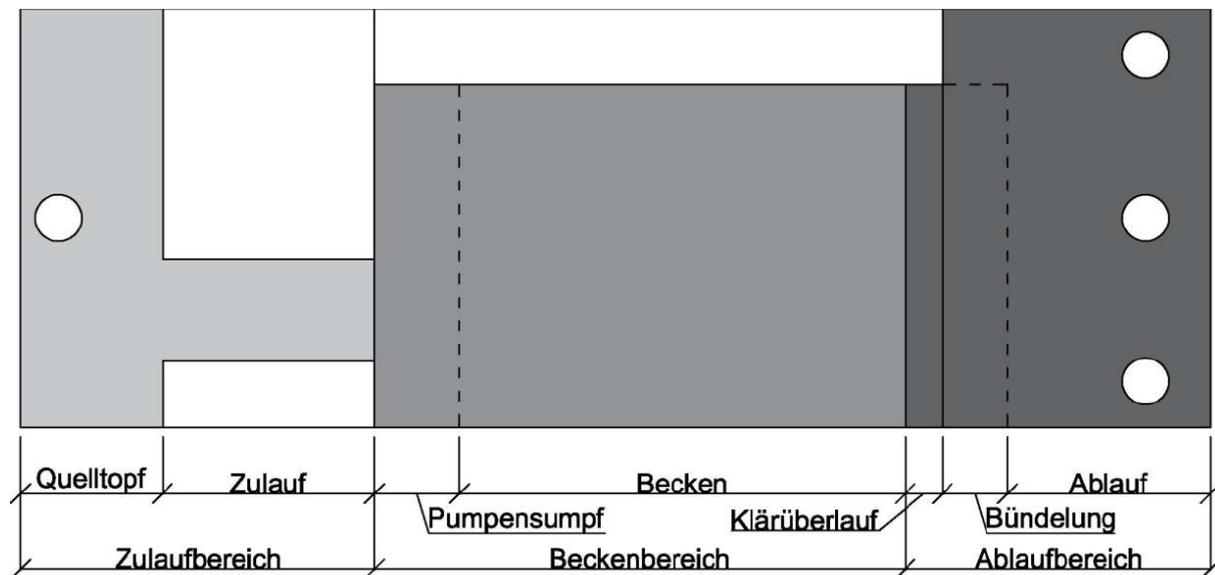


Bild 4.3: Modellkomponenten des physikalischen Modells (Darstellung verzerrt)

In Tabelle 4-5 sind die geometrischen Abmessungen und hydraulischen Randbedingungen des physikalischen Modells aufgeführt. Zur Skalierung der hydraulischen und geometrischen Parameter wurde das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz $Fr_N = Fr_M$ (vgl. Strobl/Zunic [2006]) (Maßstab 1:5) verwendet.

Tabelle 4-5: Bemessung des physikalischen Modells

	Abkürzung	Einheit	Größe
Beckenlänge	L_M	m	2,30
Länge des Pumpensumpfes	$L_{M, PS}$	m	0,30
Gesamtlänge	$L_{M, Gesamt}$	m	2,60
Länge des Zulaufes	$L_{M, Zulauf}$	m	0,66
Beckenbreite	B_M	m	0,30
mittlere Beckentiefe	$h_{M,m,T}$	m	0,35
Oberfläche	A_M	m ²	1,82
Volumen	V_M	m ³	0,710
Kritischer Abfluss	$Q_{M, krit}$	l/s	2,00
Oberflächenbeschickung (in Bezug auf das Referenzbecken)	$q_{M, A}$	m/h	8,8

4.3.1.1 Quelltopf, Einlaufgerinne und Pumpensumpf

In Bild 4.4 ist der Quelltopf, in dem das Becken aus der Druckrohrleitung zufließende Wasser aufsteigt sowie das Einlaufgerinne dargestellt.

Durch Turbulenzgitter im Quelltopf (blaue Filtermatten) wird ein gleichmäßiges Aufströmen des Wassers gewährleistet. Um sicherzustellen, dass bei der Einschnürung des Wassers im Übergangsbereich zwischen Quelltopf und Einlaufgerinne keine Drall- bzw. Sekundärströmung eingetragen werden, ist dort ebenfalls ein Turbulenzgitter verbaut. Bei den eingesetzten Turbulenzgittern handelt es sich um handelsübliche Filtermatten aus dem Aquarienbau.



Bild 4.4: links: Quelltopf mit Turbulenzgitter; rechts: Einlaufgerinne mit Turbulenzgitter

Der Pumpensumpf befindet sich direkt unterhalb des Einlaufgerinnes. Da es sich bei dem Pumpensumpf um den tiefsten Punkt im Becken handelt, kann das gesamte Becken über diesen entleert werden.

4.3.1.2 Sedimentationskammer

Bild 4.5 zeigt auf der linken Seite das physikalische Modell in der Außenansicht. Auf der rechten Seite ist die Sedimentationskammer von innen zu sehen. Auf der linken Seite befindet sich eine Seitenwand aus Holz, die aufgrund der größeren Breite des Glasbeckens gegenüber dem eingebauten Modell des RKB notwendig ist. Eine gleichbleibende Rauheit der Seitenwand ist durch die Wahl des wasserfesten Werkstoffes „Siebdruckplatte“ gewährleistet. Die glatte Seite ist der Strömung zugewandt.



Bild 4.5: links: Außenansicht Glasbecken; rechts: Sedimentationskammer

4.3.1.3 Klärüberlauf und Strömungszusammenführung

Der Klärüberlauf ist als integriertes Bauteil aus Wehr und Tauchwand in der Beckenrückwand ausgebildet. Die resultierende Schlitzwand ist analog zur linken Beckenseitenwand aus Siebdruckplatten erstellt worden. Um einen scharfkantigen, vollkommenen Überfall zu erzeugen, ist ein Aluminiumblech als Wehroberkante verwendet worden.

Unterhalb des Klärüberlaufs befindet sich die Ablaufkonstruktion, die so gestaltet ist, dass der Durchfluss an den Messsonden eines Tracermessgeräts vorbeigeführt wird. Im Versuchsbetrieb sind die Messsonden abgedeckt, da die Messtechnik sensitiv auf UV-Strahlung ist. Das Wehr und die Strömungszusammenführung sind in Bild 4.6 dargestellt. Unterhalb der Messsonden befindet sich der Auslauf aus dem physikalischen Modell, der hier nicht dargestellt ist.



Bild 4.6: Klärüberlauf; links: Wehr im Querschnitt; rechts: Überlaufschwelle in der Ansicht vom UW

4.3.2 Methodik der Tracermessung

Mit Hilfe von Tracerversuchen wird im Labor das Durchströmungsverhalten des Modellbeckens einschließlich Bauteile zur Optimierung beurteilt und bewertet. Anhand der Ergebnisse kann eine integrale Beurteilung der Strömung vorgenommen werden.

Messtechnik

Anwendung findet der Fluoreszenztracer Uranin. Zunächst erfolgt eine impulsartige Zugabe der definierten Tracermasse in den Zulauf der Anlage. Im Ablauf wird Tracer-Konzentration kontinuierlich mit einem Lichtleiterfluorometer (Typ TQ-F, Sommer Mess-Technik, Koblach/Österreich) gemessen (Bild 4.7). Das Lichtleiterfluorometer ist mit Anregungs- und Emissionsfiltern für die Uranindetektion ausgestattet und verfügt über zwei faseroptische Sonden, die jeweils über ein Lichtleiterkabel mit dem Gerät verbunden sind.

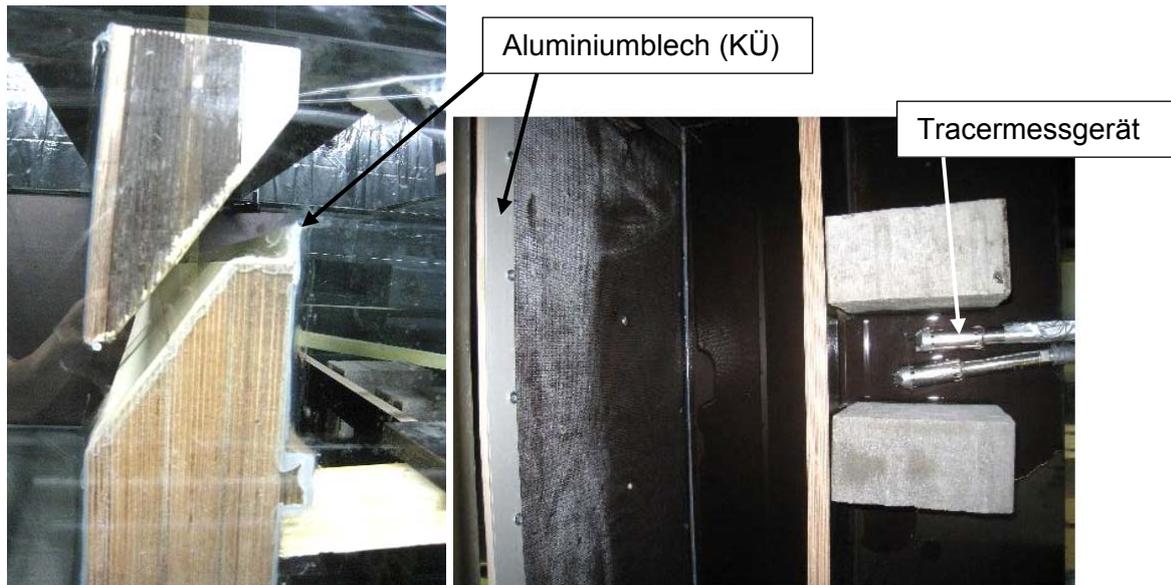


Bild 4.7: Lage des Ortes der Tracer-Zugabe im Zulauf und der Tracer-Messsonden im Ablauf

Methodik der Verweilzeitverteilung

Tracerganglinien können für stationäre als auch instationäre Verhältnisse mit Hilfe der Verweilzeitverteilung-Methodik ausgewertet werden (Werner/Kadlec [1995]). Um die Verweilzeitverteilungen unterschiedlich großer Anlagenvolumina und hydraulischer Belastungen vergleichbar gegenüberzustellen, ist eine dimensionslose Darstellung der Konzentration und der Zeit erforderlich. Die normierte Konzentration C' wird wie folgt berechnet:

$$C' = \frac{C}{M/V_R}$$

mit

C' normierte Konzentration [-]

C gemessene Konzentration des Tracers im Ablauf [mg/l]

M Masse des Tracer [mg]

V_R Reaktorvolumen [l]

Je nach Untersuchung kann für die Masse des Tracers die eingespeiste Masse in den Zulauf oder die wiedergefundene Masse des Tracers im Ablauf verwendet werden. Im Rahmen der vorliegenden Laboruntersuchungen wird für die Berechnung der normierten Konzentration die wiedergefundene Tracermasse im Ablauf verwendet, da ein eindeutig definierter Anlagenablauf vorliegt und die Versuche einen nahezu vollständigen Traceraustrag gewährleisten.

Die Zeit wird als durchflussgewichtete Zeit dargestellt. Diese normierte Darstellung der Zeit entspricht der aktuellen theoretischen Austauschrate des Reaktorvolumens unter Annahme einer idealen Pfropfenströmung. Zuerst wird dazu das Volumen V_{Aus} , das seit dem Beginn der Tracereinspeisung die Anlage verlassen hat unter Berücksichtigung des Durchflusses Q berechnet.

$$V_{Aus}(t) = \int_0^t Q(t) \cdot dt$$

mit

V_{Aus} Abflussvolumen seit Tracereinspeisung [l]

t Zeit seit Tracereinspeisung [s]

Q Durchfluss [l/s]

Mit Hilfe von V_{Aus} kann die dimensionslose durchflussgewichtete Zeit Φ berechnet werden:

$$\phi = V_{Aus} / V_R \quad \text{und} \quad d\phi = dV_{Aus} / V_R$$

Die entsprechende Verweilzeitverteilung unter Verwendung der normierten Konzentration C' ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$C'(\phi) = \frac{C(\phi)}{M/V_R}$$

4.4 Numerische Simulation

4.4.1 Verwendete Software

Die numerische Strömungsmechanik basiert auf der mathematischen Formulierung von physikalischen Prozessen mit Hilfe der Erhaltungssätze für Masse und Impuls (Navier-Stokes-Gleichungen). Die numerische Modellierung (Computational Fluid Dynamics, CFD) ist in der Lage, auch komplexe, nichtlineare strömungsmechanische Probleme zu erfassen. Im Rahmen dieses Projektes wird das kommerzielle Softwarepaket FLOW-3D von Flow Science, Inc. in der Version 11.2 verwendet. Der freie Wasserspiegel wird mit Hilfe des VOF-Modells modelliert. Die Diskretisierung erfolgt bei FLOW-3D durch die Finite-Differenzen-Methode, dazu wird ein kartesisches Gitternetz verwendet.

Um mit dem Programm FLOW-3D eine numerische Strömungssimulation durchführen zu können, muss zunächst eine Geometrie des Beckens erstellt werden. Die Geometrie wurde mit dem Programm SOLIDWORKS 2015 der Firma Dassault Systems Deutschland GmbH erstellt und als STL-Datei in FLOW-3D importiert. Allgemeine Informationen zum Gitternetz wie z.B. Zellgröße und Simulationsdauer können der Tabelle 5-5 entnommen werden. Der Einlauf des Beckens wurde als Volume Flow Rate-Inlet ausgebildet. Hier wird ein konstanter Volumenstrom über den gesamten Einlaufquerschnitt zugegeben. Der Auslauf wurde als Specified Pressure-Outlet definiert. Hier wird der Wasserspiegel durch eine Druckrandbedingung auf einer vorgegebenen Höhe festgehalten. Die Initialisierung erfolgt mit vollgefülltem Becken.

Mit Hilfe von Turbulenzmodellen, mit denen bestimmte Vereinfachungen und Annahmen einhergehen, kann der Simulationsaufwand erheblich reduziert werden, wodurch eine praktische Anwendung überhaupt erst möglich wird (Marlow et al. [2014]). In FLOW 3D stehen diverse Modelle zur Auswahl. Diese halbempirischen Modelle verwenden unterschiedliche Lösungsverfahren, sodass der Auswahl eines geeigneten Turbulenzmodells, je nach Anwendungsbereich und Zielsetzung, eine wichtige Bedeutung zukommt (Marlow et al. [2014]). Gewählt wurde das k - ϵ RNG-Turbulenzmodell. Dieses Modell ist für geringe Reynolds-Zahlen, wie sie in Absetzbecken vorzufinden sind, sehr gut geeignet.

4.4.2 Geometrische und hydraulische Randbedingungen der für die numerischen Optimierungsstudien ausgewählten Beckenkomponenten

Die im Folgenden beschriebenen Konstruktionen und Abmessungen der einzelnen Funktionskomponenten wurden auf Basis der Erhebung der repräsentativen Beckenkomponenten (vgl.

Kapitel 4.2), mit Hilfe von Angaben aus Regelwerken und Themenblättern der DWA (DWA-A 166 [2013]; DWA-T3/2013 [2013]) aber auch aus Erfahrungswerten festgelegt.

Anmerkungen zur Auswahl der Konfiguration der Beckenkomponenten:

Die hier untersuchten Konfigurationen der Regenklärbecken und insbesondere die Gestaltung des Einlaufbauwerkes wurden auf den Wassertagen Münster 2017 in einem Workshop der Fachwelt vorgestellt. Die Teilnehmer setzten sich aus den Bereichen Betrieb, Kommune/Behörde, Planen und Beckenausrüster zusammen. Von den Teilnehmern wurde die Praxisrelevanz der hier untersuchten Konfigurationen der Beckenkomponenten bestätigt. Bis auf Becken in Erdbauweise, die aufgrund ihrer grundsätzlichen Andersartigkeit in diesem Projekt nicht betrachtet werden, wurden durch die Teilnehmer keine weiteren Konfigurationen ergänzend vorgeschlagen.

4.4.2.1 Konfiguration des Einlaufbauwerkes

Insgesamt sind vier unterschiedliche Typen von Einlaufbauwerken sog. **Grundvarianten (Variante 1-4)** untersucht worden. Anhand der Erkenntnisse aus der numerischen Simulation der Grundvarianten wurden Einbauten zur Optimierung der Becken entwickelt und die Durchströmung ebenfalls im numerischen Modell analysiert (sog. **optimierte Varianten**).

Unabhängig vom Einlaufbauwerk weisen die jeweils angeschlossenen Becken das gleiche Volumen bei gleichen Abmessungen auf. Das in DWA-A 166 [2013] Breiten/Tiefen-Verhältnis ist hierbei eingehalten. Ebenfalls sind die Abmessungen des Pumpensumpfes in allen Varianten gleich. Der Pumpensumpf erstreckt sich über die gesamte Breite des Beckens, hat eine Tiefe von 0,75 m und eine Länge von 1,0 m in Beckenlängsrichtung. Diese sind aus dem in DWA-T3/2013 [2013] vorgestellten Muster-Regenklärbecken entnommen.

Die Abmessungen der vier untersuchten Grundvarianten der Einlaufbauwerke sind in Tabelle 4-6 enthalten.

Tabelle 4-6: Geometrische Abmessungen und hydraulische Randbedingungen der Grundvarianten des Einlaufbauwerkes

Variante	Einlaufart	DN	Höhe Sohle Einlauf	Breite Einlauf	Breite Becken	Tiefe Becken	Ausmitte (links)	Ausmitte (rechts)	Höhe Wehr (links)	Höhe Wehr (rechts)	h_{kue}	r_{hy} Einlauf	Q	$h_{\bar{u}}$	v_{ein}
		mm	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m ³ /s	m	m/s
V1 mittig	Gerinne	-	1.5	2.15	5	2	1.425	1.425	-		2	0.396	0.2083	0.08	0.167
V1 außermittig	Gerinne	-	1.5	2.15	5	2	2.05	0.8	-		2	0.396	0.2083	0.08	0.167
V2 mittig	Kanal	900	0.36	-	5	2	2.5	2.5	-		2	0.225	0.2083	0.08	0.327
V2 außermittig	Kanal	900	0.36	-	5	2	3.75	1.25	-		2	0.225	0.2083	0.08	0.327
V3.1	Kanal	900	0.36	-	5	2	-	-	1.4	1.4	2	0.225	0.2083	0.08	0.327
V3.2	Kanal	900	0.36	-	5	2	-	-	1.6	1.6	2	0.225	0.2083	0.08	0.327
V3.3	Kanal	900	0.36	-	5	2	-	-	1.8	1.4	2	0.225	0.2083	0.08	0.327
V4 mittig	Gerinne	-	0	1	5	2	2	2	-		2	0.400	0.2083	0.08	0.104
V4 außermittig	Gerinne	-	0	1	5	2	3.75	1.25	-		2	0.400	0.2083	0.08	0.104

Bei **Variante 1** (vgl. Bild 4.8) handelt es sich um einen **beckenparallelen, hochliegenden Gerinneeinlauf**. Der Gerinneeinlauf liegt sowohl als mittige als auch als außermittige Grundvariante vor. Bild 4.9 zeigt die wesentlichen geometrischen Abmessungen und hydraulischen Parameter für die Variante 1.

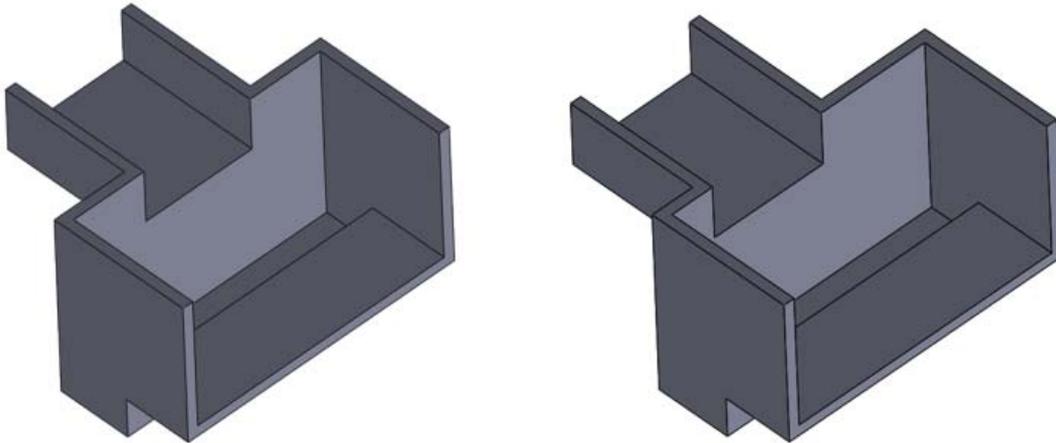


Bild 4.8: Variante 1 Grundausführung; links: mittig; rechts: außermittig

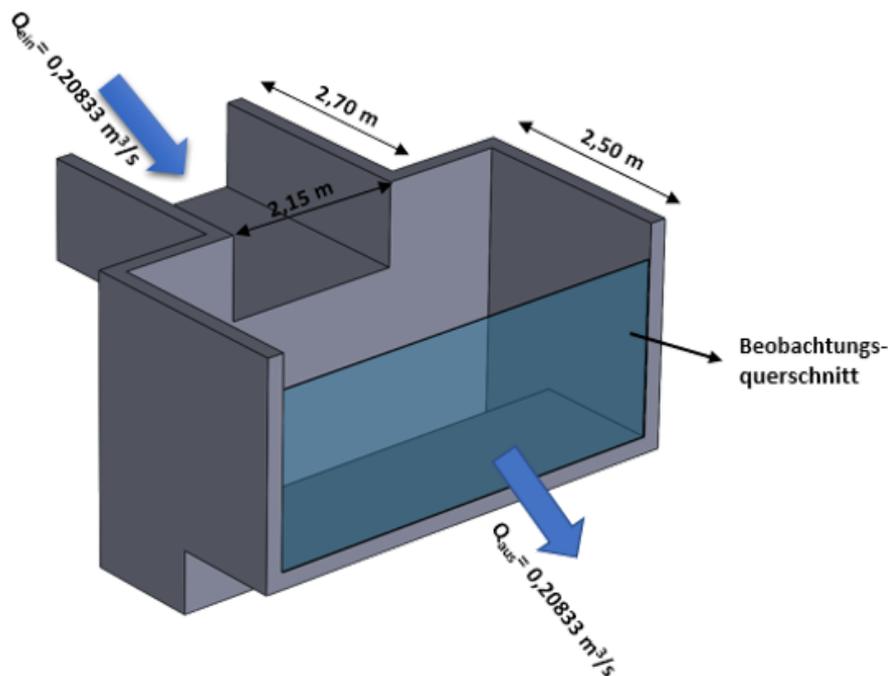


Bild 4.9: Geometrische und hydraulische Randbedingungen der Variante 1

Variante 2 weist einen **Rohreinlauf in Sohlhöhe** auf und liegt ebenfalls sowohl als mittige als auch als außermittige Grundvariante vor (vgl. Bild 4.10). Die Grundkonstruktion ist an die Konstruktionsempfehlungen aus DWA-A 166 [2013] angelehnt. Ein Rohreinlauf wird in der aktuellen Fassung des Arbeitsblatts zwar nicht mehr empfohlen, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Bauform häufig an Bestandsbecken vorzufinden ist, da sie in älteren Versionen des Arbeitsblattes als Einlaufvariante empfohlen wurde und aufgrund der geringen Baukosten oftmals bei der Konzeption von Becken favorisiert wurde.

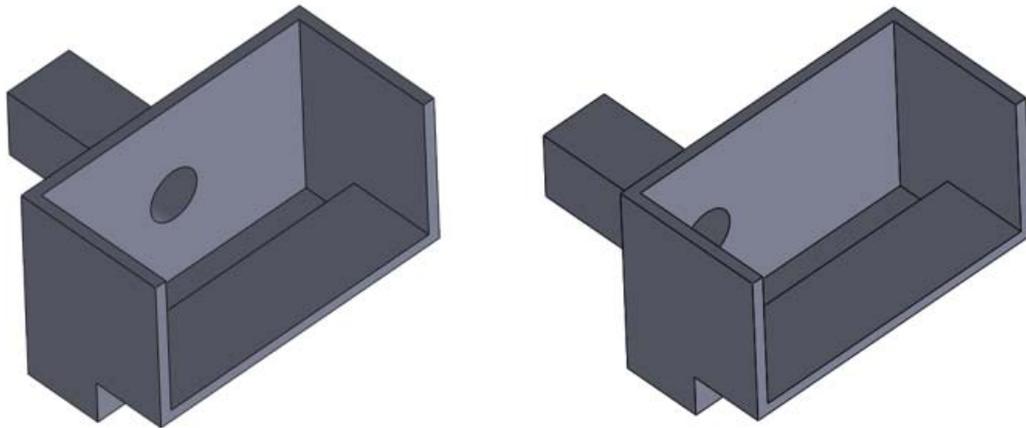


Bild 4.10: Variante 2 Grundausführung; links: mittig; rechts: außermittig

Bild 4.11 zeigt die unterschiedlichen Geometrien der **Variante 3**. Dabei handelt es sich um ein **90°-umgelenkt (transversal) angeströmtes Becken**. Das Wasser fließt dabei seitlich durch einen Kanal in ein dem Becken vorgeschaltetes Sammelgerinne, dessen Sohlhöhe gleich der des Beckens ist. Das Sammelgerinne ist durch ein Wehr vom Becken getrennt. Unterhalb des Wehres schließt der Pumpensumpf an. Diese Zulaufvariante wird in DWA-A 166 [2013] als Einlaufkonstruktion vorgeschlagen.

Die Grundausführung der Variante 3 liegt sowohl mit horizontalem Wehr, als auch mit Streichwehr vor (vgl. Bild 4.11). Für die Variante mit horizontalem Wehr wurden zwei unterschiedliche Wehrrhöhen gewählt (vgl. Tabelle 4-6). Bild 4.12 zeigt die wesentlichen geometrischen Abmessungen und hydraulischen Parameter für die Variante 3.

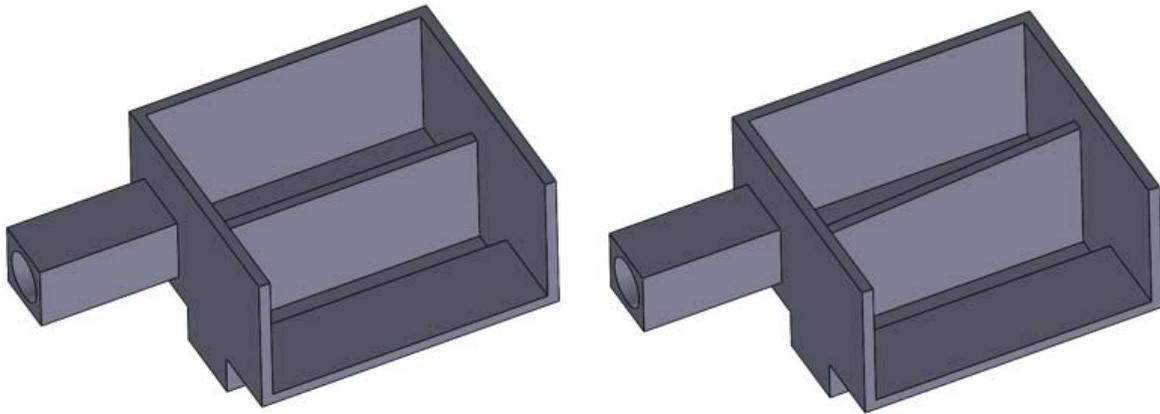


Bild 4.11: Variante 3 Grundausführung; links: horizontales Wehr, rechts: Streichwehr

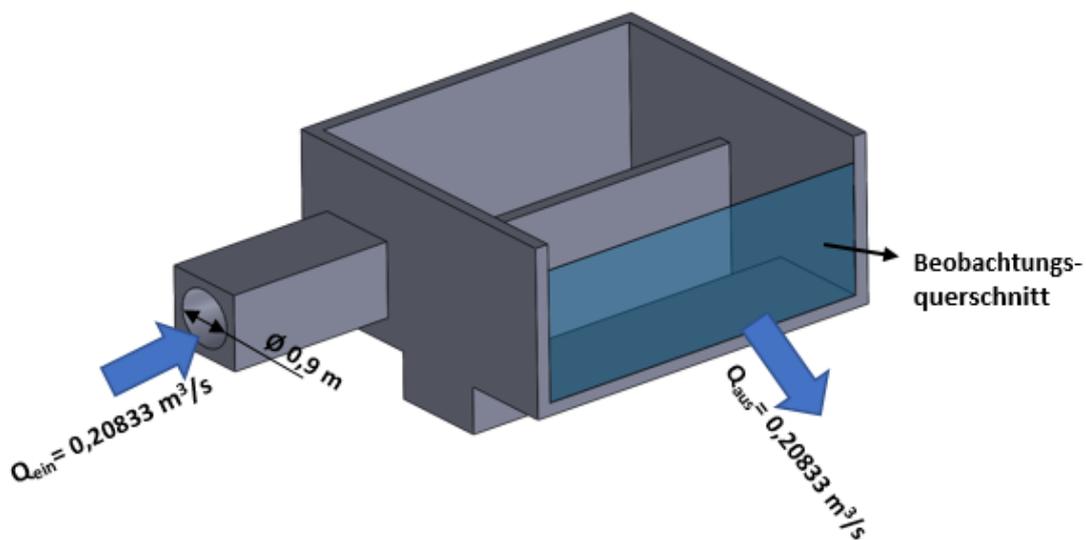


Bild 4.12: Geometrische und hydraulische Randbedingungen der Variante 3

Variante 4 repräsentiert die in DWA-T3/2013 [2013] vorgestellte Musterkonstruktion eines Regenklärbeckens, jedoch in der hier dargestellten Grundvariante ohne die Prallwand. Das Wasser fließt in eine Beckenvorkammer, in der sich in der Musterkonstruktion der Beckenüberlauf befindet. Dieser ist hier nicht berücksichtigt, da die hydraulische Belastung in der Simulation unterhalb derer liegt, die zur Aktivierung des Beckenüberlaufes notwendig ist. Der Zulauf von der Beckenvorkammer in das Becken selbst erfolgt durch einen vertikalen, 1 m breiten Schlitz, unterhalb dessen der Pumpensumpf anschließt. Wie in Bild 4.13 dargestellt, liegt Variante 4 sowohl als mittig, als auch als außermittig angeströmte Variante vor.

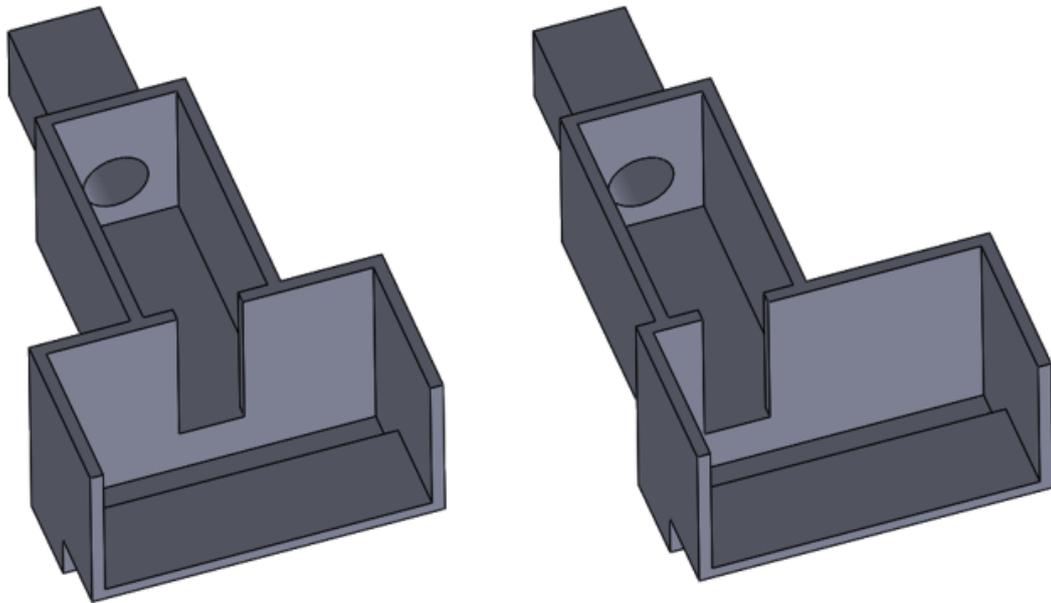


Bild 4.13: Variante 4 Grundausführung; links: mittig; rechts: außermittig

4.4.2.2 Konfiguration der Sedimentationskammer

Insgesamt sind vier verschiedene Grundvarianten der Sedimentationskammer (SeKa) untersucht worden. Das Volumen der Sedimentationskammer ist in allen Varianten gleich. Das Beckenvolumen ist mit 150 m^3 an das Volumen des Musterbeckens in DWA-T3/2013 [2013] angelehnt. Ferner ist die Oberflächenbeschickung bei SeKa 1-3 gleich 10 m/h und die Beckentiefe gleich 2 m . Diese entsprechen der in DWA-A 166 [2013] festgelegten, maximal zulässigen Oberflächenbeschickung sowie der minimalen Beckentiefe, die als Genehmigungsgrundlage für Bestandsbecken dient. Die Materialrauheit ist mit 5 mm angesetzt worden. Alle weiteren geometrischen und hydraulischen Bemessungsgrößen sind Tabelle 4-7 zu entnehmen.

Tabelle 4-7: Geometrische Abmessungen und hydraulische Randbedingungen der Grundvarianten der Sedimentationskammer

Variante	V_{ges} m^3	V_{nutz} m^3	Q m^3/s	h_{kue} m	l_b -	b_b -	q_a m/h	l_b/b_b -	b_b/h_{kue} -	l_b/h_{kue} -	v_h m/s	$h_{\bar{u}}$ m
SeKa 1	150	150	0.20833	2	15.00	5.00	10.0	3.00	2.50	7.50	0.021	0.080
SeKa 2	150	150	0.20833	2	14.00	5.36	10.0	2.61	2.68	7.00	0.019	0.077
SeKa 3	150	150	0.20833	2	18.37	4.08	10.0	4.50	2.04	9.19	0.026	0.092
SeKa 4	150	150	0.20833	3	15.00	3.33	15.0	4.50	1.11	5.00	0.021	0.105

Die in DWA-A 166 [2013] empfohlenen Abmessungsverhältnisse für Sedimentationskammern von Regenbecken sind

- $6 < l_B : h_B < 15$ (Längen/Tiefen-Verhältnis)
- $3 < l_B : b_B < 4,5$ (Längen/Breiten-Verhältnis)
- $2 < b_B : h_B < 4$ (Breiten/Tiefen-Verhältnis)

SeKa 1 und SeKa 3 liegen innerhalb der vorgeschriebenen Abmessungsverhältnisse in DWA-A 166 [2013]. Bei **SeKa 1** ist die im der Rahmen der Bemessungskonfiguration maximal mögliche Beckenbreite und bei **SeKa 3** die maximal mögliche Beckenlänge, bei gleicher Beckentiefe und Oberflächenbeschickung, gewählt worden. Diese Becken entsprechen den in Kapitel 4.2.2 vorgestellten, am häufigsten vorkommenden Beckenkammern.

SeKa 2 hat eine vergleichsweise breite Sedimentationskammer, wodurch das Längen/Breiten-Verhältnis kleiner als zulässig wird. Diese Konfiguration ist ebenfalls häufig in den erhobenen Bestandsbecken (Kapitel 4.2) vorhanden.

Die **SeKa 4** weist bei gleichem Volumen des Beckens eine größere Tiefe auf. Dies führt zu einer geringeren Oberfläche und – bei gleicher hydraulischer Belastung Q [m^3/s] im Zulauf – dementsprechend zu einer deutlich höheren Oberflächenbeschickung q_A [m/h]. Das Becken gilt daher nach DWA-A 166 [2013] als zu kurz und zu tief. Diese Variante wird gewählt, da einige Becken in Tabelle 4-1 die Beckentiefe von 2 m z.T. deutlich überschreiten.

Bild 4.14 zeigt einen relativen Vergleich der Abmessungen der untersuchten Sedimentationskammern als Draufsicht.

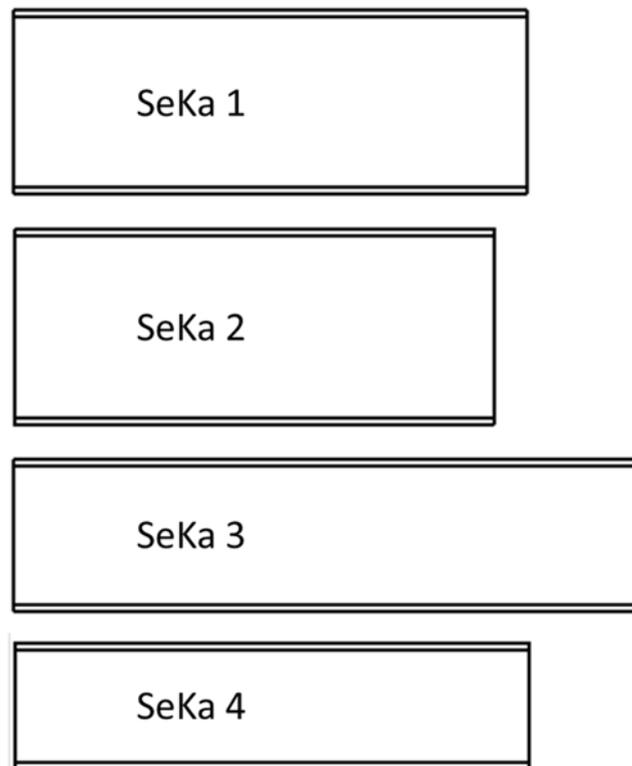


Bild 4.14: Relativer Vergleich der Abmessungen aller untersuchten Sedimentationskammern (SeKa 1-4) als Draufsicht

4.4.2.3 Konfiguration des Klärüberlaufes

In Kapitel 4.2.3 ist festgestellt worden, dass ein Großteil der Bestandsbecken entweder mit einem Klärüberlauf als Schlitzwand (Varianten KUE 1.1 – KUE 1.3) oder als herkömmliches Wehr mit vorgeschalteter Tauchwand (Varianten KUE 2.1 – KUE 2.3) ausgerüstet ist. Beide Varianten wurden im numerischen Modell in Anlehnung an DWA-M 176 [2013] umgesetzt (vgl. Bild 4.15). Die Beckenbreite sowie die hydraulische Belastung wurde analog zur Bemessung der Einlaufbauwerke gewählt (vgl. Tabelle 4-6).

Tabelle 4-8: Geometrische Abmessungen und hydraulische Randbedingungen der Grundvarianten des Klärüberlaufes

Variante		h_{kue}	Schlitzabstand	Eintauchtiefe Tauchwand (TW)	Abstand Tauchwand
		m	m	m	m
KUE_1.1	Schlitzwand	2	0.2	-	-
KUE_1.2	Schlitzwand	2	0.25	-	-
KUE_1.3	Schlitzwand	2	0.3	-	-
KUE_2.1	Wehr und TW	2	-	0.08	0.3
KUE_2.2	Wehr und TW	2	-	0.12	0.3
KUE_2.3	Wehr und TW	2	-	0.16	0.3

In DWA-M 176 [2013] ist für die Wehrkonstruktion als Schlitzwand eine Schlitzbreite (paralleler Abstand) zwischen 20 und 30 cm vorgegeben. Dieser wurde in 3 Stufen (KUE 1.1 – 1.3) variiert (vgl. Tabelle 4-8). Der Winkel des Schlitzes von 45° ist bei der Konstruktion aller Varianten berücksichtigt worden und wurde nicht variiert.

Das Arbeitsblatt DWA-A 111 [2010] schreibt die Konfiguration Wehr mit vorgeschalteter Tauchwand vor (KUE 2). Der dort definierte Mindestabstand der Tauchwand vom Wehr von 30 cm wurde in allen Varianten konstant gehalten. Die Eintauchtiefe der Tauchwand gegenüber der Wehroberkante ist mit $1-2 \cdot h_{\bar{u}}$ angegeben. Dieser Abstand wurde in 3 Schritten (KUE 2.1 – 2.3) variiert (vgl. Tabelle 4-8).

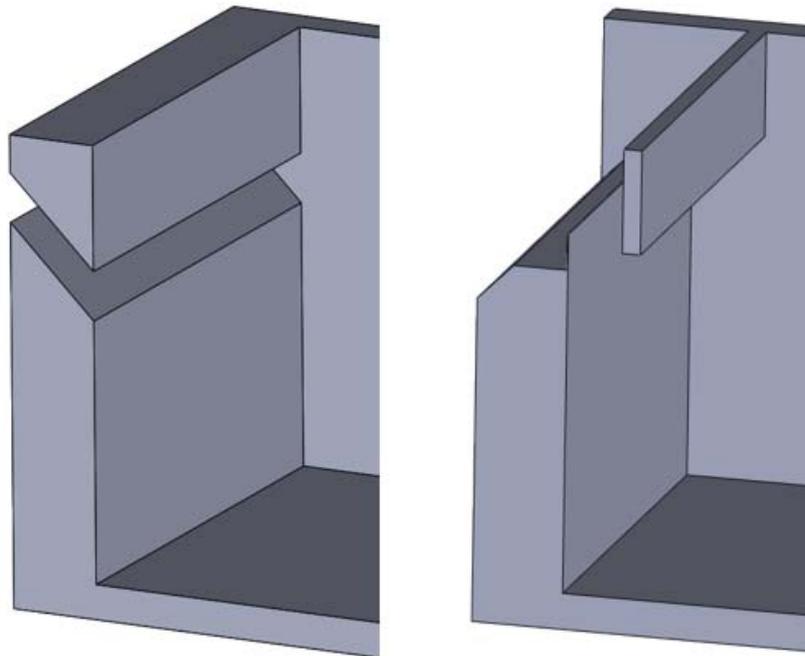


Bild 4.15: Grundvarianten Klärüberlauf; links: Schlitzwand; rechts: Wehr mit vorgeschalteter Tauchwand

4.5 Bewertungs-Systematik

Die Bewertungssystematik (vgl. Bild 4.16) soll als Entscheidungshilfe für die Ertüchtigung von Regenklärbecken dienen. Dazu ist die Systematik in die Grundsäulen „**Beurteilung von Bestandsplänen**“, „**Tracermessungen an Bestandsbecken**“ und „**Simulation von bestehenden Becken**“ eingeteilt, die teils alternativ, teils ergänzend im Entscheidungsprozess zu beschreiten sind.

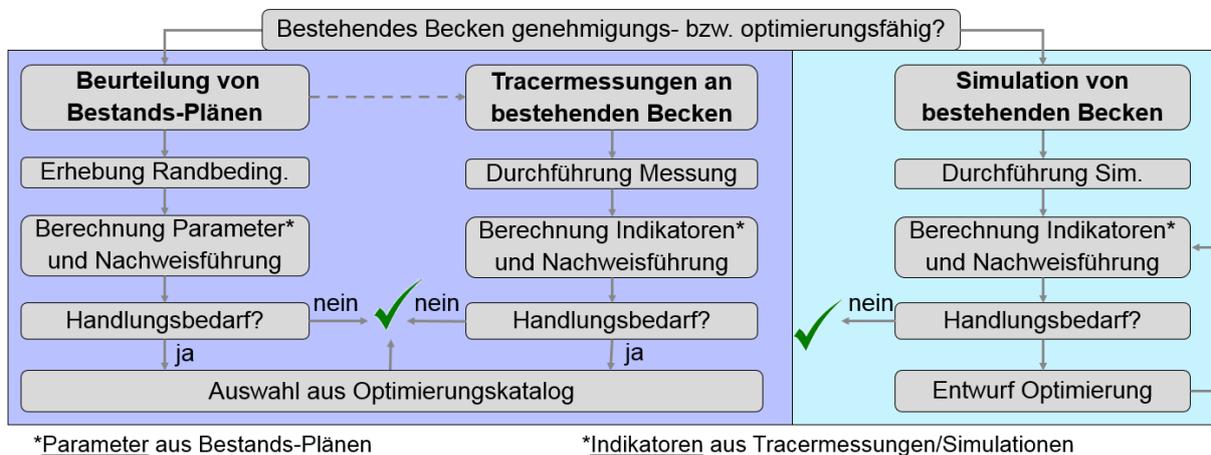


Bild 4.16: Bewertungssystematik zur Ertüchtigung von Bestandsbecken

In der **ersten Säule „Beurteilung von Bestandsplänen“** sollen geometrische und hydraulische Randbedingungen erhoben werden mit Hilfe derer sog. Randbedingungsparameter errechnet werden können. Dies sind beispielsweise die Abmessungsverhältnisse des Beckens oder ein aus außermittiger Anströmung resultierender Hebelarm. Die Randbedingungsparameter werden in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** vorgestellt. Anhand dieser Parameter kann bereits anhand von Bestandsplänen ermittelt werden, ob Handlungsbedarf besteht. Falls dies der Fall ist, kann aus einem Optimierungskatalog, der die in Kapitel 5.4.1 und 5.4.2 vorgestellten Einbauten zur Optimierung enthält, eine Ertüchtigungsmaßnahme gewählt werden. Dieser Katalog kann dann fortlaufend weiterentwickelt werden. Sollte im Optimierungskatalog für die jeweils vorliegende Problemstellung noch kein passender Einbau vorhanden sein, so sind die Schritte der dritten Säule zu durchlaufen und ein geeigneter Einbau ist zu entwickeln. Auf diese Weise wird der Optimierungskatalog fortgeschrieben. Der Optimierungskatalog ist in Anlage 1 zu finden.

In der **zweiten Säule „Tracermessungen an Bestandsbecken“** wird das Optimierungspotenzial über in-Situ Tracermessungen definiert. Dazu sind Bestandsbecken mit der notwendigen Tracermesstechnik und dazugehöriger SPS und Abflussmessung auszurüsten. Das Messsystem ist im Rahmen des Forschungsvorhabens Uhl et al. [2009] entwickelt worden und wird derzeit mit weiterentwickelter Steuerung in der zweiten Phase des Vorhabens Uhl et al. [2012] eingesetzt. Der Aufbau und die Funktion des Messsystems ist Uhl et al. [2009] zu entnehmen. Die Indikatoren aus der Tracermessung werden in Kapitel 4.6 vorgestellt.

Die **dritte Säule „Simulation von bestehenden Becken“** basiert auf der Durchführung von numerischen Simulationen und der Analyse der Durchströmungscharakteristik. Es werden für den IST-Zustand sog. Strömungsindikatoren bestimmt, die in Kapitel 4.7 vorgestellt werden. Anhand der Indikatoren und der Visualisierung der Durchströmung wird eine Ertüchtigungsmaßnahme ausgewählt bzw. entworfen und in das numerische Modell implementiert. Ziel der Ertüchtigungsmaßnahme ist das Erreichen einer möglichst gleichmäßigen Beckendurchströmung. Bewertet wird die Maßnahme wiederum anhand der definierten Strömungsindikatoren. Die beschriebenen Strömungsindikatoren existieren zwar schon, das Verfahren an sich muss allerdings in einem zukünftigen Projekt erst noch entwickelt und praxisreifer gemacht werden.

4.6 Indikatoren aus Traceruntersuchungen

Aus den in-Situ Tracerversuchen wird eine Verweilzeitverteilung des Tracers ermittelt, aus der verschiedene Fließzeiten errechnet werden (vgl. Stamou/Adams [1988]). Die Methode der Auswertung und die jeweiligen Parameter fanden ebenfalls in Uhl et al. [2009] Anwendung. In Bild 4.17 sind exemplarisch eine Verweilzeitverteilung und die daraus ermittelten Parameter dargestellt.

Zur Quantifizierung der Beckendurchströmung eignen sich insbesondere die Parameter θ_{Beginn} , θ_{10} , θ_{50} sowie die Differenz aus $\theta_{75} - \theta_{25}$.

θ_{Beginn} – Beginn des Traceraustrages

θ_{Beginn} gibt den Zeitpunkt des ersten Tracerauftritts im Ablauf an. Dieser Zeitpunkt kann als Indikator zur Durchströmungsgeschwindigkeit eingesetzt werden, unterliegt jedoch hohen Unsicherheiten.

θ_{10} – Zeit, bei der 10 % des Tracers ausgetragen wurde

Zur Ermittlung der Durchströmungsgeschwindigkeit kann im Fall eines steilen Anstiegs der Verweilzeitverteilung ebenfalls θ_{10} eingesetzt werden. θ_{10} ist ferner ein Indikator dafür, ob es sich bei der vorliegenden Strömung um eine für die Sedimentation günstige Pfropfenströmung handelt. Tendiert θ_{10} gegen 1, handelt es sich um eine Pfropfenströmung, tendiert θ_{10} gegen 0, handelt es sich um eine Kurzschlussströmung. Wenn eine Kurzschlussströmung detektiert wird, kann eine Stromröhre vorliegen, durch die ein Teil des Zuflusses den Ablauf wesentlich schneller erreicht, als es bei einer Pfropfenströmung der Fall wäre.

θ_{50} – Zeit, bei der 50 % des Tracers ausgetragen wurde

θ_{50} stellt einen Indikator für die hydraulische Effizienz der Durchströmung dar. Tendiert θ_{50} gegen 1, liegt eine optimale Ausnutzung aller Beckenbereiche vor. Wird das Beckenvolumen nicht optimal ausgenutzt, können Rezirkulationszonen im Becken auftreten und θ_{50} tendiert gegen 0.

θ_{Dom} – Austrag der höchsten Tracerkonzentration

Der Peak der Verweilzeitverteilung (vgl. Bild 4.17) wird als θ_{Dom} (Uhl et al. [2009]) oder auch als θ_{Max} (Stamou/Adams [1988]) benannt und gibt die am höchst gemessene Tracerkonzentration wieder. Der Indikator beschreibt die dominierende Verweilzeit des Tracers im Becken.

$\theta_{75} - \theta_{25}$ - Differenz

Die Differenz aus θ_{75} und θ_{25} ist ein Maß für die Dispersion. Bei einem Wert von 0 liegt eine Pfropfenströmung vor, ebenfalls können niedrige Werte durch Kurzschlussströmungen verursacht werden. Je näher der Wert zu 1 tendiert, desto größer ist die Dispersion.

θ_{Ende} – Längste Verweilzeit

Der Indikator θ_{Ende} beschreibt die längste Verweilzeit des Tracers. Diese ist u.a. von der Nachweißgrenze des Tracers abhängig und unterliegt Einflüssen wie Totzonen und Sorptionsprozessen. Aufgrund der schwierigen Bestimmung und der geringen Aussagekraft wird der Indikator i.d.R. nicht zu Auswertungszwecken und zur Charakterisierung der Durchströmungsverhältnisse herangezogen.

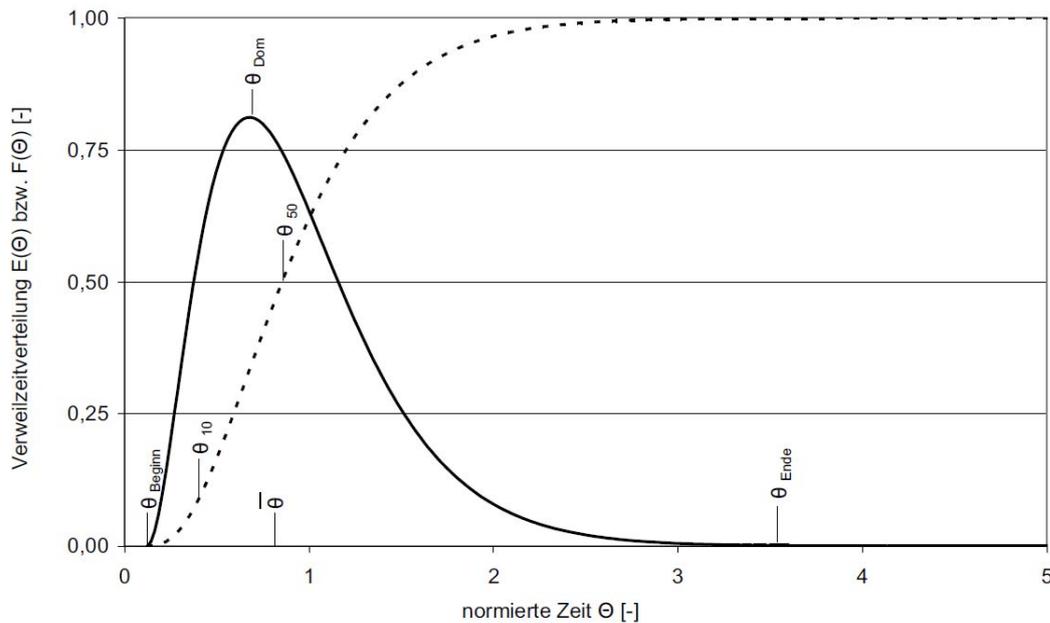


Bild 4.17: Parametrisierung der Durchströmungseigenschaften (Uhl et al. [2009])

$E(\theta)$ stellt die Verweilzeitverteilung dar und wird im Folgenden auch mit $C'(\theta)$ bezeichnet. $F(\theta)$ bezeichnet die Summenlinie der Verweilzeit.

4.7 Indikatoren aus numerischer Strömungssimulation

Die Indikatoren, die aus den Ergebnissen der numerischen Strömungssimulation ermittelt werden, werden auf dem Kontrollquerschnitt zwischen Einlaufbereich und Sedimentationskammer sowie in der Sedimentationskammer bestimmt. Der Kontrollquerschnitt ist als Hilfskonstrukt zu verstehen, um das Einlaufbauwerk separat bewerten zu können. Zunächst wird die Optimierungs-Studie anhand der Bewertung des Einlaufbauwerks durchgeführt und nicht für das Gesamtbecken, so soll v.a. Simulationszeit eingespart werden. Lediglich jeweils die besten Varianten je Optimierung werden als Gesamtbecken simuliert und bewertet. In den folgenden Kapiteln werden diese Strömungs-Indikatoren erläutert.

4.7.1 Einlaufbauwerk und Klärüberlauf

Zur Bewertung der Funktions-Komponente Einlaufbauwerk die Indikatoren I_{EV} (-) und I_A (-) bestimmt.

Vergleichmäßigung der Strömung

Der Indikator I_{EV} bewertet die Abweichung der auf der definierten Kontrollfläche vorliegenden Geschwindigkeitsverteilung von einer idealen Geschwindigkeitsverteilung einer Pfropfenströmung (stationär, laminar, ohne Wandeinfluss). Dazu wird die Abweichung der rechnerischen, mittleren Fließgeschwindigkeit des gesamten durchströmten Querschnitts (u_h , Pfropfenströmungsgeschwindigkeit) von der an jedem berechneten Punkt auf dem Kontrollquerschnitt bestimmten Fließgeschwindigkeit (u_i) bestimmt und mit Hilfe des betrachteten Teilquerschnitts gewichtet. Daraus wird die Summe gebildet und mit der Pfropfenströmungsgeschwindigkeit ins Verhältnis gesetzt. Die Pfropfenströmungsgeschwindigkeit berechnet sich wie folgt:

$$u_h = \frac{Q}{A_{\text{Kontrollquerschnitt}}} \text{ (m/s)}$$

In einem weiteren Schritt wird der Indikator auf den Wertebereich 0 - 1 normiert. Da die Fließgeschwindigkeit im durchflossenen Querschnitt bei einer Propfenströmung an jeder Stelle gleich der mittleren Fließgeschwindigkeit ist, liegt bei einem berechneten Indikator nahe 0 eine sehr schlechte Verteilung vor, wohingegen ein gegen 1 tendierender Indikator auf eine sehr gute Gleichverteilung der Fließgeschwindigkeit hindeutet. Das Erreichen eines Wertes für I_{EV} von 1 ist jedoch aufgrund der Haftbedingung und der Reibung an den Beckenwänden nicht möglich. Der unter realen Bedingungen erreichbare Wert des Indikators liegt bei 0,93 (vgl. Bild 4.18).

$$I_{EV} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{I_{EV,dim}}\right)} \text{ (-)} \quad \text{mit:} \quad I_{EV,dim} = \frac{u_h}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (u_i - u_h)^2 \cdot A_i / A_{ges}}} \text{ (-)}$$

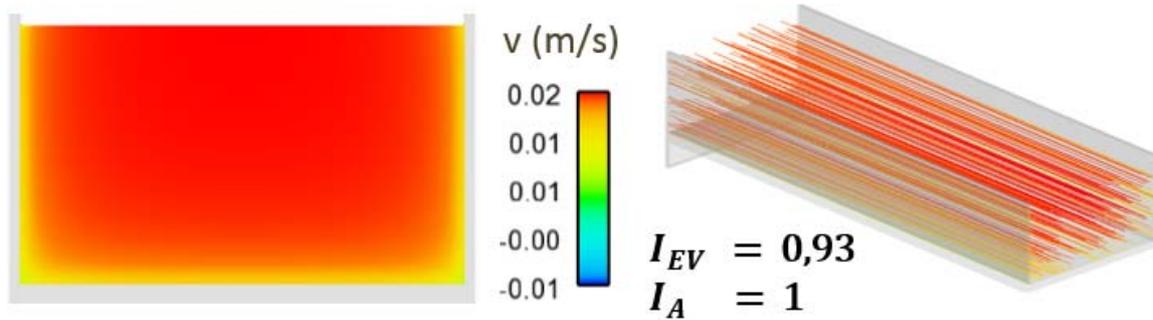


Bild 4.18: Durchströmungscharakteristik in einem idealisierten, rechteckigen Becken mit Pfropfenströmung; links: Konturplot der u-Geschwindigkeiten; rechts: Stromlinien beginnend im Einlauf

Ausnutzung des Beckenquerschnitts

Der Indikator I_A weist auf das Vorliegen von Rezirkulationszonen hin. Je höher der Anteil an Rezirkulationszonen im Becken ist, desto weniger Beckenvolumen wird aktiv von der Strömung genutzt. Das Phänomen ist untrennbar verknüpft mit dem Auftreten von Kurzschlussströmungen, welche die Partikel mit zu geringer Aufenthaltszeit zum Klärüberlauf führen, wo sie ausgetragen werden, da sie die schützende Grenzschicht auf der Sohle nicht erreichen konnten.

Tendiert I_A gegen 0, liegen große, negativ durchströmte Bereiche vor, wohingegen ein gegen 1 tendierender Indikator eine nahezu vollständig positive Durchströmung des Einlaufbereiches aufzeigt. Analog zu I_{EV} , ist auch I_A auf den Wertebereich 0 – 1 normiert.

$$I_A = 1 - \frac{A_{neg}}{A_{ges}} (-)$$

mit:

u_i	Fließgeschwindigkeit in Zelle i	(m/s)
u_h	mittlere Fließgeschwindigkeit gesamt	(m/s)
A_i	durchströmter Querschnitt in Zelle i	(m ²)
A_{ges}	durchströmter Querschnitt gesamt	(m ²)
A_{neg}	negativ durchströmter Querschnitt	(m ²)

I_A und I_{EV} werden auch auf der Kontrollfläche zwischen Sedimentationskammer und Klärüberlauf gebildet.

4.7.2 Sedimentationskammer

Die Güte der Durchströmung der Sedimentationskammer wird anhand der Einhaltung einer maximalen Horizontalgeschwindigkeit (Indikator I_u), der Größe des absetzwirksamen Volumens (Indikator I_v) sowie der Einhaltung einer Grenz-Schubspannung (Indikator $I_{\tau_{krit}}$) bewertet.

Je Indikator werden die Volumina oder auch Flächen von Bereichen, in denen sinnvoll definierte Grenzwerte der oben genannten Variablen unterschritten werden, aufintegriert. Zur Berechnung der entsprechenden Indikatoren wird das auf diese Weise berechnete Volumen mit dem Gesamtvolumen bzw. -fläche ins Verhältnis gesetzt. Folgende Indikatoren bewerten die Durchströmung der Sedimentationskammer:

Horizontalgeschwindigkeit:	absetzwirksames Volumen:	Grenz-Schubspannung:
$I_u = \frac{V_{u < u_h}}{V_{SeKa}} (-)$	$I_v = \frac{V_{v < maßg.v_s }}{V_{SeKa}} (-)$	$I_{\tau_{krit}} = \frac{A_{\tau < \tau_{krit}}}{A_{SeKa}} (-)$

mit:

V_{SeKa}	Volumen der Sedimentationskammer	(m^3)
A_{SeKa}	Grundfläche der Sedimentationskammer	(m^2)
$V_{u, Tl, v}$	jeweiliges Volumen, in dem der Grenzwert unterschritten wird	(m^3)
$A_{\tau_{krit}}$	Fläche, auf der die Grenz-Schubspannung unterschritten wird	(m^2)
u_h	Grenzwert der horizontalen Geschwindigkeit	(m/s)
v_s	Grenzwert der vertikalen Geschwindigkeit	(m/s)
τ_{krit}	kritische Schubspannung von AFS ₆₃	(N/m^2)

Einhaltung einer maximalen Horizontalgeschwindigkeit

Der **Indikator I_u** bewertet die Abweichung der horizontalen Fließgeschwindigkeit von der maximal nach DWA-A 166 [2013] vorgesehenen horizontalen Fließgeschwindigkeit von $0 < u_h \leq 0,05$ m/s im Becken. Dieser Indikator erlaubt insbesondere die Identifikation von Kurzschlussströmungen, deutet aber auch auf Rezirkulationszonen hin, da nur positiv durchströmte Bereiche in den Indikator einfließen.

Ausnutzung des gebauten Beckenvolumens bzw. Anteil des absetzwirksamen Volumens

Der **Indikator I_v** bewertet die vertikale Durchströmung der Sedimentationskammer und somit das tatsächlich absetzwirksame Volumen des Beckens. Überall dort, wo eine Aufwärtsströmung das Absinken der Körner bremst oder sogar ganz verhindert, befindet sich ungenutztes Beckenvolumen.

I_v ist so definiert, dass, neben allen abwärts durchströmten Bereichen, alle aufwärts durchströmten Bereiche, in denen die Aufströmgeschwindigkeit kleiner als der Grenzwert ist, in die Bewertung einfließen. Als Grenzwert der vertikalen Geschwindigkeit ist ein Wert von $v_v < 10$ m/h definiert. Dieser Wert entspricht ca. der nach Stokes bestimmten Sinkgeschwindigkeit eines Partikels mit einer Dichte von 2.650 kg/m^3 und einem Durchmesser von $63 \text{ }\mu\text{m}$. Diese Vorgehensweise entspricht derzeit noch der gängigen Praxis für die Definition der maximalen Oberflächenbeschickung, obwohl damit nur das Größtkorn der Ziel-Kornfraktion AFS_{63} erfasst, d.h. im Grenzfall abgeschieden wird.

Gewährleistung eines AFS_{63} -Schutzraums bzw. Einhaltung einer Grenz-Schubspannung

Im Gegensatz zu I_u und I_v bei denen das gesamte Volumen der Sedimentationskammer betrachtet wird, handelt es sich bei dem **Indikator I_{krit}** um einen Flächenindikator. Es wird der Anteil der Gesamtfläche auf der Beckensohle bestimmt, in dem die angreifende, aus der Strömung resultierende Schubspannung nicht ausreicht, um einen Partikel mit einer Dichte von 2.650 kg/m^3 und einem Durchmesser von $63 \text{ }\mu\text{m}$ zu remobilisieren. Die angesetzte kritische Schubspannung beträgt $\tau_{\text{krit}} = 0,17 \text{ N/m}^2$. Auch hier entspricht die Vorgehensweise derzeit noch der gängigen Praxis bei der Definition der maximalen Oberflächenbeschickung, obwohl damit nur das Größtkorn der Ziel-Kornfraktion AFS_{63} erfasst, d.h. im Grenzfall vor Remobilisierung geschützt wird. Der Grenzwert der stoffbezogenen Zielgröße wird auf $63 \text{ }\mu\text{m}$ festgelegt, da nach übereinstimmenden Untersuchungen an diesen Kornfraktionen der Hauptanteil der partikulär gebundenen Schadstoffe transportiert wird (DWA-A 102/BWK-A 3 [2016]).

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Physikalische Modellierung

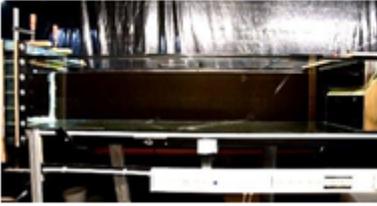
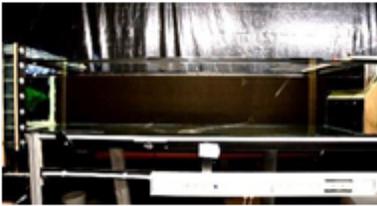
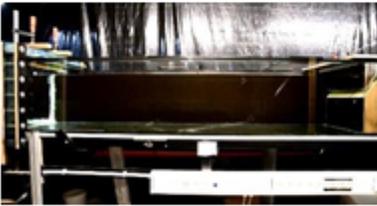
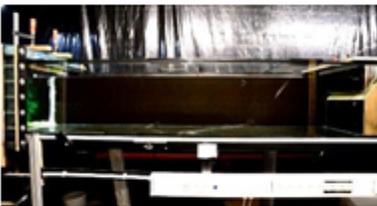
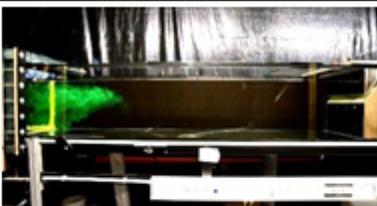
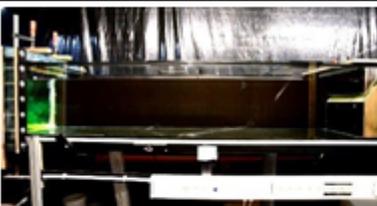
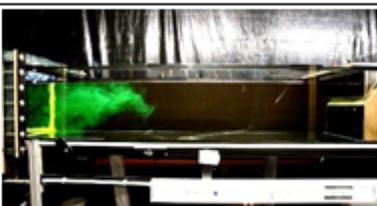
Im Folgenden wird zunächst die Durchströmung der Grundvariante ohne Einbauten und einer Variante, welche zusätzlich einen Prallteller im Einlaufbereich aufweist, mit Hilfe von Tracer (Uranin) visualisiert und anhand von Bilderserien verglichen.

Zusätzlich werden die Ergebnisse von Traceruntersuchungen der Grundvariante, einer Variante mit Prallteller sowie einer Variante mit Prallwand vergleichend dargestellt.

5.1.1 Visualisierung der Durchströmung

Es erfolgt ein optischer Vergleich der Durchströmungscharakteristik der Grundvariante (ohne Einbau) und der Variante mit Prallteller. Die in den nachfolgenden Tabelle 5-1 bis Tabelle 5-4 dargestellten Bilder dokumentieren die Durchströmung des Tracers im Becken. In den Abbildungen ist lediglich die Sedimentationskammer und der Klärüberlauf zu sehen, der Einlaufbereich inkl. Prallwand ist nicht mit abgebildet.

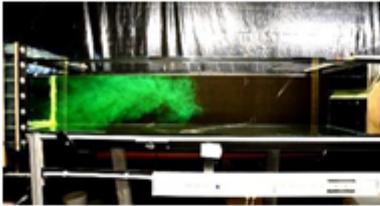
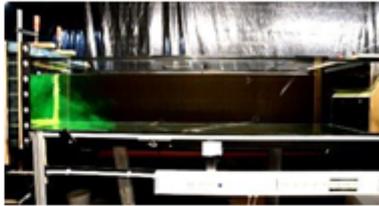
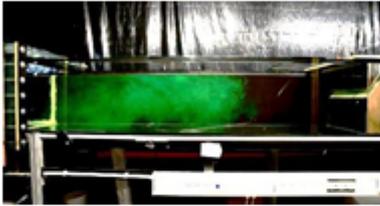
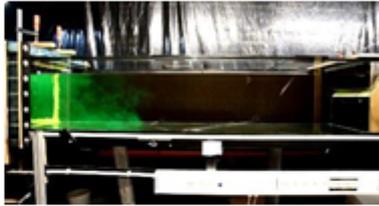
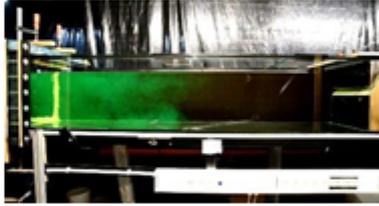
Tabelle 5-1: Visueller Vergleich der Grundvariante und der Variante mit Prallteller im Querschnitt, Minute 0:00 bis 0:20

Zeitstaffel [Minuten] + Fließrichtung	Querschnitt Grundvariante	Querschnitt Prallteller
0:00 ➔		
0:05 ➔		
0:10 ➔		
0:15 ➔		
0:20 ➔		

In der Grundvariante zeigt sich in den ersten 15 Sekunden ein schnellerer Tracereintritt im oberen Drittel der Wassertiefe. Dies wird durch die Anordnung des Zulaufes hervorgerufen, der sich im oberen Beckenbereich befindet. Im weiteren zeitlichen Verlauf gelangt auch in die unteren Zonen dispergierter Tracer.

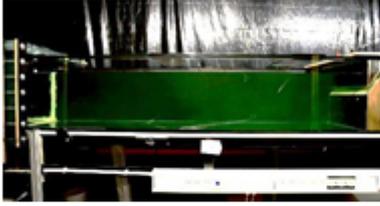
Für die Variante mit Prallteller ist hingegen ein verzögerter Eintritt im unteren bis mittleren Beckenbereich erkennbar.

Tabelle 5-2: Visueller Vergleich der Grundvariante und der Variante mit Prallteller im Querschnitt, Minute 0:30 bis 2:35

Zeitstaffel [Minuten] + Fließrichtung	Querschnitt Grundvariante	Querschnitt Prallteller
0:30 ➔		
0:45 ➔		
1:15 ➔		
1:55 ➔		
2:35 ➔		

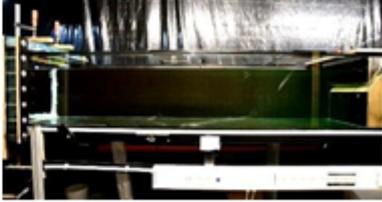
Die Strömung in der Grundvariante fällt im ersten Drittel des Beckens von der oberen Wasserzone in Richtung Beckensohle bogenartig ab (0:30) und bewegt sich dann über die Beckentiefe verteilt in Richtung Klärüberlauf fort. Durch den Einbau des Pralltellers breitet sich die Durchströmung zeitnah vom unteren Beckenbereich auf die gesamte Beckentiefe aus. Des Weiteren ist die zeitliche Verzögerung auch in Tabelle 5-2 deutlich zu erkennen.

Tabelle 5-3: Visueller Vergleich der Grundvariante und der Variante mit Prallteller im Querschnitt, Minute 3:15 bis 5:55

Zeitstaffel [Minuten] + Fließrichtung	Querschnitt Grundvariante	Querschnitt Prallteller
3:15 ➔		
3:55 ➔		
4:35 ➔		
5:15 ➔		
5:55 ➔		

Im weiteren Versuchsverlauf ist in der Grundvariante bereits eine große Tracermenge ausgetragen, wohingegen sich bei der Variante mit Prallteller noch der Großteil des Tracers im Becken befindet. Dies ist auf eine bessere Beckenausnutzung und geringere Fließgeschwindigkeiten zurückzuführen.

Tabelle 5-4: Visueller Vergleich der Grundvariante und der Variante mit Prallteller im Querschnitt, Minute 6:35 bis 9:15

Zeitstaffel [Minuten] + Fließrichtung	Querschnitt Grundvariante	Querschnitt Prallteller
6:35 ➔		
7:15 ➔		
7:55 ➔		
8:35 ➔	Keine Aufnahme vorhanden	
9:15 ➔	Keine Aufnahme vorhanden	

Zudem wird der Tracer durch den Einsatz eines Pralltellers gleichmäßiger am Klärüberlauf ausgetragen.

5.1.2 Auswertung der Tracerversuche

Neben der visuellen Auswertung der Durchströmungscharakteristik mit Hilfe des Tracers wird die Verweilzeitverteilung ausgewertet. Hierdurch können weitere Rückschlüsse auf die Durchströmung (Pfropfenströmung, Kurzschlussströmung) des Beckens getroffen werden. Je Variante wurden mehrere Reproduktionsversuche durchgeführt.

5.1.2.1 Grundvariante

Die in Bild 5.1 abgebildete Tracer-Ganglinie der Grundvariante steigt zu Beginn sehr stark an bis sie einen hohen Peak erreicht. Der obere Kurvenverlauf ist spitz und kurzläufig ausgebildet. Der Ablauf verläuft leicht wellenförmig und in den ersten zwei Dritteln etwas schwächer abfallend als im Anstieg. Das letzte Drittel ist sehr langgezogen (Tailing).

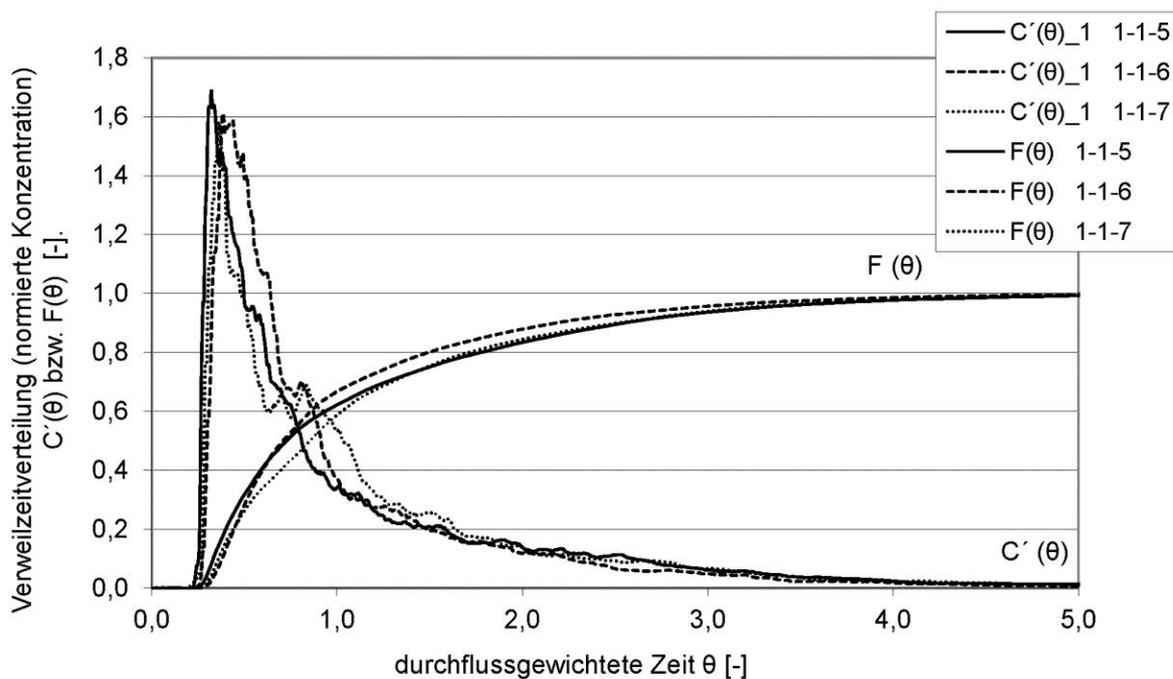


Bild 5.1: Verweilzeitverteilung der Grundvariante

Der starke Anstieg der Ganglinie $C'(\theta)$ zu Beginn ist ein Indiz für eine Kurzschlussströmung im Becken. Dies bestätigt auch die Beobachtungen der Durchströmungscharakteristik mittels im vorangegangenen Kapitel. 5.1.1. Das „Flattern“ des abfallenden Astes der Tracerganglinie mit den schwach ausgeprägten Peaks deuten auf „Konzentrationswolken“ hin, die durch Rezirkulationen im Becken sukzessive zum Klärüberlauf geführt werden. Dies wird durch die Darstellungen in Bild 5.2 bestätigt. Die dort eingezeichneten Pfeile visualisieren die Strömungsrichtungen, wodurch vor allem das Vorhandensein von Rezirkulationen verdeutlicht wird.



Bild 5.2: Momentaufnahme des Tracerversuchs der Grundvariante in der Draufsicht

Der in Bild 5.1 in der Summenkurve $F(\theta)$ dargestellte Verlauf deutet in Betracht des θ_{10} auf eine Kurzschlussströmung hin. Liegt der Wert für θ_{50} im Bereich von $\theta = 1,0$, wird das untersuchte Becken optimal ausgenutzt. Für die Grundvariante lässt der Wert von θ_{50} bei etwa $\theta = 0,7$ auf eine nicht optimale Beckenausnutzung schließen. Dies ist auf mögliche Rezirkulationszonen zurückzuführen (siehe Bild 5.2), die Levenspiel [2011] ebenfalls beschreibt.



Bild 5.3: Momentaufnahme des Tracerversuchs der Grundvariante im Querschnitt

Eine konzentrierte Beckendurchströmung im oberen Beckenbereich, mit nur schwacher Dispersion des Tracers in die Randbereiche, weist auf eine Kurzschlussströmung hin und bestätigt die Annahme von Rezirkulationszonen im Modellbecken. Des Weiteren konnten vereinzelte Wirbelbildungen, wie in Bild 5.3 abgebildet, im unteren Beckenbereich identifiziert werden.

5.1.2.2 Prallteller

Im Vergleich zur Ganglinie der Grundvariante zeigt die Ganglinie bei Einbau des Pralltellers (drei Positionen mit jeweils drei Reproduktionen) einen relativ gleichmäßigen Anstieg. Wie in Bild 5.4 abgebildet, ist zudem der Peak der Ganglinie vergleichsweise abgeflacht, das Abklingen der Kurve verläuft eher wellenförmig.

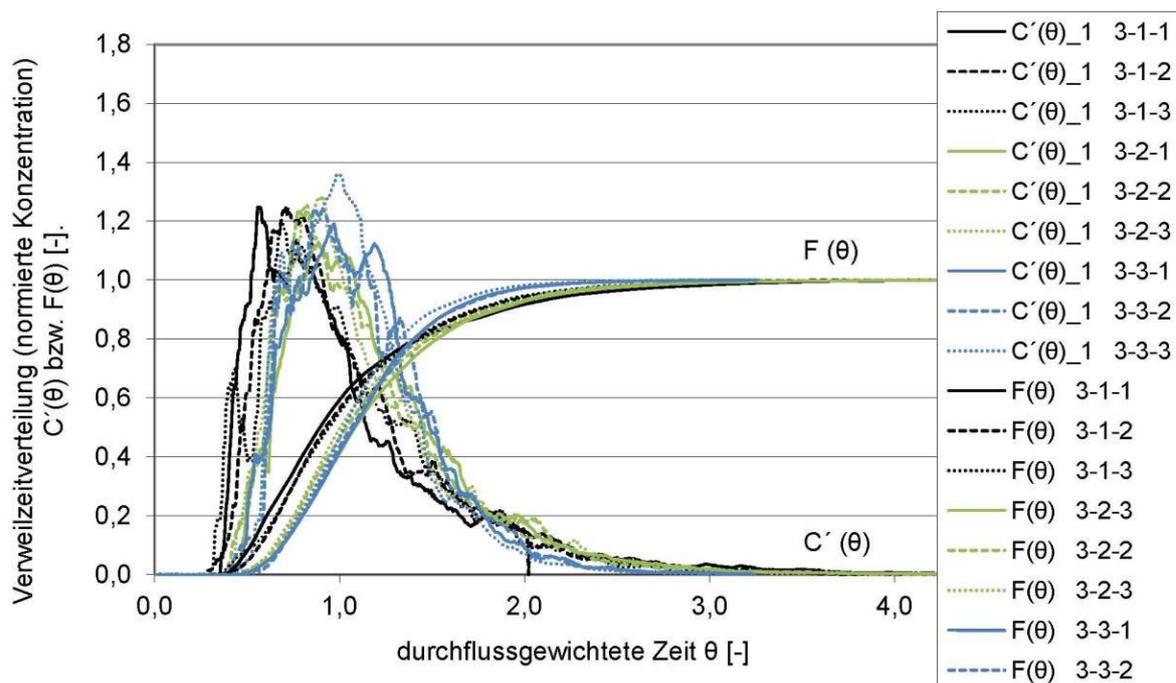


Bild 5.4: Verweilzeitverteilung der Versuchsreihe Prallteller

Die Indikatoren $\theta_{\text{Beginn}} = 0,43$, $\theta_{\text{Dom}} = 1,00$ (= ideale Pfropfenströmung), das $\theta_{10} = 0,68$ und die Differenz von $\theta_{75} - \theta_{25}$ mit einem Wert von 0,43 deuten auf eine pfropfenartige Durchströmung hin. Der Peak mit einem Wert von etwa 1,2 deutet ebenfalls auf dieses Strömungsverhalten hin.

Die Auswertung der Filmaufnahme, siehe Bild 5.5, gibt parallele Strömungen im Beckenverlauf an. Diese sind eher linksseitig und mittig im Becken ausgebildet, jedoch dispergiert die Konzentration in die Randbereiche. Dennoch sind aufgrund dieses Strömungsbildes konzentrationsfreie Bereiche vorhanden (Rezirkulation), die für die mehrfachen Peaks im oberen Kurvenverlauf verantwortlich sind, denn durch die Rezirkulationszone wird der abflusswirksame Fließquerschnitt verringert, wodurch die horizontalen Fließgeschwindigkeiten erhöht werden.

Bild 5.5 zeigt eine gerichtete, jedoch leicht asymmetrisch nach links tendierende Strömung über die gesamte Länge des Beckens. Die Konzentration des Tracers dispergiert jedoch teilweise im Becken auch Bereiche mit einer sehr geringen Tracerkonzentration vorhanden.

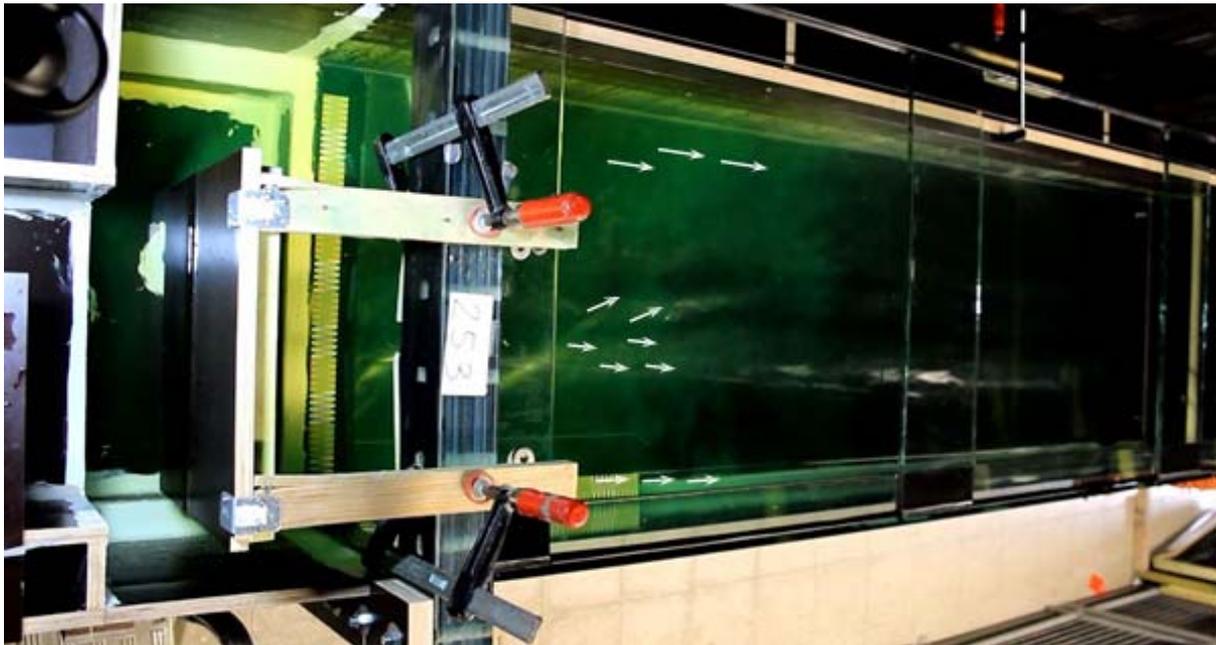


Bild 5.5: Momentaufnahme des Tracerversuchs des Pralltellers in der Draufsicht

Der θ_{50} mit einem Wert von 1,02 widerlegt jedoch die o.g. Aussage. Ein Wert nahe 1,00 weist auf eine optimale Ausnutzung des Beckens hin und schließt somit das Vorliegen von Rezirkulationszonen im Becken aus. Im hinteren Bereich des Beckens stellen sich zwar nur wenige Rezirkulationszonen ein, in denen kein Tracer zu beobachten ist, jedoch zeigt eine weitere Auswertung der Filmaufnahme, dass die Verteilung des Tracers nicht regelmäßig ist sondern unterschiedliche Konzentrationsstärken vorliegen, die durch den wellenförmigen Abklang der Kurve bestätigt wird.

Insbesondere die Unterströmung des Pralltellers führt zu einer ungleichmäßigen Verteilung des Tracers über die Höhe des Beckens (Bild 5.6).

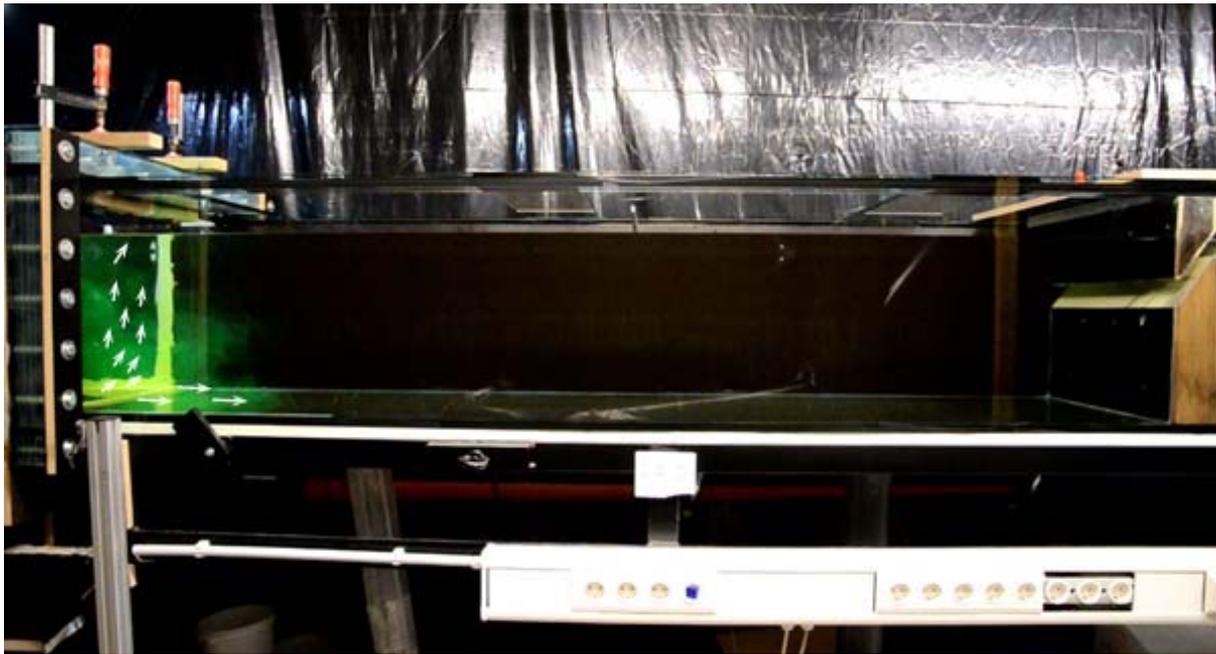


Bild 5.6: Momentaufnahme des Tracerversuchs des Pralltellers im Querschnitt

Bild 5.6 zeigt dieses Strömungsverhalten. Des Weiteren sind eine Wirbelbildung am Ende des Pumpensumpfes, sowie die Bildung schwacher Wirbel in der Hauptströmung erkennbar.

5.1.2.3 Prallwand

Bild 5.7 zeigt den gemessenen Verlauf der Tracerganglinie an zwei unterschiedlichen Positionen im Becken mit jeweils drei Reproduktionen. Der Anstieg der Tracerkurven verläuft zu Beginn relativ gleichmäßig. Noch bevor die Ganglinie jedoch ihren absoluten Peak erreicht, ist ein Versatz bzw. ein sekundärer Peak zu beobachten. Der primäre Peak ist eher flach ausgebildet. Der abfallende Ast der Ganglinie verläuft langgezogen und eher mäßig abfallend.

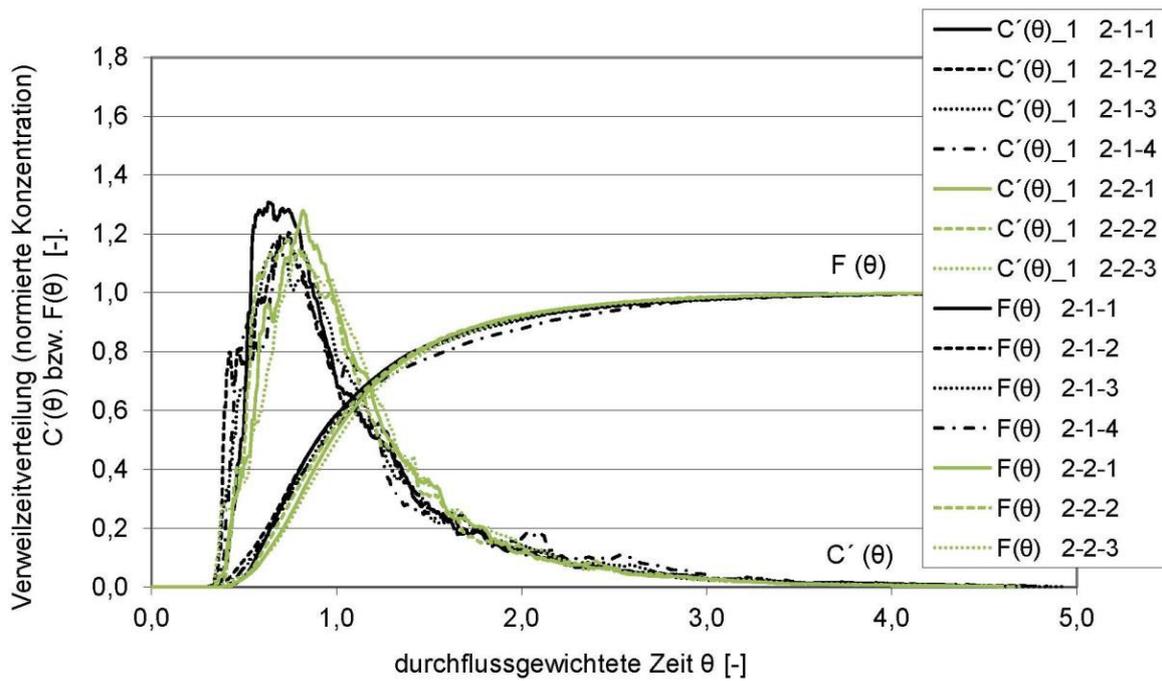


Bild 5.7: Verweilzeitverteilung der Versuchsreihe Prallwand

Der Versatz der Ganglinie von θ_{Beginn} bis θ_{Dom} ist in der Filmaufnahme der Tracerversuche ebenfalls zu beobachten. Ein erster Teil des Tracers gelangt seitlich an der Prallwand entlang in das Becken. Ein Wirbel vor der Prallwand zieht einen weiteren Teil der Konzentration zur Sohle des Pumpensumpfes und sorgt somit für eine verzögerte Weiterleitung in das Becken. Der Ausschnitt der Filmaufnahme in Bild 5.8 zeigt die rückgeführte Tracerkonzentration im Pumpensumpf durch den Wirbel.



Bild 5.8: Momentaufnahme des Tracerversuchs im Becken mit Prallwand in der Draufsicht

Das lange Abklingen der Tracerkurve nach Erreichen des Peaks wird durch die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und durch die Wirbelbildung im Becken hervorgerufen. Die Auswertung des θ_{10} mit einem Wert von 0,60 ist kein eindeutiges Zeichen für eine sedimentationsgünstige Pfropfenströmung, aber auch nicht für eine Kurzschlussströmung. Auch wenn die Tendenz in Richtung $\theta = 1,0$ des θ_{Dom} mit $\theta = 0,82$ für eine mögliche Pfropfenströmung sprechen würde, wird dies durch weitere Parameter (z.B. $\theta_{75} - \theta_{25}$) und der Filmauswertung nicht bestätigt. Die Strömung wird an der Prallwand vorbei geleitet und ordnet sich kurz hinter dieser mittig im Becken an. Eine weit ausgedehnte Rezirkulationszone bildet sich im Unterstrom der Prallwand aus. Im weiteren Beckenverlauf sind Wirbelbildungen erkennbar. Weitere Wirbelbildungen sind im Querschnitt der Filmaufnahme vor allem im ersten Drittel des Beckens erkennbar.

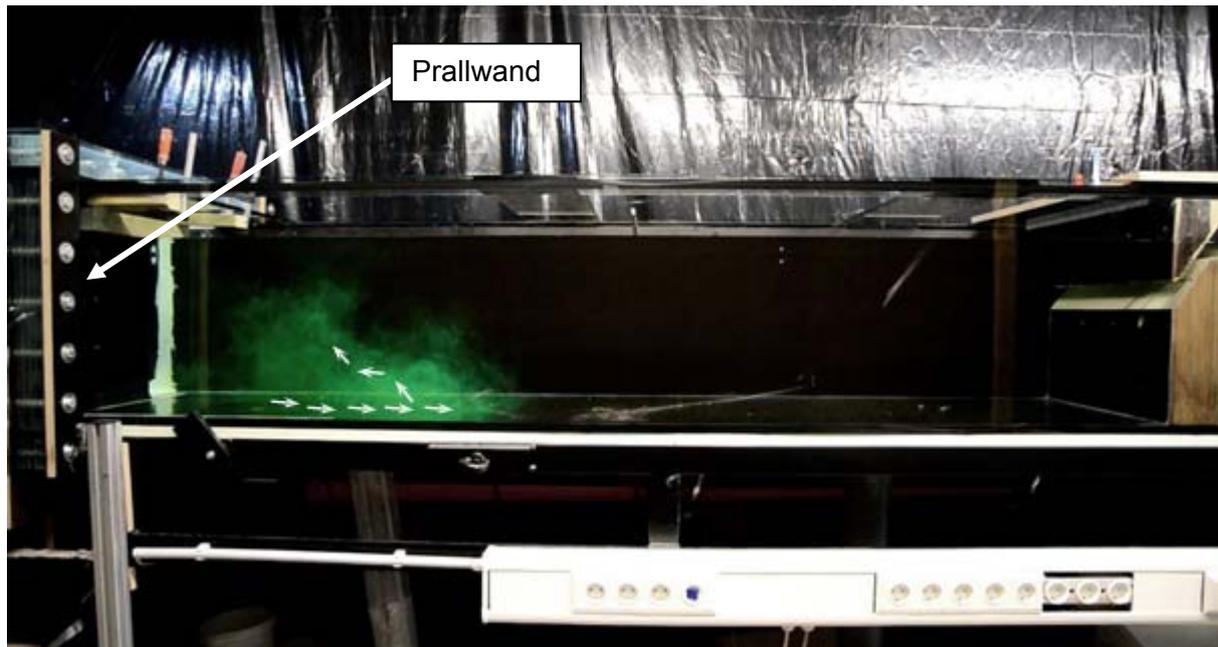


Bild 5.9: Momentaufnahme des Tracerversuchs der Prallwand im Querschnitt

Infolge der Umströmung der Prallwand bilden sich räumliche Rezirkulationen aus, wie in Bild 5.9 schematisch durch die eingezeichneten Pfeile angedeutet ist. Des Weiteren dispergiert die Konzentration in den oberhalb gelegenen Zonen. Dort wird der Tracer zeitverzögert in den Gesamtstrom aufgenommen und zum Ablauf geleitet.

Die Strömung im Sohlbereich verläuft hingegen relativ gleichmäßig in Richtung Ablauf.

Ab etwa der Mitte des Beckens vereinigen sich beide Teilströme etwa auf halber Höhe des Wasserstandes. Dies entspricht in etwa der Höhe des Klärüberlaufes.

5.1.3 Grafische Zusammenfassung und Vergleich

In Bild 5.10 findet ein Vergleich der Verweilzeitverteilungen der Grundvariante, des Pralltellers sowie der Prallwand statt.

Die Tracer-Ganglinie der Grundvariante ist geprägt durch einen früh beginnenden Austrag des Tracers, einen sehr steilen Anstieg und einem zunächst steilen dann aber flachen, langgezogenen Abstieg (Tailing). Durch den Einbau einer Prallwand wird erst zu einem späteren Zeitpunkt Tracer im Ablauf gemessen. Der Anstieg der Ganglinie verläuft ähnlich steil wie der der Grundvariante, wobei die Spitze einen deutlich breiteren Verlauf im Bereich der Maxima besitzt. Die Maximalwerte weisen allerdings geringere Werte auf ($F(\theta) = 1,3$ für die Prallwand und $F(\theta) = 1,6$ für die Grundvariante). Der hohe Maximalwert der Grundvariante deutet auf einen sehr stark konzentrierten Traceraustrag und die damit verbundene Kurzschlussströmung hin. Diese Erkenntnis wird durch den θ_{Dom} -Wert von 0,38 der Grundvariante, welcher auf eine nicht optimale Ausnutzung des Beckenvolumens deutet, bestätigt. Der θ_{Dom} der Prallwand mit einem Wert von 0,81 zeigt, dass das Becken durch den Einbau der Prallwand schon deutlich besser ausgenutzt wird.

Im Vergleich zur Prallwand wird durch den Einbau eines Pralltellers erst zu einem späteren Zeitpunkt Tracer im Auslauf detektiert. Die Ganglinie des Pralltellers besitzt im Gegensatz zu der der Grundvariante und der der Prallwand ein deutlich kleineres Tailing. Der θ_{Dom} -Wert von 1,0 weist auf eine nahezu pfropfenartige Durchströmung des Beckens hin.

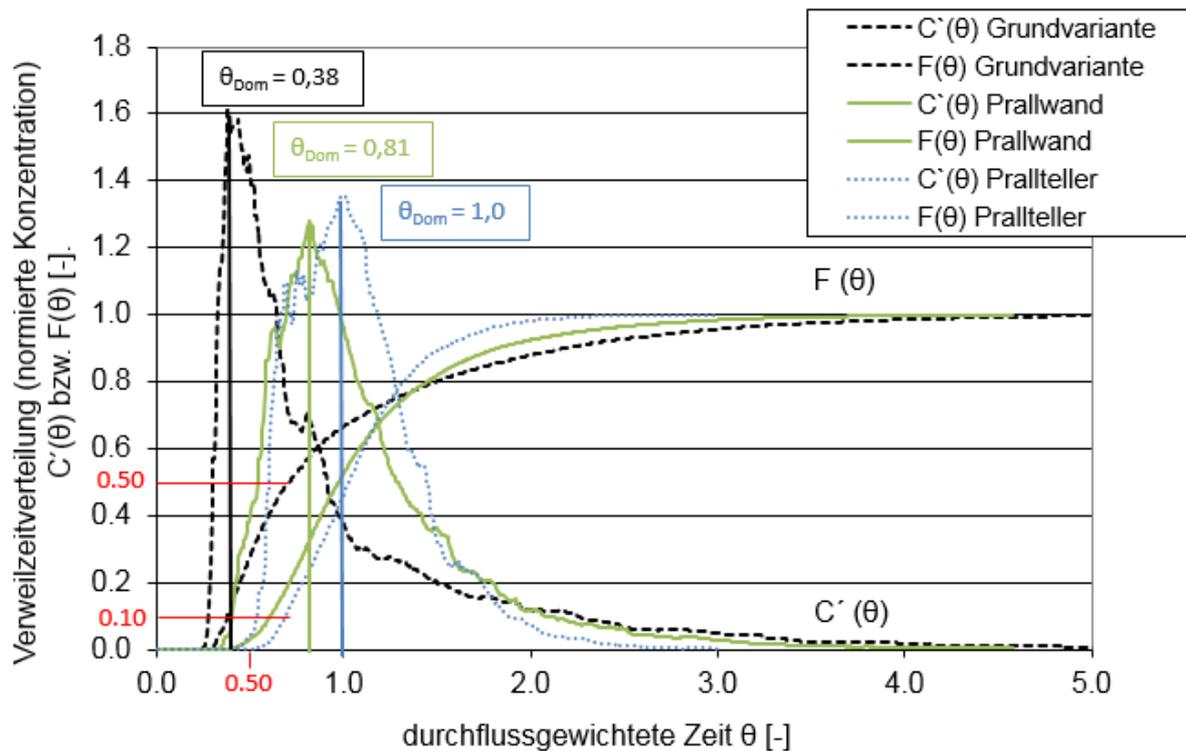


Bild 5.10: Vergleich der Verweilzeitverteilung der Grundvariante, des Pralltellers und der Prallwand

Durch die in der physikalischen Modellierung durchgeführten Versuche konnten erste Hinweise zur strömungstechnischen Wirkung der einzelnen Einbauten gewonnen werden. Zunächst kann festgehalten werden, dass die Grundvariante aufgrund der geringen Indikatoren und der visuellen Beobachtung (Kapitel 5.1.1) deutliche Defizite in Bezug auf die Durchströmung und damit auf den Sedimentationswirkungsgrad aufweist. Der Prallteller weist im Vergleich zur Prallwand bessere Indikatoren auf, allerdings wird die Wirkung der Prallwand in der visuellen Beobachtung besser bewertet als die des Pralltellers, sodass sich durch die physikalischen Versuche durchaus widersprüchliche Aussagen ergeben. Deshalb wurden die gewonnenen Datensätze der physikalischen Modellierung für die Validierung des numerischen Modells verwendet, um im numerischen Modell detailliertere Untersuchungen durchführen und Eindeutigere Aussagen über die strömungstechnische Wirkung der einzelnen Einbauten zur Optimierung gewinnen zu können.

5.2 Validierung der numerischen Simulation

Zur Validierung der numerischen Simulation ist eine Geometrie für das numerische Modell mit den Abmessungen des in Kapitel 4.2.3 beschriebenen physikalischen Modells der Grundvariante erstellt worden. Gleichsam den Laborversuchen wurden die Durchströmung eines gelösten Tracers im numerischen Modell simuliert und mit Hilfe der Verweilzeitverteilung (vgl. Kapitel 5.1.2) ausgewertet. Die für das numerische Modell verwendeten Einstellungen, Teilmodelle und Randbedingungen sind in Kapitel 4.4.1 erläutert.

In Bild 5.11 sind die Ergebnisse des Laborversuches und der numerischen Simulation gegenübergestellt. Aus der Gegenüberstellung lässt sich eine gute Übereinstimmung des Experimentes mit der Simulation erkennen. Sowohl der Zeitpunkt des ersten Tracerauftrittes am Klärüberlauf, als auch der Auftrittszeitpunkt und die Höhe des Peaks werden durch das Simulationsmodell sehr gut modelliert. Ferner wird auch das Tailing durch die Simulation mit einer guten Genauigkeit abgebildet.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Simulationsmodell die im physikalischen Modell vorliegende Durchströmung sehr gut repräsentiert und daher für die im Folgenden vorgestellten Simulationen verwendet werden kann.

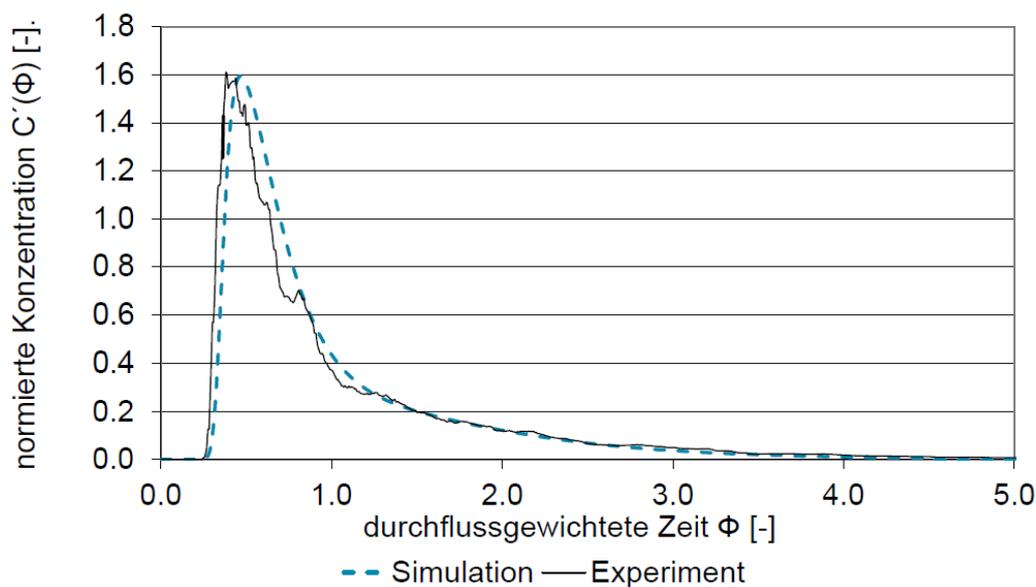


Bild 5.11: Gegenüberstellung der Verweilzeitverteilung Simulation und Experiment

5.3 Gitternetzstudie

Für das Einlaufbauwerk wurde eine Gitternetzstudie mit drei unterschiedlich aufgelösten Gitternetzen durchgeführt. Die Netzstudie wurde für die Grundvariante des außermittigen Gerinneeinlaufs durchgeführt. Die Größe und Anzahl der Zellen kann der Tabelle 5-5 entnommen werden.

Tabelle 5-5: Angaben zum numerischen Gitter der Netzstudie (Einlaufbauwerk)

Netz	Zellgröße [cm]	Zellanzahl	Simulationsdauer
grob	x; y; z 7,5; 7,5; 7,5	114.227	ca. 0,5 h
mittel	x; y; z 5,0; 5,0; 5,0	384.227	ca. 6,0 h
fein	x; y; z 2,5; 2,5; 2,5	3.073.816	ca. 30 h

Bild 5.12 zeigt das Gitternetz mit einer Zellgröße von 5,0 cm für die Optimierung 2 des außermittigen Gerinneeinlaufs.

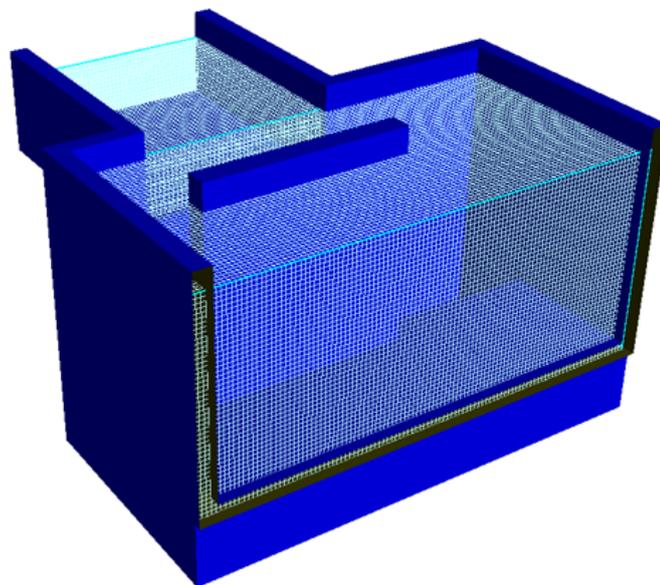


Bild 5.12: Darstellung des Gitternetzes mit einer Zellgröße von 5 cm in Flow3D

Wie in Bild 5.13 zu erkennen ist, besteht zwischen dem groben und dem mittleren Gitternetz sowohl in den horizontalen Fließgeschwindigkeiten (Konturplot) als auch in den Indikatoren noch nennenswerte Unterschiede. Zwischen dem mittleren und dem feinen Gitternetz werden diese Unterschiede deutlich geringer. Im Hinblick auf die deutlich höheren Simulationsdauern

bei Verwendung des feinen Netzes, wird für die nachfolgenden Optimierungsstudien ein Gitternetz mit einer Zellgröße von 5 cm gewählt.

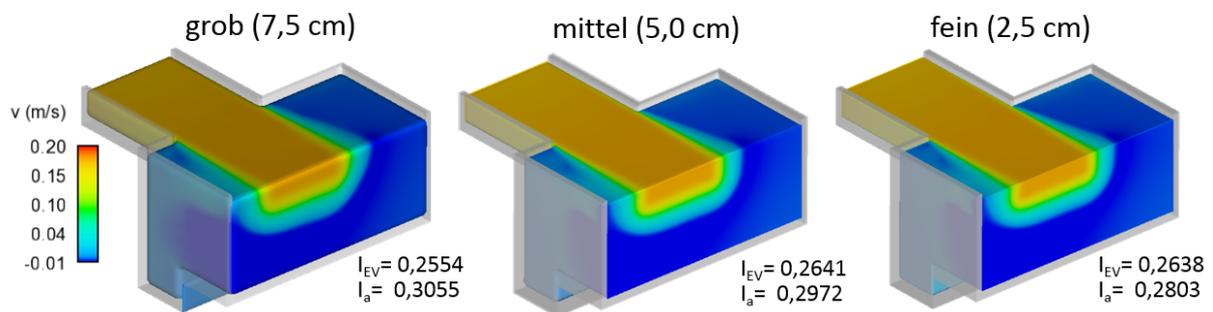


Bild 5.13: Konturplot der u-Geschwindigkeiten und Strömungsindikatoren für unterschiedlich fein aufgelöste Gitternetze

5.4 Numerische Optimierungsstudien der ausgewählten Regenbecken

Die Optimierung der einzelnen Komponenten eines Regenbeckens erfolgt ausschließlich im validierten numerischen Modell. Alle in diesem Kapitel dargestellten Grafiken entstammen der numerischen Simulation.

In Bild 5.14 sind die vier untersuchten Einlaufbauwerke dargestellt. Diese können prinzipiell in longitudinale (beckenparallele) und transversale (zur Beckenfließrichtung) Einlaufbauwerke unterschieden werden. Zu den beckenparallelen Einläufen gehören der Gerinneeinlauf, der Rohreinlauf und der Einlauf nach DWA-T3. Der transversale Einlauf ist ein tiefliegendes Rohr.

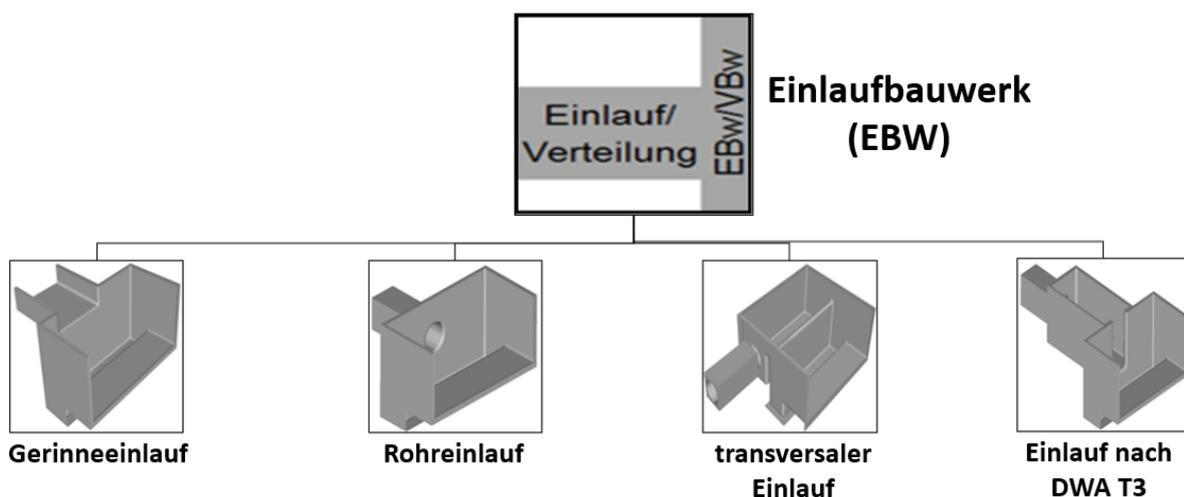


Bild 5.14: Untersuchte Einlaufkonstruktionen

Die im Folgenden beschriebenen Einbauten zur Optimierung wurden mit der maximalen hydraulischen Belastung beschickt, demnach einer Oberflächenbeschickung von 10 m/h. Die Simulationszeit beträgt 1.000 s (instationäre Simulation bei gleichzeitig konstantem Zufluss). Nach

einer Simulationszeit von 1.000 s hat sich in allen Simulationen ein stationärer Strömungszustand eingestellt. Ein Großteil der Varianten wurde zusätzlich mit einer geringeren Oberflächenbeschickung von 4 m/h simuliert. Da sich durch die geringe Oberflächenbeschickung jedoch die grundlegende Durchströmungscharakteristik nicht ändert und auch die Indikatoren keine nennenswerten Änderungen aufweisen (siehe Kap. 5.4.1, Optimierung 6), werden hier ausschließlich Konturplots und Strömungsindikatoren für eine Oberflächenbeschickung von 10 m/h aufgezeigt. Dies bedeutet nicht, dass eine geringere Oberflächenbeschickung gegenüber einer hohen keine Vorteile bezüglich der Sedimentationsleitung aufweisen, sondern nur, dass sich die grundlegende Durchströmung nicht ändert, die Fließgeschwindigkeiten sind aber trotzdem vergleichsweise geringer und somit auch die theoretische Aufenthaltszeit.

Insgesamt wurden im Rahmen der Optimierung aller Einlaufbauwerke etwa 230 Simulationen durchgeführt. Die bevorzugten Einbauten zur Optimierung jeder Zulaufkonstruktion werden in einem Optimierungskatalog einschließlich Bewertung zusammengefasst (siehe Anlage 1).

5.4.1 Einlaufbauwerk (beckenparallel)

Bei den beckenparallelen Einlaufbauwerken wurden drei verschiedene Zulaufkonstruktionen untersucht. Dies sind der Gerinneeinlauf, der Rohrzulauf und der Zulauf nach DWA T3. Für jede dieser drei Varianten wurden jeweils ein mittiger und ein außermittiger Zulauf betrachtet. Der transversale Einlauf wird in Kap. 5.4.2 beschrieben.

Zunächst wurde der mittige Gerinneeinlauf optimiert. Für diesen wurden insgesamt sechs konstruktiv unterschiedliche Optimierungen vorgenommen.

5.4.1.1 Gerinneeinlauf (mittig)

Bild 5.15 gibt eine Übersicht über die für den mittigen Gerinneeinlauf untersuchten Optimierungen. Es werden die klassischen Einbauten wie Prallteller (Optimierung 1) und Prallwand (Optimierung 2) untersucht. Darüber hinaus werden Einbauten wie ein Reflektor (Optimierung 3), eine Lamellenwand (Optimierung 4) und horizontale Leitbleche (Optimierung 5) strömungstechnisch untersucht. Des Weiteren wird ein Strömungs-Gleichrichter simuliert (Optimierung 6).

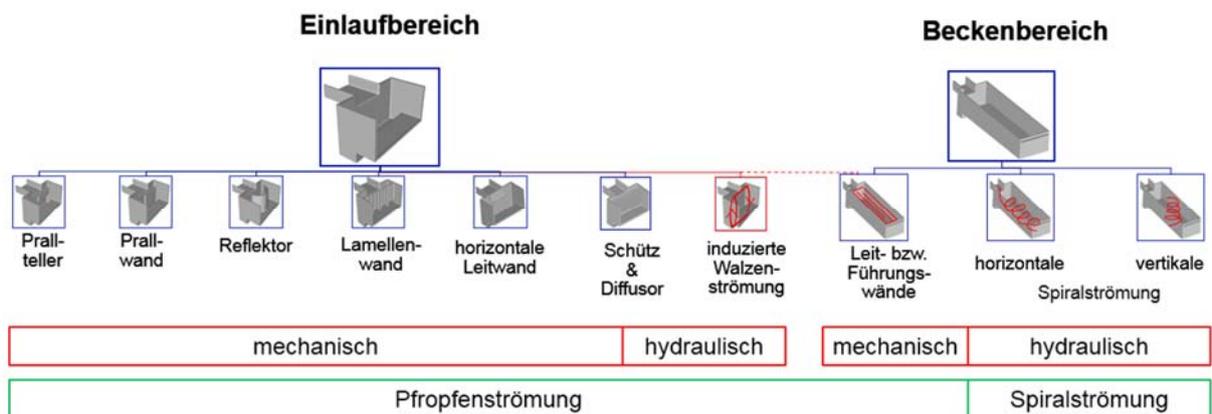


Bild 5.15: Überblick der untersuchten Optimierungen für den mittigen Gerinneeinlauf

Grundvariante

Die geometrischen Abmessungen der Grundvariante für den mittigen Gerinneeinlauf sind in Kapitel 4.4.2.1 beschrieben. Die sich im Bereich des Einlaufes ausbildende Durchströmung ist in Bild 5.16 mittels Konturplot der u -Geschwindigkeiten visualisiert.

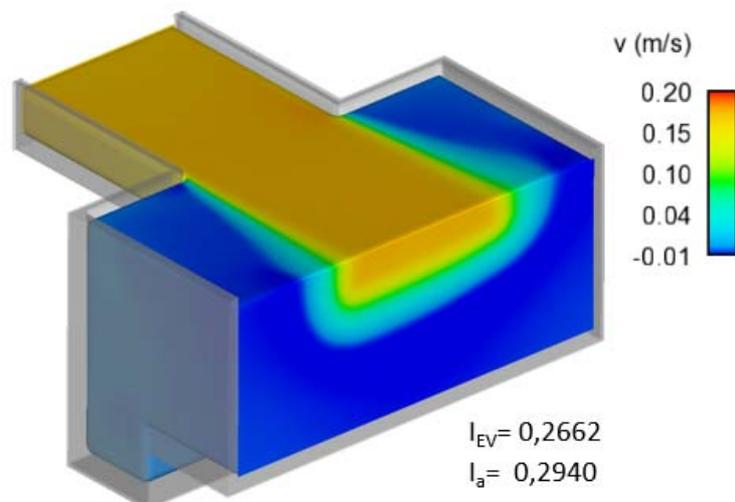


Bild 5.16: Konturplot der u -Geschwindigkeiten der Grundvariante (beckenparallel, mittig)

Anhand des Konturplots zeigt sich eine deutliche Kurzschlussströmung nahe des Wasserspiegels infolge der Einlaufkonstruktion. Hierdurch wird zwar die Beckensohle vor Remobilisierung geschützt, Absetzvorgänge werden hingegen durch den Einlauf-Jet und die großräumigen Rückströmungszonen (dunkelblau dargestellt) maßgeblich gestört. Dies zeigt sich auch in den niedrigen Werten der Strömungsindikatoren.

Aus der Visualisierung der Durchströmungscharakteristik sowie auch aus den berechneten Indikatoren lässt sich Optimierungspotenzial ableiten.

Optimierung 1: Prallteller

In Bild 5.17 ist die Durchströmungscharakteristik der Variante mit Prallteller gezeigt, welche die höchsten Werte der Strömungsindikatoren aufweist. Der Abstand des Pralltellers zum Zulauf beträgt das Fünffache des hydraulischen Radius des Zulaufes ($5 \cdot r_{hy}$). Die Breite des Pralltellers beträgt $7,3 \cdot r_{hy}$, die Eintauchtiefe beträgt $2,2 \cdot r_{hy}$. Der Prallteller kann seitlich umströmt und auch unterströmt werden.

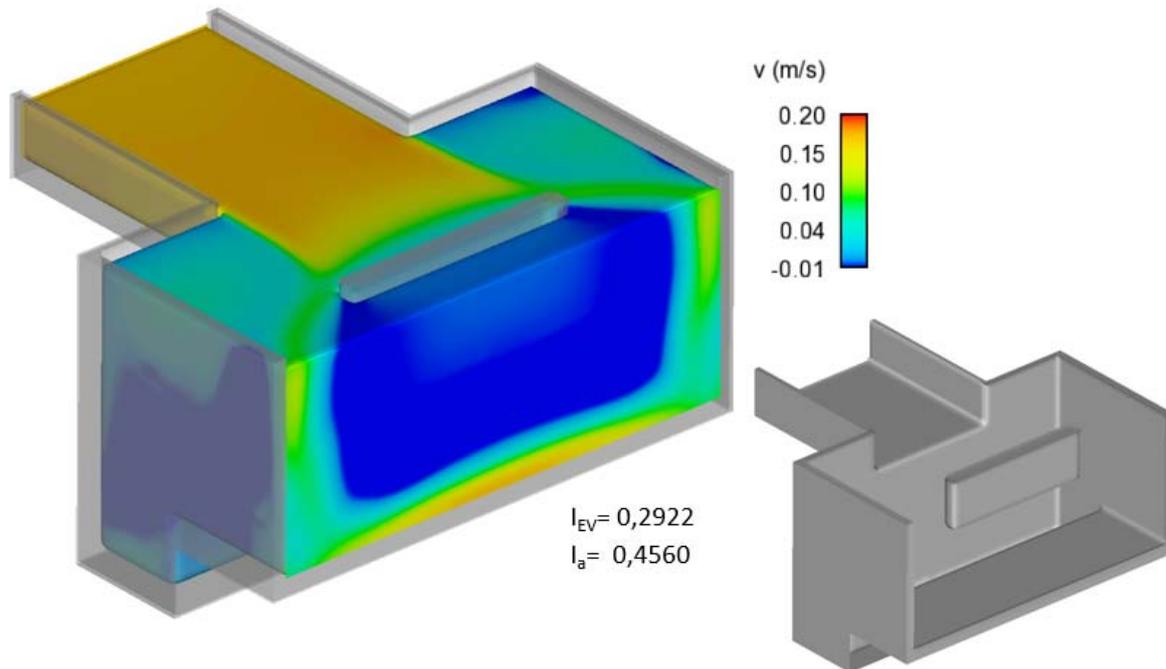


Bild 5.17: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 1 des mittigen Gerinneeinlaufs

Infolge der Unterströmung des Pralltellers resultieren hohe Geschwindigkeiten (max. 0,28 m/s) auf der Beckensohle. Hierdurch besteht die Gefahr, dass bereits abgelagertes Sediment remobilisiert und auch die Sedimentation gestört wird. Ferner entsteht hinter dem Prallteller eine weit ausgedehnte Rezirkulation, welche dem abflusswirksamen Querschnitt nicht zur Verfügung steht. Das Entstehen von Rezirkulationszonen infolge von Verblockungen des Fließquerschnitts deckt sich u.a. auch mit den Untersuchungen von Jamshidnia/Firoozabadi [2010]. Anhand der Indikatoren wird deutlich, dass durch den Einbau eines Pralltellers nur sehr geringe Verbesserungen gegenüber dem Ist-Zustand erzielt werden.

Neben der in Bild 5.17 abgebildeten Konfiguration wurden weitere Konfigurationen mit unterschiedlichem Abstand zum Zulauf untersucht. Der Abstand von $5 \cdot r_{hy}$ erzielt leicht bessere Indikatoren als die Abstände von 3 bzw. $4 \cdot r_{hy}$ (vgl. Bild 5.18).

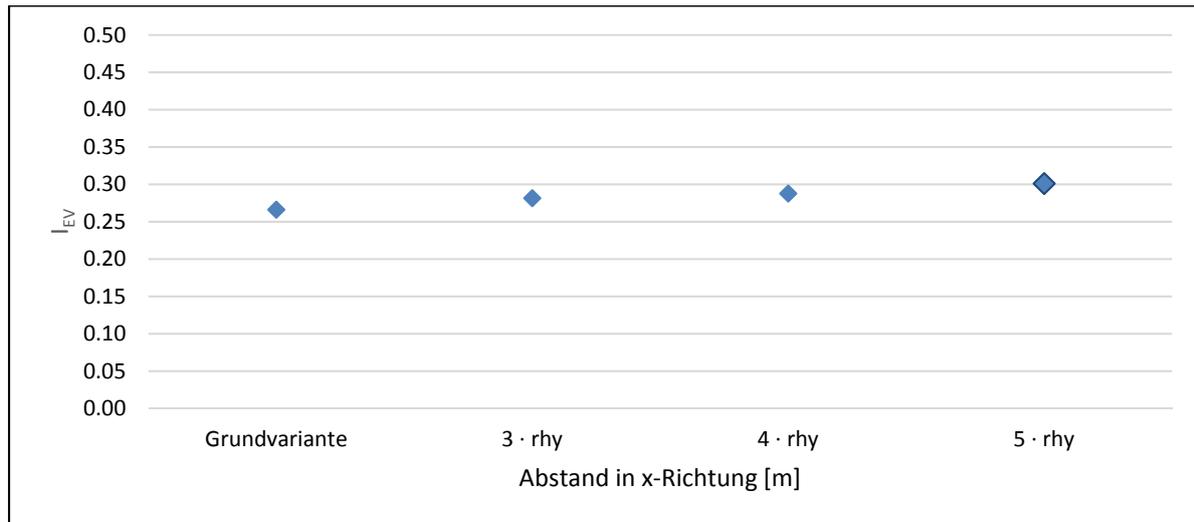


Bild 5.18: Übersicht aller untersuchten Pralltellerkonfigurationen

Optimierung 2: Prallwand

Für die Prallwand wurden insgesamt 15 Simulationen durchgeführt. Die einzelnen Varianten unterscheiden sich in der Breite der Prallwand. Die Lage der Prallwand wurde fest gewählt, da angenommen wurde, dass aus betrieblichen Gründen (Verhalten bei Spülung) nur eine Position der Prallwand direkt am Übergang vom Pumpensumpf in die Beckensohle akzeptabel ist. Bei einer weiter im Becken liegenden Position würde beim Spülen eine Totzone entstehen, in welcher der Schlamm nicht geräumt würde. In Bild 5.19 findet sich eine Darstellung der berechneten Indikatoren I_{EV} aller untersuchten Varianten. Sind 27 % Fließquerschnitt durch die Prallwand verblockt, so ist ein klares Optimum des Indikators I_{EV} zu erkennen. Dies entspricht einer Prallwandbreite von 1,33 m ($\sim 3 \cdot r_{hy}$, bezogen auf den Zulauf). Die Prallwand ist dennoch deutlich schmaler als die Breite des Einlaufs (2,15 m).

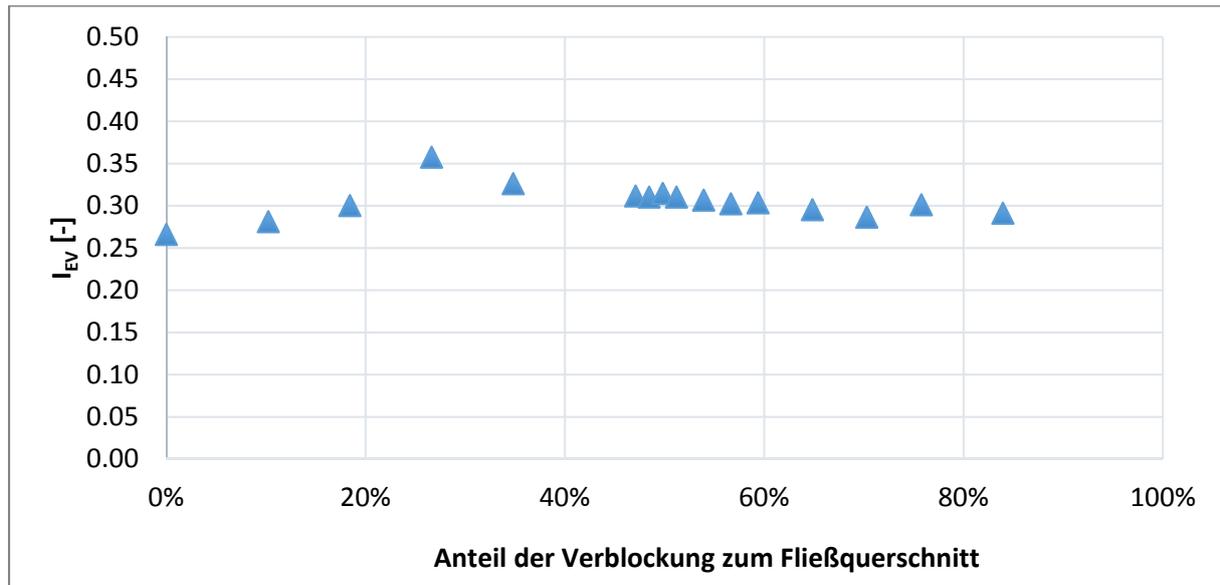


Bild 5.19: Übersicht aller untersuchten Prallwandkonfigurationen

Bild 5.20 zeigt die Durchströmungscharakteristik des Zulaufbereiches mit der optimalen Prallwand der Breite $\sim 6 \cdot r_{hy}$. Im Gegensatz zum Prallteller wird der Zufluss gleichmäßiger über die Breite des Beckens aufgeteilt. In der Abströmung hinter der Prallwand entsteht ähnlich dem Prallteller eine Rezirkulation, die jedoch eine vergleichsweise geringere Ausdehnung aufweist. Des Weiteren treten auf der Beckensohle geringere Geschwindigkeiten auf als bei dem Prallteller, sodass der Schlammraum (SSR), bzw. der AFS₆₃-Schutzraum, durch die Prallwand besser geschützt wird. Dies spiegelt sich auch in einem Indikator von $I_{EV} = 0,3577$ im Gegensatz zum Prallteller von $I_{EV} = 0,2922$ und der Grundvariante von $I_{EV} = 0,2662$ wider.

Der Indikator I_a weist mit einem Wert von 0,5437 jedoch darauf hin, dass trotz der erzielten gleichmäßigeren Durchströmung im Vergleich zur Grundvariante und dem Prallteller noch immer etwa 46 % des Fließquerschnitts infolge von Rezirkulationen ungenutzt sind.

In Anhang 1 finden sich ergänzend zu diesen Ergebnissen weitere Darstellungen von Konturplots für Varianten mit deutlich breiteren bzw. deutlich schmaleren Prallwänden als die hier

gezeigt. Die Konturplots aber auch die ermittelten Indikatoren lassen erkennen, dass derartige Konfigurationen zur Verbesserung der Durchströmungscharakteristik ungeeignet sind.

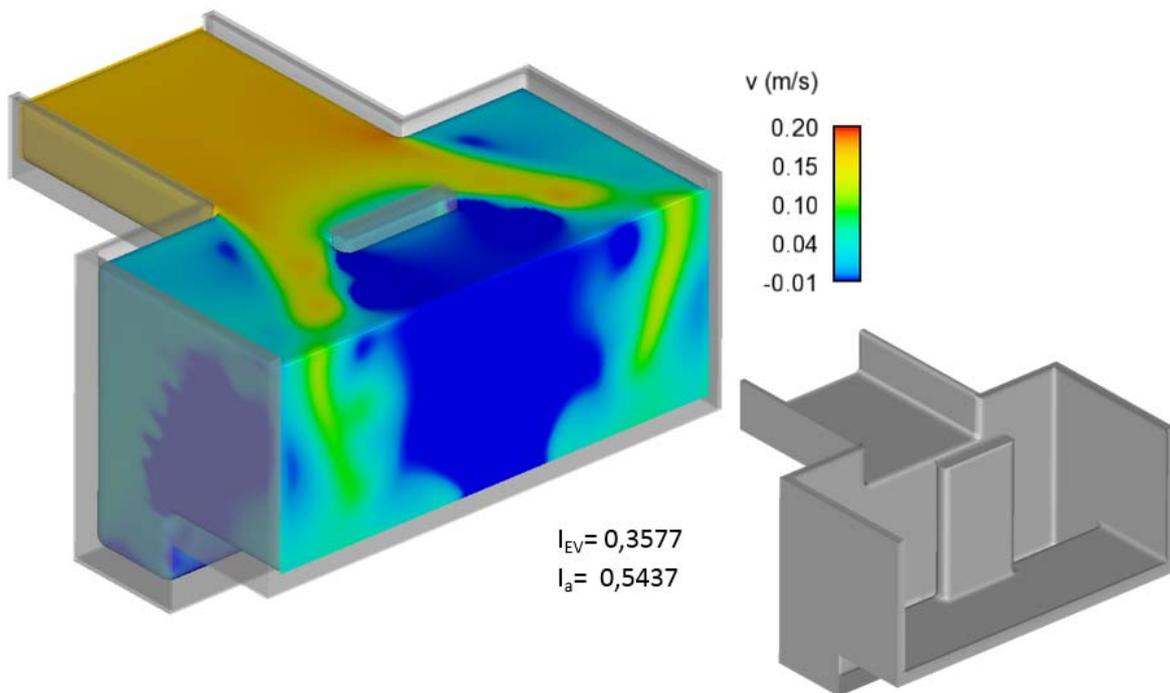


Bild 5.20: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 5 des mittleren Gerinneeinlaufs

Diskussion der geraden Prall-Vorrichtungen

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz von einfachen, konventionellen Einbauten die Durchströmung des Beckens nur geringfügig verbessert werden kann. Zwar wird eine kompakte Kurzschlussströmung, wie sie in der Grundvariante zu beobachten ist, vermindert. Es entstehen jedoch großräumige Rezirkulationszonen, welche die gewünschte, pfropfenartige Durchströmung des Beckens weitestgehend verhindern.

Optimierung 3: Reflektor

Die Grundidee hinter dieser Geometrie war, die Strömung durch Trennung und 180°-Umlenkung nach dem Gegenstromprinzip gegen sich selbst zu richten und so besonders schubspannungsreiche Scherzonen zu verursachen, in denen die Energie des Zulaufs in Turbulenz umgewandelt werden kann.

Der Reflektor ist, ähnlich der Prallwand, direkt hinter dem Pumpensumpf angeordnet. Der Durchmesser des Reflektors beträgt $\varnothing_{\text{Reflektor}} = 4 \cdot r_{hy}$. Dementsprechend besitzt dieser je Seite

einen Überstand zum Zulaufgerinne von ca. $0,5 r_{hy}$. Die Dicke des Bauteils beträgt $0,20$ m. Der Mittelpunkt des Reflektors besitzt einen Abstand von $3 \cdot r_{hy}$ zum Zulauf.

Wie in Bild 5.21 zu erkennen ist, entsteht direkt hinter dem Reflektor eine weit ausgedehnte Rezirkulation. Hierdurch wird der Reflektor seitlich im Kurzschluss umströmt. Auch Versuche, die Strömung durch das Verändern des Radius des Reflektors oder durch den Einsatz von Schlitzern gleichmäßiger auf den gesamten Beckenquerschnitt zu verteilen, waren nicht zielführend. Eine Dokumentation der Ergebnisse ist in Anhang 2 zu finden.

Da gegenüber dem Prallteller bzw. der Prallwand keine Verbesserungen durch den Einsatz des Reflektors erkennbar sind, wurden keine weitergehenden Untersuchungen des Reflektors durchgeführt.

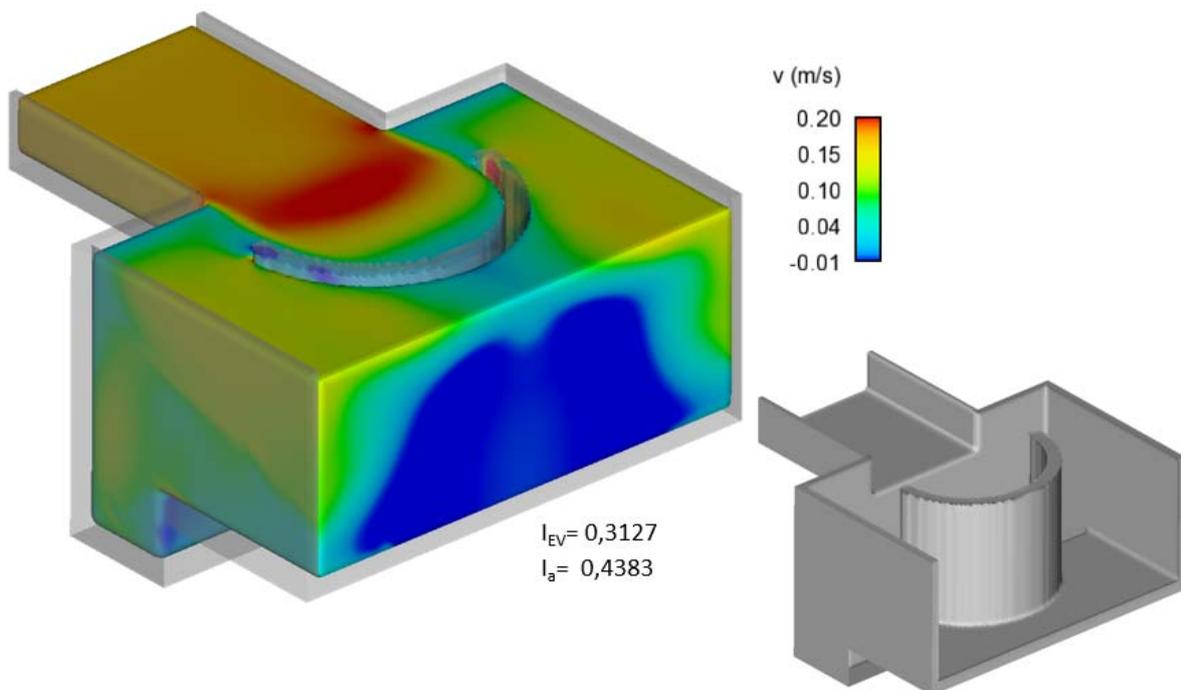


Bild 5.21: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 3 (Reflektor) des mittigen Gerinneinlaufs

Optimierung 4: Lamellenwand

Die Optimierung 4 weist eine konstruktiv einfach gestaltete Lamellenwand direkt hinter dem Pumpensumpf auf (Bild 5.22). Ziel der Lamellen ist es, möglichst viele Scherschichten zur Energiedissipation zu erzeugen und die Strömung über die Breite des Beckens „aufzufächern“.

Wie anhand der vergleichsweise schlechten Indikatorwerte erkennbar ist, wird dieses Ziel mit dieser Konfiguration nicht erreicht. Insbesondere der Indikator I_a mit einem Wert von $0,4261$ zeigt das Vorhandensein von Rezirkulationszonen und damit ungenutztes Beckenvolumen an.

Die Kurzschlussströmung infolge des Gerinnezulaufs wird nur geringfügig durch die hier gezeigte Konfiguration der Lamellenwand beeinflusst.

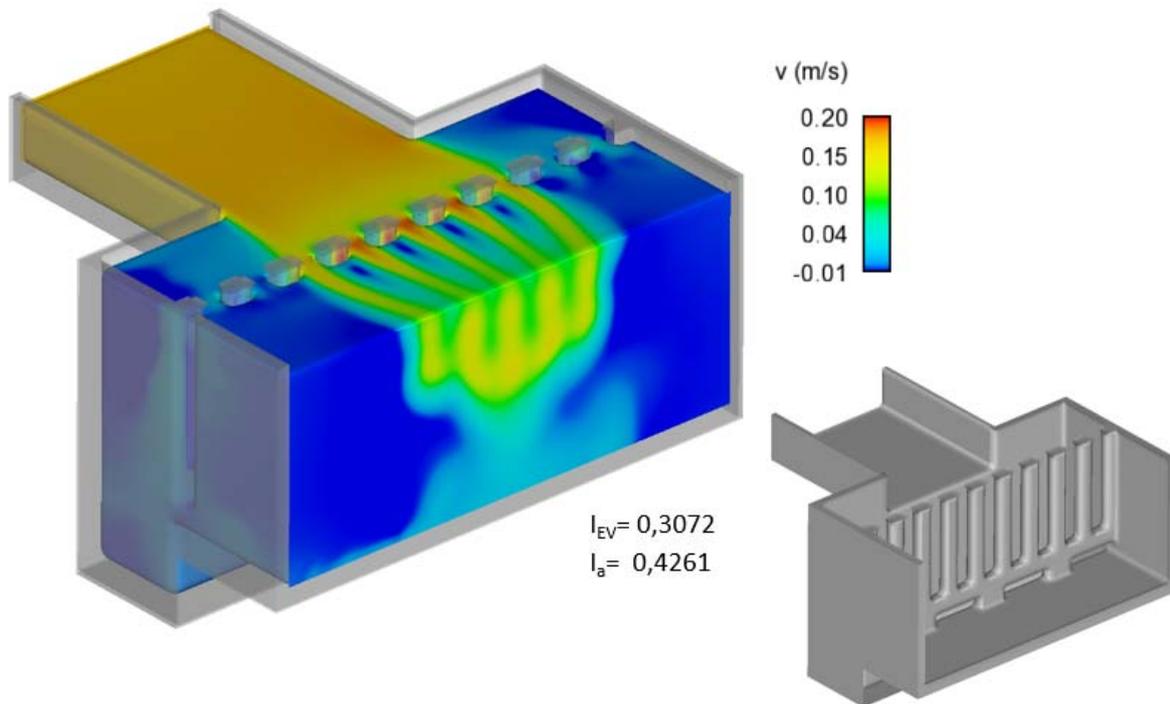


Bild 5.22: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Lamellenwand des mittigen Gerinneeinlaufs

Es wurden weitere Varianten von Lamellenwänden, die spezifischen Bereiche des Strömungsquerschnittes ausblocken, untersucht.

In Bild 5.23 ist eine zusätzlich Ausblockung in Form einer integrierten Prallwand dargestellt. Im Vergleich zu der einfachen Lamellenwand (54 %) werden in dieser Konfiguration etwa 60 % des Fließquerschnittes ausgeblockt.

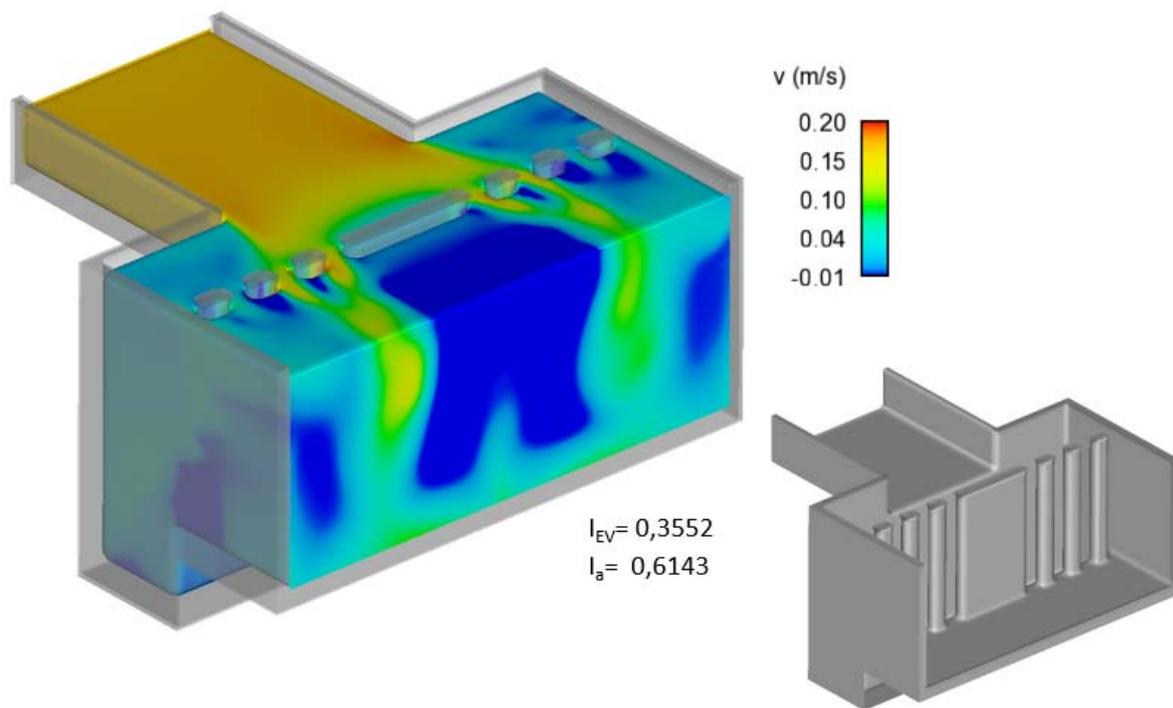


Bild 5.23: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der teilw. ausgeblockten Lamellenwand des mittigen Gerinneeinlaufs

Dieser Einbau erzielt im Vergleich zu der einfachen Lamellenwand eine gleichmäßigere Durchströmung und verhindert insbesondere die Ausbildung einer zentrierten Kurzschlussströmung. Der positiv durchströmte Flächenanteil des Kontrollquerschnittes wird deutlich erhöht ($I_a = 0,6143$).

Bild 5.24 gibt einen Überblick über die Indikatoren weiter untersuchter Varianten der Lamellenwand.

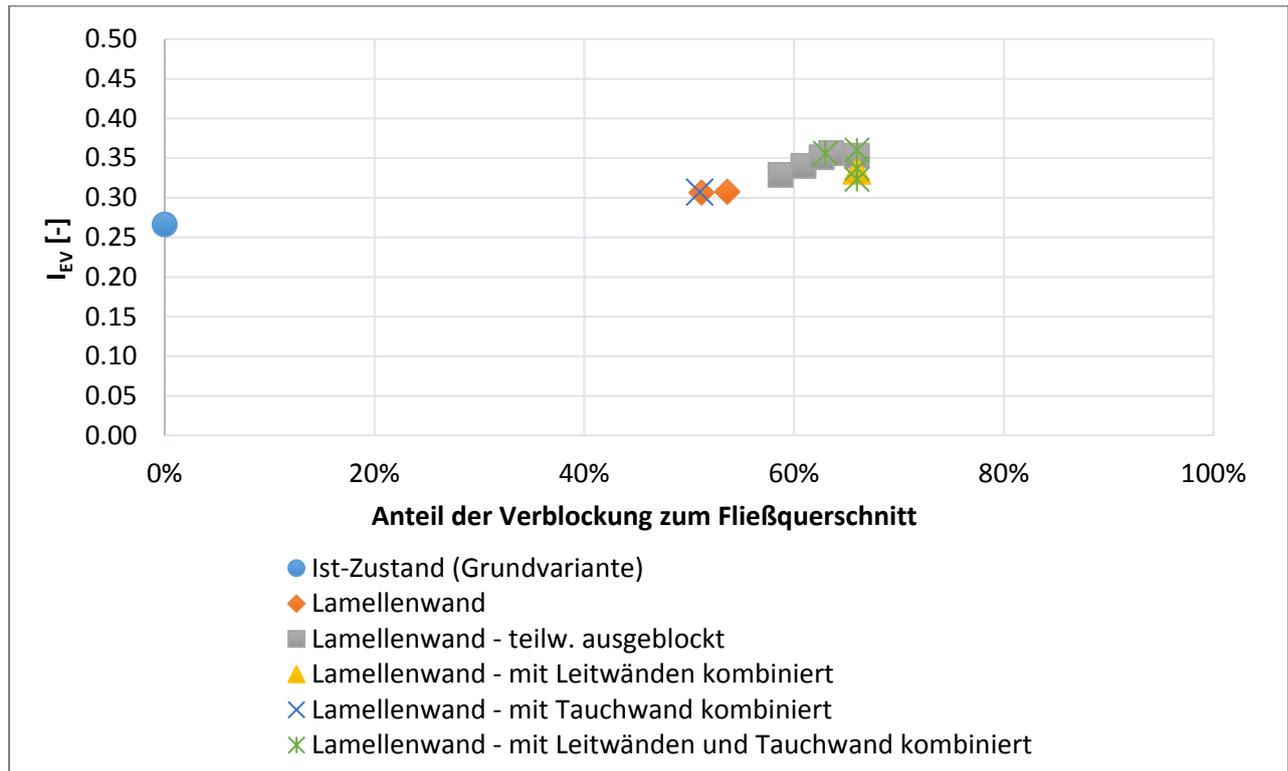


Bild 5.24: Übersicht der untersuchten Lamellenwände

Optimierung 5: liegende Leitwand

Ein horizontales Leitblech (Bild 5.25 rechts unten) soll den gesamten Zufluss abwärts in den Pumpsumpf lenken. Zwei schräg unter dem horizontalen Leitblech angeordnete Leitbleche haben zudem die Aufgabe, den Zuflussstrom in beide Ecken des Pumpensumpfes zu leiten.

Bild 5.25 zeigt, dass in der Mitte des Kontrollquerschnitts aufgrund einer Rezirkulation eine Rückwärtsströmung entsteht, die sich über gesamte Beckentiefe erstreckt. An den Beckenaußenwänden resultieren erhöhte Geschwindigkeiten. Es kann jedoch mit einem vergleichsweise sehr einfachen Einbau ein ähnlich hoher Indikator ($I_{EV} = 0,36$) erzielt werden, wie z.B. sonst nur mit einer wesentlich aufwändigeren, teilweise ausgeblockten Lamellenwand.

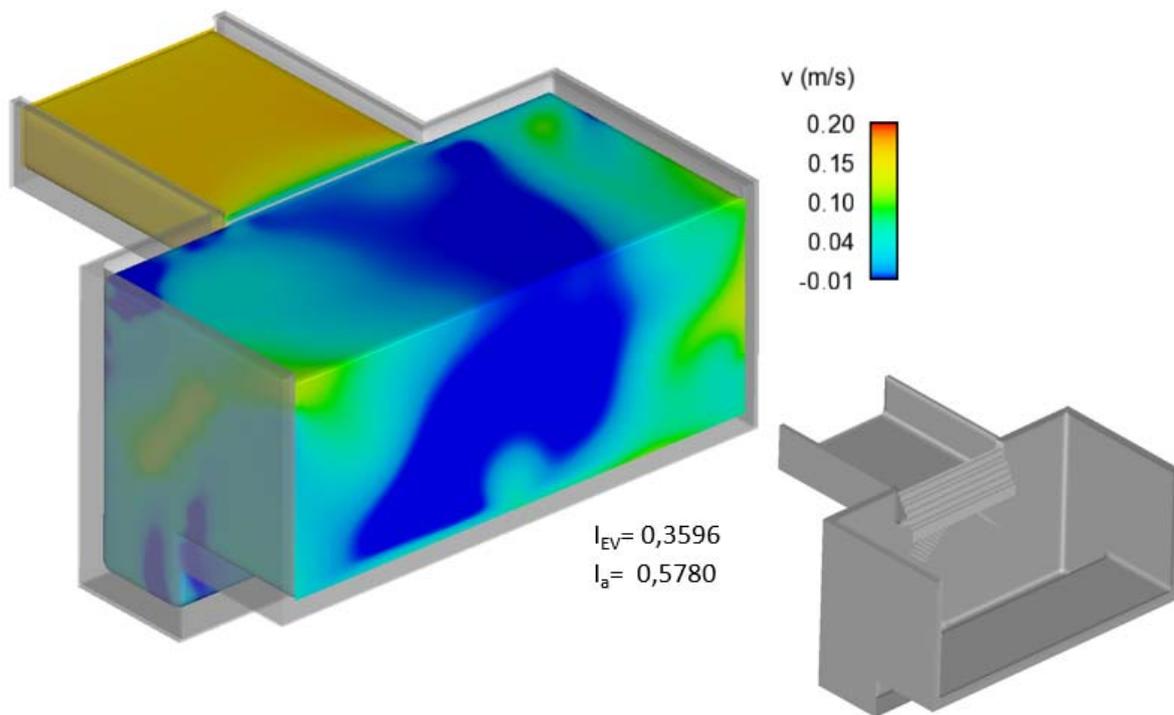


Bild 5.25: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 5 (liegende Leitwand) des mittigen Gerinneeinlaufs

Optimierung 6: Strömungs-Gleichrichter

Auf der Basis einer umfassenden Analyse der Wirkung von Einbauten auf die Durchströmungscharakteristik im Becken wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes ein sogenannter Strömungs-Gleichrichter entwickelt. Dieser basiert auf den folgenden Funktionsprinzipien.

Strahlauffächerung

Unmittelbar nach Eintritt in die Zulauf-Komponente trifft die Strömung auf eine vertikale, unterströmbare Prallwand. Durch das Auftreffen des Zulaufstrahles wird die Strömung in alle Raumrichtungen aufgefächert (Bild 5.26). Durch diese Auffächerung wird insbesondere eine Vergleichmäßigung der Strömung über die Breite des Beckens erzielt.

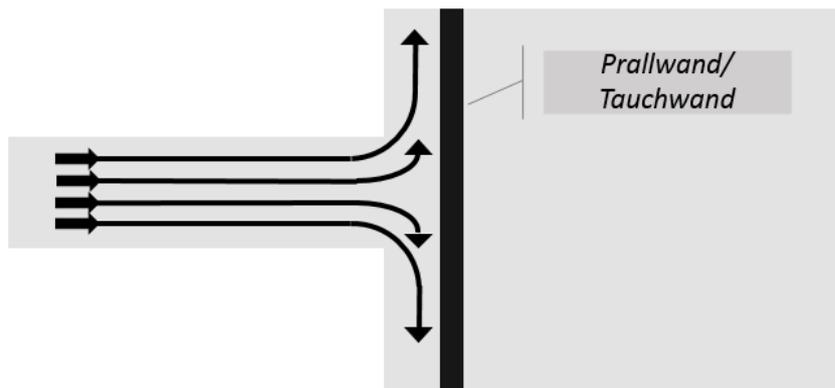


Bild 5.26: Prinzip der Strahlauffächerung (Draufsicht)

Fließweg-Verlängerung und Beschleunigung

Nach dem Auftreffen der Strömung auf die Prallwand wird diese gezielt nach unten geführt und unterströmt die Tauchwand. Durch diese Art Faltung der Strömung (180°-Umlenkung) im Zulaufbereich wird der Fließweg deutlich verlängert. Gleichzeitig wird die Strömung zunächst verzögert, dann wieder durch Verengung des Querschnittes unterhalb der Tauchwand lokal beschleunigt.

Die hierbei zusätzlich erzeugte Reibung sowie die mit Hilfe der Beschleunigung erzielte Ausrichtung der Strömung bewirkt ein „Gerade-Ziehen“ der Stromlinien. Ablösungen der Randstromlinien, Rezirkulationen oder aber auch spiralförmige Stromlinien werden hierdurch gezielt aufgelöst.

Sollte im Zulaufbereich des Beckens ein Pumpensumpf vorhanden sein, kann die Tauchwand hier integriert werden. Es wird eine gerichtete Aufwärtsströmung erzeugt (Bild 5.27).

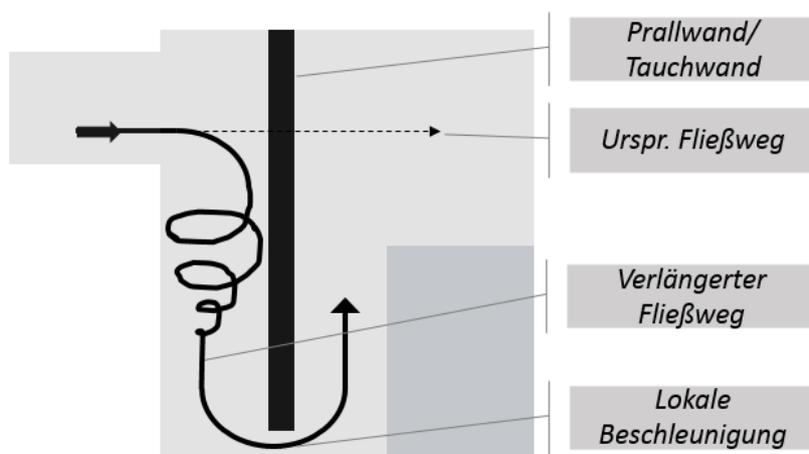


Bild 5.27: Prinzip der Fließweg-Verlängerung und Beschleunigung

Stufenweises Abgreifen der Strömung

Die hinter der Tauchwand aufwärts gerichtete Strömung wird nun durch eine systematische, versetzte Anordnung von Leitblechen stufenweise, d.h. über die Höhe gleichmäßig verteilt, abgegriffen (Bild 5.28). Durch die Form der Leitbleche wird die Strömung zudem wiederum horizontal ausgerichtet.

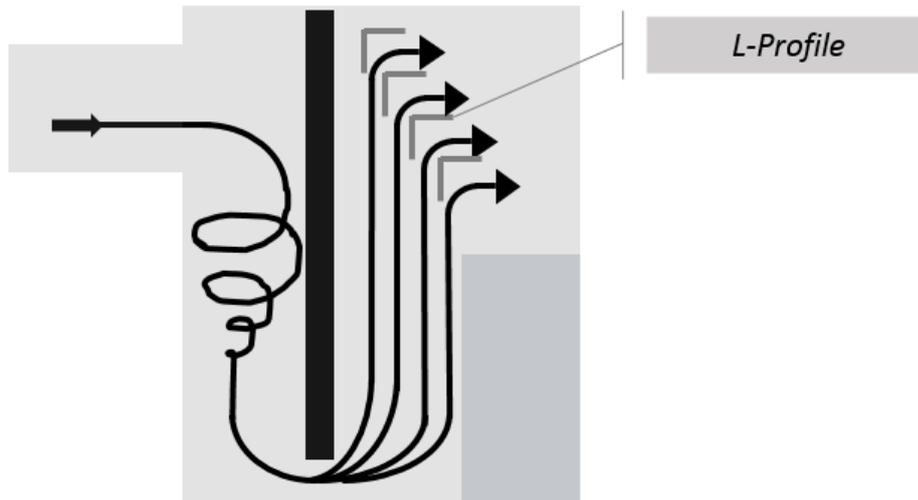


Bild 5.28: Prinzip des stufenweise Abgreifens der Strömung über die Höhe des Beckens

Wirkung des Strömungs-Gleichrichters auf die Beckendurchströmung

In Bild 5.29 ist die Zulauf-Komponente mit dem oben beschriebenen Gleichrichter-Bauteil ausgerüstet. Die Visualisierung der Durchströmung zeigt, dass bereits unmittelbar hinter dem Gleichrichter eine gleichmäßige, annähernd pfropfenartige Durchströmung im gesamten durchflossenen Fließquerschnitt erzielt wird. Der Indikator $I_{EV} = 0,57$ bestätigt die gleichmäßigere Fließgeschwindigkeitsverteilung über den Fließquerschnitt im Vergleich zur Grundvariante ($I_{EV} = 0,3$).

Anhand des Indikators $I_A = 0,99$ ist erkennbar, dass Rezirkulationen nahezu vollständig vermieden werden und annähernd die gesamte Sedimentationskammer pfropfenartig durchströmt wird. Durch die Ausrüstung eines Gleichrichters können unabhängig von der Zulaufgestaltung optimale Absetzbedingungen für bestimmte Partikelfractionen geschaffen werden.

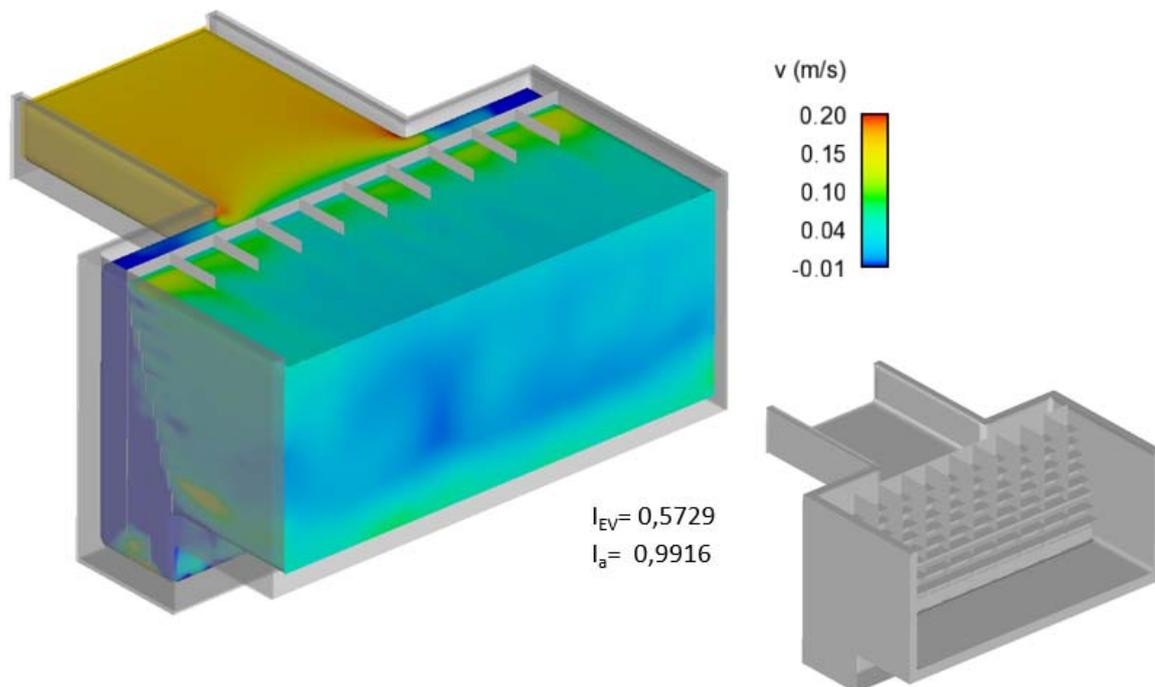


Bild 5.29: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des mittigen Gerinneeinlaufs für $q_a=10$ m/h

Die Durchströmungscharakteristik ändert sich bei einer niedrigeren Oberflächenbeschickung von 4 m/h nicht maßgeblich (Bild 5.30). Lediglich die Fließgeschwindigkeiten werden insgesamt geringer (von max. 0,38 m/s zu 0,16 m/s).

Bild 5.29 und Bild 5.30 zeigen jedoch auch, dass auf der Sohle vergleichsweise die höchsten Geschwindigkeiten auftreten und somit eine Remobilisierung begünstigt wird. Dies verdeutlicht den noch bestehenden Optimierungsbedarf dieser Optimierungsvariante. Hiermit sind insbesondere die Abstände der verschiedenen L-Profile zu verstehen.

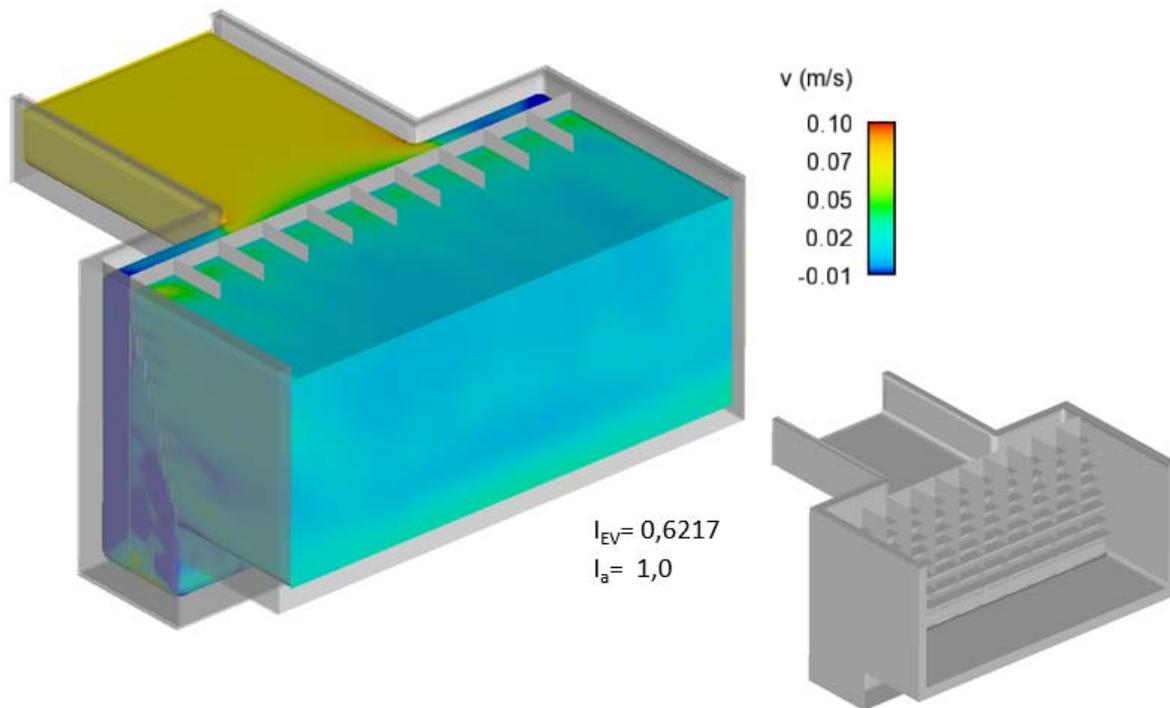


Bild 5.30: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des mittigen Gerinneinlaufs für $q_a=4 \text{ m}^3/\text{h}$

5.4.1.2 Gerinneinlauf (außermittig)

Grundvariante

Der außermittige Gerinnezufluss erzielt vergleichbare Indikatoren wie der mittige Gerinnezufluss. Auch die Durchströmungscharakteristik ist vergleichbar (vgl. Kapitel 5.4.1.1).

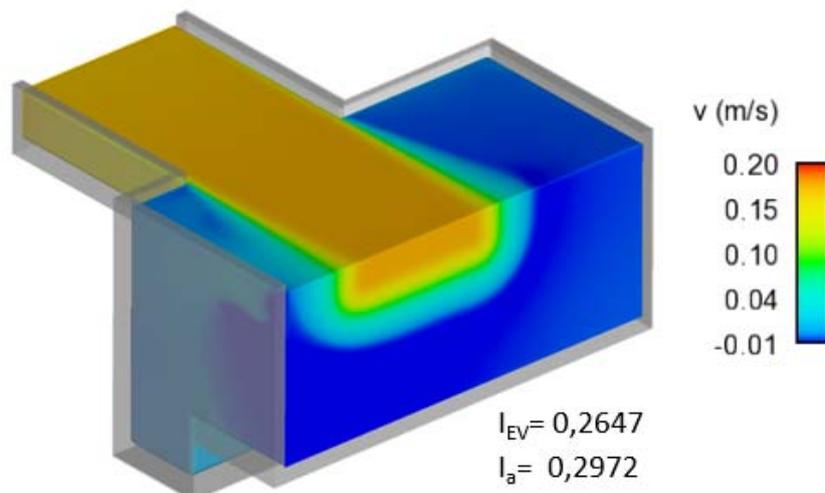


Bild 5.31: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Grundvariante des außermittigen Gerinneinlaufs

Optimierung 6: Strömungs-Gleichrichter

Für den außermittigen Gerinnezufluss wurde die Variante mit dem Strömungs-Gleichrichter simuliert. Anhand der Durchströmungscharakteristik wird deutlich, dass der Einbau auch für den außermittigen Einlauf eine gute Durchströmung und dementsprechend gute Strömungsindikatoren erzielt. Die eingangs getroffene Annahme, dass eine Maßnahme, die bei symmetrischer Anordnung wirkt, auch bei asymmetrischer Anordnung sinnvoll einsetzbar ist, wurde daher in erster Näherung bestätigt. Auch hier ist jedoch, wie bei der symmetrischen Variante, weitergehender Optimierungsbedarf erkennbar.

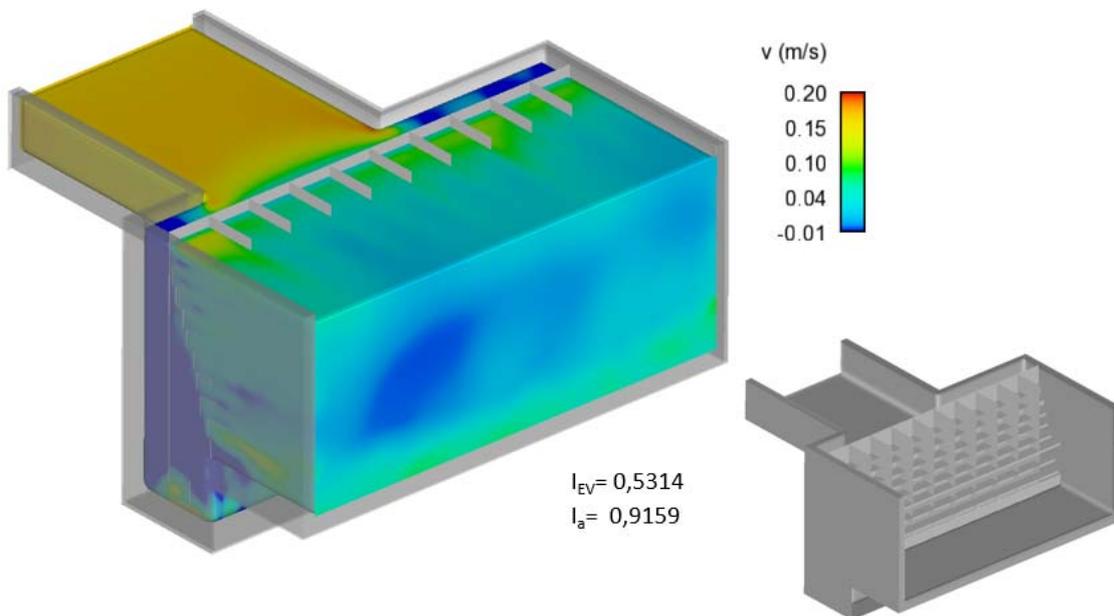


Bild 5.32: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des außermittigen Gerinneeinlaufs

5.4.1.3 Rohreinlauf (sohlgleich und mittig)

Grundvariante

Der sohlgleiche, mittige Rohrzulauf weist eine sehr stark gebündelte Kurzschlussströmung im Bereich der Beckensohle auf. Im Vergleich zum Gerinnezufluss sind die Geschwindigkeiten beim Rohrzulauf aufgrund der geringeren Querschnittsfläche höher. Dies spiegelt sich auch in den Indikatoren wider.

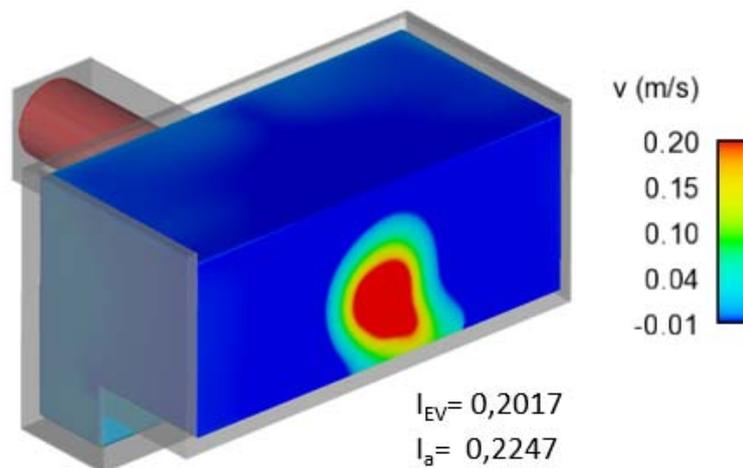


Bild 5.33: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Grundvariante des sohlgleichen, mittigen Rohrzulaufs

Optimierung 6: Strömungs-Gleichrichter

Obwohl die Ist-Situation strömungstechnisch ungünstiger als der Gerinnezulauf ist, kann der Strömungs-Gleichrichter die Strömung über die Breite und Höhe gut zu vergleichmäßigen. Die Indikatoren sind im Vergleich zum außermittigen Gerinnezulauf sogar etwas besser.

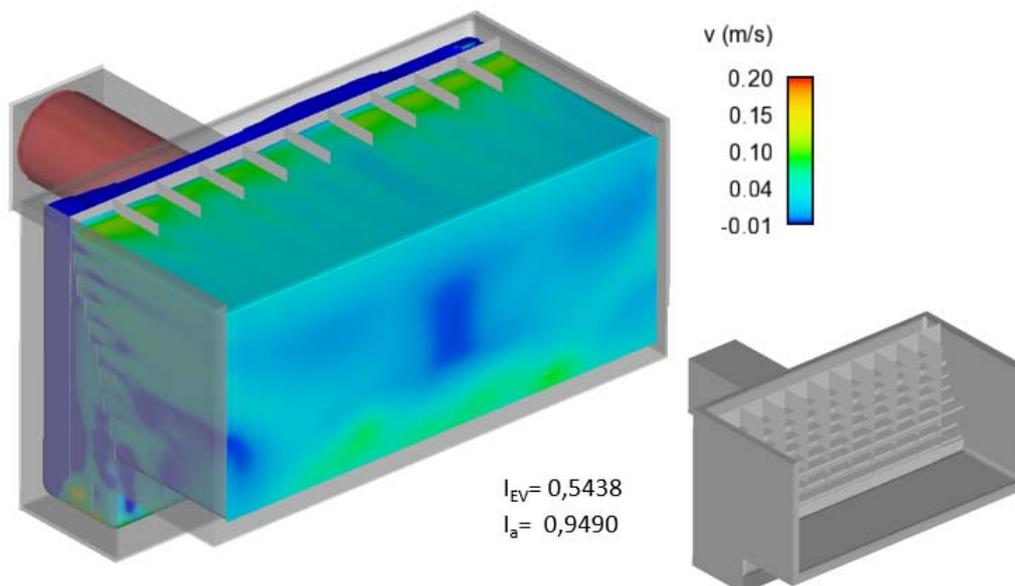


Bild 5.34: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des sohlgleichen, mittigen Rohrzulaufs

5.4.1.4 Rohreinlauf (sohlgleich und außermittig)

Grundvariante

Der sohlgleiche, außermittige Rohrzulauf verhält sich strömungstechnisch wie der mittige Rohrzulauf, nur befindet sich die Kurzschlussströmung nicht in Beckenmitte.

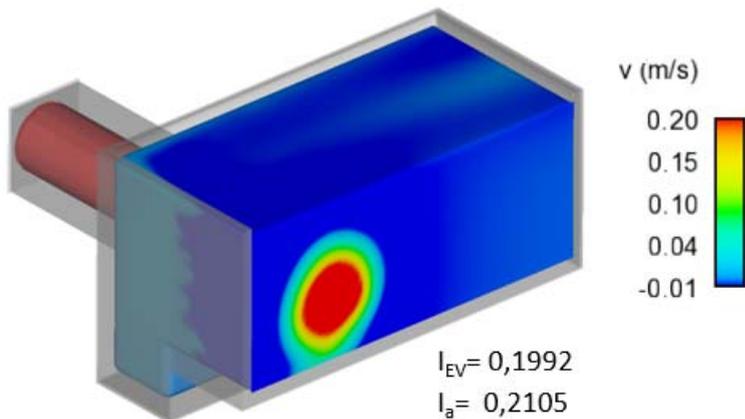


Bild 5.35: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des sohlgleichen, außermittigen Rohrzulaufs

Optimierung 6: Strömungs-Gleichrichter

Auch in dieser Einlaufkonstruktion ist die Optimierung 6 in der Lage, die konzentrierte Kurzschlussströmung über den gesamten Beckenquerschnitt zu verteilen. Allerdings ist auf dem Kontrollquerschnitt in Höhe des Zulaufes eine kleinräumige Rezirkulation zu erkennen, deshalb ist auch der Indikator I_a vergleichsweise geringer.

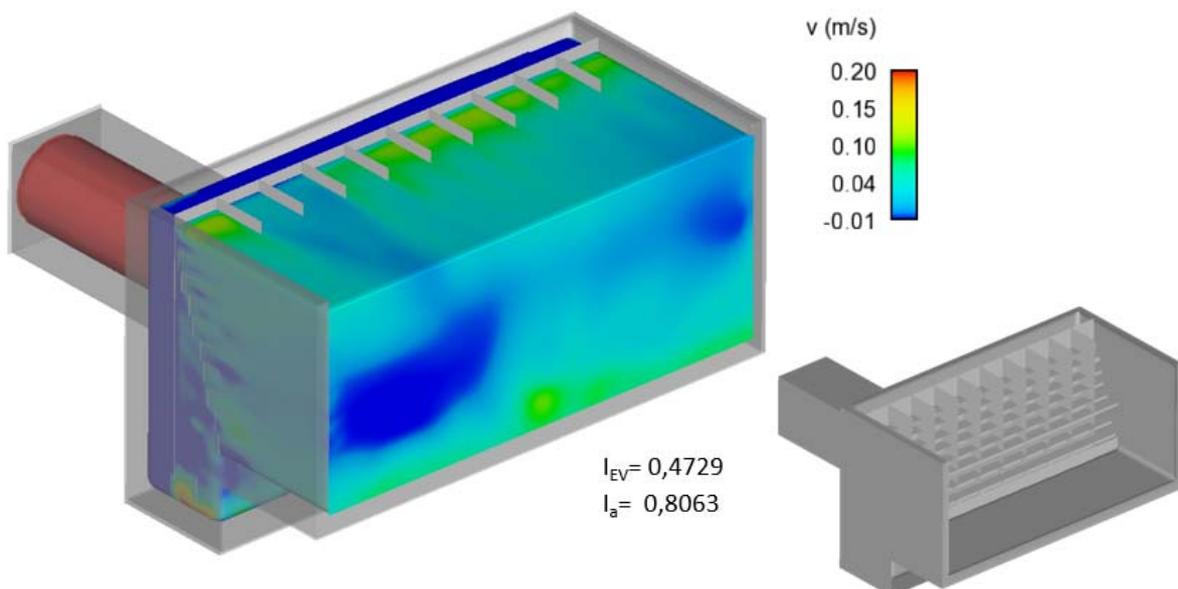


Bild 5.36: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des sohlgleichen, außermittigen Rohrzulaufs

Für beide Varianten des Rohrzuflufs ist, wie sie auch für die Gerinnezuflufe, eine spätere Nachoptimierung erstrebenswert.

5.4.1.5 DWA T3 (mittig)

Grundvariante

Durch das Einlaufbauwerk nach DWA T3 wird im Vergleich zum sohlgleichen, mittigen Rohrzuflauf eine bessere Geschwindigkeitsverteilung über den Kontrollquerschnitt erreicht. Es wird v.a. der positiv durchströmte Bereich vergrößert. Insgesamt ist jedoch immer noch eine Kurzschlussströmung zu erwarten. Des Weiteren kann die Gleichverteilung über die Beckenbreite noch optimiert werden.

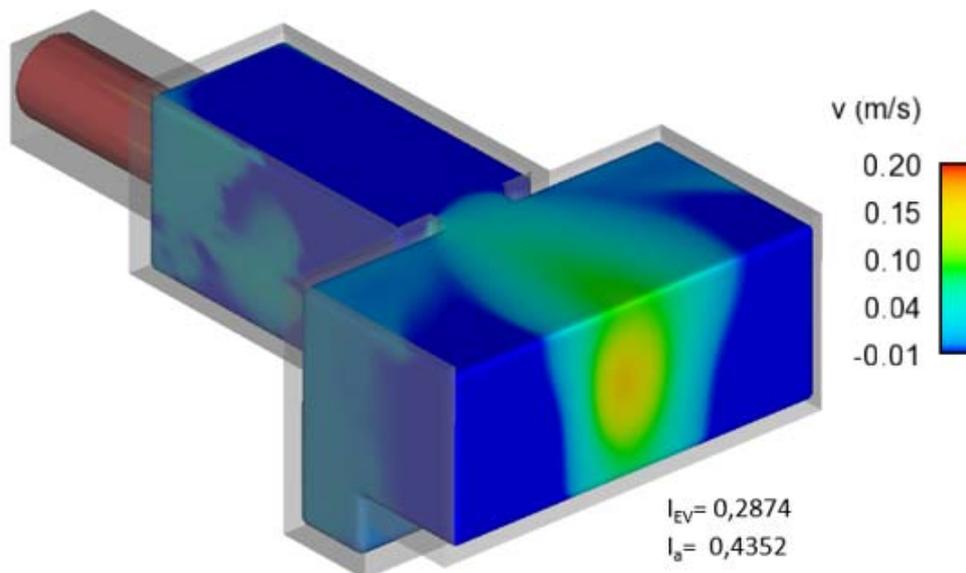


Bild 5.37: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des mittigen Zulaufs nach DWA T3

Optimierung 6: Strömungs-Gleichrichter

Durch den Einbau eines Strömungs-Gleichrichters können die Strömungsindikatoren deutlich verbessert werden. So kann der negativ durchströmte Bereich (Rezirkulation) auf rund 5 % des Kontrollquerschnittes reduziert werden. Des Weiteren ist eine pfropfenartige Durchströmung zu erkennen.

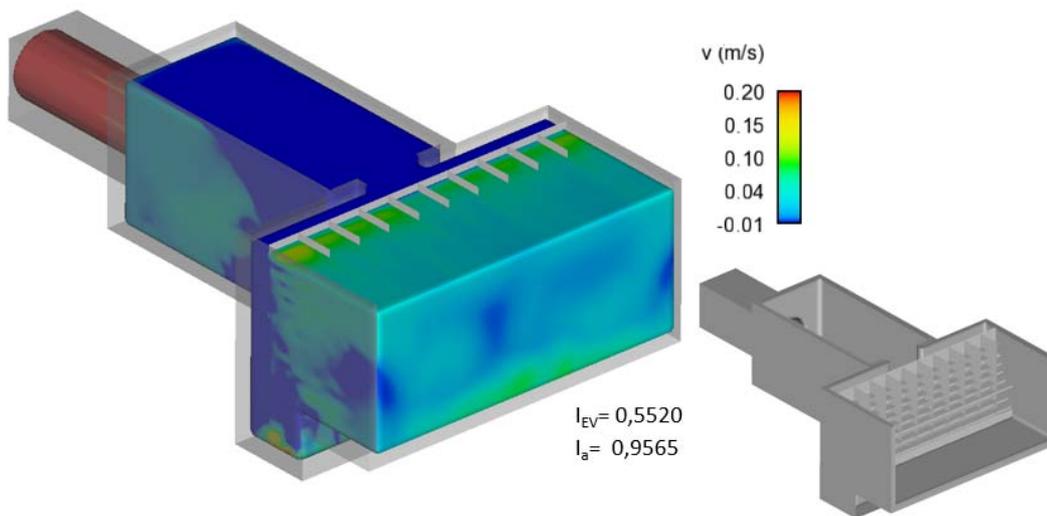


Bild 5.38: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des mittigen Zulaufs nach DWA T3

5.4.1.6 DWA T3 (außermittig)

Grundvariante

Der außermittige Einlauf nach DWA T3 weist keine erheblichen Unterschiede zum mittigen Einlauf auf. Ungünstig sind die zu erwartende Kurzschlussströmung und der weit ausgedehnte Totraum.

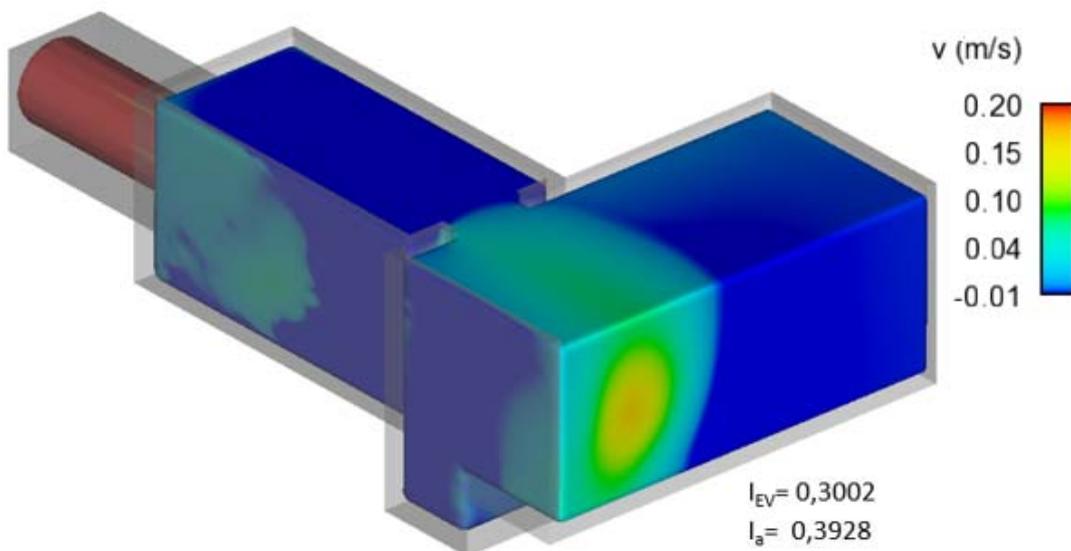


Bild 5.39: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des außermittigen Zulaufs nach DWA T3

Optimierung 6: Strömungs-Gleichrichter

Auch für diese Einlaufkonstruktion kann die Optimierung eine sehr gute Geschwindigkeitsverteilung erzielen. Auf der rechten Beckenseite befindet sich ein kleiner Totraum, der rund 5 % des Kontrollquerschnitts ausmacht. Der Indikator $I_{EV} = 0,5758$ ist zusammen mit dem des mittleren Gerinnezulaufs ($I_{EV} = 0,5729$) für eine Oberflächenbeschickung von 10 m/h die bisher am besten erzielten Indikatoren.

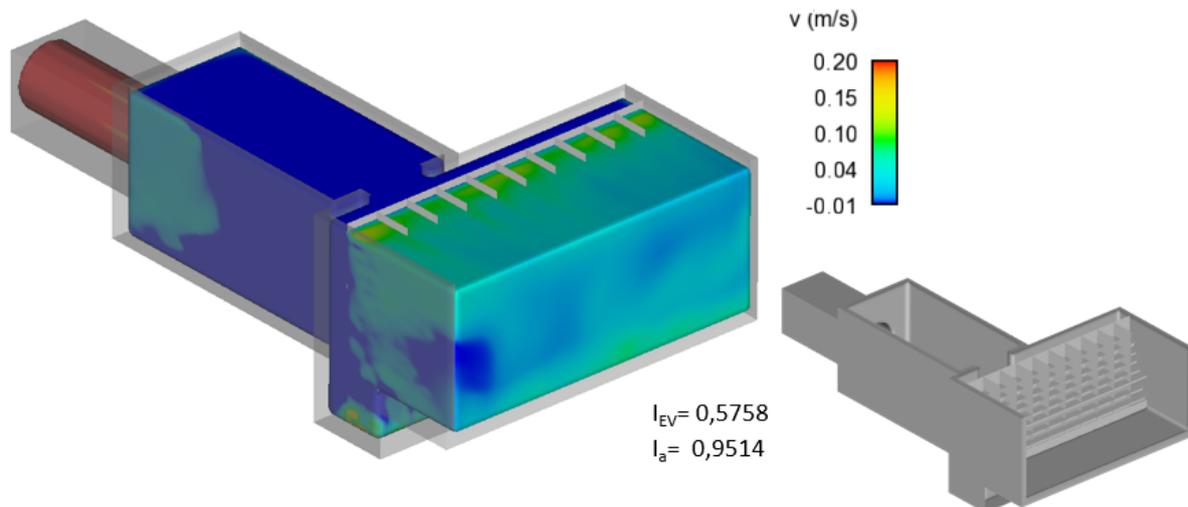


Bild 5.40: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 (Strömungs-Gleichrichter) des außermittigen Zulaufs nach DWA T3

Auch für die beiden T3-Zuläufe sollte eine spätere Nachoptimierung durchgeführt werden.

5.4.2 Einlaufbauwerk (transversal)

Für die Zulaufkonstruktion des transversalen Rohrzuflusses wurden fünf konstruktiv unterschiedliche Optimierungen entworfen (Bild 5.41). In der Grundvariante ist ein transversales Wehr oberhalb des Pumpensumpfes angeordnet, um den Sammelkanal vom Becken räumlich abzutrennen.

In der **Optimierung 1** ist dem Wehr eine vertikale Leitwand auf Höhe des Pumpensumpfes nachgeschaltet, um das Wasser gezielt abwärts in den Pumpensumpf zu leiten.

In der **Optimierung 2** wurden mehrere gestaffelte Prallteller im Sammelkanal vor dem Wehr angeordnet, um den Zulauf sukzessive über die gesamte Breite des Wehres aufzuteilen und so eine gleichmäßigere Überströmung des Wehres ohne Kurzschluss zu erreichen.

In der **Optimierung 3** ist eine Lamellenwand hinter dem Wehr angeordnet.

Der Einfluss der Höhe des Wehres in Kombination mit einer Lamellenwand wurde dann in einer Optimierungsstudie variiert (**Optimierung 4**).

In der **Optimierung 5** die Form des Wehres verändert.

Zusätzlich wird - ähnlich dem mittigen Gerinneinlauf (Kapitel 5.4.1.1) – ein Strömungs-Gleichrichter (**Optimierung 6**) auch für den transversalen Einlauf angewendet. Es soll überprüft werden, ob diese Optimierungsvariante auch für transversale Einläufe eine ähnlich gleichmäßige Anströmung des Beckens erzielen kann

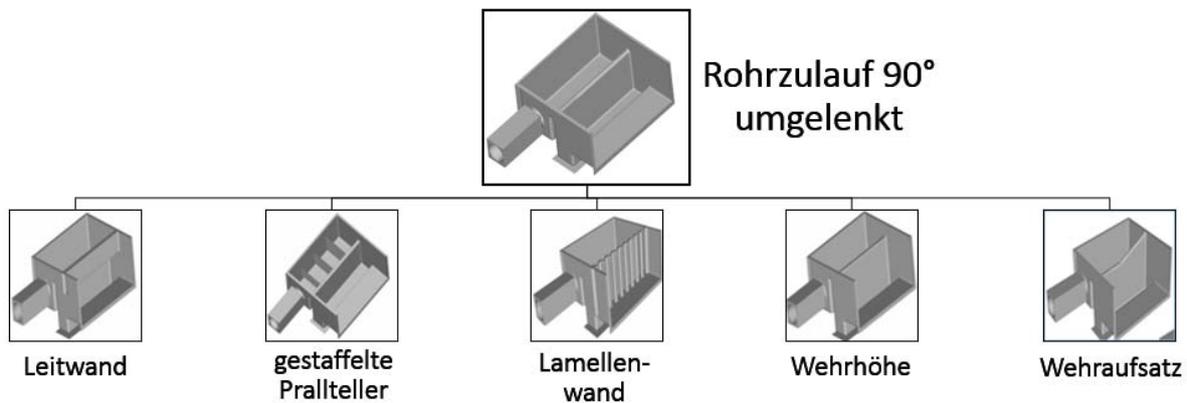


Bild 5.41: Untersuchte Optimierungen für den transversalen Einlauf

Grundvariante

Das Einlaufbauwerk mit einem 90°- umgelenkten Einlauf weist eine vergleichsweise homogenere Geschwindigkeitsverteilung (Bild 5.42) auf als dies bei Becken mit einer beckenparallel Einlaufsituation (Bild 5.16) der Fall ist. Dennoch ist die Geschwindigkeitsverteilung im Kontrollquerschnitt in Folge des Wehrüberfalles leicht asymmetrisch.

Anhand der Visualisierung der Durchströmungscharakteristik sowie der berechneten Indikatoren lässt sich ein Optimierungspotenzial ableiten.

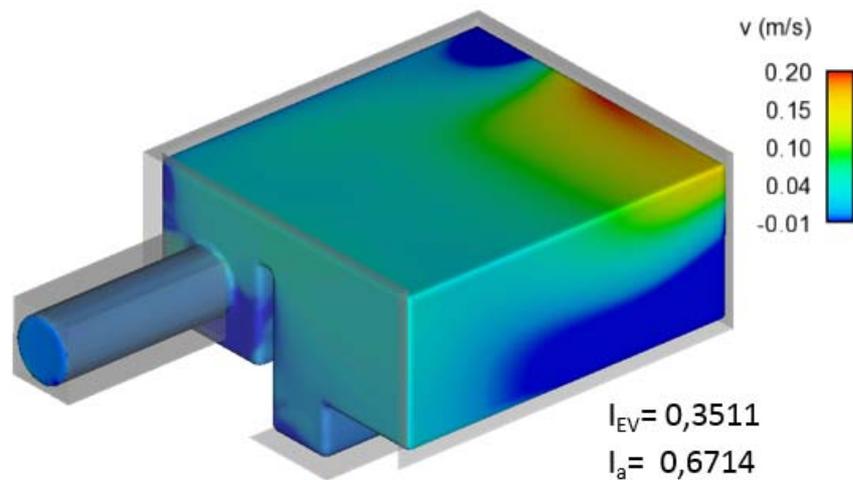


Bild 5.42: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Grundvariante des transversalen Einlaufs

Optimierung 1: Leitwand

Zunächst ist der Abstand zwischen Leitwand und Wehr variiert. Die senkrechte Leitwand ist 0,20 m breit, taucht mit einer Länge $l_t = 4 \cdot r_{hy}$ in das Becken ein und hat einen Abstand a_t zum Wehr von $4 \cdot r_{hy}$ und $2 \cdot r_{hy}$. Der hydraulische Radius (r_{hy}) beträgt 0,225 m.

Die in Bild 5.44 visualisierte Durchströmungscharakteristik zeigt, dass der Abstand der Leitwand zum Wehr keinen wesentlichen Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung bzw. auf die Anströmung der Sedimentationskammer aufweist. Der berechneten Indikatoren weisen für die Variante mit dem Abstand von $4 \cdot r_{hy}$ eine etwas homogenere Geschwindigkeitsverteilung auf, daher wird dieser Abstand für die nachfolgende Optimierung der Eintauchtiefe verwendet.

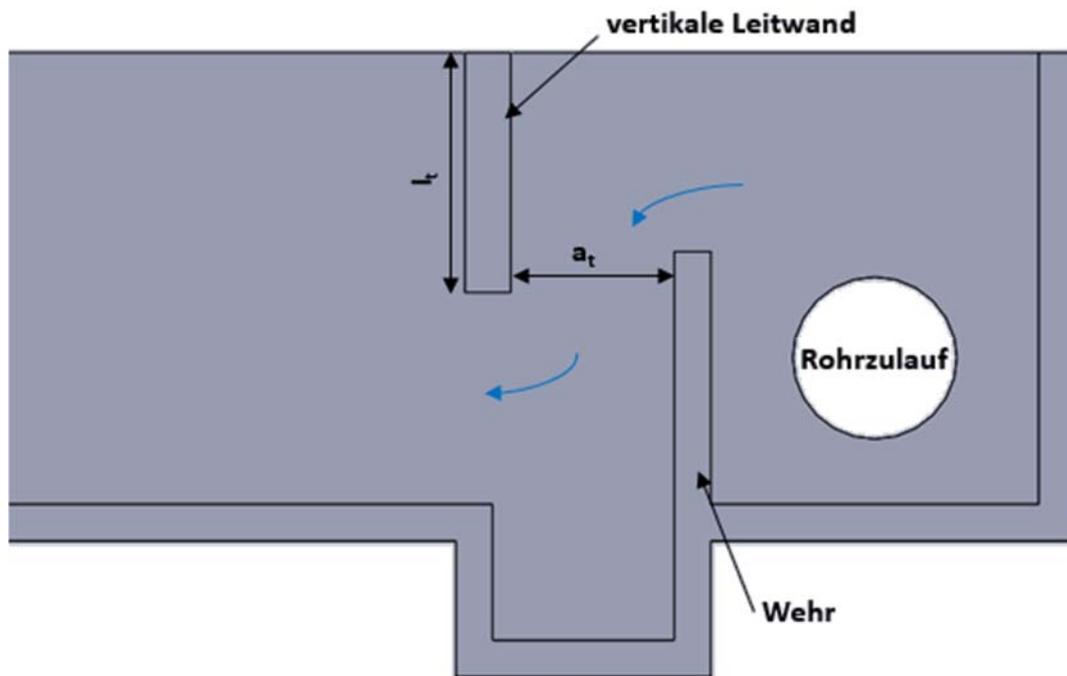


Bild 5.43: Längsschnitt mit Längen – und Abstandsmaß der vertikalen Leitwand

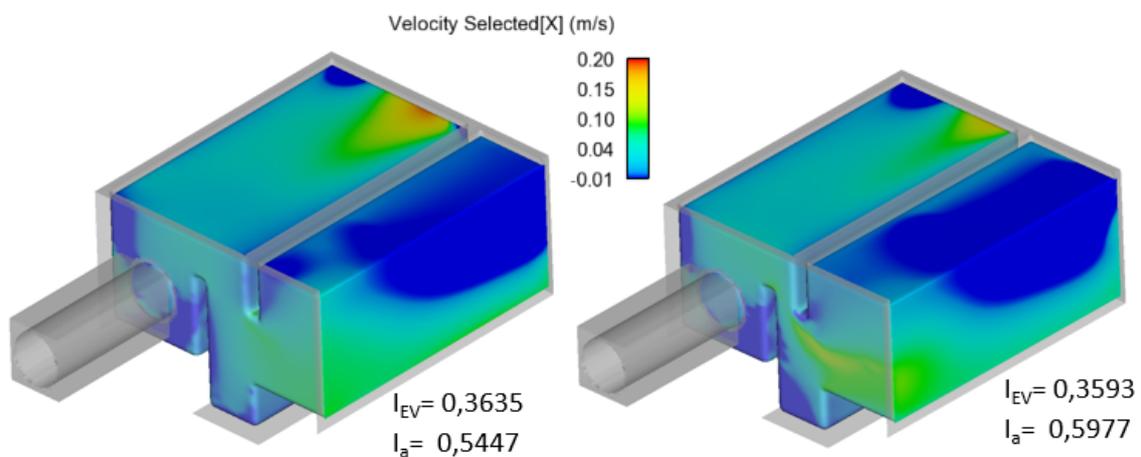


Bild 5.44: Konturplot der u-Geschwindigkeiten (links: Abstand Tauchwand zum Wehr = $4 \cdot r_{hy}$; rechts = $2 \cdot r_{hy}$)

Es wurden Eintauchtiefen von $4 \cdot r_{hy}$, $5 \cdot r_{hy}$ und $6 \cdot r_{hy}$ gewählt. Der Abstand der Leitwand zum Wehr ist konstant bei $4 \cdot r_{hy}$.

In Bild 5.45 ist die Verteilung der u-Geschwindigkeiten für die Eintauchtiefen von $4 \cdot r_{hy}$ (links) und $6 \cdot r_{hy}$ (rechts) dargestellt. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Eintauchtiefe der Leitwand die unterstrom resultierende Rezirkulationszone mit horizontal liegender Drehachse größer wird. Dies resultiert in einer Verkleinerung des abflusswirksamen Fließquerschnitts und

damit in höheren Fließgeschwindigkeiten (ca. 0,10 m/s) im Bereich der Sohle. Es besteht somit die Gefahr von Remobilisierungsvorgängen im Schlammraum des Beckens.

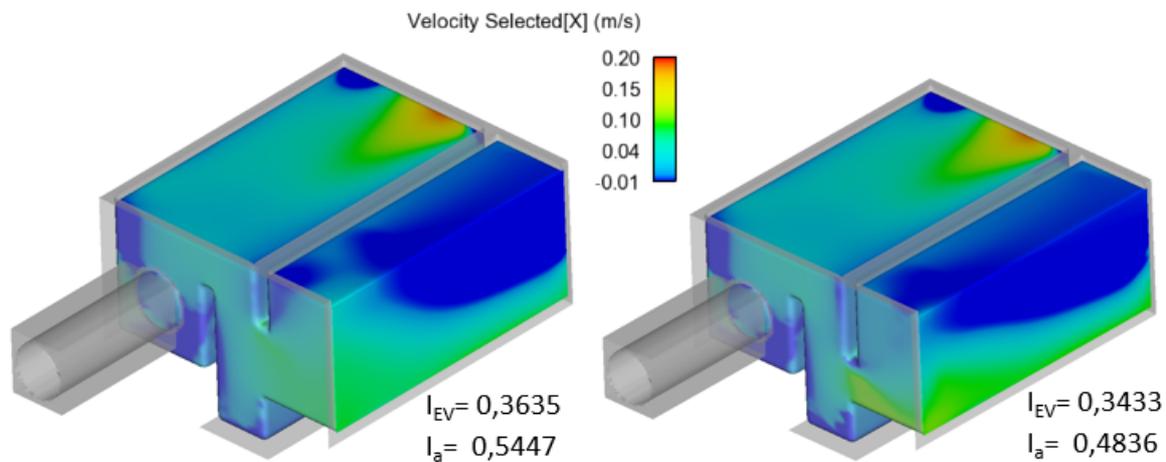


Bild 5.45: Konturplot der u-Geschwindigkeiten (links: Eintauchtiefe = $4 \cdot r_{hy}$; rechts = $6 \cdot r_{hy}$)

Optimierung 2: gestaffelte Prallteller im Sammelkanal

In der zweiten Optimierung wurden im Sammelkanal vor dem Wehr **drei hintereinander gestaffelt Prallteller** positioniert. Der Sammelkanal wird auf diese Weise in vier gleich große Bereiche unterteilt. Insgesamt wurden 13 verschiedene Abmessungen der Prallteller untersucht, jedoch bei identischer Positionierung dieser.

In Bild 5.46 sind beispielhaft zwei Varianten dargestellt. In der Variante oben liegt die Achse der Prallteller auf derselben Höhe wie die Achse des Rohrzulaufes. Der Querschnitt der Prallteller vergrößert sich bei zunehmendem Abstand vom Zulauf. Die Höhe des ersten Pralltellers beträgt die Hälfte des Rohrdurchmessers ($D_{Rohrzulauf}$). Die Höhe des zweiten Pralltellers beträgt $0,75 \cdot D_{Rohrzulauf}$ und die des dritten $1,0 \cdot D_{Rohrzulauf}$. Alle drei Prallteller sind sowohl unter- als auch überströmbar.

Die Variante unten in Bild 5.46 besitzt drei Prallteller, deren Oberkanten jeweils bis zum Wasserspiegel reichen und dadurch nicht überströmbar sind. Die Unterkante des ersten Pralltellers reicht so tief, dass 20 % des Rohrdurchmessers ausgeblockt werden. Der zweite Prallteller blockt 60 % und der dritte 100 % des Rohrdurchmessers aus.

Die Staffelung der Prallteller soll die Strömung sukzessive abgreifen und somit eine über die Breite des Wehres gleichverteilte Überströmung erzielen. Die Verteilung der Geschwindigkeiten in Bild 3.22 zeigen jedoch deutlich, dass die hier getestete Kombination aus Pralltellern und Wehr großräumige Rezirkulationen nicht verhindert werden können. Zwar erzielen die

Prallteller, welche bis zum WSP reichen, leicht höhere Indikatoren als diejenigen, die überströmbar sind, eine gewünschte pfropfenartige Anströmung des Beckens wird durch diese Optimierungsvariante des Einlaufes nicht erreicht.

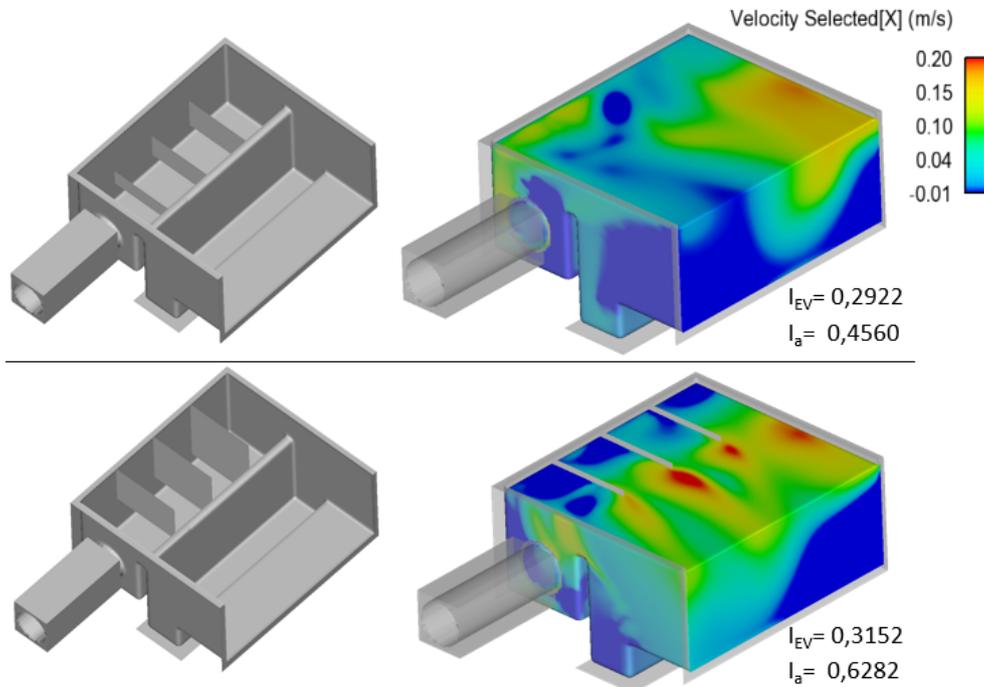


Bild 5.46: Konturplot der u-Geschwindigkeiten (oben: überströmbar; unten: nicht überströmbar)

Optimierung 3: Lamellenwand

In der dritten Optimierungsvariante wurde **unterstrom des Wehrs eine Lamellenwand** angeordnet. Das Wehr weist eine Höhe von 1,40 m ($\sim 6 \cdot r_{hy}$) auf. Die Lamellenwand besteht aus insgesamt zehn Lamellen und steht auf drei Füßen, um ein Spülen nach einem Regenereignis zu ermöglichen.

Bild 5.47 zeigt, dass durch die Lamellenwand großräumige Rezirkulationszonen vermieden werden ($I_a = 0,9448$). Des Weiteren werden die Geschwindigkeitsspitzen auf der linken Beckenseite durch die Lamellenwand aufgefächert, so kann die kinetische Energie durch die entstehenden Scherschichten besser dissipieren. Des Weiteren werden die Vektoren der Geschwindigkeit durch die Lamellen so geordnet, dass diese eine beckenparallele Ausrichtung aufweisen.

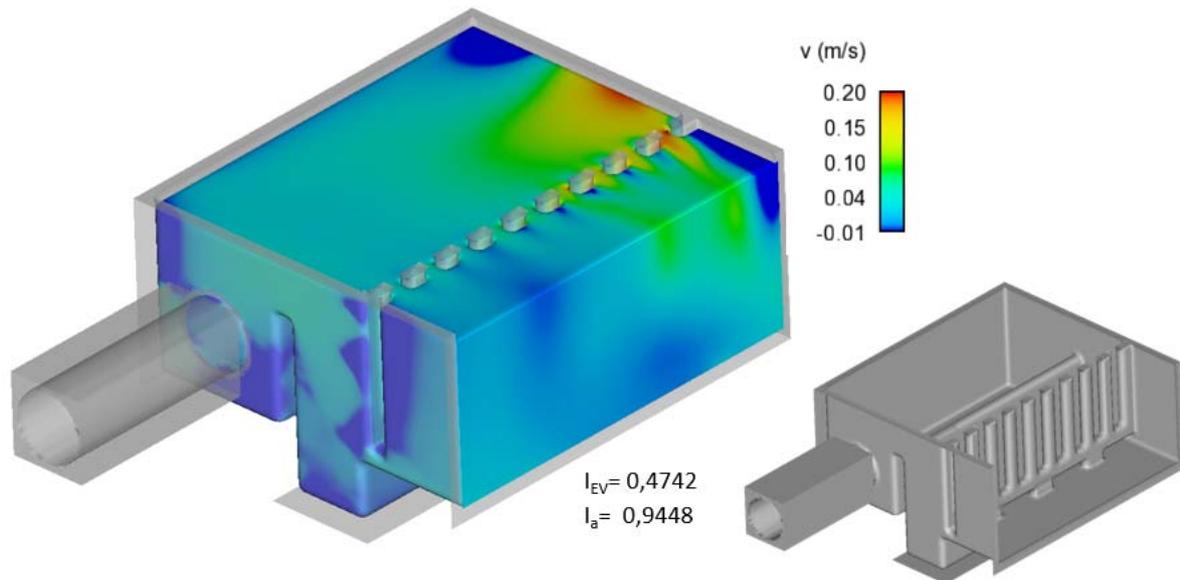


Bild 5.47: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Lamellenwand mit einer Wehrhöhe von 1,40 m

Optimierung 4: Variation der Wehrhöhe

Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse bei Verwendung einer Kombination aus Wehr und Lamellenwand wird diese Variante weitergehend untersucht und optimiert. Hierzu wurde insbesondere **die Höhe des Wehres stufenweise verändert**, um deren Einfluss auf die Durchströmungscharakteristik zu quantifizieren. Es wurden sowohl vollkommene als auch unvollkommene Wehrüberfälle betrachtet. Die Wehrhöhen liegen zwischen $0 \cdot r_{hy}$ (ohne Wehr) und $9,7 \cdot r_{hy}$.

Bild 5.48 zeigt die Indikatoren aller untersuchten Wehrhöhen. Anhand dieses Vergleiches ist ersichtlich, dass sich Wehrhöhen zwischen $2,5$ und $4,5 \cdot r_{hy}$ positiv auf die Durchströmung auswirken. Bei einer Wehrhöhe von $\sim 3 \cdot r_{hy}$ ist ein Optimum abzulesen.

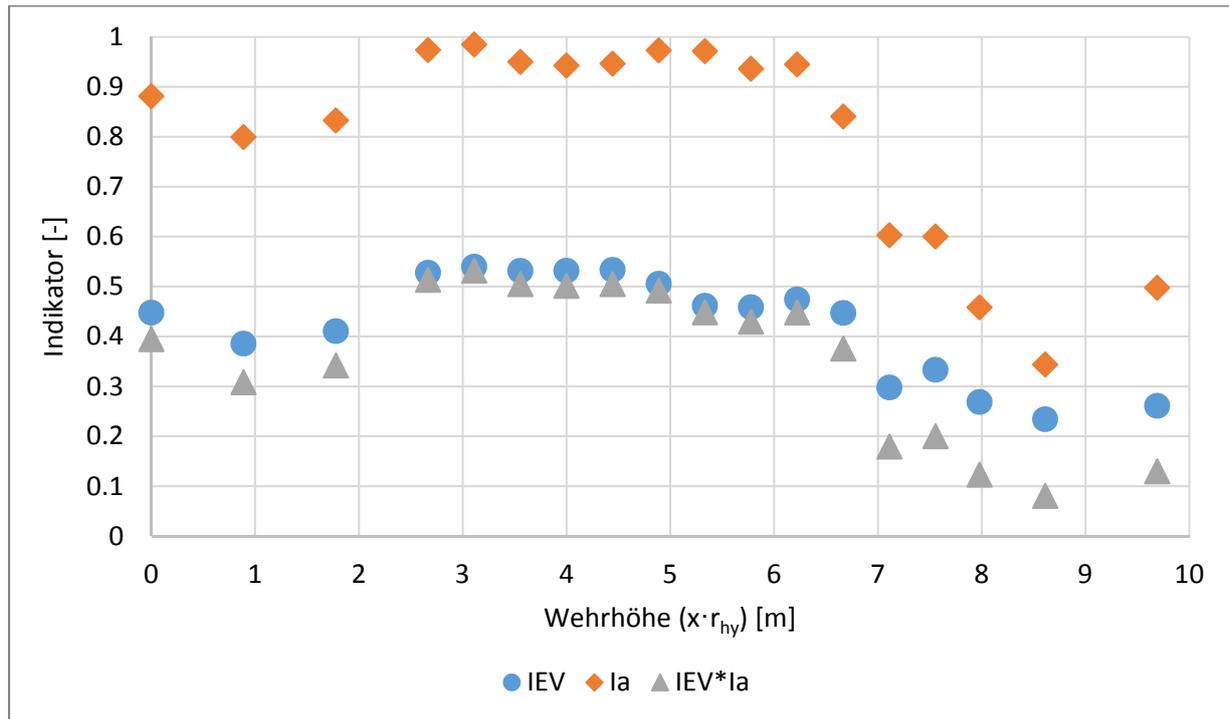


Bild 5.48: Übersicht der untersuchten Wehrhöhen in Kombination mit einer Lamellenwand

Bild 5.49 ist die Verteilung der Geschwindigkeiten im Zulaufbereich der Variante mit der optimaler Wehrhöhe dargestellt. Im Vergleich zu der Variante mit dem vergleichsweise höheren Wehr (vgl. Bild 5.47) werden Rezirkulationszonen und Geschwindigkeitsspitzen reduziert und die Anströmung der Sedimentationskammer ist deutlich gleichmäßiger. Bemerkenswert dabei ist, dass die Wehroberkante noch unterhalb des Scheitels des Zulaufrohres liegt.

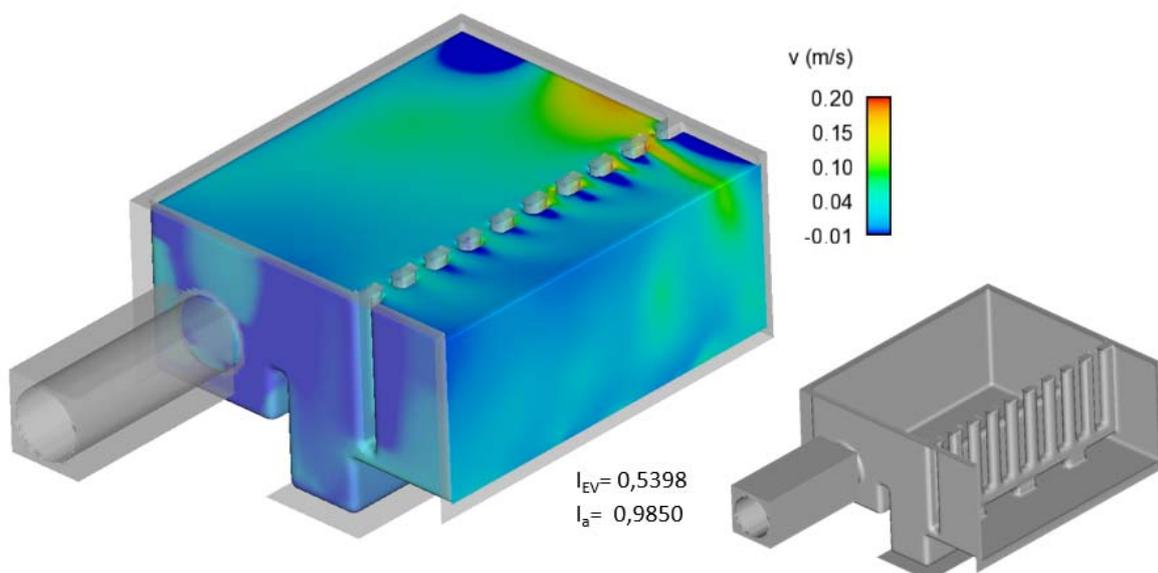


Bild 5.49: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Lamellenwand mit einer Wehrhöhe von $\sim 3 \cdot r_{hy}$

Ergänzend zu der oben beschriebenen Lamellenwand wurden andere geometrische Ausführungen der Lamellenwand untersucht. Zum einen wurden, um den Schlammraum zu schützen, die **Spülschlitze als nicht durchströmbar** ausgebildet. Zum anderen wurde **zwischen Beckenaußenwand und erster Lamelle ein Spalt** vorgesehen, um die sich dort in der Ursprungsvariante (Bild 5.49) zu beobachtende Rezirkulation in diesem Bereich zu vermeiden. Beide Konfigurationen führen jedoch nicht nur nicht zum erwünschten Erfolg, sondern bewirken sogar weitere negative Auswirkungen auf die Durchströmung (Bild 5.50). So entsteht in dem Spalt zwischen Außenwand und erster Lamelle eine Jet-Wirkung, die zu hohen Geschwindigkeiten führt. Die ausgeblockten Spülschlitze führen zu unregelmäßigen Rezirkulationszonen, die sich vor allem auf der rechten Beckenseite befinden. Beide Varianten werden aufgrund dessen verworfen.

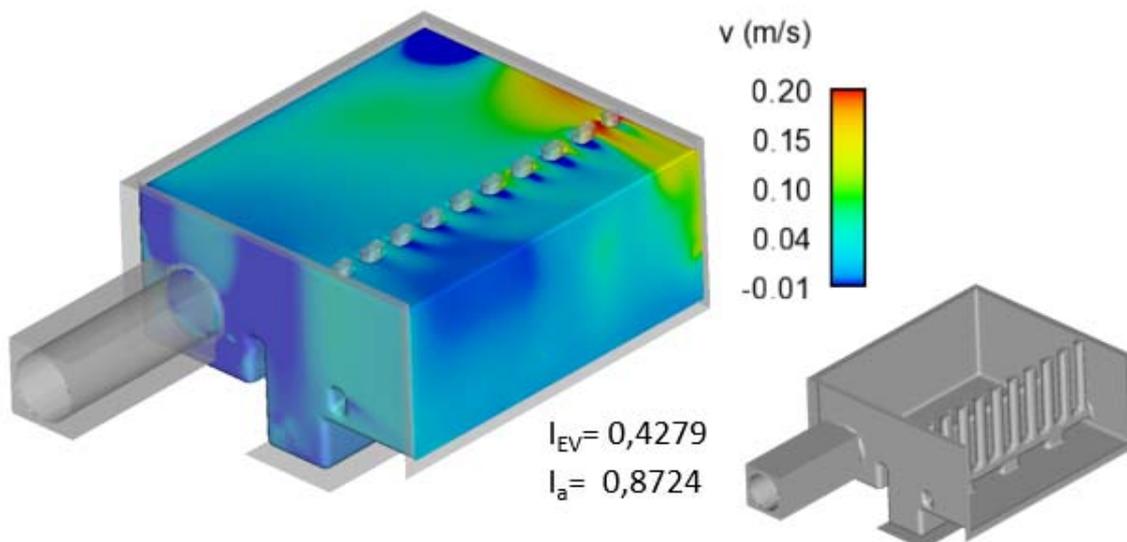
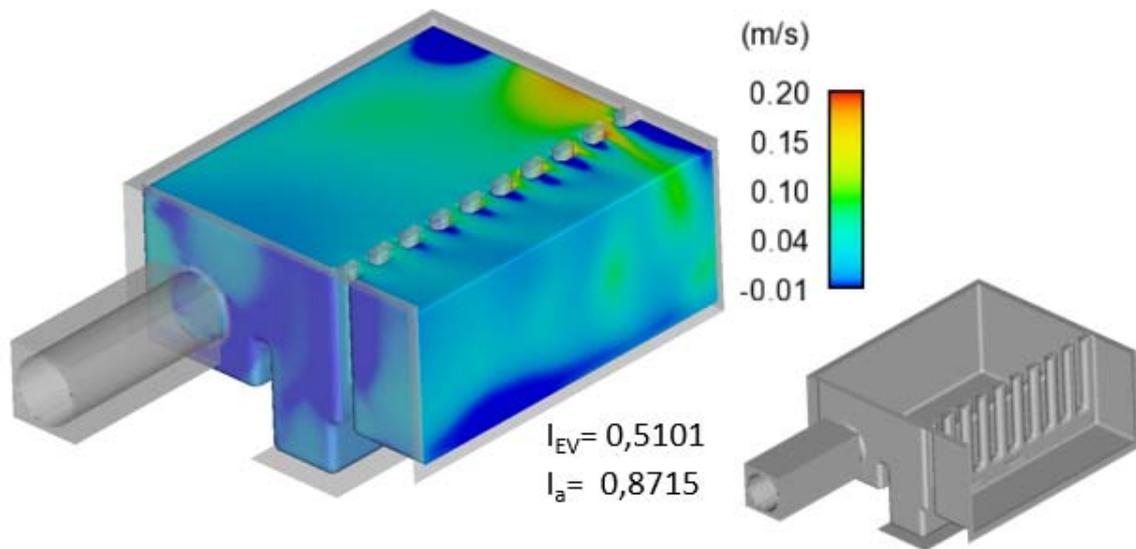


Bild 5.50: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Lamellenwand mit einer Wehrhöhe von 0,70 m (oben: ausgeblockte Spülschlitze; unten: Spalt zwischen Außenwand und erster Lamelle)

Optimierung 5: Veränderte Wehrform

Im Rahmen der Optimierung 5 wurde die Form des Wehres verändert. In Bild 5.51 ist ein **schräg verlaufendes Wehr** gezeigt. Die Höhe des Wehres beträgt auf der linken Beckenseite $8 \cdot r_{hy}$ (1,80 m), auf der rechten Beckenseite $\sim 6 \cdot r_{hy}$ (1,40 m). Das auf der linken Seite hochgezogene Wehr soll die in der Grundvariante entstehende Kurzschlussströmung linksseitig im Becken verhindern. Wie Bild 5.51 zeigt, gelingt dies jedoch nicht vollständig. Noch immer ist dort eine Kurzschlussströmung erkennbar.

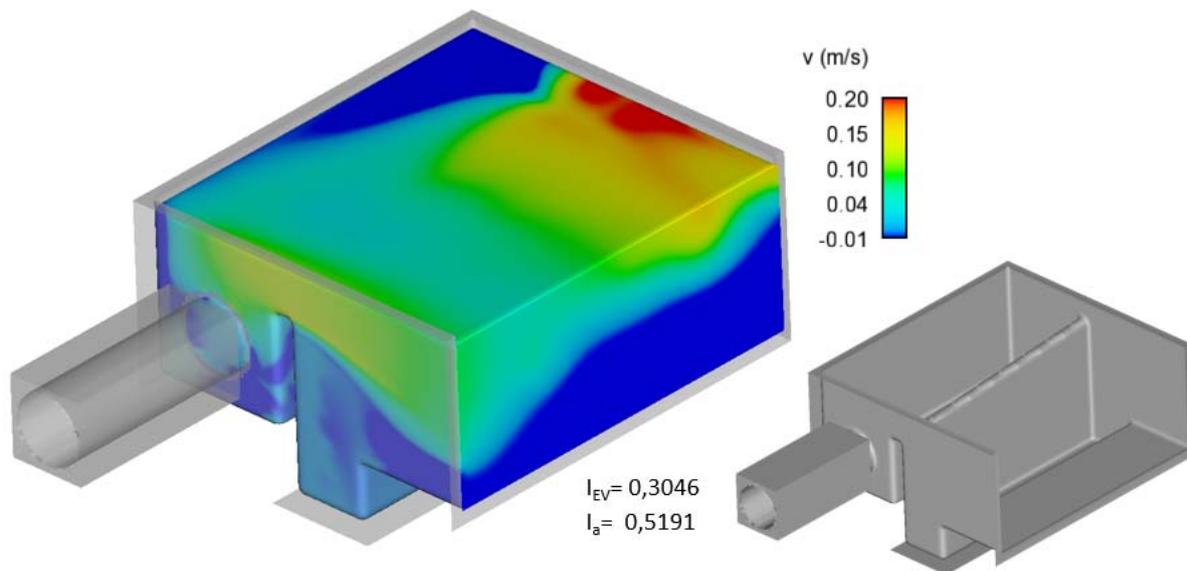


Bild 5.51: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des schrägen Wehres

Daher wurde das schräg verlaufende Wehr mit einer **entgegengesetzt verlaufenden, schrägen Leitwand** kombiniert. Die in der Grundvariante mit konstanter Wehrhöhe ausgebildete Rezirkulation horizontaler Drehachse ist auch bei Verwendung des schrägen Wehres noch deutlich erkennbar obgleich örtlich begrenzt durch eine nun auf die gegenüberliegende rechte Beckenseite verlagerte Kurzschlussströmung. Zwar sind die Geschwindigkeits-Maxima geringer als ohne Verwendung der schrägen Leitwand, die Strömungsindikatoren weisen jedoch noch immer eine ungleichmäßige Verteilung der Geschwindigkeiten aus.

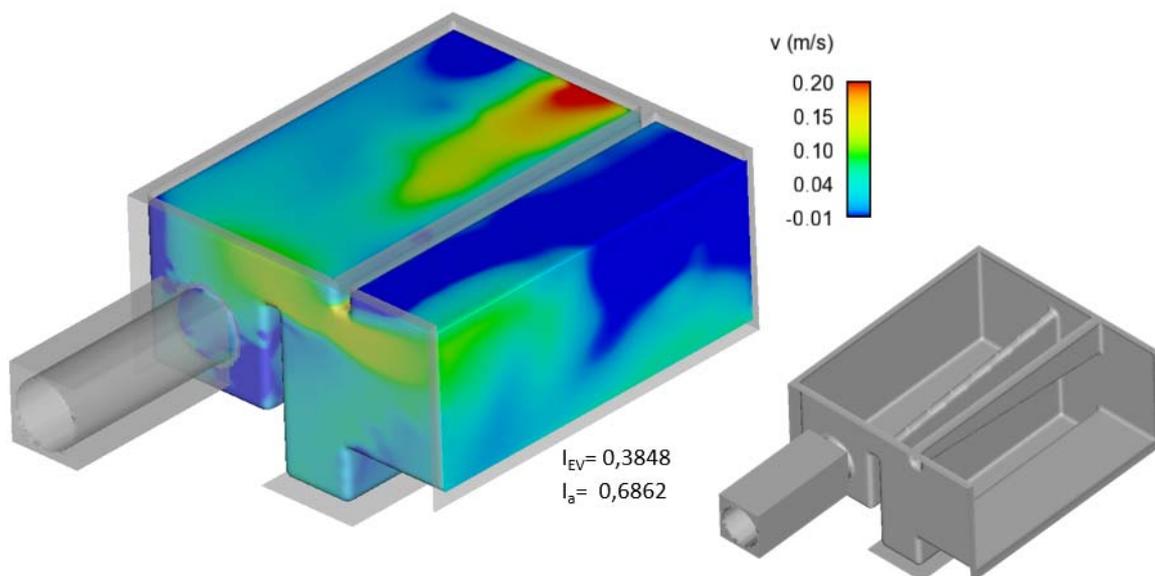


Bild 5.52: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des schrägen Wehres und gegenläufig angeschrägter Tauchwand

Optimierung 6: Strömungs-Gleichrichter

Ähnlich den beckenparallelen Einlaufbauwerken wird auch für den transversalen Einlauf der Einsatz eines Strömungs-Gleichrichters getestet. Die Höhe des Wehres beträgt in dieser Optimierung $\sim 3 \cdot r_{hy}$ (optimale Wehrhöhe nach Optimierung 4: Variation der Wehrhöhe).

Der Indikator I_a gibt an, dass etwa 97 % des Kontrollquerschnitts positiv durchströmt werden, Rezirkulationszonen werden also nahezu vollständig vermieden. Somit wird das gesamte Beckenvolumen effektiv durchströmt und ist somit zur Sedimentation nutzbar.

Der Indikator I_{EV} mit einem Wert von 0,5652 verdeutlicht die gute Gleichverteilung der Fließgeschwindigkeiten. Allerdings sind leicht erhöhte Fließgeschwindigkeiten auf der Beckensohle zu verzeichnen, welche die Remobilisierung von bereits abgelagertem Sediment begünstigen könnten. Dies ist aber durch kleinere Variationen der Anordnung der Belche des Gleichrichters vermeidbar.

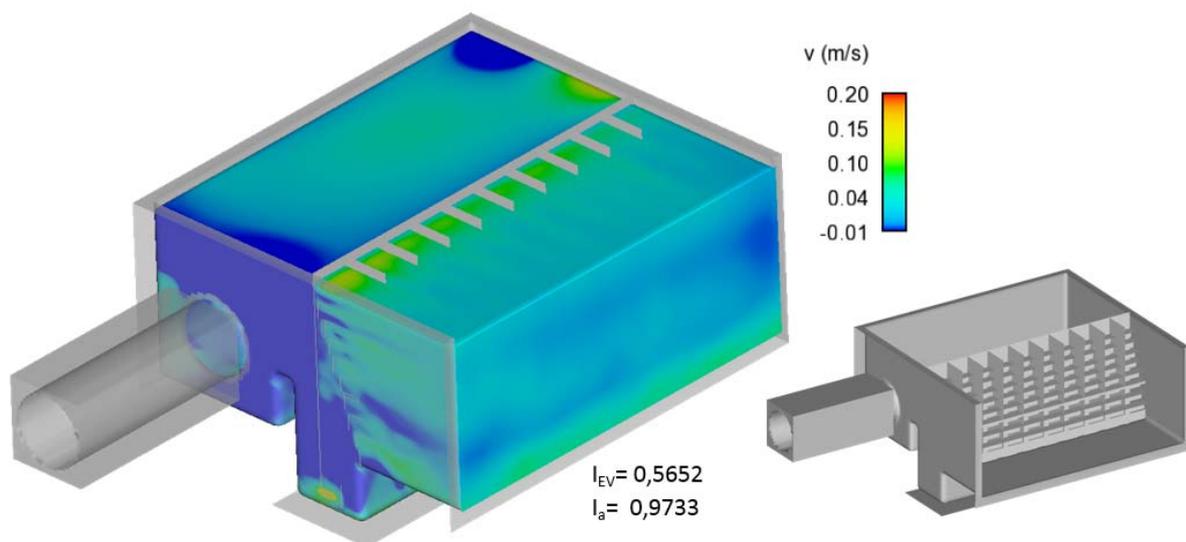


Bild 5.53: Konturplot der u-Geschwindigkeiten der Optimierung 6 des transversalen Einlaufs

5.4.3 Sedimentationskammer

Insgesamt wurden vier unterschiedliche Grundvarianten der Sedimentationskammer (Ist-Varianten SeKa 1 - 4) entworfen. Diese Grundvarianten unterscheiden sich bei gleichbleibendem Beckenvolumen in ihren Abmessungsverhältnissen gemäß Kapitel 4.4.2. Zusätzlich sind je Grundvariante vier Varianten (SeKa x_1 – Seka x_4) entwickelt worden, die eine unterschiedliche hohe Ausblockung des Fließquerschnitts vor dem Schlammraum aufweisen (vgl. Bild 5.54 und Bild 5.56). Mit dieser Ausblockung soll untersucht werden, ob durch derartige

Einbauten einen Schutz des Sedimentationsraumes herbeigeführt werden kann. Bewertet wird dies anhand der Schubspannungen auf der Sohle der Sedimentationskammer.

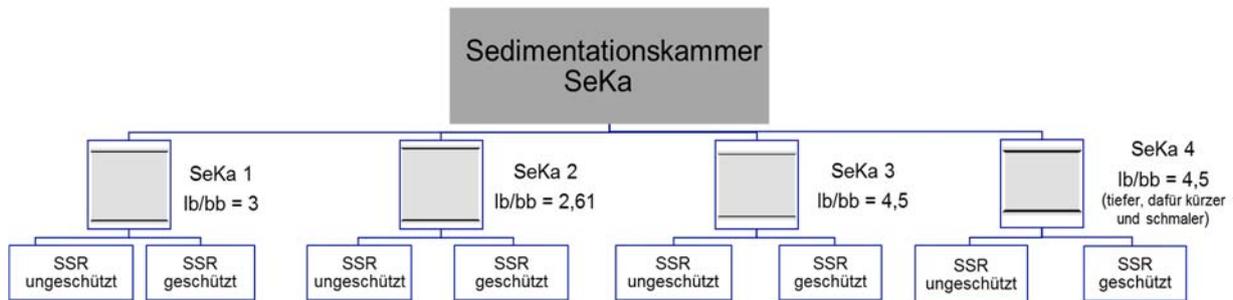


Bild 5.54: Übersicht der durchgeführten Simulationen zur Sedimentationskammer

Die Ausblockung wird in den Varianten SeKa x_1 – SeKa x_4 schrittweise um jeweils 0,1 m in der Höhe verändert (Das x wird jeweils durch die Nummer der Grundvariante ersetzt). Die Größe des Schlammraum bleibt für diese Untersuchung unverändert. Der Bereich oberhalb der negativen Stufe ist zusätzlich angefügt, um ein vollausgebildetes, ungestörtes (pfropfenartig) Geschwindigkeitsprofil zu gewährleisten. Die Geschwindigkeiten im Zulauf werden mit einem Blockprofil vorgegeben. Durch diese Vorgehensweise wird der Einfluss einer etwaigen Zulaufkonstruktion ausgeblendet und ausschließlich die Wirkungsweise der Sedimentationskammer und von Einbauten in der Sedimentationskammer zum Schutz des Schlammraum beurteilt werden.

In Bild 5.55 ist die Schubspannungsverteilung auf der Sohle der **SeKa 1** für alle simulierten Sohlstufen (SeKa 1_1 bis SeKa 1_4) dargestellt. Die Grundvariante zeigt eine sehr homogene Schubspannungsverteilung auf der Sohle. Diese liegt deutlich unterhalb der kritischen Schubspannung des in Kapitel 4.7.2 definierten Grenzkornes (AFS_{63}) von 0,17 Pa. Unterhalb der Ausblockung zeigt sich eine Rezirkulationszone, die mit zunehmender Höhe der Ausblockung größer wird. In Bild 5.56 ist die Ausbildung der Rezirkulationszone, bedingt durch die Ausblockung, exemplarisch im Längsschnitt eines Beckens dargestellt. Bei einer angenommenen Höhe des SSR von bis zu 0,2 m zeigen sich, im Vergleich zur Grundvariante, keine negativen Auswirkungen auf die Größe der auftretenden Schubspannungen. Eine größere Höhe in der Ausblockung führt jedoch zu Schubspannungsspitzen im letzten Drittel des Beckens. Diese liegen allerdings immer noch deutlich unterhalb der kritischen Schubspannung des Grenzkornes. Bei einer gleichmäßigen Anströmung der SeKa kann demnach an jeder Stelle auf der Sohle Substrat sedimentieren, ohne remobilisiert zu werden.

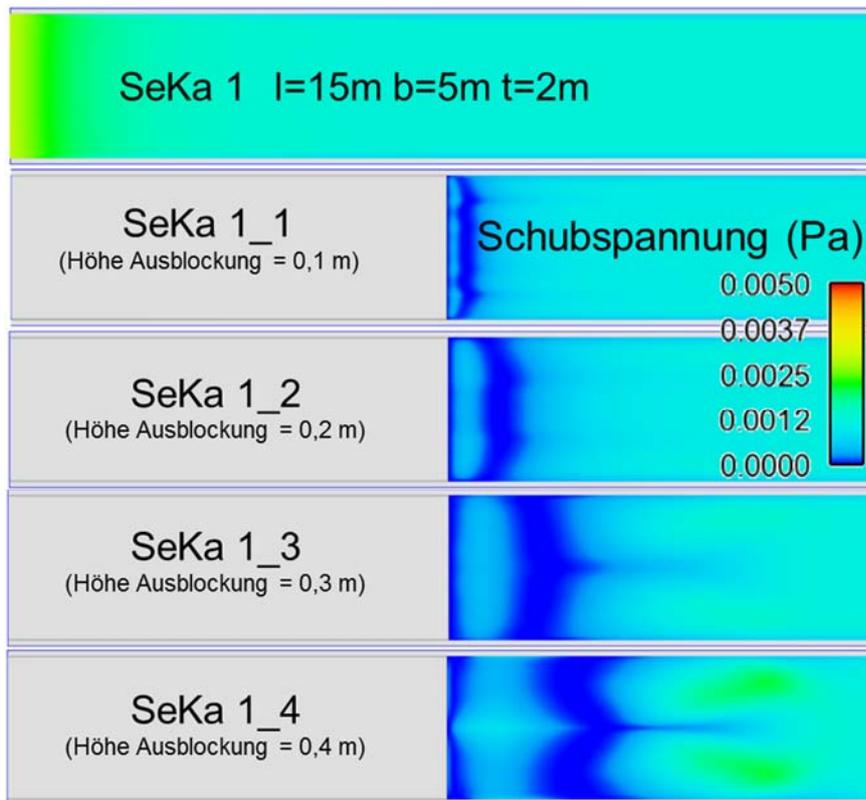


Bild 5.55: Schubspannungsverteilung auf der Sohle (SeKa 1)

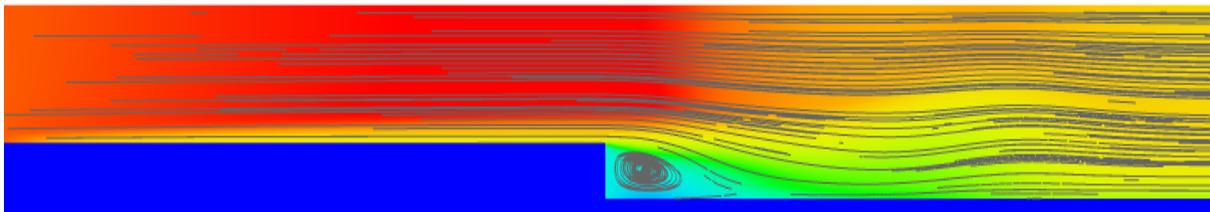


Bild 5.56: Exemplarische Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung im Längsschnitt einer SeKa mit Ausblockung zum Schutz des SSR (überhöht)

Die in Bild 5.57 dargestellte Schubspannungsverteilung in den simulierten Varianten der **SeKa 2** zeigt ein ähnliches Verhalten zu dem von SeKa 1 auf. Aufgrund der größeren Breite des Beckens sind die Schubspannungen etwas geringer, deren Spitzen flacher allerdings deutlich weiter in Richtung Klärüberlauf verschoben. Bedingt durch die geringe Länge der SeKa wirkt sich die Rezirkulationszone unterhalb der größten Ausblockung jedoch bis zur Beckenmitte aus, was zu einer Verringerung der absetzwirksamen Fläche führen kann.

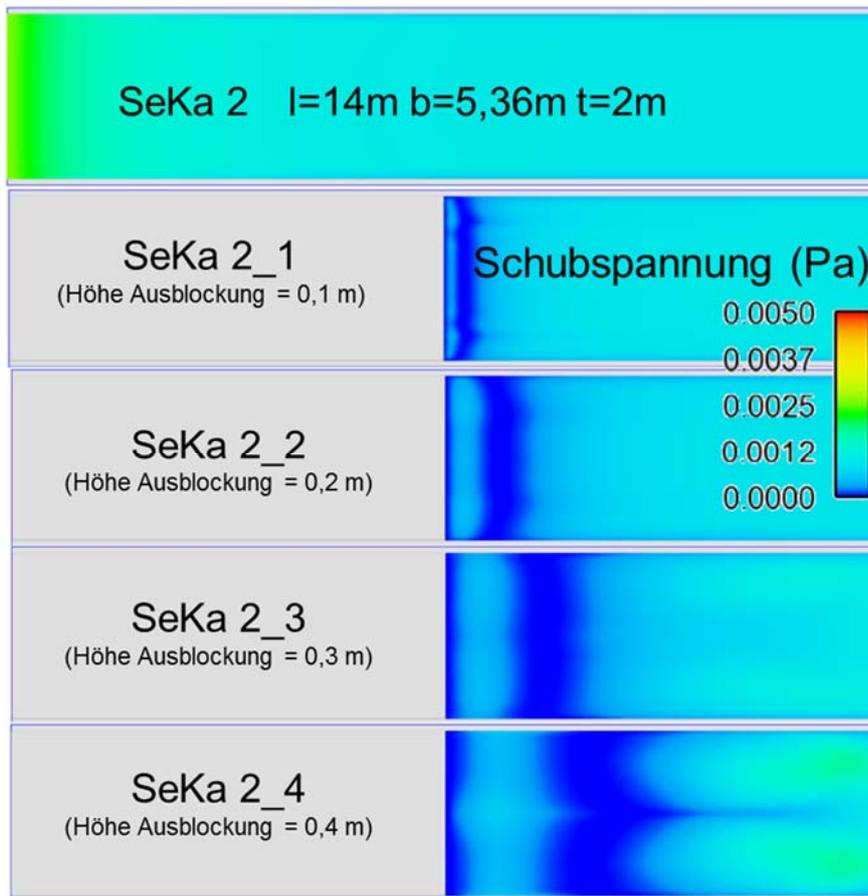


Bild 5.57: Schubspannungsverteilung auf der Sohle (SeKa 2)

SeKa 3 zeigt, dass sich mit abnehmender Breite des Beckens (vgl. Bild 5.58) die Schubspannungen auf der Sohle vergrößern. Die maximal auftretenden Schubspannungen liegen dennoch deutlich unterhalb der des Grenzkorns.

In Bild 5.59 sind die Schubspannungsverteilungen der Varianten von **SeKa 4** dargestellt. Diese Variante repräsentiert ein schmales, tiefes Becken bei konstantem Volumen. Rechnerisch führt dies bei gleicher hydraulischer Belastung zu einer größeren Oberflächenbeschickung. Zwar sind bei dem tieferen Becken die Schubspannungen auf der Sohle im Vergleich zu den Varianten mit Abmessungsverhältnissen geringer - was einen Schutz des Schlammraumraumes begünstigt - jedoch muss auch bedacht werden, dass sich die resultierende höhere Oberflächenbeschickung bei gleicher hydraulischer Belastung direkt negativ auf Sedimentationsvorgänge auswirkt.

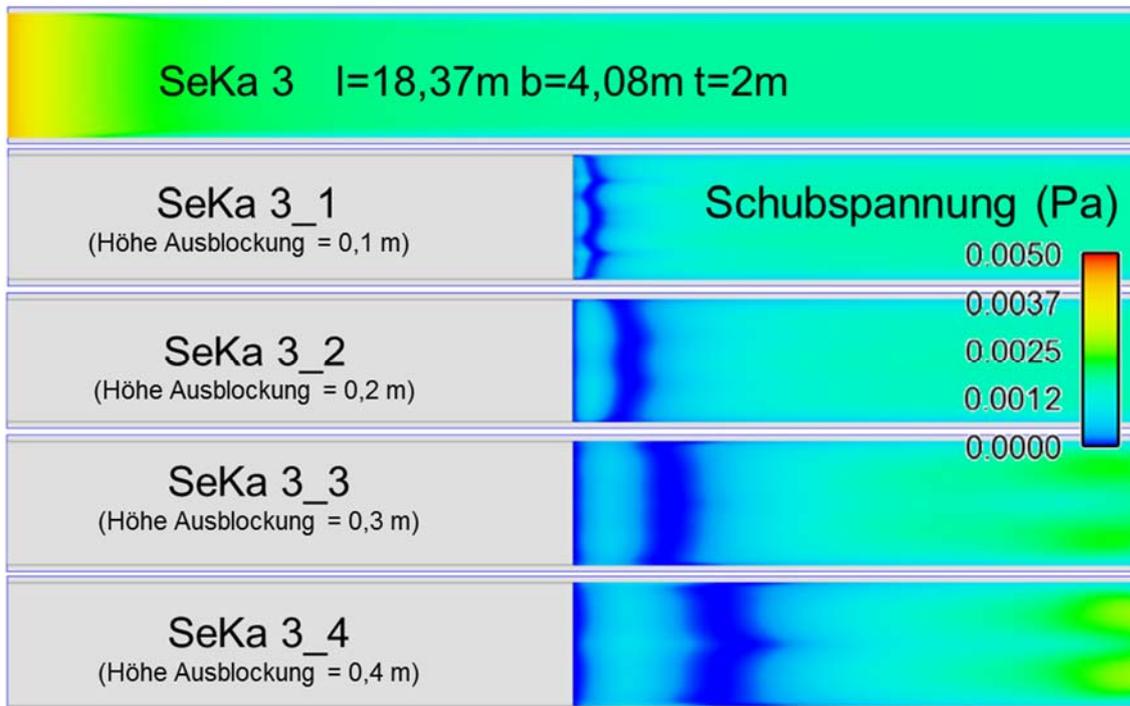


Bild 5.58: Schubspannungsverteilung auf der Sohle (SeKa 3)

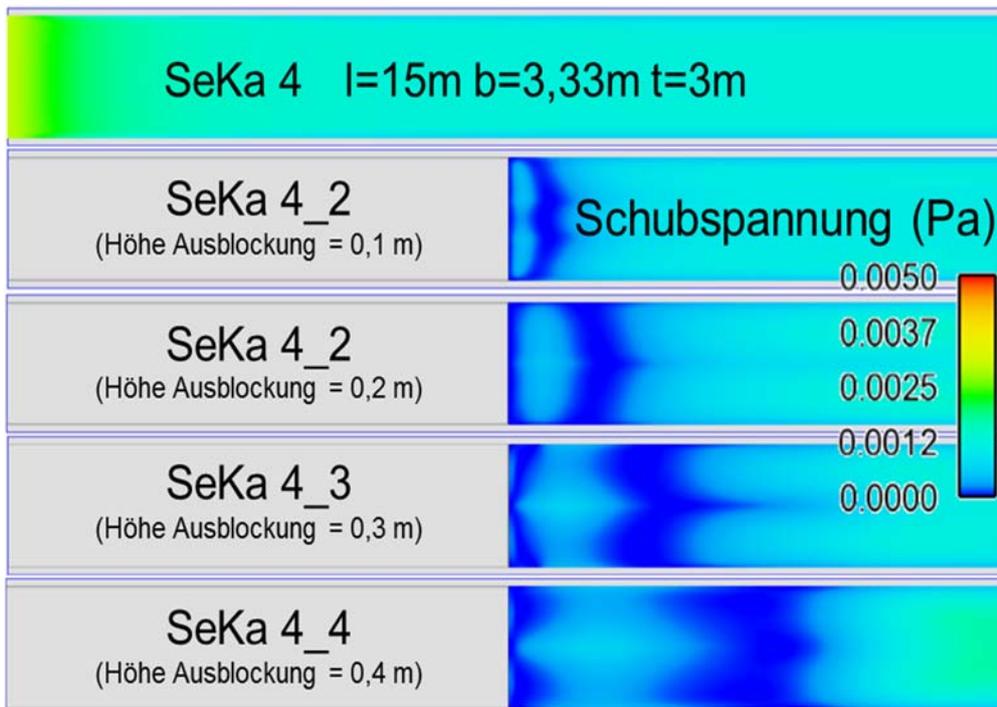


Bild 5.59: Schubspannungsverteilung auf der Sohle (SeKa 4)

Der Vergleich der unterschiedlichen Abmessungsverhältnisse der Sedimentationskammer zeigt, dass diese, sofern die in DWA A 166 vorgeschlagenen Abmessungsverhältnisse eingehalten sind, kaum merkliche Auswirkungen auf die Remobilisierung in der Sedimentationskam-

mer haben. Geringfügige Abweichungen von den Abmessungsverhältnissen (vgl. SeKa 2) führen zu keiner negativen Beeinflussung der Durchströmung. Becken, deren Tiefenverhältnis außerhalb der definierten Grenzen liegt, weisen zwar einen höheren Schutz vor Remobilisierung auf, durch die resultierende erhöhte Oberflächenbeschickung (15 m/h bei SeKa 4) müsste jedoch der Zufluss und damit die Oberflächenbeschickung begrenzt werden, um eine vergleichbare Sedimentationsleistung im Becken zu erzielen.

5.4.4 Klärüberlauf

Wie in Kapitel 4.4.2.3 vorgestellt, sind zwei unterschiedliche Grundvarianten untersucht worden. Dabei handelt es sich zum einen um die Variante KÜ1, bei der die Tauchwand und das Wehr in der Beckenrückwand integriert sind und zum anderen um die Variante KÜ2, die ein herkömmliches Wehr mit vorgeschalteter Tauchwand aufweist. Für jede Grundvariante sind drei unterschiedliche Schlitzbreiten bzw. Eintauchtiefen der Tauchwand untersucht worden. Der betrachtete Bereich umfasst den hinteren Teil des Beckens ab 1,5 m oberstrom des Klärüberlaufes. In diesem Abstand befindet sich der Kontrollquerschnitt, auf dem die Indikatoren berechnet werden.

In Bild 5.60 sind die Simulationsergebnisse der Variante KÜ1 für alle drei simulierten Schlitzbreiten dargestellt, wobei die Schlitzbreite von links nach rechts zunimmt. Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeitsverteilung auf dem Kontrollquerschnitt nicht durch die unterschiedlichen Schlitzbreiten beeinflusst wird. Zwischen den Varianten KÜ1_1 – KÜ1_3 ist der Einfluss der Schlitzbreite lediglich anhand der Geschwindigkeitsverteilung im Schlitz selbst erkennbar. Insbesondere durch den schmalen Schlitz ist ein aus der Einschnürung resultierendes, lokales Maximum in der Fließgeschwindigkeit zu erkennen. Der Indikators I_{EV} zeigt nur marginale Änderungen durch die veränderte Schlitzbreite an. Der Indikator I_a liegt bei allen Varianten bei 1. Es resultieren keine Rezirkulationszonen infolge des Klärüberlaufes.

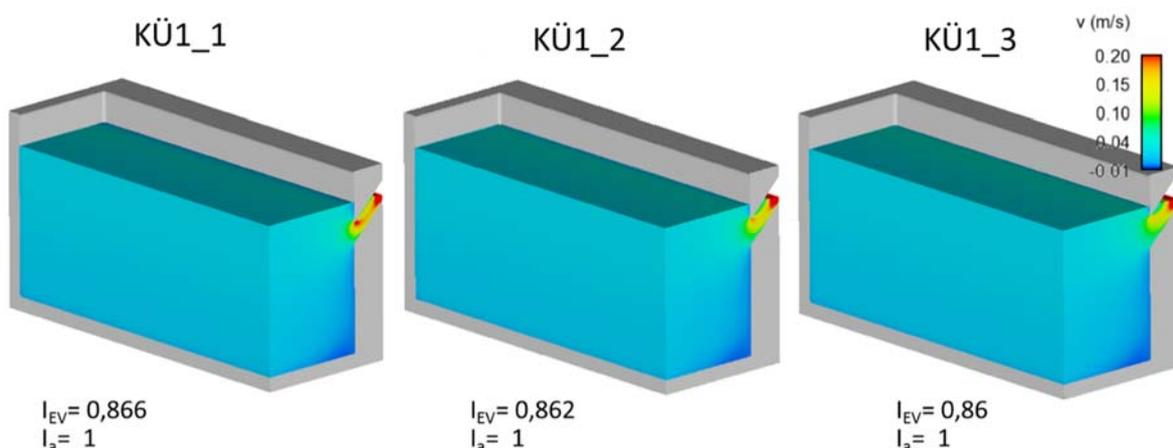
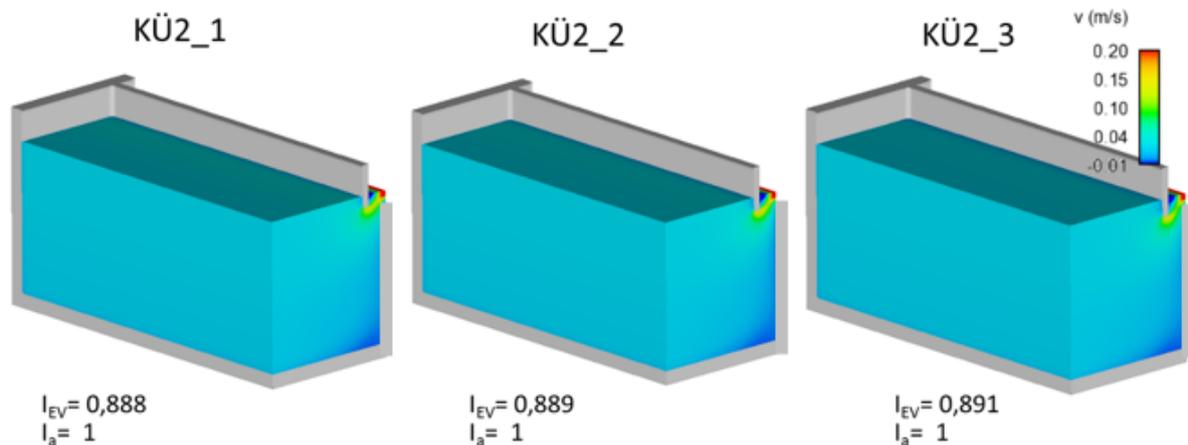


Bild 5.60: Geschwindigkeitsverteilung aller Varianten Klärüberlauf KÜ 1

Bild 5.61 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung der drei untersuchten Varianten KÜ2, die sich jeweils anhand der Eintauchtiefe der Tauchwand unterscheiden. Die Eintauchtiefe nimmt von links nach rechts zu.

**Bild 5.61: Geschwindigkeitsverteilung aller Varianten Klärüberlauf KÜ 2**

Analog zu den Varianten des KÜ1, zeigt sich auch bei KÜ2 kein Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung durch eine unterschiedliche Eintauchtiefe der Tauchwand. Ein nennenswerter Unterschied in der Einschnürung hinter der Tauchwand, ist bei den unterschiedlichen Varianten von KÜ2 jedoch nicht erkennbar.

Anhand des Indikators I_{EV} lässt sich ein, wenn auch marginaler, Einfluss der Eintauchtiefe der Tauchwand erkennen. Mit zunehmender Eintauchtiefe steigt der Indikator an. Der Indikator I_a ist analog zu KÜ1 bei allen Varianten gleich. Es resultieren keine Rezirkulationszonen durch diese Variante des Klärüberlaufes.

Die Konstruktion Wehr mit vorgeschalteter Tauchwand wirkt sich demnach nicht maßgeblich auf die Geschwindigkeitsverteilung am Kontrollquerschnitt und damit auf die Durchströmung der Sedimentationskammer aus.

5.4.5 Gesamtbecken

Gesamtbecken wurden für den mittigen Gerinnezufluss und den transversalen Rohrzufluss simuliert. Für den beckenparallelen, mittigen Gerinnezufluss wurden die Grundvariante, Optimierungen 2 (Prallwand), Optimierung 4 (Lamellenwand) und die Optimierung 6 (Strömungsgleichrichter) untersucht. Für den transversalen Zufluss wurden die Grundvariante, die Lamellenwand mit der optimalen Wehrhöhe sowie ebenfalls die Optimierung 6 (Strömungsgleichrichter) simuliert.

5.4.5.1 Gerinnezufluss (mittig)

Grundvariante

Bild 5.62 zeigt das Gesamtbecken der Grundvariante. Alle Gesamtbecken wurden mit einer Oberflächenbeschickung von 10 m/h simuliert, da dies den Bemessungsfall darstellt. Die geometrischen Abmessungen des Gesamtbeckens sind in Kapitel 4.4.2 beschrieben.

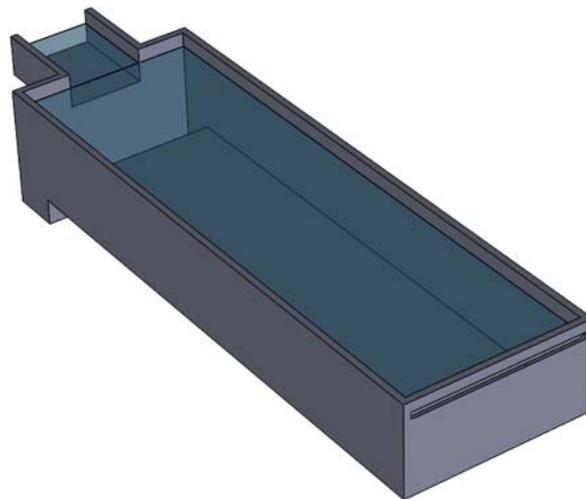


Bild 5.62: Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante des mittigen Gerinnezuflusses

Die Erkenntnisse aus der Untersuchung des mittigen Gerinneeinlaufs im Rahmen der Einlaufbauwerke werden bestätigt. Die sich infolge des mittigen Beckeneinlaufes ausbildende Kurzschlussströmung zieht sich nahezu durch das gesamte Becken. Auf der rechten Beckenseite bildet sich eine großräumige Rezirkulationszone aus. Eine annähernde Gleichverteilung der Geschwindigkeiten über die Beckenhöhe gelingt nur im hinteren Teil des Beckens (Bild 5.63).

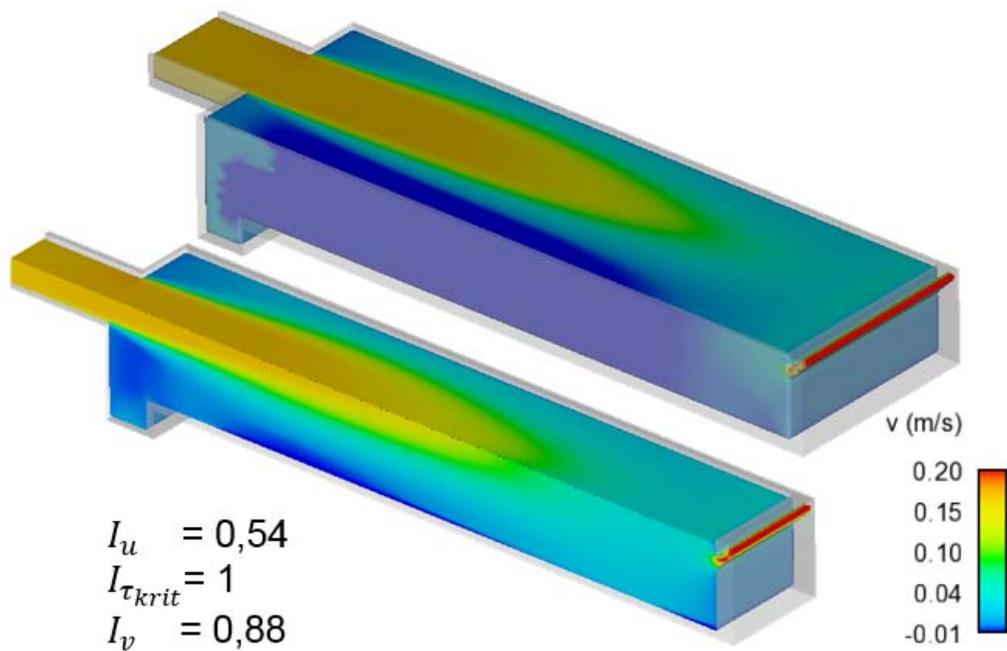


Bild 5.63: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante des mittigen Gerinneinlaufs

Optimierung 2: Prallwand

Bild 5.64 zeigt das Gesamtbecken der Grundvariante mit einer Prallwand des mittigen Gerinneinlaufs.

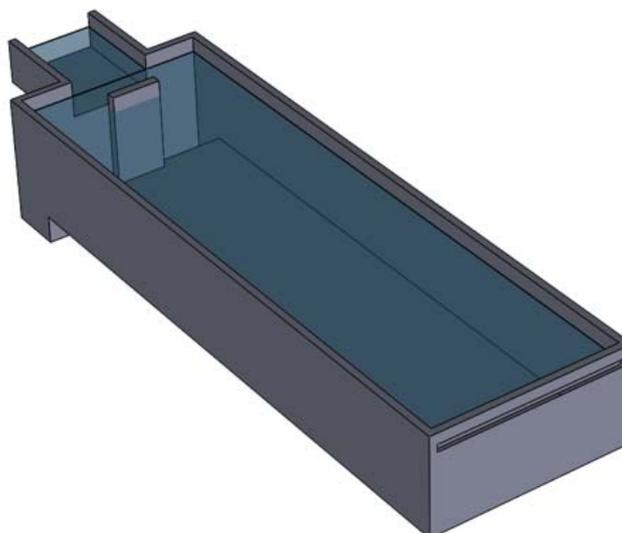


Bild 5.64: Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Prallwand des mittigen Gerinneinlaufs

Durch den Einsatz einer Prallwand kann etwa ab der Hälfte der SeKa eine pfropfenartige Durchströmung erzielt werden. Im Unterstrom der Prallwand resultiert eine großräumige Rezirkulation. Die maximale horizontale Fließgeschwindigkeit wird durch den Einsatz einer Prallwand weniger häufig überschritten als bei der Grundvariante. Auch die Größe des absetzbaren Volumens wird durch diese Optimierung verbessert.

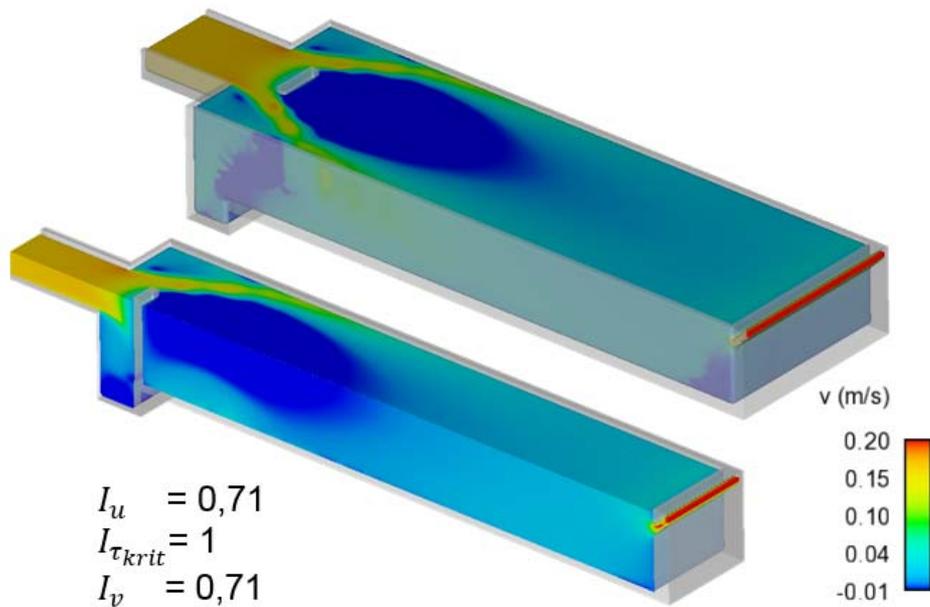


Bild 5.65: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Prallwand des mittigen Gerinneinlaufs

Optimierung 4: Lamellenwand

Bild 5.66 zeigt das Gesamtbecken der Grundvariante mit einer Lamellenwand des mittigen Gerinnezuflusses. Die Lamellen stehen direkt auf der Beckensohle. Es sind keine Ausblockungen vorhanden.

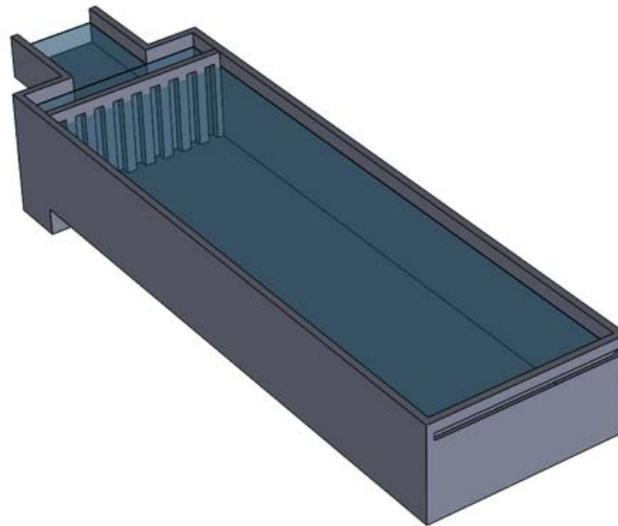


Bild 5.66: Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Lamellenwand des mittleren Gerinneeinlaufs

Bild 5.67 zeigt, dass durch den Einbau einer Lamellenwand nur etwa das letzte Drittel der Sedimentationskammer pfpfenartig durchströmt wird. Im Großteil der Sedimentationskammer ist eine Kurzschlussströmung, die beidseitig von großräumigen Rezirkulationszonen begleitet wird, zu erkennen. Im Vergleich zur Grundvariante wird durch die Lamellenwand die Größe des absetz wirksamen Volumens verkleinert (Indikator I_v).

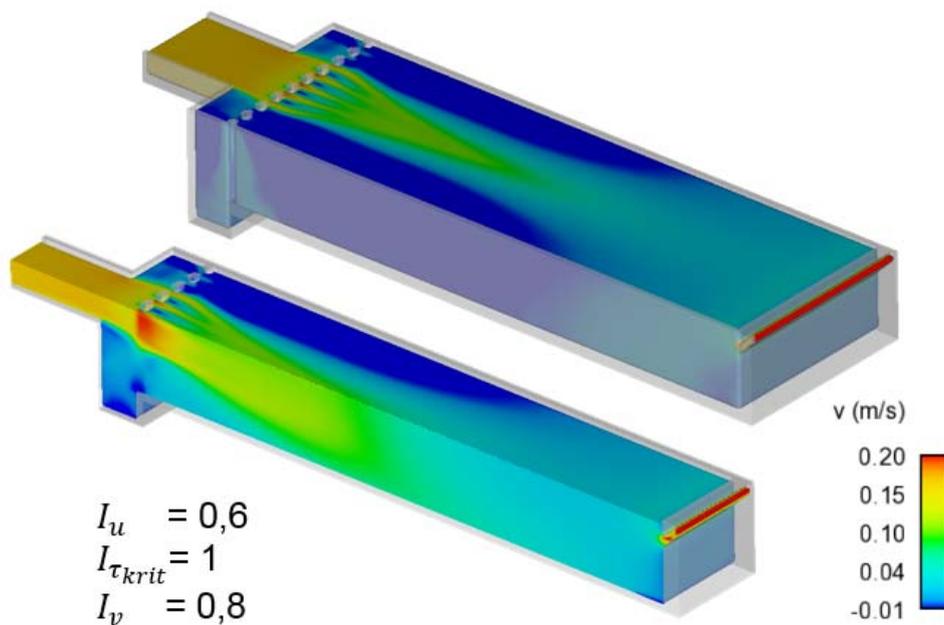


Bild 5.67: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Lamellenwand des mittleren Gerinneeinlaufs

Optimierung 6: Strömungs-Gleichrichter

Bild 5.68 zeigt das Gesamtbecken der Grundvariante mit einem Strömungs-Gleichrichter des mittigen Gerinneeinlaufs.

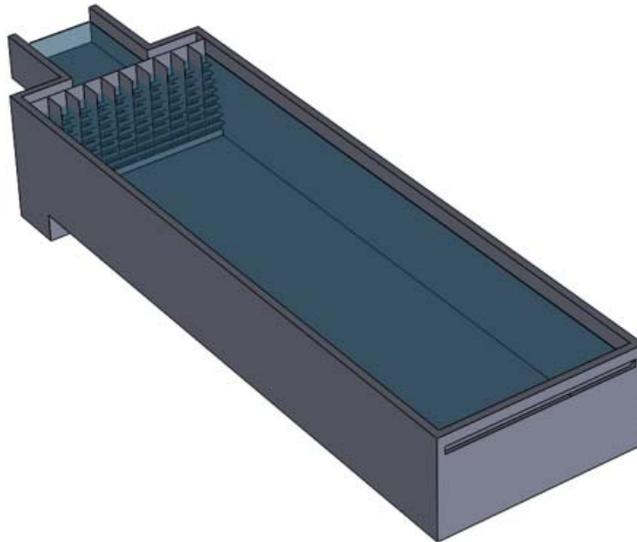


Bild 5.68: Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante mit dem Strömungs-Gleichrichter des mittigen Gerinneeinlaufs

Durch den Einbau eines Strömungs-Gleichrichters wird nahezu über die gesamte Sedimentationskammer eine pfpfenartige Durchströmung erzielt. Es entstehen kaum Rezirkulationszonen im Becken.

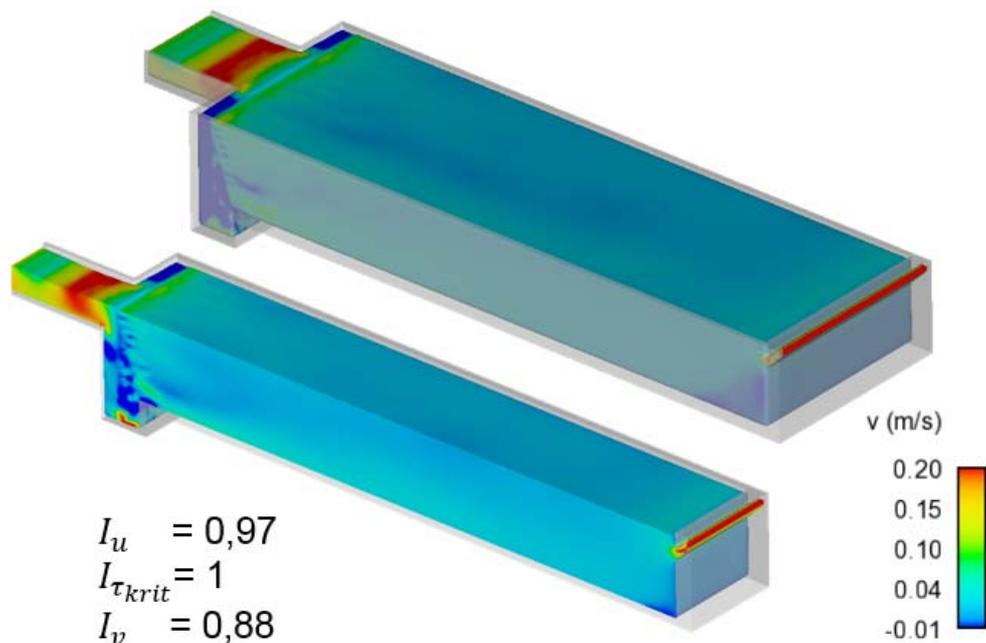


Bild 5.69: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante mit einem Strömungs-Gleichrichter des mittigen Gerinneeinlaufs

5.4.5.2 Transversaler Rohrzulauf

Grundvariante

In Bild 5.70 ist die Grundvariante des Gesamtbeckens mit transversalem Zulauf dargestellt.

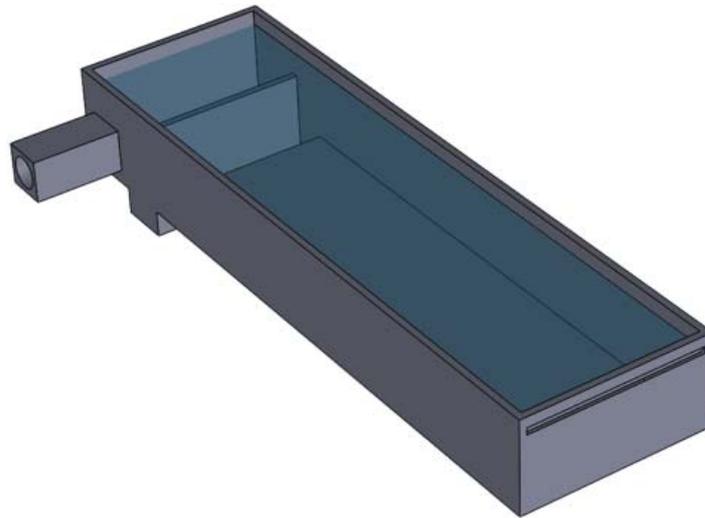


Bild 5.70: Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante des transversalen Rohrzulaufs

Bild 5.71 zeigt, dass etwa dreiviertel der Sedimentationskammer pfropfenartig durchströmt werden. Im Vergleich zur Grundvariante des beckenparallelen Einlaufs weist der Indikator I_u deutlich besseren Wert auf, der Indikator I_v ist hingegen nur leicht besser. Die kritische Schubspannung für AFS_{63} (2.650 kg/m^3 , $63 \text{ }\mu\text{m}$) in keinem Bereich auf der Sohle überschritten.

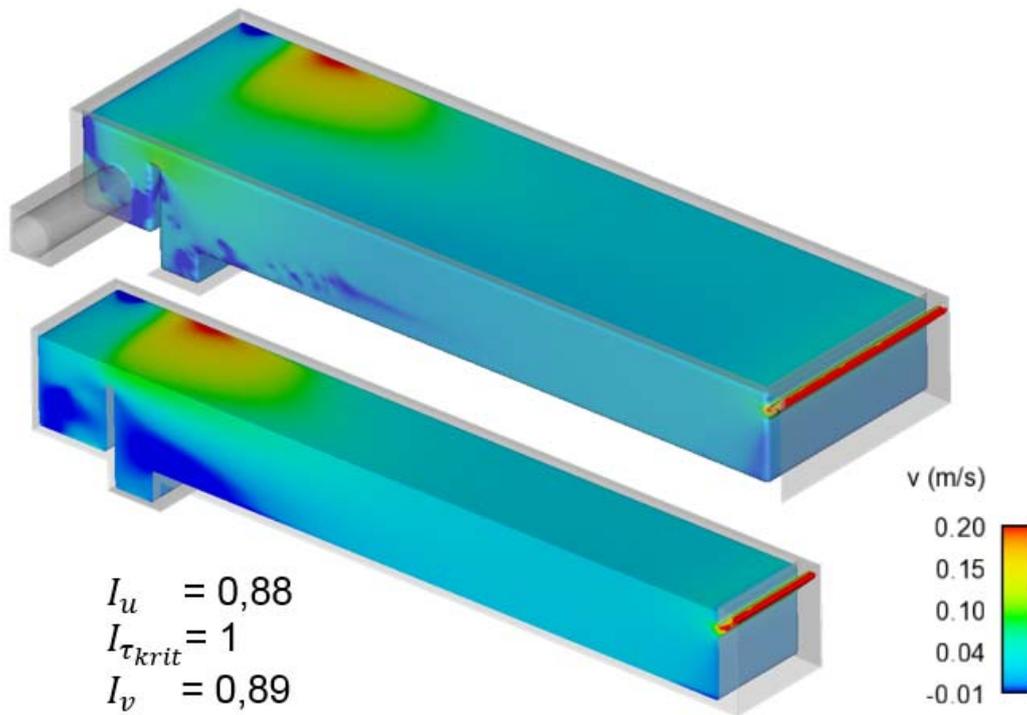


Bild 5.71: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante des transversalen Rohrzulaufs

Lamellenwand und optimale Wehrhöhe

Bild 5.72 zeigt das Gesamtbecken der Grundvariante mit Lamellenwand und optimaler Wehrhöhe des transversalen Rohrzulaufs.

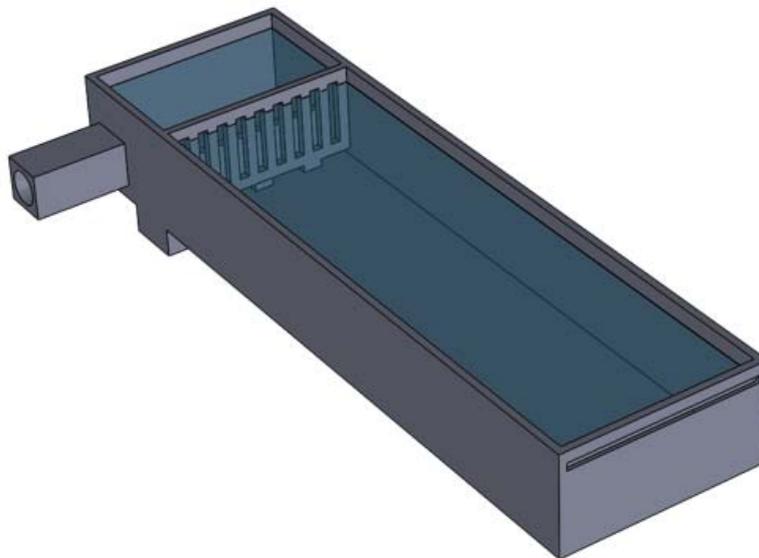


Bild 5.72: Geometrie des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Lamellenwand und optimaler Wehrhöhe des transversalen Rohrzulaufs

In Bild 5.73 ist zu erkennen, dass obwohl das Einlaufbauwerk an sich gute Indikatoren erzielt hat, in der Sedimentationskammer einzelne unregelmäßige Rezirkulationen zu erkennen sind. Es zeigt sich ein Pendeln der Strömung im Becken, wodurch eine pfpfenartige Durchströmung gestört wird.

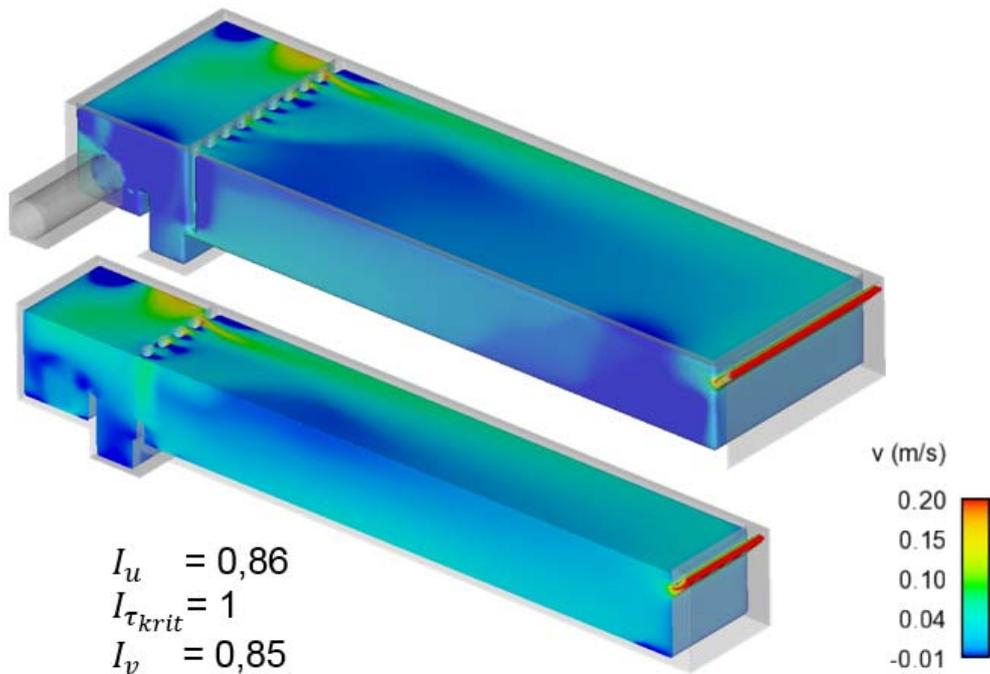


Bild 5.73: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante mit Lamellenwand und optimaler Wehrhöhe des transversalen Rohrzulaufs

Strömungs-Gleichrichter

Der Strömungs-Gleichrichter erzielt für den transversalen Zulauf die besten Indikatoren. Gegenüber der Grundvariante hat sich vor allem der Indikator I_u für die Einhaltung einer maximalen Horizontalgeschwindigkeit verbessert. Der Indikator I_v , welcher die Größe des absetz-wirksamen Volumens beschreibt, wird durch diesen Einbau jedoch nicht verbessert. Allerdings besitzt dieser im Ist-Zustand bereits einen hohen Wert.

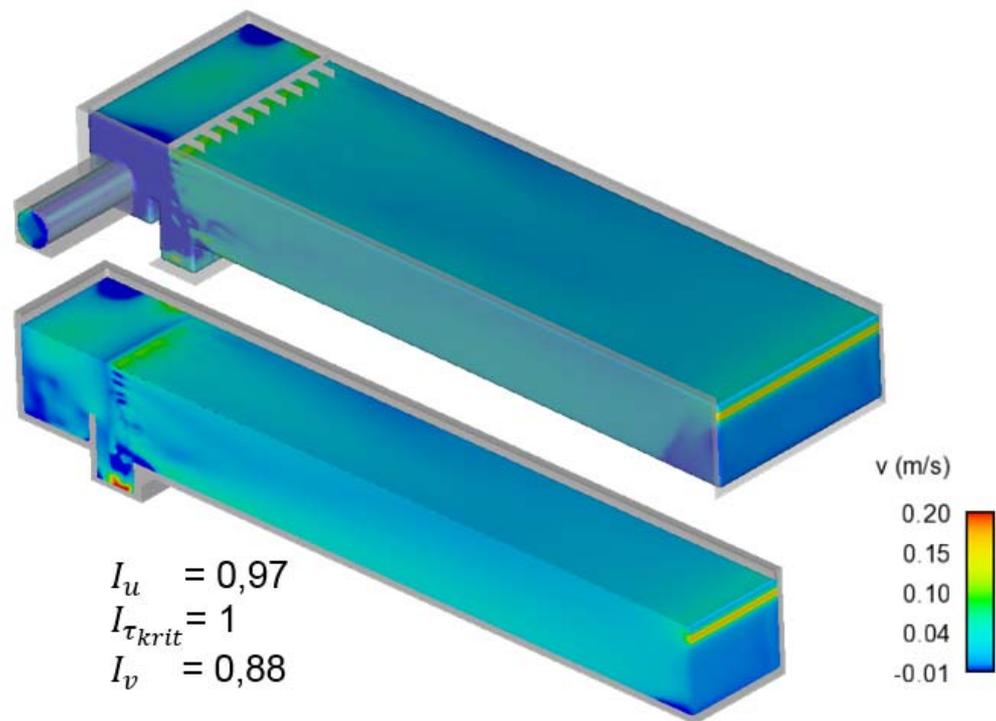


Bild 5.74: Konturplot der u-Geschwindigkeiten des Gesamtbeckens der Grundvariante mit einem Strömungs-Gleichrichter des transversalen Rohrzuflusses

6 Empfehlungen

Sämtliche Empfehlungen in diesem Kapitel gelten unter der Einschränkung, dass sie nur für die hier untersuchten geometrischen Verhältnisse ausgesprochen werden. Hiervon abweichende reale Verhältnisse erfordern eine Nachoptimierung zur Feinabstimmung der Anordnung der Einbauten und ihrer Abmessungen.

Funktionskomponente Einlaufbauwerk (EBW):

Das Einlaufbauwerk hat die Aufgabe, die Zuströmung aus dem Kanalnetz aufzugreifen und so gleichmäßig über den Querschnitt des Rechteckbeckens zu verteilen, dass keine Ablösungen der Randstromlinien mit Rezirkulationszonen und damit untrennbar verbundene Kurzschlussströmungen entstehen. Dazu sollte die eventuell notwendige Dissipation kinetischer Energie nach Möglichkeit nicht über eine Umwandlung in Turbulenzenergie bewerkstelligt werden, wie sie in Scherschichten produziert wird.

Die Güte des Einlaufbauwerks wird durch die Annäherung des Abström-Profiles der Geschwindigkeiten an ein ideales Blockprofil (Pfropfenströmung) definiert (Bild 4.18). Mängel bei der Erfüllung dieser Aufgabe machen sich in der Regel im gesamten anschließenden Beckenraum negativ bemerkbar und beeinträchtigen den Gesamtwirkungsgrad des Gesamtbeckens.

Beckenparallele (longitudinale) Einläufe

Bei beckenparallelen Einläufen erzielen **Prallteller** aufgrund erhöhter Fließgeschwindigkeiten auf der Sohle und die damit verbundene Remobilisierung im Schlammraum sowie der weit ausgedehnten Rezirkulationszonen unterstromig des Bauteils nur eine sehr geringe Verbesserung gegenüber der Grundvariante ohne Einbau und sind daher **nicht zu empfehlen**.

Prallwände bewirken einen besseren Schutz des Schlammraums, allerdings verursachen sie ebenfalls eine weit ausgedehnte Rezirkulation in der Abströmung des Bauteils. Die Strömungsindikatoren der Prallwand sind generell besser als die des Pralltellers und werden daher hier als **bedingt empfehlenswert** beurteilt.

Durch den Einbau eines **Reflektors** (im Grundriss halbkreisförmige Prallwand) treten hohe Fließgeschwindigkeiten an den Außenwänden des Beckens auf. Auch hier werden große Rezirkulationszonen in der anschließenden Sedimentationskammer verursacht. Die Strömungsindikatoren liegen etwas unterhalb der Werte einer Prallwand. Aufgrund der einfacheren Geometrie und der leicht besseren Indikatoren ist die Prallwand gegenüber dem Reflektor zu bevorzugen. Der Einbau eines Reflektors wird **nicht empfohlen**.

Lamellenwände erzielen dann eine gleichmäßigere Abströmung als die vorstehend besprochenen Einbauten, wenn sie nach den Erkenntnissen dieses Vorhabens gestaltet werden. In diesem Fall verursachen sie in deutlich geringerem Maße unwirksames Beckenvolumen in Rezirkulationszonen. Die Indikatoren sind mit denen der Prallwand vergleichbar. Lamellenwände sollten jedoch nur mit geeigneten Ausblockungen eingesetzt werden, denn ohne Ausblockungen weisen Lamellenwände nur vernachlässigbare Verbesserungen gegenüber der Grundvariante ohne Einbauten auf. Lamellenwände mit Ausblockungen sind **empfehlenswert**.

Der Einbau von **liegenden Leitwänden** stellt eine sehr einfache Optimierung dar. Die Strömungsindikatoren sind zwar mit denen der Lamellenwand und der Prallwand vergleichbar, allerdings sind erhöhte Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche und an den Außenwänden des Beckens zu erwarten. Liegende Leitwände sind daher **bedingt empfehlenswert**.

Der **Strömungs-Gleichrichter** stellt einen komplexeren Einbau dar, der jedoch sehr gute Indikatoren erzielt. Rezirkulationszonen können in den meisten der untersuchten Fälle fast vollständig vermieden und annähernd pfropfenartige Durchströmungen über die gesamte Beckenlänge und -breite erreicht werden. Der Strömungs-Gleichrichter wird als **besonders empfehlenswert** eingestuft.

Rechtwinklige (transversale) Einläufe

Leit- bzw. Tauchwände sind aufgrund der weit ausgedehnten Rezirkulationszonen **nicht zu empfehlen**.

Der Einbau einer **Lamellenwand** erzielt im Beobachtungsquerschnitt des Einlaufbauwerks gute Indikatoren. Allerdings zeigt sich bei der Simulation des Gesamtbeckens, dass ein Pendeln der Strömung eintritt und das Beckenvolumen dadurch nicht vollständig ausgenutzt werden kann. Die Anordnung von gestaffelten Pralltellern im Sammelkanal vor dem Wehr und die veränderte Wehrform waren nicht zielführend. Der Einbau von Lamellenwänden kann daher für diese Einlaufkonfiguration **nicht empfohlen** werden.

Für den transversalen Beckeneinlauf eignet sich vor allem die Optimierungsvariante 6 mit einem **Strömungs-Gleichrichter**, die auch hierfür als **besonders empfehlenswert** eingestuft wird.

Zusammenfassung Einlaufbauwerk

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse dieses Vorhabens deutlich machen, dass für beckenparallele Zuläufe schon durch einfache Einbauten (Prallwand und Lamellenwand) eine deutlich bessere Durchströmung von Regenklärbecken erreicht werden kann. Um jedoch nahezu das gesamte Potential der Becken, insbesondere bei rechtwinkliger Anströmung, zu aktivieren sind einfache Einbauten nicht mehr ausreichend, hierzu müssen komplexere Einbauten wie der Strömungs-Gleichrichter vorgesehen werden.

Funktionskomponente Sedimentationskammer (SeKa) und AFS-Schutzraum:

Zur Simulation der Einlaufbauwerke sowie der Klärüberläufe sind die aus SeKa 1 resultierenden Abmessungen ($L/B = 3,0$) gewählt worden, da diese Variante die geringsten Schubspannungen der simulierten Sedimentationskammern innerhalb der geforderten Abmessungsverhältnisse aufweist. Da die grundsätzlichen Abmessungen eines Beckens im Bestand nicht geändert werden können, ohne Volumen zu verlieren, wird diesbezüglich **keine Empfehlung** ausgesprochen.

Die Größe der Schubspannungen auf der Sohle der Grundvarianten zeigen, dass kein besonderer Schutz des SSR notwendig ist, sofern die Vergleichmäßigung der Strömung durch die Funktionskomponente Einlaufbauwerk zufriedenstellend erfüllt wird.

Prinzipiell zeigt sich weiterhin, dass die Abmessungen der Sedimentationskammer keinen maßgeblichen Einfluss auf deren ureigene Funktion haben, vorausgesetzt, die zulässige Oberflächenbeschickung für die Zielpartikel wird nicht überschritten und die SeKa wird über den gesamten Querschnitt gleichmäßig angeströmt. In diesem Fall erübrigt sich dann auch die separate Definition eines AFS-Schutzraums. Aus diesem Grund erübrigen sich weitere Einbauten zur Abgrenzung eines AFS-Schutzraums, sodass auch diesbezüglich **keine Empfehlung** gegeben wird, außer der bereits oben festgestellten Tatsache, dass die **Optimierung der Einlaufkonstruktion entscheidend** ist.

Funktionskomponente Klärüberlauf (KÜ):

Keine der untersuchten Konstruktionen des Klärüberlaufs verursacht im Bereich des Kontrollquerschnittes einen großen Einfluss auf die Geschwindigkeitsverteilung im Becken. Lediglich in der Ecke zwischen Beckensohle und –rückwand liegt, im Längsschnitt betrachtet, eine kleine Rezirkulation vor, die völlig unkritisch ist.

Die hier untersuchten Klärüberläufe sind daher **alle gleichermaßen empfehlenswert**. Die Auswahl einer Konstruktion kann nach anderen Kriterien als denen der Beckendurchströmung entschieden werden.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen der Phase 1 des Forschungsvorhabens MEREBEN wurden für rechteckige Regenbecken nachrüstbare Einbauten untersucht bzw. entwickelt, um das Reinigungspotenzial der Bestands-Becken möglichst optimal auszunutzen. Auf der Basis dieser Forschungsergebnisse kann es gelingen, den Eintrag feinputikulärer und feinputikulär gebundener Stoffe aus der Regenkanalisation in die Gewässer zukünftig so weit zu reduzieren, wie dies heute technisch und wirtschaftlich möglich ist. Betrachtet man die gesamte Bandbreite der existierenden Konstruktionsvariationen, so kann es in einigen Fällen sinnvoll sein, die empfohlenen Einbauten noch einer weitergehenden Optimierung zu unterziehen, da im Rahmen dieses Vorhabens eine allumfassende und erschöpfende Abhandlung aller vorkommenden Fälle nicht möglich war.

Zunächst ist eine Erhebung zu den in der Praxis gängigen, rechteckigen Beckentypen durchgeführt worden. Um eine fundierte Beurteilung der Becken zu gewährleisten, wurden die Becken in Funktionskomponenten unterteilt. Auf diese Weise wurde gewährleistet, dass die Einflüsse jeder einzelnen Beckenkomponente eindeutig identifiziert werden können und sich nicht mit den Schwächen der anderen Komponenten überlagern. Regenbecken gliedern sich in die Funktionskomponenten Einlaufbauwerk (EBW), Sedimentationskammer (SeKa) einschließlich Schlammammelraum (SSR) und Klärüberlauf (KÜ). Die separate Definition eines AFS-Schutzraums erwies sich als nicht erforderlich, wenn die Empfehlungen bezüglich der Funktionskomponente Einlauf, welche den entscheidenden Einfluss auf das gesamte Becken ausübt, berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurden Hilfsmittel zur Bewertung der Güte der Funktion des Gesamtbeckens bzw. der Funktionskomponenten entwickelt. Dies sind:

1. Randbedingungsparameter (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)
2. Strömungs-Indikatoren (Kapitel 4.7)

Weiterhin wurden zur Beurteilung der Funktionsgüte der Gesamtbecken Absetz-Wirkungsgrade bestimmt, welche für die Phase des Durchlaufbetriebs, d.h. während des Betriebs des Klärüberlaufs, gelten.

Anhand eines physikalischen Modells im Maßstab 1:5 wurde mit Traceruntersuchungen ein beckenparalleler, außermittiger Gerinneeinlauf untersucht. Die Untersuchungen wurden mit einer hydraulischen Belastung (Oberflächenbeschickung) von 8,8 m/h durchgeführt. Anhand der Ergebnisse der Verweilzeitverteilung ist das numerische Modell validiert worden. Ebenfalls hat durch das physikalische Modell eine Vor-Optimierung von Einbauten stattgefunden. Nach

erfolgreicher Validierung des numerischen Modells sind insgesamt sechs unterschiedliche Optimierungen für Einlaufbauwerke mit beckenparallelen und mit rechtwinkligen Anströmungen untersucht worden.

Weiterhin wurde das Verhalten ausgesuchter Optimierungen im Gesamtbecken simuliert und analysiert. Neben der numerischen Bewertung der Durchströmung anhand der Indikatoren wurde zusätzlich eine visuelle Bewertung durch Konturplots der horizontalen Geschwindigkeiten vorgenommen. Die einzelnen Erkenntnisse und die sich daraus ergebenden Empfehlungen je Funktionskomponente sind bereits in Kapitel 6 zusammengefasst.

Dufresne et al. [2011] und Camnasio et al. [2013] haben in ihren Untersuchungen festgestellt, dass das Einlaufbauwerk einen großen Einfluss auf die Durchströmung von Absetzbecken hat. Diese Erkenntnis wird durch die hier erzielten Simulationsergebnisse bestätigt. Die Sedimentationskammer und der Klärüberlauf haben zwar je nach Gestaltung durchaus positive Auswirkungen auf die Durchströmung, allerdings sind die Einflüsse des Einlaufbauwerks deutlich stärker.

Die Verringerung der hydraulischen Belastung von 10 m/h auf beispielsweise 4 m/h führt zwar zu keinen wesentlichen Änderungen in der Durchströmungscharakteristik des Beckens. Die Indikatoren zeigen eine leichte Verbesserung an. Ob eine Erhöhung des Partikelrückhaltes infolge einer Begrenzung der maximalen Oberflächenbeschickung von 10 m/h auf 4 m/h zu erwarten ist, wird in der Phase 2 dieses Projektes untersucht.

In der nun folgenden Phase 2 werden Hinweise und Musterkonfigurationen für den Neubau von Reckteck- und Rundbecken erarbeitet. In diese Phase sollen die aus der Phase 1 erlangten Kenntnisse im Besonderen zur grundlegenden Wirkungsweise von strömunglenkenden Einbauten mit einfließen.

Literaturverzeichnis

- Adamsson, A. (2004): Three-Dimensional Simulation and Physical Modelling of Flows in Detention Tanks - Studies of Flow Pattern, Residence Time and Sedimentation. Göteborg, Schweden, Chalmers University of Technology, Department of Water Environment Transport, Diss.
- Adamsson, A. und Bergdahl, L. (2004): Extending Residence Time in a Detention Tank. In: Journal of Environmental Engineering.
- Adamsson, A. und Bergdahl, L. (2006): Simulation of Temperature Influence on Flow Pattern and Residence Time in a Detention Tank. In: Nordic Hydrology, (Vol. 37, Nr. 1), S. 53 - 58.
- Adamsson, A., Bergdahl, L. und Lyngfelt, S. (2002a): Measurement and Three-Dimensional Simulation of Flow in a Rectangular Detention Tank. In: Urban Water, 2002 (Vol. 2, Issue 4), S. 277 - 287.
- Adamsson, A., Bergdahl, L. und Vikström, M. (2002b): A Laboratory Study of the Effect of an Island to Extend Residence Time in a Rectangular Tank. 9th Int. Conf. Urban Storm Drainage. Global Solutions for Urban Drainage. Konferenz am 08. - 13. September, Portland, Oregon, USA. ISBN 0-7844-0644-8.
- Adamsson, A., Persson, J. und Lyngfelt, S. (1999): Numerical Simulation and Large-Scale Physical Modelling of Flow in a Detention Basin. 8th Int. Conf. Urban Storm Drainage. Vol. 3, Konferenz am 30. August - 03. September, Sydney, Australia. S. 1175 - 1183. ISBN 0-85825-718-1.
- Adamsson, A., Stovin, V. und Bergdahl, L. (2003): Bed Shear Stress Boundary Condition for Storage Tank Sedimentation. In: Journal of Environmental Engineering, (Vol. 129, Nr. 7), S. 651 - 658.
- Akan, A.O. (2010): *Design Aid for Water Quality Detention Basins*. In: Journal of Hydrologic Engineering, 15 (1), S. 39-48.
- 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.
- Bajcar, T., Steinman, F., Sirok, B. und Preseren, T. (2011): *Sedimentation efficiency of two continuously operating circular settling tanks with different inlet- and outlet arrangements*. In: Chemical Engineering Journal, 178, S. 217-224.
- Boller, M.; Kaufmann, P.; Ochsenbein, U. (2005): Schadstoffe im Straßenabwasser einer stark befahrenen Straße und deren Retention mit neuartigen Filterpaketen aus Geotextil und Adsorbermaterial. Schlussbericht Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit eawag, Dübendorf, FH Bern, GSA, Bern, ASTRA, Bern, BUWAL, Bern, Dübendorf
- 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.
- Chen, Z., Han, S., Zhou, F.Y. und Wang, K. (2013): *A CFD Modeling Approach for Municipal Sewer System Design Optimization to Minimize Emissions into Receiving Water Body*. In: Water Resources Management, 27 (7), S. 2053-2069.

- Dewals, B.J., Kantoush, S.A., Ercicum, S., Piroton, M. und Schleiss, A.J. (2008): *Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins*. In: Environmental Fluid Mechanics, 8 (1), S. 31-54.
- Dufresne, M.; Vazquez, J.; Terfous, A.; Ghenaim, A.; Poulet, J.-B.: Experimental investigations and CFD modelling of flow, sedimentation, and solids separation in a combined sewer detention tank, Computers & Fluids 2009, 38, 1042-1049
- Dufresne, M., Dewals, B.J., Ercicum, S., Archambeau, P. und Piroton, M. (2011): *NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW PATTERNS IN RECTANGULAR SHALLOW RESERVOIRS*. In: Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 5 (2), S. 247-258.
- DWA-A 102/BWK-A 3 (2016): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Gelbdruck.
- DWA-A 111 (2010): *Hydraulische Dimensionierung und betrieblicher Leistungsnachweis von Anlagen zur Abfluss- und Wasserstandsbegrenzung in Entwässerungssystemen*. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ISBN 978-3-941897-51-9.
- DWA-A 166 (2013): *Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung - Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung. Arbeitsblatt*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., S. 78.
- DWA-M 176 (2013): *Hinweise zur konstruktiven Gestaltung und Ausrüstung von Bauwerken der zentralen Regenwasserbehandlung. Merkblatt*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., S. 105.
- DWA-T3/2013 (2013): *Beispiele zur Gestaltung von Regenbecken. Themenblatt*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., S. 78.
- Fuchs, S.; Eyckmanns-Wolters, R. (2016): *Wirksamkeit von Regenbecken im Bestand*. Erfahrungsaustausch F&E Vorhaben zum Thema Niederschlagswasserbeseitigung. Düsseldorf.
- Goula, A., Kostoglou, M., Karapantsios, T. und Zouboulis, A. (2008): *A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment - Case study: The influence of a feed flow control baffle*. In: Chemical Engineering Journal, 140, S. 110 - 121.
- Grothhusmann, D., Kasting, U., Hunze, M. (2007): Optimierung von Absetzbecken zur Regenwasserbehandlung. In: KA Abwasser, Abfall, 54(7), S.690-697.
- Gruber, E.-M. (2015): *Untersuchung der Durchströmung eines Regenklärbeckens am maßstäblichen, physikalischen Modell*. Münster, Fachhochschule Münster, IWARU, Masterthesis.
- Hadi, G.A. 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.
- Han, M.Y. und Mun, J.S. (2007): *Particle behaviour consideration to maximize the settling capacity of rainwater storage tanks*. In: Water Science and Technology, 56 (11), S. 73-79.
- Hazen A. On Sedimentation. ASCE American Society of Civil Engineers; 1904, S. 45 - 71.
- 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., Wood, J., Marsalek, J. und Rochfort, Q. (2008): *Using CFD modeling to improve the inlet hydraulics and performance of a storm-water clarifier*. In: Journal of Environmental Engineering-Asce, 134 (9), S. 722-730.
- Hsu, N.S., Kuo, J.T. und Chiu, S.K. (2008): *Optimal design of a settling basin for a small-scale drainage area*. In: Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce, 134 (3), S. 372-379.
- Huang, T.L., Li, Y.X. und Zhang, H. (2008): *Theoretical analysis on non-uniformity of water distribution and influence of construction parameters on settling efficiency*. In: Water Science and Technology, 58 (5), S. 1007-1014.
- 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.
- Jayanti, S. und Narayanan, S. (2004): *Computational study of particle-eddy interaction in sedimentation tanks*. In: Journal of Environmental Engineering-Asce, 130 (1), S. 37-49.
- Kahn, S.; Melville, B. W.; Shamseldin, A. Y.; Fischer, C.: *Investigation of flow patterns in storm water retention ponds using CFD*, Journal of Environmental Engineering 2013, 139 (1), 61-69
- Kris, J. und Hadi, G.A. (2010): *IMPROVEMENT PERFORMANCE OF AL-WATHBA SETTLING TANK BY A COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL*. In: Journal of Hydrology and Hydromechanics, 58 (3), S. 201-210.
- Levenspiel, O. (2012): *Tracer Technology*. New York, NY, ISBN 9781441980731.
- 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.D., Xue, H.Q., Hua, Z.L., Yao, Q. und Hu, J. (2013): *Inverse Calculation Model for Optimal Design of Rectangular Sedimentation Tanks*. In: Journal of Environmental Engineering-Asce, 139 (3), S. 455-459.
- Liu, X.F. und Garcia, M.H. (2011): *Computational Fluid Dynamics Modeling for the Design of Large Primary Settling Tanks*. In: Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 137 (3), S. 343-355.
- Lopez, 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.
- Marlow, F., Milke, H. (2014): *Numerische Simulation der Strömung in Absetzbecken - Bedeutung und Nutzen der Berücksichtigung von Einlaufbedingung und Wirbelabbildung*. In: KA Abwasser, Abfall, 61(9), S.762-768.
- Maus C. und Uhl M. (2009): *Traceruntersuchungen zur Wirksamkeit von Regenbecken*. In: Korrespondenz Abwasser Abfall, 2009/2, S. 164-170.
- Muth, W. (1992): *Regenüberlaufbecken - Strömungsuntersuchungen an Durchlaufbecken*. In: KA Korrespondenz Abwasser, 6/92 S.910-915
- Niemann, A. (2001): *Schädigung des hyporheischen Interstitials kleiner Fließgewässer durch Niederschlagswassereinleitung*. Aachen: Shaker, ISBN 3-8265-8478-3.
- 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.

- 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.
- Park, N.S., Lim, J.L., Lee, S.J., Lee, K.H. und Kwon, S.B. (2006): *Examining the effect of transverse troughs on hydrodynamic behavior in a sedimentation basin with CFD simulation and ADV technique*. In: *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 55 (4), S. 247-256.
- 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.M., 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.
- Shahrokhi, M., Rostami, F., Said, M.A.M. und Syafalni (2013): *Numerical modeling of baffle location effects on the flow pattern of primary sedimentation tanks*. In: *Applied Mathematical Modelling*, 37 (6), S. 4486-4496.
- Stamou, A.I. (2008): *Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models*. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47 (8), S. 1179-1189.
- Stamou, A.I. und Adams, E.W. (1988): *Study of the Hydraulic Behavior of a Model Settling Tank Using Flow through Curves and Flow Patterns*. . Universität Karlsruhe, Sonderforschungsbericht 210, 92 S.
- Stamou, A.I. und Noutsopoulos, G. (1994): *Evaluating the effect of inlet arrangement in settling tanks using the hydraulic efficiency diagram*. In: *Waster SA*, 20 (1), S. 77-84.
- Statistisches Bundesamt. Anzahl der Regenentlastungsanlagen in Deutschland nach Anlagenart im Jahr 2013. In: S-DS-PSD 2015 editor. <<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152754/umfrage/anzahl-der-regenentlastungsanlagen-in-deutschland-2007/>>; 2015.
- 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. (2000): *Computational Fluid Dynamics and the Design of Sewage Storage Chambers*. In: *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management*, (Vol. 14, Nr. 2), S. 103 - 110.
- Strobl und Zunic (2006): *Wasserbau*. Heidelberg: Springer Verlag, ISBN 10 3-540-22300-2.
- 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.
- Tamayol, A., Firoozabadi, B. und Ashjari, M.A. (2010): *Hydrodynamics of Secondary Settling Tanks and Increasing Their Performance Using Baffles*. In: *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 136 (1), S. 32-39.
- Uhl, M., Perrefort, T. und Maus, C. (2009): *REBEWI - Klärtechnische Wirksamkeit von Regenbecken in der Stadtentwässerung*. Fachhochschule Münster, Labor für Wasserbau und Wasserwirtschaft, BMBF Programm FH³ FKZ 1705X05.
- Uhl, M., Mohn, R., Fuchs, S. und Schmitt, T.G. (2012): *Reduktion des Feststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen - NRW RKB*. Münster: Fachhochschule Münster.

-
- Uhl M.; Mohn R.; Fuchs S. and Schmitt TG (2012): Reduktion des Feststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen - NRW RKB. Münster: Fachhochschule Münster; 2012.
- Uhl M., Mohn R., Maus C., Schnieders A., Sommer M., Voßwinkel N. (2013): WEREBE - Weitergehende Regenwasserbehandlung im Trennsystem -Projektbericht-. BMBF Programm FHProfUnt Förderkennzeichen 1765X09; 2013.
- 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.
- Werner, T.M., Kadlec R.H. (1996): Application of residence time distributions to stormwater treatment systems. In: Ecological Engineering 7 (1996) 213-234
- 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.
- Yoon, T. und Lee, S. (2000): *Hydraulic behavior and removal efficiency of settling tanks*. In: KSCE Journal of Civil Engineering, 4 (1), S. 53-57.

Anhangsverzeichnis

Anhang 1	Beckenparalleler Einlauf mit einer Prallwand	124
Anhang 2	Beckenparalleler Einlauf mit einem Reflektor	125
Anlage 1	Optimierungskatalog	

Anhang 1

In Bild 1 ist der beckenparallele Einlauf mit einer Prallwand als Optimierung dargestellt. Die Prallwand verblockt etwa 47 % des Fließquerschnitts. Im Zusammenhang mit Bild 2 und Bild 5.20 aus Kap. 5.4.1 wird deutlich, dass die Größe der Rezirkulationszone im Unterstrom der Prallwand zunimmt, umso größer die Verblockung des Fließquerschnitts ist.

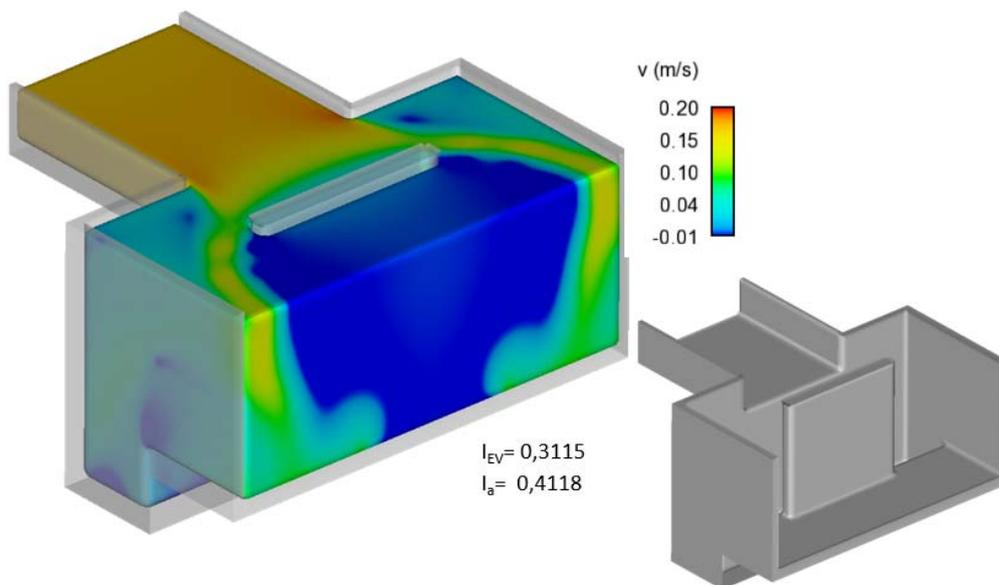


Bild 1: Konturplot der u-Geschwindigkeiten einer Prallwand, mit einem Verblockungsverhältnis von 47 %, des mittigen Gerinneinlaufs

In Bild 2 ist für den beckenparallelen Einlauf eine Prallwand mit einem Verblockungsverhältnis von 18 % als Optimierung abgebildet.

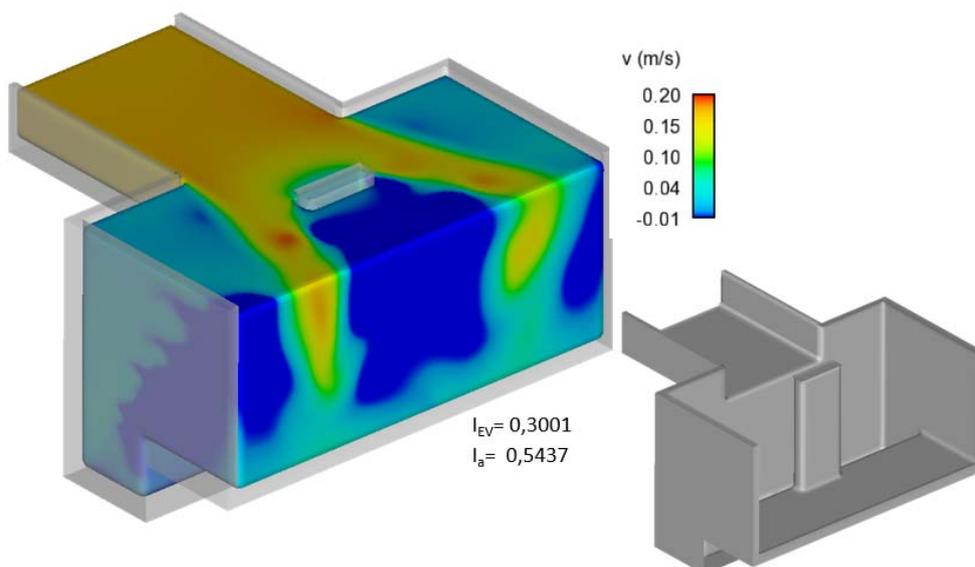


Bild 2: Konturplot der u-Geschwindigkeiten einer Prallwand, mit einem Verblockungsverhältnis von 18 %, des mittigen Gerinneinlaufs

Anhang 2

In Bild 3 ist ein Reflektor im beckenparallelen Einlaufbauwerk integriert worden. Der Reflektor besitzt einen Durchmesser von $4 \cdot r_{hy}$, dies entspricht der Breite der optimalen Prallwand. Es wird deutlich, dass vor dem Reflektor ein Wasserpolster entsteht, wodurch der Reflektor die gleiche Wirkungsweise wie die einer Prallwand bekommt.

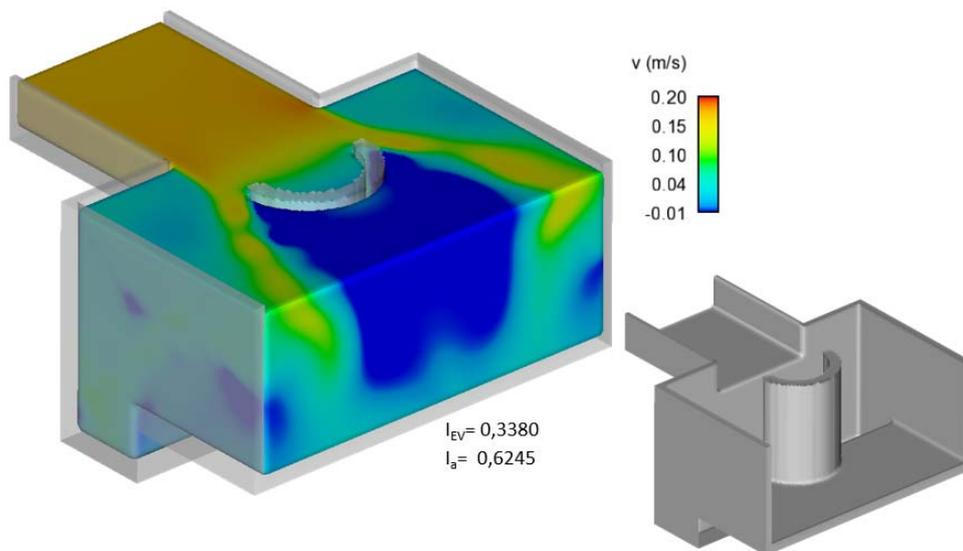


Bild 3: Konturplot der u-Geschwindigkeiten eines Reflektors, mit einem Durchmesser von $4 \cdot r_{hy}$, des mittigen Gerinneinlaufs

Auch trotz der in Bild 4 angeordneten Schlitze im Reflektor entstehen zwei weit ausgedehnte Rezirkulationszonen. Des Weiteren werden lokal sehr hohe Fließgeschwindigkeiten produziert. Dies spiegelt auch der Indikator I_{EV} mit einem Wert von 0,2960 wider.

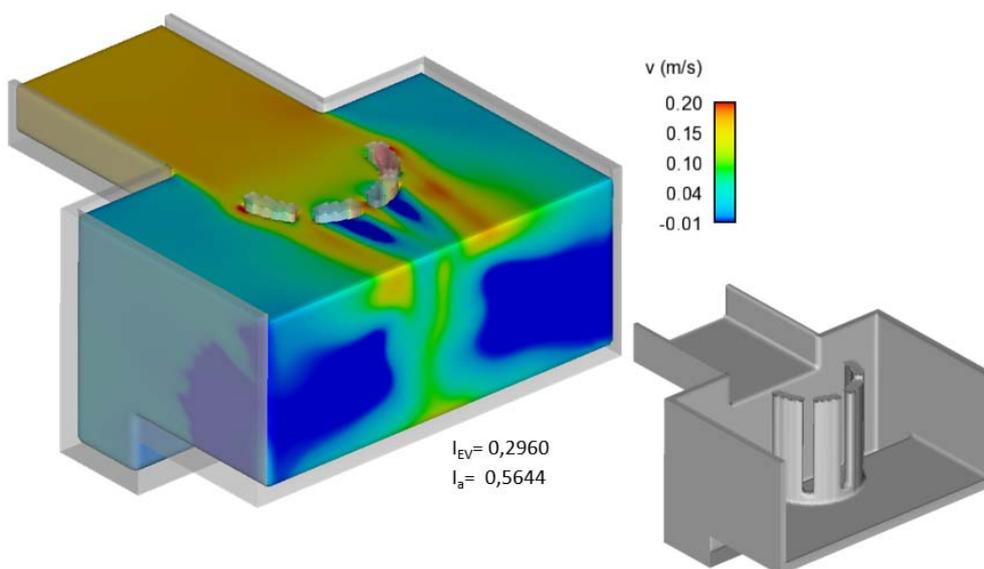
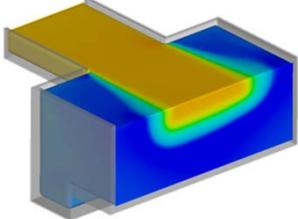
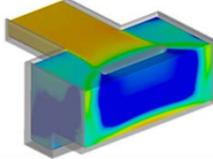
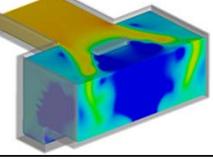
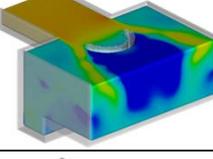
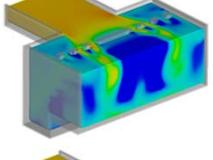
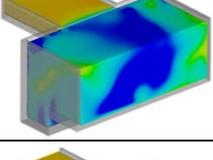
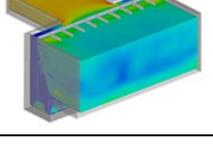
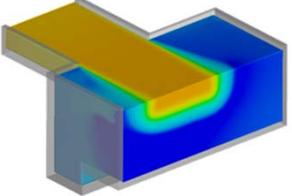
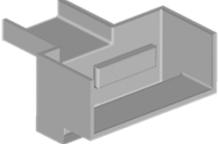
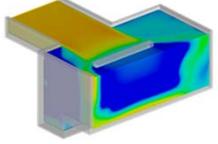
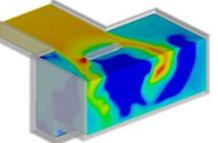
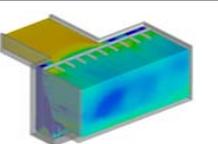
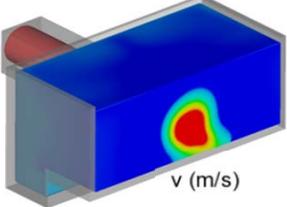
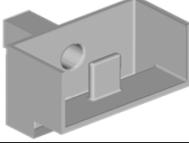
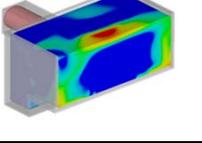
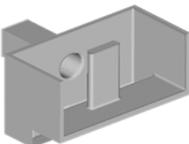
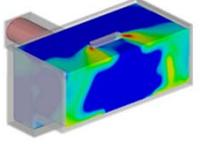
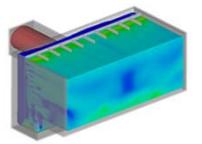
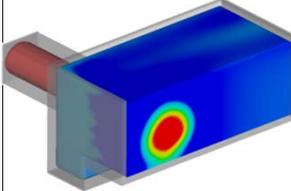
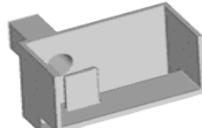
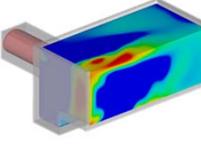
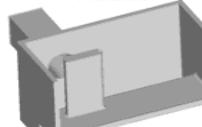
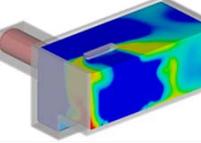
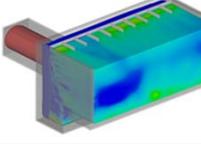
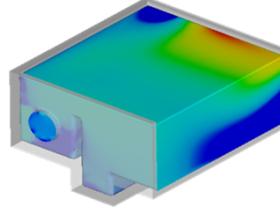
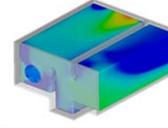
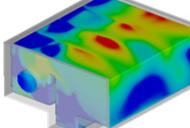
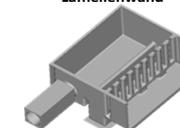
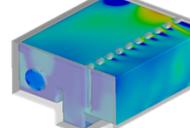
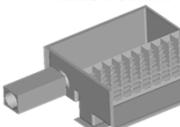
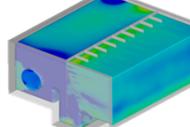
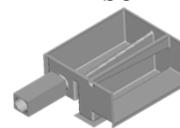
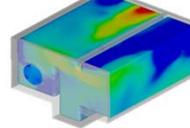
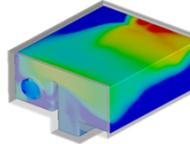
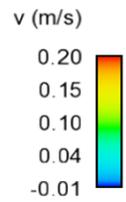


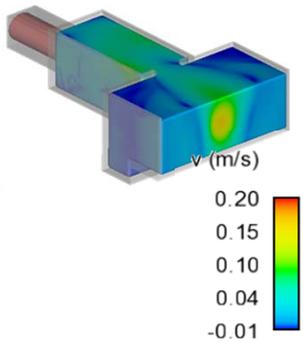
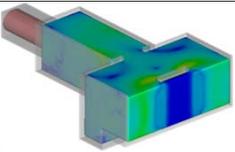
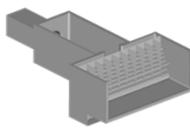
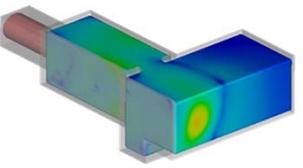
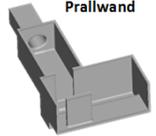
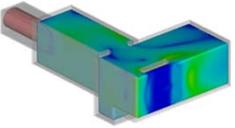
Bild 4: Konturplot der u-Geschwindigkeiten eines Reflektors, mit einem Durchmesser von $4,6 \cdot r_{hy}$, mit drei Schlitzen des mittigen Gerinneinlaufs

Becken-Funktions-Komponente	Klasse		GRUNDVARIANTE		NACH OPTIMIERUNG		
			Durchströmungscharakteristik	Indikatoren	Bauteil zur Optimierung	Durchströmungscharakteristik	Indikatoren
Einlaufbauwerk (EBW)	Gerinneinlauf	mittig 	 v (m/s) 0.20 0.15 0.10 0.04 -0.01 	$I_{EV} = 0,2662$ $I_a = 0,2940$	Prallteller		$I_{EV} = 0,2922$ $I_a = 0,4560$
					Prallwand		$I_{EV} = 0,3577$ $I_a = 0,5437$
					Reflektor		$I_{EV} = 0,3380$ $I_a = 0,6245$
					Lamellenwand (teilweise ausgeblockt)		$I_{EV} = 0,3552$ $I_a = 0,6143$
					horizontale Leitwand		$I_{EV} = 0,3596$ $I_a = 0,5780$
					Schütz & Diffusor		$I_{EV} = 0,5729$ $I_a = 0,9916$

Einlaufbauwerk (EBW)	Gerinneinlauf	außermittig 		$I_{EV} = 0,2647$ $I_a = 0,2972$	Prallteller 		$I_{EV} = 0,3026$ $I_a = 0,4312$
					Prallwand 		$I_{EV} = 0,3418$ $I_a = 0,4024$
					Schütz & Diffusor 		$I_{EV} = 0,5314$ $I_a = 0,9159$
	Rohreinlauf	mittig 	 $v \text{ (m/s)}$ 0.20 0.15 0.10 0.04 -0.01	$I_{EV} = 0,2017$ $I_a = 0,2247$	Prallteller 		$I_{EV} = 0,2687$ $I_a = 0,4732$
					Prallwand 		$I_{EV} = 0,3061$ $I_a = 0,4948$
					Schütz & Diffusor 		$I_{EV} = 0,5438$ $I_a = 0,9490$

Einlaufbauwerk (EBW)	Rohreinlauf	außermittig 		$I_{EV} = 0,1992$ $I_a = 0,2105$	Prallwand - überströmbar 		$I_{EV} = 0,2687$ $I_a = 0,5755$
					Prallwand 		$I_{EV} = 0,2935$ $I_a = 0,5752$
					Schütz & Diffusor 		$I_{EV} = 0,4729$ $I_a = 0,8063$
	transversaler Einlauf	Wehr flach 		$I_{EV} = 0,3511$ $I_a = 0,6714$	Leitwand 		$I_{EV} = 0,3635$ $I_a = 0,5447$
					gestaffelte Prallteller 		$I_{EV} = 0,3762$ $I_a = 0,6137$
					Lamellenwand 		$I_{EV} = 0,5398$ $I_a = 0,9850$
					Schütz & Diffusor 		$I_{EV} = 0,5652$ $I_a = 0,9733$
					Leitwand (gegenläufig) 		$I_{EV} = 0,3848$ $I_a = 0,6862$
		Wehr schräg 		$I_{EV} = 0,3047$ $I_a = 0,5191$			



Einlaufbauwerk (EBW)	Einlauf nach DWA T3	mittig		$v_{EV} = 0,2874$ $v_a = 0,4352$	 <p>Prallwand</p>		$I_{EV} = 0,4066$ $I_a = 0,5294$
					 <p>Schütz & Diffusor</p>		
		außermittig		$v_{EV} = 0,3002$ $v_a = 0,3928$	 <p>Prallwand</p>		$I_{EV} = 0,4548$ $I_a = 0,6432$
					 <p>Schütz & Diffusor</p>		