

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

***"Verfahren zur dynamischen
Entlastungsoptimierung
bei Regenwasserbehandlungsanlagen"***

Abschlussbericht

Dezember 2004

**Forschungs- und
Entwicklungsvorhaben:**

„Verfahren zur dynamischen Entlastungsoptimierung
bei Regenwasserbehandlungsanlagen“

Auftraggeber:

Gemeinde Neunkirchen
Amt 81 – Tiefbau / Werke / Bäder –
Bahnhofstraße 3
57290 Neunkirchen

Auftragnehmer:

IWB Gemeinnütziges Institut Wasser und Boden e.V.
Bonn – Sankt Augustin – Siegen
Oelgartenstraße 18
53757 Sankt Augustin
Telefon: (0 22 41) 34 10 87 / 33 31 23
Telefax (0 22 41) 33 40 42
e-mail: IWB-mail@t-online.de
Internet: <http://www.iwb-bonn.de>

Leitung:

Dr.-Ing. Jörg Strunkheide

Bearbeitung:

Dipl.-Ing. Mario Seibert
Dipl.-Ing. Marcus Rasel

Sankt Augustin, den:

Dr.-Ing. Jörg Strunkheide
(Vorsitzender)

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i>	1
2	<i>Veranlassung / Problemstellung und Zielsetzung</i>	2
3	<i>Regenwasserbehandlung in Mischwassernetzen</i>	4
3.1	Herkunft und Zusammensetzung des Mischwassers	4
3.1.1	Herkunft des Mischwassers	4
3.1.2	Stoffliche Zusammensetzung des Mischwassers	5
3.2	Verfahrenstechniken der Niederschlagswasserbehandlung	7
4	<i>Technischer Lösungsansatz durch das Verfahren der dynamischen Entlastungsoptimierung</i>	11
4.1	Verfahrensbeschreibung und konzeptionelle Umsetzung für das Fangbecken „Weidenstraße“	11
4.2	Definition der im Rahmen des Projektes zu untersuchenden Betriebszustände sowie der Betrachtungsweisen	14
4.3	Definition der einzusetzenden Messsysteme als Grundlage für die Beckensteuerung	15
4.3.1	Hydraulisches Messsystem	16
4.3.2	Messung der Stoffkonzentrationen	17
4.3.3	Temperaturmessung	23
4.3.4	Regenschreiber	23
4.3.5	Datenaufzeichnung	24
5	<i>Referenzzustand</i>	25
5.1	Siedlungswasserwirtschaftliche Vorgaben für das Fangbecken „Weidenstraße“	25
5.1.1	Topografische Charakteristik des Einzugsgebietes	25
5.1.2	Hydrologische Charakteristik des Einzugsgebietes	26
5.2	Bemessungsvorgaben und Bautechnische Ausführung des Fangbeckens „Weidenstraße“	28
5.3	Betrieb des Beckens im Referenzzustand	29
5.4	Hydraulische Charakteristik der Trockenwetterzuflüsse	29
5.4.1	Hydraulische Schwankungsbreite der Trockenwetterzuflüsse	29
5.4.2	Darstellung und Beurteilung des Fremdwassereinflusses	31

5.5	Stoffliche Zusammensetzung der Trockenwetterzuflüsse	36
5.6	Dynamik der Mischwasserentlastung – Messdaten des IST-Zustandes an Regenwettertagen	38
5.6.1	Erläuterung der hydraulischen Verlaufscharakteristik (unabhängig von der gewählten Steuerungsvariante)	38
5.6.2	Erläuterung der stofflichen Verlaufscharakteristika	40
6	Entwicklung dreier Steuerungsvarianten auf der Grundlage der IST-Zustand-Erfassung	43
6.1	Die volumetrische Steuerungsstrategie	43
6.2	Der konzentrationsabhängige Steuerungsansatz	45
6.3	Der kombinierte Steuerungsansatz	46
7	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse aus dynamischem Steuerungsbetrieb	47
7.1	Dynamik des Mischwasserabflusses in den Projektphasen 2 und 3	47
7.1.1	Häufigkeit niederschlagsbedingter Einstau- und Entlastungsereignisse	47
7.1.2	Hydraulische Verlaufscharakteristik der dynamisch optimierten Mischwasserentlastung als Grundlage der Beckensteuerung	48
7.1.3	Stoffliche Mischwasserbelastung im Verlauf eines Entlastungsereignisses	50
7.2	Ergebnisse des Steuerungsbetriebes aus den Projektphasen 2 und 3	53
7.2.1	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse aus volumetrischer Steuerungsstrategie	54
7.2.2	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse aus konzentrationsabhängiger Steuerungsstrategie	58
7.2.3	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse aus kombiniertem Steuerungsansatz	63
8	Ergebnisse aus numerischer Simulation	69
8.1	Numerische Strömungsmechanik	69
8.2	Modellierung teilchenbeladener Strömungen	70
8.2.1	Sinkgeschwindigkeiten	70
8.2.2	Verweilzeiten zur Beurteilung der Strömungen im Becken	72
8.3	Systemidentifikation anhand zweier Grundmodelle (Planungs- und IST-Zustand)	73
8.4	Durchführung der Berechnung	75
8.4.1	Definition der Variablen	75
8.4.2	Stoffkennwerte	75
8.4.3	Partikel und Sinkgeschwindigkeiten	76
8.5	Ergebnisse der numerischen Berechnung	77

9	<i>Untersuchung der Wirtschaftlichkeit der Fangbeckensteuerung</i>	80
10	<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	84

Anhang I (im Dokument)

Anhang II (auf CD)

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 4-1:	SKIZZE DER SYSTEMAUSLÄSSE DES FANGBECKENS NACH MODIFIKATION IM RAHMEN DER STEUERUNGSPLANUNG	15
ABBILDUNG 4-2:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES PROBENAHMESYSTEMS DER FIRMA DR. LANGE GMBH.....	18
ABBILDUNG 4-3:	EINGESETZTE SAUGANKER DER FIRMA DR. LANGE	18
ABBILDUNG 4-4:	VERZOPFUNGEN AN DEN SAUGANKERN DER FIRMA DR. LANGE IM ZULAUF (BILD LINKS) UND IM ABLAUF (BILD RECHTS)	19
ABBILDUNG 4-5:	BLICK IN DIE MESSKAMMER DES KANALSAMPLERS AN DER MESSSTELLE I.....	20
ABBILDUNG 4-6:	GEGENÜBERSTELLUNG DER VERLÄUFE DER PARAMETER SAK, TS UND CSB _{GES}	22
ABBILDUNG 5-1:	PROZENTUALE VERTEILUNG DER REGEN- UND TROCKENWETTERTAGE IM ZEITRAUM APRIL 2003 - OKTOBER 2004	26
ABBILDUNG 5-2:	VERTEILUNG DER TÄGLICHEN NIEDERSCHLAGSHÖHEN DER REGENMESSSTATIONEN BURBACH UND NEUNKIRCHEN-SALCHENDORF	27
ABBILDUNG 5-3:	GEWÄSSERGÜTEKARTE DER HELLER IM ABSCHNITT DER EINLEITUNGSSTELLE AUS DEM FANGBECKEN "WEIDENSTRASSE" (QUELLE: STUA – SIEGEN).....	28
ABBILDUNG 5-4:	VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER TROCKENWETTERGANGLINIEN IN DREI UNTERSUCHUNGSABSCHNITTEN	30
ABBILDUNG 5-5:	VERTEILUNG DER TROCKENWETTERZUFLÜSSE ZUM FANGBECKEN „WEIDENSTRASSE“ IM UNTERSUCHUNGSZEITRAUM (APRIL 2003 BIS OKTOBER 2004).....	30
ABBILDUNG 5-6:	VERTEILUNG DER MONATLICHEN FREMDWASSERANTEILE BEI EINEM SCHMUTZWASSERSOCKEL VON 0,3 L/(s · 1000 EW)	33
ABBILDUNG 5-7:	VERTEILUNG DER MONATLICHEN FREMDWASSERANTEILE BEI EINEM SCHMUTZWASSERSOCKEL VON 1,0 L/(s · 1000 EW)	34
ABBILDUNG 5-8:	PROZENTUALER ANTEIL DER NACHLAUFBEEINFLUSSTEN TROCKENWETTERTAGE ÜBER DEN UNTERSUCHUNGSZEITRAUM (APRIL 2003 BIS OKTOBER 2004)	35
ABBILDUNG 5-9:	DARSTELLUNG DER NACHLAUFBEEINFLUSSTEN ENTLEERUNGSVERZÖGERUNG AM BEISPIEL DES DROSSELABFLUSSES IM MONATS FEBRUAR	36
ABBILDUNG 5-10:	VERLAUF DER GEMITTELTEN TROCKENWETTERKONZENTRATION DES PARAMETERS SAK ÜBER DIE DAUER VON 24 H	37
ABBILDUNG 5-11:	VERLAUF DER GEMITTELTEN TROCKENWETTERKONZENTRATION DES PARAMETERS TS ÜBER DIE DAUER VON 24 H	37
ABBILDUNG 5-12:	MONATSGANGLINIE DES BECKENFÜLLSTANDSVERLAUFS IM MONAT JULI 2003 ALS SYSTEMREAKTION AUF EINZELNE STARKREGENEREIGNISSE	38

ABBILDUNG 5-13:	MONATSGANGLINIE DES BECKENFÜLLSTANDSVERLAUFS IM MONAT AUGUST 2004 ALS SYSTEMREAKTION AUF EINZELNE REGENEREIGNISSE IN KURZER ABFOLGE	39
ABBILDUNG 5-14:	HÄUFIGKEIT DER BECKENBEAUFSCHLAGUNGEN IM VERGLEICH ZU DEN ENTLASTUNGSHÄUFIGKEITEN AM BECKENÜBERLAUF IM REFERENZZEITRAUM.....	40
ABBILDUNG 5-15:	FESTSTOFFFRACHT GEMESSEN AM SYSTEMZUFLUSS IM VERGLEICH ZUM ABLAUF ZUR KLÄRANLAGE ÜBER DIE DAUER EINES EINSTAUEREIGNISSES	41
ABBILDUNG 5-16:	VERTEILUNG DER SAK-KONZENTRATION IM ENTLASTUNGSABFLUSS AM BECKENÜBERLAUF (MESSSTELLE III) IM ZEITRAUM (DEZEMBER 2003 BIS SEPTEMBER 2004).....	42
ABBILDUNG 5-17:	VERTEILUNG DER FESTSTOFFKONZENTRATION IM ENTLASTUNGSABFLUSS AM BECKENÜBERLAUF (MESSSTELLE III) IM ZEITRAUM (DEZEMBER 2003 BIS SEPTEMBER 2004).....	42
ABBILDUNG 6-1:	DARSTELLUNG DER ABFLUSSBILDUNG IM ZULAUF ZUM FANGBECKEN „WEIDENSTRASSE“ ALS GRUNDLAGE DER ERMITTLUNG DER STELLGRÖßEN ZUR AKTIVIERUNG DES KLÄRÜBERLAUFS.....	45
ABBILDUNG 7-1:	HÄUFIGKEIT DER BECKENBEAUFSCHLAGUNGEN IM VERGLEICH ZU DEN ENTLASTUNGSHÄUFIGKEITEN AM BECKEN- BZW. KLÄRÜBERLAUF IN DEN PROJEKTPHASEN 2 UND 3.....	47
ABBILDUNG 7-2:	DARSTELLUNG DES ÜBERGANGSZEITRAUMES ALS INTERVALL ZWISCHEN DEM BEGINN DER PHASE 2 UND DEM ENDE DER PHASE 3	49
ABBILDUNG 7-3:	GANGLINIEN DER ENTLASTUNGSVOLUMENSTRÖME AN MESSSTELLE IV AUS DEM VOLUMETRISCH GESTEUERTEN BETRIEB	50
ABBILDUNG 7-4:	VERTEILUNG DER FESTSTOFFKONZENTRATION IM ENTLASTUNGSVOLUMENSTROM DER MESSSTELLEN III UND IV DER VOLUMETRISCH GESTEUERTEN ENTLASTUNGSEREIGNISSE	51
ABBILDUNG 7-5:	VERTEILUNG DER SAK-KONZENTRATION IM ENTLASTUNGSVOLUMENSTROM DER MESSSTELLEN III UND IV DER VOLUMETRISCH GESTEUERTEN ENTLASTUNGSEREIGNISSE	51
ABBILDUNG 7-6:	VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER SCHWANKUNGSBREITE DER FESTSTOFFKONZENTRATIONEN AN DEN MESSSTELLEN III UND IV IM RAHMEN EINES VOLUMETRISCH GESTEUERTEN ENTLASTUNGSEREIGNISSES.....	52
ABBILDUNG 7-7:	VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER REAL AN MESSSTELLE IV GEMESSENEN UND AN MESSSTELLE III ERRECHNETEN SAK-FRACHTVERLÄUFE AM BEISPIEL DES ENTLASTUNGSEREIGNISSES VOM 13.-26.12.2003	56
ABBILDUNG 7-8:	VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER REAL AN MESSSTELLE IV GEMESSENEN UND AN MESSSTELLE III ERRECHNETEN FESTSTOFFFRACHTVERLÄUFE AM BEISPIEL DES ENTLASTUNGSEREIGNISSES VOM 13.-26.12.2003	57
ABBILDUNG 7-9:	VERLAUF DER FRACHTSUMMENLINIEN DES PARAMETERS TS-KONZENTRATION DES VOLUMETRISCH GESTEUERTEN ENTLASTUNGSEREIGNISSES VOM 13.-26.12.2003 (AUSSCHNITT).....	57
ABBILDUNG 7-10:	VERLAUFGRAFIK DER ENTLASTUNGSMENGEN AM BECKEN- BZW. KLÄRÜBERLAUF DES EREIGNISSES VOM 03.-04.02.2004	60

ABBILDUNG 7-11: VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER REAL GEMESSENEN SAK-FRACHTVERLÄUFE AN DEN MESSSTELLEN III UND IV AM BEISPIEL DES ENTLASTUNGSEREIGNISSES VOM 03.-04.02.2004	61
ABBILDUNG 7-12: VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER REAL GEMESSENEN FESTSTOFFFRACHTVERLÄUFE AN DEN MESSSTELLEN III UND IV AM BEISPIEL DES ENTLASTUNGSEREIGNISSES VOM 03.-04.02.2004	61
ABBILDUNG 7-13: VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER REAL GEMESSENEN SAK-FRACHTVERLÄUFE AN DEN MESSSTELLEN III UND IV SOWIE DER THEORETISCHEN ENTWICKLUNG AN MESSSTELLE III AM BEISPIEL DES ENTLASTUNGSEREIGNISSES VOM 03.-04.02.2004	62
ABBILDUNG 7-14: VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER REAL GEMESSENEN FESTSTOFFFRACHTVERLÄUFE AN DEN MESSSTELLEN III UND IV SOWIE DER THEORETISCHEN ENTWICKLUNG AN MESSSTELLE III AM BEISPIEL DES ENTLASTUNGSEREIGNISSES VOM 03.-04.02.2004	62
ABBILDUNG 7-15: VERLAUF DER FRACHTSUMMENLINIEN DES PARAMETERS TS-KONZENTRATION DES KONZENTRATIONSABHÄNGIG GESTEUERTEN ENTLASTUNGSEREIGNISSES VOM 03.-04.02.2004 (AUSSCHNITT)	63
ABBILDUNG 7-16: VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER SCHWANKUNGSBREITE DER FESTSTOFFKONZENTRATIONEN AN DEN MESSSTELLEN III UND IV IM RAHMEN EINES KOMBINIERT GESTEUERTEN ENTLASTUNGSEREIGNISSES.....	66
ABBILDUNG 7-17: VERLAUF DER FRACHTSUMMENLINIEN DES PARAMETERS TS-KONZENTRATION DES KOMBINATORISCH GESTEUERTEN ENTLASTUNGSEREIGNISSES VOM 23.-25.04.2004.....	67
ABBILDUNG 7-18: VERGLEICH DER FRACHTSUMMENLINIEN.....	68
ABBILDUNG 8-1: SCHLEPPGESCHWINDIGKEIT MINERALISCHER PARTIKEL IN ABHÄNGIGKEIT VON DER PARTIKELGRÖßE.....	72
ABBILDUNG 8-2: SUMMENKURVEN DER SINKGESCHWINDIGKEITEN ERMITTELT AUS DER KORRIGIERTEN ZWEITEN PARTIKELMESSUNG IM VERGLEICH ZU ANGABEN AUS DER LITERATUR (HÜBNER (1997))	76
ABBILDUNG 8-3: DARSTELLUNG DER SINKGESCHWINDIGKEITEN ALS FUNKTION DER PARTIKELDURCHMESSER FÜR MINERALISCHE UND ORGANISCHE PARTIKEL	77
ABBILDUNG 8-4: DARSTELLUNG DER THEORETISCHEN VERWEILZEIT (HIER 2630 s) AM BEISPIEL DES MODELLS "IST-ZUSTAND".....	78

Tabellenverzeichnis

TABELLE 3-1:	FREMDWASSERURSACHEN BEI MISCHWASSERKANÄLEN (MW) SOWIE SCHMUTZWASSER- (SW) UND REGENWASSERKANÄLEN (RW) DER TRENNKANALISATION NACH ATV-DVWK (2003, S. 71).....	4
TABELLE 3-2:	SUMMENPARAMETER IN DER ABWASSERTECHNIK NACH DR. HÄCK (2001, S. 54).....	6
TABELLE 3-3:	KONZENTRATIONEN AUSGEWÄHLTER PARAMETER IM MISCH- UND ENTLASTETEM MISCHWASSER NACH BROMBACH U. FUCHS (2001).....	7
TABELLE 3-4:	AUSFÜHRUNGSFORMEN HERKÖMMLICHER REGENBECKEN NACH ATV A 166 (1999).....	9
TABELLE 3-5:	ZUSAMMENSTELLUNG DER ANLAGEN UND DER VERFAHRENSTECHNIKEN ZUR BEHANDLUNG DER REGENABFLÜSSE NACH HÜBNER (1997).....	10
TABELLE 4-1:	STATISTISCHER ZUSAMMENHANG DES SPEKTRALEN ABSORPTIONSKOEFFIZIENTEN (SAK) UND DER FESTSTOFFKONZENTRATION (ONLINE-MESSUNG) ZUM CSB (1-H-MISCHPROBE).....	23
TABELLE 5-1:	METHODEN DER FREMDWASSERERMITTLUNG	32
TABELLE 7-1:	AUFSTELLUNG DER BEEINFLUSSTEN ENTLASTUNGSEREIGNISSE MIT VOLUMETRISCHER STEUERSTRATEGIE	54
TABELLE 7-2:	AUFSTELLUNG DER BEEINFLUSSTEN ENTLASTUNGSEREIGNISSE MIT KONZENTRATIONSABHÄNGIGER STEUERSTRATEGIE	59
TABELLE 7-3:	AUFSTELLUNG DER BEEINFLUSSTEN ENTLASTUNGSEREIGNISSE MIT KOMBINierter STEUERSTRATEGIE	64
TABELLE 8-1:	STOFFKENNWerte DER PHASEN FÜR DIE NUMERISCHE SIMULATION.....	75
TABELLE 8-2:	ZUSAMMENSTELLUNG DER STOFFRÜCKHALTE FÜR ALLE MODELLE	79
TABELLE 9-1:	AUFSTELLUNG EXEMPLARISCHER KOSTEN FÜR DIE MSR-TECHNIK	82

Abkürzungsverzeichnis

Begriffe:

a.a.R.d.T.	allgemein anerkannte Regeln der Technik
AbwAG	Abwasserabgabengesetz
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
BF	Bodenfilter
BWK	Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau
DB	Durchlaufbecken
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Nenndurchmesser
EU	Europäische Union
EW	Einwohnerwert(e)
FA	Filteranlagen
FB	Fangbecken
ha	Hektar
i.d.R.	in der Regel
i.M.	im Mittel
LUA	Landesumweltamt
LWG	Landeswassergesetz
MF	Mechanische Filter
MID	magnetisch-induktive Durchflussmessung
MSR	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein Westfalen
N-A-...	Niederschlags-Abfluss-....
NRW	Nordrhein Westfalen
o.A.	ohne Angabe
RdErl.	Runderlass
RRA	Regenrückhalteanlage
RRB	Regenrückhaltebecken
RRK	Regenrückhaltekanal
RRSB	Regenrückstaubecken
RÜ	Regenüberlauf
RÜB	Regenüberlaufbecken
s.o.	siehe oben

s.u.	siehe unten
SK	Stauraumkanal
SKK	Stauraumkanal als Kaskade
SKO	Stauraumkanal mit oben liegender Entlastung
SKU	Stauraumkanal mit unten liegender Entlastung
sog.	sogenannte(n)
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
SüwV Kan	Selbstüberwachungsverordnung Kanal
usw.	und so weiter
UV	Ultraviolett
VB	Verbundbecken
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Parameter:

ν	Viskosität
ϕ	Formkorrekturbeiwert
η_i	Relativer Stoffrückhalt
μ_F	dynamische Viskosität des Fluids
A	Fläche
A_E	Fläche des Einzugsgebiets
AFS	abfiltrierbare Stoffe
A_{ges}	Gesamtfläche
A_{red}	reduzierte (bebaute) Fläche des Einzugsgebiets
ASS	absetzbare Stoffe
b	Breite
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
BSB_5	Biochemischer Sauerstoffbedarf (Verbrauch nach 5 Tagen)
C(SAK, TS)	Funktion C aus den Parametern SAK und TS
$C_{Bü}$	Mischwasserkonzentration am Beckenüberlauf
$C_{Kü}$	Mischwasserkonzentration am Klärüberlauf
cmWS	Höhe der Wassersäule in cm
CO ₂	Kohlendioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSB _{filt.}	Gelöster chemischer Sauerstoffbedarf
CSB _{ges}	gesamter chemischer Sauerstoffbedarf

$CSB_{\text{part.}}$	Partikulärer chemischer Sauerstoffbedarf
$CSB_{\text{SAK, TS}}$	Chemischer Sauerstoffbedarf anhand der Parameter SAK und TS
c_w	Widerstandsbeiwert
$d_K = d_P$	Partikeldurchmesser
EP	Dissipation der kinetischen Turbulenzenergie (e)
g	Erdbeschleunigung (9,81 m/s ²)
H	Höhe
h_{Becken}	Füllstandshöhe im Becken
$h_{K\ddot{u}}$	Höhe des Überstandswassers am Klärüberlauf
$h_{\ddot{U}}$	Höhe des Überstandswassers am Beckenüberlauf
KE	Turbulenzenergie (k)
L	Länge
M	Massenstromdichte
N	Stickstoff
n	kinematische Viskosität des Fluids
N_{anorg}	Anorganischer Stickstoff
N_{ges}	gesamter Stickstoff (organischer u. anorganischer Stickstoff)
$NH_3\text{-N}$	Ammoniak-Stickstoff
$NH_4\text{-N}$	Ammonium-Stickstoff
O_2	Sauerstoff
P	Phosphor
P1	Druck
PAK	polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
P_{ges}	gesamter Phosphor
Q	Durchflussmenge
qA	Oberflächenbeschickung
Q_{ab}	Drosselabfluss
$Q_{B\ddot{u}}$	entlastete Mischwassermenge am Beckenüberlauf
$Q_{\text{E,zul.}}$	zulässiger kritischer jährlicher Einleitungsabfluss
Q_f	Fremdwasser
Q_g	gewerbliches Abwasser
Q_h	häusliches Abwasser
Q_i	industrielles Abwasser
Q_{krit}	kritische Abflussmenge
$Q_{K\ddot{u}}$	Entlastete Mischwassermenge am Klärüberlauf
Q_{Luft}	Volumenstrom Luft
Q_m	Mischwasserabfluss

Q_r	Regenwasserabfluss
Q_s	Schmutzwasserabfluss
Q_{Zu}	Zulaufvolumenstrom
R	Volumenanteil am Gesamtvolumen
R^2	Bestimmtheitsmaß der mathematischen Korrelation
Re	Reynoldszahl
SAK	Spektraler Absorptionskoeffizient
t	Verweilzeit
t_A	Aufenthaltszeit
t_f	Fließzeit
t_{mhv}	mittlere hydrodynamische Verweilzeit
TOC	gesamter organischer Kohlenstoff
t_R	theoretische Verweilzeit
TS	Trockensubstanz (Feststoffgehalt)
t_{th}	theoretische Verweilzeit
u	Horizontalgeschwindigkeit
u^*	Schubspannungsgeschwindigkeit
u_s	Schleppgeschwindigkeit
v	Horizontalgeschwindigkeit
V_{Becken}	Beckenvolumen
V_{ges}	Gesamtes Rückhaltevolumen
V_{Kanal}	Kanalvolumen
v_s	Sinkgeschwindigkeit
V_{SF}	Sandfangvolumen
w	Vertikalgeschwindigkeit
ρ_F	Dichte des umgebenden Fluids
ρ_p	Dichte des Partikels
Δv	Geschwindigkeitsdifferenz

1 EINLEITUNG

Im Verlauf der letzten Jahre vollzieht sich nachweislich ein Wandel in der Abwasserentsorgung. Unter dem Eindruck des schlechten Gewässerzustands als Folge der Einleitungen aus Schnittstellen der Schwemmkanalisation mit dem Gewässer sowie dem überproportionalen Anstieg der einwohnerspezifischen Kosten für Sammlung, Transport und Reinigung rückte eine integrierte Betrachtung der Teilsysteme Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer in den Vordergrund (vgl. WEILAND, HOPPE, ORTH (2002, S. 136)). Mit der Entwicklung eines stärkeren Umweltbewusstseins und einer sich intensivierenden Kostendiskussion in der Öffentlichkeit (vgl. COBURG et al. (2003, S. 491 ff), HELBIG/FOLTYS-SCHMIDT (2003, S. 631 ff)) haben sich im Rahmen neuer Gesetze und Leitlinien letztlich folgende Hauptziele in der Abwasserreinigung herausgestellt:

1. **Stetige Verbesserung der Gewässerqualität**
2. **Sichere Einhaltung der Kläranlagenablaufgrenzwerte**
3. **Reduktion der Schadstofffrachten aus der Niederschlagswasserbehandlung**
4. **Kosteneinsparung durch effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen.**

Wegen der regional zeitlich unterschiedlichen Ausbautätigkeit hat sich ein hoher, bereichsweise unterschiedlicher Innovationsstand eingestellt. Darüber hinaus führte die Inbetriebnahme neuer Anlagen zu bisher nicht bekannten Betriebserfahrungen. So führte auf Seiten der **Abwasserreinigung** beispielsweise die Umstellung des Belebtschlammprozesses auf die Prozessziele Stickstoff- und Phosphorelimination seit Anfang der 90er Jahre zu Stabilitätsproblemen durch Bildung fadenförmiger Bakterien (u.a. Microthrix) und damit auch zu Problemen bei der Einhaltung der Ablaufwerte der Kläranlage.

Auf der Seite der **Niederschlagswasserbehandlung** gab man den Grundsatz auf, Regenwasser in dicht besiedelten und ländlichen Gebieten undifferenziert zentral zu sammeln und schnell einem Vorfluter zuzuführen.

Mit dem BWK MERKBLATT 3 (2001) wurde auf der Grundlage geltender Emissionsanforderungen nach dem Stand der Technik eine Handlungsempfehlung zur Begrenzung der akuten sowie langfristigen Wirkung von Niederschlagswassereinleitungen anhand immissionsorientierter Zielgrößen vorgestellt. Verstärkt wird diese Entwicklung durch die Forderung der EU - WASSERRAHMENRICHTLINIE (2000) nach einem kombinierten Ansatz aus Emissionsanforderungen und weitergehenden immissionsorientierten Verfahrenslösungen zum Erreichen eines „guten Zustands“ der Gewässer.

Vor diesem Hintergrund macht es Sinn – unter Beibehaltung der Zielsetzung der o.g. Punkte 1-3 – den Zielen der Optimierung und Kosteneinsparung des Punktes 4 nachzugehen.

2 VERANLASSUNG / PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Im Dezember des Jahres 2002 wurde das IWB von der Gemeinde Neunkirchen mit der wissenschaftlichen Begleitung des Forschungsvorhabens „Verfahren zur dynamischen Entlastungsoptimierung bei Regenwasserbehandlungsanlagen“ beauftragt. Das Projekt befasst sich mit dem Entlastungsverhalten eines Fangbeckens. Die Untersuchungen sollten am Beispiel des Fangbeckens RÜB B84 „Weidenstraße“ der Gemeinde Neunkirchen durchgeführt werden.

Problemstellung

Im Mischsystem erfolgt die gemeinsame Ableitung von Schmutz- und Regenwasser zur Kläranlage. Bei einem Regenereignis steigen abhängig von der Gebietscharakteristik die abzuleitenden Wassermengen sprunghaft an. Um einen gleichmäßigen Zufluss zur Kläranlage zu erreichen, sind im Leitungsnetz Bauwerke angeordnet, welche die bei einem Regenereignis anfallenden Wassermengen speichern und zeitlich verzögert zur Kläranlage ableiten. Da diese Bauwerke aus wirtschaftlichen Erwägungen nicht für jedes mögliche Regenereignis ausgelegt werden können, wird toleriert, dass über das zur Verfügung stehende Speichervolumen hinaus Wassermengen anfallen, die nicht zwischengespeichert werden können. Diese werden an zahlreichen Schnittstellen im Leitungsnetz in das Gewässer entlastet. In Einzugsgebieten mit geringem Fremdwasseranfall beschränkt sich diese stoßweise Belastung der Vorfluter auf wenige Stunden. In dem zu untersuchenden Einzugsgebiet stellt sich jedoch aufgrund eines erhöhten Fremdwasseranfalls ein Nachlaufzeitraum von mehreren Tagen ein, bei dem der Zulauf zum Becken über $2 Q_s + Q_f$ liegt. Dieser schwach verdünnte Mischwasserzufluss wird am Trennbauwerk abgeschlagen.

Zielsetzung

Im gleichlautenden Forschungsantrag der Gemeinde Neunkirchen vom April 2002 (s.o.) wurde ein technischer Lösungsansatz für dieses Problem und die Umsetzung auf das zu untersuchende Fangbecken dargestellt.

Durch eine dynamische Steuerungsstrategie sollte das Fangbecken „Weidenstraße“ so betrieben werden, dass sowohl die eigentliche Funktion des Spülstoßrückhalts, als auch die mechanische Reinigungswirkung eines Durchlaufbeckens in einem Bauwerk erreicht werden. Die Untersuchung wurde in drei zeitlich aufeinanderfolgende Phasen eingeteilt. Diese waren:

- Phase 1: Untersuchungen im IST-Zustand (Referenzzustand)
- Phase 2: Entwicklung und Erprobung möglicher Steuerstrategien (- in Abhängigkeit von der Hydraulik / - in Abhängigkeit von den Frachten)
- Phase 3: Langzeituntersuchungen mit Entlastungsoptimierung

Der vorliegende Abschlussbericht stellt die Ergebnisse der Untersuchung vor und bewertet die Wirkung der dynamischen Entlastungsoptimierung vor dem Hintergrund der geltenden Umweltstandards.

3 REGENWASSERBEHANDLUNG IN MISCHWASSERNETZEN

3.1 HERKUNFT UND ZUSAMMENSETZUNG DES MISCHWASSERS

3.1.1 Herkunft des Mischwassers

Das Abwasser im Mischwasserkanal setzt sich aus den Komponenten Trockenwetter- und Regenwetterabfluss zusammen. Der Trockenwetterabfluss wiederum ist die Summe aus Schmutzwasser und Fremdwasser. Das **Schmutzwasser** im Mischwasserkanal besteht anteilig aus häuslichem, gewerblichen und industriellem Abwasser (Q_h , Q_g und Q_i). Zusätzlich zum Schmutzwasser wird in Kanälen des Misch- und Trennsystems „fremdes“ Wasser mit abgeleitet. Dieses **Fremdwasser** gelangt auf unterschiedlichen Wegen in das Kanalsystem. Nach ATV-DVWK (2003, S.71) sind die wichtigsten Ursachen für Fremdwasser in folgender Tabelle aufgeführt:

Tabelle 3-1: Fremdwasserursachen bei Mischwasserkanälen (MW) sowie Schmutzwasser- (SW) und Regenwasserkanälen (RW) der Trennkanalisation nach ATV-DVWK (2003, S. 71)

Fremdwasserkomponente	MW	SW	RW
Eindringendes Grundwasser durch undichte Schächte und Kanäle	X	X	X
Drainagewasser	X	X	X*
Quellwasser und Bachwasser	X	X	X*
Kühlwasser	X	X	
Fehleinleitungen von Regenwasser		X	
Zufluss von Regenwasser über Schachtabdeckungen		X	
Oberflächenwasser von Außengebieten, die nicht planmäßig durch die Kanalisation entwässert werden sollen	X	X	X
X: Die Fremdwasserkomponente gilt als Fremdwasser in dieser Kanalart			
*: Die Zulässigkeit der Einleitung von Drainage-, Quell- und Bachwasser in Regenwasserkanäle ist im Einzelfall zu prüfen			

Die Auswirkung des Fremdwassers auf das zu untersuchende Becken wird in Kapitel 5.4.2 beschrieben. Hier bleibt für das betrachtete Einzugsgebiet festzustellen, dass es in regenreichen Monaten zu deutlich verlängerten Nachlaufzeiträumen und damit ausgedehnten Entlastungszeiträumen kommt, die von der Kommune dem Fremdwasser zugeschrieben werden.

Das bei Regen von bebauten und befestigten Flächen ablaufende **Niederschlagswasser** führt in der Mischkanalisation zu einem Ansteigen des Volumenstroms auf ein Vielfaches des Trockenwetterabflus-

ses. Dieses eindringende Regenwasser verdrängt nach GRÜNING (2002, S. 43) zu Beginn eines Mischwasserabflusses den Trockenwetterabfluss in Richtung der Netzauslässe (Entlastungen, Drosseln). Damit kann die maximale Frachtmenge im Verlauf eines Ereignisses vor der maximalen Wassermenge am Regenbecken eintreffen. Einen solchen Fall bezeichnet man als **Spülstoß**.

3.1.2 Stoffliche Zusammensetzung des Mischwassers

Im Gegensatz zum **Schmutzwasser**, dessen Verteilung von organischen und mineralischen Bestandteilen für ein bestimmtes Einzugsgebiet relativ konstant und lediglich tageszeitlichen bzw. wöchentlichen Schwankungen unterworfen ist, ist die Zusammensetzung des **Niederschlagswassers** stärkeren, auch kurzfristigen Veränderungen zugänglich. Im Regenwetterfall treten im Kanal Schmutzstoffkonzentrationen auf, die sich nicht durch ein Verdünnungsverhältnis errechnen lassen. Hierbei spielen mehrere, sich überlagernde Prozesse eine Rolle:

- Abspülungen von Verschmutzungen an Oberflächen,
- Aufnahme der in der Luft befindlichen Verschmutzungen,
- Vermischung mit dem Trockenwetterabfluss im Kanal,
- Remobilisierung abgelagerter Schmutzstoffe im Kanal,
- Ablösung der Sielhaut etc.

Die Ausprägung der Konzentrationsspitzen ist dabei abhängig von a) der Topografie und Geografie und b) der Dauer und Intensität des Niederschlags.

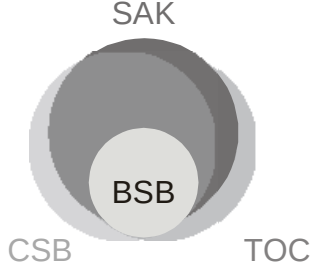
Der **Grad der Verschmutzung** wird über die Angabe der Konzentrationen sog. Summen- und Gruppenparameter bestimmt und umfasst im wesentlichen folgende Stoffgrößen:

1. Summenparameter:

- biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB₅),
- chemischer Sauerstoffbedarf (CSB),
- gesamter organischer Kohlenstoff (TOC),
- gelöster organischer Kohlenstoff (DOC).

Aus der Beschreibung ist ersichtlich, dass die Summenparameter jeweils einen Teil des Stoffkonglomerates erfassen, ohne jedoch identisch, oder durch Multiplikation mit einem pauschalen Faktor in einander überführbar zu sein. Dabei erfasst der DOC die gelösten organischen Inhaltsstoffe, während der TOC jedwede organische Belastung registriert. Der CSB stellt demgegenüber die Substanzen dar, die chemisch oxidierbar sind und der BSB erfasst nur die Stoffgruppe, die während einer mikrobiellen Oxidation umgesetzt werden. HÄCK (2001, S. 54) stellt in einer Tabelle die Summenparameter in der Abwasserreinigung wie folgt dar:

Tabelle 3-2: Summenparameter in der Abwassertechnik nach Dr. HÄCK (2001, S. 54)

Parameter	Messgröße	Messverfahren	
BSB Biochemischer Sauerstoffbedarf	O ₂ -Verbrauch	mikrobielle Oxidation	
CSB Chemischer Sauerstoffbedarf	O ₂ -Verbrauch	Nasschemische Oxidation	
TOC Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff	C-Konzentration	Thermisch/ nasschem. Aufschluss	
SAK Spektraler Absorptionskoeffizient	UV Absorption bei $\lambda = 254 \text{ nm}$	UV Absorptionsmessung	

2. Gruppenparameter

- Stickstoff (N),
- Phosphor (P)

Während die Konzentrationen der Summen- und Gruppenparameter auf Kläranlagen über längere Zeiträume gemessen und dokumentiert wurden, ist für die Kanalisation kaum belastbares Datenmaterial vorhanden. Aus diesem Grund wurde es in einer umfangreichen Datensammlung und -auswertung von BROMBACH u. FUCHS (2001) für Misch- und Trennkanalisation aufbereitet. Die Daten wurden in vier Abflusskomponenten aufgeteilt:

- Niederschlagsabfluss in der Trennkanalisation
- Trockenwetterabfluss in der Mischkanalisation
- Mischwasserabfluss in der Mischkanalisation und
- Überlaufwasser der Mischkanalisation.

Die nachfolgende Tabelle basiert auf diesem Abschlussbericht. Dargestellt sind ausgewählte Parameter, die als Referenz für die eigene Messung gelten können. Es wurden ausschließlich zwei Abflusskomponenten berücksichtigt.

Tabelle 3-3: Konzentrationen ausgewählter Parameter im Misch- und entlastetem Mischwasser nach BROMBACH u. FUCHS (2001)

			CSB	BSB ₅	TOC	P _{ges}	ASS	AFS
			[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[ml/l]	[mg/l]
Mischwasserabfluss	Welt	arithmetisches Mittel	273,00	90,60	52,90	3,24	5,73	346,80
		unteres Quartil	121,00	36,80	42,30	1,27	3,52	197,00
		Median	233,00	77,00	45,60	2,01	4,20	285,50
		oberes Quartil	415,00	126,50	70,90	4,88	8,77	439,30
	Zentral-Europa	arithmetisches Mittel	192,60	100,10	48,90	2,20	5,73	315,90
		unteres Quartil	90,70	43,50	38,90	0,73	3,52	177,50
		Median	141,00	81,00	45,60	1,25	4,20	264,00
		oberes Quartil	278,00	142,00	55,60	2,95	8,77	423,30
Mischwasserentlastung	Welt	arithmetisches Mittel	305,90	66,30	42,20	3,01	2,06	315,90
		unteres Quartil	148,00	39,50	26,30	1,45	1,10	177,50
		Median	274,00	60,00	30,60	1,96	1,59	264,00
		oberes Quartil	435,00	82,50	55,00	3,28	3,32	423,30
	Zentral-Europa	arithmetisches Mittel	172,40	62,30	40,60	1,53	2,06	228,70
		unteres Quartil	87,20	31,00	24,50	0,56	1,10	114,20
		Median	112,00	55,70	29,00	1,00	1,59	175,00
		oberes Quartil	242,00	83,00	44,95	1,71	3,32	278,00

Die Parameter „absetzbare Stoffe“ (ASS) und „abfiltrierbare Stoffe“ (AFS) aus obiger Tabelle lassen sich nach DIN 38409 als partikuläre Abwasserinhaltsstoffe zusammenfassen. Bei einem Niederschlagsereignis werden diese z.T. in die Gewässer eingetragen. Nach JACOBS und SLUIS (1992) (zitiert in BROMBACH, MICHELBAACH und WÖHRLE (1993)) sind sie ein wichtiger Transportpfad für Schmutzstoffe in das Sediment des Gewässers (hyporheisches Interstitial). Der Rückhalt dieser Stoffe im Kanalnetz erfolgt durch Sedimentation in den Regenwasserbehandlungsanlagen. Ihr Absetzverhalten kann anhand von Sinkgeschwindigkeiten und Oberflächenbeschickung beschrieben werden. Die Zusammenhänge werden im Rahmen der numerischen Simulation eingehender erläutert (s. Kapitel 8).

3.2 VERFAHRENSTECHNIKEN DER NIEDERSCHLAGSWASSERBEHANDLUNG

Die Niederschlagswasserbehandlung ist Teil eines ganzheitlichen Ansatzes zur Reduktion des Schmutzstoffeintrags in die Gewässer. Wie eingangs erwähnt findet hier ein Umdenken statt. Man ist

bestrebt, möglichst viel Niederschlagswasser aus den Kanalnetzen fern zu halten. Hierzu ist eine Differenzierung in belastetes und unbelastetes Niederschlagswasser erforderlich. Das unbelastete Nieder-

schlagswasser sollte im natürlichen Wasserkreislauf belassen und nur belastetes Niederschlagswasser behandelt werden. Aus dieser Prämisse lassen sich nach SCHMITT (1996, S 51) folgende Handlungsstrategien im Umgang mit Niederschlagswasser aufstellen:

- Vermeiden von Regenwasserabfluss durch Flächenentsiegelung und die Verwendung durchlässiger Flächenbefestigung bei unverschmutzten Flächen;
- Nutzen von Regenwasser zur Gartenbewässerung;
- Versickern von Regenwasser;
- Speichern und verzögertes (offenes) Ableiten von Regenwasser;
- Behandeln von verschmutztem Regenwasser.

Zur Behandlung von verschmutztem Regenwasser, welches nicht vermeidbar oder nicht direkt einer anderen o.g. Verwendung zugeführt werden kann, sieht das Arbeitsblatt der ATV A 128 (1992) folgende Handlungsmöglichkeiten vor:

- Zwischenspeicherung von Mischwasser und nachfolgende Reinigung in einer Kläranlage;
- Umleitung der Regenabflüsse im Kanalnetz mit dem Ziel einer optimierten Nutzung von vorhanden Speichervolumina;
- Durchführung von klärtechnischen Maßnahmen.

Die bisher üblicherweise eingesetzte Methode ist die o.g. Zwischenspeicherung mit nachfolgender Reinigung. Der Stoffrückhalt erfolgt an ausgewählten Stellen im Kanalnetz und lässt sich nach HÜBNER (1997) wie folgt kategorisieren:

- Weiterführung eines erhöhten Volumenstroms, z.B. Regenüberläufe,
- Zwischenspeicherung eines Teils des Abflussvolumens, z.B. Regenbecken und
- Reinigung des Regen- und Mischwasserabflusses.

Da sich dieses Projekt mit dem Entlastungsverhalten eines Regenbeckens in der Ausführungsform eines Fangbeckens im Nebenschluss beschäftigt (s. Tabelle 3-4), wird auf die übrigen Formen nicht weiter eingegangen.

Tabelle 3-4: Ausführungsformen herkömmlicher Regenbecken nach ATV A 166 (1999)

Anlage	Variante	Kürzel	Anordnung
Regenüberlaufbecken (RÜB)	Fangbecken	FB	▪ Hauptschluss ▪ Nebenschluss
	Durchlaufbecken	DB	▪ Hauptschluss ▪ Nebenschluss
	Verbundbecken	VB	▪ Hauptschluss ▪ Nebenschluss
Stauraumkanäle (SK)	mit oben liegender Entlastung	SKO	▪ Hauptschluss ▪ (Regelfall)
	mit unten liegender Entlastung	SKU	▪ Hauptschluss ▪ (Regelfall)
	als Kaskade	SKK	▪ Hauptschluss ▪ (Regelfall)
Regenrückhalteanlagen (RRA)	Regenrückhaltebecken	RRB	▪ Hauptschluss ▪ Nebenschluss
	Regenrückhaltekanäle	RRK	▪ Hauptschluss ▪ Nebenschluss

Hinsichtlich der Reinigungsleistung besteht jedoch Optimierungspotential (vgl. SIEKER (1991) und BRUNS (1999)). Die **mögliche Vergrößerung** der Becken bewirkt dabei lediglich einen Kostenanstieg, ohne eine signifikant höhere Reinigungsleistung zu erbringen (vgl. KRAUTH u. STOTZ (1985, zitiert in THÖLE (1998)). Ein ganzheitlicher Ansatz durch dynamische Kopplung der Komponenten Kanalnetz und Kläranlage ist nach BRUNS (1999) denkbar. Dabei muss die Reinigungsleistung der Kläranlage bei maximal zulässiger Beaufschlagung erhalten bleiben. Inzwischen sind dahingehend einige Versuche unternommen worden, den Kläranlagenzufluss auf $3,5 Q_t$ (vgl. DURCHSCHLAG et al. (1995)) bzw. $3 Q_s + Q_f$ (vgl. GROTEHUSMANN u. KAUFMANN (1991), zitiert nach GRÜNING (2002)) zu erhöhen.

Eine effiziente Nutzung der vorhandenen Speichervolumina durch Umleitung der Regenabflüsse im Kanalnetz ist systemisch bedingt auf bestimmte Anwendungsgebiete beschränkt. Der Aufbau einer **Kanalnetzbewirtschaftung** ist aufgrund hoher Anforderungen an die Messtechnik (s. auch Kapitel 4.3), des anfallenden hohen Wartungsaufwandes und aufgrund von Risiken der Störungsbeseitigung im Einzelfall abzuwägen.

Die **klärtechnischen Maßnahmen** sind, entlehnt aus den anderen verfahrenstechnischen Bereichen wie Abwasserreinigung oder –aufbereitung, mit dem Ziel übernommen worden, bestehende technische Lösungen zu optimieren. Sie kommen z.T. als zusätzliche Stufe im Anschluss an vorhandene Speicher-

volumina, aber auch als leistungssteigernde Maßnahme in vorhandenen Bauwerken in Frage. Die Verfahrenstechniken lassen sich gruppieren in:

- mechanische Behandlung des Mischwassers,
- chemische Behandlung des Mischwassers und
- biologische Behandlung des Mischwassers.

Eine Zusammenstellung klärtechnischer Maßnahmen bietet Hübner in folgender Übersicht:

Tabelle 3-5: Zusammenstellung der Anlagen und der Verfahrenstechniken zur Behandlung der Regenabflüsse nach HÜBNER (1997)

Anlagen, die als Einzelmaßnahme eingesetzt werden können				
Übergeordneter begriff	Rechen	Siebe	Hydro-dynamische Abscheider	Naturnah gestaltete Anlagen
Wirkungsprinzipien	3)	3)	1), 2), 4)	1), 2), 3), 4), 5), 6)
Ausführungsformen	Stabrechen durchströmt von - unten - oben - seitlich Stabrechen Siebrechen	Bandsieb Trommelsieb Scheibensieb Bogensieb	Wirbelabscheider Zyklonabscheider Regenüberlaufzyklon	Bodenfilter Vegetationspassagen Scheibensieb Regenteiche
Stoffrückhalt wird erzielt durch (Wirkungsprinzipien): 1) Weiterleitung eines Volumenstroms 2) Zwischenspeicherung 3) Einengung des Fließquerschnitts (Filtration) 4) Sedimentation 5) Biologisch-chemische Stoffumsetzungsprozesse 6) Physikalische Phasenwandlungsprozesse				
Verfahrenstechniken zur Leistungssteigerung von Anlagen				
Fällung und Flockung zur Verbesserung der Absetzwirkung Flotation zur Verbesserung des Feststoffrückhaltes UV-Bestrahlung zur Desinfektion Ozonierung zur Desinfektion und chemischen Stoffumsetzung Einbauten zur Verkürzung des Sinkwegs (Röhren, Platten, Lamellen)				

Die zu untersuchende dynamische Steuerungsstrategie lässt sich als zusätzliche Methode in obiger Tabelle unter „Verfahrenstechniken zur Leistungssteigerung von Anlagen“ einstufen. Wie in nachfolgendem Kapitel 4 eingehender erläutert, wird durch das Wirkungsprinzip der Sedimentation ein erhöhter Feststoffrückhalt vor der Entlastung in das Gewässer gefördert.

4 TECHNISCHER LÖSUNGSANSATZ DURCH DAS VERFAHREN DER DYNAMISCHEN ENTLASTUNGSOPTIMIERUNG

4.1 VERFAHRENSBESCHREIBUNG UND KONZEPTIONELLE UMSETZUNG FÜR DAS FANGBECKEN „WEIDENSTRASSE“

Fangbecken dienen ausschließlich der Zwischenspeicherung und brauchen keine Klärwirkung zu erzielen. Sie besitzen einen im Zulauf gelegenen Beckenüberlauf (BÜ), der als Überlauf mit hochgezogenem Wehr ohne nachgeschaltete Drosseleinrichtung bezeichnet werden kann. Der Beckenüberlauf (BÜ) darf nicht als Regenüberlauf (RÜ) ausgebildet werden. Erst nach der Beckenfüllung darf der BÜ entlasten.

Werden Fangbecken im qualifizierten Nebenschluss betrieben, werden sie über ein Trennbauwerk beschickt. Der Mischwasserabfluss Q_{tx} und Q_{ab} wird am Becken vorbei zur Kläranlage geleitet. Erst nach der Füllung des Beckens entlastet das Bauwerk über den Beckenüberlauf. In Trockenwetterperioden und während kleinerer Niederschläge ($Q_r \leq Q_{ab}$) findet keine Füllung des Beckens statt. Die Entleerung des Beckens erfolgt über Pumpen. Diese bewirken im Gegensatz zu einem Fangbecken im Hauptschluss einen konstanten zusätzlichen Zufluss zur Kläranlage.

Das Fangbecken in der Weidenstraße sollte in den ersten drei Phasen eines Regenereignisses (Spülstoß, Anstieg der Mischwassermenge bis zum Maximum, Abklingen des Regenereignisses) in der üblichen Betriebsweise bewirtschaftet werden. Die Mischentlastung ist in diesen Phasen durch die starke Verdünnung als unkritisch anzusehen.

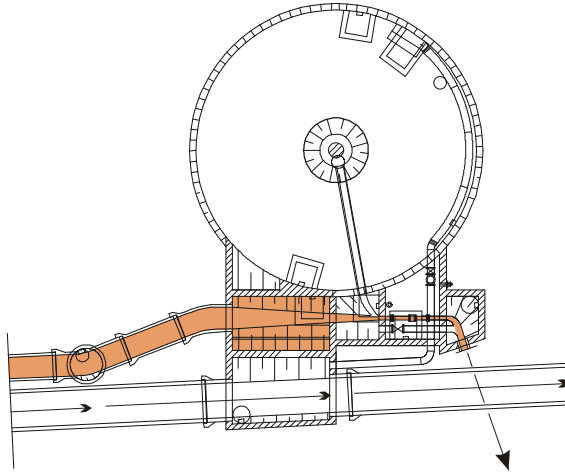
Erst im Nachlauf des Regenereignisses, in dem der Zufluss, bedingt durch den vorhandenen Fremdwasseranfall im Leitungssystem (s. Kapitel 3.1.1), nicht auf $2 Q_s + Q_r$ absinkt, sollte ein Klärüberlauf im Fangbecken unterhalb der Abschlagshöhe des Beckenüberlaufes freigeschaltet werden (durch Elektroschieber oder absenkbare Abschlagsschwelle). Dies steht im Gegensatz zum Normalbetrieb, bei welchem höher konzentriertes Abwasser am Beckenüberlauf abgeschlagen wird.

Durch diese Steuerstrategie soll eine signifikante Entlastung der Vorfluter durch eine Schmutzfrachtreduzierung erreicht werden. Nach der Freischaltung des zusätzlichen Klärüberlaufs entspricht das Fangbecken in seiner Wirkungsweise einem Durchlaufbecken. Demzufolge wird eine mechanische Reinigung (Absinken der Stoffe) durch Fließzeitverzögerung der zufließenden, über dem Drosselabfluss liegenden Wassermenge bewirkt.

Der Zeitpunkt der Freischaltung des Klärüberlaufes sollte durch eine dynamische Steuerungsregelung definiert werden, die in der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) vor Ort abgelegt wurde (s. Kapitel 6). Die Ansteuerung des Schiebers zur Aktivierung des Klärüberlaufs konnte dabei beispielsweise durch Vergleiche der relativen Frachtsummenlinie mit dem relativen Mischwasservolumenstrom quantitativ erfolgen.

Nachfolgend sind die geplanten Fließwege im Bauwerk über den Verlauf eines Regenereignisses ohne (**Fall a**) und mit Steuerstrategie (**Fall b**) grafisch aufbereitet.

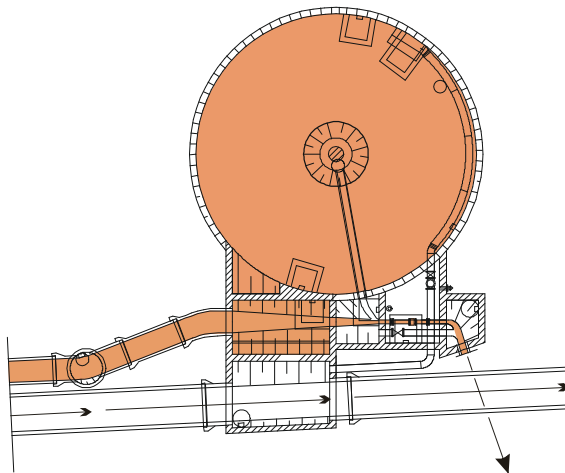
Betrieb des Beckens im Trockenwetterfall (identisch im Fall a und b):



Der Abfluss wird am Fangbecken vorbeigeführt (Anschluss im Nebenschlussverfahren).

Erste Phase eines Regenereignisses (Spülstoß)

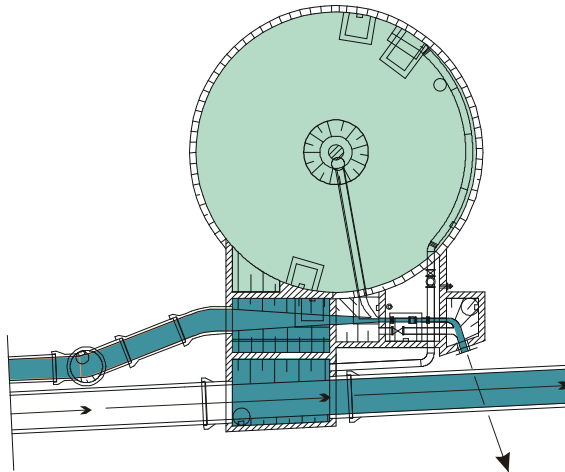
Betrieb zu Beginn eines Ereignisses (identisch im Fall a und b):



Der Fangteil des Beckens wird zu Beginn des Ereignisses mit dem Spülstoßvolumen gefüllt.

Zweite und dritte Phase eines Regenereignisses (Anstieg der Mischwassermenge bis zum Maximum und Abklingen des Ereignisses)

Betrieb während des Ereignisses (identisch im Fall a und b):

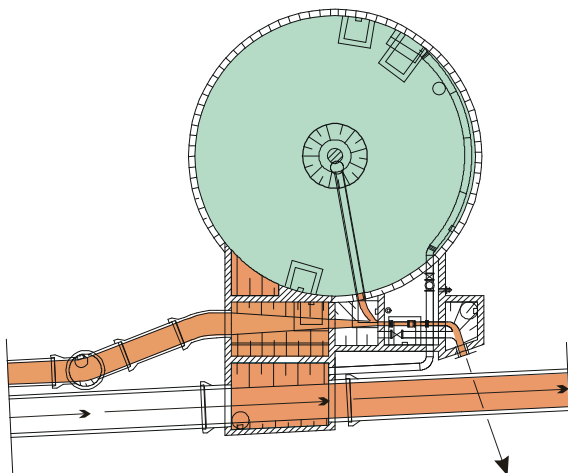


Während des Ereignisses wird verdünntes Abwasser abgeschlagen. Im Nachlauf eines Regenereignisses ist der Betrieb des Fangbeckens jedoch unterschiedlich:

Vierte Phase eines Regenereignisses

Fall a

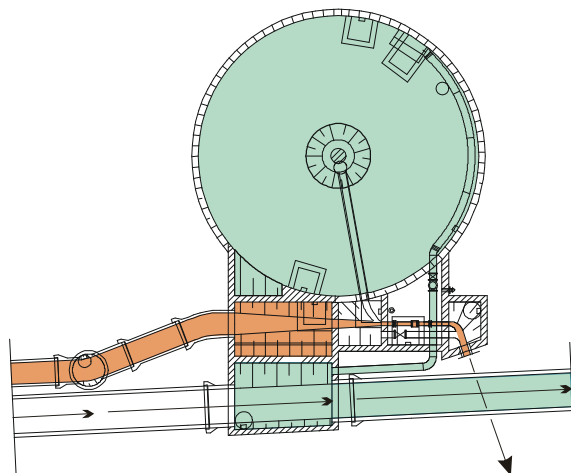
Betrieb im Nachlauf ohne Steuerung:
(herkömmliche Betriebsart)



Schwach verdünntes Mischwasser wird abgeschlagen

Fall b

Betrieb im Nachlauf mit Steuerung:



Im Nachlauf des Ereignisses öffnet sich im Fangbecken ein Schieber, der das Überstandswasser aus dem Becken dem Vorfluter zuleitet. Fällt die Zuflusswassermenge unter $2 Q_s + Q_f$ zurück, wird das Becken mit Hilfe eines Wirbeljets gereinigt. Das vorhandene Wasser wird über eine Pumpe der Kläranlage zugeführt.

4.2 DEFINITION DER IM RAHMEN DES PROJEKTES ZU UNTERSUCHENDEN BETRIEBSZUSTÄNDE SOWIE DER BETRACHTUNGSWEISEN

Betriebszustände

Aus der Verfahrensbeschreibung ließen sich zwei Betriebszustände ableiten:

1. Normalbetrieb (ohne Steuerstrategie):

Das Becken wird wasserwirtschaftlich als Fangbecken im Nebenschluss betrieben. Der Normalbetrieb wird als Referenz zur Beurteilung des Wirkungsgrades der zu untersuchenden Entlastungsoptimierung herangezogen.

2. Betrieb mit Steuerstrategie:

Das Becken wird im Nachlauf eines Regenereignisses in seiner Effizienz als Durchlaufbecken im Nebenschluss und zur übrigen Zeit als Fangbecken im Nebenschluss betrieben (Entlastungsoptimierung).

Beiden Betriebszuständen gemeinsam war der Betrieb als Fangbecken im Nebenschluss. Hierbei wurde, wie bei Fangbecken üblich, der Fangteil der Regenentlastungsanlage mit dem Spülstoß gefüllt und der übrige zufließende Volumenstrom ins Gewässer abgeschlagen. Maßgebliche Belastungsgrößen in diesem Betriebszustand waren Frachtsummenlinie bzw. relativer Mischwasservolumenstrom.

Betrachtungsweisen

Zur Beurteilung der Auswirkung dieser Belastungsgrößen, die eine Beckenbewirtschaftung beeinflussen, sind grundsätzlich zwei Betrachtungsweisen möglich:

1. Isolierte Betrachtung des Beckens (Black-Box-Modell):

Bei einer solchen Betrachtung wird das Becken fiktiv aus der Umgebung herausgelöst. Beurteilt werden lediglich die Zu- und Ablaufwerte bezogen auf Fracht und Volumenstrom, deren Grenzwerte sich jeweils an den gesetzlichen Vorgaben orientieren.

2. Betrachtung mit ganzheitlichem Ansatz:

Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Beckens in Verbindung mit der Einleitung aus anderen Regenbecken sowie der Kläranlage aus Sicht des Gewässers. Die Belastungsgrößen wären damit eine Funktion der Mischwasserabflüsse aus den Teileinzugsgebieten der Kläranlage.

Für das anstehende Forschungsvorhaben wurden in Anlehnung an das BWK MERKBLATT 3 (2001), die Empfehlungen für die Frachtableitung aus dem Fangbecken in einem ganzheitlichen Ansatz festgelegt, die abschließende Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Beckens und damit der Steuerstrategie isoliert auf das Becken bezogen.

Dadurch war zum einen garantiert, dass während des Versuchsbetriebes der Zustand des Vorfluters nicht übermäßig beeinträchtigt wird und zum anderen der messtechnische Aufwand begrenzt blieb.

4.3 DEFINITION DER EINZUSETZENDEN MESSSYSTEME ALS GRUNDLAGE FÜR DIE BECKEN-STEUERUNG

Die Aufgabenstellung einer dynamischen Prozessregulierung mit dem Ziel umzusetzen, die Gewässerbelastung bei gleichmäßigen der Kläranlagenzuflüssen zu reduzieren, erforderte die Möglichkeit, regulierend in den Abflussprozess eingreifen zu können. Daher war eine zeitnahe, gezielte Erfassung und Auswertung der akuten stofflichen Belastung (s. Kapitel 4) in Kombination mit den quantitativen Parametern, wie etwa Wasserstände und Abflüsse (Entlastungs- und Drosselabflüsse) an den in Abbildung 4-1 dargestellten Stellen I - IV erforderlich, um Regelgrößen (Entscheidungskriterien) und Messgrößen bereitzustellen.

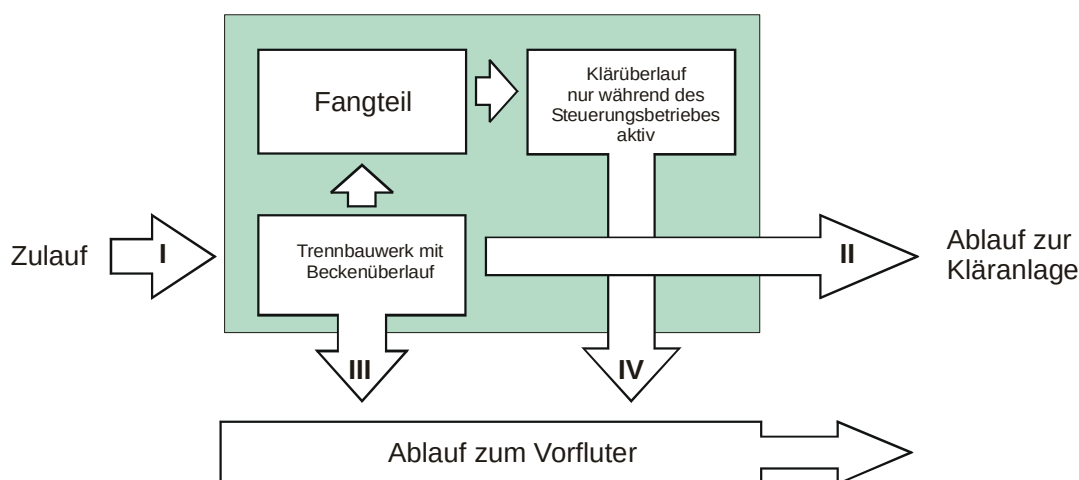


Abbildung 4-1: Skizze der Systemauslässe des Fangbeckens nach Modifikation im Rahmen der Steuerungsplanung

Darüber hinaus waren die Erkenntnisse über das Strömungsverhalten des Abwassers sowie der Stoffströme (Frachten) der gelösten bzw. partikulären Fraktion notwendig, um die Simulationsmodelle zu kalibrieren (s. Kapitel 8) sowie berechnete Systemzustände prüfen und ggf. anpassen zu können.

4.3.1 Hydraulisches Messsystem

Das hydraulische Meßsystem sollte als Komponente der Abflusssteuerung die momentanen Zustände im betrachteten System erfassen. Zur Erfassung der Volumenströme wurden folgende Messgeräte eingerichtet:

Magnetisch induktive Durchflussmessung (MID)

Im Ablauf zur Kläranlage (Messstelle II) wurde ein MID installiert. Nach dem Induktionsprinzip – durch wechselnde Erregung der Spulen fallen an den Elektroden Messspannungen an – konnten hier Informationen über die Fließgeschwindigkeit und Füllhöhe ermittelt werden. In der Ausführung unterscheidet man Teil- und Vollfüllungs-MID.

Zu den Messfehlern finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben. LANZENDORF (2001) spricht von einem maximal zu erwartenden Fehler von etwa 10 - 15 %. Angaben von UHL (2002) zufolge liegt der in der Literatur angegebene „Verkehrsfehler“ unter Praxisbedingungen für ein Vollfüllungs-MID bei 4 - 8%. Die Herstellerangaben zur Messwertabweichung liegen bei Teilfüllungs-MID bei etwa $\pm 5 - 15\%$ (vgl. BIRKNER u. CREMER (2001)).

Abschlagsvolumenmessung durch den Aqualyzer

Zur Ermittlung der Abschlagsmengen wurde am Becken- und am Klärüberlauf ein patentiertes Messsystem aus dem Produktkatalog der Firma Syro GmbH installiert. Nach dem Prinzip eines Messwehrs wird durch die Erfassung der Aufstauhöhe vor dem Wehr das Abflussvolumen mittels einer Stützpunktkurve ermittelt. Nach Herstellerangaben ist eine genaue und reproduzierbare Volumenstrommessung ab einer Abschlagsmenge von 1 l/s bei einer Genauigkeit von > 97% möglich (vgl. BOLLER (2001)).

Im Forschungsbericht „Verfahren zur exakten Volumenstrommessung in Regenwasserbehandlungsanlagen“ hat das IWB (2002) nachgewiesen, dass der Aqualyzer bei frontaler Anströmung der Überfallkante genügend genau simuliert werden kann, so dass eine Erfassung der Volumenströme am Klärüberlauf (KÜ), der im Becken zur Vermeidung von eventuell auftretenden Kurzschlussströmungen diagonal gegenüber dem Zulauf eingerichtet (Ausnutzung des längsten Fließweges) wurde, durch ein solches Messwehr erfolgen kann (Messstelle IV). Im Praxisbetrieb des Fangbeckens „Weidenstraße“ ließ sich allerdings bei Schwimmschlamm Bildung unterhalb der Ultraschall-Höhenmessung an Messstelle IV (Klärüberlauf) ein Messwertfehler von bis zu 50 % feststellen.

Bei Abfluss in offenen Gerinnen mit horizontaler Abflusstrennung (Streichwehr - Beckenüberlauf) weist dieses System jedoch erhebliche Unsicherheiten auf. Eine geforderte Vergleichsmessung lieferte hierzu keine neuen Erkenntnisse.

Berechnung der Zuflüsse aus der Summe der Einzelabflüsse an den Messstellen II-IV

Zur Bestimmung der Zuflüsse zum Becken (Messstelle I), wurden je nach Betriebsphase die verschiedenen Abflüsse aus dem Becken nach folgender Bedingung summiert:

$$Q_I = \begin{cases} Q_{II} & \text{für } Q_I < 7,81 \text{ l/s} \\ Q_{II} + \Delta V_{FB} / \Delta t & \text{für } Q_I > 7,81 \text{ l/s} \wedge h_B < h_{IV} \\ Q_{II} + Q_{IV} & \text{für } h_{IV} < h_B < h_{III} \\ Q_{II} + Q_{III} + Q_{IV} & \text{für } h_B > h_{III} \text{ bei aktiviertem Klärüberlauf} \\ Q_{II} + Q_{III} & \text{für } h_B > h_{III} \text{ bei deaktiviertem Klärüberlauf} \end{cases}$$

4.3.2 Messung der Stoffkonzentrationen

Online-Erfassung der Stoffkonzentration

Die Messung der Stoffkonzentration in der Abwasserreinigung erfolgt in herkömmlicher Weise durch Probenahme und Analyse im Labor. Durch die zeitliche Verzögerung der Auswertung ist dieses Verfahren jedoch nicht für eine dynamische Steuerung einzusetzen. Dennoch kann hierdurch ein Bezug zu herkömmlichen Messgrößen (CSB) hergestellt werden, so dass eine Laboranalyse i.d.R. parallel erfolgt.

Alternativ zur Probenahme und den dadurch erfassten Summenparametern, wie etwa CSB oder BSB, kann zur Bestimmung der gelösten organischen Substanzen der nach DIN 38404 definierte Summenparameter spektraler Absorptionskoeffizient (SAK) herangezogen werden. Das Messprinzip nutzt die Eigenschaft einer Vielzahl organischer Verbindungen, im Abwasser elektromagnetische Strahlung im UV-Spektralbereich zu absorbieren. Über eine UV-Photometrische Zelle wird bei einer Messwellenlänge von 254 nm der spektrale Absorptionskoeffizient ermittelt. In Kapitel 3.1.2 ist angeführt, wie der SAK-Summenparameter in Relation zu den herkömmlichen Summenparametern einzuschätzen ist.

Im Abwasser sind neben den gelösten organischen Inhaltsstoffen auch partikuläre organische Stoffe enthalten. Zur Erfassung dieser Inhaltsstoffe wird bei stark wechselnden Verhältnissen des $CSB_{filtr.}/CSB_{part.}$ durch HÄCK (2001) empfohlen, eine Feststoffsonde zusätzlich zu implementieren. Mit dieser Sonde wird durch eine Streulichtmessung der Gehalt an streuenden Partikeln (Feststoffkonzentration) gemessen.

Um den Medienkontakt der Systeme auf ein Minimum zu beschränken, wurde ein Probenahmesystem der Firma Dr. Lange GmbH eingesetzt, das über Entnahmeschläuche an den Messstellen I-IV (s. Abbildung 4-3) eine Mischwassermenge ansaugt. Über ein Leitungssystem, eine Kombination aus Stahlrohren ($\varnothing$ 8mm) und flexiblen Kunststoffschläuchen ($\varnothing$ 11 mm), wurde das Probevolumen den

SAK-, respektive Feststoffmesssonden zugeleitet (vgl. Anhang II). Die entsprechenden Geräte waren extern im Betriebshaus installiert.

Die Messsignale einer SAK-Sonde und einer Feststoff-Sonde wurden gebündelt und auf einer Anzeigeeinheit (Typ: Multi Unit plus der Firma Dr. Lange GmbH) ausgegeben (vgl. Abbildung 4-2).

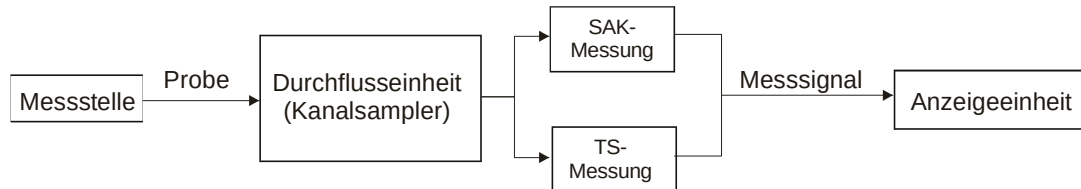


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des Probenahmesystems der Firma Dr. Lange GmbH

Am Auslass der Entnahmeschläuche waren sog. Sauganker angebracht. Diese wurden mit einem Lochband auf der Gerinnesohle befestigt (vgl. Abbildung 4-3), um ein Verrutschen oder Herausragen der Ansaugöffnungen aus dem Abwasserstrom zu verhindern.



Abbildung 4-3: Eingesetzte Sauganker der Firma Dr. Lange

Aus Abbildung 4-3 sind zwei Varianten der Sauganker ersichtlich. Die gelochte Kunststoffschiene (oben) ist ein Sauganker der Firma Dr. Lange. Über diesen Sauganker wurde das Probevolumen angesaugt, das dem Kanalsampler zugeleitet wurde. Der untere Metallanker gehört zum Probenahmesystem für die Laboranalytik, die weiter unter besprochen ist. Die dargestellte Anordnung der Entnahmeschläuche war ein Kompromiss, der sich aus der Praxis des Messstellenbetriebes ergeben hat. Bei der Interpretation der Messdaten waren daher folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

Zufluss und Strömungsverhältnisse

Im Regen- und Trockenwetterfall kann eine Probenverfälschung durch ungünstige Strömungsbedingungen verursacht werden. Dabei kann die Installation der Sauganker zum einen dazu führen, dass die Stromfäden so weit abgelenkt werden, dass kein ausreichendes Probevolumen in der Messkammer der Kanalsampler zur Verfügung steht. In einem solchen Fall wird in der Messung der zuvor ermittelte Wert erneut ausgegeben. Dieses führt in der Gangliniendarstellung der Messwerte zu sog. Messplateaus. Zum anderen sind die Abwasserinhaltsstoffe im Kanal nicht gleichmäßig verteilt. Die fehlende homogene Durchmischung führt dazu, dass bodennah transportierte Inhaltsstoffe gemessen werden.

Verzopfungen, Verstopfungen und Ablagerungen

Bei Messungen im Kanal bilden einragende Messgeräte natürliche Hindernisse im Abflussgeschehen. Transportierte Grob- und Faserstoffe belegen die Messgeräte und führen so zu einer Ergebnisverfälschung. An dem sich stetig vergrößernden Hindernis lagern sich weitere Stoffe an, bis letztlich das Gerinne verstopft ist. Aus der Abbildung 4-4 wird dieser Sachverhalt an den Messstellen I (Zulauf) und II (Ablauf) deutlich.



Abbildung 4-4: Verzopfungen an den Saugankern der Firma Dr. Lange im Zulauf (Bild links) und im Ablauf (Bild rechts)

Ferner ist ersichtlich, dass durch die Ablagerungen die Strömungsfäden zusätzlich abgelenkt werden (s.o.).

Schnittstellen im Leitungssystem wirken als Hindernis

Als Beckendurchführung wurden Edelstahlrohre gewählt, um ein Durchhängen des flexiblen Schlauchs zu vermeiden. Die Anschlüsse an die Sauganker im Gerinne bzw. die Kanalsampler im Betriebsgebäude wurden mit flexiblen Schläuchen realisiert. Die Kombination der Edelstahlrohre mit dem Ansaugschlauch ist für Verstopfungen anfällig. Zum einen lagern sich an den Anschlüssen zwischen Rohr und Schlauch Grobstoffe ab und zum anderen werden an 90°-Bögen durch die Querschnittsverengung die Partikel nicht sauber abgeleitet. Besonders wenn die Pumpenleistung zum Rückspülen der Proben durch verschmutzte Luftfilter herabgesetzt ist, können so die Sedimente nicht ordentlich und vollständig aus dem Leitungssystem entfernt werden.

Querschnitt des Leitungssystems begrenzt die Partikelverteilung

Aufgrund der gewählten Querschnitte der Ansaugsysteme werden die Partikel nur selektiv gemessen. Diese Beschränkung beeinflusst insbesondere die Feststoffmessung.

Fließweg zwischen Probenahmestelle und Auswerteeinheit

SCHEER u. SCHILLING (2003, S. 586) führten in ihrem Artikel aus, dass lange Leitungswege zur Bildung eines Biofilms sowie zur Trennung zwischen der festen und flüssigen Phase und damit zu einer Messwertverfälschung führen können.

Grobstoffablagerungen in der Messkammer der TS-Line



Abbildung 4-5: Blick in die Messkammer des Kanalsamplers an der Messstelle I

Die Abbildung 4-5 zeigt eine geöffnete Messkammer (Solitax-Sonde) eines Kanalsamplers. Aus der Konstruktion wird deutlich, dass sich beim Abfließen der Probe (im Bild abwärts) seitlich (im Bild vorn) in der Messkammer Grobstoffe ablagern können, die in der nachfolgenden Ansaugphase mit aufgewirbelt und damit erneut gemessen werden.

Erfassung der Stoffkonzentration durch Probenahme und Laboranalyse

Ziel der Erfassung der Stoffkonzentration durch eine Laboranalyse ist es, einen Bezug der online erfassten Daten (SAK und Trübung bzw. Feststoffkonzentration) zu den üblichen Summenparametern BSB, CSB und AFS herzustellen, um eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Fangbeckens „Weidenstraße“ anhand der Online-Messwerte geben zu können.

Zur automatischen Entnahme der Proben wurden an den Messstellen I (Zulauf) und II (Ablauf) stationäre Probenahmegeräte vom Typ BÜHLER 4010, sowie mobile Probenahmegeräte vom Typ MAXX TP II an den Messstellen III (Beckenüberlauf) und IV (Klärüberlauf) eingesetzt.

Schwerpunkt dieser Betrachtung war die Beschreibung des Summenparameters CSB, der nach dem Arbeitsblatt ATV A 128 (1992) den maßgeblichen Parameter zur Beurteilung von Mischwasser-Entlastungsbauwerken darstellt. HÄCK (2001, S. 54) beschreibt in seinem Artikel, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem $CSB_{ges.}$ und den Parametern SAK und TS besteht, der durch multiple lineare Regression ermittelt und durch nachfolgende Funktionsgleichung beschrieben werden kann:

$$CSB_{(SAK, TS)} [mg/l] = x \cdot SAK [1/m] + y \cdot TS [mg/l] + z \qquad \text{Gleichung 1}$$

ALTHOFF (2002) und auch GRÜNING (2002) haben in ihren Untersuchungen nachgewiesen, dass diese Korrelation nur bedingt herzustellen ist. Beide kamen zu dem Schluss, dass das Bestimmtheitsmaß der Auswertungen über einen mehrmonatigen Messbetrieb der Sonden ohne externe Wartung abnimmt.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der Ermittlung des linearen Zusammenhangs zunächst untersucht, ob eine Kohärenz zwischen den Verläufen der Einzelparameter besteht. In Abbildung 4-6 sind exemplarisch die Verläufe für die Parameter SAK, TS und $CSB_{ges.}$ eines Einzelereignisses aufgetragen.

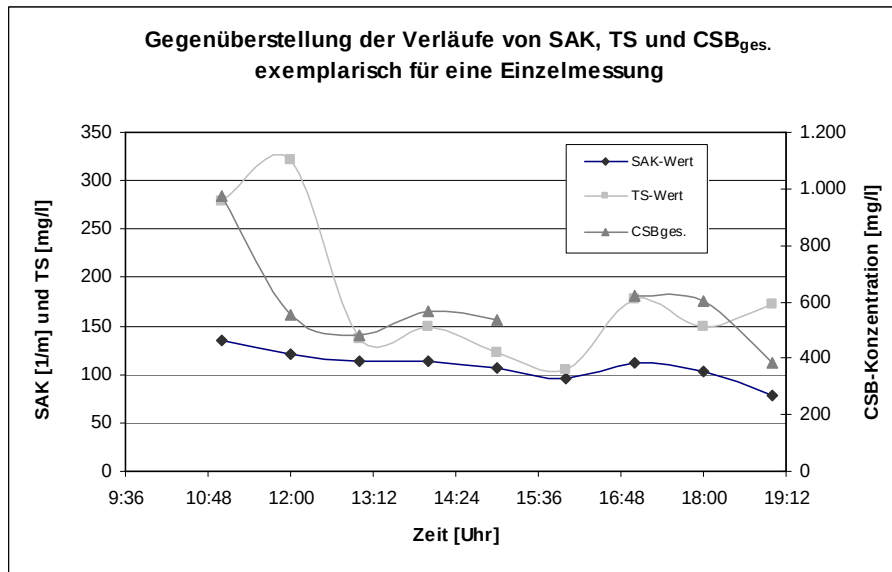


Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der Verläufe der Parameter SAK, TS und CSB_{ges.}

Aus dem Verlauf der Ganglinien wird bereits deutlich, dass sich die SAK-Konzentration analog zur CSB-Konzentration entwickelt, während die TS-Konzentration zum Teil konträr verläuft. Die in Tabelle 4-1 aufgeführten Ergebnisse der linearen Regression stellen diesen Zusammenhang in gleicher Weise dar.

Tabelle 4-1: Statistischer Zusammenhang des spektralen Absorptionskoeffizienten (SAK) und der Feststoffkonzentration (Online-Messung) zum CSB (1-h-Mischprobe)

Probenahmeort	Meßstelle I Zulauf	Meßstelle II Ablauf	Meßstelle III Beckenüberlauf	Meßstelle IV Klärüberlauf
Lineare Regression CSB_{filtriert} - SAK				
Probenumfang	70	72	38	38
R ² (CSB _{filtriert} - SAK)	0,717	0,708	0,623	0,133
Lineare Regression CSB_{ges.} - SAK				
Probenumfang	78	72	38	38
R ² (CSB _{ges.} - SAK)	0,453	0,644	0,638	0,132
Lineare Regression CSB_{partikulär} - TS				
Probenumfang	70	72	38	38
R ² (CSB _{partikulär} - TS)	0,311	0,029	0,188	0,025
Lineare Regression CSB_{ges.} - TS				
Probenumfang	78	72	38	38
R ² (CSB _{ges.} - TS)	0,310	0,030	0,285	0,056
Multiple lineare Regression CSB_{ges.} - CSB(SAK,TS)				
Probenumfang	78	72	38	38
R ² (CSB _{ges.} - CSB(SAK,TS))	0,453	0,645	0,644	0,132

Die gewonnenen Ergebnisse ließen jedoch keinen statistisch gesicherten Zusammenhang erkennen. Aus diesem Grund erfolgte eine weitere Bewertung der Leistungsfähigkeit des Fangbeckens sowie auch die Ermittlung der Stellgrößen für die frachtabhängige dynamische Steuerstrategie (s. Kapitel 6) anhand der Parameter SAK und TS.

4.3.3 Temperaturmessung

Da die Sinkgeschwindigkeit von Partikeln eine Funktion der Dichte des Fluidums und damit abhängig von der Temperatur ist, war die kontinuierliche Erfassung dieser Größe vorzusehen.

4.3.4 Regenschreiber

Der Niederschlag ist in der Siedlungshydrologie eine maßgebliche Belastungsgröße. Die Erfassung dieser Daten bietet die Möglichkeit, in einer ersten Näherung das Niederschlagsverhalten des Einzugsgebietes zu erfassen. Eine mögliche Vorhersage der Gewässerbelastung aus den ermittelten Daten ist zwar grundsätzlich möglich, jedoch im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht Gegenstand der Untersuchung.

4.3.5 Datenaufzeichnung

Die Aufzeichnung der erfassten Daten (Höhenmessung h_{ij} an den beiden Aqualyzer (Messstelle III + IV), Volumenstrommessung (MID (Messstelle II und Messstelle IV)), Temperaturmessung im Becken sowie die Erfassung von Ereignisdaten (Steuerung des Probenahmesystems über Druckmessdose oder h_{ij}) sowie Störmeldungen usw. erfolgte in der SPS. Parallel hierzu wurden die Daten mit einem Linien-schreiber aufgezeichnet.

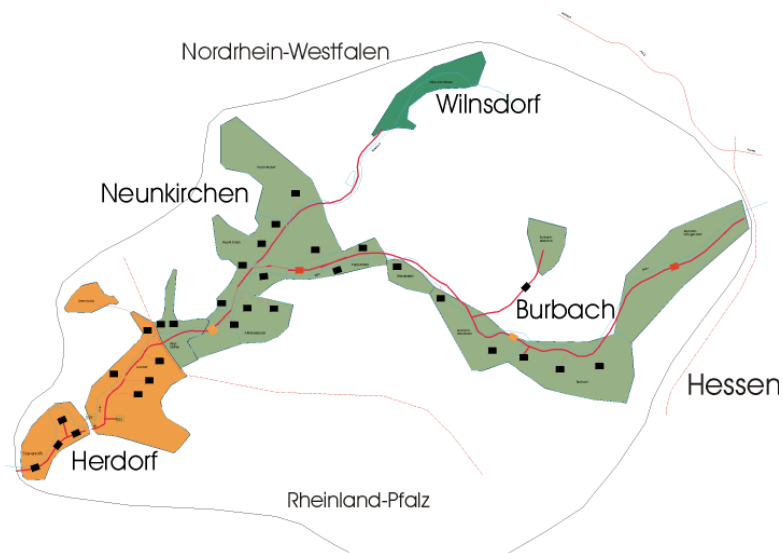
5 REFERENZZUSTAND

5.1 SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFTLICHE VORGABEN FÜR DAS FANGBECKEN „WEIDEN- STRAßE“

5.1.1 Topografische Charakteristik des Einzugsgebietes

Das zu untersuchende Fangbecken „Weidenstraße“ (RÜB B84) liegt im Einzugsgebiet der Verbandskläranlage Hellertal im Ortsteil Zeppenfeld der Gemeinde Neunkirchen.

Das gesamte Einzugsgebiet der Kläranlage liegt übergreifend in zwei Bundesländern und gliedert sich entsprechend nachfolgendem Übersichtslageplan.



Dabei liegen die Gemeinden Neunkirchen, Wilnsdorf und Burbach im Bundesland Nordrhein-Westfalen, die Stadt Herdorf im Bundesland Rheinland-Pfalz.

Entsprechend der Schmutzfrachtberechnung vom Juli 1993 ergibt sich für die Gemeinde Neunkirchen eine Verteilung der Einwohner- und Einwohnerequivalente von:

Einwohner Wohngebiet	19.207 E
Einwohnerwerte Gewerbegebiet	4.500 EGW
Summe E + EGW	23.707 E + EGW

Der Versiegelungsgrad wurde dabei für eine Gesamtfläche aus Misch- und Trenngebieten mit 572,58 ha auf 35 % A_u ha festgelegt. Auf das direkte Einzugsgebiet des zu untersuchenden Fangbeckens entfallen absolut 8,79 ha. Die Anzahl der Einwohner in dem vom Fangbecken „Weidenstraße“ zu entwässernden Gebiet ist vom Abwasserverband Hellertal mit ca. 600 Einwohnern angegeben worden.

5.1.2 Hydrologische Charakteristik des Einzugsgebietes

Verteilung der Regen- und Trockenwettertage

Zur Beurteilung der Belastungssituation des Fangbeckens „Weidenstraße“ wurde zunächst das Verhältnis der Regen- bzw. Trockenwettertage ermittelt. Die Festlegung erfolgte dabei nach RdErl. des MUNLV (1991). Die Verteilung ergab sich durch die vom StUA-Siegen zur Verfügung gestellten Tagessummenwerte der Stationen Burbach und Neunkirchen-Salchendorf und stellte sich für den Untersuchungszeitraum (April 2003 bis Oktober 2004) insgesamt wie folgt dar (eine monatsweise Auflösung der Verteilung findet sich im Anhang II):

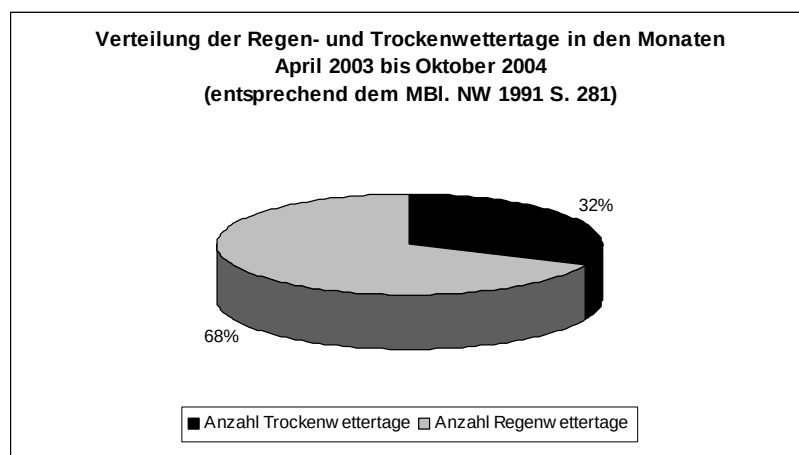


Abbildung 5-1: Prozentuale Verteilung der Regen- und Trockenwettertage im Zeitraum April 2003 - Oktober 2004

Da sich keiner dieser Regenschreiber im theoretischen Flächenschwerpunkt des Einzugsgebiets des Fangbeckens befand, aber eine annähernd reale Beurteilung der Witterungsverhältnisse gewünscht war, wurden Ende Januar 2004 (bis einschl. Juli 2004) die Niederschlagsdaten um die Messungen eines eigenen und in unmittelbarer Nähe zum Becken aufgestellten Regenschreibers erweitert. Die Kontrollmessung bestätigte in 75% der Datenaufzeichnungen die zuvor als charakteristisch angenommene Verteilung anhand der Messstationen Burbach und Neunkirchen-Salchendorf.

Niederschlagsauswertung

Grundsätzlich ermöglicht eine ermittelte Systemreaktion des Untersuchungsgebietes im Zusammenhang mit den Niederschlagsdaten in einer ersten Näherung eine Vorhersage der Gewässerbelastung durch den Stoffeintrag aus der Mischwasserbehandlung. Da jedoch im Rahmen dieses Projektes keine eingehende Untersuchung der systemischen Vernetzung anhand von N-A-Modellen erfolgte, wurde auf eine Erfassung des tageszeitlichen Verlaufs der Niederschlagshöhen verzichtet. Im Rahmen dieses Projektes wurden lediglich die Tagessummen ermittelt und ausgewertet. Das Ergebnis ist in Form einer Verteilungsgrafik der Niederschlagshöhen für den gesamten Untersuchungszeitraum nachfolgend dargestellt. Für eine monatsweise Darstellung der täglichen Niederschlagshöhen wird auf den Anhang II verwiesen.

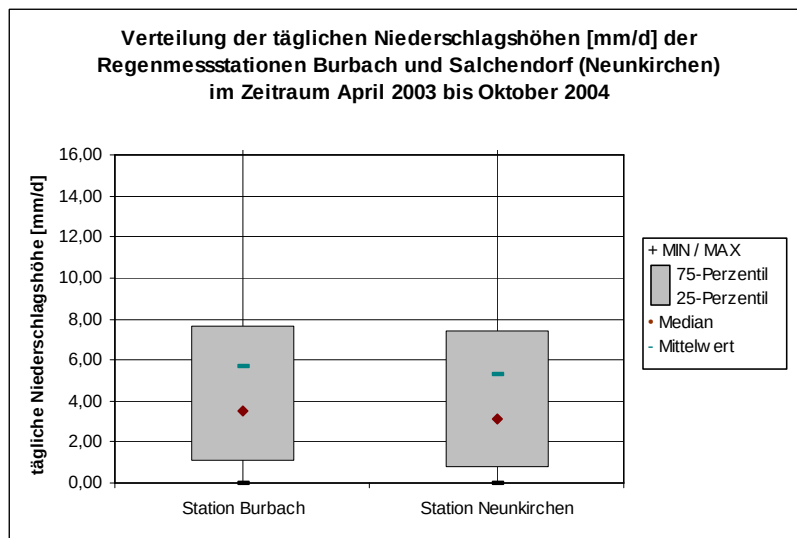


Abbildung 5-2: Verteilung der täglichen Niederschlagshöhen der Regenmessstationen Burbach und Neunkirchen-Salchendorf

In dieser Darstellung markiert der Abweichungsbalken das 25- bzw. das 75-Perzentil. Es wird deutlich, dass für die Station Burbach 75 % der Regen eine Tagessumme von 7,65 mm/d nicht überschreiten, bzw. dass für die Station Salchendorf (Neunkirchen) die Tagessumme in 75 % der Fälle kleiner oder gleich 7,40 mm/d ist.

In wenigen Fällen erreichten die Tagessummenwerte eine Höhe von 44,8 mm/d (Station Burbach) bzw. von 40,90 mm/d (Station Neunkirchen - Salchendorf).

Insgesamt lagen die Tagessummenwerte der beiden Regenmessstationen in der gleichen Größenordnung. Aufgrund der Lage zum Einzugsgebiet des Fangbeckens wurde jedoch das Hauptaugenmerk auf



Die hier dargestellte Gewässergütekarte zeigt eine kritische Belastung (Güteklasse II-III, hellgrüner Bereich) bis übermäßige Verschmutzung (Güteklasse IV, roter Bereich) für diesen Gewässerabschnitt.

5.3 BETRIEB DES BECKENS IM REFERENZZUSTAND

Die Regelung des Ablaufvolumenstroms zur Kläranlage erfolgt in einem Mess- und Drosselschacht. Dabei wird das Durchflussvolumen von einem magnetisch induktiven Durchflussmesser (MID) aufgenommen. Die Regulierung des Volumenstroms erfolgt über einen nachgeschalteten Drosselschieber mit elektrischem Stellantrieb. Wie bereits in Kapitel 4.1 allgemein erläutert, ist bei Trockenwetterzufluss eine Regulierung des Drosselschiebers nicht erforderlich, da die Drosselwassermenge 7,8 l/s unterschritten und der Zufluss somit am Becken vorbeigeführt wird.

In den ersten zwei Phasen eines Regenereignisses (Spülstoß, Anstieg der Mischwassermenge bis zum Maximum) erfolgt durch Begrenzung des Mischwasserabflusses auf 7,8 l/s ein Rückstau in das Trennbauwerk, wodurch eine Beaufschlagung des Beckens über die Überlaufschwelle erfolgt und sich der Fangteil mit dem Spülstoßvolumen füllt. Ist das Maximum des Rückhaltevolumens erreicht, wird ab einem Beckenfüllstand von 150 cmWS der Beckenüberlauf aktiviert und verdünntes Abwasser in die Heller entlastet. Nach Abklingen des Niederschlagsereignisses und Unterschreitung der Drosselwassermenge wird das restliche im Fangbecken befindliche Mischwasservolumen über die zentrische Beckenentleerung (Rohrleitung mit DN 300) in den Vorschacht zum Mess- und Drosselschacht ein-, und somit zur Kläranlage abgeleitet. Dabei wird während dieses Vorgangs das Becken über einen Wirbeljet gereinigt. Die Entleerungszeit des RÜB bei Vollfüllung beträgt dabei $t = 8,0$ h.

5.4 HYDRAULISCHE CHARAKTERISTIK DER TROCKENWETTERZUFLÜSSE

5.4.1 Hydraulische Schwankungsbreite der Trockenwetterzuflüsse

Die Auswertung der trockenwetterspezifischen Durchflussmessdaten aus der MID an Messstelle II dokumentierte für den Trockenwetterzufluss eine saisonale Beeinflussung sowie einen charakteristischen tageszeitlichen Verlauf.

So war in den niederschlagsreicheren Untersuchungsmonaten ein im Mittel höherer Trockenwetterzufluss zu verzeichnen als in Monaten mit geringem Niederschlag. Saisonal unabhängig zeigte sich der tageszeitlich typische Verlauf (von 7:30 bis 7:30 Uhr) mit einem relativen Maximum in den späteren Morgen- und den frühen Abendstunden, sowie einem Minimum in der Nacht .

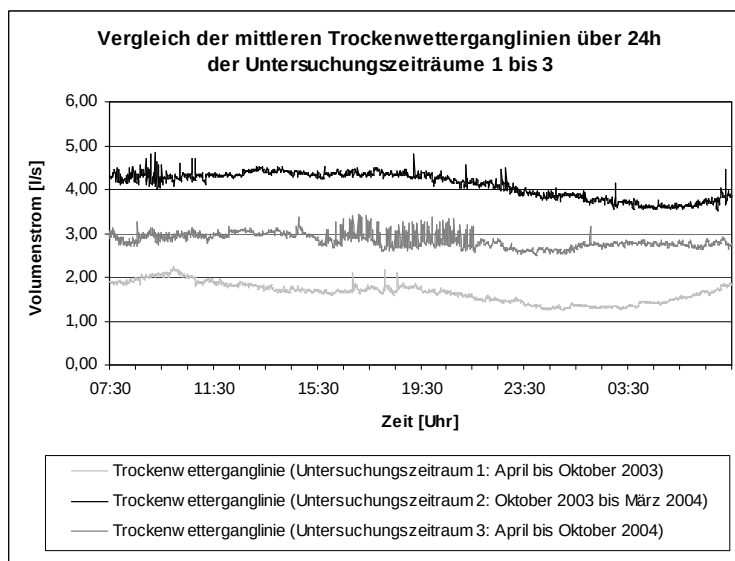


Abbildung 5-4: Vergleichende Darstellung der Trockenwetterganglinien in drei Untersuchungsabschnitten

Ein Vergleich der Trockenwetterganglinien zeigt deutlich den Einfluss der niederschlagsreicheren Untersuchungsmonate (Oktober 2003 bis Mai 2004) mit wenigen Trockenwettertagen und langen Nachlaufzeiträumen durch den Einfluss des Fremdwassers (Abbildung 5-4). Auf den Einfluss des Fremdwassers wird in Kapitel 5.4.2 noch genauer eingegangen.

Die empirische Verteilung der Trockenwetterzuflüsse für den Untersuchungszeitraum April 2003 bis Oktober 2004 in Abbildung 5-5 ergab in 75 % der Fälle einen Zufluss kleiner oder gleich 2,92 l/s und größer 1,31 l/s. Der Median des Trockenwetterzuflusses lag bei 1,86 l/s.

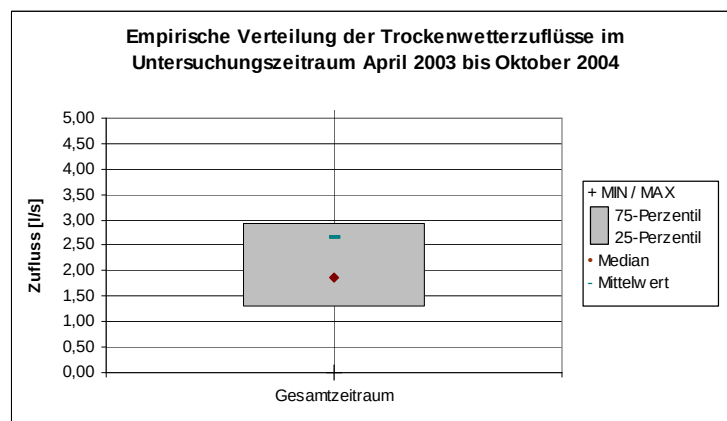


Abbildung 5-5: Verteilung der Trockenwetterzuflüsse zum Fangbecken „Weidenstraße“ im Untersuchungszeitraum (April 2003 bis Oktober 2004)

Ferner wird hier deutlich, dass an den Trockenwettertagen z.T. große (bis 7.8 l/s) Abwassermengen gemessen wurden. Ein Indiz hierfür ist der Abstand des Mittelwertes zum Median.

5.4.2 Darstellung und Beurteilung des Fremdwassereinflusses

Die Untersuchung des Fremdwasseranfalls im Einzugsgebiet des Fangbeckens wurde anhand der Trockenwetterdaten über die Methode des Nachtminimums durchgeführt. Diese Methode bietet - neben der Jahresschmutzwassermethode - trotz der unzureichenden Berücksichtigung saisonaler Schwankungen sowie der möglichen Fehlerquellen einen einfachen Ansatz zur Bestimmung des Fremdwasseranfalls und ist eine einfache Standardmethode für die Abwasserabgabeerklärung. Ein Vergleich unterschiedlicher Möglichkeiten zur Bestimmung des Fremdwasseranfalls verdeutlicht Tabelle 5-1. Dabei dienen die dort beschriebenen rein quantitativen Methoden dazu, den Anteil an Fremdwasser im Einzugsgebiet der Kläranlage auf die Teilentwässerungsgebiete zu beziehen. Auf die qualitativen Methoden wie beispielsweise Zustandsgutachten des Kanalisationsnetzes oder Auswertungen von Pegel-, Grundwasserständen und Regenschreiberdaten in Verbindung mit Abflussganglinien, wird an dieser Stelle aufgrund des Bearbeitungsumfangs der Methoden nicht weiter eingegangen.

Tabelle 5-1: Methoden der Fremdwasserermittlung

Jahresschmutzwassermethode	
Datenmaterial	Tagesabflussmengen, Wetterschlüssel, Ansatz für Schmutzwasserabfluss
Saisonaler Einfluss	Nur berücksichtigt bei einzelner Anwendung für jeden Trockenwettertag
Vorteile	Einfache Standardmethode für Abwasserabgabeerklärung
Nachteile	Nur Trockenwettertage gehen in die Ermittlung ein, willkürlicher Wetterschlüssel, unsichere Ergebnisse, latente Unterschätzung von Q_f
Methode des Nachtminimums	
Datenmaterial	Mindestens eine Nachtmessung pro Trockenwettertag eines Monats, Ansatz für nächtlichen Schmutzwasserabfluss
Saisonaler Einfluss	Nur berücksichtigt bei einzelner Anwendung für jeden Trockenwettertag
Vorteile	Einfache Standardmethode für Abwasserabgabeerklärung
Nachteile	Nur einzelne Trockenwettertage gehen in die Ermittlung ein, willkürliche Auswahl der Mess-tage, unsichere Abschätzung des nächtlichen Schmutzwasseranteils, latente Unterschät-zung von Q_f
Chemische Methode	
Datenmaterial	Mittlere und minimale Trockenwetterabflüsse sowie die jeweiligen Schmutzkonzentrationen
Saisonaler Einfluss	Nur berücksichtigt bei einzelner Anwendung für jeden Trockenwettertag und unter großem Aufwand
Vorteile	Ergänzendes Verfahren zur Verifizierung der vorgenannten Methoden
Nachteile	Sehr aufwändiges Verfahren
Methode des gleitenden Minimums	
Datenmaterial	Tagesabflussmengen, Ansatz für Schmutzwasserabfluss
Saisonaler Einfluss	Dargestellt anhand von Tageswerten für Fremdwasser und Regenwasser
Vorteile	Einfaches rechnerisches Verfahren, kein Wetterschlüssel notwendig, Berücksichtigung von Regenwettertagen und Regenwassermengen
Nachteile	Rein phänomenologisches Verfahren
Dreiecksmethode	
Datenmaterial	Tagesabflüsse, Ansatz für Schmutzwasserabfluss
Saisonaler Einfluss	Nicht berücksichtigt
Vorteile	Ansatz von Regen- und Nachlaufftagen
Nachteile	Keine Aussagen zum jahreszeitlichen Verlauf möglich, rein grafisches Verfahren

Für die Bestimmung des Fremdwasseranfalls im Entwässerungsgebiet des Fangbeckens „Weidenstraße“ anhand der Nachtmessungen wurde aus den Untersuchungsmonaten April 2003 bis Oktober 2004 je ein Trockenwettertag ausgewählt (bei einem Mindestabstand von 14 Tagen), vom jeweiligen Minimum des Nachtzuflusses in der Zeit zwischen 2:00 Uhr und 5:00 Uhr ein Nacht-Schmutzwasser-anteil von 0,3 – 1,0 l/(s • 1000 EW) abgezogen und der resultierende Fremdwasseranteil gemittelt (vgl. ATV-DVWK (2003)). Legt man den für die Schmutzfrachtberechnung prognostizierten Wert von 600 EW zugrunde, bedeutet dies für das Entwässerungsgebiet des Fangbeckens „Weidenstraße“ einen nächtlichen Schmutzwasseranteil von 0,18 – 0,6 l/s. Hieraus ergibt sich ein geschätzter Fremdwasseranteil zwischen 1,15 – 0,73 l/s, bezogen auf den mittleren minimalen Nachtzufluss von 1,33 l/s (entspricht einem Anteil von 55 – 86 %). Der laut Schmutzfrachtberechnung ermittelte Fremdwasseranteil liegt bei 0,88 l/s und korrespondiert so mit den Ergebnissen dieser Fremdwasserschätzung.

Aus Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 ist der monatliche minimale Nachtzufluss ausgewählter Trockenwettertage (für die Fremdwasserermittlung) für den Untersuchungszeitraum April 2003 bis Oktober 2004 ersichtlich.

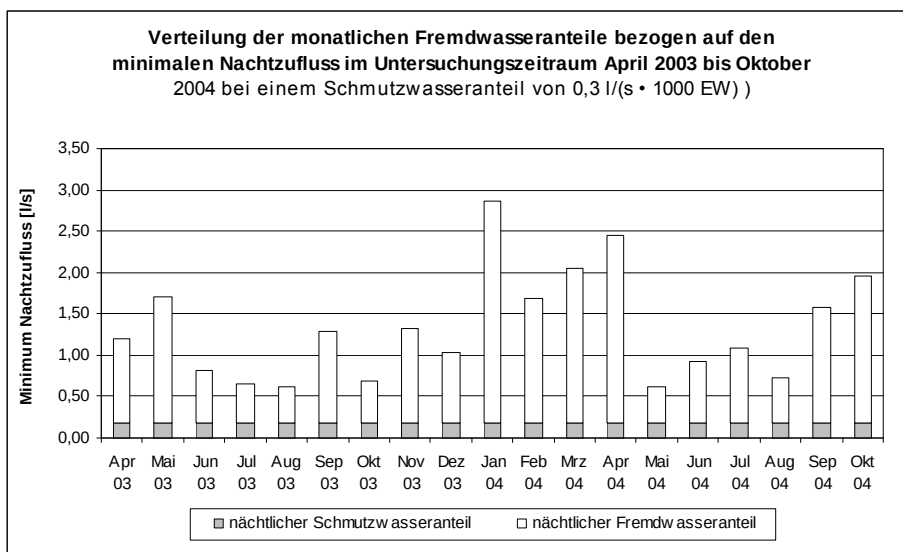


Abbildung 5-6: Verteilung der monatlichen Fremdwasseranteile bei einem Schmutzwassersockel von 0,3 l/(s • 1000 EW)

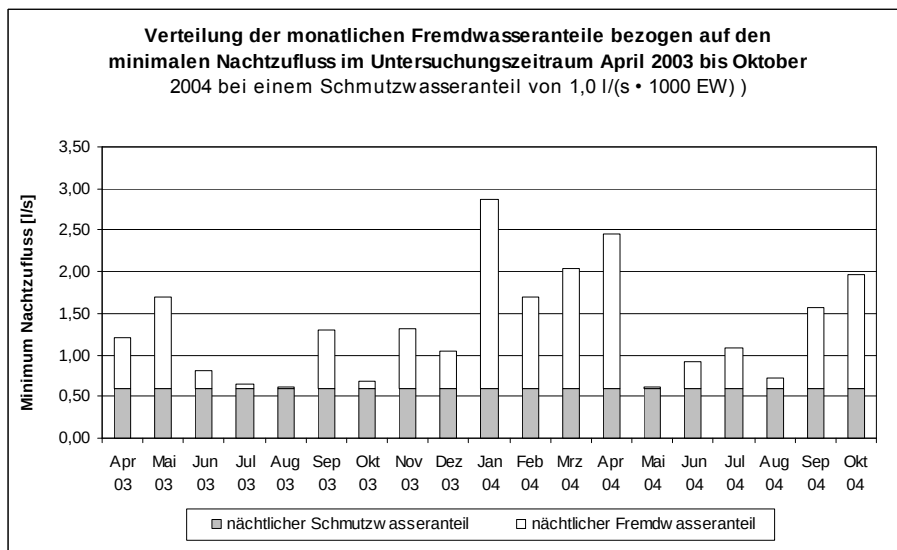


Abbildung 5-7: Verteilung der monatlichen Fremdwasseranteile bei einem Schmutzwassersockel von 1,0 l/(s · 1000 EW)

Dargestellt sind die absoluten Abflusshöhen als Summe aus dem Schmutzwasseranteil (jeweils der untere Sockel) und dem variierenden Fremdwasseranteil. Die Variationsbreite des Fremdwasseranteils über den Betrachtungszeitraum verdeutlicht den saisonalen Einfluss auf die Abflussbildung.

Eine Untersuchung der nachlaufbeeinflussten Trockenwettertage mit $Q_t \geq 7,8 \text{ l/s}$ unterstreicht diese Aussage. Aus Abbildung 5-8 geht hervor, dass die Anzahl der nachlaufbeeinflussten Trockenwettertage in den Monaten Oktober 2003 bis März 2004 z.T. deutlich höher lag, als in den anderen Untersuchungsmonaten.

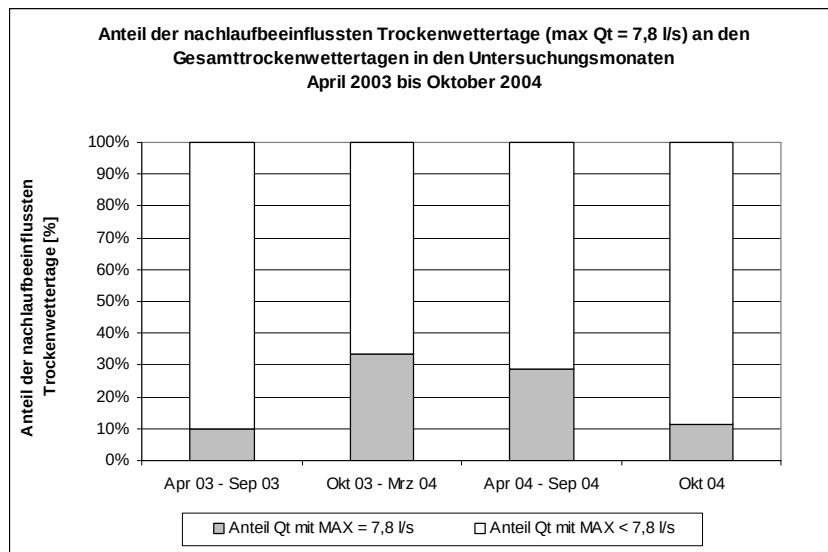


Abbildung 5-8: Prozentualer Anteil der nachlaufbeeinflussten Trockenwettertage über den Untersuchungszeitraum (April 2003 bis Oktober 2004)

Aus der Betrachtung der gemäß des RdErl. des MUNLV (1991) für den Gesamtzeitraum ermittelten 182 Trockenwettertage ließ sich in 21 % der Fälle eine Nachlaufbeeinflussung mit max. $Q_t \geq 7,8$ l/s nachweisen. Vor dem Hintergrund emissionsorientierter Betrachtung wird deutlich, dass hierdurch ein fremdwasserbelastetes Becken wie das Fangbecken „Weidenstraße“ deutlich langsamer entleert, da nachfolgende Niederschlagsereignisse häufiger auf ein noch teilgefülltes Becken treffen. Das bedeutet, dass das Rückhaltevolumen des Bauwerks deutlich kleiner ist als geplant und damit die Funktion des Spülstoßrückhalts und damit die Reinigungsleistung erheblich reduziert wird. Dadurch erhöht sich die Dauer, in der aufkonzentriertes Mischwasser in den Vorfluter entlastet wird.

Exemplarisch ist in Abbildung 5-9 die Nachlaufbeeinflussung anhand eines Vergleichs der aus den 3 Messstationen Burbach, Salchendorf, und RÜB B84 gemittelten Niederschlagsdaten und dem aufgezeichneten Drosselabfluss im Monat Februar 2004 dargestellt.

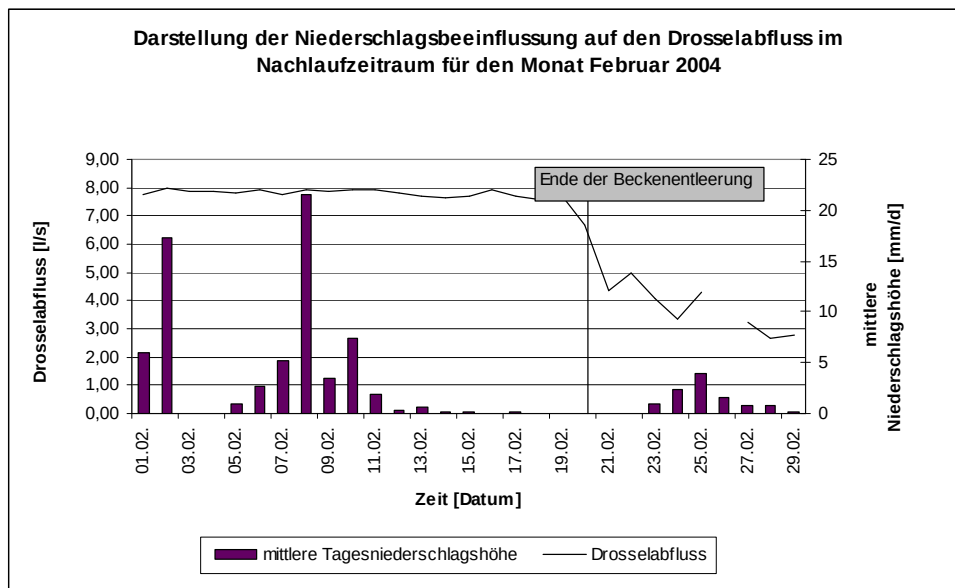


Abbildung 5-9: Darstellung der nachlaufbeeinflussten Entleerungsverzögerung am Beispiel des Drosselabflusses im Monats Februar

Die Abbildung verdeutlicht – unter Berücksichtigung der kurzen Fließzeit von $t_f \leq 15$ Minuten für das Entwässerungsgebiet des Beckens und dessen Entleerungsdauer bei Vollfüllung von $t = 8$ h – den über Tage andauernden Abfluss von über $2 Q_s + Q_f$ im Trockenwetterfall und bestätigt damit die zentrale Problematik einer nachlaufbeeinflussten Entlastung.

5.5 STOFFLICHE ZUSAMMENSETZUNG DER TROCKENWETTERZUFLÜSSE

Für die Auswertung der stofflichen Belastung im Trockenwetterfall (Referenzzustand) erfolgte anhand der Niederschlagsmessungen – unter Berücksichtigung der Vorgaben des MUNLV (1991) – zunächst eine entsprechende Aufteilung der aufgezeichneten Daten aus SAK- und TS-Analyse in trocken- und regenwetterspezifische Messdaten (s. Kapitel 5.1.2). Wie hierin bereits erwähnt, konnte eine entsprechende Zuordnung nur näherungsweise und unter Vorbehalt erfolgen, da beide Messstationen nicht direkt im Einzugsgebiet des Fangbeckens liegen. Die in Trocken- und Regenwetterdaten aufgeteilten Messdaten wurden – wie alle für eine Auswertung zur Verfügung stehenden Messdaten – abschließend einer Plausibilitätsprüfung unterzogen, um unplausible Werte wie Null- oder Negativwerte sowie Datenplateaus (festgelegt als Messwertkonstanz für eine Dauer von ≥ 120 Minuten) von der Auswertung auszuschließen.

Die Auswertung der Trockenwetterkonzentrationen SAK und TS ergab einen - über den gesamten Untersuchungszeitraum April 2003 bis Oktober 2004 betrachtet - homogenen und nahezu identischen tageszeitlichen Verlauf zwischen den Messstellen I und II (Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11). Analog

hierzu zeigte sich, trotz zeitweiliger Beeinflussung durch fremdwasserbedingte Nachlaufzeiträume, der Verlauf der Trockenwetterfrachten.

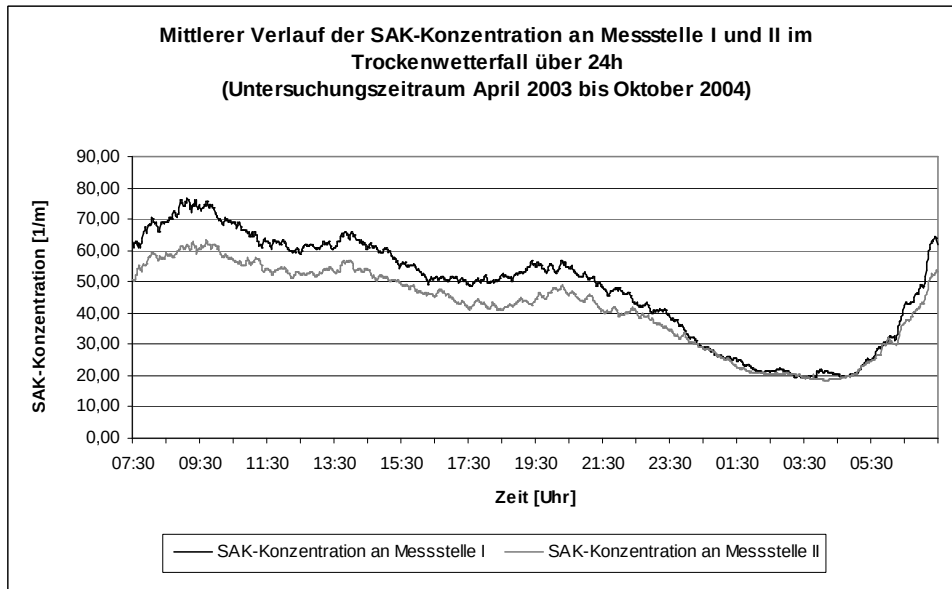


Abbildung 5-10: Verlauf der gemittelten Trockenwetterkonzentration des Parameters SAK über die Dauer von 24 h

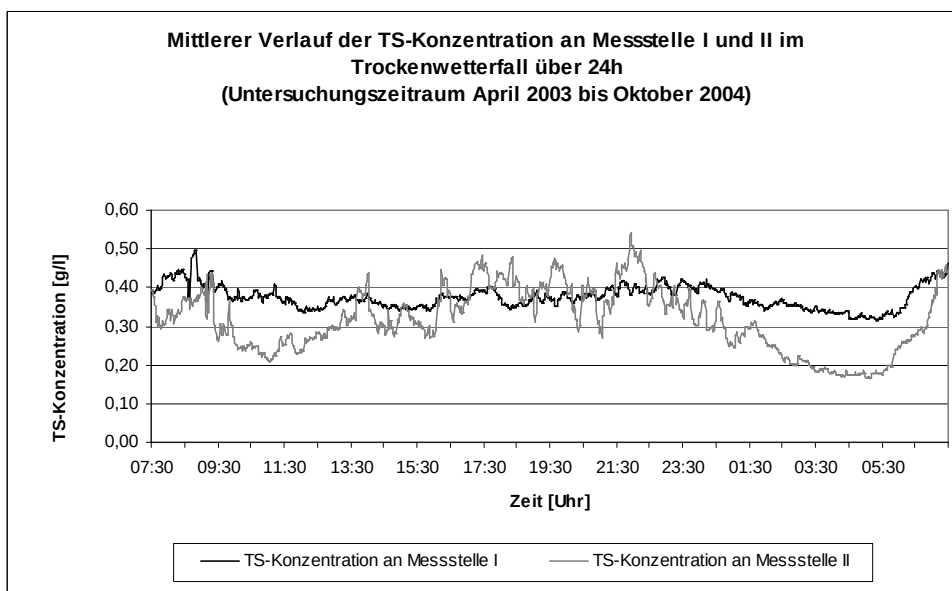


Abbildung 5-11: Verlauf der gemittelten Trockenwetterkonzentration des Parameters TS über die Dauer von 24 h

Für die TS-Messung ist der Verlauf der Konzentrationen im direkten Vergleich der Messstellen I und II deutlich weniger kongruent als der SAK-Messwert-Verlauf. Dies kann u.a. an den im Trockenwetterabfluss an Messstelle II erfassten Entleerungsstößen (Konzentrationspitze im Zulauf zur Kläranlage bei Beckenentleerung) liegen. Ferner zeigen sich hier die systembedingten Messwertbeeinflussungen, wie sie in Kapitel 4.3.2 bereits beschrieben wurden.

5.6 DYNAMIK DER MISCHWASSERENTLASTUNG – MESSDATEN DES IST-ZUSTANDES AN REGENWETTERTAGEN

Aus einem Datensatz von 394 Regenwettertagen erfolgte die Auswertung der hydraulischen und stofflichen Eigenschaften des Mischwasserabflusses bei Beaufschlagung und Entlastung des Fangbeckens „Weidenstraße“ im Referenzbetrieb. Analog zur Auswertung der trockenwetterspezifischen Messdaten wurden die Daten auf Plausibilität geprüft. Die Ergebnisse der Auswertung sollen im Folgenden näher erläutert werden.

5.6.1 Erläuterung der hydraulischen Verlaufsscharakteristik (unabhängig von der gewählten Steuerungsvariante)

Die Untersuchung der Füllstandsverlaufskurven ergab eine Charakteristik der Beckenbeaufschlagung und -entlastung, die unabhängig von einem Betrieb des Fangbeckens mit oder ohne dynamische Steuerung ist. Lediglich die zeitliche Ausdehnung des Verlaufs der Überfallhöhen an Messstelle III und IV differierte. In Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13 sind zwei Monatsganglinien dargestellt. Erstere zeigt einen typischen Füllstandsverlauf im ungesteuerten Zustand, die zweite Abbildung die Füllstandskurve im gesteuerten Zustand.

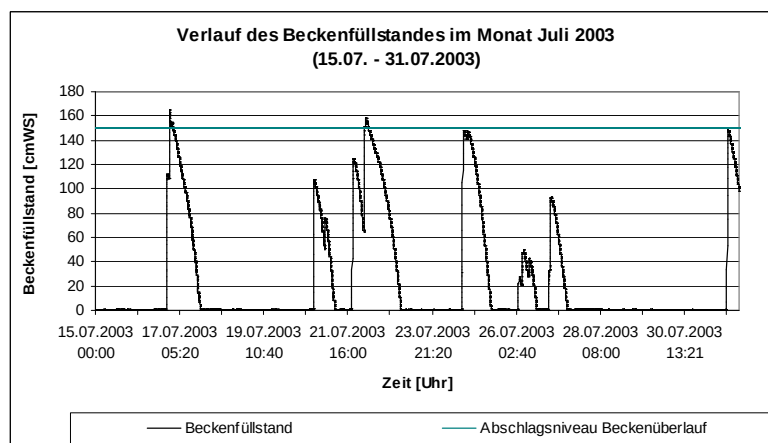


Abbildung 5-12: Monatsganglinie des Beckenfüllstandsverlaufs im Monat Juli 2003 als Systemreaktion auf einzelne Starkregenereignisse

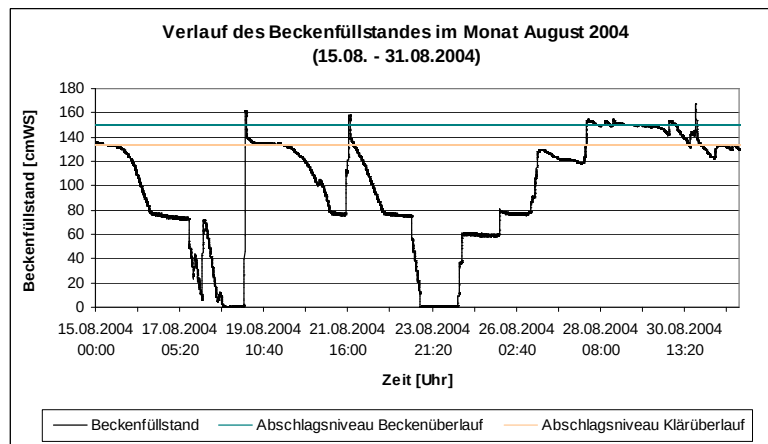


Abbildung 5-13: Monatsganglinie des Beckenfüllstandsverlaufs im Monat August 2004 als Systemreaktion auf einzelne Regenereignisse in kurzer Abfolge

So konnte der Verlauf der Beckenbeaufschlagung und -entlastung in 3 grundlegende Kategorien eingeteilt werden:

- **Kategorie 1:**

Bei vollständig unbeaufschlagtem Fangbecken steigt der Füllstand infolge eines Niederschlagsereignisses bis zur Entlastung am aktiven Überlauf an. Nach Erreichen des Entlastungsmaximums sinkt der Füllstand wieder kontinuierlich bis zur vollständigen Entleerung des Beckens. Diese Charakteristik war typisch für die Starkregenereignisse in den Sommermonaten.

- **Kategorie 2:**

Bei vollständig unbeaufschlagtem Fangbecken steigt der Füllstand infolge eines Niederschlagsereignisses bis zur Entlastung am aktiven Überlauf an. Nach Erreichen des Entlastungsmaximums sinkt der Füllstand bis zu einem Niveau unterhalb des Überlaufs. Durch ein nachfolgendes Niederschlagsereignis steigt der Füllstand wieder über das Abschlagsniveau am aktiven Überlauf an. Damit ergeben sich für ein Einstauereignis mehrere Abschlagsereignisse. Dieses Verhalten war charakteristisch für den Übergangszeitraum zwischen der Trockenwetter- und der Regenwetterphase.

- **Kategorie 3:**

Bei vollständig unbeaufschlagtem Fangbecken steigt der Füllstand infolge eines Niederschlagsereignisses bis zur Entlastung am Beckenüberlauf an. Nach Erreichen des Entlastungsmaximums sinkt der Füllstand ab, verbleibt jedoch oberhalb des Abschlagsniveaus. Durch ein nachfolgendes

Niederschlagsereignisses steigt der Füllstand erneut an (Überlagerungseffekt). Dieser Verlauf war charakteristisch für die regenreichen Monate.

Diese Verlaufscharakteristiken sind für die nachfolgend beschriebenen dynamischen Steuerungskonzepte und deren Aktivierungs- und Deaktivierungsbedingungen für den Klärüberlauf maßgebend.

Die Untersuchung der Beckenbeaufschlagungen und -entlastungen ergab für den Referenzzeitraum ohne dynamische Steuerung (April bis September 2003) eine Anzahl von 31 Beckenbeaufschlagungen mit 8 Entlastungsereignissen. Dabei wurden am Beckenüberlauf insgesamt etwa 1.500 m³ Mischwasser in den Vorfluter „Heller“ entlastet. Die Anzahl der Beckenbeaufschlagungen im Vergleich zu den Entlastungsereignissen ist in nachfolgender Grafik aufbereitet.

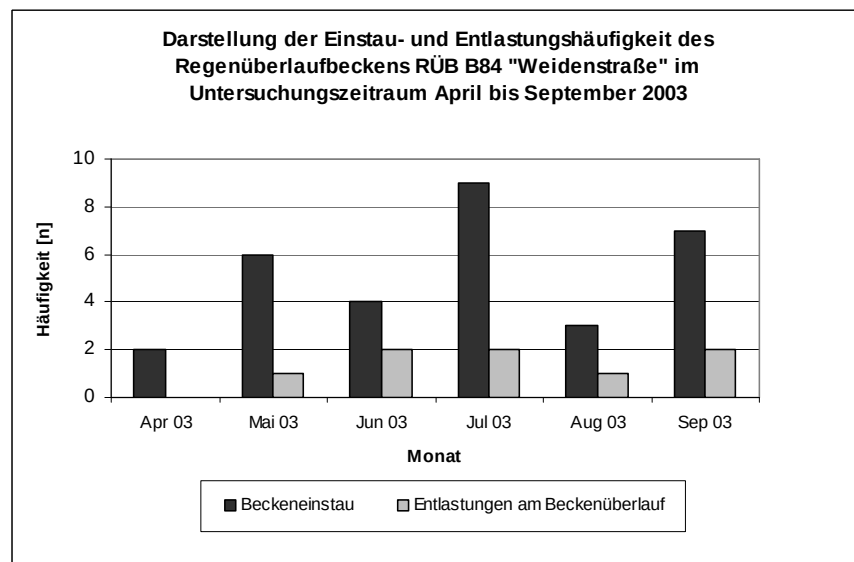


Abbildung 5-14: Häufigkeit der Beckenbeaufschlagungen im Vergleich zu den Entlastungshäufigkeiten am Beckenüberlauf im Referenzzeitraum

5.6.2 Erläuterung der stofflichen Verlaufscharakteristika

Die Betrachtung der stofflichen Charakteristiken an **Messstelle I und II** im Verlauf eines Niederschlags- bzw. Entlastungsereignisses dokumentierten die für die Dauer der Beckenbeaufschlagung infolge eines N-A-Prozesses typischen Belastungsphasen „Abflusssteigerung mit Spülstoß“, „Verdünnung“ und „Beckenentleerung mit Entleerungsstoß“. Exemplarisch sei dieser Verlauf anhand der TS-Konzentrationen im Zusammenhang mit dem Füllstandsverlauf durch das Einstauereignis vom 19.03.-28.03.2004 dargestellt (Abbildung 5-15). Das abgebildete Ereignis zeigt dabei den Verlauf einer Beckenbeaufschlagung unter dynamischer Optimierung der Mischwasserentlastung, welche jedoch keinen Einfluss auf die vor-

liegenden Konzentrationsverläufe darstellt und somit für eine Referenzbetrachtung herangezogen werden konnte.

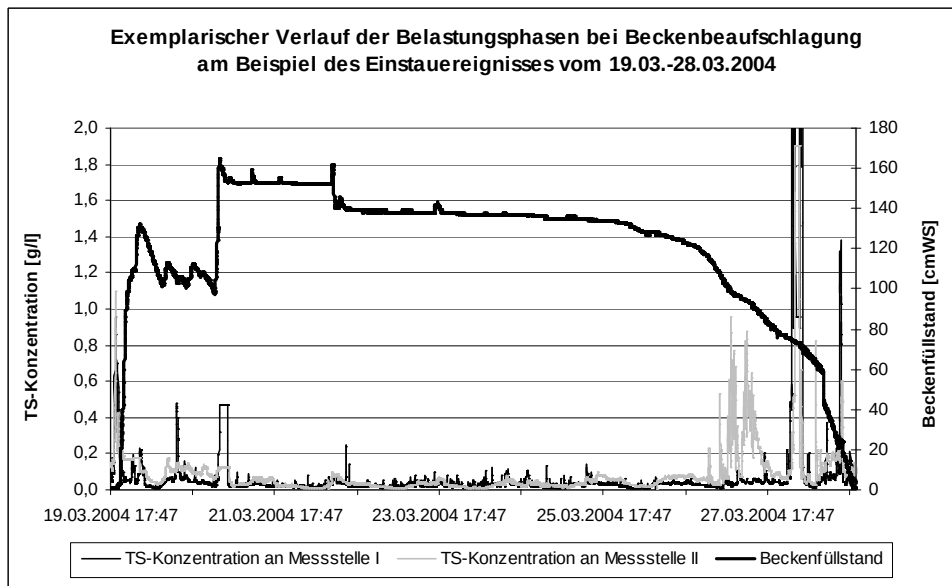


Abbildung 5-15: Feststofffracht gemessen am Systemzufluss im Vergleich zum Ablauf zur Kläranlage über die Dauer eines Einstauereignisses

Zu Beginn der Beckenbeaufschlagung zeigte sich ein Anstieg der TS-Konzentrationen vor Erreichen der Drosselwassermenge. Dies könnte auf den für ein N-A-Ereignis zu erwartenden Spülstoß hinweisen. Nach Beaufschlagung des Beckens sinkt in der darauffolgenden Verdünnungsphase das Konzentrationsniveau merklich ab. Bei der Entleerung des Beckens erfolgt an Messstelle II ein erneuter Anstieg der TS-Konzentration, da die im Becken sedimentierten partikulären Abwasserinhaltsstoffe in den Ablauf zur Kläranlage eingeleitet werden (Entleerungsstoß). Ein Anstieg der Konzentration an Messstelle I kann vermutlich auf eine Rückverlagerung in das Trennbauwerk zurückgeführt werden.

Die Betrachtung der Konzentrationsverhältnisse an **Messstelle III** über die Dauer der ungesteuerten Mischwasserentlastung konnte aufgrund unzureichender Messdaten für die Projektphase 1 (Referenzzeitraum) nur anhand von Messdaten aus den Projektphasen 2 und 3 mit dynamisch optimiertem Steuerungsbetrieb erfolgen. So ergab eine Untersuchung der generellen Konzentrationsverhältnisse an Messstelle III für den Untersuchungszeitraum Oktober 2003 bis Oktober 2004 folgende Konzentrationsverteilung (Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17).

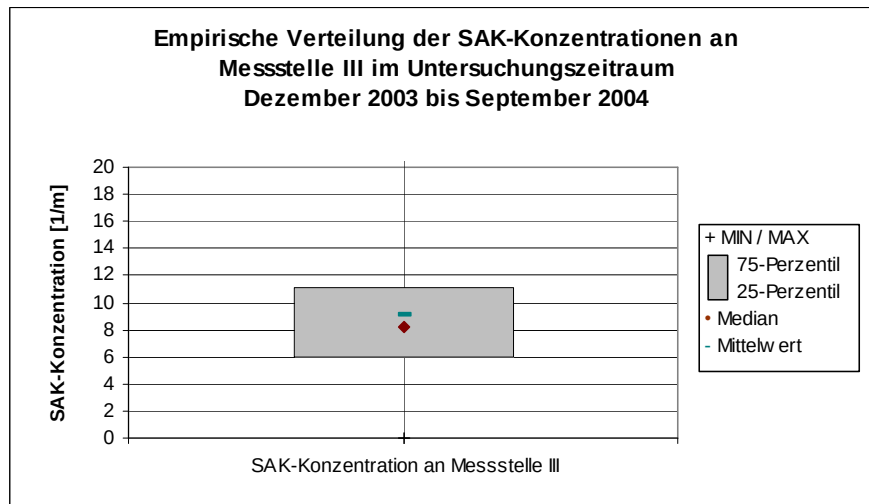


Abbildung 5-16: Verteilung der SAK-Konzentration im Entlastungsabfluss am Beckenüberlauf (Messstelle III) im Zeitraum (Dezember 2003 bis September 2004)

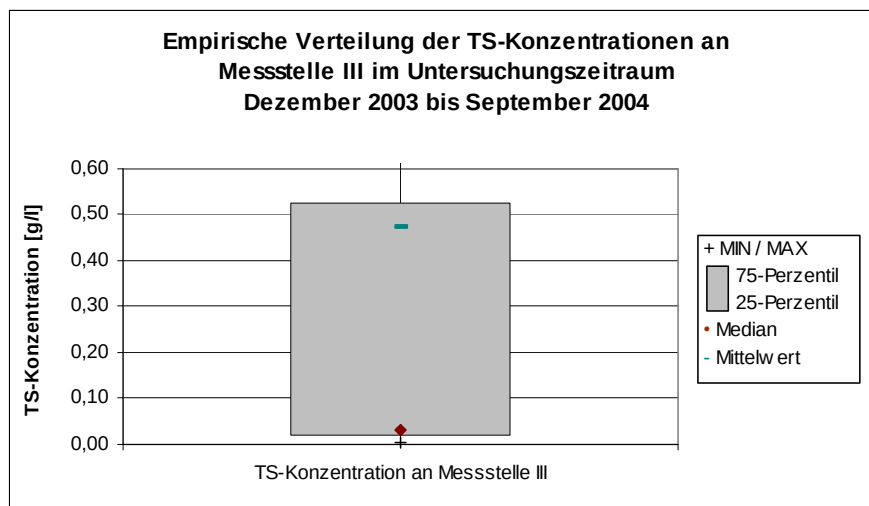


Abbildung 5-17: Verteilung der Feststoffkonzentration im Entlastungsabfluss am Beckenüberlauf (Messstelle III) im Zeitraum (Dezember 2003 bis September 2004)

Hier wird insbesondere der große Streubereich der partikulären Mischwasserkonzentrationen im Vergleich zu den SAK-Konzentrationen deutlich. Die Abweichung zwischen Mittelwert und Median zeigt deutlich den Einfluss der Extremwerte in der Messung der TS-Konzentration. Diese Streubreite ist typisch für die TS-Konzentration an Messstelle III und illustriert die hohe Dynamik im Trennbauwerk. Auf die Konzentrationsverläufe im Unterschied zu Messstelle IV und deren Bedeutung für die dynamisch optimierte Mischwasserentlastung wird im Kapitel 6 näher eingegangen.

6 ENTWICKLUNG DREIER STEUERUNGSVARIANTEN AUF DER GRUNDLAGE DER IST-ZUSTAND-ERFASSUNG

In der Phase 2 des Projektes konnte nach Abschluss der IST-Zustandsaufnahme (Untersuchungszeitraum April bis September 2003) die Erprobung unterschiedlicher Steuerungsstrategien zur optimierten Mischwasserentlastung auf hydraulischer und stofflicher Grundlage im Praxisbetrieb erfolgen. Die Steuerungskonzepte wurden dabei in Form eines Programms in der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) hinterlegt. Die Fließdiagramme der einzelnen Steuerungsvarianten sind in Anhang I grafisch aufbereitet.

Die Auswertungsergebnisse führten bereits im laufenden Steuerungsbetrieb zu einer Modifikation der bisher angestrebten Steuerungsvarianten:

- **volumetrische Steuerungsstrategie,**
- **konzentrationsabhängige Steuerungsstrategie,**
- **frachtabhängige Steuerungsstrategie.**

Nachfolgend sollen die entwickelten Steuerungsvarianten näher erläutert werden. Das frachtabhängige Steuerungskonzept wurde dabei zugunsten eines kombinierten Steuerungsansatzes verworfen. Eine Darstellung der programmtechnischen Ablaufschemata mit allen Steuerungsvariablen und Aktivierungskonditionen ist dem Anhang I zu entnehmen. Die angesprochenen Messstellen wurden bereits in Kapitel 4.1 erläutert. Eine detaillierte Messstellenbeschreibung findet sich im Anhang II dieses Berichts.

Grundvoraussetzung aller Strategien war dabei eine minimale Aufenthaltszeit im Fangbecken von einer Stunde. Nach dieser Zeit war davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil der partikulären Abwasserinhaltsstoffe aus dem sog. Spülstoß im Fangteil sedimentiert war, so dass am Klärüberlauf im Gegensatz zum Beckenüberlauf ein mechanisch vorgereinigter Mischwasservolumenstrom innerhalb des Nachlaufzeitraums eines N-A-Ereignisses in den Vorfluter entlastet wurde. Die entwickelten Steuerungsstrategien unterscheiden sich in den anschließenden additiv verknüpften Aktivierungs- bzw. alternativ verknüpften Deaktivierungsbedingungen. Die minimale Aufenthaltszeit (1h) wurde dabei anhand der Dauer $h_{KÜ} > 0$ der Ultraschall-Höhenmessung an Messstelle IV ermittelt.

6.1 DIE VOLUMETRISCHE STEUERUNGSSTRATEGIE

Konzeption

Die Aufenthaltszeit von 60 Minuten im Becken war Grundvoraussetzung für die volumetrische Steuerungsstrategie. Unter der Annahme, dass sich der Konzentrationsverlauf für alle Ereignisse gleichartig

einstellt und der Sedimentationsprozess im Becken weitgehend abgeschlossen ist, wurde unter Aufrechterhaltung dieser Aufenthaltszeit der Klärüberlauf aktiviert. Die Aufenthaltszeit war eingehalten, wenn der Zufluss zum Becken auf 74 l/s (Fall 1) begrenzt wurde. Sie errechnete sich aus folgender Gleichung

$$\text{Aufenthaltszeit } t_A = \frac{\text{Rückhaltevolumen [m}^3\text{]}}{\text{Entlastungsvolumen [l/s]} \cdot 3,6} \text{ [h]} \quad \text{Gleichung 2}$$

Für den Versuchsbetrieb wurde zusätzlich der Zufluss auf 41 l/s (Fall 2) reduziert (entspricht einer zweistündigen Aufenthaltszeit) um evtl. die Sedimentationsleistung zu erhöhen.

In beiden Fällen errechnet sich der Zuflussvolumenstrom (Q_{zu}) aus dem ermittelten Entlastungsvolumen ($Q_{aü}$) auf der Grundlage der Aqualyzerstützpunktkurve (s. Kapitel 4.3.1) und dem gemessenen Abflussvolumen (Q_{ab}) aus:

$$Q_{zu} = Q_{ab} + \Sigma Q_{aü} \text{ [l/s]} \quad \text{Gleichung 3}$$

Bei einem als konstant angenommenen Drosselabfluss von 7,8 l/s ergab sich der Entlastungsvolumenstrom $Q_{aü}$ zu 66 bzw. 33 l/s. Dies entspricht einer Überfallhöhe am Beckenüberlauf (Aqualyzer) von 115 bzw. 85 mm.

Umsetzung im Praxisbetrieb

Die volumetrische Steuerungsstrategie orientiert sich an dem charakteristischen Verlauf der Abflusshöhe im Zulauf. Dieser entsprach der aus der Hydrologie bekannten Niederschlagsabflusskurve mit einem schnellen Anstieg des Zuflusses bis zum Maximum und einem relativ dazu flach abfallenden Zuflussvolumenstrom bis zum normalen Trockenwetterzufluss (Abbildung 6-1).

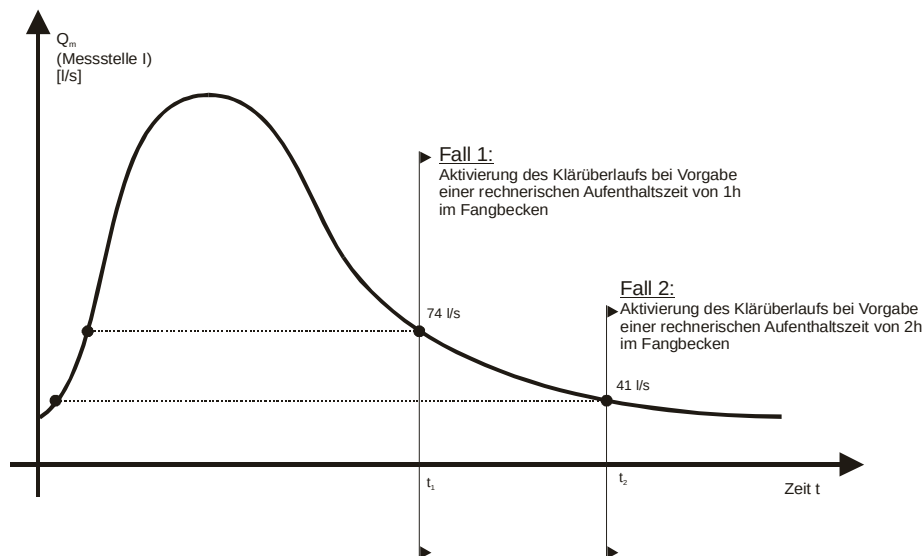


Abbildung 6-1: Darstellung der Abflussbildung im Zulauf zum Fangbecken „Weidenstraße“ als Grundlage der Ermittlung der Stellgrößen zur Aktivierung des Klärüberlaufs

Voraussetzung für die Aktivierung des Klärüberlaufs war das Durchschreiten von $Q_{Zu} = 74$ oder 41 l/s in der Nachlaufphase eines N-A-Prozesses, d.h. diese hydraulischen Steuerungsparameter mussten aus Richtung eines Maximums durchlaufen werden ($Q_{Zu-1} > Q_{Zu} > Q_{Zu+1}$).

Wie aus Abbildung 6-1 ersichtlich, wird zu Beginn eines N-A-Prozesses der hydraulische Steuerungsparameter aus Richtung eines Minimums durchlaufen ($Q_{Zu-1} < Q_{Zu} < Q_{Zu+1}$). Ein erneutes Durchlaufen des hydraulischen Steuerungsparameters aus Richtung eines Minimums während des Steuerungsbetriebes war eine Voraussetzung für die Deaktivierung des Klärüberlaufs. Eine alternative Deaktivierungsbedingung war das Absinken des Beckenfüllstands auf das Niveau $h_{Becken} < 134$ cm (entspricht $h_{Kü} = 0$ mm).

6.2 DER KONZENTRATIONSABHÄNGIGE STEUERUNGSANSATZ

Konzeption

Da der Stoffeintrag in das Gewässer bei gleichem Mischwasservolumenstrom unterschiedliche Schmutzstoffkonzentrationen aufweisen kann, wurde neben einer hydraulischen auch eine stoffliche Steuerungsstrategie entwickelt. Die Steuerungsvariable sollte also neben der minimalen Aufenthaltszeit die Konzentration des CSB aus der Gleichung 1 (s. Kapitel 4.3.2) sein.

Da ein Zusammenhang der online gemessenen Parameter SAK und TS mit dem CSB nicht eindeutig hergestellt werden konnte (s. Kapitel 4.3.2), wurden die Parameter SAK und TS als Indikatoren ange-

setzt. Die Gleichung 1 wurde auf eine allgemeine Konzentrationsfunktion für den aktiven Überlauf ($C_{a\ddot{u}}$ (SAK,TS)) reduziert. Diese lautet:

$$C_{a\ddot{u}}(\text{SAK,TS}) = x \cdot \text{SAK} [1/\text{m}] + y \cdot \text{TS} [\text{mg/l}] \quad \text{Gleichung 4}$$

mit x und $y = \text{const.}$ (Die Wertigkeit konnte frei gewählt und eingestellt werden.).

Umsetzung im Praxisbetrieb

Grundvoraussetzung für die Aktivierung der Steuerung war wie bei allen Steuerungsvarianten die einstündige Aufenthaltszeit im Becken. Nach der Aktivierung erfolgte im Unterschied zum kombinierten Ansatz (s.u.) eine Prüfung der Aufrechterhaltung des Steuerungsbetriebes ausschließlich anhand des Konzentrationsvergleichs an Messstelle III (Bü) bzw. Messstelle IV (Kü). Die Deaktivierung des Klärüberlaufs erfolgte bei Änderung des Konzentrationsverhältnisses ($C_{B\ddot{u}} < C_{K\ddot{u}}$) für $\Delta t > 3$ Minuten (entspricht einem Probenahmeintervall der Messsonden) oder dem Absinken des Beckenfüllstandes auf $h_{\text{Becken}} < 134$ cm.

6.3 DER KOMBINIERTE STEUERUNGSANSATZ

Konzeption

Als weiteres stoffliches Konzept wurde neben der konzentrationsabhängigen Steuerung auch eine frachtabhängige Steuerungsstrategie diskutiert. Aufgrund der Erkenntnisse der Phase 2 (Entwicklung und Erprobung möglicher Steuerstrategien nach dem Verfahren des Entlastungsoptimierung) wurde dieser Ansatz jedoch verworfen. Alternativ wurde eine Kombination aus hydraulischen und stofflichen Steuerungsparametern entwickelt. Dieser kombinierte Steuerungsansatz berücksichtigt neben dem Minimum der Aufenthaltszeit (1 h) den Zulaufvolumenstrom von $Q_{zu} = 74$ bzw. 41 l/s (s. volumetrische Steuerung) und die Konzentrationsberechnung auf der Grundlage der Gleichung 4.

Umsetzung im Praxisbetrieb

Nach der Aktivierung erfolgte eine Prüfung der Aufrechterhaltung des Steuerungsbetriebes anhand des Konzentrationsvergleichs an Messstelle III (Bü) bzw. Messstelle IV (Kü) in Kombination mit der Aufenthaltszeit. Die Deaktivierung des Klärüberlaufs erfolgte bei Änderung des Konzentrationsverhältnisses ($C_{B\ddot{u}} < C_{K\ddot{u}}$) für $\Delta t > 3$ Minuten (entspricht einem Probenahmeintervall der Messsonden), dem Ansteigen des Zulaufvolumenstroms über den Steuerungsgrenzwert infolge eines Überlagerungsereignisses oder dem Absinken des Beckenfüllstandes auf $h_{\text{Becken}} < 134$ cm.

7 DARSTELLUNG UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE AUS DYNAMISCHEM STEUERUNGSBETRIEB

Eine vollständige Aufstellung der Auswertungsgrafiken aller dynamisch gesteuerten Ereignisse (volumetrisch, konzentrationsabhängig und kombiniert) ist dem Anhang II zu entnehmen.

7.1 DYNAMIK DES MISCHWASSERABFLUSSES IN DEN PROJEKTPHASEN 2 UND 3

7.1.1 Häufigkeit niederschlagsbedingter Einstau- und Entlastungsereignisse

Im Anschluss an die Projektphase 1 - Aufnahme des Referenzzustandes - folgte ab Oktober 2003 die Erprobung (Phase 2) und Langzeituntersuchung (Phase 3) der dynamischen Steuerungen für das Fangbecken „Weidenstraße“. Aufgrund der in Kapitel 5.1.2 erläuterten hydrologischen Randbedingungen des Versuchsbetriebes kam es zu 42 Beckenbeaufschlagungen. Dabei konnten 38 Entlastungen am Beckenüberlauf und durch Anwendung der dynamischen Steuerungsstrategie auf hydraulischer und stofflicher Grundlage insgesamt 22 Entlastungen am künstlichen Klärüberlauf aufgezeichnet werden. Abbildung 7-1 zeigt die Einstau- und Entlastungshäufigkeiten in den Projektphasen 2 und 3.

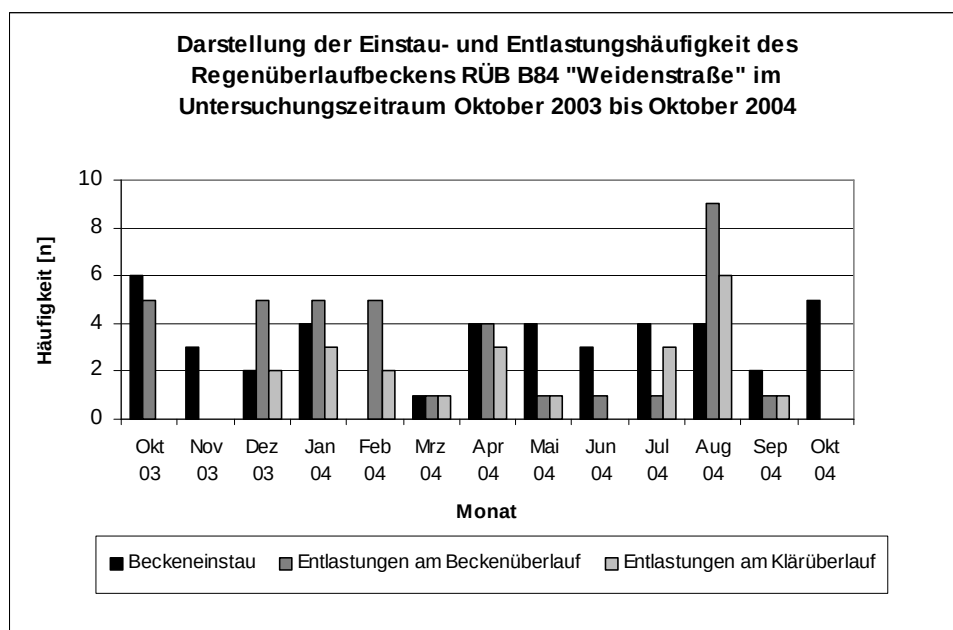


Abbildung 7-1: Häufigkeit der Beckenbeaufschlagungen im Vergleich zu den Entlastungshäufigkeiten am Becken- bzw. Klärüberlauf in den Projektphasen 2 und 3

7.1.2 Hydraulische Verlaufscharakteristik der dynamisch optimierten Mischwasserentlastung als Grundlage der Beckensteuerung

Ermittlung der Zulaufwassermenge in den Entlastungsphasen

Die Zulaufwassermenge zum Fangbecken ermittelte sich für die Dauer einer dynamisch optimierten Mischwasserentlastung in 4 Phasen:

- **Phase 1:**

Aktivierung des Beckenüberlaufs infolge eines Niederschlagsereignisses. Nach Erreichen des N-A-Maximums sinkt Q_{Zu} im Nachlaufzeitraum auf den als Regelgröße eingestellten Zuflussvolumenstrom ab (hier 74 oder 41 l/s). Der Zulaufvolumenstrom berechnete sich nach Gleichung 3 (s. Kapitel 6.1) zu

$$Q_{Zu} = Q_{ab} + Q_{Bü} \quad [l/s]$$

- **Phase 2:**

Steuerungsbedingte Aktivierung des Klärüberlaufs bei gleichzeitiger Reduktion der Wassermengen bis zur vollständigen Deaktivierung des Beckenüberlaufs. Der Zulaufvolumenstrom berechnete sich zu

$$Q_{Zu} = Q_{ab} + Q_{Bü} + Q_{Kü} \quad [l/s]$$

- **Phase 3:**

Nach vollständiger Deaktivierung des Beckenüberlaufs sank der Wasserstand im Becken ab, bis $Q_{Kü, \text{ nach Aktivierung}} = Q_{Bü, \text{ vor Aktivierung}}$. Das System befand sich am Ende der Phase 3 im Gleichgewichtszustand, d.h. es floss ebensoviel Abwasser an den aktiven Systemauslässen ab, wie dem Becken zugeführt wurde. Der Zulaufvolumenstrom Q_{Zu} berechnete sich zu

$$Q_{Zu} = Q_{ab} + Q_{Kü} \quad [l/s]$$

Aufgrund der nachfolgend aufgezeigten Bedeutung für die Auswertung der Schmutzfrachten werden Phasen 2 und 3 kurz als **Übergangszeitraum** bezeichnet.

- **Phase 4:**

Entlastung am Klärüberlauf bis zur Deaktivierung durch Ende des Nachlaufzeitraumes und damit des N-A-Prozesses oder steuerungsbedingt durch erneutes Ansteigen des Beckenfüllstandes bei Überlagerungsniederschlägen bis zum Niveau von Phase 1.

Besonderheiten der Volumenstromentwicklung in den Phasen 2 und 3 eines Entlastungsereignisses (Übergangszeitraum)

Der Übergangszeitraum, als Zeitabschnitt zwischen der Aktivierung des Klärüberlaufs und dem hydraulischen Gleichgewichtszustand aus Abfluss- und Zuflussvolumenstrom (Beginn der Phase 2 bis zum Ende der Phase 3), war die kritische Phase im Abflussverhalten des Beckens. Die Dauer des Übergangszeitraums konnte unabhängig von der gewählten Steuerungsvariante wechselnde zeitliche Ausprägungen aufweisen. Diese waren aufgrund unterschiedlicher Einflussfaktoren, wie etwa dem Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Einzugsgebiets oder dem Fremdwassereinfluss, nicht prognostizierbar. Nachfolgenden Abbildung zeigen den Übergangszeitraum als Abschnitt eines Entlastungsereignisses. Zusätzlich sind alle vier Phasen der Abflussbildung eingetragen.

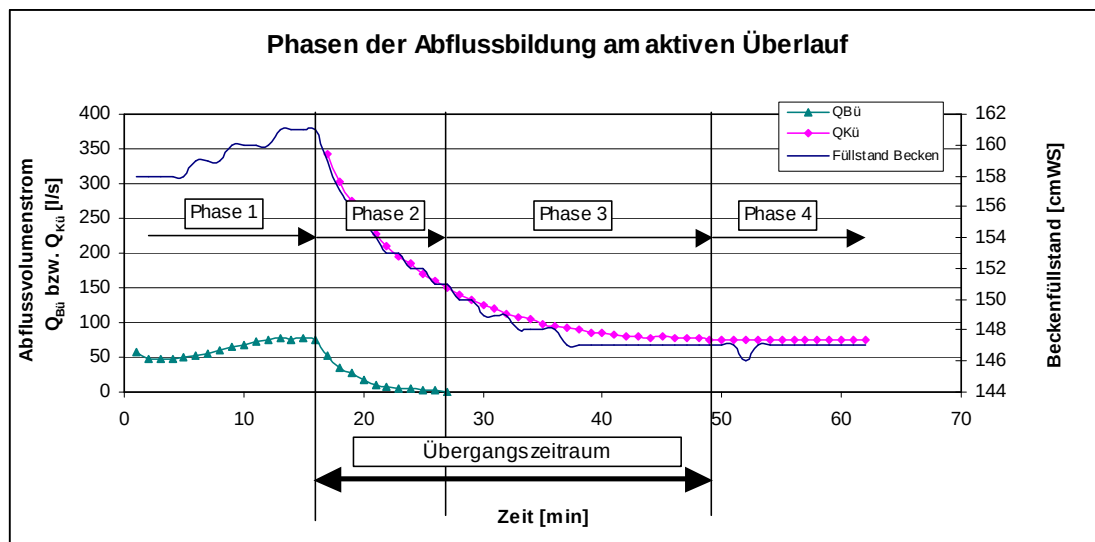


Abbildung 7-2: Darstellung des Übergangszeitraumes als Intervall zwischen dem Beginn der Phase 2 und dem Ende der Phase 3

Während dieser Zeit schwankte der Volumenstromverlauf an der Messstelle IV sehr stark (Aufschaukelungsprozess). Obwohl dieser Prozess in seiner Amplitude durchaus unterschiedlich sein konnte, so zeigte er sich unabhängig von der gewählten Steuerungsvariante in jeder dynamisch optimierten Mischwasserentlastung. Exemplarisch ist der Verlauf in Abbildung 7-3 anhand der Überfallmengen aus volumetrischem Steuerungsbetrieb dargestellt.

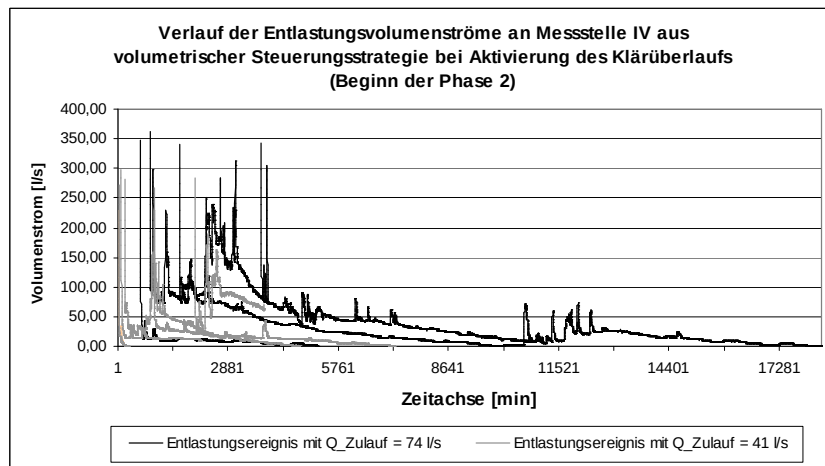


Abbildung 7-3: Ganglinien der Entlastungsvolumenströme an Messstelle IV aus dem volumetrisch gesteuerten Betrieb

Die Ermittlung der Volumenströme an Messstelle IV erfolgte durch Erfassung der Überfallhöhe und Berechnung der Ablaufwassermengen aus der hinterlegten Stützpunktkurve. Steuerungsbedingt, schwankte nun der Wasserspiegel vor dem Überfallwehr und erzeugte eine unruhige Oberfläche, die eine Ursache für die Schwankungen sein konnte. Zusätzlich wurde die Wasserspiegellage durch Volumenstromspitzen aus nachfolgenden oder überlagernden Abflussereignissen beeinflusst.

Durch Multiplikation der jeweiligen Volumenströme mit den korrespondierenden Konzentrationen ergeben sich die Frachtverläufe für die einzelnen Entlastungsereignisse. Im systemtechnisch bedingten Übergangszeitraum erfolgte ein deutlich höherer Schmutzfrachteintrag in das Gewässer. Diese stoffliche wie hydraulische Belastungsspitze konnte je nach Dauer des Übergangszeitraumes ein ansonsten positives Gesamtergebnis der optimierten Mischwasserentlastung (größerer Schmutzfrachtrückhalt) umkehren.

7.1.3 Stoffliche Mischwasserbelastung im Verlauf eines Entlastungsereignisses

Verlaufscharakteristik

Im Gegensatz zum Trockenwetter zeichnen sich die Stoffkonzentrationen des Mischwasserabflusses durch eine hohe Dynamik der Zusammensetzung aus. Die hohe Schwankungsbreite der Feststoffmessung in der statistischen Auswertung verdeutlicht u.a. diese Dynamik (Abbildung 7-4).

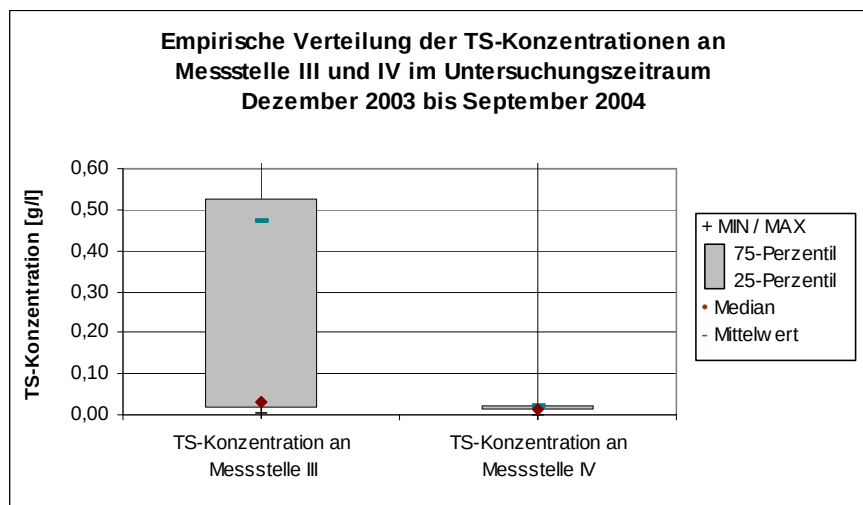


Abbildung 7-4: Verteilung der Feststoffkonzentration im Entlastungsvolumenstrom der Messstellen III und IV der volumetrisch gesteuerten Entlastungsereignisse

Die Auswertung der TS-Messwerte ergab an Messstelle III in 75 % der Fälle eine Konzentration von $\leq 0,53$ g/l bzw. an Messstelle IV von $\leq 0,02$ g/l sowie in 25 % der Fälle eine Konzentration von $\leq 0,02$ g/l bzw. $\leq 0,01$ g/l. Der Median der TS-Konzentrationen lag an Messstelle III bei 0,032 g/l und Messstelle IV 0,014 g/l.

Im Gegensatz dazu waren die Messwerte der SAK-Messung relativ stark um den Median konzentriert (Abbildung 7-5).

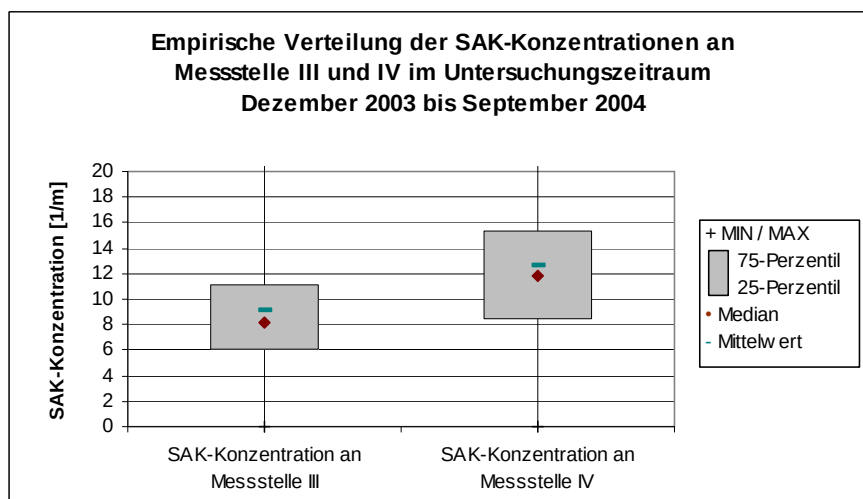


Abbildung 7-5: Verteilung der SAK-Konzentration im Entlastungsvolumenstrom der Messstellen III und IV der volumetrisch gesteuerten Entlastungsereignisse

Die ausgewerteten SAK-Messwerte zeigten an Messstelle III in 75 % der Fälle eine Konzentration von $\leq 11,09$ 1/m bzw. an Messstelle IV von $\leq 15,32$ 1/m sowie in 25 % der Fälle eine Konzentration von $\leq 6,00$ 1/m bzw. $\leq 8,47$ 1/m. Aufgrund der Anfälligkeit des arithmetischen Mittelwertes gegen einzelne Extremwerte ist hier die Gewichtung auf den Median gelegt worden, da dieser weniger anfällig gegen die doch – insbesondere bei der TS-Messung – relativ häufig auftretenden Messwertausreißer ist. So lag der Median der SAK-Konzentrationen an Messstelle III bei 8,15 1/m und an Messstelle IV bei 11,80 1/m.

Während das Abflussgeschehen im Trennbauwerk starken Turbulenzen unterworfen war, bildeten sich im Fangteil ein relativ stationärer Zustand aus. So ließen sich im Gegensatz zu Messstelle IV die Messwerte an Messstelle III in ihrem Verlauf bzw. ihrer Schwankungsbreite als eher unstatig charakterisieren. Aus Abbildung 7-6 wird deutlich, dass der Messwertverlauf innerhalb eines Ereignisses um die relativ homogen verlaufenden Messwerte der Messstelle IV schwingen kann.

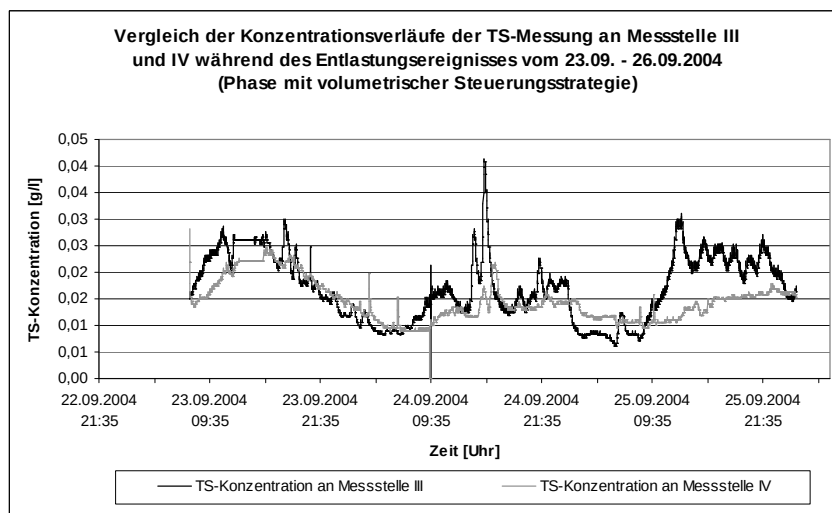


Abbildung 7-6: Vergleichende Darstellung der Schwankungsbreite der Feststoffkonzentrationen an den Messstellen III und IV im Rahmen eines volumetrisch gesteuerten Entlastungsereignisses

Insgesamt ergab eine vergleichende Untersuchung der generellen Konzentrationsverhältnisse zwischen den Messstellen III und IV, vor dem Hintergrund der dynamischen Verhältnisse (Durchmischung im Trennbauwerk, mögliche Phasentrennung der Abwasserinhaltsstoffe durch Fließzeitverzögerung im Fangteil etc.) eine relative Konzentrationsdivergenz. 80 % aller Feststoffkonzentrationen an Messstelle IV lagen unterhalb derer an Messstelle III. Dieses vorliegende Konzentrationsverhältnis lässt sich – unter der Annahme einer relativ korrekten Abbildung der tatsächlich vorhandenen stofflichen Belastungen – als Reinigungseffekt durch Ausnutzung des Sedimentationspotentials der partikulären Abwasser-

inhaltsstoffe interpretieren. Hierdurch wird die Intention und Zielsetzung des Forschungsprojektes bestätigt.

Die SAK-Messwerte verhielten sich zumeist entgegengesetzt, d.h. in 74 % aller Fälle lagen die Messwerte an Messstelle IV oberhalb der Konzentrationen an Messstelle III. Dieses könnte u.a. als Rückklösungserscheinung ausgelegt werden.

Auf die Bedeutung der Konzentrationsdivergenzen für die Ergebnisse der jeweils steuerdynamisch beeinflussten Entlastungsereignisse innerhalb der jeweiligen Steuerungsphasen soll im Folgenden näher eingegangen werden.

7.2 ERGEBNISSE DES STEUERUNGSBETRIEBES AUS DEN PROJEKTPHASEN 2 UND 3

In der Auswertung der Messdaten der jeweiligen Steuerungsstrategie werden die stofflichen Messergebnisse anhand der Gemeinsamkeiten, bei exemplarisch herausgearbeiteten Unterschieden, dargestellt. Auf eine Detailanalyse der Einzelereignisse wird dabei verzichtet.

Um eine Beurteilung der Effektivität der optimierten Mischwasserentlastung zum Referenzbetrieb des Fangbeckens treffen zu können, wurde ein Frachtsummenvergleich der Entlastungsereignisse zwischen Messstelle III und IV ab dem Zeitpunkt der Aktivierung des Klärüberlaufes (Phase 2) bis zum Ende des Entlastungsereignisses (Phase 4) durchgeführt.

Abhängig von der Entlastungsphase waren dabei unterschiedliche Annahmen zu treffen, die hier kurz skizziert werden.

Annahme für Phase 2 und 3:

Wie bereits oben erläutert, stellt sich, bedingt durch die bautechnische Anordnung des Klärüberlaufes (160 mm unterhalb des Beckenüberlaufes), zum Zeitpunkt seiner Aktivierung ein hoher Abflussvolumenstrom an Messstelle IV ein, wodurch sich ein hoher Schmutzfrachteintrag ergibt. Gleichzeitig sinkt der Volumenstrom an Messstelle III auf 0 ab.

Durch die Anordnung der Messtechnik war eine direkte Aufnahme des Zuflussvolumenstroms an Messstelle I nicht möglich, sodass die hydraulische Belastung des Beckens im Zulauf als konstant angenommen werden musste. Für eine Frachtermittlung wurden daher die an Messstelle III gemessenen Stoffkonzentrationen im Übergangszeitraum mit diesem konstanten Volumenstrom multipliziert.

Annahme für Phase 4 :

Unter der Annahme, dass sich nach Ende des Übergangszeitraumes – markiert durch das Erreichen des kongruenten Abflussvolumenstromes ($Q_{Kü, \text{ nach Aktivierung}} = Q_{Bü, \text{ vor Aktivierung}}$) – derselbe Entlastungsver-

lauf am Beckenüberlauf einstellen würde wie am Klärüberlauf, wurde ab diesem Zeitpunkt die an Messstelle III gemessene Konzentration mit dem jeweiligen an Messstelle IV vorliegenden Volumenstrom multipliziert. Somit ergab sich ein (teilweise simulierter) Frachtverlauf über den gesamten Zeitraum des Entlastungsereignisses. Dieser ließ sich abschließend für eine Massenbilanz auswerten. Eine vollständige Darstellung der simulierten Frachtverläufe ist dem Anhang II zu entnehmen.

7.2.1 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse aus volumetrischer Steuerungsstrategie

Während der Betriebsphasen mit volumetrischer Steuerungsstrategie konnten im Untersuchungszeitraum Oktober 2003 bis Oktober 2004 insgesamt 10 dynamisch optimierte Entlastungsereignisse an Messstelle IV dokumentiert und ausgewertet werden. Bei der Auswertung der Messdaten lag die Priorität auf der Betrachtung der Messstellen III (Beckenüberlauf) und IV (Klärüberlauf). Die nachfolgende Tabelle 7-1 zeigt die zeitliche Anordnung der volumetrisch gesteuerten Entlastungsereignisse im Untersuchungszeitraum 2 (Oktober 2003 bis März 2004) und 3 (April bis Oktober 2004). Während im Untersuchungszeitraum 2 noch beide Steuerungsvarianten ($Q_{Zu} = 74 \text{ l/s}$ und $Q_{Zu} = 41 \text{ l/s}$) im Praxisbetrieb geprüft wurden, lag die Präferenz der Langzeituntersuchung einer volumetrischen Steuerungsstrategien im abschließenden Untersuchungszeitraum 3 aufgrund der zuvor gesammelten Erfahrungen auf der Steuerungsvariante mit $Q_{Zu} = 41 \text{ l/s}$, da hier die zeitliche Ausdehnung des Übergangszeitraumes gegenüber der Steuerungsvariante mit $Q_{Zu} = 74 \text{ l/s}$ im Mittel um 50 % kürzer war.

Tabelle 7-1: Aufstellung der beeinflussten Entlastungsereignisse mit volumetrischer Steuerungsstrategie

Entlastungsereignisse am Klärüberlauf durch volumetrisch bedingte Steuerung								
Steuerungsvariante	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Datum	Zeit
	Aktivierung des Beckenüberlaufs		Aktivierung des Klärüberlaufs		Ende des Beckenüberlaufs		Ende des Klärüberlaufs	
$Q_{Zu} = 74 \text{ l/s}$	13. Dez	09:01	13. Dez	22:52	13. Dez	23:00	26. Dez	03:30
	28. Dez	06:21	28. Dez	16:11	28. Dez	16:17	31. Dez	21:34
	08. Jan	22:52	11. Jan	13:20	11. Jan	13:28	11. Jan	16:20
	11. Jan	16:31	12. Jan	19:14	12. Jan	19:25	19. Jan	09:30
$Q_{Zu} = 41 \text{ l/s}$	31. Jan	19:44	01. Feb	11:22	01. Feb	11:28	03. Feb	11:30
	21. Mrz	00:19	22. Mrz	10:58	22. Mrz	11:04	26. Mrz	02:00
	08. Apr	09:55	08. Apr	11:16	08. Apr	11:23	09. Apr	22:18
	21. Aug	16:45	21. Aug	17:22	21. Aug	17:26	21. Aug	20:40
	30. Aug	20:38	30. Aug	20:55	30. Aug	21:00	31. Aug	01:15
	22. Sep	21:35	23. Sep	00:22	23. Sep	00:27	26. Sep	04:49

Während die hydraulische Belastung des Fangbeckens für alle Entlastungsereignisse betrachtet werden konnte, erfolgte aufgrund messtechnischer Fehler (verschmutzungsbedingte Fehler in der TS-Messung an Messstelle III oder IV) die qualitative Auswertung und Beurteilung der Konzentrationsmessungen nur auf der Basis von 6 Entlastungsereignissen.

Die für die Auswertung der Konzentrations- und Frachtverhältnisse qualitativ relevanten Entlastungsereignisse werden nachfolgend kurz skizziert.

Dynamisch optimiertes Entlastungsereignis vom 13.12. - 26.12.2003:

Bei diesem Entlastungsereignis handelte es sich um ein Ereignis der **Kategorie 2**. Infolge von Niederschlagsereignissen ab dem 13.12.2003 stieg der Beckenfüllstand auf ein Entlastungsmaximum am Beckenüberlauf von $Q_{Bü} = 87,18$ l/s. Nach Erreichen der steuerungsrelevanten Zulaufmenge von $Q_{Zu} = 74$ l/s im Nachlauf wurde der Klärüberlauf aktiviert. Das Entlastungsereignis am Klärüberlauf wurde durch Absinken des Füllstandes auf ein Niveau unterhalb des Klärüberlaufes beendet.

Dynamisch optimiertes Entlastungsereignis vom 31.01.2003 - 03.02.2004:

Bei dieser Entlastung handelte es sich um ein Ereignis der **Kategorie 3**. Infolge von Niederschlagsereignissen ab dem 31.01.2004 stieg der Beckenfüllstand auf ein Entlastungsmaximum am Beckenüberlauf von $Q_{Bü} = 91,81$ l/s. Nach Erreichen der steuerungsrelevanten Zulaufmenge von $Q_{Zu} = 41$ l/s im Nachlauf wurde der Klärüberlauf aktiviert. Das Entlastungsereignis am Klärüberlauf wurde durch Umschalten des Steuerungsbetriebes auf Referenzzustand (ungesteuerte Entlastung) beendet.

Dynamisch optimiertes Entlastungsereignis vom 21.03. – 26.03.2004:

Hierbei handelte es sich um ein Entlastungsereignis der **Kategorie 1**. Infolge von Niederschlagsereignissen ab dem 19.03.2004 stieg der Beckenfüllstand auf ein Entlastungsmaximum am Beckenüberlauf von $Q_{Bü} = 113,63$ l/s. Nach Erreichen der steuerungsrelevanten Zulaufmenge von $Q_{Zu} = 41$ l/s im Nachlauf wurde der Klärüberlauf aktiviert. Nach Aktivierung sank der Beckenfüllstand kontinuierlich bis zur vollständigen Entleerung.

Dynamisch optimiertes Entlastungsereignis vom 08.04. – 09.04.2004:

Bei diesem Entlastungsereignis handelte es sich um ein Ereignis der **Kategorie 3**. Infolge eines Niederschlagsereignisses am 07.04.2004 stieg der Beckenfüllstand relativ schnell bis zum Entlastungsniveau am Beckenüberlauf von 150 cmWS an. Nach Absinken des Füllstandes auf ein Niveau knapp unterhalb des Beckenüberlaufes stieg der Füllstand durch Überlagerungsniederschläge bis auf ein Entlastungsmaximum von $Q_{Bü} = 81,19$ l/s erneut an. Nach Erreichen der steuerungsrelevanten Zulaufmenge von $Q_{Zu} = 41$ l/s im Nachlauf wurde der Klärüberlauf aktiviert. Das Entlastungsereignis am Klärüberlauf wurde durch Umschalten des Steuerungsbetriebes auf kombinierte Steuerungsstrategie beendet.

Dynamisch optimiertes Entlastungsereignis vom 21.08. – 21.08.2004:

Dieses Entlastungsereignis war der **Kategorie 2** zuzuordnen. Infolge von Niederschlagsereignissen ab dem 19.08.2004 sank der Beckenfüllstand nach Entlastung durch kombinierte Steuerungsstrategie auf ein Niveau unterhalb des Klärüberlaufs. Durch ein erneutes Niederschlagsereignis stieg der Beckenfüllstand auf ein Entlastungsmaximum von $Q_{Bü} = 50,51 \text{ l/s}$ erneut an. Durch einen betriebstechnischen Fehler erfolgte jedoch die Aktivierung des Klärüberlaufs etwa 10 Minuten verzögert bei einem Zulaufvolumenstrom von nur noch $Q_{Zu} = 23 \text{ l/s}$. Das Entlastungsereignis am Klärüberlauf wurde durch Absinken des Füllstandes unterhalb des Klärüberlaufsniveaus beendet.

Dynamisch optimiertes Entlastungsereignis vom 22.09. – 26.09.2004:

Bei diesem Entlastungsereignis handelte es sich um ein Ereignis der **Kategorie 1**. Infolge von Niederschlagsereignissen ab dem 21.09.2004 stieg der Beckenfüllstand am 22.09.2004 bis auf ein Entlastungsmaximum von $Q_{Bü} = 313,48 \text{ l/s}$ erneut an. Nach Erreichen der steuerungsrelevanten Zulaufmenge von $Q_{Zu} = 41 \text{ l/s}$ im Nachlauf wurde der Klärüberlauf aktiviert. Nach der Aktivierung sank der Beckenfüllstand kontinuierlich bis zur vollständigen Entleerung.

Die hydraulische Belastung des Fangbeckens bei allen 6 Ereignissen entspricht der Beschreibung in Kapitel 7.1.2. Die Frachtverläufe aus Teilsimulationen wurden entsprechend den eingangs geschilderten Annahmen ermittelt. Exemplarisch werden hier die Ergebnisse dieser Berechnung anhand des Entlastungsereignisses vom 13.12.2003 (Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8) illustriert.

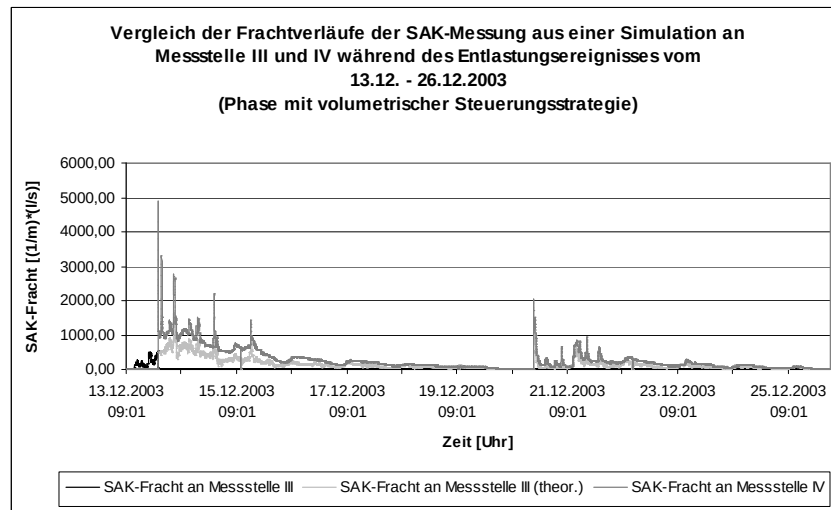


Abbildung 7-7: Vergleichende Darstellung der real an Messstelle IV gemessenen und an Messstelle III errechneten SAK-Frachtverläufe am Beispiel des Entlastungsereignisses vom 13.-26.12.2003

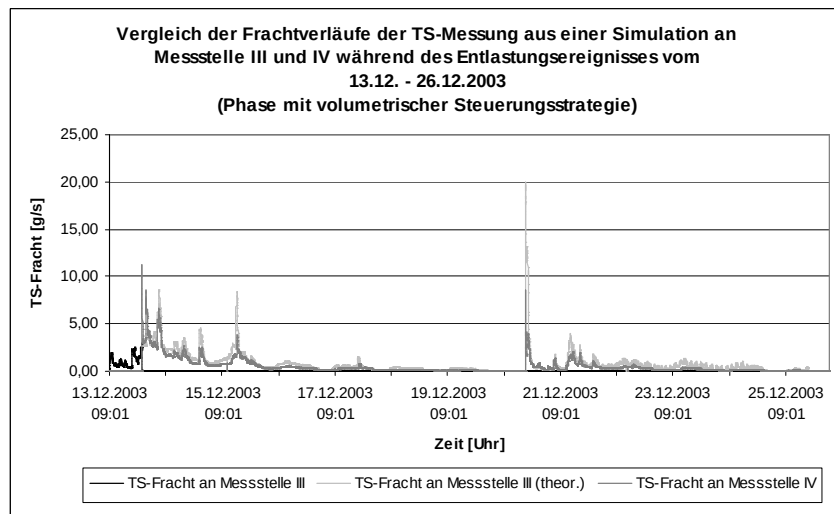


Abbildung 7-8: Vergleichende Darstellung der real an Messstelle IV gemessenen und an Messstelle III errechneten Feststofffrachtverläufe am Beispiel des Entlastungsereignisses vom 13.-26.12.2003

Die Summation der an Messstelle III und IV entlasteten Frachten führte für die jeweiligen Entlastungsereignisse zu einer Massenbilanz, wie Sie beispielhaft in Abbildung 7-9 dargestellt ist.

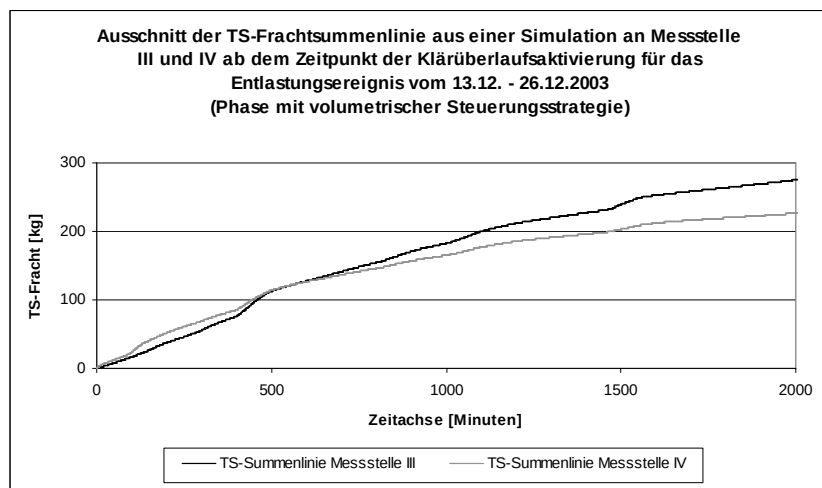


Abbildung 7-9: Verlauf der Frachtsummenlinien des Parameters TS-Konzentration des volumetrisch gesteuerten Entlastungsereignisses vom 13.-26.12.2003 (Ausschnitt)

Es wurde deutlich, dass aufgrund der bautechnischen Anordnung des Klärüberlaufs die Frachtsumme an Messstelle IV gerade zu Beginn der Klärüberlaufsaktivierung durch die hydraulische und somit stoffliche Belastungsspitze größer ist, als an Messstelle III. Im weiteren Verlauf (hier nicht dargestellt) bleibt jedoch die Summenlinie der an Messstelle IV erfassten TS-Fracht dauerhaft unter der an Messstelle III.

Im Hinblick auf den partikulären Schmutzfrachtrückhalt zeigte sich, dass mit der Ergänzung des Klärüberlaufs im Fangbecken unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen in 5 von 6 auswertbaren Entlastungsereignissen eine Optimierung der Mischwasserentlastung durch dynamische Steuerung, d.h. ein Rückhalt der partikulären Schmutzfracht von durchschnittlich **38 %** gegenüber dem simulierten Abschlag am Beckenüberlauf erzielt werden konnte. Die Differenz zwischen Becken- und Klärüberlauf betrug je nach Entlastungsdauer der 5 Ereignisse zwischen 12,2 und 280,96 kg TS.

Ein Unterschied im Schmutzfrachtrückhalt der beiden gewählten Steuerungsvarianten mit $Q_{zu} = 74$ bzw. 41 l/s ließ sich anhand der Frachtsummenbilanz und des Konzentrationsverlaufs nicht feststellen.

Die hohen Schmutzfrachtemissionen im Übergangszeitraum aufgrund fehlender Konzentrationsregelgrößen sind jedoch als kritisch zu bewerten. Beispielsweise wurden bei dem Ereignis mit erhöhtem Schmutzfrachtaustrag 2,8 kg TS über die Dauer des Ereignisses mehr in das Gewässer entlastet, als dies bei einem ungesteuerten Ereignis der Fall gewesen wäre. Aus diesem Grund wurde in der Projektphase die nachfolgend beschriebene konzentrationsabhängige Steuerung im Praxisbetrieb erprobt.

7.2.2 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse aus konzentrationsabhängiger Steuerungsstrategie

Neben der volumetrischen Steuerungsstrategie wurde im Untersuchungszeitraum Oktober 2003 bis Oktober 2004 ebenfalls die konzentrationsabhängige Steuerungsstrategie im Praxisbetrieb eingesetzt. Dabei wurde sowohl die Steuerungsvariante mit den Parametern SAK und TS in Kombination, als auch die rein feststoffbasierte (TS-Messung) Variante untersucht. Für die Projektphasen 2 und 3 konnten insgesamt 5 dynamisch optimierte Entlastungsereignisse mit konzentrationsabhängiger Steuerungsstrategie aufgezeichnet werden (Tabelle 7-2).

Tabelle 7-2: Aufstellung der beeinflussten Entlastungsereignisse mit konzentrationsabhängiger Steuerstrategie

Entlastungsereignisse am Klärüberlauf durch konzentrationsbedingte Steuerung									
Steuerungsvariante	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Anzahl konzentrationenbedingter Unterbrechungen	Datum	Zeit
	Aktivierung des Beckenüberlaufs		Aktivierung des Klärüberlaufs		Ende des Beckenüberlaufs			Ende des Klärüberlaufs	
C(SAK,TS) = 1,0 • SAK + 1,0 • TS	19. Jan	12:24	23. Jan	09:30	23. Jan	09:33	0	25. Jan	22:30
C(SAK,TS) = 1,0 •TS	03. Feb	11:38	03. Feb	18:00	03. Feb	18:06	0	04. Feb	10:00
C(SAK,TS) = 1,0 •TS	18. Jul	15:00	18. Jul	15:00	18. Jul	15:33	10	20. Jul	00:17
C(SAK,TS) = 1,0 •TS	-	-	20. Jul	14:41	-	-	0	20. Jul	20:03
C(SAK,TS) = 1,0 •TS	-	-	23. Jul	07:14	-	-	0	23. Jul	09:49

Aufgrund einer programm- und betriebstechnischen Fehlfunktion konnten die im Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2004 gewonnenen Messdaten dreier optimierter Entlastungsereignisse für eine detaillierte Auswertung nicht herangezogen werden, sodass hier nur auf die zwei entlastungsoptimierten Ereignisse im Untersuchungszeitraum Oktober 2003 bis März 2004 eingegangen werden kann. Durch die bereits in Kapitel 4 dargestellten messtechnischen Schwierigkeiten konnte allerdings nur das Entlastungsereignis vom 03.02.-04.02.2004 ausgewertet und beurteilt werden. Dieses Entlastungsereignis wird im folgenden kurz skizziert.

Entlastungsereignis vom 03.02.-04.02.2004:

Dieses Entlastungsereignis am Klärüberlauf (Messstelle IV) wurde im Anschluss an ein Entlastungsereignis der **Kategorie 3** aus volumetrischem Steuerungsbetrieb durch Einschalten der dynamischen Steuerung vom ungesteuerten Betriebszustand (Referenzbetrieb) auf Konzentrationsabhängigkeit erzielt. Der Zulaufvolumenstrom betrug zum Zeitpunkt der Aktivierung $Q_{\text{Zu}} = 41,7 \text{ l/s}$. Das Entlastungsereignis am Klärüberlauf wurde wiederum durch Umschalten des Steuerungsbetriebs auf Referenzzustand (ungesteuerte Entlastung) beendet.

In Abbildung 7-10 ist der Verlauf des Volumenstroms an den Messstellen III und IV aufgetragen.

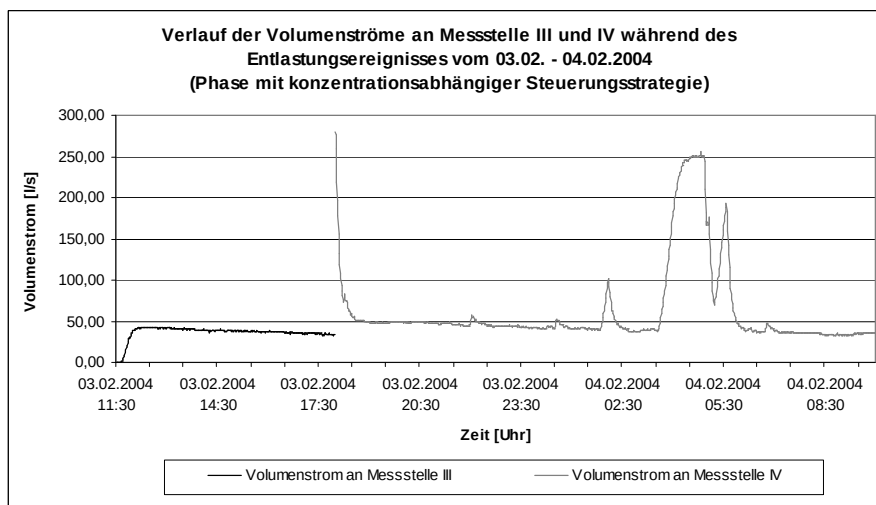


Abbildung 7-10: Verlaufsgrafik der Entlastungsmengen am Becken- bzw. Klärüberlauf des Ereignisses vom 03.-04.02.2004

Der Verlauf der Abschlagsmenge an Messstelle III von ca. 12:00 bis ca. 18:00 Uhr beschreibt ein abklingendes Abschlagsereignis. Zum Zeitpunkt der Aktivierung betrug die Abschlagsmenge 33,89 l/s. Das entspricht einem Zuflussvolumenstrom von 41 l/s und somit einer zweistündigen Aufenthaltszeit im Becken.

Beginnend mit einer recht hohen Abschlagsmenge fiel der Volumenstrom an Messstelle IV bald ab und nähert sich dem Betrag des Zuflussvolumens an Messstelle III an, ohne ihn zu erreichen. Im weiteren Verlauf des Einstauereignisses kam es zu einer erneuten Beckenbeaufschlagung.

Aus den gemessenen Konzentrationen wurden durch Multiplikation mit den korrespondierenden Volumenströmen die Frachten entsprechend der Abbildung 7-11 und Abbildung 7-12 ermittelt.

Das hohe Schmutzfrachtniveau an Messstelle IV im Anfangsstadium der Phase 2 wurde durch den konstruktionsbedingt auftretenden enorm hohen Volumenstrom zu Beginn der Übergangsphase verursacht.

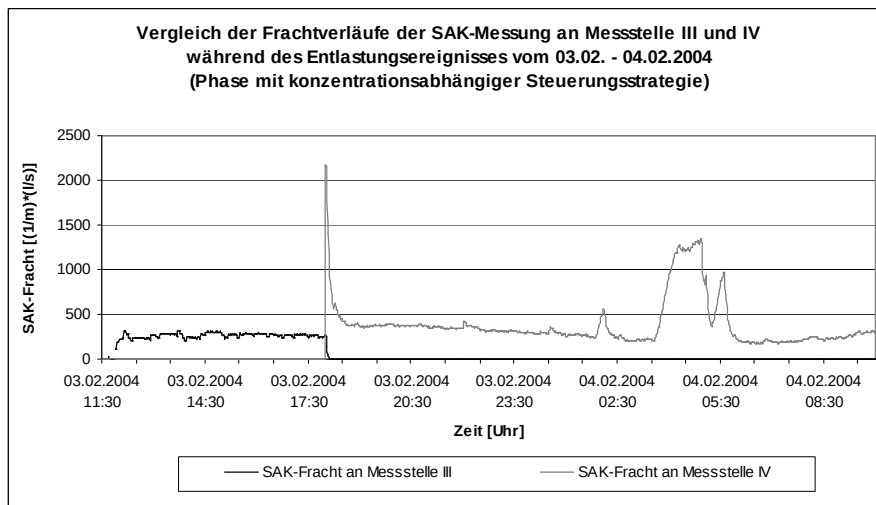


Abbildung 7-11: Vergleichende Darstellung der gemessenen SAK-Frachtverläufe an den Messstellen III und IV am Beispiel des Entlastungsereignisses vom 03.-04.02.2004

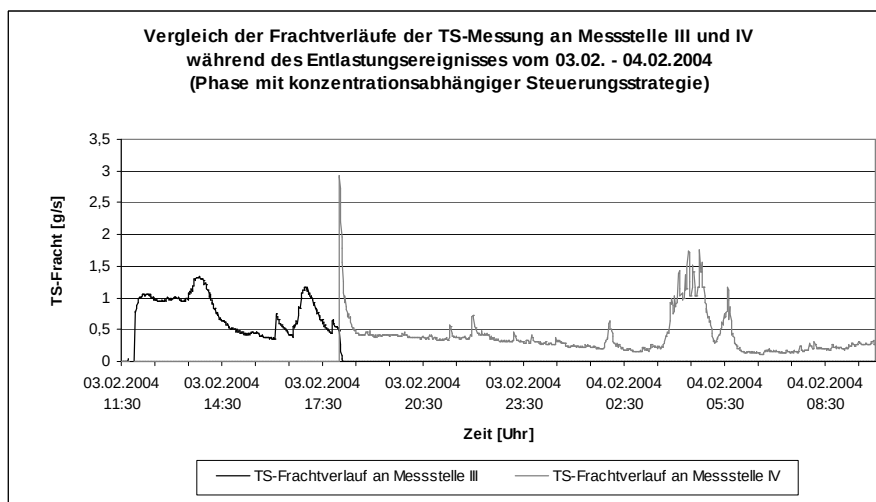


Abbildung 7-12: Vergleichende Darstellung der gemessenen Feststofffrachtverläufe an den Messstellen III und IV am Beispiel des Entlastungsereignisses vom 03.-04.02.2004

Analog zu den Untersuchungen der Daten aus volumetrisch gesteuerten Entlastungsereignissen wurde hier zur Ermittlung der Abweichung zum Referenzbetrieb mittels einer Trendanalyse der Volumenstromverlauf an Messstelle III simuliert. Dazu wurde unter der Annahme des kontinuierlichen Verlaufs die mittlere Reduktion des Überfallvolumenstroms ($Q_{\text{Bü}}$) vom relativen Maximum des jeweiligen Ereignisses bis zum Zeitpunkt der Aktivierung des Klärüberlaufs ermittelt und fortgeführt. Der theoretische

Verlauf des Zulaufvolumenstroms wurde anschließend mit den korrespondierenden Konzentrationen an Messstelle III multipliziert und ergab den in Abbildung 7-13 und Abbildung 7-14 dargestellte Frachtverlauf an den Messstellen III und IV.

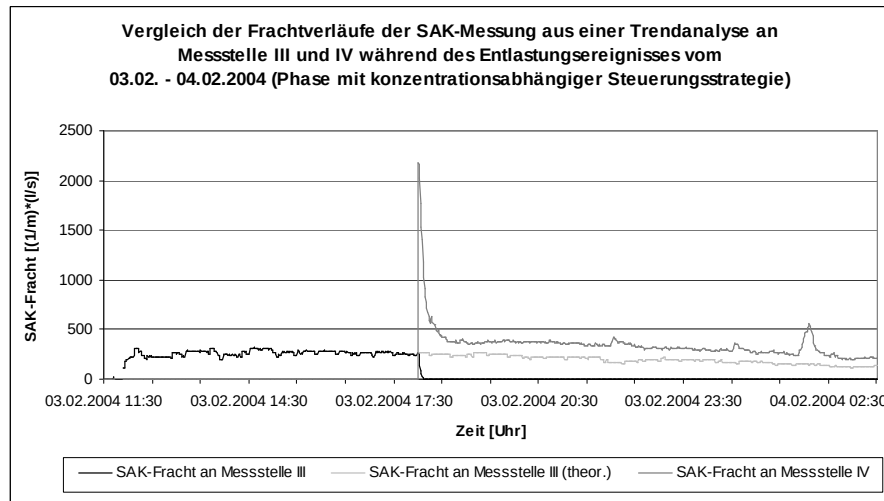


Abbildung 7-13: Vergleichende Darstellung der gemessenen SAK-Frachtverläufe an den Messstellen III und IV sowie der theoretischen Entwicklung an Messstelle III am Beispiel des Entlastungsereignisses vom 03.-04.02.2004

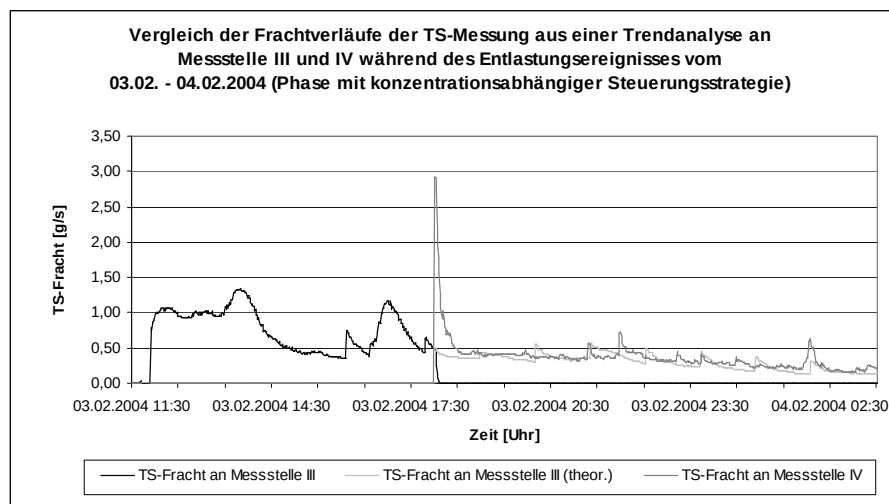


Abbildung 7-14: Vergleichende Darstellung der gemessenen Feststofffrachtverläufe an den Messstellen III und IV sowie der theoretischen Entwicklung an Messstelle III am Beispiel des Entlastungsereignisses vom 03.-04.02.2004

Es zeigte sich, dass der Verlauf der theoretischen TS-Fracht an Messstelle III nahezu betragsgleich zu der tatsächlich gemessenen TS-Fracht an Messstelle IV ist. Damit ergibt sich, betrachtet ab dem Zeitpunkt der Aktivierung des Klärüberlaufs, folgende TS-Frachtsummenlinie (Abbildung 7-15).

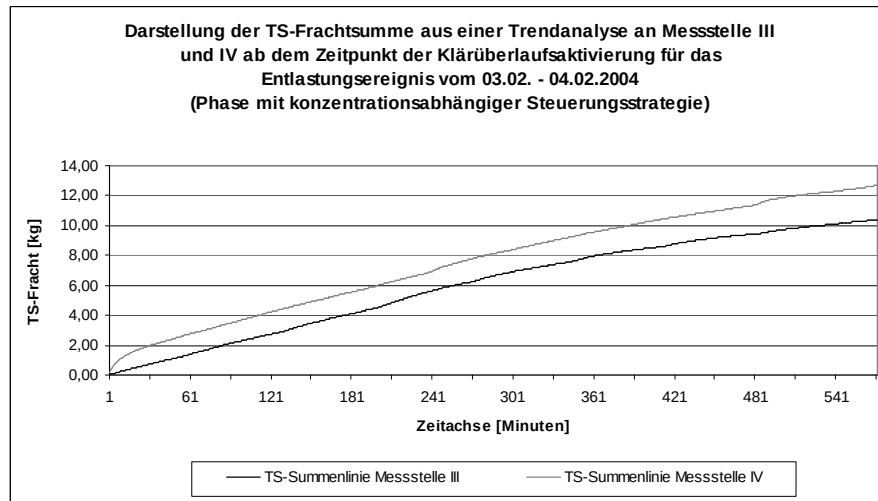


Abbildung 7-15: Verlauf der Frachtsummenlinien des Parameters TS-Konzentration des konzentrationsabhängig gesteuerten Entlastungsereignisses vom 03.-04.02.2004 (Ausschnitt)

Hier zeigt sich, dass für dieses Entlastungsereignis letztendlich durch die Belastungsspitze im Übergangszeitraum bei der konzentrationsabhängigen Steuerungsstrategie kein Frachtrückhalt erzielt werden konnte. Bedingt durch die bereits zu Beginn erwähnten mess- und betriebstechnischen Fehlfunktionen konnten keine zusätzlichen auswertbaren Entlastungsereignisse aufgezeichnet werden. Es war also nicht mit Bestimmtheit zu sagen, ob dieses Ergebnis typisch für die konzentrationsabhängige Steuerung ist.

7.2.3 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse aus kombiniertem Steuerungsansatz

Aufgrund der Erfahrungen mit den konzentrationsabhängigen Steuerungsstrategien hinsichtlich des hohen Schmutzfrachteintrags im Übergangszeitraum wurde der zuvor verfolgte Ansatz einer frachtabhängigen Steuerung – wie bereits in Kapitel 6 erläutert – aufgegeben und stattdessen im Untersuchungszeitraum Oktober 2003 bis Oktober 2004 ein kombiniertes Steuerungskonzept im Praxisbetrieb eingesetzt, um die Nachteile beider Steuerungsstrategien kompensieren zu können.

Im Vorfeld des Praxisbetriebs wurde die Leistungsfähigkeit der kombinierten Steuerung anhand der Ergebnisse der Konzentrations- und Frachtverläufe bei volumetrisch gesteuerten Entlastungsereignissen theoretisch untersucht.

Für die stofflichen Komponenten der kombinierten Steuerungsvariante wurden, wie zuvor bei der konzentrationsabhängigen Steuerungsstrategie, die Messwerte SAK und TS mit dem Faktor 1,0 multipliziert, sodass galt :

$$C(\text{SAK}, \text{TS}) = 1,0 \cdot \text{SAK} + 1,0 \cdot \text{TS}$$

Es zeigte sich jedoch, dass bei dieser Kombination ein diskontinuierlicher Steuerungsverlauf erfolgen würde, da aufgrund z.T. wechselnder Konzentrationsverhältnisse während eines Entlastungsereignisses und der damit variierenden Konzentrationsverhältnisse zwischen Messstelle III und IV ($C_{\text{Bü}} < C_{\text{Kü}}$), eine ständige Aktivierung und Deaktivierung des Klärüberlaufs erfolgen würde. Diese zusammenhängende Betrachtung führte zu dem Ergebnis, dass ohne Kenntnis einer qualitativen Korrelation zwischen dem CSB_{ges} und den Parametern SAK und TS eine Steuerung mit Berücksichtigung der stofflichen Komponente allein an der TS-Messung festgemacht werden sollte. So wurden für den nachfolgenden Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2004 die Parameter der stofflichen Aktivierungsbedingung für den Klärüberlauf entsprechend den zuvor gewonnenen Erkenntnissen auf die TS-Messung eingestellt. Es galt:

$$C(\text{SAK}, \text{TS}) = 0,0 \cdot \text{SAK} + 1,0 \cdot \text{TS}$$

Neben dieser stofflichen Bedingung wurde eine hydraulische Bedingung von $Q_{\text{Zu}} = 74 \text{ l/s}$ im Steuerungsprogramm hinterlegt. Hiermit ließen sich für den Untersuchungszeitraum April bis Oktober 2004 insgesamt 6 Entlastungsereignisse dynamisch steuern. Die nachfolgende Tabelle 7-3 zeigt die zeitliche Anordnung der kombinatorisch gesteuerten Entlastungsereignisse.

Tabelle 7-3: Aufstellung der beeinflussten Entlastungsereignisse mit kombinierter Steuerstrategie

Entlastungsereignisse am Klärüberlauf durch kombinierte Steuerung									
Steuerungs- variante	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Datum	Zeit	Anzahl konzentrati- onsbeding- ter Unter- brechungen	Datum	Zeit
	Aktivierung des Beckenüberlaufs		Aktivierung des Klärüberlaufs		Ende des Beckenüberlaufs			Ende des Klär- überlaufs	
Q _{Zu} = 74 l/s und C(SAK,TS) = 1,0 • TS	23. Apr	05:27	23. Apr	06:38	23. Apr	06:44	20	25. Apr	03:10
	07. Mai	07:20	07. Mai	18:36	07. Mai	18:46	1	10. Mai	09:10
	12. Aug	17:16	12. Aug	18:13	12. Aug	18:16	0	12. Aug	19:18
	13. Aug	18:36	13. Aug	19:33	13. Aug	19:36	1	14. Aug	00:48
	14. Aug	03:14	14. Aug	11:51	14. Aug	11:54	6	15. Aug	15:05
	18. Aug	22:36	18. Aug	23:35	18. Aug	23:42	0	20. Aug	03:48

Nach Abschluss der Plausibilitätsprüfung der aufgezeichneten Messdaten konnten hiervon vier Entlastungsereignisse für eine nähere Auswertung herangezogen werden.

Diese Entlastungsereignisse werden hier wiederum kurz dargestellt:

Dynamisch optimiertes Entlastungsereignis vom 23.04. – 25.04.2004:

Dieses Entlastungsereignis war in die **Kategorie 1** einzuordnen. Der Beckenfüllstand stieg infolge eines Starkregenereignisses relativ schnell auf das Entlastungsmaximum von $Q_{Bü} = 282,83 \text{ l/s}$ an. Nach Erreichen der steuerungsrelevanten Zulaufmenge von $Q_{Zu} = 74 \text{ l/s}$ sowie einem TS-Konzentrationsverhältnis von $C_{Bü} > C_{Kü}$ wurde der Klärüberlauf aktiviert. Durch Umkehrung der Konzentrationsverläufe wurde der Klärüberlauf zwischenzeitlich 20 mal, z.T. über eine längere Zeit deaktiviert. Das Entlastungsereignis am Klärüberlauf wurde durch relativ kontinuierliches Absinken des Füllstandes bis zur vollständigen Entleerung beendet.

Dynamisch optimiertes Entlastungsereignis vom 07.05. – 10.05.2004:

Hierbei handelte es sich um ein Entlastungsereignis der **Kategorie 3**. Auch hier stieg der Beckenfüllstand stieg infolge eines Starkregenereignisses relativ schnell auf das Entlastungsmaximum von $Q_{Bü} = 85,66 \text{ l/s}$ an. Der Klärüberlauf wurde analog zum Entlastungsereignis vom 23.04.2004 aktiviert. Durch Umkehrung der Konzentrationsverläufe wurde der Klärüberlauf zwischenzeitlich einmal über eine längere Dauer deaktiviert. Das Entlastungsereignis am Klärüberlauf wurde aus betriebstechnischen Gründen manuell beendet.

Dynamisch optimiertes Entlastungsereignis vom 13.08. – 14.08.2004:

Dieses Entlastungsereignis war in die **Kategorie 2** einzuordnen. Hierbei wurde infolge eines Überlagerungsregens das nicht vollständig entleerte Fangbecken erneut beaufschlagt, sodass nach Erreichen der steuerungsrelevanten Zulaufmenge von $Q_{Zu} = 74 \text{ l/s}$ im Nachlaufzeitraum sowie des TS-Konzentrationsverhältnisses von $C_{Bü} > C_{Kü}$ der Klärüberlauf aktiviert wurde. Durch einen Wiederanstieg des abgesunkenen Füllstandes und damit Überschreiten von $Q_{Zu} = 74 \text{ l/s}$ im Vorlaufzeitraum eines Niederschlags-Abfluss-Ereignisses, wurde eine zwischenzeitliche Deaktivierung des Klärüberlaufs herbeigeführt. Das Entlastungsereignis wurde durch einen erneuten und dauerhaften Anstieg des Beckenfüllstandes auf ein Zulaufniveau $Q_{Zu} > 74 \text{ l/s}$ beendet.

Dynamisch optimiertes Entlastungsereignis vom 14.08. – 15.08.2004:

Bei diesem Entlastungsereignis handelte es sich wiederum um ein Ereignis der **Kategorie 3**. Das Entlastungsereignis erfolgte 2 ½ Stunden nach dem zuvor beschriebenen Entlastungsereignis vom 13.08. – 14.08.2004. Nach Erreichen von $Q_{Zu} = 74 \text{ l/s}$ sowie des TS-Konzentrationsverhältnisses von $C_{Bü} > C_{Kü}$ wurde der Klärüberlauf aktiviert. Durch Umkehrung der Konzentrationsverläufe wurde der Klärüberlauf

zwischenzeitlich 20 mal, z.T. über eine längere Dauer deaktiviert. Das Entlastungsereignis wurde durch eine betriebstechnische Störung des Stellschiebers am Klärüberlauf beendet.

Die Auswertung der Messdaten illustrierte den bereits in der Diskussion um die volumetrische Steuerungsstrategie angesprochenen vielfachen Wechsel der Konzentrationen im Vergleich zwischen Messstelle III und IV. Am Beispiel des in Abbildung 7-16 grafisch aufbereiteten Verlaufs der Konzentrationsmesswerte am Becken- und Klärüberlauf wird deutlich, dass die Feststoffmesswerte am Beckenüberlauf um die relativ dazu ruhig verlaufenden Konzentrationen am Klärüberlauf schwanken.

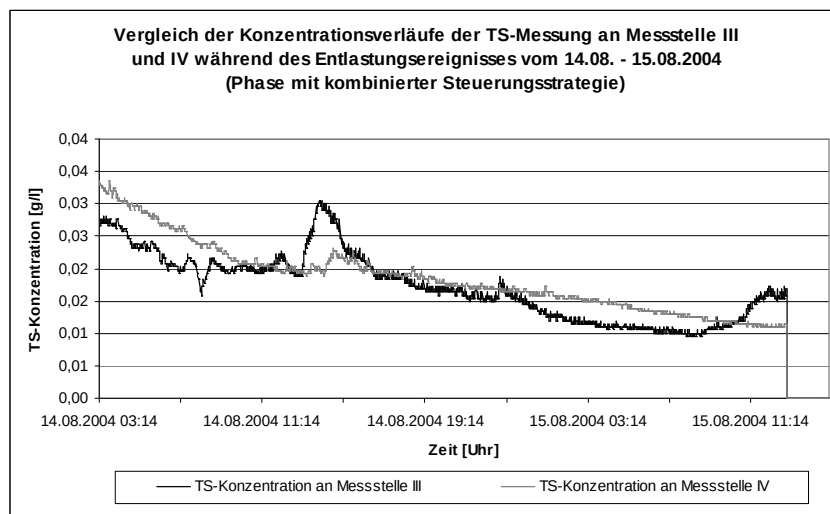


Abbildung 7-16: Vergleichende Darstellung der Schwankungsbreite der Feststoffkonzentrationen an den Messstellen III und IV im Rahmen eines kombiniert gesteuerten Entlastungsereignisses

Durch die stoffliche Aktivierungs- bzw. Deaktivierungsbedingung der kombinierten Steuerungsstrategie konnte im Gegensatz zur volumetrischen Steuerung gezielter in das Abschlagsverhalten und somit den Stoffaustrag in das Gewässer eingegriffen werden.

Der Erfolg war jedoch zweifelhaft. Nur in zwei von vier Fällen, konnte über das gesamte Entlastungsereignis eine Verbesserung der abgeschlagenen Frachten im Vergleich zu den theoretisch am Beckenüberlauf ermittelten erzielt werden. Abbildung 7-17 zeigt beispielhaft den Frachtsummenvergleich eines Abschlagsereignisses mit höherem Frachtrückhalt durch die Steuerungsstrategie.

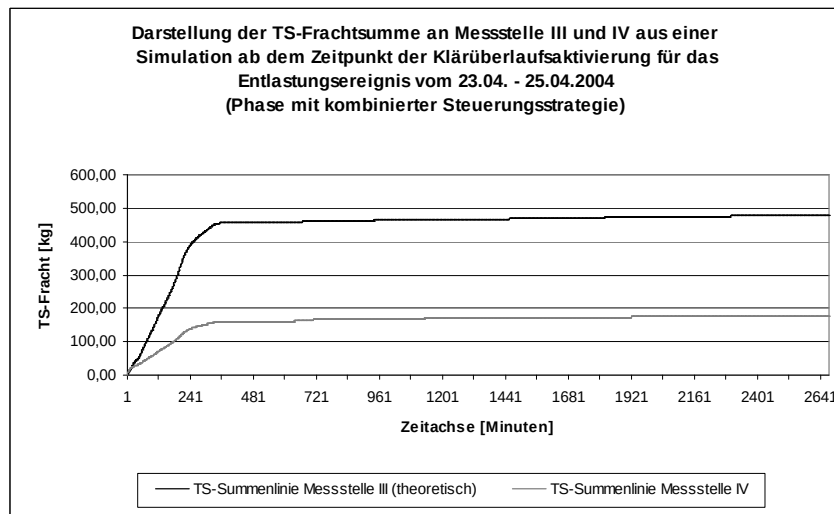


Abbildung 7-17: Verlauf der Frachtsummenlinien des Parameters TS-Konzentration des kombinatorisch gesteuerten Entlastungsereignisses vom 23.-25.04.2004

In den übrigen zwei Ereignissen wurde bedingt durch den langen Übergangszeitraum am Klärüberlauf (Messstelle IV) mehr abgeschlagen, als für den Beckenüberlauf theoretisch ermittelt wurde.

Insgesamt wurden die Ergebnisse des kombinierten Steuerungsbetriebes mit denen des volumetrischen Regelkonzeptes verglichen. Dazu wurde bei allen auswertbaren Entlastungsereignissen der kombinierten Steuerung der sich einstellende Frachtverlauf der Steuerungsstrategie auf volumetrischer Basis simuliert und vergleichend gegenübergestellt. Die Frachtsummenlinien (vgl. Abbildung 7-18) zeigten, dass bei allen auswertbaren Entlastungsereignissen der zusätzliche Stellparameter der kombinierten Steuerung gegenüber der rein volumetrischen Regelung einen Vorteil darstellt. Eine mögliche Erklärung ist die konstruktive Anordnung des Klärüberlaufs (160 mm) unterhalb der Unterkante des Beckenüberlaufs. Hier wird künstlich ein Pufferspeicher geschaffen, der bei einer Deaktivierung des Klärüberlaufs zunächst wieder gefüllt werden muss. Diese „Abschlagspausen“ führen dazu, dass in der Summation gegenüber dem durchlaufenden Frachtanstieg einer volumetrischen Steuerung vermeintlich ein Vorteil liegt.

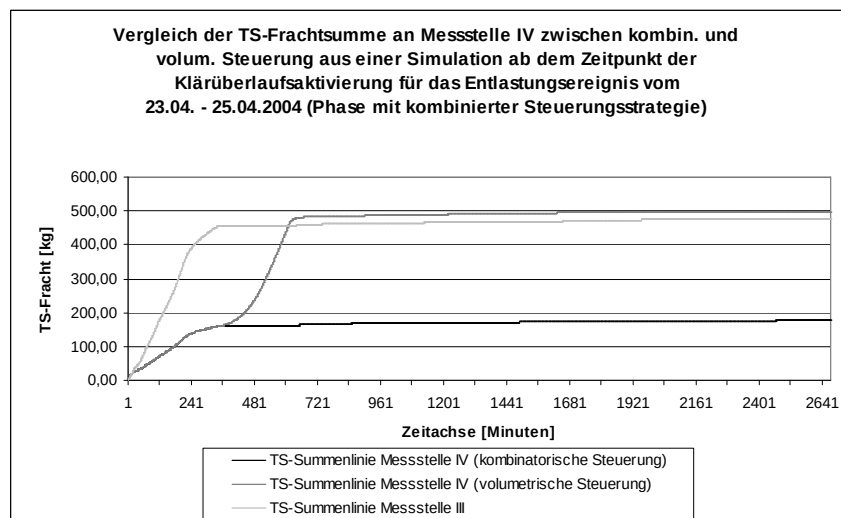


Abbildung 7-18: Vergleich der Frachtsummenlinien

8 ERGEBNISSE AUS NUMERISCHER SIMULATION

Neben den umfangreichen Messungen vor Ort wurden im Rahmen des Projektes in Zusammenarbeit mit der Fa. T.O.R. Engineering GmbH (Berg. Gladbach) Modelluntersuchungen mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation vorgenommen.

Die begleitende Simulation wurde durchgeführt, um

- eine **Systemidentifikation** mit Hilfe mathematischer Beziehungen formulieren,
- **Vorhersagen** zur Änderung der Systemreaktion bei Belastungsänderung treffen und
- eine evtl. unzureichend vorhandene **Messdatendichte ausgleichen** (Auffüllen von Messlücken)

zu können.

Ausgehend vom Modell „Planungs-Zustand“ wurde das Modell „IST-Zustand“ zur Systemidentifikation untersucht. Anschließend wurden mögliche Systemreaktionen durch Änderungen der Randbedingungen in drei Varianten prognostiziert und die Ergebnisse den Grundmodellen gegenübergestellt. Berechnet wurden für den quasi stationären Zustand als Durchlaufbecken insbesondere die dreidimensionalen Geschwindigkeitsfelder, die Partikelbahnen und der Rückhalt der partikulären Stoffe für die verschiedenen Modelle. Die Darstellung der numerischen Daten erfolgte in Form von Geschwindigkeitsvektoren mit farblicher Kennzeichnung des Vektorbetrages, der Partikelbahnen und der Verweilzeitkurven. Grundsätzlich finden sich die entsprechenden Grafiken im Anhang II dieses Berichtes. In Einzelfällen wurden sie exemplarisch in die nachfolgende Ergebnisdarstellung eingebunden.

Aus den prognostizierten Systemreaktionen bei Änderung der Randbedingungen, insbesondere der Lage und der Konstruktion von Zu- und Ablauf, ließen sich zusätzlich Hinweise für Bemessungshilfen gewinnen und überprüfen.

8.1 NUMERISCHE STRÖMUNGSMECHANIK

Bei der Strömungssimulation mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) werden die Bilanzgleichungen für die Masse und den Impuls, die Kontinuitätsgleichung und die Navier-Stokes-Gleichungen für ein Fluid wie z.B. Wasser oder Luft aufgestellt und gelöst (OERTEL u. LAURIEN (2003)). Sie wurden durch die Bilanzgleichungen für die Energie und für die Variablen eines Turbulenzmodells z.B. k (Turbulenzenergie) und ε (Dissipation der Turbulenzenergie) etc. ergänzt. Im vorliegenden einphasigen Fall erfolgte die Aufstellung und Lösung der Bilanzgleichungen für Masse und Impuls mit Hilfe des CFD-Programmsystems CHAMPION3D. Die Turbulenz wurde mit dem k - ε -Modell berechnet, das die ortsabhängigen effektiven Viskositäten ermittelt. Für die Überprüfung der Turbulenz- und Sedimentationsmodellierung mit einem anderen Ansatz wurde beim Modell „Planungs-Zustand“ zusätzlich das Programm-

system FLUENT eingesetzt. Mit einem ähnlich detaillierten Rechengitter, dem RNG k-ε- Turbulenzmodell, wurden die Partikelbahnen mit Rückkopplung auf das Strömungsfeld integriert.

Die numerische Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems erfolgt nach Vorgabe eines Startfeldes für die wichtigsten Variablen und wird an Hand einer Reihe von Konvergenzkriterien wie z.B. der Massenbilanz während der Iteration beurteilt.

Einsatz der numerischen Simulation bei Sedimentationsbecken

Für die Modellierung der zweiphasigen Strömung in Absetzbecken stehen grundsätzlich die zwei Ansätze Euler-Euler und Euler-Lagrange zur Verfügung. Bei Nachklärbecken mit einer relativ hohen Feststoffkonzentration und einer dominierenden Sinkgeschwindigkeit beim behinderten Absetzen des Belebtschlammes bietet sich das erste Verfahren an. Eine Verfolgung von individuellen Partikeln ist allerdings nur mit dem letzten Verfahren möglich, so dass bei bis zu zehn verschiedenen Sinkgeschwindigkeiten pro Partikelspektrum in Mischwasserkanälen nur der Euler-Lagrange-Ansatz sinnvoll ist. Hierbei wird das Strömungsfeld der kontinuierlichen Phase Wasser mit dem üblichen Euler-Ansatz berechnet, ohne die geringen Volumenanteile der partikulären Phase und etwaige Rückwirkungen auf das Strömungsfeld zu berücksichtigen. Diese Annahme ist wegen der vergleichsweise geringen Konzentration von Partikeln im Mischwasser gerechtfertigt. Auf der Basis des aufgestellten Strömungsfeldes kann der Transport von Sedimentpartikeln simuliert werden. Dabei wird die räumliche Bewegung eines Partikels unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsfeldes, seiner Sinkgeschwindigkeit und der Diffusion aufgrund von Turbulenz beschrieben. Ausgehend von mehreren tausend Startpunkten im Eintrittsgebiet des Durchlaufbeckens können so statistisch abgesichert die Partikelbahnen im Strömungsgebiet bis zur Sedimentation oder dem Erreichen des Ablaufs dargestellt und ausgewertet werden. Das Verhältnis der Anzahl der sedimentierten Partikel zu der Anzahl der eintretenden Partikel ergibt den relativen Stoffrückhalt η_i .

8.2 MODELLIERUNG TEILCHENBELADENER STRÖMUNGEN

8.2.1 Sinkgeschwindigkeiten

Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, liegen im Mischwasserabfluss organische und mineralische Partikel isoliert oder koagulierte vor. Der Rückhalt bzw. Weitertransport von Partikeln ist einerseits von deren Volumen, Form und Dichte und andererseits vom Strömungsfeld und den Fluideigenschaften abhängig. Bei CFD-Berechnungen geht man in der Regel von runden Partikeln aus, deren Sinkgeschwindigkeiten über Korrekturfaktoren den realen Gegebenheiten angepasst werden. Die stationäre Sinkgeschwindigkeit der Partikel ist definiert durch

$$v_{\text{sink}} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot d_p}{c_w} \cdot \frac{\rho_p - \rho_F}{\rho_F}}$$

Gleichung 5

Hierin bedeuten:

- g = 9,81 m/s² Erdbeschleunigung
 d_p Partikeldurchmesser
 ρ_p Partikeldichte
 ρ_F = 1000 kg/m³ Dichte des umgebenden Fluids

Der Widerstandsbeiwert c_w ist von der Reynolds-Zahl abhängig.

Für den betrachteten Bereich $0 < Re < 1 \cdot 10^{-3}$ gilt:

$$c_w = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0,4 \quad \text{Gleichung 6}$$

Die so berechneten Sinkgeschwindigkeiten gelten für „ideale“ Partikel: die Partikel sind im Modell als kugelförmige runde Einzelpartikel anzusehen. Da im Kanal und im Regenüberlaufbecken Partikelschwärme oder auch nicht runde Partikel vorliegen, kann ein sog. Formkorrekturbeiwert ϕ (mit $0 < \phi < 1$) eingeführt werden. Die Sinkgeschwindigkeiten werden mit dem Formkorrekturbeiwert multipliziert, um die realen Verhältnisse besser abzubilden. KROPF (1956) schlägt für die Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten einen Korrekturwert von $f = 0,6 \dots 0,7$ vor. KOLB (2001) nimmt bei Untersuchungen einen Korrekturbeiwert von $\phi = 0,75$ an.

Die Sinkgeschwindigkeit ist dabei in allen Zellen bis auf die bodennahen Zellen konstant. Überschreitet in den bodennahen Zellen die resultierende bodenparallele Geschwindigkeit die sog. Schleppgeschwindigkeit des Partikels, geht die Sinkgeschwindigkeit linear auf Null zurück. Die Schleppgeschwindigkeit stellt die Geschwindigkeit dar, die den Beginn von Sohl- und Schwebetransport kennzeichnet (vgl. Abbildung 8-1). Für natürliche Sedimente gilt:

$$u_s = u^* \cdot 2,5 \cdot \ln \left(9,0 \cdot u^* \cdot \frac{y}{v} \right) \quad \text{Gleichung 7}$$

v Viskosität des Fluides ($\eta = 0,01 \text{ cm}^2/\text{s}$ für Wasser)

y y-Richtung [cm] (Bodenabstand)

Die Größe u^* bezeichnet eine kritische Schubspannungsgeschwindigkeit und wird mit

$$u^* = \frac{0,0504}{d_p} \cdot \left(\sqrt{1 + 122 \cdot 10^5 \cdot d_p^3} - 1 \right) \quad \text{Gleichung 8}$$

gebildet. Zu beachten ist die Einheit von u_s , u^* mit cm/s und d_p mit cm.

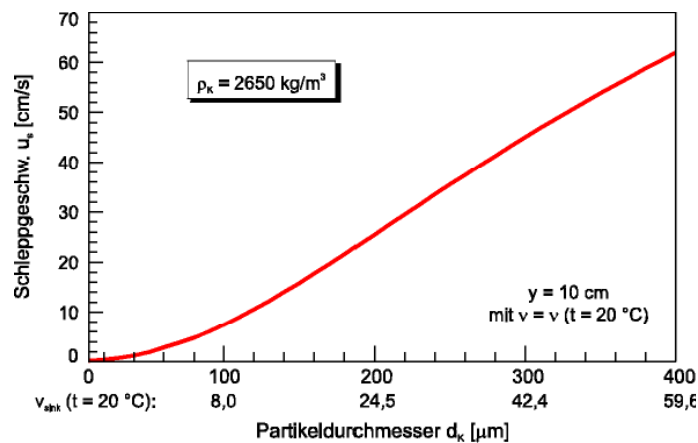


Abbildung 8-1: Schleppgeschwindigkeit mineralischer Partikel in Abhängigkeit von der Partikelgröße

8.2.2 Verweilzeiten zur Beurteilung der Strömungen im Becken

Auch bei Sedimentationsbecken ist man bestrebt durch entsprechende Strömungsführung für eine optimale Ausnutzung des gesamten Beckenvolumens zu sorgen. Als ein Maß für die Güte der Durchströmung dienen die Verweilzeitkurven, die z.B. Hinweise auf Kurzschlussströmungen und Totzonen liefern. Der Idealzustand wird dabei beschrieben durch das ideale Strömungsröhr mit einer Kolbenströmung Q in m^3/s und einer mittleren hydrodynamischen Verweilzeit von

$$t_{mhv} = V/Q$$

Gleichung 9

In diesem Fall erreichen alle Fluidelemente, die zum Zeitpunkt $t = 0$ in das Strömungsröhr eintreten, zum Zeitpunkt t_{mhv} den Ausgang. Bei realen Becken besitzen die Fluidelemente in der Regel keine einheitliche Verweilzeit, sondern es liegt eine Verweilzeitverteilung vor. Bei diesen Becken wird der Quotient V/Q theoretische Verweilzeit t_{th} genannt. Die Ermittlung der Verweilzeitverteilung oder auch relativen Häufigkeit erfolgt auf der Basis der Bahnverfolgung von Fluidelementen mit Startpunkten im Eintrittsquerschnitt. Ausgewertet wird ein Zeitraum der doppelten theoretischen Verweilzeit $2 t_{th}$, innerhalb dessen erfahrungsgemäß mindestens 80 % des Volumenstroms den Ausgang erreicht. In den Abbildungen zur Verweilzeit werden die Funktionen der relativen Häufigkeit und der Summenhäufigkeit dargestellt. Die erste gibt an wie groß die Wahrscheinlichkeit $E(t)$ ist, dass ein Fluidelement die Verweilzeit t besitzt, und die zweite stellt den Anteil der Fluidelemente $F(t)$ dar, die das Becken bis zum Zeitpunkt t nach ihrer Zugabe ($t=0$) wieder verlassen haben.

8.3 SYSTEMIDENTIFIKATION ANHAND ZWEIER GRUNDMODELLE (PLANUNGS- UND IST-ZUSTAND)

Das Modell „Planungs-Zustand“

Angenommen als stationärer Betriebszustand wurde ein maximaler Zufluss von $Q_{zu,F} = 50$ l/s für die Berechnung festgelegt. Auf der Grundlage der Bauzeichnung wurde die Beckengeometrie in einem Preprocessing in das Rechengitter abgebildet. Bestehend aus 57.330 Volumenzellen wurde ein zylindrischer Bereich zwischen der mittleren Bodenhöhe mit der Höhenkote 270,60 m+NN und Oberkante des Aqualyzers mit der Höhenkote 272,10 m+NN aufgestellt. Damit ergeben sich für die Randbereiche nachfolgend beschriebene Kriterien.

1. Region Reg. 1: Zulauf $Q_{zu,F} = 0,050$ m³/s

Es wird angenommen, dass der Zulauf mit einem konstanten Geschwindigkeitsprofil in einem rechteckigen Bereich mit den Abmessungen $h \cdot b = 0,70 \text{ m} \cdot 2,20 \text{ m}$ mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,033$ m/s erfolgt. Diese Fläche wird vorgegeben in horizontaler Richtung (b) durch die Wände des Zulaufkanals und in vertikaler Richtung (h) durch die Wehrüberlaufkante und den Wasserspiegel.

2. Region Reg. 2: Ablauf $Q_{kü} = 0,050$ m³/s

Der Austritt erfolgt ebenfalls über eine rechteckige Öffnung, die in den Abmessungen $h \cdot b = 0,1 \text{ m} \cdot 1,6 \text{ m}$ den Dimensionen der Überfallkante des Aqualyzers angenähert ist. Es wird ein Referenzdruck vorgegeben, so dass sich das Geschwindigkeitsprofil im Austritt frei einstellen kann. Aus Kontinuitätsgründen ergibt sich im Ablauf ein Volumenstrom von 0,050 m³/s.

3. Regionen Reg. 3 und 4: Wände, Boden (Schlammschicht) und Wasseroberfläche

In beiden Regionen werden die Geschwindigkeitskomponenten senkrecht zu den Flächen zu Null gesetzt. Bei den Wänden und dem Boden wird für die parallelen Geschwindigkeitskomponenten zusätzlich die Wandreibung aktiviert.

Das Modell „IST-Zustand“

Angenommen als stationärer Betriebszustand wurde ein maximaler Zufluss von $Q_{zu,F} = 66$ l/s für die Berechnung festgelegt. Auf der Grundlage des Modells „Planungs-Zustand“ wurde das Untersuchungsgebiet, das durch die Innenberandung begrenzt wird, durch ein räumliches Gitternetz diskretisiert. Bestehend aus 57.330 Volumenzellen wurde ein zylindrischer Bereich zwischen der mittleren Bodenhöhe mit der Höhenkote 270,60 m+NN und Oberkante des Aqualyzers mit der Höhenkote 272,10 m+NN aufgestellt. Zur Berücksichtigung einer Sedimentschicht von 20 cm wird dieser Bereich über dem Boden

blockiert. Ebenso wurde ein im Einlaufbereich befindlicher Wirbeljet berücksichtigt. Damit ergeben sich für die Randbereiche nachfolgend beschriebene Kriterien.

1. Region Reg. 1: Zulauf $Q_{zu,F} = 0,066 \text{ m}^3/\text{s}$

Es wurde angenommen, dass der Zulauf (konstant) in einem rechteckigen Bereich mit den Abmessungen $h \cdot b = 0,70 \text{ m} \cdot 2,20 \text{ m}$ mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,043 \text{ m/s}$ erfolgt. Diese Fläche wird vorgegeben in horizontaler Richtung (b) durch die Wände des Zulaufkanals und in vertikaler Richtung (h) durch die Wehrüberlaufkante und den Wasserspiegel.

2. Region Reg. 2: Ablauf $Q_{kü} = 0,066 \text{ m}^3/\text{s}$

Der Austritt erfolgt ebenfalls über eine rechteckige Öffnung, die in den Abmessungen $h \cdot b = 0,1 \text{ m} \cdot 1,6 \text{ m}$ den Dimensionen der Überfallkante des Aqualizers angenähert ist. Es wird ein Referenzdruck vorgegeben, so dass sich das Geschwindigkeitsprofil im Austritt frei einstellen kann. Aus Kontinuitätsgründen ergibt sich im Ablauf ein Volumenstrom von $0,066 \text{ m}^3/\text{s}$.

3. Regionen Reg. 3 und 4: Wände, Boden (Schlammschicht) und Wasseroberfläche

In beiden Regionen werden die Geschwindigkeitskomponenten senkrecht zu den Flächen zu Null gesetzt. Bei den Wänden und dem Boden wird für die parallelen Geschwindigkeitskomponenten zusätzlich die Wandreibung aktiviert.

Die Varianten des Modells „IST-Zustand“

Auf der Basis des Modells „IST-Zustand“ wurden Zusätzlich drei Varianten aufgestellt.

1. Im Zulaufbereich wurden eine Tauchwand und ein Prallblech simuliert. Damit wurde der Hauptstrom vom Einlauf her in eine bodennahe Zone gezwungen.
2. Der Klärüberlauf, der sich im IST-Zustand gegenüber dem Einlaufbereich (3. Quadrant) befindet, wurde in den 4. Quadranten verlegt.
3. Die Variante 3 ist eine Kombination der Varianten 1 und 2.

8.4 DURCHFÜHRUNG DER BERECHNUNG

8.4.1 Definition der Variablen

Die einphasigen Berechnungen wurden für jede Gitterzelle mit folgenden Variablen durchgeführt, die bei der Auswertung einzeln oder in Kombinationen als Vektoren, Isolinien und Isoflächen etc. grafisch dargestellt werden können.

1. Druck P1, Druckkorrektur PP
2. Horizontalgeschwindigkeit u1 (Phase 1, x-Richtung)
3. Horizontalgeschwindigkeit v1 (Phase 1, y-Richtung)
4. Vertikalgeschwindigkeit w1 (Phase 1, z-Richtung)
5. Turbulenzenergie KE (k)
6. Dissipation der kinetischen Turbulenzenergie EP (ϵ)

8.4.2 Stoffkennwerte

In der nachfolgenden Tabelle sind die eingesetzten Stoffkennwerte aufgeführt

Tabelle 8-1: Stoffkennwerte der Phasen für die numerische Simulation

dynamische Viskosität des Wassers (Variation für $5\text{ °C} \leq T \leq 20\text{ °C}$)	
$\mu_F (20\text{ °C})$	$= 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$
$\mu_F (15\text{ °C})$	$= 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$
$\mu_F (10\text{ °C})$	$= 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$
$\mu_F (5\text{ °C})$	$= 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$
Dichte des Wassers (Variation für $5\text{ °C} \leq T \leq 20\text{ °C}$ gering)	
ρ	$= 1.000 \text{ kg/m}^3$
Dichte der organischen Stoffe (Variation für $5\text{ °C} \leq T \leq 20\text{ °C}$ gering)	
ρ	$= 1.200 \text{ kg/m}^3$
Dichte der mineralischen Stoffe (Variation für $5\text{ °C} \leq T \leq 20\text{ °C}$ gering)	
ρ	$= 2.650 \text{ kg/m}^3$

8.4.3 Partikel und Sinkgeschwindigkeiten

Die Untersuchung der Sinkgeschwindigkeiten für das Modell „Planungs-Zustand“ unterschied sich von den Berechnungen der anderen Modelle. Die Ermittlung der Sinkgeschwindigkeiten für das Modell „Planungs-Zustand“ erfolgte durch Iteration. Unter der Vorgabe eines Rückhaltes von 85 % wurden sie durch Superposition der Strömungsgeschwindigkeiten mit den jeweils gewählten Sinkgeschwindigkeiten iterativ ermittelt.

Für die Untersuchung des Modells „IST-Zustand“ und dessen Varianten (Nr. 1-3) wurden die Messwerte der korrigierten zweiten Partikelanalyse der Messstelle 1 zur Ermittlung des Sinkgeschwindigkeitsspektrums eingesetzt. Die Maschenweite wurde dabei in sieben Stufen von 2.000 μm auf 25 μm reduziert. Zusammen mit dem Schwarzband lagen somit acht Massenanteile vor, die über die Zuläufe eins bis sechs gemittelt wurden. Der Massenanteil des Schwarzbandes erhält die Sinkgeschwindigkeit für die kleinste Maschenweite und der Massenanteil der größten Maschenweite die dazugehörige Sinkgeschwindigkeit. Die Charakteristik ist in Abbildung 8-2 im Vergleich zu den Charakteristiken von HÜBNER (1997) dargestellt. Zusätzlich wurde eine weitere Sinkgeschwindigkeitscharakteristik mit der Bezeichnung Weidenstraße 2 aufgestellt. Für 10 gleiche Massenanteile ermöglichte diese eine zusätzliche Aufteilung des Schwarzbandanteils. Dabei werden Annahmen bezüglich eines nicht absetzbaren Anteils und einer kleinsten Sinkgeschwindigkeit getroffen.

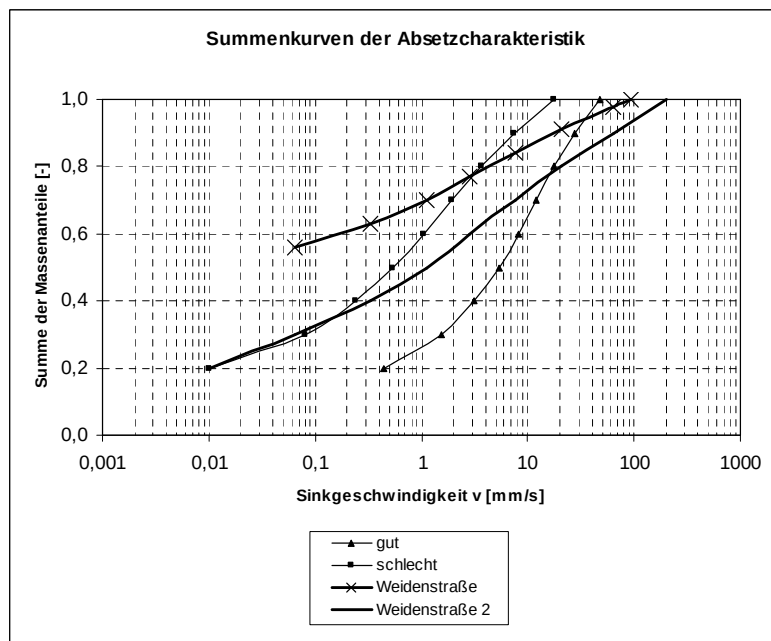


Abbildung 8-2: Summenkurven der Sinkgeschwindigkeiten ermittelt aus der korrigierten zweiten Partikelmessung im Vergleich zu Angaben aus der Literatur (HÜBNER (1997))

Über den Glührückstand wurde der Anteil der organischen Stoffe zu 84 % und der Anteil der mineralischen Stoffe zu 16 % bestimmt. Wenn alle Partikel die gleiche Zusammensetzung gehabt hätten, hätte sich eine Dichte von $\rho_p = 1.315 \text{ kg/m}^3$ ergeben. Tatsächlich war jedoch davon auszugehen, dass die Menge aller Partikel die gesamte Bandbreite der Dichte vom organischen bis zum mineralischen Material besaß. Um dem Rechnung zu tragen, wurde in Anlehnung an HÜBNER (1997) für Durchmesser $d_p < 100 \mu\text{m}$ eine Partikeldichte von $\rho_p = 2.000 \text{ kg/m}^3$ gesetzt und für Durchmesser $d_p > 100 \mu\text{m}$ eine Partikeldichte von $\rho_p = 1.500 \text{ kg/m}^3$.

Die Temperaturmessungen über ein ganzes Jahr lieferten einen Zyklus zwischen $0,21 \text{ }^\circ\text{C}$ und $19,82 \text{ }^\circ\text{C}$, so dass sich ein Mittelwert von ca. $10 \text{ }^\circ\text{C}$ einstellte, der bei der Ermittlung der Sinkgeschwindigkeiten eingesetzt wurde.

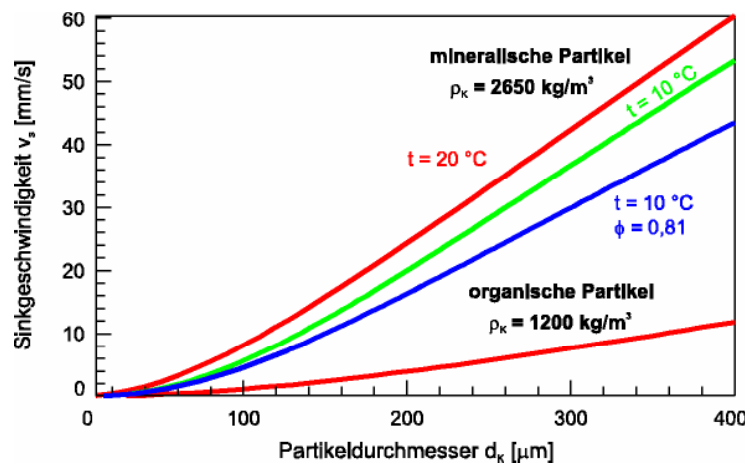


Abbildung 8-3: Darstellung der Sinkgeschwindigkeiten als Funktion der Partikeldurchmesser für mineralische und organische Partikel

8.5 ERGEBNISSE DER NUMERISCHEN BERECHNUNG

Aus den Darstellungen der Berechnungsergebnisse (s. Anhang II) waren für alle Modelle zwei Hauptströmungen zu erkennen:

1. der direkte Weg vom Eingang zum Ausgang und
2. die rotierende Beckenströmung.

Die Absolutgeschwindigkeiten lagen im gesamten Becken im einstelligen Zentimeterbereich, nur in der unmittelbaren Nähe des Ablaufs wurden Werte deutlich über 10 cm/s erreicht. Entsprechend der Be-

rechnung mittels des k - ε -Modells konnte dabei der Turbulenzgrad im Becken, außer unmittelbar am Klärüberlauf, als niedrig eingestuft werden.

Von besonderem Interesse waren die Geschwindigkeiten am Boden, die 5 cm über der Schlammschicht maximal zwischen 0 - 3,5 cm/s lagen. Eine Klärbedingung für rechteckige Durchlaufbecken nach dem Arbeitsblatt A 128 besagt, dass die mittlere horizontale Fließgeschwindigkeit nicht wesentlich mehr als 5 cm/s betragen soll.

Die Verweilzeit- oder auch Durchflusskurven liefern eine Aussage zu den Kurzschlussströmungen im Becken (s. Abbildung 8-4).

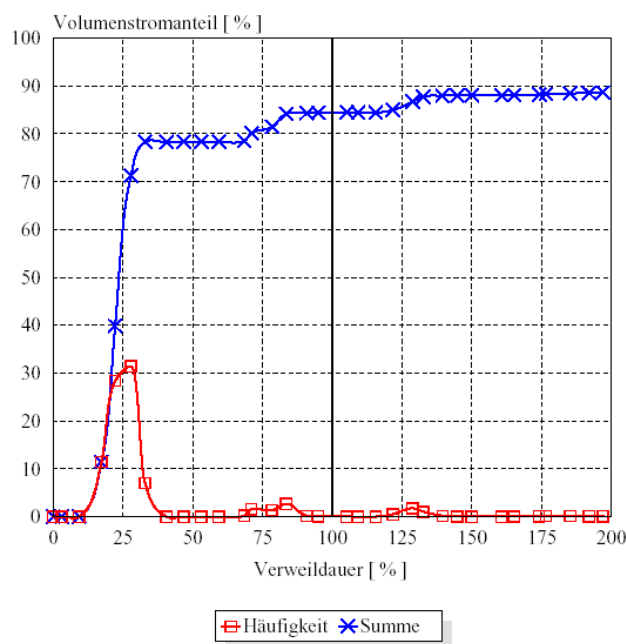


Abbildung 8-4: Darstellung der theoretischen Verweilzeit (hier 2630 s) am Beispiel des Modells "IST-Zustand"

In der Abbildung entspricht die erste Spitze dem direkten Weg des Volumenstroms zum Klärüberlauf und die weiteren Spitzen jeweils den abgeschlagenen Mengen nach einem zusätzlichen Umlauf. Die Verweilzeitkurven des Planungs- und IST-Zustands zeigten die größten Kurzschlussströmungen, die durch die Anordnung des Ablaufs im 4. Quadranten bei Variante 2 deutlich reduziert werden konnten.

Eine weitere Verbesserung lieferte die Variante 1 mit der Tauchwand am Eintritt und einer Summenhäufigkeit von 55 % bei 50 % der theoretischen Verweilzeit. Die Variante 3 als Kombination der Varianten 1 und 2 lieferte mit den entsprechenden Werten von 39 % und 50 % das beste Ergebnis. Die Verringe-

rung von Kurzschlussströmungen und hohe Verweilzeit dienen der Sedimentation, wie sich auch bei der Betrachtung des Stoffrückhalts zeigt. Nicht bei der Berechnung berücksichtigt, aber in der Praxis teilweise von Bedeutung ist die Koagulation oder Flockung, die bestimmte Kontaktzeiten benötigt, um wirksam zu werden.

Nach der Ermittlung des Strömungsfeldes wurde dieses mit drei verschiedenen Sinkgeschwindigkeitscharakteristiken beaufschlagt. Dabei wurden für jede Sinkgeschwindigkeit ca. 4.500 Bahnkurven, beginnend im Zulaufquerschnitt, ausgewertet und der jeweilige relative Stoffrückhalt η_i bestimmt. Über die Gewichtung mit den jeweiligen Massenanteilen m_i und der Summation über alle 10 Sinkgeschwindigkeiten ergab sich für jede Charakteristik der gesamte relative Stoffrückhalt.

Die Tabelle 8-2 zeigt die relativen Stoffrückhalte für alle Modelle. Es zeigte sich, dass die Sinkgeschwindigkeitscharakteristik großen Einfluss auf die Höhe des Stoffrückhalts hat. Auch hier wie schon bei den Verweilzeiten lieferte die Variante 3 die besten Ergebnisse.

Für die Bemessung von Regenüberlaufbecken der untersuchten Art ergaben sich folgende Empfehlungen:

- Anordnung des Ablaufs im vierten Quadranten.
- Anordnung einer Tauchwand am Eintritt.
- Den größten Effekt erzielte die Kombination der beiden Maßnahmen, jedoch lieferte jede einzelne schon eine deutliche Verbesserung gegenüber dem IST-Zustand.

Tabelle 8-2: Zusammenstellung der Stoffrückhalte für alle Modelle

Charakteristik Modell	Gut	schlecht	Weidenstraße	Weidenstraße 2
Planungs-Zustand	0,78	0,47	0,37	0,57
IST-Zustand	0,78	0,48	0,36	0,57
Variante 1	0,80	0,49	0,37	0,58
Variante 2	0,82	0,53	0,40	0,60
Variante 3	0,85	0,59	0,45	0,64

9 UNTERSUCHUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT DER FANGBECKENSTEUERUNG

Unter dem Eindruck der sich verschärfenden Kostendiskussion sind die Betreiber eines Entwässerungssystems vor dem Hintergrund strengerer ökologischer Rahmenbedingungen dazu aufgefordert, Kosteneinsparungen durch effizientere Nutzung der vorhandenen Strukturen herauszuarbeiten. Ein Ansatz sind dabei Steuerungskonzepte, die entweder isoliert in das Abflussgeschehen eines Beckens eingreifen (wie in vorliegendem Beispiel) oder ganzheitlich die Teilsysteme Kanal und Kläranlage aus Sicht des Gewässers bewirtschaften. Für diese Steuerungskonzepte sind Informationen der akuten stofflichen und hydraulischen Belastung als Ergebnis der Online-Messung im Kanalnetz incl. der Regenwasserbehandlung erforderlich. Diese sollten zentral gebündelt und ausgewertet werden. In den meisten Kommunen ist eine „Basisausstattung“ an Mess- und Regeltechnik aus der Umsetzung der Forderung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan (1995)) bereits vorhanden. So fordert die SüwV Kan (1995) in Nordrhein-Westfalen etwa die kontinuierliche Ermittlung der Überlaufmengen, -dauer und -häufigkeiten der wichtigsten Regenbauwerke als Aufzeichnung der Füllstände und Benutzungszeiten.

Für die Nachrüstung einer Verfahrenstechnik zur Leistungssteigerung der vorhandenen Regenwasserbehandlungsanlagen auf der Grundlage eines Steuerungskonzeptes, wie sie hier untersucht wurde, bedeutet dies zunächst einmal eine Investition und steigende Betriebskosten. Nachfolgend sind die Kostenstellen kurz skizziert.

Zusätzliche Kosten durch die Entwicklung eines Steuerungsmodells

Der gezielte Eingriff in das Abflussverhalten des Fangbeckens erfordert eine umfassende Datenbasis (Referenzaufnahme). Es sollten auf der Grundlage gemessener Systemreaktionen auf eine Reihe von Belastungszuständen Regelgrößen entwickelt werden, welche die Gewässerbelastung auf ein Minimum reduzieren. Sollte an dieser Stelle auf eine große Datenbasis seitens der Kommune zurückgegriffen werden können, so reduzieren sich die Kosten erheblich. Andernfalls sollte in einer umfassenden Untersuchung der Referenzzustand herausgearbeitet werden.

Zusätzliche Kosten für die Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR-Technik)

Für die Umsetzung der hier untersuchten Steuerungskonzepte ist, unabhängig von der gewählten Steuerungsvariante die Installation einer zusätzlichen MSR-Technik erforderlich. Hierzu gehören:

- die Installation eines Klärüberlaufs mit Ablaufkasten, Leitungssystem und Messwehr, wie etwa dem Aqualyzer (incl. Hözensensor und Steuereinheit) zur bereits vorhandenen Abschlagsmessung nach SüwV Kan;

- die Installation einer Fernwirktechnik, welche die aufgenommenen Betriebsdaten an die Leitstelle übermittelt, über die aber auch rückwirkend in den Prozess eingegriffen werden kann;
- technische Erweiterung der Leitstelle zur Verwaltung und Verarbeitung der gewonnenen Daten.

Mit den aufgelisteten Installationen ist die Realisierung einer volumenstromabhängigen Steuerung des Fangbeckens möglich. Für die Umsetzung einer stofflich basierten Steuerung ist die zusätzliche Installation mehrerer Stoffmesssonden (incl. medienfreiem Probenahmesystem (Kanalsampler)) an den Systemauslässen und dem Systemzufluss erforderlich.

Kostenaufstellung für die Mess-, Regel- und Steuerungstechnik im Fangbecken „Weidenstraße“

Es wird deutlich, dass, abhängig von der vorhandenen Basisausstattung und den verfügbaren Basisdaten, zur Entwicklung eines Steuerkonzeptes die zusätzlich aufzubringenden Kosten erheblich variieren können. Für die Realisierung der Fangbeckensteuerung sind die nachfolgend aufgeführten Kosten in den genannten Kostengruppen angefallen:

Tabelle 9-1: Aufstellung exemplarischer Kosten für die MSR-Technik

ENTWICKLUNG EINES STEUERUNGSMODELLS			
Beschreibung	Anzahl	EP netto	GP netto
Wissenschaftliche Projektierung mit Auswertung der vorhandenen Basisdaten und technischen Randbedingungen psch.			19.000 €
Entwicklung und Erprobung möglicher Steuerstrategien			41.000 €
Summe			60.000 €
KOSTEN FÜR DIE MSR-TECHNIK			
Beschreibung	Anzahl	EP netto	GP netto
Installation des Klärüberlaufs incl. Ablaufkasten, Rohrleitung, Stellschieber, Höhenstandserfassung, Steuereinheit (SPS) ¹⁾			17.000 €
Entwicklung der Stützpunktkurve			7.500 €
Fernwirk-Unterstation incl. USV (unterbrechungsfreie Stromversorgung) und Modem ²⁾			6.000 €
Summe			30.500 €
SENSORTECHNIK FÜR EINE STEUERSTRATEGIE AUF STOFFLICHER BASIS			
Beschreibung	Anzahl	EP netto	GP netto
Sonde zur Bestimmung von gelösten organischen Substanzen (SAK)	4	10.500 €	42.000 €
Sonde zur Bestimmung der Feststoffkonzentration (TS)	4	1.500 €	6.000 €
Durchflusseinheit zur medienfreien Probenahme incl. Anzeigeeinheit und allseitige Anbindung	4	2.500 €	10.000 €
Summe			58.000 €
¹⁾ mündliche Auskunft der Firma Syro GmbH			
²⁾ Die Kosten wurden nach ARNOLD (2001) (zitiert in GRÜNING (2002)) abgeschätzt			

Die aufgeführten Kosten sollen einen Anhaltspunkt zur Kostenschätzung liefern. Sie sind in keiner Weise vollständig. Dieser Anspruch kann nicht erhoben werden, da das vorgestellte Verfahren eine Einzel-

falllösung darstellt und, wie bereits mehrfach erwähnt, von den vorhandenen Rahmenbedingungen abhängig ist.

Fazit

Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse würde eine alternative Verfahrenstechnik gleichen Nutzens erfordern. Im vorliegenden Fall bestünde eine solche Variante in der vergleichenden Betrachtung mit einem Standarddurchlaufbecken gleicher Effektivität. Systemtechnisch bedingt sind solche Becken vor dem Hintergrund der Bemessungsansätze mit einem größeren Beckenvolumen auszuführen. Hierdurch ergeben sich höhere kalkulatorische Kosten (AfA und Zins) für den laufenden Betrieb. Diese fixen Kosten stellen den größten Anteil der Kosten für die Abwasserableitung der Kommunen dar. Wenn also dieser Vergleich dazu führen würde, dass herkömmliche Bemessungsansätze für Standardbecken der Mischwasserbehandlung überdacht und künftig vielleicht mit geringeren Beckenvolumina ausgeführt werden könnten, bestehen darin die Kosteneinsparpotentiale dieser Regelungstechnik. Da im Rahmen dieses F&E-Vorhabens keine vergleichbaren Durchlaufbecken untersucht werden konnten, ist eine abschließende Beurteilung hinsichtlich der Kostenersparnis an dieser Stelle nicht möglich.

10 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel dieser Untersuchung war es, vor dem Hintergrund geltender Umweltstandards die Leistungsfähigkeit der optimierten Mischwasserentlastung zu beurteilen. Dabei stand die Nachrüstung einer dynamisch regulierenden Mess- und Regeltechnik (Implementierung einer alternativen Entlastungsschwelle - Klärüberlauf) in ein vorhandenes Fangbecken auf dem Prüfstand. Durch diese Nachrüstung konnte das Becken im Nachlaufzeitraum eines Entlastungsereignisses verfahrenstechnisch als Durchlaufbecken betrieben werden. Das System wurde als eine Methode zur Leistungssteigerung bestehender Becken (s. Kapitel 4) eingestuft, das es ermöglichen sollte, unter dem Eindruck der sich verschärfenden Kostendiskussion, Kosteneinsparungen durch effizientere Nutzung der vorhandenen Strukturen herauszuarbeiten.

Hierzu wurden im Rahmen des Projektes in Anbetracht der zu erwartenden hydraulischen und stofflichen Belastungen (s. Kapitel 4) zunächst die Rahmenbedingungen der einzusetzenden Messtechnik festgelegt. Da letztlich die Beurteilung der Effektivität einer angewandten Steuerung einen Abgleich mit dem Spektrum und den Auswirkungen möglicher Fehler erfordert, wurden parallel zur Auswahl der Messgeräte mögliche Fehlerquellen der online erfassten Daten aus der Literatur aufbereitet.

Auf der Grundlage der Erfassung des IST-Zustandes - Projektphase 1 - (s. Kapitel 6) wurden mögliche Steuerstrategien zur dynamischen Entlastungsoptimierung entwickelt (s. Kapitel 7). Ein wesentliches Merkmal war dabei die Festlegung der Regelgrößen auf der Basis hergebrachter sowie aktuell diskutierter Beurteilungskriterien, wie etwa dem Summenparameter CSB oder den immissionsorientierten Empfehlungen des BWK Merkblattes 3. Die entworfenen Steuerstrategien anhand hydraulischer (volumetrische Steuerstrategie) und/oder stofflicher Stellparameter (kombinierter Steuerungsansatz bzw. konzentrationsabhängige Steuerung) wurden in den Projektphasen 2 und 3 im Praxisbetrieb eingesetzt und vergleichend gegenübergestellt. Dabei stellte sich der Zeitabschnitt zwischen der Aktivierung des Klärüberlaufs und dem hydraulischen Gleichgewichtszustand aus Abfluss und Zuflussvolumenstrom im Verlauf eines Abschlagsereignisses als die kritische Phase im Abflussverhalten des Beckens heraus, da sich hier eine unkontrollierbare hydraulische und stoffliche Belastungsspitze ergibt. Die Dauer dieses Übergangszeitraums wies unabhängig von der gewählten Steuerungsvariante wechselnde zeitliche Ausprägungen auf, die aufgrund unterschiedlicher Einflussfaktoren nicht prognostizierbar waren.

Die Auswertung der Messdaten aus den volumetrisch gesteuerten Ereignissen ergab einen erhöhten Schmutzfrachtrückhalt am Klärüberlauf im Vergleich zu den theoretisch ermittelten Frachtverläufen am Beckenüberlauf ohne dynamische Steuerungsstrategie (Referenzzustand). Über die auswertbaren Ereignisse wurde durchschnittlich ein Rückhalt der partikulären Schmutzfracht von **ca. 38 %** gegenüber dem simulierten Abschlag am Beckenüberlauf erzielt. Die Differenz zwischen Becken- und Klärüberlauf betrug je nach Entlastungsdauer der 5 Ereignisse zwischen 12,2 und 280,96 kg TS. Damit würde unter Anwendung einer rein volumetrisch bedingten Steuerung ein einfaches Instrument zur dynamischen

Entlastungsoptimierung vorliegen. Als problematisch erwies sich bei dieser Steuerungsvariante jedoch, dass im Übergangszeitraum und darüber hinaus (Nachlaufzeitraum) aufgrund fehlender Konzentrationsregelgrößen Frachten in das Gewässer abgeschlagen werden können, die schwer kontrollierbar sind. Aus diesem Grund wurde in der Projektphase die nachfolgend beschriebene konzentrationsabhängige Steuerung im Praxisbetrieb erprobt.

Bedingt durch mess- und betriebstechnischen Fehlfunktionen konnte für die konzentrationsabhängige Steuerung nur ein Entlastungsereignis ausgewertet werden. Die Beeinflussung des Entlastungsereignisses ergab einen erhöhten Schmutzfrachtaustrag aus dem Becken. Da keine zusätzlichen auswertbaren Entlastungsereignisse aufgezeichnet werden konnten, kann nicht mit Bestimmtheit gesagt werden, ob dieses Ergebnis typisch für die konzentrationsabhängige Steuerung ist.

Zur Kompensation der Nachteile beider Steuerstrategien, wurde als letzte Steuerungsvariante eine Kombination aus beiden Strategien im Praxisbetrieb erprobt. Durch die stoffliche Aktivierungs- bzw. Deaktivierungsbedingung der kombinierten Steuerungsstrategie, konnte im Gegensatz zur rein volumetrischen Steuerung gezielter in das Abschlagsverhalten und somit den Stoffaustrag in das Gewässer eingegriffen werden. Dennoch konnte nur in zwei von vier der auswertbaren Ereignisse ein erhöhter Schmutzfrachtrückhalt durch die dynamische Steuerungsstrategie erzielt werden.

Die Ergebnisse des kombinierten Steuerungsbetriebes wurden den theoretischen Ergebnissen des volumetrischen Regelkonzeptes gegenübergestellt. Die Frachtsummen der Ereignisse zeigten, dass bei allen auswertbaren Entlastungsereignissen der zusätzliche stoffliche Stellparameter der kombinatorischen Steuerung gegenüber der rein volumetrischen Regelung einen Vorteil darstellt. Eine mögliche Erklärung ist die konstruktive Anordnung des Klärüberlaufs (160 mm) unterhalb der Unterkante des Beckenüberlaufs. Hier wird künstlich ein Pufferspeicher geschaffen, der bei einer Deaktivierung des Klärüberlaufs zunächst wieder gefüllt werden muss. Diese „Abschlagspausen“ führen dazu, dass in der Summation gegenüber dem durchlaufenden Frachtanstieg einer volumetrischen Steuerung vermeintlich ein Vorteil liegt.

Nachteilig an einer Steuerungsstrategie auf stofflicher Basis ist, dass durch die anfällige Messtechnik ein enorm erhöhter Wartungsaufwand entsteht. Zur Erfassung der akuten Stofflichen Belastung für die Realisierung eines erweiterten Steuerungskonzeptes auf stofflicher Basis ist eine wesentlich robustere Messtechnik erforderlich.

Begleitend zum Praxisbetrieb wurden die erfassten Daten mittels numerischer Simulation ausgewertet. Die Simulationen dienten der Systemidentifikation durch mathematische Beziehungen. Ferner konnten Vorhersagen zur Systemreaktion bei Änderung der Randbedingungen, wie etwa der Lage und der Konstruktion von Zu- und Ablauf gemacht werden. Für den quasistationären Zustand als Durchlaufbecken

mit konstantem Wasserspiegel und geöffnetem Klärüberlauf wurden die teilchenbeladenen Strömungen mit numerischen Modellen untersucht.

Erkennbar bei allen Modellen waren zwei Hauptströmungen, erstens der direkte Weg vom Eingang zum Ausgang (Kurzschlussströmungen) und zweitens die rotierenden Beckenströmungen. Aufgetragen als Durchfluss- oder Verweilzeitkurven zeigten sich für die Modelle „Planungs-“ und „IST-Zustand“ die größten Kurzschlussströmungen im Becken. Diese konnten durch Anordnung des Ablaufs im 4. Quadranten bei Variante 2 deutlich reduziert werden. Eine weitere Verbesserung lieferte die Variante 1 mit der Tauchwand am Eintritt. Die Variante 3 als Kombination der Varianten 1 und 2 lieferte die besten Ergebnisse.

Auch bei der Beladung des Strömungsfeldes mit verschiedenen Sinkgeschwindigkeitscharakteristiken zeigte die Variante 3 den besten Stoffrückhalt. Damit kann für nachfolgende Untersuchungen an Regenüberlaufbecken mit diesem Verfahren zur Leistungssteigerung die Anordnung des Klärüberlaufs im 4. Quadranten in Kombination mit einer im Zulauf befindlichen Tauchwand empfohlen werden. Jede einzelne Maßnahme bringt jedoch schon einen Vorteil gegenüber dem IST-Zustand.

Eine Abschätzung der finanziellen Aufwendungen für die Nachrüstung der dynamischen Steuerstrategie war nur eingeschränkt möglich. Abhängig von der gewählten Steuerungsvariante liegen in den Kommunen regional abweichende Basisdaten in unterschiedlicher Qualität zur Vorgabe einer standardisierten Steuerstrategie vor. Die Kostenaufstellung kann also immer nur eine Einzelfalllösung sein. Dennoch wurden für das untersuchte Fangbecken einzelne Positionen aufgelistet, die einen Anhaltspunkt bieten können.

Vor diesem Hintergrund besteht vor der generellen Umsetzung dieser Steuerstrategie noch weiterer Untersuchungsbedarf. So sollte beispielsweise untersucht werden, ob unter Ausschluss der oben angeführten systemtechnischen Interpretationsspielräume tatsächlich ein Vorteil der stofflichen Steuerungsvariante vorliegt. Dies könnte beispielsweise durch eine gezielte Abschaltung des Beckenüberlaufs mittels einer beweglichen Wehrschwelle erfolgen. Gleichzeitig könnte man durch diese Wehrschwelle das Problem des unbeherrschbaren Übergangszeitraumes, der das Ergebnis aller Steuerungsstrategien letztlich positiv oder negativ entscheidet, eingrenzen.

Ferner könnte zur Abschätzung der Kostenreduktion durch das Verfahren der dynamischen Entlastungsoptimierung eine vergleichende Betrachtung des dynamisch optimierten Fangbeckens mit einem Standarddurchlaufbecken gleicher Effektivität erfolgen. Dies könnte etwa im Rahmen einer numerischen Simulation erfolgen. Wenn dieser Vergleich dazu führen würde, dass herkömmliche Bemessungsansätze für Standardbecken der Mischwasserbehandlung überdacht und künftig vielleicht mit geringerem Beckenvolumen ausgeführt werden könnten, bestehen darin die Kosteneinsparpotentiale dieser Regelungstechnik.

Literaturverzeichnis

- ALTHOFF (2002) Althoff, M.; Orth, H.: Untersuchungen zum Austragsverhalten von Stauraumkanälen. Abschlussbericht. Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum. 2002
- ARNOLD (2001) Arnold, J.-U.: Betriebserfahrungen mit gesteuerten Regenüberlaufbecken. Vortrag, Workshop des Wasserverbandes Eifel-Ruhr, Pilotprojekt „Abflusssteuerung“, 03. April 2001 in Düren
- ATV A 128 (1992) ATV (Hrsg.): Richtlinie für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik, St. Augustin
- ATV A 166 (1999) ATV (Hrsg.) Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik, St. Augustin
- ATV A 176 (2001) ATV (Hrsg.) Hinweise und Beispiele zur konstruktiven Gestaltung und Ausrüstung von Bauwerken der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik, St. Augustin
- ATV-DVWK (2003) ATV-DVWK Arbeitsgruppe ES-1.3 „Fremdwasser“: Fremdwasser in Deutschland. KA – Abwasser, Abfall, 50 (2003), Nr. 1, S. 70 - 81
- BIRKNER u. CREMER (2001) Birkner, T.; Cremer, S.: Durchflussmesseinrichtungen von Regenentlastungsbauwerken. Abschlussbericht. Hrsg.: Institut für unterirdische Infrastruktur. Gelsenkirchen. 2001.
- BOLLER (2001) Boller, R.: Ein exaktes Verfahren zur Volumenstrommessung in Regenwasserbehandlungsanlagen. . In: Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum. Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum e.V..2001. S. 9-17.
- BROMBACH u. FUCHS (2001) Brombach, Dr. H.; Fuchs, Dr. S.: Datenpool gemessener Verschmutzungskonzentrationen von Trocken- und Regenwetterabflüssen in Misch- und Trennkanalisation. Abschlussbericht. Hrsg.: ATV-DVWK-Forschungsfonds. 2001.
- BROMBACH, MICHELBAACH u. WÖHRLE (1993) Brombach, H.; Michelbach, S., Wöhrle, C.: Feststoffe in der Mischwasserkanalisation – Sedimentation und Remobilisierung. Korrespondenz Abwasser, Hennef, 40, (1993) Nr. 12, S. 1910-1926.
- BRUNS (1999) Bruns, J.: Dynamische Kopplung von Regenwasserbehandlungen und Abwasserreinigung bei Mischwasserabfluss. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 151.
- BWK MERKBLATT 3 (2001) BWK (Hrsg.): Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse. Merkblatt 3, Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V., Düsseldorf; April 2001
- COBURG et al. (2003) Coburg, R.C.; Stadtfeld, R.; Oehmichen, U.; Lohaus, J.; Willms, M.: Marktdaten Abwasser 2002 – Ergebnisse der gemeinsamen Umfrage zur Abwasserentsorgung der ATV-DVWK und des BGW, KA Heft 4/2003, S. 491 ff
- DEMOULIN u. HAIDER (2000) Demoulin, G.; Haider, R.: Einfluss verschiedener Probenahmesysteme auf die Ermittlung der CSB-Zulaufkraft. KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, Hennef, 47, (2000) Nr. 3, S. 373-382.

DURCHSCHLAG et al. (1995)	Gesamtemissionen aus Kanalnetz und Kläranlage bei Mischwasserabfluss. Forum Städtehygiene (46), Nr. 2/3, S. 167-177
GROTEHUSMANN u. KAUFMANN (1991)	Grotehusmann, H.; Kaufmann, F.: Einsparungen von Speichervolumen für die Regenwasserbehandlung durch Erhöhung des zulässigen Mischwasserabflusses zur Kläranlage. Abwassertechnik, Heft 3, S. 48-50
GRÜNING (2002)	Grüning, H.: Ein Modell zur simultanen Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage unter Berücksichtigung resultierender Gewässerbelastung. In: Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum. Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum e.V..2002. Band 42.
HÄCK (2001)	Häck, Dr. M.: Kontinuierliche Qualitätsmessung in der Kanalisation. In: Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum. Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum e.V..2002. Band 40. S. 51-61.
HELBIG/FOLTYS- SCHMIDT (2003)	Helbig, A.; Foltys-Schmidt, C.: Ganzheitliches und qualifiziertes Benchmarking als ein Instrument zur zukunftsorientierten Modernisierung der Wasserwirtschaft, KA Heft 5/2003, S. 631 ff
HÜBNER (1997)	Hübner, M.: Beurteilung und Ermittlung Wirkungsweise von Anlagen zur Regenwasserbehandlung. Hrsg.: Förderverein der Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft an der Universität GH Essen, SIWAWI e.V. 1997. Heft 10
IWB (2002)	Witte, H.; Strunkheide, J.; Seibert, M.: Verfahren zur exakten Volumenstrommessung bei Regenwasserbehandlungsanlagen. Abschlussbericht. Hrsg.: Institut Wasser und Boden e.V. St. Augustin, 2002.
JACOBS u. SLUIS (1992)	Jacobs, E.; von Sluis, J.W.: Sewers an the quality of canals and ditches in Amsterdam. International conference on Sewage into 2000, 31 August – 4 September 1992
KOLB (2001)	Kolb, F.R.: Rundsandfang – Simulation und praxisorientierte Auslegung. wwt awt, (2001), Nr. 3, S. 16-20.
KRAUTH u. STOTZ (1985)	Kraut, Kh.; Stotz, G.: Minimierung des Schmutzstoffeintrags aus Siedlungsgebieten in Vorfluter. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 624/3-2, Deutsche Forschungsgemeinschaft.
KROPF (1956)	Kropf, A.: Der Absetzvorgang körniger Stoffe. Fortbildungskurs der Eidgen. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz der ETH Zürich.
LANZENDORF (2001)	Lanzendorf, W.: Kontrolle von Durchflussmessenrichtungen. In: Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum. Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum e.V..2000. Band 40. S. 19-32.
MUNLV (1991)	Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Jahresschmutzwassermenge bei Einleitung von mit Niederschlagswasser vermischem Schmutzwasser. RdErl. d. Ministeriums für Umwelt, Raumordnung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. MBl. NW, 1991
OERTEL u. LAURIEN (2003)	Oertel, H.; Laurien, E.: Numerische Strömungsmechanik Grundgleichungen – Lösungsmethoden – Softwarebeispiele. Vieweg Verlag, Braunschweig, 2. Auflage.

- PECHER u. GEURTS (2000) Pecher, K. H.; Geurts, S.: Messen von Wasserständen und Abflüssen in der Kanalisation. In: Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum. Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum e.V..2000. Band 38.
- SCHEER u. SCHILLING (2003) Scheer, M.; Schilling, W.: Einsatz von Online-Messgeräten zur qualitativen Beurteilung von Mischwasserabflüssen für Zwecke der Kanalnetzsteuerung (ONMEKA). Hrsg.: Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV). 2000
- SCHMITT (1996) Schmitt, T.G.: Dezentrale Maßnahmen zur Reduzierung des Regenwasserabflusses in der Kanalisation. In: Wechselwirkungen zwischen Einzugsgebiet und Kläranlage. Hrsg.: Institut für Siedlungswasserwirtschaft Universität Karlsruhe (TH). 1996. Band 78
- SIEKER (1991) Sieker, F.: Einwendungen zum Weißdruck-Entwurf des ATV-Arbeitsblattes A 128. Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Hannover, (1991), Heft 17, S. 165-167
- SüwV Kan (1995) Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal) „SüwV Kan“ Inkrafttreten am 1. Januar 1996, Wasserrecht Nordrhein-Westfalen
- THÖLE (1998) Thöle, D.: Minimierung der Gesamtemissionen aus Kanalnetz und Kläranlage durch Einsatz dynamischer Simulation. Dissertation, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Hannover
- UHL (2002) Uhl, M.: Messabweichungen und Messfehler. In: Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum. Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum e.V..2000. Band 38. S. 89-106.
- WEILAND, HOPPE, ORTH (2002) Weiland, M.; Hoppe, H.; Orth, H.: Immissionsorientierte Gewässersanierungskonzeption für das Entwässerungsgebiet Odenthal. In: Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum. Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr-Universität Bochum e.V..2002. S. 135-152.

A N H A N G

ABLAUFDIAGRAMME DER STEUERUNGSSTRATEGIEN

Ablaufdiagramm der volumetrischen Steuerungsstrategie

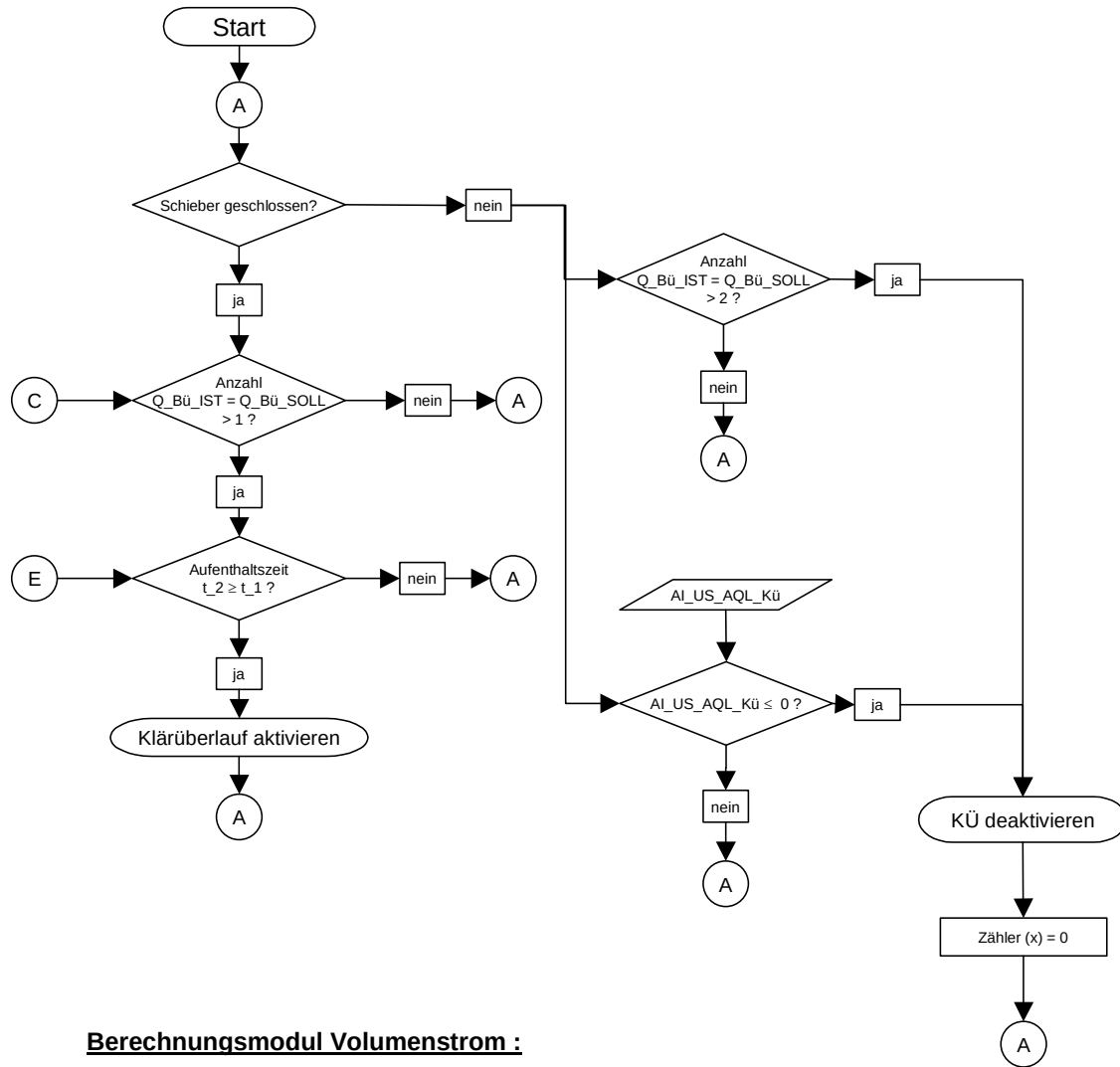
Ablaufdiagramm der Konzentrationssteuerung

Ablaufdiagramm der kombinierten Steuerungsstrategie

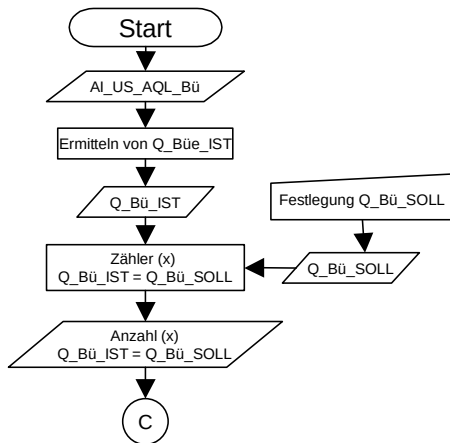
SKIZZE DER MESSSTELLENVERTEILUNG IM FANGBECKEN „WEIDENSTRASSE“

ABLAUFDIAGRAMME DER STEUERUNGSSTRATEGIEN

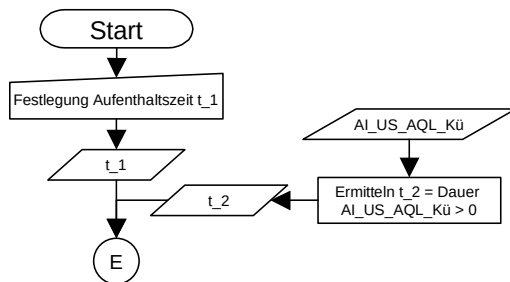
Ablaufdiagramm der volumetrischen Steuerungsstrategie



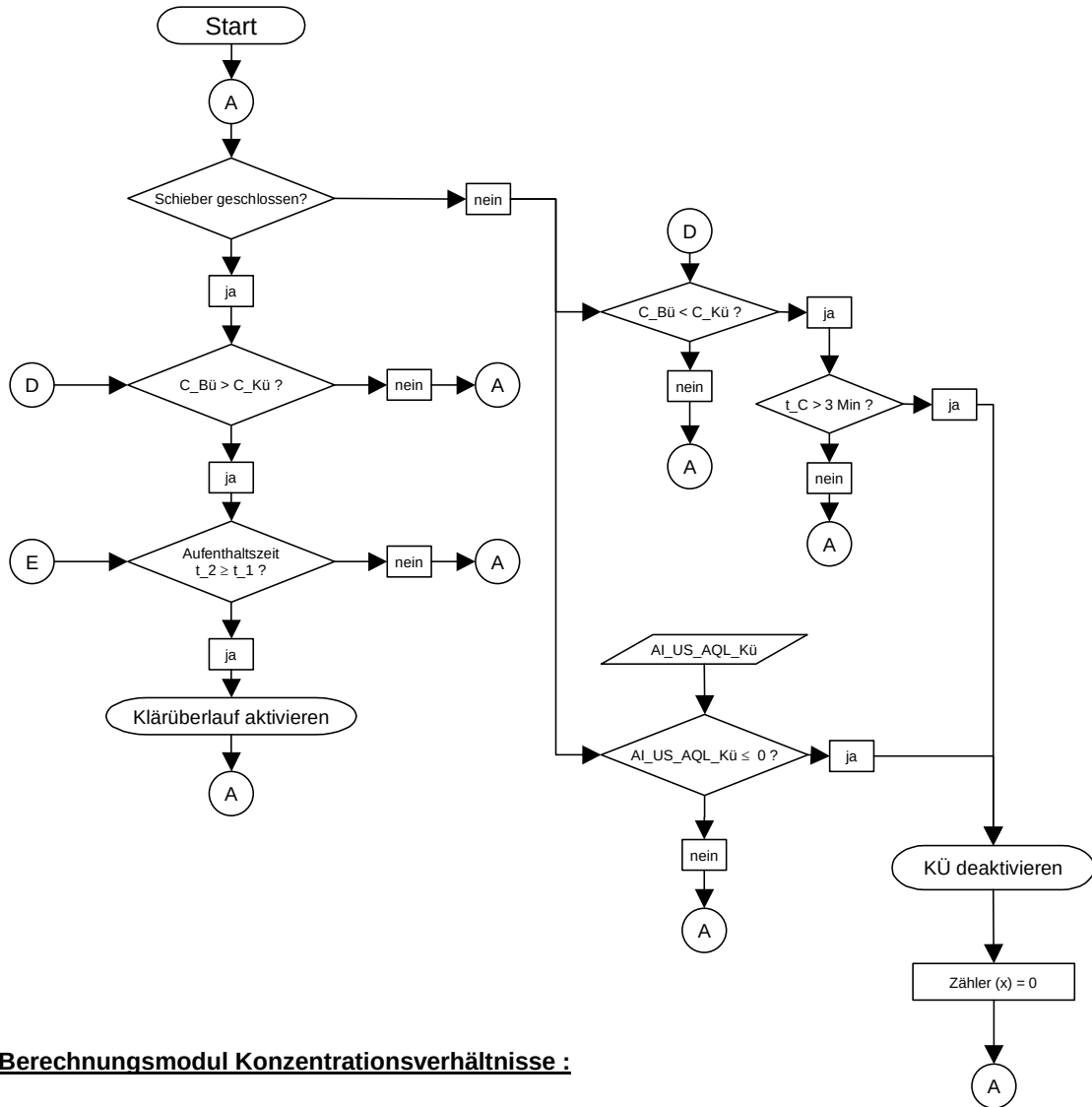
Berechnungsmodul Volumenstrom :



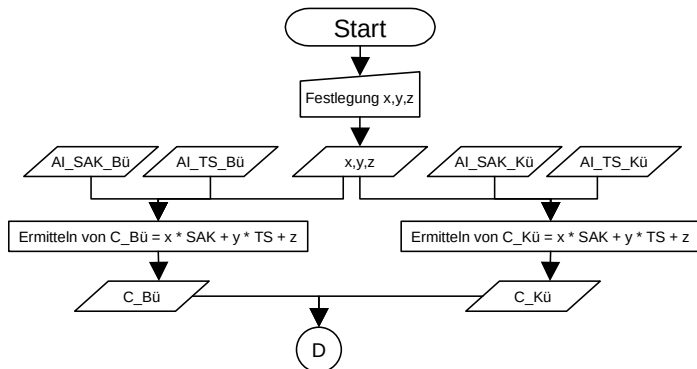
Berechnungsmodul Aufenthaltszeit :



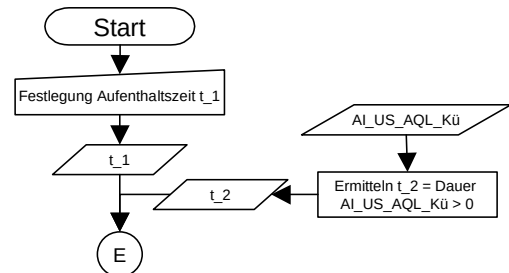
Ablaufdiagramm der Konzentrationssteuerung



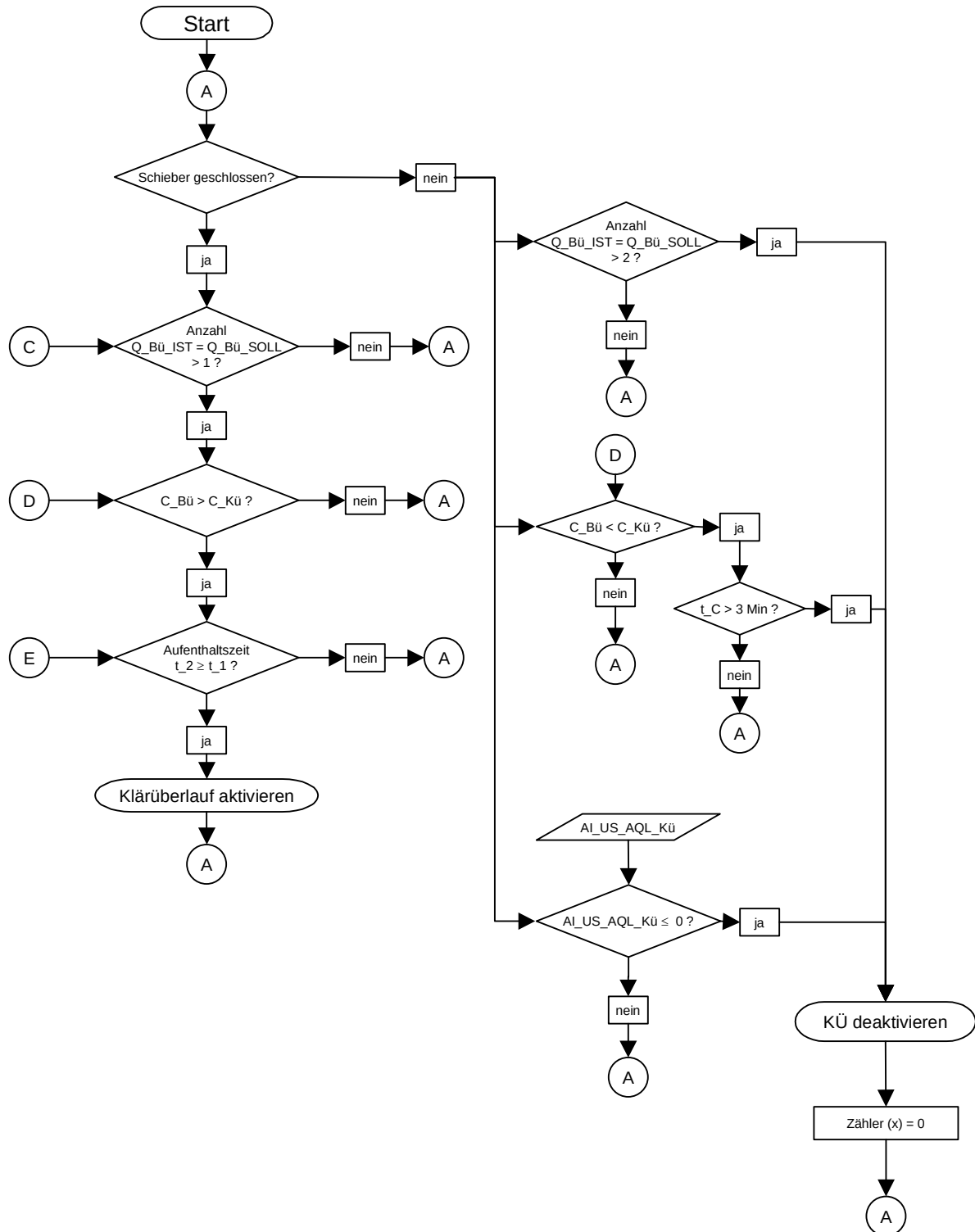
Berechnungsmodul Konzentrationsverhältnisse :



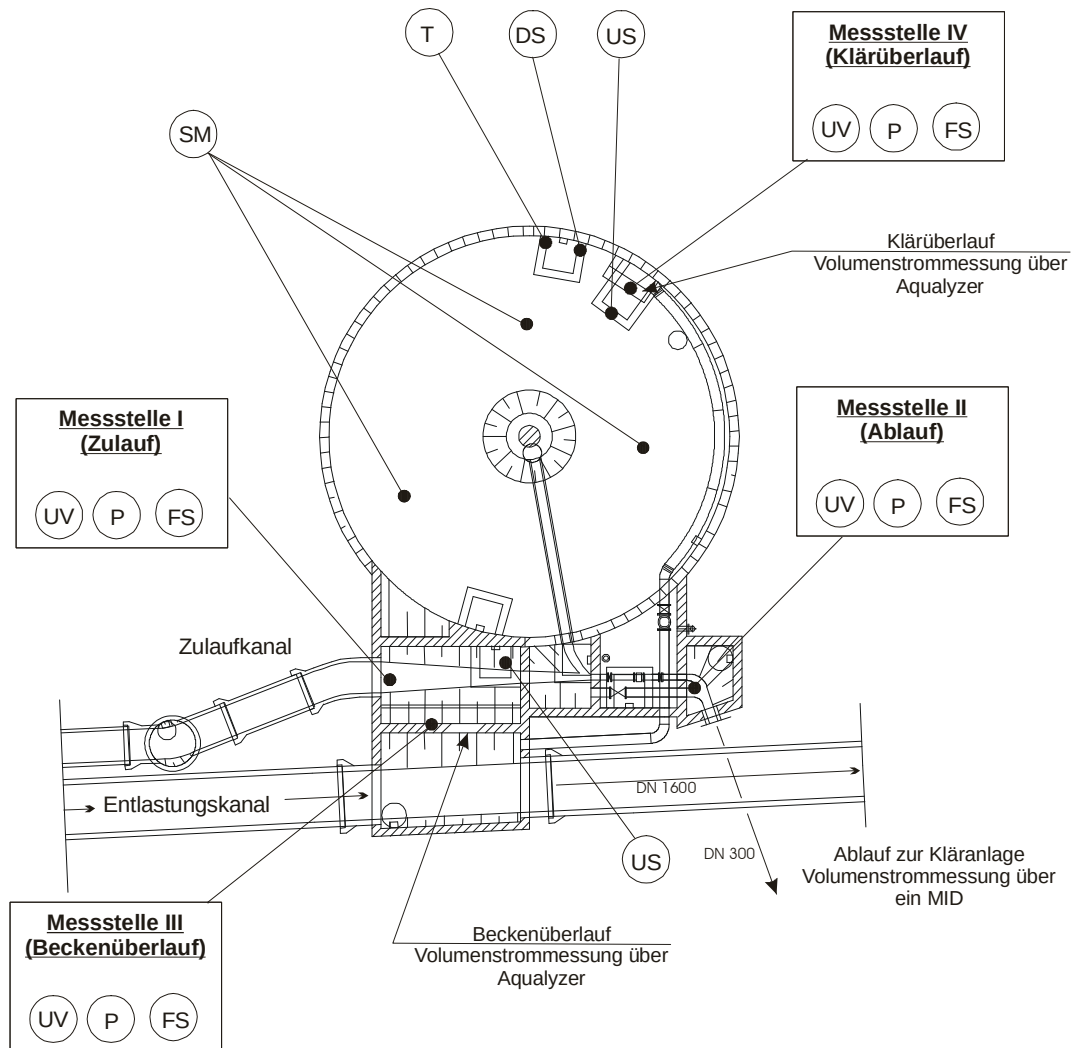
Berechnungsmodul Aufenthaltszeit :



Ablaufdiagramm der kombinierten Steuerungsstrategie



SKIZZE DER MESSSTELLENVERTEILUNG IM FANGBECKEN „WEIDENSTRASSE“



- UV = UV-Adsorptionsmessung (SAK)
- FS = Feststoffmessung (TS)
- P = Probennehmer
- US = Ultraschallhöhenmessung
- DS = Drucksonde (Füllstandsmessung)
- SM = Schlammspiegelmessung
- T = Temperaturmessung