

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Anwendung von Flockungsverfahren bei der Regenwasserbehandlung

von

K.H. Kraut, O. Bondareva

Universität Stuttgart

Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft

Förderkennzeichen: PA 97.189

Die Arbeiten des Projektes "Wasser, Abfall, Boden" wurden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Februar 2000

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
-----------------------------	---

Tabellenverzeichnis

VIII

1	Einleitung.....	1
1.1	Hintergrund.....	1
1.2	Problematik.....	2
2	Derzeitige Regenwasserbehandlung im Mischsystem.....	5
2.1	Verschmutzungen des Mischwassers.....	5
2.2	Ausführungsformen.....	6
2.3	Stoffrückhalt	7
3	Maßnahmen zur Verbesserung der Regenwasserbehandlung	11
4	Fällung und Flockung.....	13
4.1	Bedeutung des Verfahrens.....	13
4.2	Chemische Grundlage	14
4.3	Verfahrenstechnische Grundprinzipien.....	17
4.4	Zur Fällung und Flockung der Regenabflüsse	18
4.4.1	Allgemeines.....	18
4.4.2	Bisherige Untersuchungen	19
5	Konzeption der eigenen Untersuchungen	23
5.1	Ziele der Arbeit.....	23
5.2	Projektbearbeitung.....	23
6	Untersuchungen zum Absetzverhalten der Inhaltstoffen im Mischwasser bei der Fällung und Flockung.....	25
6.1	Allgemeines.....	25
6.2	Derzeitiger Kenntnisstand	25

6.3	Überlegungen zur Durchführung der Untersuchungen.....	28
6.4	Methodik und Analytik.....	28
6.5	Durchgeführte Untersuchungen	30
6.6	Darstellung der Ergebnisse.....	31
6.7	Beurteilung der Ergebnisse.....	33
6.8	Schlußfolgerungen und Diskussion.....	36
7	Experimentelle Untersuchungen zur Fällung und Flockung an einem Durchlaufbecken...	39
7.1	Überlegungen zur Durchführung der Untersuchungen.....	39
7.2	Beschreibung der Versuchsanlage	40
7.3	Durchführung der Untersuchungen.....	42
7.4	Messung und Analytik.....	42
7.5	Flockenbildung bei verschiedenen hydraulischen Bedingungen.....	43
7.5.1	Allgemeines.....	43
7.5.2	Darstellung der Ergebnisse	44
7.5.3	Beurteilung der Ergebnisse	46
7.6	Einfluß der Flächenbeschickung auf die Schmutzstoffelimination	47
7.6.1	Allgemeines.....	47
7.6.2	Darstellung der Ergebnisse	48
7.6.3	Beurteilung der Ergebnisse	53
7.7	Schmutzstoffverteilung im Becken	56
7.7.1	Allgemeines.....	56
7.7.2	Darstellung der Ergebnisse	58
7.7.3	Beurteilung der Ergebnisse	59
7.8	Zusammenfassende Interpretation.....	61
7.9	Schlußfolgerungen und Diskussion.....	62
8	Experimentelle Untersuchungen zur Fällung und Flockung mit Lamelleneinbau.....	63
8.1	Allgemeines	63
8.2	Theoretische Auslegung des Lamellenabscheiders	64
8.3	Durchführung der Untersuchungen.....	66
8.4	Lamellen Typ FS 41.80	68
8.4.1	Darstellung der Ergebnisse	68
8.4.2	Beurteilung der Ergebnisse	74
8.5	Lamellen Typ DH 50.....	78
8.5.1	Darstellung der Ergebnisse	78
8.5.2	Beurteilung der Ergebnisse	79

8.6	Zusammenfassende Interpretation.....	83
8.7	Schlußfolgerung und Diskussion	84
9	Instrumente zur technischen Realisierung	87
9.1	Chemikaliendosierung.....	87
9.2	Verfahrenstechnische Auslegung des Lamellenabscheiders	90
9.3	Wartung und Betrieb	92
9.4	Schlammabtransport über die Drossel.....	94
10	Wirtschaftliche Aspekte der Mischwasserbehandlung	97
10.1	Vorgehensweise	97
10.2	Aktueller Stand der Mischwasserbehandlung.....	97
10.3	Mischwasserbehandlung mittels Fällung/Flockung inkl. Lamelleneinbau	100
10.4	Zusammenfassende Interpretation.....	105
11	Zusammenfassung und Ausblick	109
	Danksagung.....	115
	Literaturverzeichnis.....	117
	Anlagen	121

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Emissionen in den Vorfluter bei Entwässerung im Mischverfahren	2
Abb. 2:	Abhängigkeit des Stoffaustrags aus Regenüberlaufbecken in das Gewässer vom spezifischen Speichervolumen nach KRAUTH & STOTZ (1985)	8
Abb. 3:	Partikelgrößen und ihre Sedimentationszeiten im Wasser nach JEKEL (1985).....	13
Abb. 4:	Ablauf der Fällung und Flockung in der Wasserreinigung nach HAHN (1987)	16
Abb. 5:	Absetzgeschwindigkeit der Partikel im Mischwasser nach BROMBACH et al. (1993)	26
Abb. 6:	Schlammanfall bei der Wasserreinigung mittels Fällung und Flockung nach HAHN (1987)	27
Abb. 7:	Vergleich des Absetzverhaltens der Partikel im Mischwasser ohne und mit Fällung/Flockung: links - mit Fällung/Flockung, rechts - ohne Fällung/Flockung...	29
Abb. 8	Schema des Apparates zur Bestimmung der Absetzgeschwindigkeit der Partikel nach BROMBACH et al. (1993)	30
Abb. 9:	V Versuchsergebnisse zum Absetzverhalten der geflockten Partikel im Mischwasser: a - Absetzvolumen, b - Trockensubstanz, c - Wassergehalt und Glühverlust	33
Abb. 10:	Summenhäufigkeitsverteilung der Absetzgeschwindigkeiten der geflockten Partikel im Mischwasser: a - Absetzvolumen, b - Trockensubstanz.....	35
Abb. 11:	Theoretische Rückhalterate eines Durchlaufbeckens bei der Fällung/Flockung.....	35
Abb. 12:	Anordnung der Versuchsanlage auf dem Gelände des KW Stuttgart-Büsnau	39
Abb. 13:	Schema der halbtechnischen Versuchsanlage	40
Abb. 14:	Trübungsabnahme in den aus dem Rohrflocker bei verschiedenen Zuflüssen entnommenen Wasserproben	45
Abb. 15:	Ergebnisse der Versuchsreihe vom 29.08.1997 mit ansteigenden Zuflüssen: a - abfiltrierbare Stoffe; b - DOC	49
Abb. 16:	Ergebnisse der Versuchsreihe vom 13.09.1997 mit abnehmenden Zuflüssen: a - abfiltrierbare Stoffe; b - DOC	49

Abb. 17:	Schmutzstoffelimination in Abhängigkeit von der Beschickungsdauer in der Versuchsreihe vom 29.08.1997: a - abfiltrierbare Stoffe; b - DOC; c - CSB.....	51
Abb. 18:	Schmutzstoffelimination in Abhängigkeit von der Beschickungsdauer in der Versuchsreihe vom 13.09.1997: a - abfiltrierbare Stoffe; b - DOC; c - CSB.....	52
Abb. 19:	Abhängigkeit der Schmutzstoffkonzentration im Klärüberlauf von der Flächenbeschickung: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB; c - DOC	54
Abb. 20:	Vergleich der erzielten CSB-Elimination mit den Literaturangaben.....	56
Abb. 21:	Weg eines Partikels durch ein rechteckiges Durchlaufbecken	57
Abb. 22:	Verteilung der Feststofffracht im Durchlaufbecken (während der Überlaufdauer) bei der Fällung/Flockung ohne Lamellen bei unterschiedlichen Flächenbeschickungen	60
Abb. 23:	Prinzip der Betriebsweise von Lamellenabscheidern nach SCHADE & SAPULAK (1984)	63
Abb. 24:	Weg eines Partikels durch die Absetzebenen.....	65
Abb. 25:	Abscheiderfläche der Lamellen.....	65
Abb. 26:	Form der getesteten Lamellen	67
Abb. 27:	Schema der erweiterten Versuchsanlage.....	67
Abb. 28:	Zusammenstellung aller Versuchsergebnisse mit Lamellen FS 41.80	73
Abb. 29:	Erzielte Klärüberlaufqualität bei Einbau der Lamellen FS 41.80 und Vergleich mit den Untersuchungen ohne Lamellen: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB	74
Abb. 30:	Erzielter Stoffrückhalt in den Versuchen mit Lamellen FS 41.80 und Vergleich mit den Untersuchungen ohne Lamellen :a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB.....	76
Abb. 31:	Beschaffenheit des Drosselabflusses in den Versuchen mit Lamellen FS 41.80 und Vergleich mit den Ergebnissen ohne Lamellen: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB ...	77
Abb. 32:	Zusammenstellung maximaler und minimaler Konzentrationswirkungsgrade bei dem Lamelleneinsatz: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB.....	79
Abb. 33:	Vergleich der Klärüberlaufqualität bei dem Einsatz der getesteten Lamellen: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB	80

Abb. 34:	Erzielter Stoffrückhalt (mit Angaben über den Drosselaustrag) bei praxisnahen Bedingungen mit Lamellen DH 50: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB	81
Abb. 35:	Beschaffenheit des Drosselabflusses bei praxisnahen Bedingungen mit Lamellen DH 50: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB.....	83
Abb. 36:	Beispielhafte Darstellung der Chemikalienzugabe an einem Durchlaufbecken	87
Abb. 37:	Überlegungen zum Beginn der Chemikalienzugabe in einem Durchlaufbecken.....	89
Abb. 38:	Zu erwartende Reduzierung der jährlichen direkten Gewässerbelastung durch Fällung und Flockung des Mischwassers	89
Abb. 39:	Anordnung des Lamellenabscheiders im Durchlaufbecken	92
Abb. 40:	Beispielhafte Darstellung der Flächenbeschickung innerhalb des Überlaufes eines Durchlaufbeckens: a - während warmer Jahreszeit; b- während kalter Jahreszeit	95
Abb. 41:	Kosten der Feststoffentnahme bei der aktuellen Mischwasserbehandlung	99
Abb. 42:	Kosten der Feststoffentnahme bei der Mischwasserbehandlung mittels Fällung/Flockung inkl. Lamellen	104
Abb. 43:	Kostenvergleich der Mischwasserbehandlung mittels Fällung/Flockung inkl. Lamellen mit aktueller Behandlung nach ATV-ARBEITSBLATT A-128 (1992)	105

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Literaturangaben über die Beschaffenheit der Mischwasserabflüssen	5
Tab. 2:	Literaturangaben über den Schwermetallgehalt in Mischwasserabflüssen	6
Tab. 3:	Mittlere Konzentrationen und Konzentrationswirkungsgrade η_c in Durchlaufbecken bei Mischwasserzufluß nach BROMBACH & MICHELBACH (1997).....	9
Tab. 4:	Zusammenstellung der Anlagen und der Verfahrenstechniken zur Behandlung der Regenabflüssen nach HÜBNER (1997).....	11
Tab. 5:	Zusammenfassung der Mechanismen zur Entstabilisierung der Suspensa nach KLUTE zitiert bei KARGIOS (1982).....	15
Tab. 6:	Verfahrensschritte der Fällung/Flockung nach DVGW-MERKBLATT W 217 (1987)	17
Tab. 7:	Beschaffenheit des analysierten Mischwassers bei Untersuchungen zum Absetzverhalten der geflockten Partikel	31
Tab. 8:	Einfluß der Fällung/Flockung auf den Schlammanfall im Mischwasser - Ergebnisse der Laborversuche.....	31
Tab. 9:	Basisdaten zur Dimensionierung des Rohreaktors.....	41
Tab. 10:	Abmessungen des Versuchsbeckens	41
Tab. 11:	Analytische Methoden und verwendete Meßgeräte.....	43
Tab. 12:	V Versuchsergebnisse der Sedimentation von Wasserproben aus dem Rohrflocker....	45
Tab. 13:	Vergleich der Versuchsbedingungen zur Flockenbildung mit den Literaturangaben	47
Tab. 14:	Ergebnisse der Versuchsreihe vom 12.12.1997	53
Tab. 15:	Konzentrationswirkungsgrade des Versuchsbeckens ohne Lamelleneinbau	55
Tab. 16:	Ergebnisse der Untersuchungen zur Schmutzstoffverteilung im Becken	58
Tab. 17:	Hydraulische Verhältnisse bei der Versuchsdurchführung zur Untersuchung der Schmutzstoffverteilung im Becken	59
Tab. 18:	Technische Charakteristik der getesteten Lamellen.....	66
Tab. 19:	Angabe zur Versuchsdurchführung mit Lamellen FS 41.80	68
Tab. 20:	Erzielte Konzentrationswirkungsgrade - Ergebnisvergleich ohne und mit Lamellen.....	75
Tab. 21:	Untersuchungen zum Einsatz der Lamellen DH 50 - Versuchsergebnisse	78

Tab. 22:	Beginn der Chemikalienzugabe in einem Durchlaufbecken.....	90
Tab. 23:	Kostenübersicht über die konventionelle Mischwasserbehandlung.....	98
Tab. 24:	Betriebskosten zur Fällung/Flockung des Mischwassers	101
Tab. 25:	Investitionen für den Lamelleneinsatz in einem Durchlaufbecken	102
Tab. 26:	Kostenübersicht über die Fällung/Flockung inkl. Lamellen in Durchlaufbecken.....	103
Tab. 27:	Vergleich der einwohnerbezogenen Kosten der Regenwasserbehandlung mittels Fällung/Flockung inkl. Lamellen bei V_s von 12-30 m ³ /ha mit konventioneller Behandlung bei V_s von 40 m ³ /ha.....	106

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Infolge des heutigen hohen Bebauungsgrades von Siedlungsflächen muß der größte Teil der anfallenden Niederschläge künstlich abgeleitet werden.

Die Entwässerung in Deutschland erfolgt vorwiegend mittels Mischverfahren: sowohl häusliches, gewerbliches und industrielles Schmutzwasser als auch der Regenabfluß von Dach- und Verkehrsflächen werden gemeinsam in einem Mischwasserkanal in der Regel im freien Gefälle aus dem Einzugsgebiet zur Kläranlage abgeleitet.

Um die stoffliche Belastung der Gewässer bei Regen zu vermindern, wird der erste Teil des hoch verschmutzten Mischwassers in den im Kanalnetz angeordneten Regenüberlaufbecken bzw. Stauraumkanälen zwischengespeichert. Nur die nachfolgenden Zuflüsse werden über die Entlastungsbauwerke in den Vorfluter geleitet. Als erste Richtlinie für die Regenwasserbehandlung im Mischsystem diente das ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1977).

Um die Behandlung der Regenabflüsse zu verbessern, erschien im Jahr 1992 eine neue Fassung des ATV-ARBEITSBLATTES A 128. In dieser Fassung wird in Abhängigkeit von der Gewässersituation zwischen dem Normalfall und weitergehenden Anforderungen unterschieden. Neben der Zwischenspeicherung schreibt sie die klärtechnischen Maßnahmen vor der Einleitung in den Vorfluter vor und gibt neue Bemessungsvorgaben für die Regenüberlaufbecken.

Durch den Einbau von Durchlaufbecken in das Kanalnetz, die eine mechanische Reinigung des Entlastungsabflusses bewirken, läßt sich die in die Gewässer ausgetragene Fracht reduzieren. Nach letzten Erkenntnissen (SCHÄFER et al. (1997)) sollte jedoch das Sedimentationspotential von Durchlaufbecken weiter ausgeschöpft werden, um die gesamte Mischwasserbehandlung zu verbessern. Für einen effektiven Gewässerschutz reicht es nicht aus, nur das der Kläranlage zugeführte Abwasser weitergehend zu reinigen, sondern auch die Stofffracht aus Regenwasserentlastungen muß minimiert werden.

Mit diesem Forschungsvorhaben wurde im halbtechnischen Maßstab die Verbesserung des Stoffrückhaltes von Durchlaufbecken mittels Flockungsverfahren ohne und mit Lamelleneinbau zur Optimierung der Partikelabscheidung untersucht.

1.2 Problematik

In Deutschland werden die Siedlungsflächen zum großen Teil im Mischverfahren entwässert. Auf den Vorfluter wirkt dabei die Summe der Einzelemissionen aus den Kläranlagenabläufen (indirekte Gewässerbelastung) und aus den Regenwasserentlastungen (direkte Gewässerbelastung) (Abb. 1).

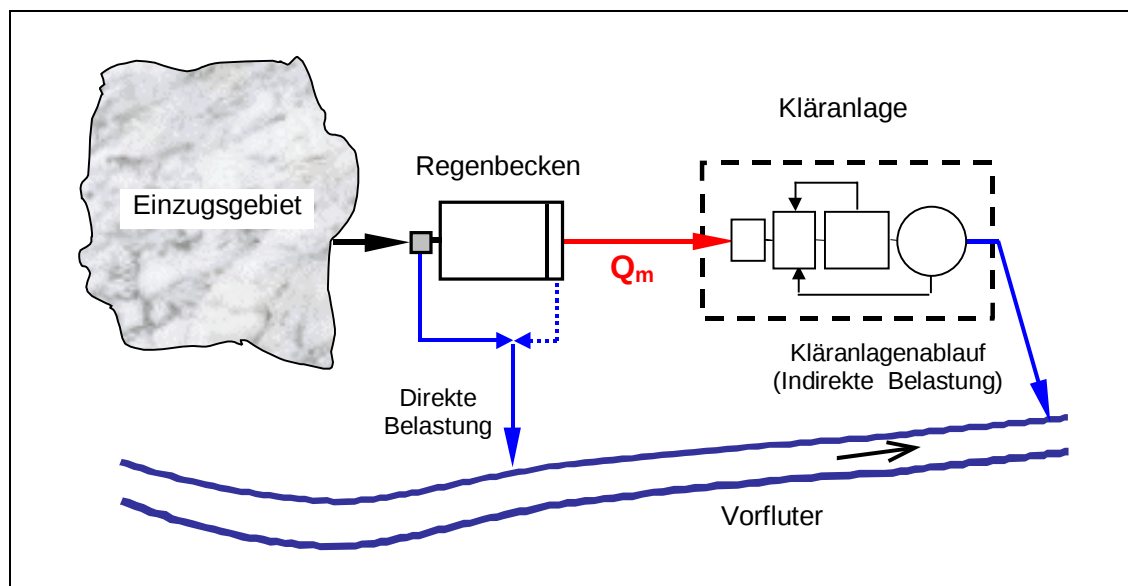


Abb. 1: Emissionen in den Vorfluter bei Entwässerung im Mischverfahren

Die bei Regen im Kanal abgeleiteten Abflüsse führen oft hohe Schmutzfrachten mit. Der erste Teil des stark verschmutzten Mischwassers wird heute im Kanalnetz zwischengespeichert und danach auf der Kläranlage gereinigt. Jedoch können während eines Überlaufereignisses durch Entlastung der darauffolgenden Zuflüsse ohne bzw. nur mit mechanischer Behandlung die von Kläranlagen in den Vorfluter ausgehenden Stofffrachten um ein mehrfaches überschritten werden.

Die neue Fassung von ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) definiert die Aufgabe der Regenwasserbehandlung im Mischsystem folgendermaßen: den Regenabfluß zur Kläranlage so zu begrenzen, daß der dort gewählte Bemessungszufluß nicht überschritten wird und gleichzeitig die stoßweise Belastung des Gewässers aus Regenentlastungen in der vertretbaren Grenze bleibt.

Nach den gegebenen Möglichkeiten sieht diese Richtlinie drei Maßnahmen zur Behandlung der Regenabflüsse vor:

- Zwischenspeicherung von Mischwasser und nachfolgende Reinigung in einer Kläranlage
- Umleitung der Regenabflüsse im Kanalnetz mit dem Ziel einer optimierten Nutzung von vorhandenen Speichervolumen
- Durchführung von klärtechnischen Maßnahmen

Bei den ersten beiden Maßnahmen erfolgt eine Verminderungen des Volumens der Entlastungsabflüsse. Mit dem Ableiten größerer Mischwasservolumina mit zugehöriger Stofffracht zu Kläranlagen verringern sich die Gesamtemissionen in den Vorfluter.

Die heute angewandte Zwischenspeicherung von Mischwasser erfolgt in Regenbecken (vgl. 2.2). Dadurch werden die über die Entlastungsbauwerke ausgetragenen Frachten wesentlich vermindert. Hinsichtlich der gesamten Frachten aus dem Mischsystem muß jedoch die heutige Zwischenspeicherung verbessert werden. Eine Vergrößerung der Speicher bewirkt nur eine unwesentliche Verbesserung (KRAUTH & STOTZ (1985), PECHER (1987)) und führt zu einer deutlichen Kostensteigerung. Denkbar ist eine dynamische Koppelung der Regenwasserbehandlung und der Kläranlage (BRUNS (1999), SEYFRIED & THÖHLE (1999)). Die Weiterführung eines erhöhten Mischwasserzuflusses bei Regenwetter zur Kläranlage hat eine Steigerung der Gesamtwirkung der Mischwasserbehandlung zur Folge.

Eine bessere Nutzung der vorhandenen Speichervolumina durch die Umleitung von Regenabflüssen im Kanalnetz beschränkt sich auf große Netze mit unterschiedlichen Auslastungen in einzelnen Teileinzugsgebieten bzw. Niederschlagsgeschehen. Diese Maßnahme benötigt ein zielgerichtetes Abflußsteuerungssystem und kommt nur im Rahmen einer Kanalnetzbewirtschaftung in Anwendung.

Die klärtechnischen Maßnahmen zielen auf Verminderung der Stofffrachten in den Entlastungsabflüssen, deren Wasservolumina unveränderbar sind.

Aufgrund der periodischen Zuflüsse und großen Schwankungen der Wassermenge und Wasserbeschaffenheit ist es generell nicht möglich, auf das Speichervolumen zu verzichten. Prinzipiell können im Anschluß an die Speicherung viele Möglichkeiten angewendet werden:

- mechanische Verfahren (Absetzen, Skimmen, Schwer- und Leitstoffabscheider, Sieben, Rechen, Filtern, hydrodynamische Abscheider etc.)
- physikalisch-chemische Verfahren (Fällung, Flockung, Flotation etc.)
- chemische bzw. biochemische Verfahren (Oxidation, Inkorporation etc.)
- physikalisch-biologische Verfahren (Bodenfilter, Abwasserteiche etc.).

Obwohl einige Maßnahmen eine höhere Reinigungswirkung erreichen, können diese wegen der wesentlich höheren Kosten kaum in Frage kommen. Es muß beim Mischverfahren das primäre Ziel sein, eine ökonomische Lösung der Problemstellung unter Berücksichtigung der ökologischen Anforderungen zu finden. Auf der Suche nach einer Lösung müssen zuerst die Verfahren in Betracht gezogen werden, durch die die bereits vorhandenen technische Einheiten optimiert werden können. Dabei entstehen keine wesentlichen Investitionskosten.

Heute erfolgt eine mechanische Klärung des direkt entlasteten Mischwassers in Durchlaufbecken. Infolge einer beschränkten Sedimentationsleistung gewährleisten diese Becken nur eine mechanische Teilreinigung (KRAUTH (1984), BROMBACH & MICHELBAACH (1997)). Hier werden keinesfalls ähnlich hohe Rückhalteraten wie im Vorklärbecken erzielt. Bezogen auf die gesamte jährliche Fracht aus Kläranlage und Regenwasserentlastungen kann laut SCHÄFER ET AL. (1997) die aus Durchlaufbecken in das Gewässer ausgetragenen Frachten während der Überlaufdauer mit etwa 50 % eingeschätzt werden.

Eine Maßnahme, die die Sedimentationsleistung von Durchlaufbecken erhöhen kann, ist die Fällung und Flockung. Das Verfahren hat neben der Verbesserung der Feststoffabtrennung insbesondere Auswirkungen auf die Elimination von CSB, Phosphatverbindungen und Schadstoffen. In der hier dargestellten Arbeit wurde der Einsatz der Fällung und Flockung inkl. Abscheidung der gebildeten Partikel mit Lamellen in einem nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) ausgelegten Durchlaufbecken untersucht.

2 Derzeitige Regenwasserbehandlung im Mischsystem

2.1 Verschmutzungen des Mischwassers

Das Mischwasser enthält Verschmutzungen verschiedener Herkunft, die in fünf Gruppen unterteilt werden können: die atmosphärischen Schmutz- und Schadstoffe, die mit dem Regenabfluß an der Oberfläche des Einzugsgebietes aufgenommenen Stoffe, die Stoffe aus dem Trockenwetterabfluß, die resuspendierten Stoffe aus den Kanalablagerungen und die Stoffe aus der erodierten Sielhaut.

Die Höhe und Art der Belastung hängt von den Eigenschaften des Entwässerungsgebiets, Regencharakteristik, Mischungsverhältnissen zwischen Regen-, Schmutz- und Fremdwasser, Selbstreinigungsvermögen des Kanalnetzes usw. ab und kann großen Schwankungen unterliegen. Größe und Struktur des Gebiets beeinflussen die Bildung des Spülstoßes maßgeblich. In den Gebieten mit maximaler Fließzeit von 15 min ist der Spülstoß in der Regel stärker ausgeprägt als bei großen Gebieten. Ein Überblick über einige Meßergebnisse der in Deutschland beprobten Mischsysteme gibt Tab. 1.

Tab. 1: Literaturangaben über die Beschaffenheit der Mischwasserabflüssen

Autor	Abfiltrierbare Stoffe in mg/l	CSB (BSB ₅) in mg/l	NH ₄ -N in mg/l	NO _x -N in mg/l	Ges-P in mg/l
KRAUTH (1970)	174	(114)	-	-	-
HARREMOËS & JOHANSEN (1986)	41-469	36-462	2,5	1,4	1,1-7,4
GEIGER (1990)	55-177	79-275	3,8-8,6	0,4	1,2-4,3
BROMBACH & MICHELBACH (1997)	141-263	64-165	2,4-5,5	0,6-1,5	-

In den bisherigen Untersuchungen (z.B. KARI et al. (1989), BROMBACH et al. (1992), SCHÄFER et al. (1997)) wurde auch nachgewiesen, daß der Mischwasserabfluß aus den städtischen Einzugsgebieten anthropogene Schadstoffe aufweisen kann. Die Herkunft dieser Verschmutzungen ist in der Regel auf verkehrsbedingte Emissionen zurückzuführen. Tab. 2 zeigt beispielhaft die Konzentrationen an Schwermetallen für zwei Mischkanalisationen in Deutschland (Bayreuth (KARI et al. (1989)) und Bad Mergentheim (BROMBACH et al. (1992))). In der Sielhaut der vornehmlich mit häuslichem Abwasser betriebenen Mischkanalisation von Bad Mergentheim wurden von den Autoren auch 14 verschiedene PAK-Verbindungen gefunden.

Tab. 2: Literaturangaben über den Schwermetallgehalt in Mischwasserabflüssen

Parameter	Autor	Maximal in µg/l	Minimal in µg/l	Mittel in µg/l
Pb	KARI et al. (1989)	66,3	29	53
	BROMBACH et al. (1992)	213,6	11,9	83
Cu	KARI et al. (1989)	114,3	31,1	74
	BROMBACH et al. (1992)	136,2	26,6	96
Cd	KARI et al. (1989)	2,36	0,79	1,46
	BROMBACH et al. (1992)	4,7	0,7	1,9
Zn	KARI et al. (1989)	1504	373	953
	BROMBACH et al. (1992)	1430	411	952

2.2 Ausführungsformen

Die heutige Regenwasserbehandlung im Mischsystem erfolgt in Form von Regenüberlaufbecken (RÜB), zu denen auch Stauraumkanäle (SK) zählen, und Regenrückhaltebecken (RRB). Regenrückhaltebecken speichern für das Bemessungsereignis den gesamten Mischwasserabfluß aus dem Einzugsgebiet ohne Bauwerksüberlastung zwischen und geben ihn verzögert an die Kläranlage ab. Regenüberlaufbecken fangen aufgrund vorhandener Speicherkapazität einen Teil des Mischwassers aus dem Einzugsgebiet ab, und danach werden weniger verschmutzte Zuflüsse über ein Entlastungsbauwerk in den Vorfluter entlastet. Gleichzeitig dienen RÜB als Puffer zum Ausgleich des zufließenden Mischwassers mit langsamer, zeitlich verteilter Abgabe an die Kläranlage. Schätzungsweise 12000 bis 15000 Regenüberlaufbecken sind heute in Deutschland im Betrieb.

Regenüberlaufbecken werden als Fangbecken (FB), Durchlaufbecken (DB) und Verbundbecken (VB) (Kombination aus Fang- und Durchlaufbecken) ausgeführt. Die Funktion von Fangbecken besteht ausschließlich in einer Zwischenspeicherung. Nach Speicherfüllung wird der Entlastungsabfluß über den vor dem Becken angeordneten Überlauf (Beckenüberlauf BÜ) in den Vorfluter eingeleitet. Durchlaufbecken übernehmen neben der Speicherfunktion auch die Klärung für einen Teil des Mischwassers. Während eines Überlaufereignisses wird das Speichervolumen vom Entlastungsabfluß durchflossen und über den am Ende des Beckens angeordneten Klärüberlauf (KÜ) entlastet. Der Beckenüberlauf springt bei Durchlaufbecken nur dann an, wenn sehr große Mischwasservolumina zufließen. Im Kanalnetz können Regenüberlaufbecken im Haupt- und Nebenschluß (HS und NS) angeordnet werden.

Nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) werden Fangbecken in nicht vorentlasteten Einzugsgebieten mit einer Fließzeit kleiner als 15 min gebaut, da hier ein ausgeprägter Spülstoß erwartet werden kann. In Einzugsgebieten mit längerer Fließzeit bzw. ohne ausgeprägten Spülstoß sind Durchlaufbecken anzuordnen. Um eine Klärung in Durchlaufbecken zu gewährleisten, darf die Oberflächenbeschickung bei einer kritischen Regenspende von 15 l/(s·ha) den Wert von 10 m/h nicht überschreiten. Stauraumkanäle werden bei einem Speichervolumen bis 50 m³ empfohlen. In Abhängigkeit von der Lage der Entlastungsbauwerke unterscheidet man zwischen Stauraumkanälen mit oben liegender Entlastung (SKO) und Stauraumkanälen mit unten liegender Entlastung (SKU). Erstere wirken wie Fangbecken im Hauptschluß, letztere wie Durchlaufbecken im Hauptschluß.

2.3 Stoffrückhalt

Bei der heutigen Mischwasserbehandlung in Regenüberlaufbecken kann der Stoffrückhalt vor dem Gewässer durch drei Komponenten erzielt werden:

- durch Weiterführung eines Volumenstromes über die Drossel,
- durch Zwischenspeicherung eines Teils des Mischwasser (Fangwirkung)
- und durch Reinigung des Entlastungsabflusses

Zur Bestimmung der einzelnen Wirkungen ist es notwendig, die in den entsprechenden Teilsystemen zurückgehaltenen Stofffrachten zu bestimmen. Während der gesamte Wirkungsgrad eines Fangbeckens sich hauptsächlich aus den zwei ersten Komponenten ergibt, sind für Durchlaufbecken alle drei von großer Bedeutung.

Der Gesamtwirkungsgrad berechnet sich aus der zufließenden (F_{Zu}) und entlasteten Fracht ($F_{KÜ}$) wie folgt:

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{F_{Zu} - F_{KÜ}}{F_{Zu}} \cdot 100 \%$$

Neben der zurückgehaltenen Fracht kann die Wirkung von Durchlaufbecken auch auf die Reduktion der Entlastungskonzentrationen mit dem Konzentrationswirkungsgrad η_c beschrieben werden. Der Konzentrationswirkungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der mittleren Entlastungskonzentration ($C_{KÜ}$) und der mittlerem Zulaufkonzentration (C_{Zu}):

$$\eta_c = \frac{C_{Zu} - C_{KÜ}}{C_{Zu}} \cdot 100 \%$$

Der Stoffrückhalt in einem Regenüberlaufbecken hängt von vielen Faktoren ab. Zu den wichtigsten gehören neben der Wasserbeschaffenheit und dem zeitlichen Verlauf der Abfluß- und Schmutzbelastung die Größe des spezifischen Speichervolumens und die Menge des Drosselabflusses. Abb. 2 zeigt die von KRAUTH & STOTZ (1985) ermittelten Stoffeinträge in das Gewässer bei unterschiedlich großen Regenüberlaufbecken. Wie aus dieser Abbildung ersichtlich, werden bei kleineren Beckengrößen wesentlich mehr abfiltrierbare und organische Stoffe ausgetragen als bei größeren Becken. Die ausgetragenen Stickstoff- und Phosphorfrachten ändern sich bei der heute verwendeten Beckengröße von 10 bis 40 m³/ha kaum.

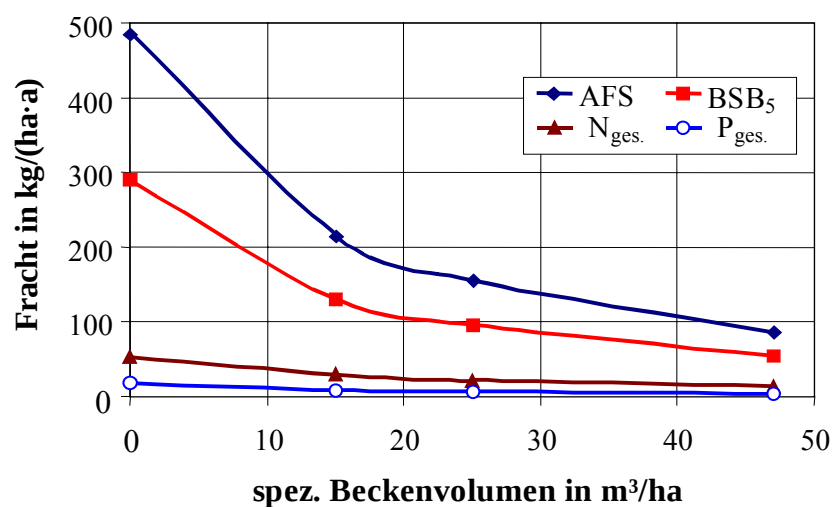


Abb. 2: Abhängigkeit des Stoffaustrags aus Regenüberlaufbecken in das Gewässer vom spezifischen Speichervolumen nach KRAUTH & STOTZ (1985)

Die Menge des über die Drossel abgeleiteten Mischwassers wird in der Regel auf den Bemessungszufluß zur Kläranlage $Q_m = 2 \cdot Q_s + Q_f$ begrenzt. Eine weitere Erhöhung des Drosselabflusses verbessert die gesamte Wirkung der Mischwasserbehandlung, wenn dabei die Kapazität der biologischen Stufe nicht ausgelastet ist. In den Fällen mit Q_m von kleiner als $2 \cdot Q_s + Q_f$ nimmt das Volumen der direkt entlasteten Mischwasser zu, und entsprechend ist eine niedrigere Wirkung zu erwarten.

Die im Rahmen des BMBF-Projektes "NIEDERSCHLAG" durchgeführten stofflichen Messungen an drei Durchlaufbecken und einem Fangbecken in Karlsruhe sowie Auswertungen der an 80 RÜB gemessenen Entlastungstätigkeit (SCHÄFER et al. (1997)) zeigten, daß in einem ordnungsgemäß bemessenen und konstruierten Durchlaufbecken ein guter Stoffrückhalt erreicht werden kann. Hinsichtlich der abfiltrierbaren Stoffe wurde bei kleineren bis mittleren Ereignissen

durchschnittlich ein Frachtrückhalt von 80 % erzielt. Bei einer dauerhaften Beschickung mit q_A von 10 m/h ist mit einer Rückhalterate von 40-50 % zu rechnen. In Bezug auf den CSB ist die Wirkung der Durchlaufbecken begrenzt, da ein Teil des CSB gelöst vorliegt. Bei einem kräftigen Gewitter kann man einen CSB-Frachtrückhalt von etwa 50 % erwarten.

Die erwähnten Rückhalteraten wurden laut vorgenannter Autoren bei hohem Drosselabfluß ($3,7 \cdot Q_s + Q_f$) erzielt. Ohne Berücksichtigung des Drosselabflusses lag die Reinigungsleistung des Beckens durchschnittlich bei 35 %. Fast die Hälfte davon ist auf die Fangwirkung zurückzuführen.

Diese Ergebnisse legen dar, daß die Sedimentationsleistung nicht ausreichend ausgenutzt ist, und daß der Rückhalt von Durchlaufbecken durch eine bessere Sedimentation erhöht werden kann. Aus nachfolgender Tabelle ist ersichtlich, daß heute noch über den Klärüberlauf erhebliche Konzentrationen an abfiltrierbaren Stoffen und CSB entlastet werden.

Tab. 3: Mittlere Konzentrationen und Konzentrationswirkungsgrade η_c in Durchlaufbecken bei Mischwasserzufluß nach BROMBACH & MICHELBAACH (1997)

Parameter	RÜB Neureut			RÜB Etzenrot			RÜB Niederhofen		
	Zulauf	Klär- überlauf	η_c in %	Zulauf	Klär- überlauf	η_c in %	Zulauf	Klär- überlauf	η_c in %
absetzbare Stoffe ml/l	4,2	0,8	80	2,64	1,42	46,3	2,1	0,6	73,2
abfiltrierbare Stoffe in mg/l	263	92	64,8	141,1	111,5	20,9	-	-	-
CSB in mg/l	165	104	37,1	64,3	90,3	-40,4	151,6	95,1	37,3
NH ₄ -N in mg/l	5,46	6,02	-10,3	2,4	2,8	-9,7	2,63	3,02	-14,8
NO ₃ -N in mg/l	0,61	0,56	9,1	1,54	1,69	-9,7	1,19	1,32	-10,6
PO ₄ -P in mg/l	0,77	0,76	0,8	0,24	0,24	1,4	1,2	1,16	3,3

Bezogen auf die gesamte Gewässerbelastung (über den Klärüberlauf, Beckenüberlauf und Kläranlagenablauf) wurde pro Ereignis, z. B., für RÜB Neureut die über den Klärüberlauf entlastete Feststofffracht mit etwa 80 % eingeschätzt. Bezogen auf die Gesamtjahresfracht aus Kläranlage und Regenwasserentlastungen kann man mit etwa 50 % rechnen.

Um einen effektiven Gewässerschutz zu erreichen, muß heute nicht nur die Stofffracht aus Kläranlagen sondern auch aus Regenwasserentlastungen minimiert werden, um die gesamte Wirkung der Mischwasserbehandlung zu verbessern. Eine Möglichkeit stellt die Erhöhung des Sedimentationspotentials von Durchlaufbecken dar.

3 Maßnahmen zur Verbesserung der Regenwasserbehandlung

Aufgrund der periodischen Regenwasserzuflüsse und großen Schwankungen der Wassermenge und Wasserbeschaffenheit ist es generell nicht möglich, bei der Regenwasserbehandlung auf das Speichervolumen zu verzichten. Um die Regenwasserbehandlung zu verbessern, kommen im Anschluß an die Speicherung prinzipiell alle verfahrenstechnischen Möglichkeiten in Frage.

Einen Überblick von Verfahrenstechniken zur Leistungssteigerung von Regenwasserbehandlungsanlagen sowie der verschiedenen Anlagen zur Reinigung von Regen- und Mischwasser ist nach HÜBNER (1997) in nachfolgender Tabelle wiedergegeben.

Tab. 4: Zusammenstellung der Anlagen und der Verfahrenstechniken zur Behandlung der Regenabflüssen 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 Fließquerschnittes (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)				

Obwohl die aufgelisteten Anlagen auch als Einzelmaßnahme möglich sind, werden sie bisher hauptsächlich als weitgehende Maßnahme in Verbindung mit bereits vorhandenen Regenbecken betrachtet. Die Anlagen können zu dem vorhandenen Speichervolumen nach- bzw. vorgeschaltet sein. Da die vorliegende Arbeit sich mit der Verbesserung der Sedimentationsleistung von Durchlaufbecken beschäftigte, werden sie hier nicht erörtert.

Die in Tab. 4 aufgelisteten Verfahrenstechniken, die zur Leistungssteigerung von Anlagen führen, sind für den Zweck dieser Arbeit von Bedeutung.

Fällung und Flockung in Verbindung mit Regenbecken verbessert die Absetzwirkung heutiger Regenwasserbehandlung. Durch Flotation können aus dem Wasser auch Schwebstoffe abgeschieden werden, die nicht der Sedimentation im Schwerefeld unterliegen, indem sie durch Einbringung von Gasblasen zum Aufschwimmen gebracht und danach entfernt werden. Durch Desinfektion mittels UV-Bestrahlung oder Ozonierung können Abflüsse weitergehend behandelt werden. Einbauten in Regenbecken vermindern den Absetzweg der Partikel und führen somit ebenso zur Erhöhung der Absetzwirkung.

Fällung und Flockung hat neben einer besseren Feststoffabtrennung auch positive Auswirkungen auf die Elimination von CSB, Phosphatverbindungen und Schadstoffen, was für eine Mischwasserbehandlung wichtig ist. Fällung und Flockung werden im nachfolgenden Kapitel ausführlich erörtert.

4 Fällung und Flockung

4.1 Bedeutung des Verfahrens

Die im Wasser vorhandenen Stoffe können in Abhängigkeit von ihrer Herkunft mineralischer und organischer Natur sein. Sie weisen deshalb verschiedene Eigenschaften auf und unterscheiden sich in der Partikelgröße (Abb. 3).

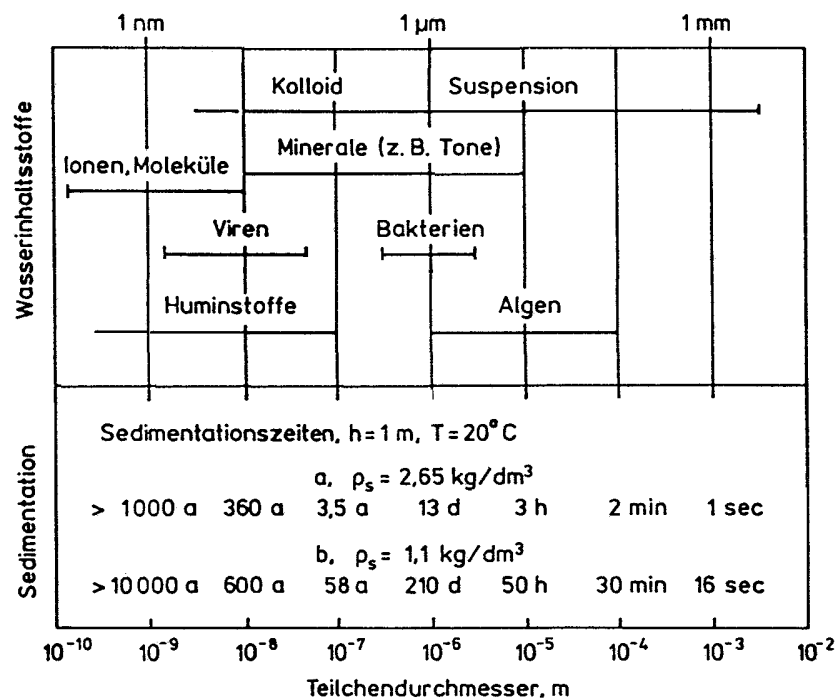


Abb. 3: Partikelgrößen und ihre Sedimentationszeiten im Wasser nach JEKEL (1985)

Wie aus Abb. 3 ersichtlich ist, besitzen die kleinen Partikel eine hohe Sedimentationszeit. Deshalb können in heutigen Absetzbecken nicht alle Inhaltsstoffe zurückgehalten werden. Nur für die Partikel mit einem Durchmesser größer als 10^{-5} m gibt es die Möglichkeit, abgeschieden zu werden.

Um die fein verteilten und gelösten Inhaltsstoffe, die häufig in Regenabflüssen und Oberflächengewässern vorhanden sind, aus dem Wasser durch das Absetzen abscheiden zu können, müssen sie in größere abtrennbare Aggregate überführt werden. Dies lässt sich durch die Fällung und Flockung erreichen.

Die Fällung und die Flockung sind Verfahren, die schon lange Zeit mit Erfolg in vielen Abwasserreinigungs- und Wasseraufbereitungsprozessen eingesetzt werden. Die Zugabe von Eisen- oder Aluminiumsalzen (als Flockungsmittel bezeichnet) beschleunigt die Sedimentation von Feststoffen bzw. es werden gezielt Stoffe ausgefällt. Zur Verbesserung der Absetzbarkeit der abscheidbaren Fällprodukte werden i.a. Flockungshilfsmittel in Form von organischen Polymeren zugegeben, die durch Vernetzung der Makroflocken kompakte, relativ schnell absetzbare Flocken erzeugen.

4.2 Chemische Grundlage

Unter Fällung versteht man die Überführung echt gelöster Wasserinhaltsstoffe durch eine chemische Reaktion in eine ungelöste Verbindung (den sogenannten Niederschlag). Hier handelt sich um einen Phasenübergangsprozeß. Als Beispiel dafür dient die Ausfällung von Phosphat aus dem kommunalem Abwasser.

Die Flockung hingegen ist kein Phasenübergangsprozeß. Bei der Flockung werden fein suspendierte oder kolloidale Systeme durch physikalisch-chemische Einflüsse in einen abscheidfähigen Zustand überführt. Die wichtigste Voraussetzung für Flockung ist, die zwischen Partikeln wirkenden abstoßenden Kräfte durch Gegenmaßnahmen herabzusetzen oder aufzuheben oder sie durch chemische Reaktionen zu überlagern. Die Flockung beinhaltet die Entstabilisierung und die anschließende Aggregation.

Die meisten Partikel im Wasser weisen eine negative Oberflächenladung auf. Diese gleiche Ladung ist verantwortlich für die Stabilität der Suspensionen. Die Partikel gleicher Oberflächenladung stoßen sich gegenseitig ab und bleiben damit „stabil“. Der andere Mechanismus beruht auf dem lyophilen Charakter der Suspensa: die Partikel, die mit Hydrationshüllen umgeben sind, verändern bei Zusammenstoßen ihren suspendierten Zustand nicht.

Um einen durch elektrische Aufladung stabilisierten Stoff zum Ausflocken zu bringen, muß man die abstoßende Ladung beseitigen. Die Entstabilisierungsmechanismen sind in Tab. 5 wiedergegeben. Jeder dieser Mechanismen wirkt in der Praxis der Wasserreinigung meistens in Kombination mit anderen.

Bei dem ersten Mechanismus erfolgt durch Zugabe von zu den Partikeln entgegengesetzt geladenen Ionen (Gegenionen) eine Anreicherung dieser in der Doppelschicht, die einen mit Oberflächenladung behafteten suspendierten Feststoff umgibt (VAN OLPHEN (1963)). Durch diese Anreicherung kommt es zu Kompressionen der Doppelschicht. Mit zunehmender Konzentration der Gegenionen in der Doppelschicht nimmt die Abstoßungsenergie ab, so daß eine gegenseitige Annäherung möglich wird, bei der London-van-der-Waals-Kräfte wirksam sind. Durch diese

Kräfte können sich Partikel zusammenlagern. Dieser Mechanismus kommt im allgemeinen eine geringere praktische Bedeutung zu, da er nur in chemisch reinen Systemen anwendbar ist.

Tab. 5: Zusammenfassung der Mechanismen zur Entstabilisierung der Suspensa nach KLUTE zitiert bei KARGIOS (1982)

Entstabilisierungsmechanismen		Beispiele für Flockungsmittel
1	Kompression der elektrischen Doppelschicht (Gegenionen, Schultze-Hardy Regel)	Inerte Ionen entgegengesetzter Ladung: Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+}
2	Reduktion des Oberflächenpotentials (Adsorption von Gegenionen, chemische Reaktionen an der Oberfläche)	Hydrolisierte Metallionen: Al^{3+} , Fe^{3+} Polyelektrolyte entgegengesetzter Ladung und geringer Kettenlänge
3	Bildung molekularer Brücken (Adsorption von Makromolekülen, Polyelektrolyten)	Geladene und ungeladene Polymere großer Kettenlänge
4	Fällung (Einschluß kolloidaler Partikel in Fällprodukte bei Überschreitung des Löslichkeitsproduktes)	Al^{3+} , Fe^{3+} bei höher Konzentration

Eine weitere Möglichkeit zur Entstabilisierung der Suspensionen ist durch die Adsorption von geladenen Spezies oder durch chemische Reaktionen an der Partikeloberfläche gegeben. Dabei können auch gelöste Inhaltsstoffe an der Oberfläche der Suspensa angelagert werden bzw. sich von dieser Oberfläche ablösen. Im Unterschied zu der oben beschriebenen Ladungskompensation, bei der niemals eine Veränderung der Oberflächenladung oder eine Umladung stattfindet, kann bei der Sorption positiv geladener Partikel die Stoffladung mit zunehmender Oberflächenbelegung von ursprünglich negativem Vorzeichen über den Nullpunkt (den sog. isoelektrischen Punkt) bis hin zu positiven Werten verändert werden.

Die dritte Art von Entstabilisierung erfolgt durch die spezifische Adsorption von Flockungsmittelmolekülen an der Oberfläche von mehreren Partikeln. Voraussetzung hierzu ist eine hinreichende Molekülgröße, so daß der durch elektrostatische Abstoßung vorgegebene minimale Abstand zwischen den Partikeln überbrückt werden kann. Je nach Konfiguration der adsorbierten Makromoleküle erfolgt die Entstabilisierung entweder aufgrund molekularer Brücken zwischen den Partikeln oder aufgrund einer elektrostatischen Wechselwirkung.

Die Entfernung der Partikel durch Einschluß in Fällprodukte (Mitfällung) tritt auf, wenn bei der Zugabe von Metallsalzen die Löslichkeit der entstehenden Hydroxide überschritten wird. Diese fallen dann unter Einschluß der dispergierten Partikel aus der Lösung aus. Die Mitfällung wirkt so, daß sich die Hydroxide sowohl in der Lösung als auch an der Oberfläche der dispergierten Partikel

abscheiden. Durch die Einbindung in Hydroxide sind in vielen praktischen Anwendungsbeispielen schwer zu entfernende Trübstoffe erfolgreich zurückgehalten worden. Eine große Rolle spielt hier der pH-Wert, da bei zu sauren oder auch zu basischen pH-Werten keine Hydroxidbildung erfolgt.

Die Aggregation der Partikel hängt von der Häufigkeit der Zusammenstöße und von ihrer Wirksamkeit hinsichtlich einer erfolgreichen Haftung aneinander ab. Die Anzahl der Zusammenstöße wird durch physikalische Faktoren, wie Temperatur und Strömungsbedingungen, bestimmt. In der Regel sind die Transportvorgänge geschwindigkeitsbestimmend, da sie gegenüber den Entstabilisierungsvorgängen meist erheblich langsamer ablaufen. Man unterscheidet zwischen zwei Transportvorgängen: Diffusion infolge Brownscher Molekularbewegung oder verschiedene relative Geschwindigkeiten der Partikel in Geschwindigkeitsgradientenfeldern, die sie in gegenseitigen Kontakt bringen. Art und Ausmaß der Entstabilisierung sowie physiko-chemische Einflüsse bestimmen, welcher Anteil der stattfindenden Kollisionen zu einer Aggregation führt.

Unabhängig von primär verfolgten Zielen treten in der Praxis der Wasserreinigung die Fällung und die Flockung gemeinsam auf (Abb. 4).

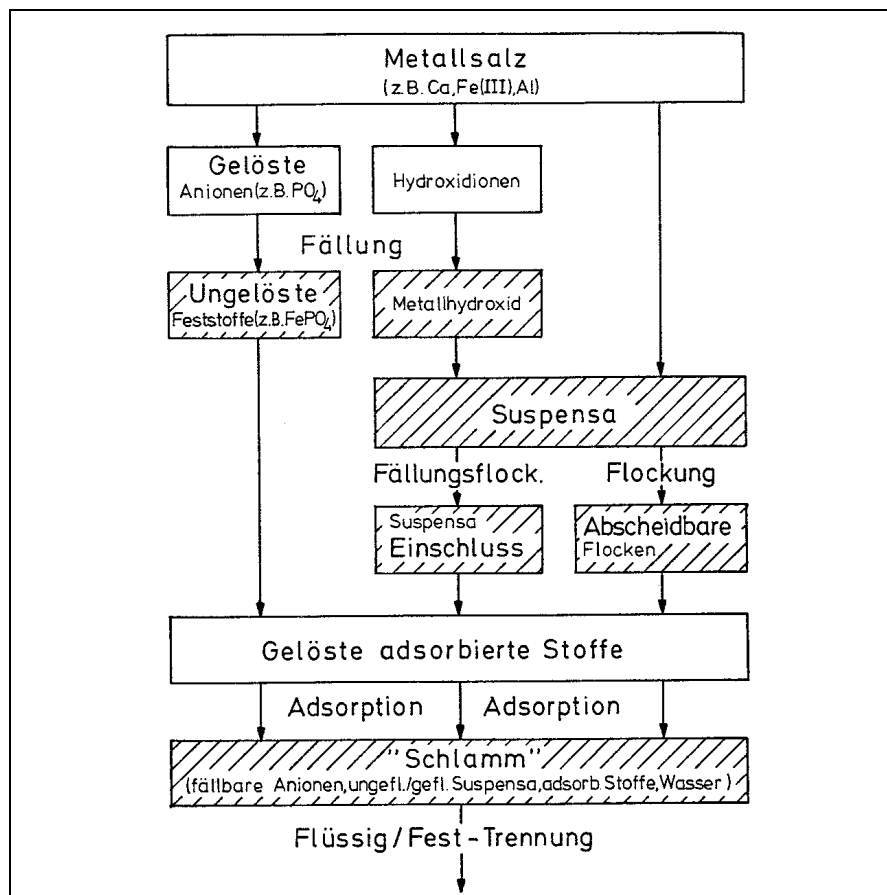


Abb. 4: Ablauf der Fällung und Flockung in der Wasserreinigung nach HAHN (1987)

4.3 Verfahrenstechnische Grundprinzipien

Verfahrenstechnisch stellt die Fällung und Flockung eine Verfahrenskombination dar, die in vier Schritten abläuft (Tab. 6).

Tab. 6: Verfahrensschritte der Fällung/Flockung nach DVGW-MERKBLATT W 217 (1987)

Verfahrensschritte		Aufgabe
1	Dosierung und Einmischung	Gleichmäßige Verteilung der Flockungschemikalien
2	Entstabilisierung	Entstabilisierung von Trübstoffen und Kolloiden, Fällung gelöster Stoffe
3	Aggregation zu Mikroflocken	Schnelle Aggregation von entstabilisierten Trübstoffen zu kleinen Flocken bei hohen Schergradienten ohne Flockungshilfsmittel
4	Aggregation zu Makroflocken	Aggregation zu abtrennbaren Flocken mit bzw. ohne Flockungshilfsmittel

Das wichtigste physikalische Kriterium, das den Gesamtprozeßablauf im wesentlichen bestimmt, ist die schnelle und homogene (zeitlich und räumlich) Verteilung der dosierten Chemikalien im Wassermedium. Eine schlechte Chemikalienverteilung führt für einen Teil der Inhaltsstoffe zur Überdosierung mit Reststabilisierung, für anderen Teil dagegen zur Underdosierung mit ungenügender Entstabilisierung.

Da die Entstabilisierung häufig weitgehend simultan mit der Einmischung verläuft, können sie im gleichen Reaktionsapparat durchgeführt werden. Um eine optimale Entstabilisierung zu erzielen, ist die Chemikalieneinmischung unter hoher Turbulenzintensität und kurzer Verweilzeit erforderlich. Bei diesen Bedingungen bilden sich kleine Flocken (Mikroflocken) aus. Für eine erfolgreiche Sedimentation reicht ihre Größe in der Regel nicht aus.

Bei dem nächsten Schritt (Makroflockenbildung) werden diese Aggregate zu gut abtrennbaren Flocken verbunden. Hier ist von einer geringen Turbulenz auszugehen, so daß eine Zerstörung bereits vorhandener Flocken aufgrund von Oberflächenerosion oder Scherbeanspruchung verhindert wird. Die Scherstabilität der Aggregate läßt sich durch die Zugabe von Flockungshilfsmittel wesentlich erhöhen. Somit kann die Flockenbildung beschleunigt und verbessert werden. Bei den gleichen Geschwindigkeitsgradienten ist die Erzeugung von größeren Flocken möglich.

4.4 Zur Fällung und Flockung der Regenabflüsse

4.4.1 Allgemeines

Untersuchungen in Rußland (NETSCHAEW (1990)) zeigten, daß 80 % der im Oberflächenabfluß enthaltenen Feststoffe einen Durchmesser von weniger als 50 µm aufweisen und 15 % der Partikel sogar kleiner sind als 5 µm. Ähnliche Resultate beim Mischverfahren wurden von VERBANCK (1989) in Belgien mitgeteilt. Diese Feinstoffe, welche häufig eine sehr hohe spezifische Schadstoffbelastung aufweisen, können bei der konventionellen Sedimentation in Absetzbecken nicht abgetrennt werden.

Diese kleinen, sonst nur bei sehr langen Verweildauern sedimentierbaren Partikel können erst durch die Fällung und Flockung zurückgehalten werden. Das Verfahren bietet sich technisch bevorzugt in bereits vorhandenen Regenbecken an. Der im Becken anfallende Schlamm könnte mit den aus dem Einzugsgebiet ausgespülten Feststoffen gemeinsam zur Kläranlage abgeführt werden.

Bei dieser Technologie ist jedoch zu beachten, daß die Effektivität des Verfahrens stark von den folgenden Faktoren abhängt: Beschaffenheit des Wassers, pH-Wert, Temperatur, Art und Menge der gelösten Salze, etc.

Bei der Reinigung von Regenabflüssen kann das Verfahren u.U. instabil werden und die erzielbare Wirkung nicht in allen Fällen ausreichend sein, da sowohl die genannten Parameter als auch die Volumenströmen starken Schwankungen unterliegen.

Die Regenabflüsse weisen meistens einen pH-Bereich von 5 bis 8, niedrige Säurekapazität, geringeren Salzgehalt und stark schwankende Fest- und Trübstoffkonzentration auf, die auch durch die Jahreszeit beeinflusst werden kann. Im Winter muß mit einer niedrigen Temperatur gerechnet werden. Die meisten Partikel sind negativ geladen.

Bei dem Mischsystem vermischt sich der Regenabfluß mit dem Trockenwetterabfluß. Deshalb hat dieses Wasser (Mischwasser) eine andere Wasserbeschaffenheit als der Regenabfluß aus der Trennkanalisation. Die Beschaffenheit des Mischwasser hängt von den Zusammensetzungen einzelner Abflüsse sowie von dem Mischverhältnis ab. Durch das Rohabwasser erhöhen sich in der Regel die Säurekapazität, der Salzgehalt und die Konzentrationen an abfiltrierbaren und organischen Stoffen sowie an Stickstoff- und Phosphorverbindungen. Insbesondere gilt dies für die biochemisch leicht oxidierbaren Kohlenstoffverbindungen (BSB₅) und das NH₄-N. In der Tendenz liegen im Mischwasser auch höhere Konzentrationen an Mikroschadstoffen vor (BORCHARDT (1999)).

Laboruntersuchungen von BONDAREVA & STOTZ (1996) belegen, daß die Fällung und Flockung von Mischwasser grundsätzlich mehr anorganische Flockungschemikalien als die von Regenabflüssen aus dem Trennsystem benötigt.

Für eine Regenwasserbehandlung sind solche Flockungschemikalien vorzuziehen, die eine relativ geringe Abhängigkeit von der schwankenden Wasserbeschaffenheit aufweisen. Nach den vorgenannten Autoren führt die zusätzliche Zugabe von Polymeren bei der Fällung und Flockung zu einer weitgehenden Schmutzstoffelimination. Die erzielbaren Restverschmutzungen sind dann quasi unabhängig von der Beschaffenheit der zu reinigenden Abflüsse. Dadurch eröffnet sich ein breiteres Einsatzfeld für das Verfahren. Z. B., auf Kläranlagen in Rußland werden während der kalten Jahreszeit Polymere zusätzlich zu anorganischen Chemikalien eingesetzt, um den Flockungseffekt zu verbessern.

Aus diesen Überlegungen erfolgte die Chemikalienwahl für diese Arbeit. Aufgrund von Empfehlungen von BONDAREVA & STOTZ (1996) wurde eine Kombinationen von Polyaluminium mit einem kationischen Polymer (Sachtofloc-46,24) verwendet. Dieses Produkt wird industriell produziert, hat eine gute Haltbarkeit (mindestens 6 Monate) und kann unverdünnt zugegeben werden, was einen Betrieb ohne hohen Aufwand ermöglicht. Der Einsatz von Flockungshilfsmitteln ist in aller Regel beschränkt, da sie nach dem Ansetzen der jeweiligen Lösungen nur für eine begrenzte Zeit einsatzbereit sind. Danach vernetzen sich die Polymerketten und sind damit nicht mehr zur einer Brückenbildung in der Lage.

Ein großer Vorteil des Einsatzes von Flockungsmittel und Polymeren als Kombination ist die Tatsache, daß nur eine Zugabestelle erforderlich ist. Diese Anwendung erfordert kein zusätzliches Volumen zum Einmischen, wie es bei der getrennten Zugabe von Flockungschemikalien der Fall ist. Auch ermöglicht die kombinierte Anwendung von Flockungsmitteln, die erforderliche Dosis der anorganischen Flockungsmittel wesentlich zu verringern.

4.4.2 Bisherige Untersuchungen

Erste Untersuchungen der weitergehenden Regenwasserbehandlung beim Mischsystem mittels Fällung und Flockung wurden von WEYAND & ILCHMANN (1992) im technischen Maßstab in einem Durchlaufbecken mit Einsatz von anorganischen Flockungsmitteln durchgeführt. DOHMANN et al. (1994) führten diese Untersuchungen fort. Unter günstigen Rahmenbedingungen wurde die prinzipielle Wirksamkeit des Verfahrens nachgewiesen. Bei großen Flächenbeschickungen wurden jedoch die erzeugten Flocken infolge der unzureichenden Dichte nicht zurückgehalten, obwohl während der Versuche die Flockenbildung gut verlief. Bei einer Flächenbeschickung von etwa 3,7 m/h wurde praktisch keine Wirkung hinsichtlich des CSB-Rückhalts

mehr erzielt, nur der Phosphatgehalt wurde noch um ca. 32 % reduziert. Weitere Versuche zur Optimierung des Verfahrens, z.B. Nachrüstung des Beckens mit Lamellen bzw. Einsatz effektiver Chemikalien etc., wurden nicht durchgeführt. Daher brachten diese Untersuchungen keine erfolgreichen Ergebnisse.

HEINZMANN (1993) hat die Anwendung der Fällung und Flockung beim Trennsystem in Berlin untersucht. Die Ergebnisse zeigen, daß die Technologie im Hinblick auf die Beschaffenheit des Entlastungsstromes bei stabiler Reinigungswirkung erfolgreich ist. Obwohl die besten Resultate durch Rohrflockung mit nachfolgender Filtration (Aufstromfilter) erzielt wurden, wirkten sich eine Verlängerung der Rohrstrecke für die Ausbildung der Makroflocken sowie die Zugabe von Flockungshilfsmittel auf die Sedimentation positiv aus. Eine gute Klärüberlaufqualität wurde erreicht.

In Frankreich wurde laut N.N. (1994) ein chemisch-physikalisches Klärverfahren (so genanntes ACTIFLO-Verfahren) bearbeitet. Zur Regenwasserbehandlung wird es im Anschluß an einen Feinrechen und einen Sandfang angeordnet. Das Prinzip besteht in der beschwerten Flockung. Diese wird durch die Zugabe von Feinsand bei der Fällung und Flockung erreicht. Die beschwerten Flocken werden im Absetzbecken mittels Lamellen abgeschieden. Durch das ACTIFLO-Verfahren werden mehr als 80 % der suspendierten Feststoffe aus dem Abwasser entfernt. Die Verwendung von anorganischen Chemikalien in Verbindung mit klassischer Verfahrenstechnik dürfte höhere Investitions- und betriebliche Kosten verursachen und kaum beim Mischsystem eingesetzt werden.

PFEIFER & HAHN (1995) haben in Karlsruhe den Einsatz der chemischen Flockung beim Trennsystem untersucht. Basierend auf amerikanischen Arbeiten (LEVY et al. (1972), CUPTA et al. (1977) und MEINHOLZ et al. (1979)) wurden im Rahmen dieser Untersuchungen auf einer Pilotanlage Flockung und Flotation zur Reinigung der Regenablässe getestet. Die gewonnenen Ergebnisse belegen die Wirksamkeit des Verfahrens zur Behandlung von Niederschlagsabflüssen. Obwohl ein Vergleich der Ergebnisse auf der Pilotanlage mit den amerikanischen Arbeiten an den Großanlagen ein Rückgang der Stoffreduktion zeigte, kann dies nach Meinung der Autoren durch eine Optimierung der Einmischungs- und Prozeßbedingungen verbessert werden.

Die Fällung und Flockung in Stauraumkanälen wurde von DOHMANN & PECHER (1995) in einer halbtechnischen Versuchsanlage untersucht und von PECHER (1997) durch den Einbau von lamellenartigen Gleichströmern optimiert. Die Untersuchungsergebnisse bestätigten den Zusammenhang zwischen dem Stoffaustrag über den Klärüberlauf und der hydraulischen Beschickung. Durch die Abscheidung der erzeugten Flocken mittels Gleichströmer wurden die Entlastungskonzentrationen gegenüber den im herkömmlichen Stauraumkanal erhaltenen Werten deutlich reduziert. Dabei läßt sich eine ähnliche Sedimentationswirkung wie bei nur halb so großer

Flächenbeschickung im Stauraumkanal ohne Einbauten erzielen. Dadurch vermindert sich, insbesondere bei hohen hydraulischen Belastungen, der Feststoffaustrag in das Gewässer. Die Untersuchungen wurden jedoch nur zum einem Teil mit realem Mischwasser durchgeführt.

Eine weitere Möglichkeit zur Mischwasserbehandlung mittels einem chemisch-oxidativen Verfahren wurde von PFISTER et al. (1997) zuerst im Labormaßstab und danach im kontinuierlichen Betrieb auf einer Pilotanlage an künstlichem Mischwasser untersucht. Die Zugabe von Fentons Reagenz, einer Mischung von Fe^{2+} und H_2O_2 , zeigt aufgrund der Entstehung von OH-Radikalen eine hohe Oxidationswirkung und bildet gleichzeitig Fe^{3+} -Ionen, die eine physiko-chemische Fällung und Flockung bewirken. Die Untersuchungen belegen, daß die Reduzierung des CSB im Mittel mit einem Wirkungsgrad von 35 % eingeschätzt werden kann. Meßergebnisse für reales Mischwasser liegen jedoch noch nicht vor. Außerdem wurden diese Untersuchungen mit konstanter hydraulischer Beschickung sowie konstant eingestelltem CSB durchgeführt. Bei den hydraulischen und stofflichen Schwankungen der Mischwasserzuflüsse kann ein geringerer Wirkungsgrad erwartet werden.

5 Konzeption der eigenen Untersuchungen

5.1 Ziele der Arbeit

Mit diesem Forschungsvorhaben wurde die Verbesserung des Stoffrückhaltes im nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) ausgelegten rechteckigen Durchlaufbecken mittels Flockungsverfahren ohne und mit Einbau von Lamellen im halbtechnischen Maßstab untersucht.

Im Unterschied zu den bisherigen Arbeiten wurden diese Untersuchungen mit realem Mischwasser durchgeführt und beschäftigen sich nicht nur mit der Verminderung von Abflußfrachten, sondern auch mit der Frage, ob das Verfahren eine Einsparung vom Beckenvolumen ermöglicht.

Folgende Ziele wurden gesetzt:

- Minimierung der direkten Gewässerbelastung
- Einsparung von Speichervolumen bei Einhaltung der direkten Gewässerbelastung nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992)

Im Vorfeld dieser Untersuchungen wurden von BONDAREVA & STOTZ (1996) entsprechende Experimente im Labormaßstab durchgeführt.

5.2 Projektbearbeitung

Die in diesem Bericht dargestellten Untersuchungen erfolgten auf dem Gelände des Klärwerkes Stuttgart-Büsnau und bestanden aus fünf Teilen:

1. Teil: Untersuchungen zum Absetzverhalten der Inhaltsstoffe im Mischwasser bei der Fällung und Flockung (Kapitel 6)
2. Teil: experimentelle Untersuchungen zur Fällung und Flockung an einem Durchlaufbecken ohne Lamelleneinbau (Kapitel 7)
3. Teil: experimentelle Untersuchungen zur Fällung und Flockung an einem Durchlaufbecken mit Lamelleneinbau (Kapitel 8)
4. Teil: Entwicklung der Instrumente zur technischen Realisierung (Kapitel 9)
5. Teil: wirtschaftliche Analyse (Kapitel 10)

Im ersten Schritt war es zwingend notwendig, die Absatzgeschwindigkeit der im Mischwasser erzeugten Flocken zu bestimmen. Diese Messungen sind für die Ermittlung der Klärleistung eines Durchlaufbeckens sowie für den optimalen Lamelleneinbau von großer Bedeutung.

Die Untersuchungen am Durchlaufbecken erfolgten im halbtechnischen Maßstab auf einer neu gebauten Versuchsanlage. Um die Beckenbeschickung an die realen hydraulischen Bedingungen anzupassen, lag q_A in den Versuchen zwischen 2,5 und 10 m/h.

Bei konstanten Zuflüssen wurden die Flockenbildung im Mischwasser, erreichbare Wirkungsgrade und Verteilung der Schmutzstoffe im Becken untersucht. Die Versuche mit unterschiedlich hoher Beschickung dienten zur Ermittlung der Wirkung des Verfahrens bei schwankenden Mischwasserzuflüssen als Folge von Regenabflüssen.

Da derzeit praktische Erfahrungen zum Lamelleneinsatz in Regenbecken fehlen, wurden zwei Typen mit unterschiedlicher technischer Charakteristik getestet. Die Module wurden von Fa. Munters Euroform GmbH und Fa. Philipp Müller zur Verfügung gestellt.

Im Anschluß an experimentelle Untersuchungen erfolgte die Entwicklung der notwendigen Instrumente zur technischen Realisierung (Chemikaliendosierung, Auslegung des Lamellenabscheiders, Wartung und Betrieb, Einrichtungen für den Schlammabtransport aus dem Becken).

Eine wirtschaftliche Analyse rundet das Vorhaben ab.

6 Untersuchungen zum Absetzverhalten der Inhaltstoffen im Mischwasser bei der Fällung und Flockung

6.1 Allgemeines

Die Auslegung von Absetzbecken basiert nach der von HAZEN (1904) formulierten Theorie auf der Absetzgeschwindigkeit von Partikeln v_s . Die Absetzgeschwindigkeit der stellt nach dem Stokes'schen Gesetz eine Funktion von Partikelgröße, -form und -dichte dar.

In einem Absetzbecken werden nur Partikel zurückgehalten, die während des Durchflusses durch das Becken den Boden oder den Sammelraum erreicht haben und nicht mehr durch den Sog am Auslauf erfaßt werden. Dies trifft zu, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$v_{s,p}(\text{Größe, Form, Dichte}) \geq q_A = \frac{\text{Volumenstrom } Q}{\text{Beckengrundfläche } A}$$

6.2 Derzeitiger Kenntnisstand

Die Menge des im Mischwasser anfallenden Schlammes und seine Eigenschaften hängen von der Beschaffenheit des Mischwassers ab.

Das Absetzverhalten der Mischwasserinhaltsstoffe wurde von BROMBACH et al. (1993) untersucht. Durchgeführte Messungen bestanden in der Bestimmung der Absetzgeschwindigkeit der Partikel im Trockenwetterabfluß, Sediment, Sielhaut, Mischwasser und Überlaufwasser. Die Proben stammen größtenteils aus dem Kanalnetz der Stadt Bad Mergentheim. Der sedimentierte Schlamm wurde auf Absetzvolumen, Trockensubstanz, Glühverlust, Dichte und Wassergehalt analysiert. Die Ergebnisse zeigten, daß sich Trockenwetterabfluß im Vergleich mit dem Regenabfluß von Straßen viel schlechter absetzen läßt. Der Grund dafür ist eine niedrige Schlammichte, die aus einem hohen Glühverlust und hohen Wassergehalt resultiert. Das Kanalsediment weist ein ähnliches Absetzverhalten wie Straßenschmutz auf. Der Unterschied besteht darin, daß in das Korngerüst der Sedimente stark wasserhaltige Stoffe eingelagert werden. Die Sielhaut enthält mehr Mineralstoffe, als man gemeinhin vermutet hätte. Beachtenswert ist hier, daß mineralische Stoffe entweder ganz fein oder ganz grob sind. Im Bereich der mittleren Korngrößenfraktion lagert sich lebendiges Material aus Pilzen und Bakterien ein, das eine kleine Dichte um 1 hat.

Die Inhaltsstoffe des Mischwassers sind schlechter als Straßenschmutz, aber besser als Partikel im Trockenwetterabfluß absetzbar. Da Mischwasser eine Mischung von beidem darstellt, hängt die Absetzbarkeit jedes Abflusses davon ab, wie groß jeder Anteil ist.

Die Absetzgeschwindigkeit der Partikel im Mischwasser aus dem Kanalnetz ist auf Abb. 5 zusehen.

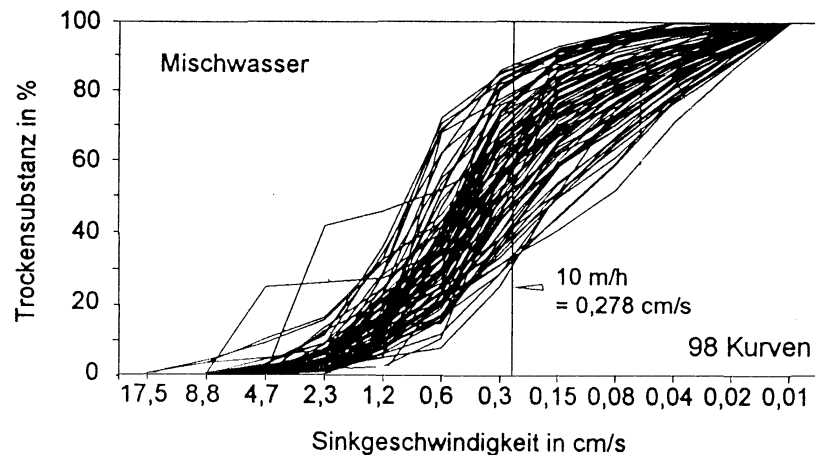


Abb. 5: Absetzgeschwindigkeit der Partikel im Mischwasser nach BROMBACH et al. (1993)

Nach Angaben von BROMBACH et al. (1993) besitzen durchschnittlich 68 % der absetzbaren Stoffe im stehenden Wasser eine Absetzgeschwindigkeit größer als 10 m/h und haben in den nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) ausgelegten Durchlaufbecken eine Chance, sich abzutrennen.

Berücksichtigt man bei der Übertragung dieser Labormessungen in die Praxis einen Sicherheitsfaktor SF, der erfahrungsgemäß zwischen 0,6 und 0,8 liegt, so kann man die Absetzgeschwindigkeit der Partikel auf die Laborwerte von 13 bis 17 m/h ansetzen. Aus der von den Autoren angegebenen Absetzkurve (vgl. Abb. 5) läßt sich die Menge der entsprechenden absetzbaren Stoffen herauslesen und dadurch die zu erwartende Rückhalterate des Beckens bei maximaler Flächenbeschickung einschätzen. Die Rückhalterate wird in der Praxis auf 40-50 % aller absetzbaren Stoffe verringert.

Durch die Zugabe der Fällungs- und Flockungskemikalien verändert sich die Menge und Beschaffenheit des anfallenden Schlammes (Abb. 6).

Den Einfluß der Fällung und Flockung auf den anfallenden Schlamm im Mischwasser haben DOHMANN et al. (1994) untersucht. Die Untersuchungen bestanden in der Beurteilung der Veränderung der Menge und der Beschaffenheit des Schlammes bei der Fällung und Flockung im Vergleich zur reinen Sedimentation und wurden sowohl im Labor als auch im technischen Maßstab durchgeführt. Die Absetzgeschwindigkeit der erzeugten Flocken wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht gemessen.

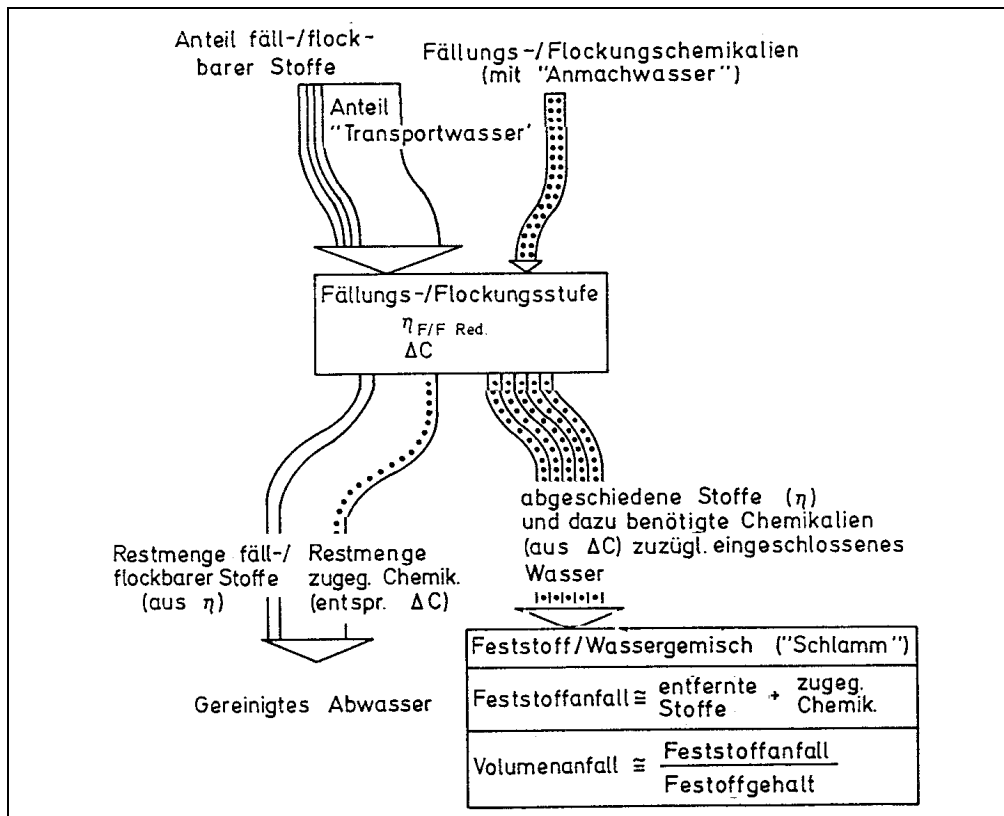


Abb. 6: Schlammanfall bei der Wasserreinigung mittels Fällung und Flockung nach HAHN (1987)

Die von DOHMANN et al. (1994) gewonnenen Ergebnisse zeigten, daß der Schlammanfall infolge Fällung und Flockung um das 3,6 bis 5-fache ansteigt. Die Trockensubstanz nimmt auch zu. Die Weiterleitung des Fällschlammes hat eine Erhöhung der Belastung der Kläranlage zur Folge. Der Fällschlamm beinhaltet höhere Frachten an organischen Stoffen, Phosphor und Eisen (bei eisenhaltigen Chemikalien). Nach DOHMANN et al. (1994) hat die Frachterhöhung keinen negativen Einfluß auf den Reinigungsprozeß der Kläranlage, auch wenn die Schwermetallfrachten durch Zugabe von Metallsalzen zunehmen. Die Stickstofffracht bleibt weitgehend unverändert. Der Fällschlamm ist leichter an Gewicht und schwerer absetzbar als der Schlamm aus reiner Sedimentation. Deshalb besteht für das Kanalnetz keine Gefahr von vermehrten Kanalablagerungen. Es wird auch fast keine Rücklösung zu erwarten.

Die Autoren kommen zum Schluß, daß eine dezentrale Entsorgung des Fällschlammes wegen seines hohen Anteils an organischen Stoffen und des hohen Wassergehalts nicht sinnvoll ist, und der anfallende Schlamm ohne negative Auswirkungen auf das nachfolgende Kanalnetz zur Kläranlage abgeleitet kann.

Für den Reinigungsprozeß im Durchlaufbecken kann eine schlechte Partikelabsetzbarkeit zur Folge haben, daß bei hohen Zuflüssen die erzeugten Flocken über den Klärüberlauf in den Vorfluter gelangen. Eine Aussage über die Wirkung eines Klärbeckens ist nur mit Kenntnis der Häufigkeitsverteilung der Absetzgeschwindigkeit der abzutrennenden Partikel möglich. Für die geflockten Partikel im Mischwasser fehlen diese Daten bisher.

6.3 Überlegungen zur Durchführung der Untersuchungen

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde im Labormaßstab die Absetzgeschwindigkeit der im Mischwasser erzeugten Flocken sowie die Beschaffenheit des Schlammes untersucht. Diese Messungen sind für ein Durchlaufbecken von großer Bedeutung. Sie lassen die Klärleistung einschätzen sowie auch die Lamellen optimal einsetzen.

Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte im Labor „Abwassertechnik“ des Institutes für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart. Als Wasserprobe diente das reale Mischwasser von Stuttgart-Büsnau. Die Mischwasserproben wurden aus der Zulaufrinne des Klärwerkes gezogen.

Im Büsnau handelt sich um ein kleines Wohngebiet ohne industrielle Nutzung mit etwa 4.000 Einwohnern. Die gesamte Fläche beträgt etwa 32 Hektar, die befestigte Fläche etwa 12 Hektar.

6.4 Methodik und Analytik

Alle gezogenen Proben sind frisch analysiert worden. Entsprechend der Standardmethode (Jar-Tests) wurde das Mischwasser aufgerührt und die Chemikalie eingemischt. Als Flockungsmittel wurde Sachtoflocc 46,24 mit einer Dosis von 5 mg Al^{3+} /l zugegeben. Nach dem zweistündigen Absetzen im Imhoff-Trichter wurden die absetzbaren Stoffe vorsichtig abgelassen.

Abb. 7 zeigt die Gewinnung einer repräsentativen Probe (links) zur Bestimmung der Absetzgeschwindigkeit der geflockten Partikel.

Die Schlammproben wurden mittels einem von BROMBACH et al. (1993) entwickelten Apparat zur fraktionierten Sedimentation im Schwerfeld untersucht. Der Absetzapparat ist schematisch in Abb. 8 dargestellt.

Die Absetzsäule ist mit Filtrat gefüllt worden. Die zu untersuchende Schlammprobe wurde in den verschieblichen Zylinder am oberen Ende der Säule gegeben, danach mittels Deckelglas verschlossen und über die Absetzsäule geschoben. Die Entnahme der abgesetzten Stoffen erfolgte durch kurzes Öffnen der Schlauchklemme in Zentrifugenröhrchen mit 15 ml Inhalt.

Insgesamt wurden innerhalb von zwei Stunden zwölf Teilproben genommen. Das Absetzvolumen jeder Probe wurde nach zwei Stunden abgelesen.

Vor jedem Versuch sind im Mischwasser absetzbare Stoffe, pH-Wert, Temperatur, Leitfähigkeit, Säurekapazität und die Konzentration an abfiltrierbaren Stoffe und CSB analysiert worden. In der geflockten Probe wurden absetzbare Stoffe, pH-Wert, Temperatur und Leitfähigkeit gemessen. Die entnommenen Teilproben wurden auf absetzbare Stoffe analysiert, das abgesetzte Material auf Trockensubstanz, Glühverlust und Wassergehalt. Analytische Bestimmungen erfolgten nach den Deutschen Einheitsverfahren (DEV). Verwendete Methoden und Meßgeräte sind in Abschnitt 7.4 erwähnt.



Abb. 7: Vergleich des Absetzverhaltens der Partikel im Mischwasser ohne und mit Fällung/Flockung: links – mit Fällung/Flockung, rechts – ohne Fällung/Flockung

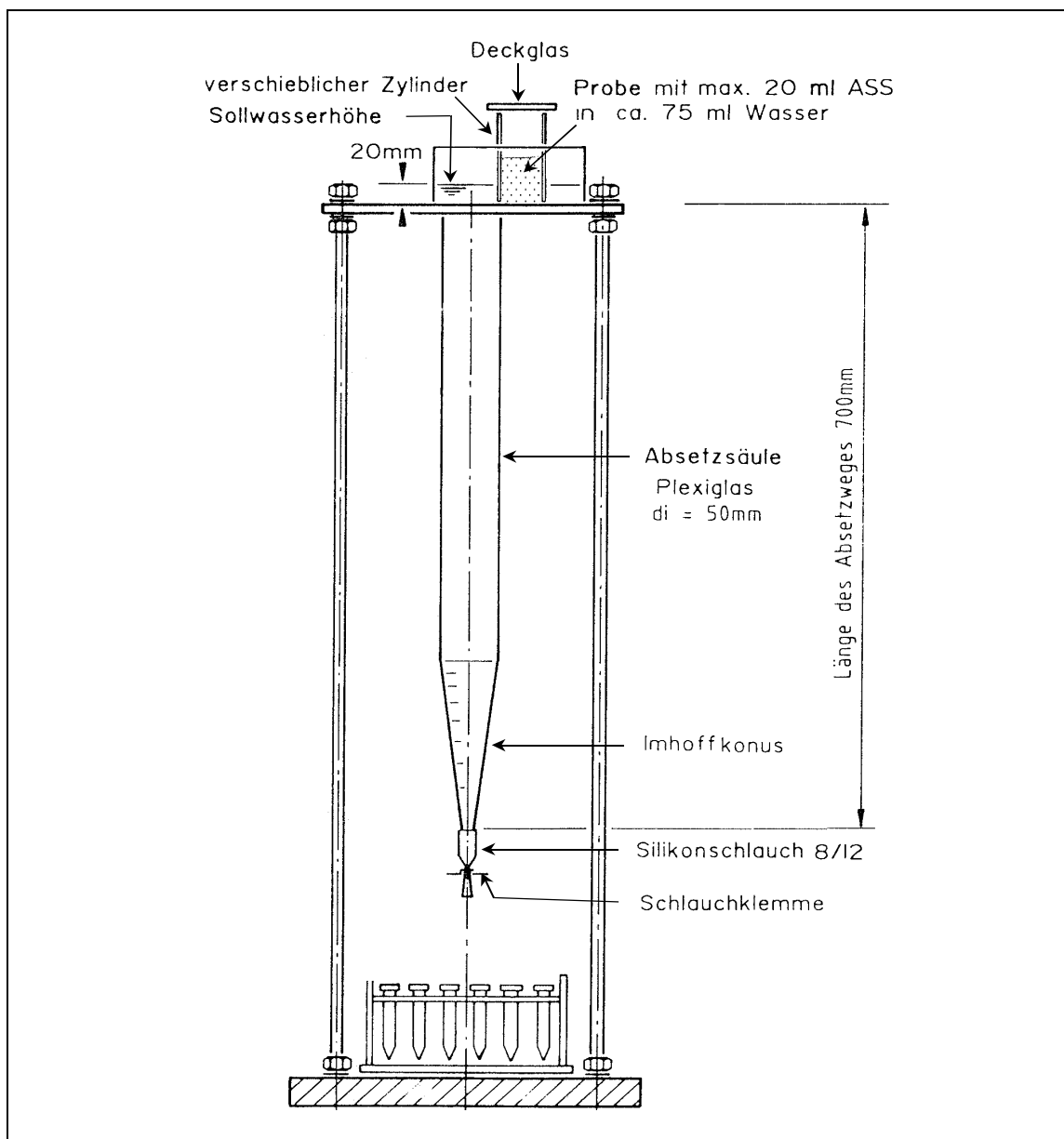


Abb. 8 Schema des Apparates zur Bestimmung der Absetzgeschwindigkeit der Partikel nach BROMBACH et al. (1993)

6.5 Durchgeführte Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden von April 1998 bis Juni 1998 durchgeführt. In diesem Zeitraum wurden insgesamt sechs Regenereignisse erfaßt. Die Beschaffenheit des analysierten Mischwassers ist in Tab. 7 dargestellt.

Tab. 7: Beschaffenheit des analysierten Mischwassers bei Untersuchungen zum Absetzverhalten der geflockten Partikel

Parameter	pH	Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$	absetzbare Stoffe in ml/l	abfiltrierbare Stoffe in mg/l	CSB in mg/l
Schwankungs- bereich	7,07 – 7,95	192 - 842	6 -33	168 - 1000	323 – 609

Nach der Fällung und Flockung wiesen die Proben einen pH-Wert von 6,53 bis 7,27 und eine Leitfähigkeit von 239 bis 882 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf.

6.6 Darstellung der Ergebnisse

Die Veränderung des Schlammanfalles im Mischwasser infolge der Chemikalienzugabe zeigt nachfolgende Tabelle.

Tab. 8: Einfluß der Fällung/Flockung auf den Schlammanfall im Mischwasser – Ergebnisse der Laborversuche

Probe Nr.	Datum	Absetzbare Stoffe in ml/l			Trockensubstanz in g/l		
		Original	geflockt	Faktor	Original	geflockt	Faktor
Probe 1	20.04.98	33	76	2,3	-	-	-
Probe 2	27.04.98	18	55	3,1	0,37	0,50	1,4
Probe 3	31.05.98	11	35	3,2	0,88	1,10	1,3
Probe 4	07.06.98	6	44	7,3	0,13	0,38	2,9
Probe 5	10.06.98	15	50	3,3	0,39	0,6	1,5
Probe 6	15.06.98	8	44	5,5	0,19	0,32	1,7
Minimum		2,3			1,3		
Maximum		7,3			2,9		
Mittelwert		4,1			1,7		

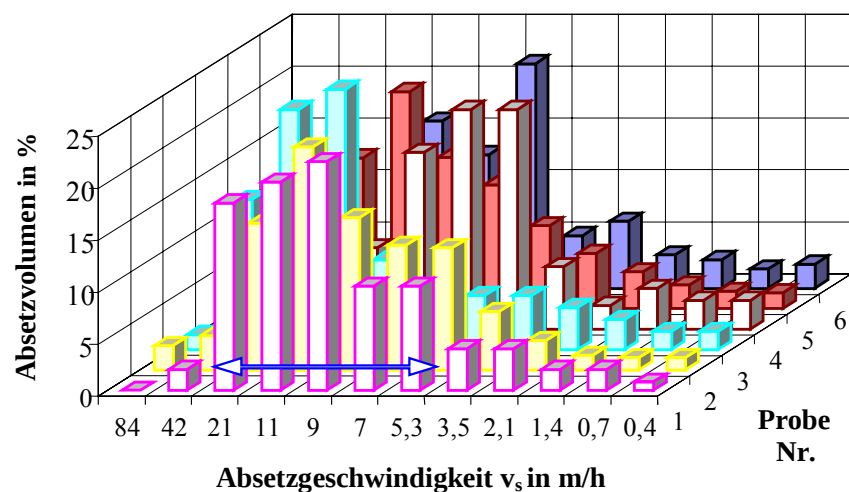
Aus Tab. 8 ist ersichtlich, daß sich der Schlammanfall bei der Fällung und Flockung erhöht. Dies betrifft das Volumen und das Trockensubstanzgewicht. Abweichungen im Schlammzuwachs treten aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheit des Abwassers auf.

Im Vergleich zum Schlamm, der bei der reinen Sedimentation anfällt, ist der Fällschlamm voluminöser und leichter, da ein Anteil aus den wasserhaltigen Hydroxidflocken besteht. Dadurch nimmt das Volumen stärker als die Masse an Feststoffen zu.

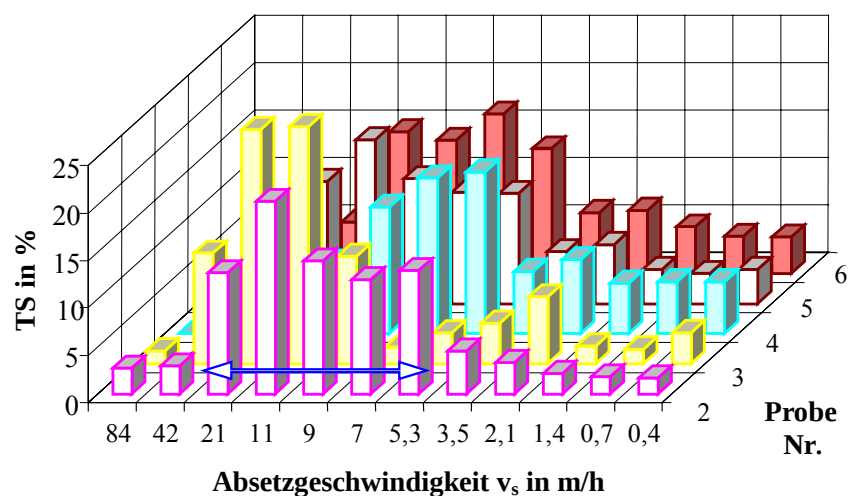
Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind in Abb. 9 als Häufigkeitsverteilungskurven für die Absetzgeschwindigkeit hinsichtlich Absatzvolumen (a), Trockensubstanz (b), Glühverlust und Wassergehalt (c) wiedergegeben.

Die Absetzgeschwindigkeiten v_s ergeben sich aus der Länge des Absetzweges L und der Dauer t zwischen dem Versuchsbeginn und dem jeweiligen Zeitpunkt der Entnahme der zwölf Teilproben:

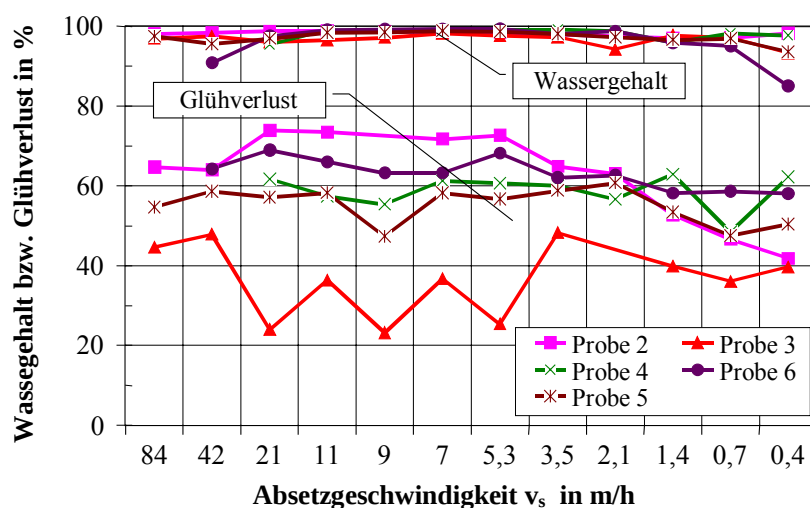
$$v_s = \frac{L}{t}$$



a)



b)



c)

Abb. 9: Versuchsergebnisse zum Absetzverhalten der geflockten Partikel im Mischwasser:
a - Absetzvolumen, b - Trockensubstanz, c - Wassergehalt und Glühverlust

Aus den ersten zwei Diagrammen (Abb. 9a und Abb. 9b) läßt sich deutlich erkennen, daß die häufigste Geschwindigkeit, mit der sich die geflockten Partikel im stehenden Wasser absetzen, von 5 bis 21 m/h reicht.

Wie aus dem letzten Diagramm (Abb. 9c) ersichtlich, wiesen alle analysierten Schlammproben erwartungsgemäß einen sehr hohen Wassergehalt auf. Im Bereich der mittleren Absetzgeschwindigkeiten lagen die Werte durchschnittlich über 98 %. Bei den Partikel mit v_s kleiner 0,7 m/h sank der Wassergehalt leicht ab. Die mittleren Fraktionen enthalten mehr stark wasserhaltige Stoffe als die äußeren. Das abgesetzte Material war zum großen Teil organisch, ausgenommen einer Probe, wo der Glühverlust zwischen etwa 25 % und 45 % lag. Glühverlustkurven häufen sich bei 60 %. Der maximale Wert lag um 77 %.

6.7 Beurteilung der Ergebnisse

Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, daß bei der Fällung und Flockung des Mischwassers deutlich mehr Schlamm anfällt als bei reiner Sedimentation. Durch die Chemikalienzugabe wird ein Teil der nicht absetzbaren Stoffe in eine absetzbare Form überführt. Dadurch lassen sich bei der Sedimentation mehr Feststoffe aus dem Wassers abtrennen.

Aufgrund der unterschiedlichen Wasserbeschaffenheit treten Abweichungen in Schlammzuwachs und Schlammeigenschaften auf. Der Zuwachs hängt in erster Linie vom Gehalt an Feststoffen im Zulauf ab. Bei höheren Konzentrationen ist der Zuwachs des infolge Fällung und Flockung

zusätzlich anfallenden Schlammes kleiner als bei niedrigeren. Durchschnittlich wird das Schlammvolumen durch Fällung und Flockung um etwa das 4-fache erhöht. Die Masse an Feststoffen steigt durch die Chemikaliendosierung durchschnittlich um das 1,7-fache an. Der Fällschlamm beinhaltet einen hohen Anteil an organischen Stoffen und hat einen hohen Wassergehalt. Der Glühverlust lag im Mittel bei 55-60 %, der Wassergehalt bei 96-98 %. Die gewonnenen Daten stimmen mit den Angaben von DOHMANN et al. (1994) überein und bestätigen, daß der Fällschlamm voluminöser und leichter ist als der Schlamm, der bei der reinen Sedimentation anfällt. Als Folge davon weist der Fällschlamm eine schlechtere Absetzbarkeit auf.

Die durchgeführten Messungen zeigen, daß sich die gebildeten Partikel am häufigsten mit einer Geschwindigkeit v_s von 5 bis 21 m/h im stehenden Wasser absetzen. Wie sich aus der Absetzkurve von BROMBACH et al. (1993) (vgl. Abb. 5) ablesen läßt, weisen die Inhaltstoffe des Mischwassers am häufigsten eine Absetzgeschwindigkeit von 7 bis 40 m/h auf.

Um die Absetzbarkeit der erzeugten Flocken statistisch zu beurteilen, wurden die Summenlinien von den langsamen zu den schnellen Partikeln für die Parameter Absetzvolumen und Trockensubstanz erstellt. Die entsprechenden Diagramme sind in Abb. 10 wiedergegeben und zeigen die Mittelwerte von 6 bzw. 5 Proben sowie die in den Versuchen gezeigten Schwankungen. In beiden Diagrammen ist der Grenzbereich für die erforderlichen v_s -Werte aus den Labormessungen markiert. Alle Partikel mit größeren Absetzgeschwindigkeiten werden in einem Durchlaufbecken bei q_A von 10 m/h zurückgehalten. Die Grenzwerte wurden mit einem Sicherheitsfaktor SF von 0,6 bis 0,8 ermittelt (Abschnitt 6.2).

Rechnet man mit einem hydraulisch gut ausgebildeten Becken (SF von 0,8), so kann man aus Abb. 10 herauslesen, daß durchschnittlich etwa 60 % des Absetzvolumens bzw. etwa 65 % der Masse aller abgesetzten Stoffe eine kleinere Absetzgeschwindigkeit haben und über den Klärüberlauf ausgetragen werden.

Aufgrund der Trockensubstanz-Summenlinie läßt sich für ein Durchlaufbecken der durchschnittliche Feststoffrückhalt einschätzen. Die Rückhalterate bei einer Flächenbeschickung q_A ergibt sich aus der Summe aller absetzbaren Stoffe, die im Labor mit einer v_s größer als q_A/SF sedimentieren. Die Schwebstoffe können bei dieser Einschätzung außer acht gelassen werden, da ihr Anteil nach der Fällung und Flockung sehr gering ist. Maximal ist mit 2 % zu rechnen.

Die für ein hydraulisch gut ausgebildetes Durchlaufbecken (SF von 0,8) zu erwartende Rückhalterate stellt Abb. 11 dar. Wie diese Abbildung verdeutlicht, hängt der Feststoffrückhalt in einem Durchlaufbecken von der hydraulischen Beschickung ab. Bei der heutigen zulässigen Flächenbeschickung von 10 m/h lassen sich bei der Fällung und Flockung im günstigsten Fall nur 35 % der Feststoffe zurückhalten. Bei einer q_A von 5 m/h steigt die mögliche Rückhalterate bis auf 70 % an, bei einer q_A von 2 m/h auf ca. 90 %.

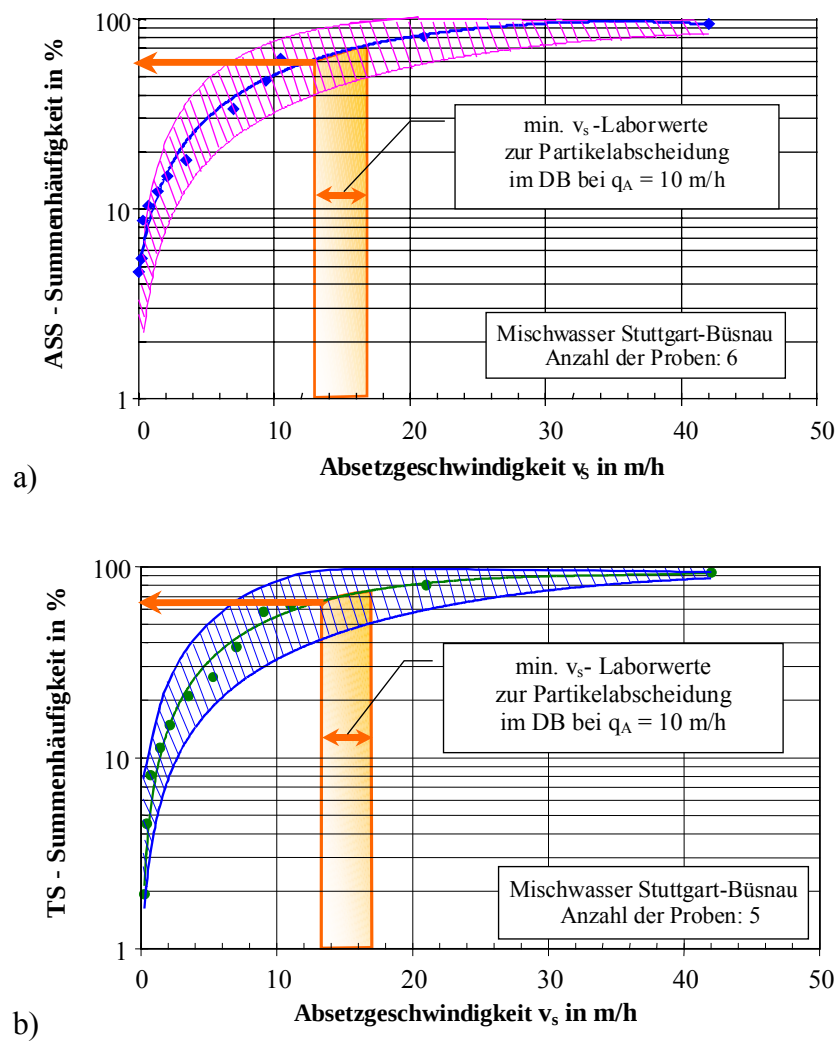


Abb. 10: Summenhäufigkeitsverteilung der Absetzgeschwindigkeiten der geflockten Partikel im Mischwasser: a - Absetzvolumen, b - Trockensubstanz

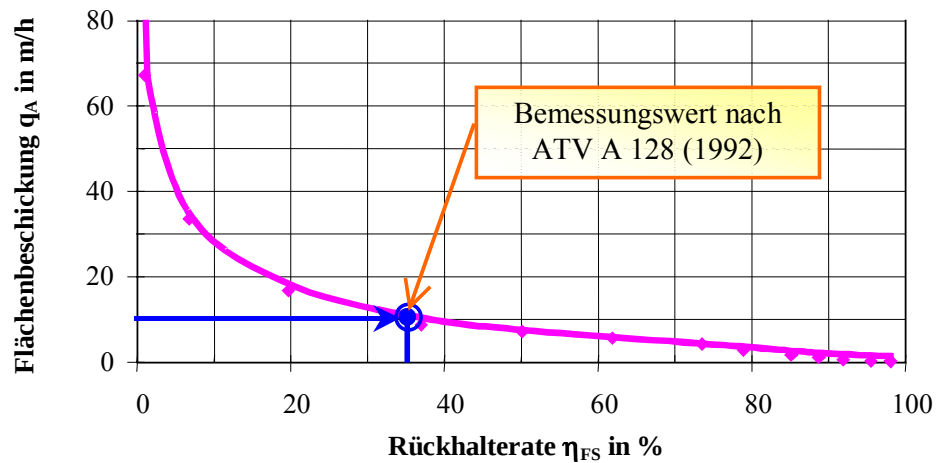


Abb. 11: Theoretische Rückhalterate eines Durchlaufbeckens bei der Fällung/Flockung

6.8 Schlußfolgerungen und Diskussion

Bei der heute aktuellen Mischwasserbehandlung werden Durchlaufbecken entsprechend ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) auf eine Flächenbeschickung von 10 m/h ausgelegt. BROMBACH et al. (1993) haben in Labormaßstab ermittelt, daß im Mischwassers durchschnittlich 68 % aller absetzbaren Stoffen eine Absetzgeschwindigkeit größer als 10 m/h haben. Der Stoffrückhalt im Durchlaufbecken bei der maximalen Beschickung schätzen die erwähnten Autoren durchschnittlich mit 68 % für die absetzbaren und 60 % für die abfiltrierbaren Stoffe ein.

Die genannten Rate sind in der Praxis kaum erreichbar, da die Übertragungsbedingungen für die Laborwerte nicht berücksichtigt wurden. Erfüllt man die erforderlichen Bedingungen, so kann man im Mittel den Stoffrückhalt bei maximaler Flächenbeschickung von 10 m/h mit 40 bis 50 % aller absetzbaren Stoffe einschätzen. Die über den Klärüberlauf ausgetragenen Feststoffe setzen sich aus den restlichen 50 bis 60 % der absetzbaren Stoffe und den nicht absetzbaren Feststoffen (Schwebstoffen) zusammen. Der prozentuale Anteil letzterer an gesamter Feststoffmenge im Mischwasser ist in der Regel nicht groß: nach BROMBACH et al. (1993) liegt er durchschnittlich bei 12 %, nach eigenen Messungen bei 19 %. Die Schwebstoffkonzentrationen können jedoch hoch sein.

Durch die Fällung und Flockung vergrößert sich die Menge der absetzbaren Stoffen im Wasser, da ein Teil der Schwebstoffen in eine absetzbare Form überführt wird. Der Anteil von den in nicht absetzbarer Form gebliebenen Feststoffen kann maximal mit 2 % eingeschätzt werden.

Die erzeugten Flocken wiesen ein breiteres Spektrum der Absetzgeschwindigkeit auf. Dies ist für den Feststoffrückhalt im Durchlaufbecken bei unterschiedlichen hydraulischen Bedingungen von Bedeutung. Wie die Auswertung der eigenen Labormessungen zeigten, läßt sich nur bis zu einer Flächenbeschickung von 5 m/h eine erhebliche Menge der Feststoffe zurückhalten. Die Rückhalterate des Durchlaufbeckens bei maximaler Flächenbeschickung von 10 m/h ist als nicht zufriedenstellend zu betrachten. In einem gut ausgebildeten Becken lassen sich bei dieser hydraulischen Belastung im günstigsten Fall nur etwa 35 % der absetzbaren Stoffe zurückhalten. Eine Strömungsbeeinflussung wurde dabei nicht berücksichtigt.

Hier muß darauf hingewiesen werden, daß es nicht möglich ist, die gewonnenen Ergebnisse mit den Daten aus der Praxis bei einer Flächenbeschickung von 10 m/h zu vergleichen. Die Daten über die Feststoffabtrennung in Durchlaufbecken bei q_A von 10 m/h liegen nicht vor, da diese Beschickung in der Praxis nur wenige Stunden pro Jahr auftritt, obwohl die Bemessung auf q_A von 10 m/h erfolgt. In dem realen Betrieb laufen häufig die Becken mit einer kleineren Flächenbeschickung über. Aus diesem Grund konnten im Rahmen der bereits vorhandenen stofflichen Messungen an Durchlaufbecken (vgl. Abschnitt 2.3) nur Überlaufereignisse mit

niedrigen hydraulischen Beschickungen beprobt werden. Bei diesen Bedingungen ist in der Regel ein guter Feststoffrückhalt zu erwarten.

Aufgrund eigener Laborergebnisse kann man darauf schließen, daß, um eine gute Feststoffabtrennung bei maximaler Flächenbeschickung von 10 m/h bei der Fällung und Flockung in Durchlaufbecken zu erreichen, die Grundfläche des Beckens vergrößert werden muß. Eine Möglichkeit dazu stellt der Einbau eines Lamellenabscheiders dar.

Welche Fläche dabei erforderlich ist, hängt von der angestrebten Leistung ab und muß für jeden Fall individuell entschieden werden. Bei einer 2-fach größeren Beckengrundfläche läßt sich eine Feststoffabtrennung mit 70 % einschätzen, bei der 5-fachen mit 90 %.

7 Experimentelle Untersuchungen zur Fällung und Flockung an einem Durchlaufbecken

7.1 Überlegungen zur Durchführung der Untersuchungen

Die Versuchsanlage wurde für dieses Vorhaben komplett neu gebaut und befindet sich auf dem Gelände des Klärwerkes (KW) Stuttgart-Büsnau. Die Anordnung der Anlage auf dem Gelände des Klärwerkes zeigt Abb. 12.

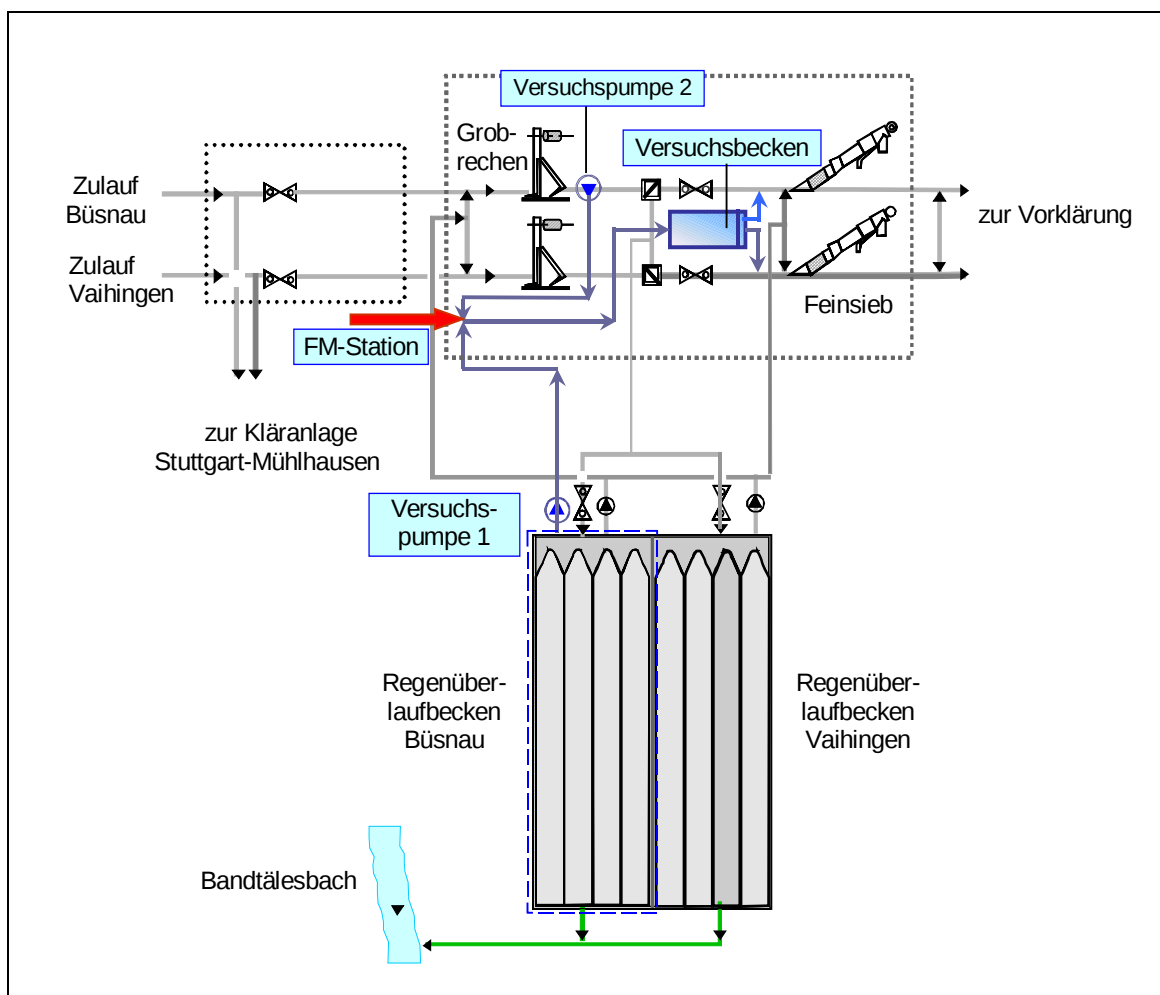


Abb. 12: Anordnung der Versuchsanlage auf dem Gelände des KW Stuttgart-Büsnau

Als Mischwasser diente der Mischwasserabfluß aus dem Einzugsgebiet Büsnau, der aus der Zulaufrinne des Klärwerkes nach Grobrechen genommen wurde.

Für die erste Versuche wurde das Mischwasser bei Regen in einem Regenüberlaufbecken des Klärwerks gespeichert und bis zur Versuchsführung mittels einem Belüftungssystem gemischt. Bei der Versuchsdurchführung förderte eine installierte Pumpe (Versuchspumpe 1) das Wasser aus dem Becken zur Versuchsanlage. Die stofflichen Schwankungen innerhalb eines Versuches wurden in dieser Phase nicht berücksichtigt. Da im betrachteten Einzugsgebiet zum Überlauf des Regenbeckens nur Abflüsse führen, die ab einer Niederschlagshöhe von etwa 5 mm entstehen (ca. 1 mm kommt zu Verlusten, 1 mm fließt direkt zum Klärwerk ab und 2,4 mm werden zwischengespeichert), wurden nur die entsprechenden Abflüsse beprobt.

In den in Abschnitt 8.5 beschriebenen Versuchen erfolgte die Entnahme des Mischwassers aus der Zulaufrinne während der Versuchsdurchführung mittels Versuchspumpe 2 (vgl. Abb. 12). Dabei wurden nur Abflüsse ab 25 l/s untersucht, da über die Dauer des Regenabflusses konstant 20 l/s zur Kläranlage abgeführt werden.

7.2 Beschreibung der Versuchsanlage

Das Schema der halbtechnischen Versuchsanlage ist in Abb. 13 dargestellt.

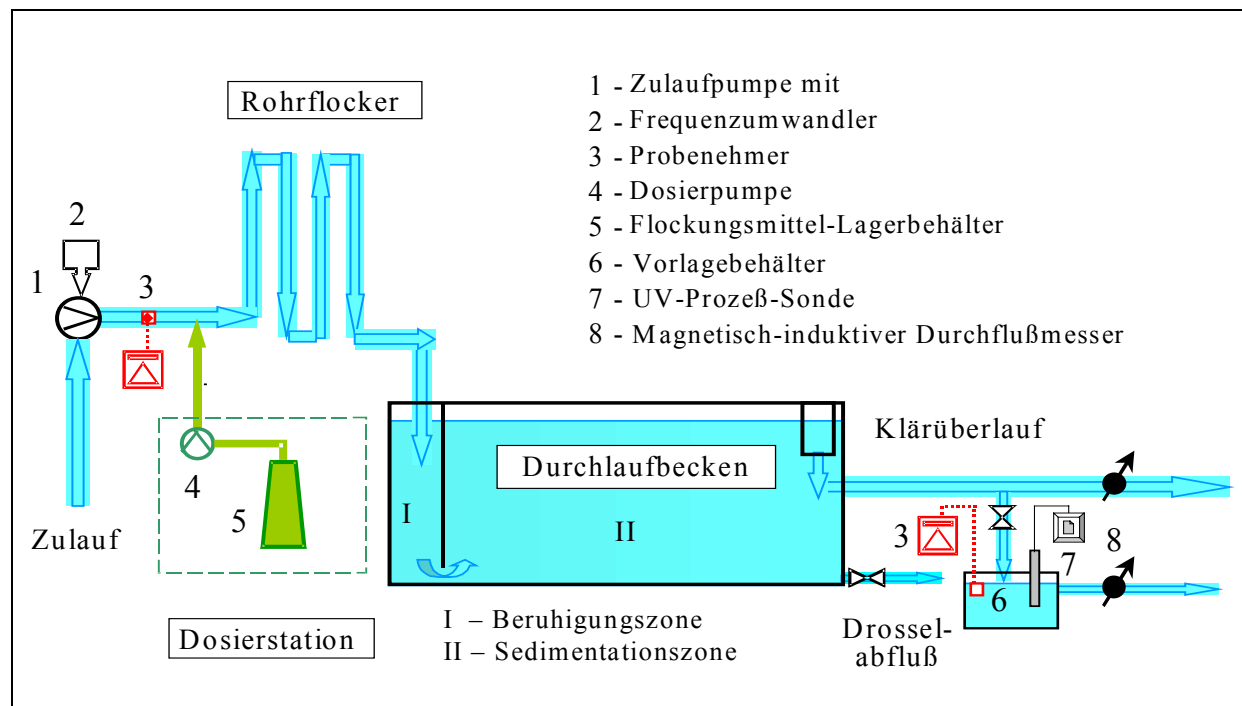


Abb. 13: Schema der halbtechnischen Versuchsanlage

Die Anlage besitzt ein Durchlaufbecken mit zusätzlicher Beruhigungszone. Die Chemikalienzugabe erfolgt ins Zulaufrohr über eine Schlauchpumpe. Als Flockungsmittel wurde Sachtoflocc 46,24 mit einer Dosis von 5 mg Al^{3+} /l zugegeben. Zur Einmischung und Unterstützung von Mikrofloccenbildung wurde ein Rohrreaktor eingesetzt, der nach GROHMANN (1990) ausgelegt wurde. Die Makrofloccen bilden sich in der Beruhigungszone des Beckens und setzen sich mit den Feststoffen des Mischwassers in der Sedimentationszone ab. Die Zonen sind voneinander durch eine Wand mit Durchlaßfenster getrennt. Der Klärüberlauf wird durch einer quer angeordneten Ablaufrinne in eine Zulaufrinne der Kläranlage abgeleitet. Ergänzend wurde ein Bypass gelegt. Darüber fließt Wasser in einen Vorlagebehälter, in dem eine UV-Prozeß-Sonde zur kontinuierlichen Analytik eingesetzt ist.

Die Daten zur Dimensionierung des Rohrreaktors und Abmessungen des Versuchsbeckens sind in Tab. 9 und Tab. 10 angegeben.

Tab. 9: Basisdaten zur Dimensionierung des Rohrreaktors

Wassermenge Q	Durchmesser D_R	Länge L_R	Verweilzeit t_R	Geschwindigkeit v_R	G-Wert	Reynoldszahl
m^3/s	mm	m	s	m/s	s^{-1}	-
0,01	100	40	30,2	1,33	439	132480

Tab. 10: Abmessungen des Versuchsbeckens

Beckenteil	Länge L	Breite B	Wassertiefe H	Nutzvolumen V
	m	M	m	m^3
Beruhigungszone	0,5	1,2	1,5	0,9
Sedimentationszone	3,0	1,2	1,5	5,6

Der Drosselabfluß wird durch einen verschließbaren Bodenablaß eingestellt. Seine Bemessung erfolgte nach den Richtlinien des Landes Baden-Württemberg und ist als Anlage 1 beigelegt.

Nach jedem Versuch wurde das Becken über den verschließbaren Bodenablaß entleert und gespült.

Fotografische Aufnahmen der halbtechnischen Versuchsanlage sind in Anlage 2 enthalten.

7.3 Durchführung der Untersuchungen

Die hier dargestellten Untersuchungen wurden von August 1997 bis März 1998 durchgeführt und behandelten drei Themen:

- Flockenbildung bei verschiedenen hydraulischen Bedingungen
- Einfluß der Flächenbeschickung auf die Schmutzstoffelimination
- Schmutzstoffverteilung im Becken

Jede Versuchsreihe bestand aus vier Versuchen mit unterschiedlicher Flächenbeschickung: ca. 2,5; 5; 7,5 und 10 m/h. Die Dauer eines Versuches betrug in verschiedenen Versuchsreihen das 1-fache, das 2-fache bzw. das 4-fache der entsprechenden Verweilzeit ($t \approx (1 \div 4) \cdot T_v$).

Innerhalb eines Versuches wurden in zeitlichen Abständen vom Klärüberlauf der Versuchsanlage Proben gezogen. Vom Zulauf wurden für jeweils eine hydraulische Beschickung Mischproben entnommen. Alle Proben wurden auf die Gehalte an abfiltrierbaren Stoffen, absetzbaren Stoffen, CSB, DOC sowie auch auf den pH-Wert, die Leitfähigkeit und die Säurekapazität untersucht.

Aus Wetter- bzw. technischen Gründen konnte im diesen Untersuchungszeitraum nur schwach belastetes Mischwasser gespeichert werden, auf welches sich die hier dargestellten Ergebnisse beziehen. Die Niederschlagshäufigkeit von August 1997 bis März 1998 lag unter dem für diese Jahreszeit üblichen Durchschnitt. Die Ereignisse mit einer Niederschlagshöhe über 5 mm traten insgesamt 10 mal auf, vier davon fielen nachts, am Wochenende und an Weihnachten. Deshalb konnten im genannten Zeitraum nur 6 Regenereignisse beprobt werden.

Das verfügbare Mischwasser wies Feststoffkonzentrationen von 38 bis 124 mg/l auf, der CSB schwankte von 70 bis 132 mg/l und die DOC-Werte lagen zwischen 12 und 17 mg/l.

7.4 Messung und Analytik

Alle in Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Bestimmungen erfolgten nach den Deutschen Einheitsverfahren (DEV). Die analysierten Parameter sowie auch die Methoden und verwendete Meßgeräte sind in Tab. 11 zusammengestellt.

Die kontinuierliche Bestimmung des CSB-Gehaltes im Ablauf der Versuchsanlage erfolgte anhand des Spektralen Absorptionskoeffizienten (SAK) über einen Umrechnungsfaktor.

Tab. 11: Analytische Methoden und verwendete Meßgeräte

Parameter	Methode	Firma	Gerät
Leitfähigkeit	DEV C8	WTW	LF 530
Temperatur	DEV C4	WTW	LF 530
pH-Wert	DEV C5	WTW	pH 530
CSB	DEV H41-2	Metrohm	Titroprozessor 672
SAK	DIN 38402 C2	Dr. Lange	UV-Prozeß-Sonde LXG 143
TOC	DEV H3	IDC	TOC-Analysator
DOC	DEV H3	IDC	TOC-Analysator
abfiltrierbare Stoffe	DEV H2	Eigenbau	Druckfiltermeßgerät
absetzbare Stoffe	DEV H9	Imhoff	Imhoff-Zylinder
Säurekapazität	DEV H7 1/2	Metrohm	Säurekapazitätsanalysator 674
Trübung	DEV C2	Dr. Lange	LTP 4
Trockengewicht	DEV H1/1	Heraeus Instruments	Trockenschrank
Glühverlust	DEV H1/3	Heraeus Instruments	Muffelofen

7.5 Flockenbildung bei verschiedenen hydraulischen Bedingungen

7.5.1 Allgemeines

Verfahrenstechnisch stellt die Fällung und Flockung eine Verfahrenskombination dar, die in vier Schritten abläuft: Dosierung und Einmischung der zugegebenen Chemikalien, Entstabilisierung, Aggregation zu Mikrofloccen und Aggregation zu Makrofloccen. Für die Agglomeration der Partikeln werden in der Praxis die Rühr- und Rohrreaktoren eingesetzt. Bei den letzten erfolgt die Flockenbildung direkt in Rohren. Gegenüber Rührreaktoren weisen sie eine Reihe von Vorteilen auf, wie eine homogene turbulente Strömung, Abwesenheit von beweglichen Teilen und als Folge davon einfacherer Betrieb sowie eine Platzersparnis, da Rohrleitungen als Flockungsreaktor ausgelegt werden können; dadurch sind zusätzliche Anlageteile nicht erforderlich.

Die Flockenbildung in Rohrstrecken hat in Berlin GROHMANN (1990) untersucht. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse gab er die folgenden Bemessungsvorschläge für den Rohrreaktor (Rohrflocker).

Als optimale Bedingungen für die Bildung von Mikrofloken unmittelbar nach der Entstabilisierung nennt er den mittleren Geschwindigkeitsgradienten G von $300\text{--}900\text{ s}^{-1}$ bei $t = 30\text{ s}$ und eine Fließgeschwindigkeit von $1\text{ bis }3\text{ m/s}$, für die Makroflokenbildung den G -Wert von $10\text{ bis }20\text{ s}^{-1}$ ohne Flockungshilfsmittel und $30\text{ bis }70\text{ s}^{-1}$ mit Flockungshilfsmittel. Die Zeit zur Aggregation zu Mikrofloken muß experimentell ermittelt werden.

Der Rohrektor für diese Untersuchungen ist für die Mikroflokenbildung aufgrund der von GROHMANN (1990) gegebenen Empfehlungen ausgelegt worden. Als Bemessungszufluß ist ein Wasservolumen von $0,01\text{ m}^3/\text{s}$ (es entspricht $q_A=10\text{ m}^3/\text{h}$) zugrunde gelegt, um die Gefahr des Flokenzerfalls bei maximaler Fließgeschwindigkeit zu vermeiden. Bei einer Verkleinerung der hydraulischen Belastung vermindert sich die Fließgeschwindigkeit im Reaktor v_R bzw. der Geschwindigkeitsgradienten G , während die Verweilzeit t zunimmt. Die Energieeintragungszahl (Campzahl) $C \cdot t$ verringert sich dadurch nur wenig. Nach GROHMANN (1990) läßt eine Halbierung des Volumenstromes noch keine Verschlechterung der Flockungsergebnisse erkennen.

Es war zu untersuchen, ob bei den schwankenden Mischzuflüssen eine gute Flokenbildung erreicht werden kann.

7.5.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Untersuchungen zur Beurteilung der Flokenbildung im Rohrfloker bei der Mischwasserbehandlung erfolgte mit vier verschiedenen Zuflüssen $2,8$; $5,7$; $7,3$ und $10,4\text{ l/s}$. Unter Berücksichtigung der Empfindlichkeit der erzeugten Floken wurde für jeden Zufluß eine Probe am Ende des Rohrflockers direkt im Imhoff-Trichter genommen und innerhalb von zwei Stunden untersucht. Hierzu wurden in Abständen von 30 , 60 und 120 Minuten die absetzbaren Stoffe sowie die Trübung und der DOC im Überstand gemessen. Diese Werte sind in Tab. 12 der Zulaufkonzentration gegenübergestellt.

Wie aus Tab. 12 zu erkennen ist, wurde bei allen Zuflüssen eine gute Flokenbildung im Rohrfloker erreicht. Die erzeugten Floken sind meistens große Partikel, die sich innerhalb der ersten 30 Minuten absetzen. Bei den Zuflüssen $5,7\text{ bis }10,4\text{ l/s}$ lag der Anteil der Floken mit einer Sedimentationsdauer $\leq 30\text{ min}$ über 95% , bei $2,8\text{ l/s}$ um 90% . Der Rest ist in Form von kleinen Partikeln vorhanden dargestellt, die eine unwesentliche Vergrößerung des Absetzvolumens zur Folge haben. Diese Partikel wurden im Überstand als Trübung gemessen.

Abb. 14 zeigt die Trübungsveränderung im Versuchsverlauf.

Tab. 12: Versuchsergebnisse der Sedimentation von Wasserproben aus dem Rohrflocker

Zufluß in l/s	Zulaufprobe *)	Ablaufprobe			
		Absetzzeit in min	ASS in ml/l	im Überstand	
				Trübung in TE/F	DOC in mg/l
2,8	ASS = 0,9 m/l Trübung = 57 TE/F DOC = 12,7 mg/l	30	14,5	25	11,2
		60	16,5	19	10,7
		120	16	13,6	11,6
5,7	ASS = 0,8 m/l Trübung = 61 TE/F DOC = 12 mg/l	30	16,5	19	11,3
		60	16,5	16	10,5
		120	16	9	10,9
7,3	ASS = 0,5 ml/l Trübung = 50 TE/F DOC = 12,5 mg/l	30	16,5	16	10,7
		60	17	10,6	10,5
		120	17	6,4	10,8
10,4	ASS = 0,7 ml/l Trübung = 50 TE/F DOC = 12 mg/l	30	17	16	9,8
		60	16,5	9,1	10,3
		120	16	1,8	9,8

*) - ASS im Zulauf wurden nach 60 Minuten bestimmt. Trübung und DOC wurden direkt nach der Probenahme analysiert.

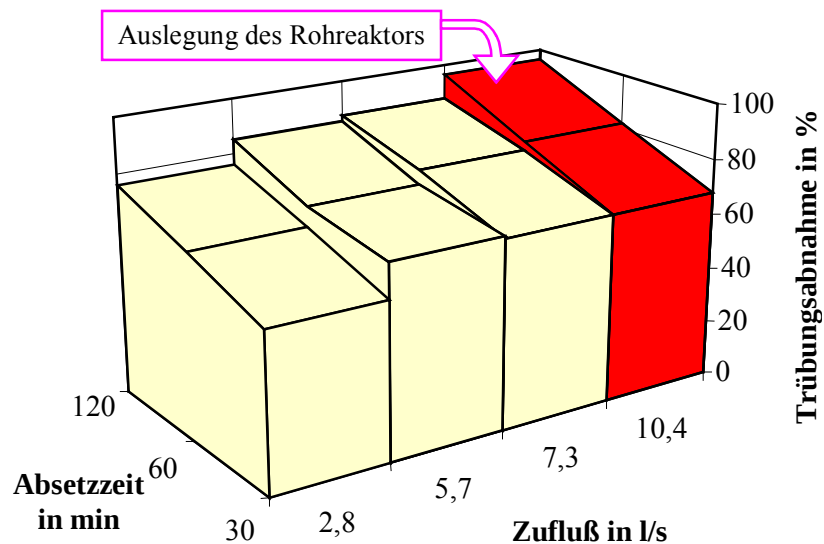


Abb. 14: Trübungsabnahme in den aus dem Rohrflocker bei verschiedenen Zuflüssen entnommenen Wasserproben

Abb. 14 verdeutlicht, daß die beste Trübungselimination bei dem Bemessungszufluß erzielt wurde. Dabei ist zu bemerken, daß die bei den Zuflüssen 5,3 bis 10,4 l/s genommenen Proben sich hinsichtlich der Trübung im Überstand nach den ersten 30 Minuten des Absetzens kaum unterschieden. Die Werte lagen bei 68-69 %. Eine unterschiedliche Klärung ergab sich bei dem weiteren Versuchsverlauf. Nach zwei Stunden des Absetzens erreichte die Abnahme 95 % bei 10,4 l/s und 85 % bei 5,3 l/s. Durch die weitere Verkleinerung der Zuflüsse nahm die Resttrübung im Überstand zu. Bei 2,8 l/s betrug die Trübungselimination nach 30 Minuten 56 %, nach den zweistündigen Absetzen 76 %. Allgemein können diese Bedingungen als zufriedenstellend betrachtet werden.

Vermutlich läßt sich bei einem Zufluß von etwa 2,5 l/s eine Grenze für optimale Bedingungen zur Flockenbildung ziehen. Im Bereich der kleineren Zuflüsse ist zu erwarten, daß der Anteil der feinen Flocken sich vergrößert, was einen negativen Einfluß auf den Absetzvorgang zur Folge haben kann.

7.5.3 Beurteilung der Ergebnisse

Die gewonnenen Ergebnisse bestätigten die Abhängigkeit der Flockenbildung in den Rohrstrecken vom zufließenden Wasservolumen. Bei einer Verringerung der hydraulischen Belastung nimmt die Größe der erzeugten Flocken ab und als Folge davon die Wirksamkeit des Verfahrens.

Der für diese Untersuchungen auf einen Zufluß von 10 l/s (das entspricht q_A von 10 m/h) nach GROHMANN (1990) ausgelegte Rohrreaktor bildete bei Zuflüssen von 10,4 bis 2,8 l/s ausreichend große Flocken aus. Die Abhängigkeit der Flockengröße von der hydraulischen Beschickung in genannten Bereich bleibt, aber sie hat noch keinen wesentlichen Einfluß auf den Gesamtprozeßablauf. Die erreichte Flockenbildung ist als zufriedenstellend zu betrachten. Dies bedeutet, daß bei der Verminderung des Zuflusses bis auf ein Viertel des Bemessungswertes gute Flockungsergebnisse erreicht werden können.

Um Erkenntnisse zur Dimensionierung eines Rohrreaktors bei der Mischwasserbehandlung zu gewinnen, wurden im nächsten Schritt die Versuchsbedingungen zur Flockenbildung mit den in der Literatur empfohlenen Werten verglichen. Diesen Vergleich zeigt Tab. 13.

Wie daraus ersichtlich, befinden sich bei den Zuflüssen 10,4 l/s und 7,8 l/s die Geschwindigkeit, der G-Wert und die Campzahl innerhalb bzw. auf der Grenze des als Optimum empfohlenen Bereiches. Bei der Verringerung des Wasservolumens unterschreiten die Fließgeschwindigkeit und der G-Wert den empfohlenen Bereich. Wenn bei 5,3 l/s die Werte noch nicht so stark abweichen, ist der Unterschied bei 2,8 l/s schon wesentlich. Die Campzahl entspricht hier jedoch noch den Angaben von BERNHARDT, H. & H. SCHELL (1979). Bei einer Geschwindigkeit v_R von

weniger als 0,4 m/s kann man mit einer wesentlichen Verschlechterung der Flockenbildung gerechnet werden.

Tab. 13: Vergleich der Versuchsbedingungen zur Flockenbildung mit den Literaturangaben

Zufluß	Mittlere Verweilzeit t_R	Mittlere Geschwindigkeit v_R		Reynoldszahl	G-Wert		Campzahl $G \cdot t$	
		ist	optimal ¹⁾		ist	optimal ¹⁾	ist	optimal ²⁾
l/s	s	m/s		-	s^{-1}		-	
2,8	112	0,4	1 bis 3	40000	85	300 bis 900	9489	7000 bis 20000
5,3	59,2	0,7		70000	183		10821	
7,8	40,3	1,0		100000	298		12007	
10,4	30,2	1,3		132480	439		13258	

¹⁾ - GROHMANN (1990)

²⁾ - BERNHARDT, H. & H. SCHELL (1979)

7.6 Einfluß der Flächenbeschickung auf die Schmutzstoffelimination

7.6.1 Allgemeines

Da die Inhaltsstoffe des Mischwasser unterschiedliche Absetzgeschwindigkeiten aufweisen, hängt der Feststoffrückhalt im Durchlaufbecken von der hydraulischen Beschickung ab. Gleiches gilt auch für die bei der Fällung und Flockung gebildeten Partikel. Bei hohen Zuflüssen werden die erzeugten Flocken aufgrund unzureichender Absetzgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 6) über den Klärüberlauf ausgetragen.

Diese Abhängigkeit wiesen die bereits erwähnten Untersuchungen von WEYAND & ILCHMANN (1992), DOHMANN et al. (1994), DOHMANN & PECHER (1995), PECHER (1997) nach. Für die Verbesserung des Stoffrückhaltes bei höheren Zuflüssen sollten Lamellen in das Becken integriert werden.

Um die durch Lamellen gegebene Verbesserung der Partikelabscheidung in einem Durchlaufbecken beurteilen zu können, sind die Daten über die Klärleistung dieses Beckens ohne Lamelleneinbau erforderlich. Die Verwendung der bereits vorhandenen Ergebnisse zum diesen Zweck kann zu falschen Aussagen führen, da sich die konstruktiven Randbedingungen sowie auch die verwendeten Chemikalien unterscheiden.

7.6.2 Darstellung der Ergebnisse

Da der Regenabfluß unterschiedliche Abflußkurven aufweist, wurde die Flächenbeschickung q_A bei der Durchführung einer Versuchsreihe von einem bis zum anderen Versuch ansteigend bzw. abnehmend geändert. Innerhalb jedes Versuches blieb die mittlere q_A konstant. Zwischen den einzelnen Versuchen erfolgte keine Entleerung des Beckens. Die Chemikalien wurden erst zugegeben, als es zum Überlauf des Beckens kam.

Die erste Versuchsreihe wurde am 29.08.1997 durchgeführt. In den Versuchen betrug q_A 2,4; 4,8; 6,7 und 10,1 m/h. Pro Versuch wurde die Anlage für eine Dauer von etwa zwei Verweilzeiten ($t \approx 2 \cdot T_v$) beschickt. Die zweite Versuchsreihe erfolgte am 13.09.1997 mit einer Dauer von etwa vier Verweilzeiten ($t \approx 4 \cdot T_v$) pro Versuch. Hierbei wurde mit einer maximalen Beschickung q_A von 10,3 m/h begonnen und diese dann schrittweise auf 7,6; 6,0 und 2,9 m/h reduziert.

Die gemessenen Gehalte an abfiltrierbaren Stoffen und gelösten organischen Stoffen (als DOC) sind in Abhängigkeit von der Beschickungsdauer (bezogen auf die Verweilzeit T_v) in Abb. 15 und Abb. 16 dargestellt.

Die durchgeführten Versuche bestätigen die Abhängigkeit des Feststoffgehaltes im Klärüberlauf von der hydraulischen Belastung des Beckens. Je niedriger die Flächenbeschickung war, desto besser war die Klärüberlaufqualität. Bei niedrigen Beschickungen lag der Feststoffgehalt im Klärüberlauf unter der Zulaufkonzentration. Bei einer Zuflußsteigerung nahm er infolge des vermehrten Flockenaustrages so zu, daß ab einer Flächenbeschickung von etwa 7 m/h die Feststoffkonzentration im Klärüberlauf in der gleichen Größenordnung wie im Zulauf lag.

Bei maximaler Flächenbeschickung von etwa 10 m/h wurde in der ersten Versuchsreihe im Klärüberlauf ein deutlich höher Feststoffgehalt gemessen als im Zulauf. Eine höhere Konzentration im Klärüberlauf ist auf den Austrag des bereits im Becken vorhandenen Schlammes zurückzuführen. Bei den vorherigen niedrigen Zuflüssen setzten sich die Flocken im Becken ab. Der sedimentierte Schlamm wird nur zum einen Teil durch den Drosselabfluß aus dem Becken abtransportiert. Der andere Teil bleibt an der Beckensohle liegen. Bei Erhöhung der hydraulischen Belastungen tritt der Austrag des gespeicherten Schlammes auf. Wie die Versuchsreihe mit abnehmenden Zuflüssen zeigte, ist der Feststoffgehalt im Klärüberlauf bei Abwesenheit von Schlamm an der Beckensohle bei maximaler Flächenbeschickung von 10 m/h ungefähr so hoch wie im Zulauf.

Eine Abhängigkeit der DOC-Konzentration im Klärüberlauf von der Flächenbeschickung wurde nicht beobachtet. Der DOC im Klärüberlauf war in den beschriebenen Versuchen etwas geringer als im Zulauf.

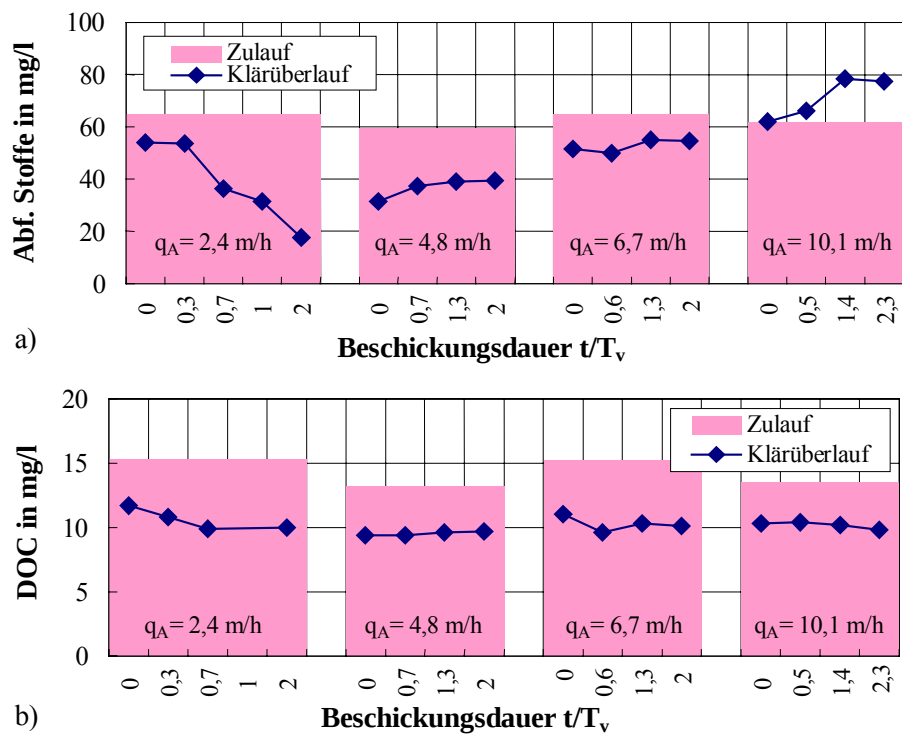


Abb. 15: Ergebnisse der Versuchsreihe vom 29.08.1997 mit ansteigenden Zuflüssen:
a - abfiltrierbare Stoffe; b - DOC

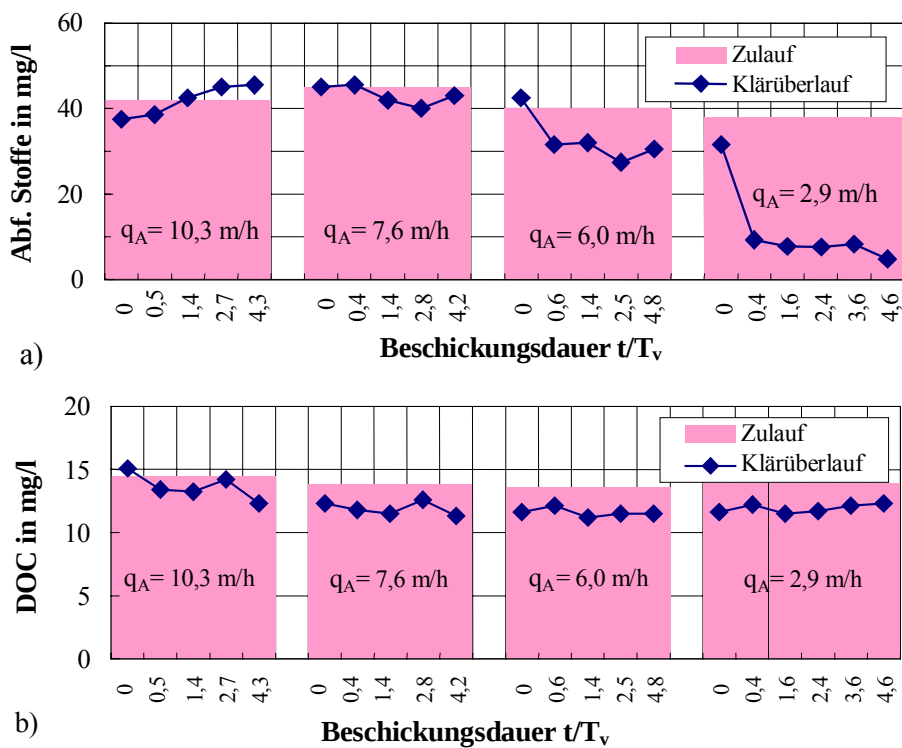


Abb. 16: Ergebnisse der Versuchsreihe vom 13.09.1997 mit abnehmenden Zuflüssen:
a - abfiltrierbare Stoffe; b - DOC

In beiden Versuchsreihen traten vergleichbare Eliminationsraten auf. Abb. 17 und Abb. 18 zeigen die bei unterschiedlichen Flächenbeschickungen erzielten Eliminationen für abfiltrierbare Stoffe, DOC sowie CSB (als Konzentrationswirkungsgrade ermittelt, vgl. 7.6.3).

Bei einer Flächenbeschickung um 2,5 m/h lag die Elimination an Feststoffen zwischen 73 und 85 %, CSB zwischen 44 und 54 %. Eine Erhöhung der hydraulischen Beschickung hatte eine Verschlechterung der Klärung zur Folge. Bei einer Flächenbeschickung von 7 bis 10 m/h wurden sehr geringe Wirkungsgrade hinsichtlich der Feststoffe sowie CSB bzw. keine Klärung erzielt.

Alle erzielten Wirkungsgrade nahmen in der Regel schon nach einer Verweilzeit die stabilen Werte an. Bei Beschickungsdauern über das 4-fache der Verweilzeiten wurde keine verschlechterte Klärung beobachtet, wie es von WEYAND & ILCHMANN (1992) für lange Entlastungsdauern aufgrund des Schlammaustrages vermutet worden war. Das Rückhaltpotential eines Beckens kann man nicht allein auf die Entlastungsdauer zurückführen, sondern auch auf die Beckenhydraulik. Eine schlechtere Klärung tritt bei langen Entlastungen nur dann auf, wenn der aufgrund unzureichender Schleppspannung bei niedrigen Zuflüssen im Becken liegende Schlamm durch die Zuflußsteigerung, die aus der Erhöhung der Niederschlagsintensität resultiert, aufgewirbelt und ausgetragen wird.

Die Elimination von gelösten organischen Stoffen (gemessen als DOC) zeigte bei allen hydraulischen Beschickungen im Rahmen einer Versuchsreihe nur geringfügige Abweichungen. In der ersten Versuchsreihe lagen die Werte zwischen etwa 24 und 34 %, in der zweiten zwischen etwa 5 und 16 %.

Vermutlich hängt die Elimination von gelösten organischen Stoffen nur von der Beschaffenheit des zu behandelnden Wassers ab. Hier soll nochmals kurz auf die Adsorption eingegangen werden. Im gefällten und geflockten Wasser nimmt aufgrund der neu gebildeten Feststoffe die spezifische Oberfläche und damit die Möglichkeit zur Adsorption zu. Nur durch diesen Prozeß kann die Verringerung gelöster organischer Stoffen erklärt werden. Im Falle der Verfügbarkeit adsorbierender Substanzen im Wasser kann die Adsorption eine maßgebliche Rolle spielen.

Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse wurde die nächste Versuchsreihe (am 12.12.1997) mit einer Dauer von etwa einer Verweilzeit ($t \approx T_v$) pro Versuch durchgeführt. Die Flächenbeschickung betrug in den Versuchen 2,8; 5,7; 7,3 und 10,4 m/h.

Die Ergebnisse sind in Tab. 14 aufgelistet. Nach jedem Versuch wurde das Becken entleert und gespült.

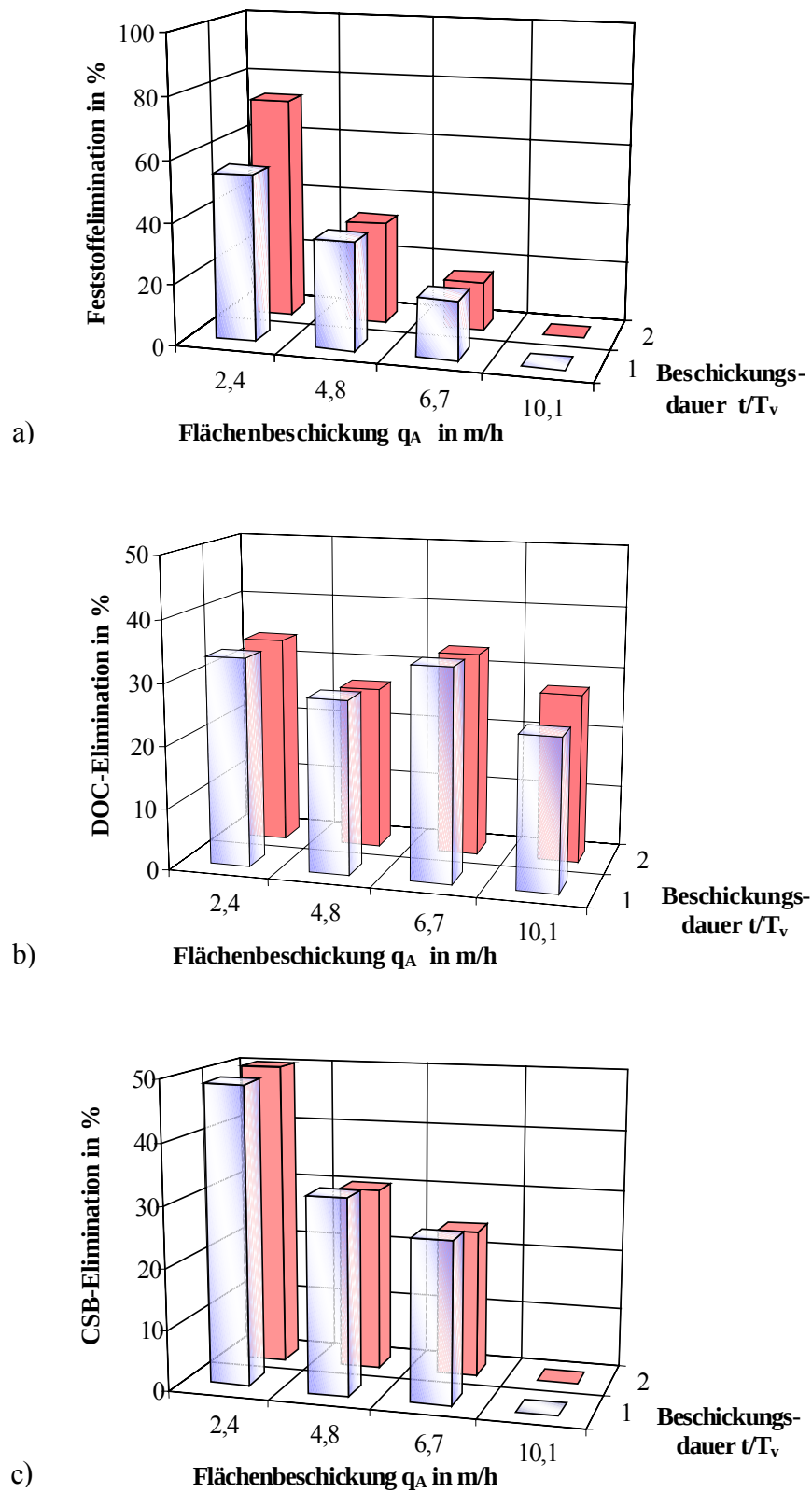


Abb. 17: Schmutzstoffelimination in Abhängigkeit von der Beschickungsdauer in der Versuchsreihe vom 29.08.1997: a - abfiltrierbare Stoffe; b - DOC; c - CSB

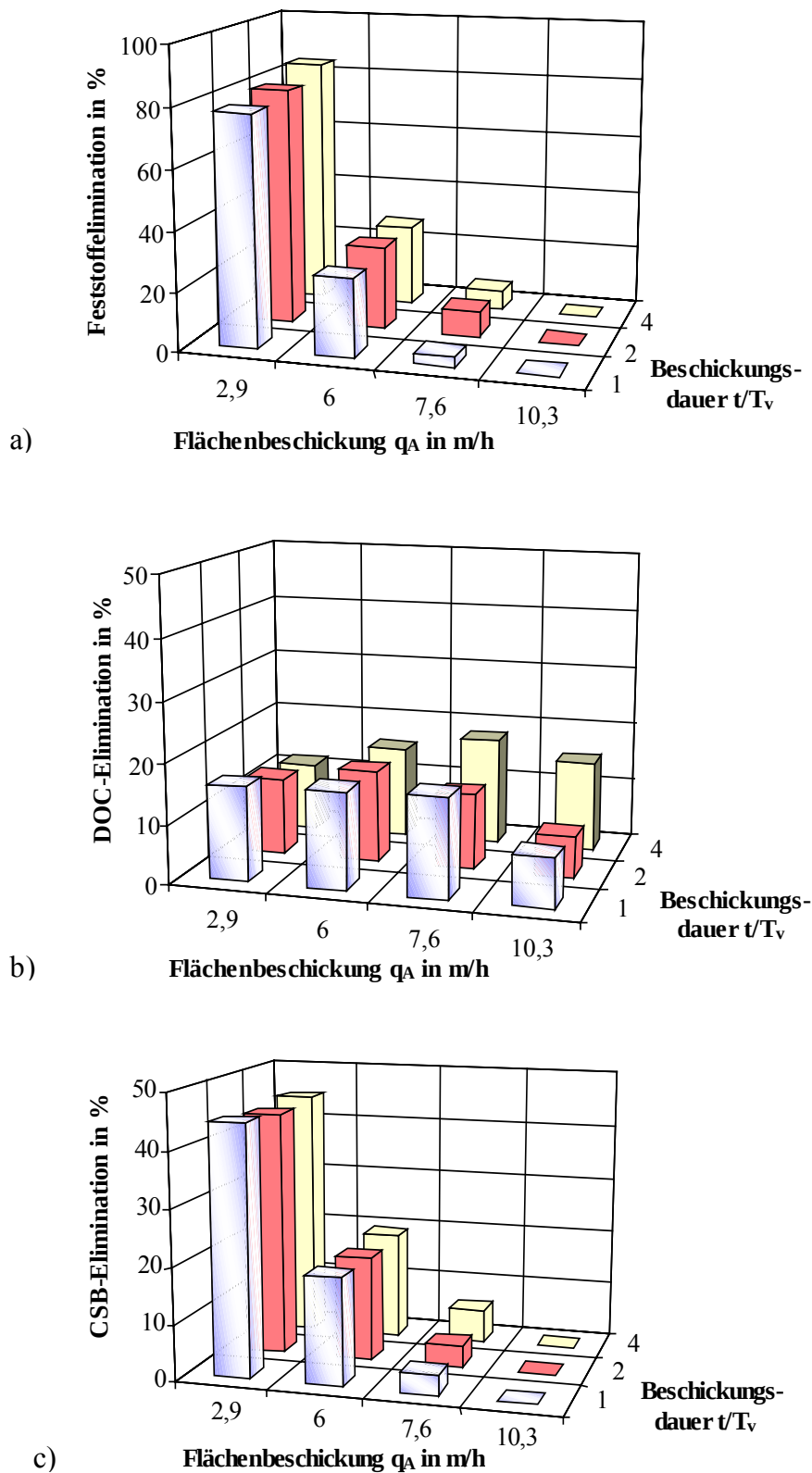


Abb. 18: Schmutzstoffelimination in Abhängigkeit von der Beschickungsdauer in der Versuchsreihe vom 13.09.1997: a - abfiltrierbare Stoffe; b - DOC; c - CSB

Tab. 14: Ergebnisse der Versuchsreihe vom 12.12.1997

q _A in m/h	Abfiltrierbare Stoffe		CSB		DOC	
	C _{Zu} in mg/l	C _{KÜ} /C _{Zu}	C _{Zu} in mg/l	C _{KÜ} /C _{Zu}	C _{Zu} in mg/l	C _{KÜ} /C _{Zu}
2,8	95	0,48	130	0,52	16,1	0,83
5,7	124	0,58	132	0,61	15,6	0,82
7,3	95	0,95	105	0,90	16,1	0,78
10,4	80	0,99	90	0,98	15,5	0,82

7.6.3 Beurteilung der Ergebnisse

Die zusammenfassende Darstellung aller Versuche ist in Abb. 19 gegeben.

Wie aus Abb. 19 ersichtlich, werden die im Mischwasser erzeugten Flocken nur bei kleinen hydraulischen Flächenbeschickungen im Becken zurückgehalten. Bei einer Steigerung der Beschickung über etwa 7 m/h können sie sich infolge unzureichender Dichte nicht mehr absetzen. Der Feststoffgehalt im Klärüberlauf liegt in gleicher Größenordnung wie im Zulauf.

Bei hohen Flächenbeschickungen kann der Feststoffgehalt im Klärüberlauf jedoch höher als im Zulauf sein, wenn der bei vorigen niedrigen Zuflüssen auf dem Beckenboden liegende Schlamm aufgewirbelt und ausgetragen wird.

Der CSB-Gehalt im Klärüberlauf nimmt bei einer Erhöhung der Flächenbeschickung ebenso wie der Feststoffgehalt deutlich zu. Zusammenfassend kann eine gute Klärung nur bei niedrigen Flächenbeschickungen erzielt werden.

Für die Beurteilung der Mischwasserbehandlung in einem Durchlaufbecken ist neben der zurückgehaltenen Fracht die Wirkung des Beckens auf die Schmutzkonzentration im Klärüberlauf von großer Bedeutung.

Eine Zusammenstellung der ohne Abscheidung mit Lamellen erzielten Konzentrationswirkungsgrade η_c findet sich in Tab. 15. Sie wurden aufgrund gemessener Konzentrationen im Zulauf C_{Zu} und Klärüberlauf C_{KÜ} wie folgt berechnet:

$$\eta_c = \frac{C_{Zu} - C_{KÜ}}{C_{Zu}} \cdot 100 \%$$

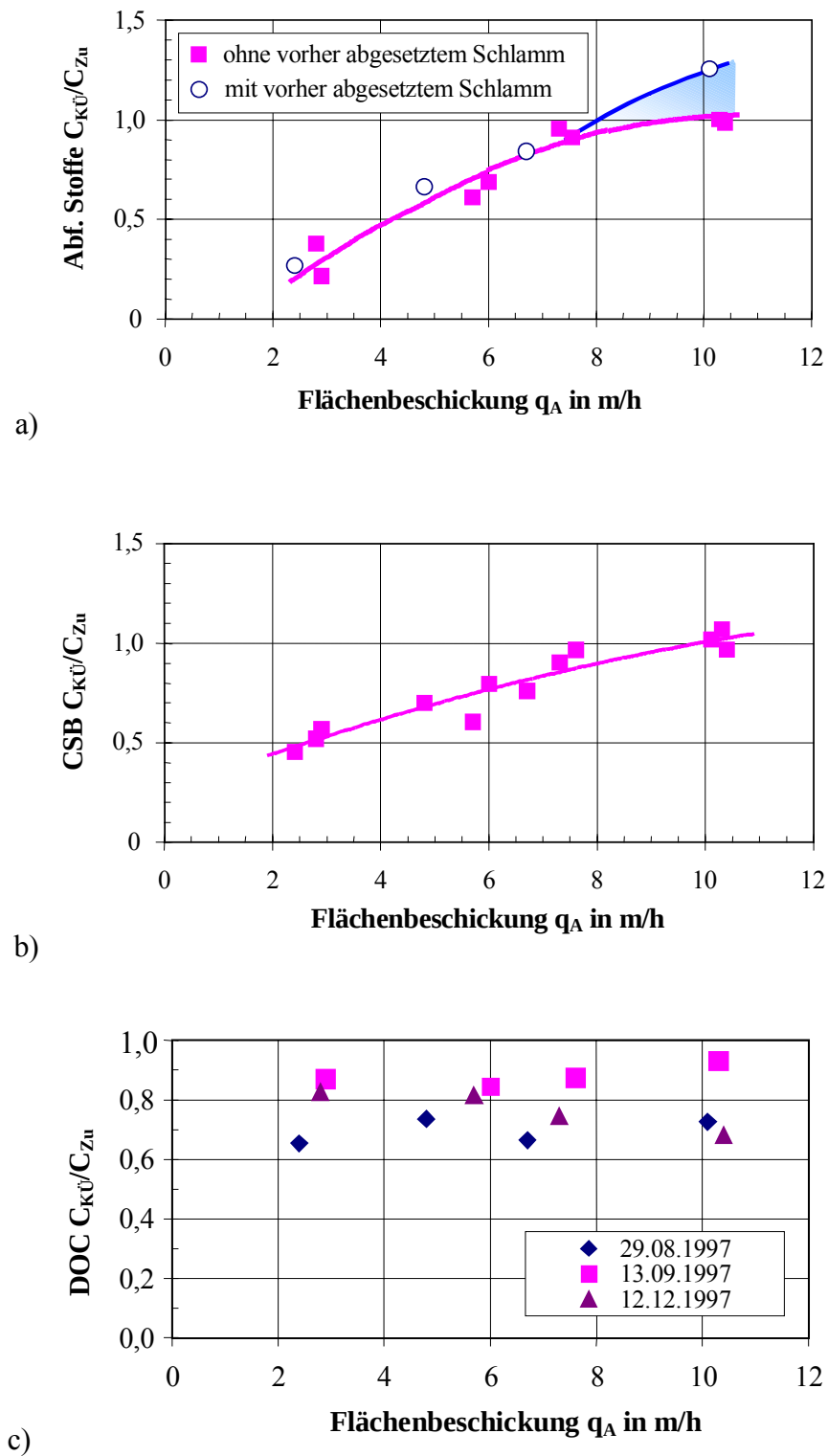


Abb. 19: Abhängigkeit der Schmutzstoffkonzentration im Klärüberlauf von der Flächenbeschickung: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB; c - DOC

Tab. 15: Konzentrationswirkungsgrade des Versuchsbeckens ohne Lamelleneinbau

q_A in m/h	Abfiltrierbare Stoffe		CSB		DOC	
	C_{zu} in mg/l	η_C in %	C_{zu} in mg/l	η_C in %	C_{zu} in mg/l	η_C in %
2,4 – 2,9	38 – 95	51,5 – 84,2	75 – 113	42,8 – 54,2	12,7 – 16,1	11,5 – 33,8
4,8 – 6,0	40 – 124	26,3 – 39,7	71,2 – 132	18,7 – 38,5	12 – 15,6	15,4 – 28
6,7 – 7,6	45 – 95	3,3 – 19,1	75,6 – 105	3,5 – 26,3	12,5 – 16,1	12,7 – 34,1
10,1 – 10,4	42 – 80	$\leq 1,5$	75,4 – 95	$\leq 2,2$	12 – 15,5	5,3 – 31,9

Tab. 15 verdeutlicht, daß bei der Fällung und Flockung in einem Durchlaufbecken ohne Abscheidung mit Lamellen die guten Konzentrationswirkungsgrade nur bei niedrigen Zuflüssen erzielt werden können. Bei einer Flächenbeschickung von ca. 2,5 m/h lag die maximale Feststoffelimination bei knapp 85 %, und die CSB-Elimination bei 54 %. Diese guten Wirkungsgrade nahmen bei der Zuflußsteigerung ab. Bei einer Flächenbeschickungen von 6 bis 8 m/h wurden hinsichtlich der Feststoffe und CSB sehr geringe Wirkungsgrade erzielt.

Eine Abhängigkeit zwischen dem DOC im Klärüberlauf und der Flächenbeschickung lag in den durchgeführten Untersuchungen nicht vor (vgl. Abb. 19c). Die Elimination von gelösten organischen Stoffe (gemessen als DOC), die durch die Adsorption stattfindet, ist vermutlich von der Wasserbeschaffenheit abhängig. In den hier durchgeführten Versuchen lag sie zwischen etwa 5 und 34%.

Die gewonnenen Ergebnisse stimmen mit den Angaben anderer Arbeiten überein und bestätigen den Zusammenhang zwischen Stoffaustrag über den Klärüberlauf und hydraulischer Beschickung. Ein Vergleich der erzielten CSB-Eliminationen mit den Ergebnissen von DOHMANN et al. (1994) ergab geringfügig bessere Werte (Abb. 20). Nach seinen Angaben zeigte die CSB-Elimination positive Werte nur bis zu einer q_A von etwa 5 m/h, nach eigenen Ergebnissen bis zu etwa 7 m/h. Bei einer Flächenbeschickung kleiner als 2 m/h lagen die erzielten Eliminationen in gleicher Größenordnung.

Der Unterschied erklärt sich durch den Einsatz eines wirksameren Flockungsmittels, das schneller absetzbare Flocken erzeugt. Das für die vorliegende Arbeit verwendete Sachtoflocc stellt eine Kombination von Polyaluminium mit einem kationischen Polymer dar. Wie bekannt ist, verbessern organische Polymere die Absetzbarkeit der abscheidbaren Fällprodukte durch Brückenbildung zwischen zwei oder mehreren Suspensa.

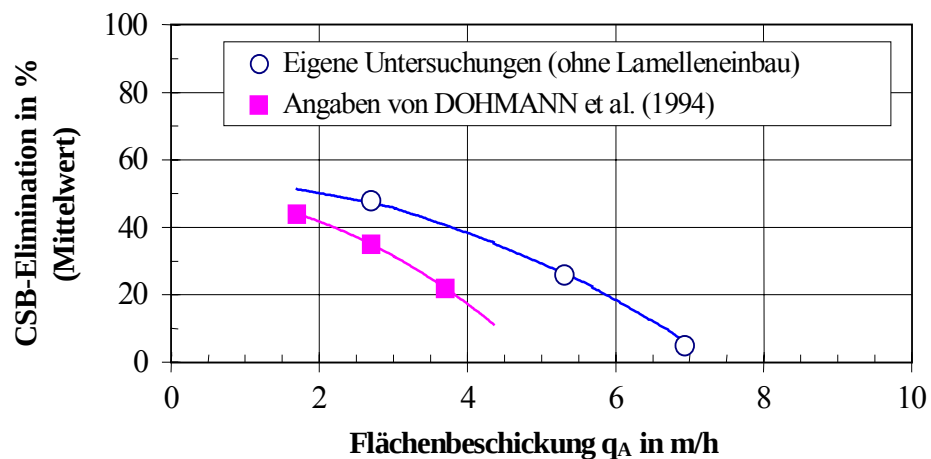


Abb. 20: Vergleich der erzielten CSB-Elimination mit den Literaturangaben

Obwohl die eingesetzten Chemikalien die Größe der erzeugten Flocken und damit die Absetzgeschwindigkeit beeinflussen, ist nicht zu erwarten, daß bei einer Flächenbeschickung von 10 m/h allein durch die Chemikalienzugabe ein befriedigender Wirkungsgrad erreicht wird, selbst wenn man eine bessere Chemikalie finden könnte.

Zu dieser Aussage führen auch die Ergebnisse der im Vorfeld dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Laboruntersuchungen von BONDAREVA & STOTZ (1996), die 13 verschiedene Chemikalien getestet haben. Die Auswahl der Chemikalien basierte auf dem derzeitigen Kenntnisstand und umfaßte die für Regenwasser effektiven Flockungsmittel, von denen Sachtofloc sich als eine gute Chemikalie für das Mischwasser zeigte.

7.7 Schmutzstoffverteilung im Becken

7.7.1 Allgemeines

Wie bereits im Kapitel 6 erwähnt, stellen die Flächenbeschickung und die Absetzgeschwindigkeit der Partikel die Auslegungsgrundlage für Absetzbecken dar.

Ein Durchlaufbecken wird als Speicher- und Absetzbecken dimensioniert. Es besitzt einen für Absetzbecken üblichen Klärüberlauf und einen Abfluß zur Kläranlage (Drosselabfluß). Ein Durchlaufbecken ist in vereinfachter Weise in Abb. 21 dargestellt.

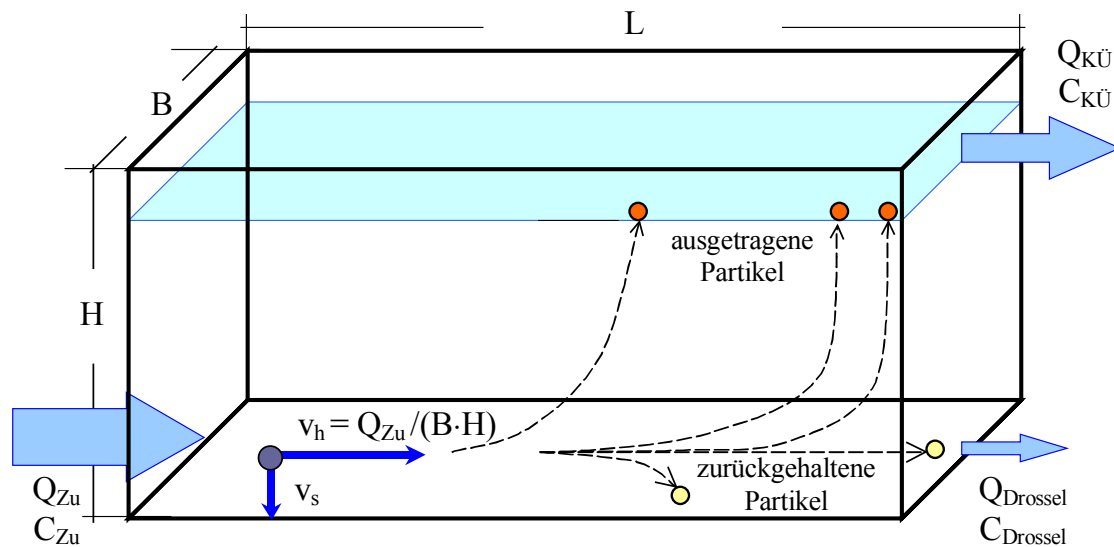


Abb. 21: Weg eines Partikels durch ein rechteckiges Durchlaufbecken

Wie Abb. 21 verdeutlicht, wird der Weg eines Partikels, durch eine vertikale und eine horizontale Komponente. Die vertikale Komponente ist nach unten gerichtet und bestimmt die Absetzgeschwindigkeit der Teilchen v_s (Schwerkraftkomponente). Die horizontale Komponente ergibt sich aus dem kontinuierlichen Durchströmen des Beckens (horizontale Fließgeschwindigkeit v_h).

Die vertikale Komponente bleibt für ein Partikel konstant. Die auf das Partikel wirkende horizontale Komponente, durch Division des Volumenstromes zu Querschnittfläche berechnet, ändert sich.

Im Bereich des Einlaufs besitzt das Teilchen eine hohe horizontale Fließgeschwindigkeit. Im Becken nimmt sie ab, da die durchströmte Fläche ansteigt, und erreicht vorübergehend einen konstanten Wert. Im Bereich der Drosselleitung nimmt die horizontale Komponente unter dem Einfluß der Drosselcharakteristik zu.

Je nach Größe und Richtung des resultierenden Bewegungsvektors werden die Partikel über den Klärüberlauf ausgetragen bzw. im Becken zurückgehalten. Die zurückgehaltenen Partikel befinden sich am Beckenboden oder im Drosselablauf. Dabei ist es erwünscht, daß über die Drossel ein hoher Anteil der zurückgehaltenen Feststoffe abgeleitet wird, um die Gefahr zu vermindern, daß am Boden liegende Partikel bei Zuflußsteigerung über den Klärüberlauf in das Gewässer gelangen.

7.7.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Untersuchungen zur Beurteilung der Schmutzstoffverteilung wurden für vier verschiedene Zuflüsse durchgeführt. Zwischen einzelnen Versuchen erfolgte die Entleerung und Spülung des Beckens. Die Flächenbeschickungen q_A betrugen in vier Versuchen 2,8; 5,7; 7,3 und 10,4 m/h.

Nach einer Verweilzeit ($t = T_v$) wurden bei jedem Versuch Proben aus der Klärüberlaufrinne, aus dem Drosselabfluß und in halber Wassertiefe am Ende des Beckens gezogen und analysiert. Die gewonnenen Ergebnisse sind in Tab. 16 dargestellt.

Tab. 16: Ergebnisse der Untersuchungen zur Schmutzstoffverteilung im Becken

Versuch	q_A in m/h	Probenahmestelle	Relative Konzentration C/C_{Zu}	
			Abf. Stoffe	CSB
1	2,8	Klärüberlauf	0,38	0,48
		Halbe Wassertiefe	0,51	0,54
		Drosselabfluß	0,6	0,62
2	5,7	Klärüberlauf	0,58	0,63
		Halbe Wassertiefe	0,6	0,62
		Drosselabfluß	0,76	0,8
3	7,3	Klärüberlauf	0,95	0,94
		Halbe Wassertiefe	0,95	0,96
		Drosselabfluß	1,06	1,05
4	10,4	Klärüberlauf	0,99	0,98
		Halbe Wassertiefe	1,0	0,99
		Drosselabfluß	1,1	1,09

Es hat sich gezeigt, daß sich der größte Teil der Feststoffe sowie des CSB in der unteren Beckenhälfte befand. Die Proben aus halber Wassertiefe wiesen bei q_A von 5,7 bis 10,4 m/h ähnliche Konzentrationen auf wie der Klärüberlauf. Bei einer Beschickung von 2,8 m/h war die Klärüberlaufqualität deutlich besser als die Qualität des Wassers in halber Wassertiefe.

Über den Drosselabfluß wurden bei allen Beschickungen mehr Feststoffe ausgetragen als über den Klärüberlauf. Gleiches gilt für den CSB. Bei kleinen Zuflüssen waren die Konzentrationen im Drosselabfluß geringer als im Zulauf. Unzureichende horizontale Fließgeschwindigkeiten v_h führen zur Ablagerung von absetzbaren Stoffen an der Beckensohle.

Das Untersuchungsspektrum der hydraulischen Verhältnisse im Versuchsbecken ist in Tab. 17 dargestellt. Im Auslauf des Beckens (Drosselleitung) lag die horizontale Fließgeschwindigkeit durchschnittlich um 1 m/s.

Tab. 17: Hydraulische Verhältnisse bei der Versuchsdurchführung zur Untersuchung der Schmutzstoffverteilung im Becken

Versuch	Flächenbeschickung q_A	Zufluß Q_{Zu}	mittlere horizontale Fließgeschwindigkeit im Becken v_h	Klärüberlaufabfluß $Q_{KÜ}$		Drosselabfluß $Q_{Drossel}$	
				Volumen	Anteil von Q_{Zu}	Volumen	Anteil von Q_{Zu}
	m/h	m³/h	cm/sek	m³/h	%	m³/h	%
1	2,8	10,1	0,15	7,2	71	2,9	29
2	5,7	20,5	0,31	17,6	86	2,9	14
3	7,3	26,3	0,39	23,4	89	2,9	11
4	10,4	37,4	0,56	34,6	92	2,9	8

7.7.3 Beurteilung der Ergebnisse

Wie aus Tab. 16 ersichtlich, hängt nicht nur die Beschaffenheit des Klärüberlaufs, sondern auch die des Drosselabflusses und der Probe aus halber Wassertiefe von der hydraulischen Beschickung ab. Mit Erhöhung der Beschickung nehmen die Konzentrationen an abfiltrierbaren Stoffen und CSB in allen Proben zu, so lange bis sie die Zulaufkonzentration erreichen.

Bei allen untersuchten Zuflüssen wurde im Klärüberlauf eine niedrigere Konzentration erzielt als im Drosselabfluß. Dabei war die Differenz zwischen den Konzentrationen bei niedrigen hydraulischen Beschickungen größer als bei hohen. Wenn bei einer q_A von 2,8 m/h die Feststoffkonzentration im Klärüberlauf nur etwa 63 % von der Drosselkonzentration betrug, erreichte sie bei maximaler Flächenbeschickung von 10,4 m/h etwa 90 %. Eine weitere Erhöhung der hydraulischen Belastung führt dazu, daß über den Klärüberlauf der gleiche Feststoffgehalt wie aus den Drosselabfluß ausgetragen wird.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Verteilung der Feststofffracht in einem Durchlaufbecken bei unterschiedlichen Flächenbeschickungen. Die Abbildung wurde aufgrund der Fracht-

bilanzierung erstellt. Die Ermittlung der am Beckenboden lieengebliebenen Fracht erfolgte wie folgt:

$$F_{\text{Beckenboden}} = C_{\text{Zu}} \cdot Q_{\text{Zu}} - (C_{\text{KÜ}} \cdot Q_{\text{KÜ}} + C_{\text{Drossel}} \cdot Q_{\text{Drossel}})$$

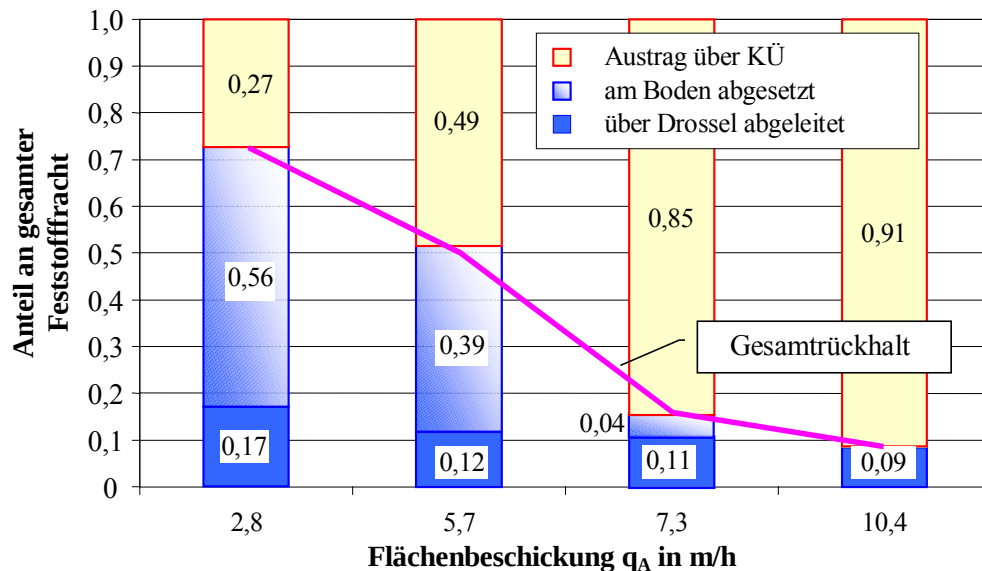


Abb. 22: Verteilung der Feststofffracht im Durchlaufbecken (während der Überlaufdauer) bei der Fällung/Flockung ohne Lamellen bei unterschiedlichen Flächenbeschickungen

Wie aus Abb. 22 ersichtlich, verringert sich bei Erhöhung der Flächenbeschickung der Frachtanteil der über die Drossel abgeleiteten Feststoffe, obwohl die Konzentration im Drosselabfluß zunimmt (vgl. Tab. 16) und als Folge davon die absolute Menge. Mit steigender hydraulischer Belastung verringert sich die am Beckenboden lieengebliebene Fracht, und der Anteil der über den Klärüberlauf ausgetragenen Fracht nimmt wesentlich zu.

Bei q_A von 2,8 m/h betrug der Feststoffaustrag über den Klärüberlauf 27 % von der zufließenden Fracht, bei q_A von 10,4 m/h etwa 91 %. Dadurch läßt sich die während der Überlaufdauer (ohne Berücksichtigung der Fangwirkung) im Becken zurückgehaltene Fracht mit 73 % bei 2,8 m/h und mit 9 % bei 10,4 m/h einschätzen.

Hier ist zu bemerken, daß der Feststoffrückhalt bei der Flächenbeschickung von 10,4 m/h nur auf das Weiterleiten eines Teils des Mischwassers über den Drosselabfluß zurückzuführen ist. Eine Klärung findet dabei wegen des Flockenaustrages nicht statt. Bei einer Flächenbeschickung von 2,8 m/h spielt die Sedimentation eine wichtige Rolle für den Stoffrückhalt. Ihr Anteil an dem erzielten Rückhalt lag bei der genannten Beschickung bei etwa 70 %.

7.8 Zusammenfassende Interpretation

Die durchgeführten Untersuchungen weisen die prinzipielle Wirksamkeit der Fällung und Flockung zur Mischwasserbehandlung nach und machen den Zusammenhang zwischen dem Stoffaustrag über den Klärüberlauf und der Flächenbeschickung q_A deutlich.

Die richtige Wahl und Einmischung der Flockungskemikalien lassen bei den schwankenden Mischwasserzuflüssen eine gute Flockenbildung erreichen. Die Chemikalien können direkt in das Rohr (so genannter Rohrflocker) zugegeben werden. Bei effektiven Chemikalien reicht die Strecke zur Mikrofloekenbildung aus, um große Flocken zu erzeugen.

Empfohlen wird, den Rohrflocker auf die maximale hydraulische Belastung auszulegen, um den Flockenzerfall bei hohen Zuflüssen zu vermeiden. Weiterhin wird eine Fließgeschwindigkeit von 2 bis 2,5 m/s beim Bemessungszufluß empfohlen. So bleibt sie auch bei nicht zu stark schwankenden Zuflüssen im von GROHMANN (1990) angegeben optimalen Bereich und sichert dadurch die Wirksamkeit des Verfahrens.

Der Rückhalt der erzeugten Flocken im Durchlaufbecken hängt stark von der hydraulischen Belastung ab. Ohne Abscheidung der gebildeten Partikel mit Lamellen wird im Durchlaufbecken eine gute Klärung nur bei niedrigen Flächenbeschickungen erzielt. So lag, z.B., bei einer q_A von 2,5 m/h der maximal erreichte Konzentrationswirkungsgrad bei knapp 85 %. Mit Zuflußsteigerung nahm er aufgrund des vermehrten Flockenaustrages über den Klärüberlauf ab. Ab einer Flächenbeschickung von etwa 7 m/h wurde eine sehr geringe bzw. keine Wirkung erzielt. Ab dieser hydraulischen Grenze können auch negative Wirkungsgrade auftreten, wenn der bei vorigen niedrigen Zuflüssen aufgrund unzureichender Schleppspannung auf dem Beckenboden liegegebliebene Schlamm aufgewirbelt und über den Klärüberlauf ausgetragen wird. Der CSB-Gehalt im Klärüberlauf nimmt bei einer Erhöhung der Flächenbeschickung ebenso wie der Feststoffgehalt zu.

Zusammenfassend kann bei der Fällung und Flockung in einem nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) ausgelegten Durchlaufbecken ohne Partikelabscheidung mit Lamellen ein guter Stoffrückhalt nur bei einer Flächenbeschickung bis etwa 5 m/h erzielt werden. Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse kann man bei dieser Grenze während der Überlaufdauer mit einem Frachtrückhalt für die abfiltrierbaren Stoffe von etwa 60 % rechnen. Im Bereich bis zu einer q_A von 2,5 m/h werden während der Überlaufdauer etwa 75 % von der zufließenden Feststofffracht zurückgehalten, und nur ein Viertel wird über den Klärüberlauf ausgetragen. Der prozentuale Anteil der Sedimentationswirkung an dem erzielten Rückhalt liegt hier bei etwa 70 %.

Die Erhöhung der hydraulischen Belastung führt dazu, daß bei heute zulässiger maximaler Flächenbeschickung von 10 m/h der Stoffrückhalt nur auf das Weiterleiten des Mischwassers über die Drossel zurückzuführen ist. Eine Klärung findet dabei nicht statt. Bezogen auf die gesamte zufließende Fracht kann der Feststoffrückhalt während der Überlaufdauer bei q_A von 10 m/h mit etwa 10 % eingeschätzt werden.

Ohne Verbesserung des Flockenrückhaltes kann das Verfahren bei hohen Flächenbeschickungen nicht eingesetzt werden.

7.9 **Schlußfolgerungen und Diskussion**

Eigene sowie bereits vorhandene Untersuchungsergebnisse zur Fällung und Flockung von Mischwasser lassen deutlich darauf schließen, daß bei einer Flächenbeschickung von 10 m/h allein durch die Chemikalienzugabe ein befriedigender Wirkungsgrad im Durchlaufbecken nicht zu erwarten ist, selbst wenn man eine effektivere Chemikalie finden könnte.

Um die Flocken bei höheren Flächenbeschickungen zurückzuhalten, empfiehlt sich, Einbauten in das Becken zu integrieren.

In Untersuchungen in einem Stauraumkanal von PECHER K. H. (1997) wurden durch Installation eines Lamellenabscheiders deutlich verbesserte Wirkungsgrade erreicht. Auch in anderen Bereichen der Wasserreinigung sind viele positive Anwendungen von Lamellen zur Abtrennung flockiger Stoffe bekannt.

Da derzeit zum Lamelleneinsatz in Regenbecken keine praktischen Erfahrungen vorliegen, ergeben sich für den Lamelleneinbau im Durchlaufbecken einige zu klärende Punkte.

Welche Abscheiderfläche zu installieren ist, sollte aufgrund der Absetzgeschwindigkeitsmessungen entschieden werden. Die eigenen Ergebnisse, die im Kapitel 6 dargestellt sind, lassen erwarten, daß durch Vergrößerung der Beckengrundfläche auf das 2- bis 5-fache eine gute Abscheidung der geflockten Partikel bei q_A von 10 m/h erreicht wird.

Weiterhin muß geklärt werden, welcher Abstand der Absetzebenen und welcher Neigungswinkel für die Flockenabscheidung im Mischwasser am zweckmäßigsten sind.

8 Experimentelle Untersuchungen zur Fällung und Flockung mit Lamelleneinbau

8.1 Allgemeines

Neben einer mittels Fällung und Flockung erreichten Erhöhung der Absetzgeschwindigkeit der Partikel kann die Sedimentationsleistung eines Absetzbeckens durch eine Vergrößerung der Absetzfläche verbessert werden.

Heutzutage werden bei der Wasserreinigung Parallelplatten- oder Lamellenabscheider erfolgreich eingesetzt. Diese Systeme weichen hauptsächlich in der Bewegungsrichtung des Wassers und der abzutrennenden Partikel sowie in Form der Durchflußprofile voneinander ab. Sie werden im Absetzbecken schräg installiert, um eine selbsttätige Entschlammung zu erreichen.

Nach den Bewegungsrichtungen werden Gleich-, Gegen-, Kreuz- und Diagonalstromprinzip unterschieden (Abb. 23).

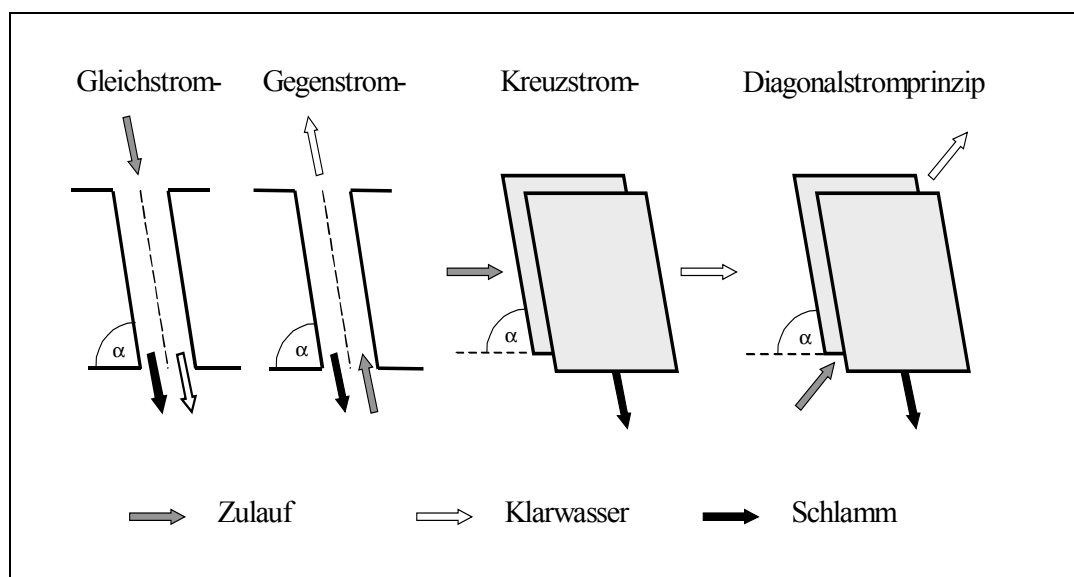


Abb. 23: Prinzip der Betriebsweise von Lamellenabscheidern nach SCHADE & SAPULAK (1984)

Der Gleichstromprinzip ist selten anwendbar, da durch die Nähe des Schlammabzugs zum Klarwasser die Gefahr der Rückvermischung und bei niedrigen hydraulischen Belastungen Verstopfungsgefahr bestehen. Der Vorteil dieses Verfahrens ist es, daß der Schlamm auch bei geringen Neigungswinkeln α abrutscht.

Der weit verbreitete Gegenstrombetrieb vermeidet die Nachteile des Gleichstrombetriebes. Die Neigung der Absetzebene muß jedoch aufgrund der gegenläufigen Strömungen deutlich höher gewählt werden.

Beim Kreuzstromsystem werden die Vorteile von Gleich- und Gegenstromprinzip vereint. Die Anwendung liegt vor allem im industriellen Bereich. Beim Kreuzstrombetrieb findet die Wasserströmung senkrecht zur Gleitrichtung des Schlammes statt.

Beim Diagonalstromsystem wird das zu reinigende Wasser auf einer Seite am unteren Ende des Lamellenpaketes über eine Tauchwand zugeführt. Das Ableiten des Klärwassers erfolgt diagonal. Der Schlamm wird analog dem Kreuzstromsystem senkrecht abgezogen. Ungleichmäßige Verteilung des Wassers über die Absetzfläche führt zu einer undifferenzierten Strömung. Trotz dieses Nachteils ist das System weit verbreitet. Der Grund dafür ist die einfache Bauart.

Beim Lamelleneinbau ist grundsätzlich die Sicherstellung einer laminaren Strömung zu beachten, um Turbulenzen zu vermeiden. Dafür werden die Module in einer gewissen Wassertiefe eingesetzt. Empfohlen wird, sie im Endbereich des Beckens zu installieren. Die schnell sedimentierenden Teilchen setzen sich dann vor dem Abscheider ab. In den Abscheider gelangen nur langsam sedimentierende, kleine Partikel. Dadurch verringert die Verstopfungsgefahr.

8.2 Theoretische Auslegung des Lamellenabscheiders

Der Weg eines abzutrennenden Partikels wird durch die Lamellen verkürzt. Abb. 24 zeigt den Absetzweg eines Partikels durch die Absetzebene. Die verfügbare Abscheiderfläche P entspricht der Summe der n horizontal projizierten Ebenen (Abb. 25). Der Neigungswinkel beträgt in der Regel $50-60^\circ$, um das Anhaften des Schlammes an den Lamellen zu verhindern.

Ein Partikel, das mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 % im Abscheider zurückgehalten wird (vgl. Abb. 24), tritt im Punkt A mit einer Geschwindigkeit v ein und wird spätestens im Punkt B abgeschieden. Dabei gilt für den Grenzfall, daß die Aufenthaltszeit im Abscheider gleich der Absetzzeit ist. In diesem Zeitraum legt das Partikel die folgende Wege zurück:

Richtung	X	Y
Strecke	$L_L \cdot \cos \alpha + \frac{h_b}{\sin \alpha}$	H
Geschwindigkeit	$v \cdot \cos \alpha$	$v \cdot \sin \alpha - v_s$
Damit gilt:	$t = \frac{L_L \cdot \cos \alpha + \frac{h_b}{\sin \alpha}}{v \cdot \cos \alpha} = \frac{H}{v \cdot \sin \alpha - v_s}$	

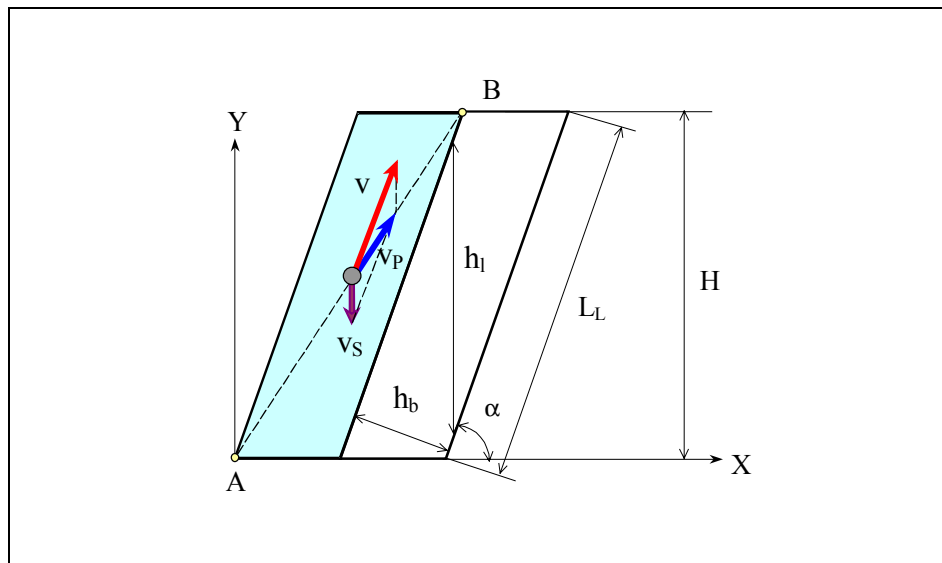


Abb. 24: Weg eines Partikels durch die Absetzebenen

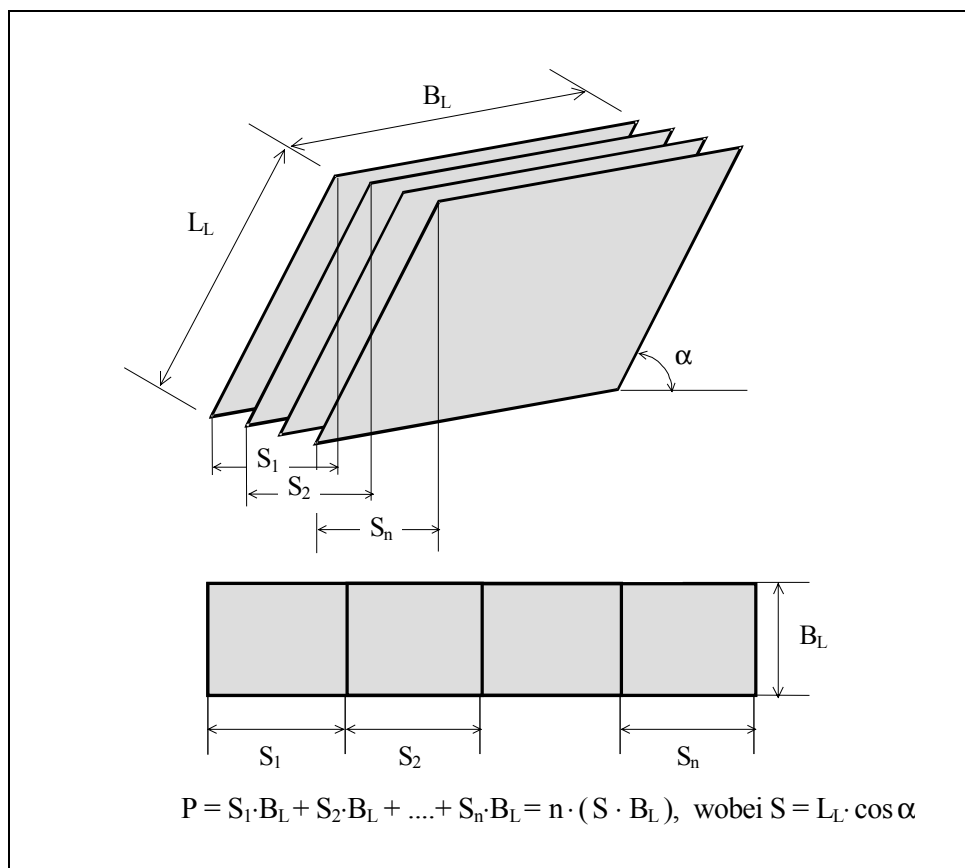


Abb. 25: Abscheiderfläche der Lamellen

Für die Lamellenbeschickung q_p muß nach den Angaben Fa. Munters Euroform GmbH dann folgende Bedingung erfüllt sein:

$$q_p \leq v_s \cdot \left(1 + \frac{h_l}{H}\right)$$

Für einen einfachen Einbau im Absetzbecken wurden die einzelnen Module zu Röhrenblöcken zusammengefaßt. Die Summe der horizontal projizierten Absetzfläche eines Blockes ergibt sich aus den Anzahl der Rohrreihen. Die Auslegung der Lamellen mit gewünschter Abscheidergröße erfolgt aufgrund der verfügbaren Basisfläche und der spezifischen Absetzfläche des Blockes.

8.3 Durchführung der Untersuchungen

Da zur Zeit zum Einsatz von Lamellenabscheidern in Regenbecken keine praktischen Erfahrungen vorliegen, wurden im Rahmen dieser Untersuchungen zwei Typen getestet. Die Module wurden von Fa. Munters Euroform GmbH und Fa. Philipp Müller zur Verfügung gestellt. Sie unterscheiden sich in Form, Abstand, Neigung der Absetzebene und in der spezifischen Absetzfläche.

Die Form der getesteten Lamellen ist in Abb. 26 dargestellt, die technische Charakteristik ist der Tab. 18 zu entnehmen.

Tab. 18: Technische Charakteristik der getesteten Lamellen

Typ	FS 41.80	DH 50
Hersteller	Fa. Munters Euroform GmbH	Fa. Philipp Müller
Abstand der Absetzebene in mm	80	50
Neigungswinkel in °	55	60
Spez. Absetzfläche in m ² /m ³	7,0	11,6
Höhe in m	0,5	0,65
Basisfläche L x B in m	2,5 x 1,07	2,2 x 1,0
Vergrößerung der Absetzfläche	ca. 2,5-fach	ca. 4,5-fach

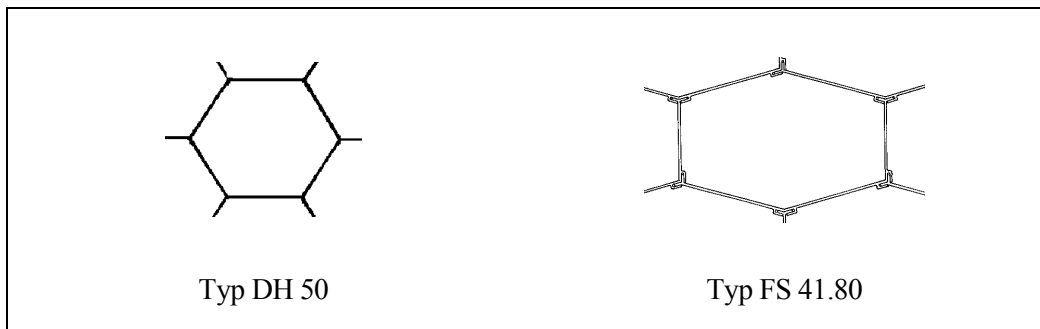


Abb. 26: Form der getesteten Lamellen

Lamellen wurden in der Sedimentationszone des vorhandenen Beckens vor dem Klärüberlauf eingesetzt (Abb. 27) und im Gegenstrom betrieben. Um zu vermeiden, daß Schlamm durch das einströmende Wasser aufgewirbelt und mitgerissen wird, betrug die Tiefe unterhalb der Lamellen ca. 0,8 m. Um einen gleichmäßigen Ablauf über die Oberfläche zu erzielen, wurde die alte Ablaufrinne durch eine T-förmige Längssammelrinne ersetzt.

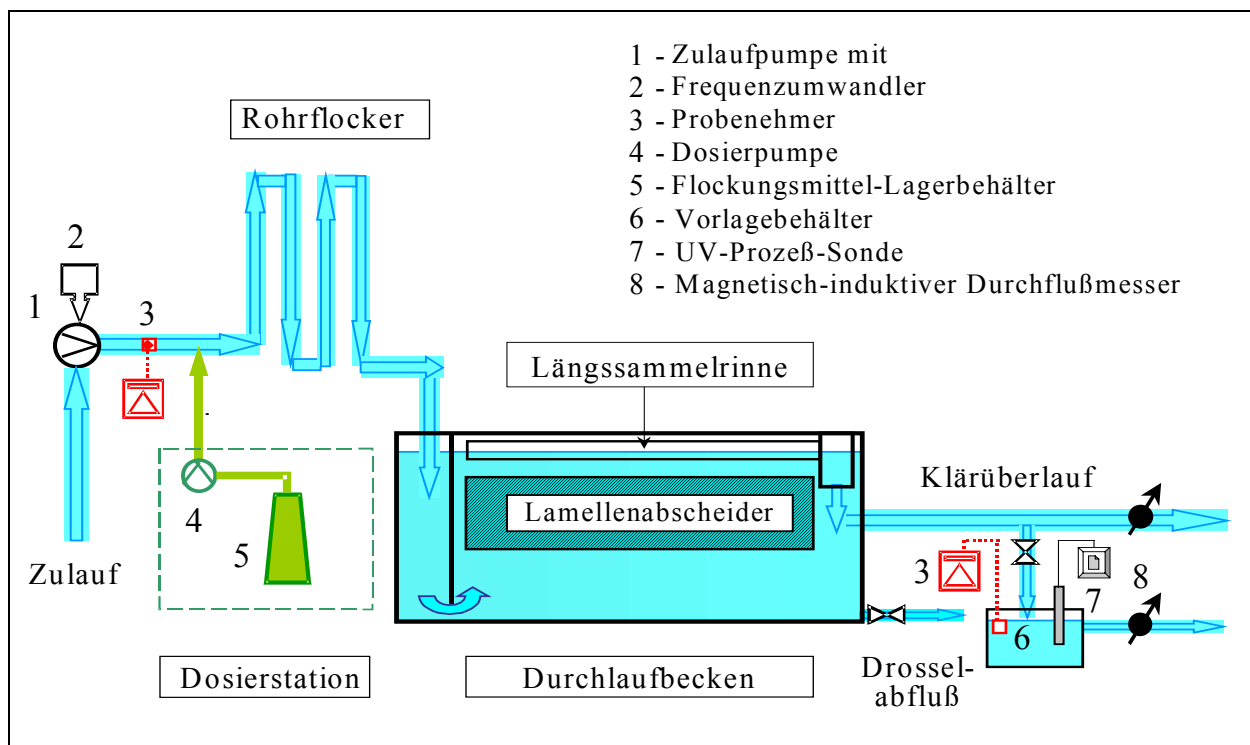


Abb. 27: Schema der erweiterten Versuchsanlage

In der ersten Phase wurden die Lamellen FS 41.80 getestet. Diese Versuche wurden von April bis Juli 1998 durchgeführt. Das verwendete Mischwasser wurde wie bisher in einem Regenüberlaufbecken des Klärwerks gespeichert. Es wies eine Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen von 68 bis 153 mg/l und CSB von 128 bis 274 mg/l auf, der DOC lag zwischen 16,8 und 35,8 mg/l.

In der zweiten Phase wurden die Lamellen DH 50 untersucht. Die Versuche wurden von September bis November 1998 durchgeführt. Das Mischwasser wurde direkt aus der Zulaufrinne des Klärwerks zur Anlage gepumpt. Dies hat ermöglicht, die Konzentrationsschwankungen zu berücksichtigen sowie die Klärung bei einem stark belasteten Mischwasser (Spülstoß) zu untersuchen. Die Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen lag in den Versuchen zwischen 45 und 299 mg/l, der CSB schwankte von 105 bis 347 mg/l und der DOC von 14 bis 33 mg/l.

8.4 Lamellen Typ FS 41.80

8.4.1 Darstellung der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Untersuchungsphase wurden fünf Versuchsreihen durchgeführt. Die Versuchsbedingungen sind in nachfolgender Tabelle zusammengefaßt.

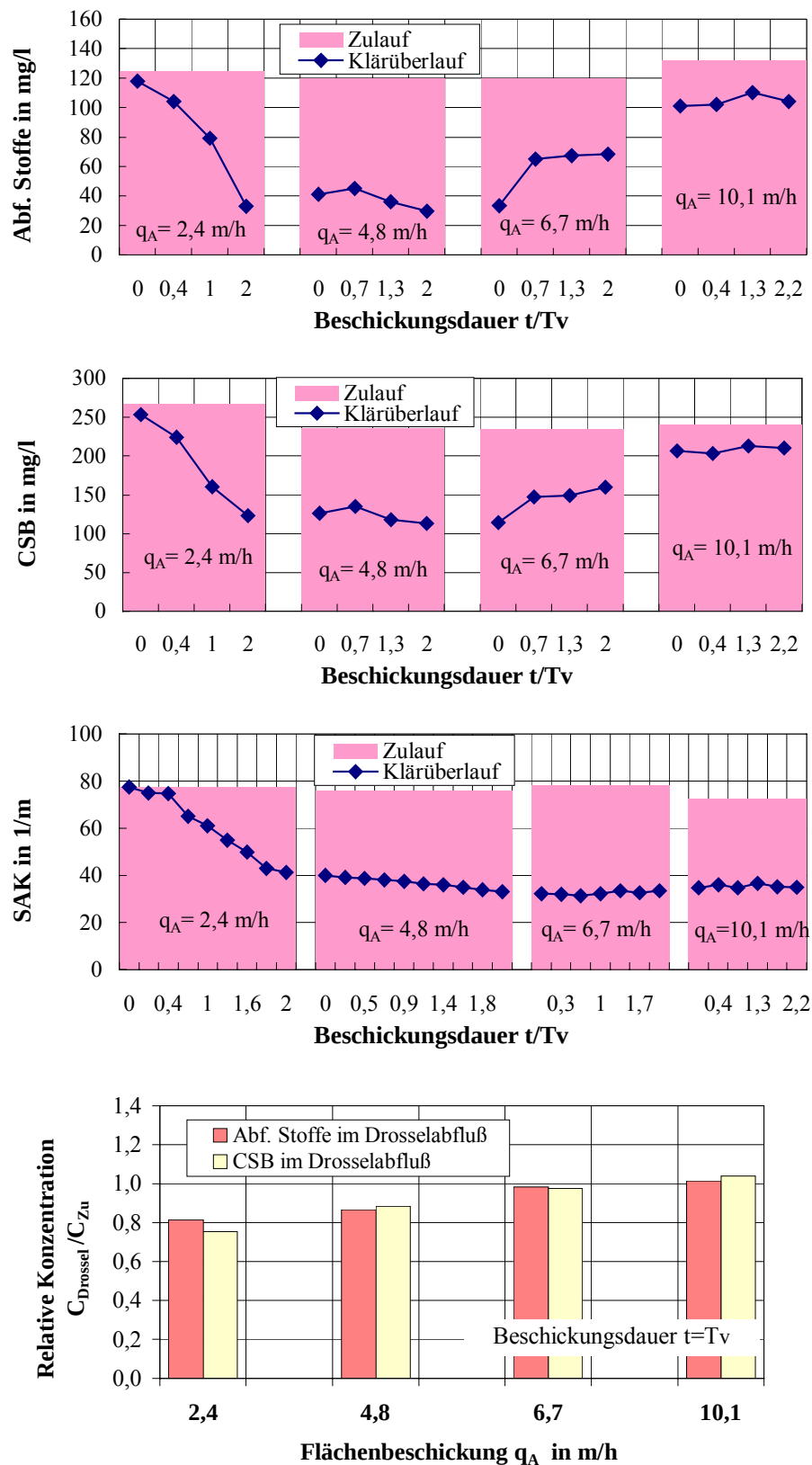
Tab. 19 Angabe zur Versuchsdurchführung mit Lamellen FS 41.80

Versuchsreihe	Datum	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3		Versuch 4	
		q _A in m/h	Dauer ^{*)} t/T _v	q _A in m/h	Dauer ^{*)} t/T _v	q _A in m/h	Dauer ^{*)} t/T _v	q _A in m/h	Dauer ^{*)} t/T _v
1	28.04.1998	2,4	2,0	4,8	2,0	6,7	2,0	10,1	2,2
2	02.06.1998	10,0	2,2	7,5	2,0	5,0	2,0	2,5	2,0
3	12.06.1998	2,5	2,0	5,2	2,0	7,1	2,0	9,8	2,2
4	29.06.1998	10,0	2,2	7,5	2,0	5,0	2,0	2,5	2,0
5	8.07.1998	2,6	2,0	5	2,0	6,8	2,0	9,5	2,2

^{*)} – bezogen auf Verweilzeit

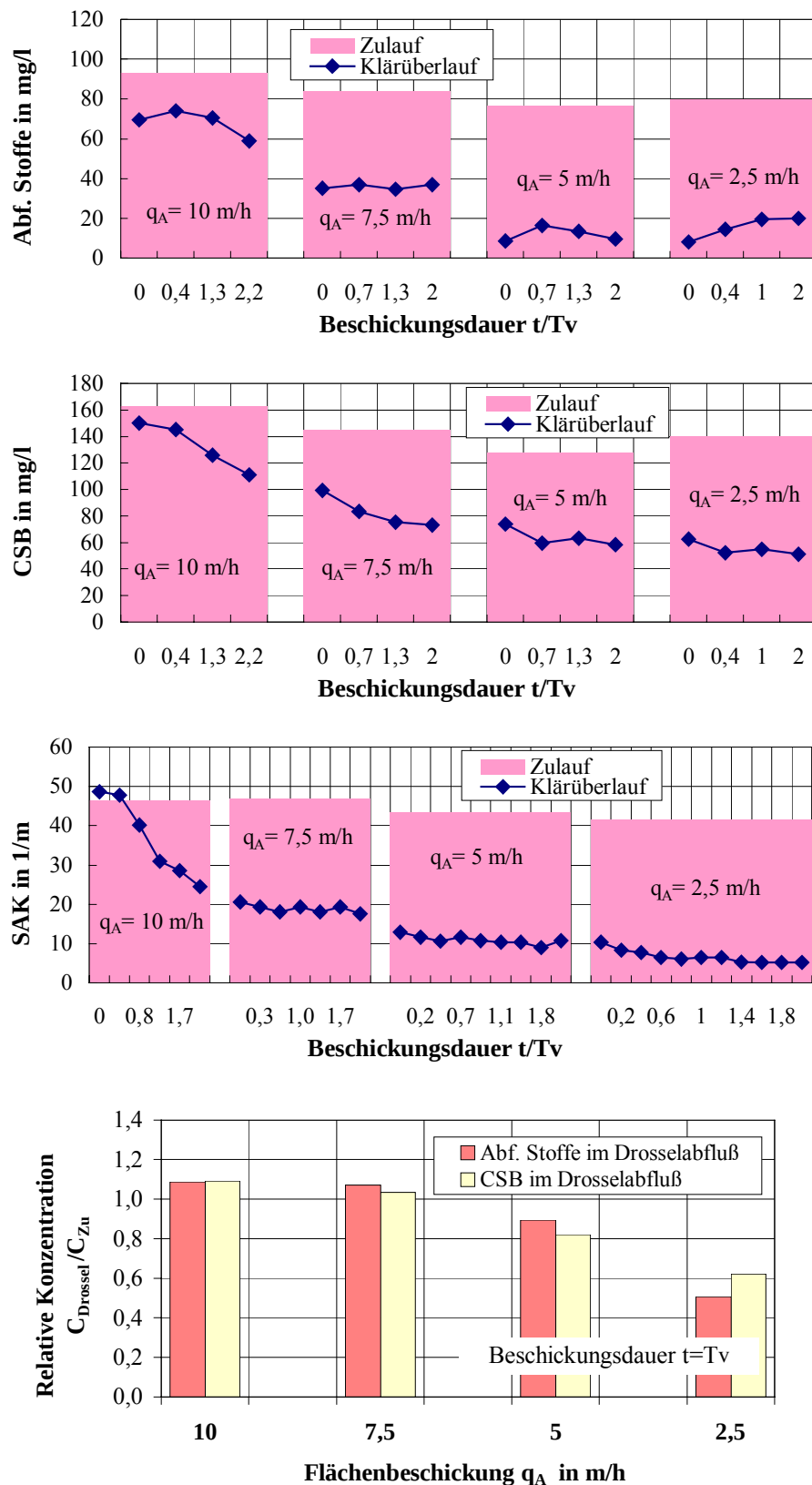
Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 28 zusammengestellt und zeigen den Verlauf der Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen, CSB und des SAK im Klärüberlauf innerhalb eines Versuches sowie den Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen und CSB im Drosselabfluß nach einer Dauer vom einfachen der Verweilzeit.

Anwendung von Flockungsverfahren bei der Regenwasserbehandlung



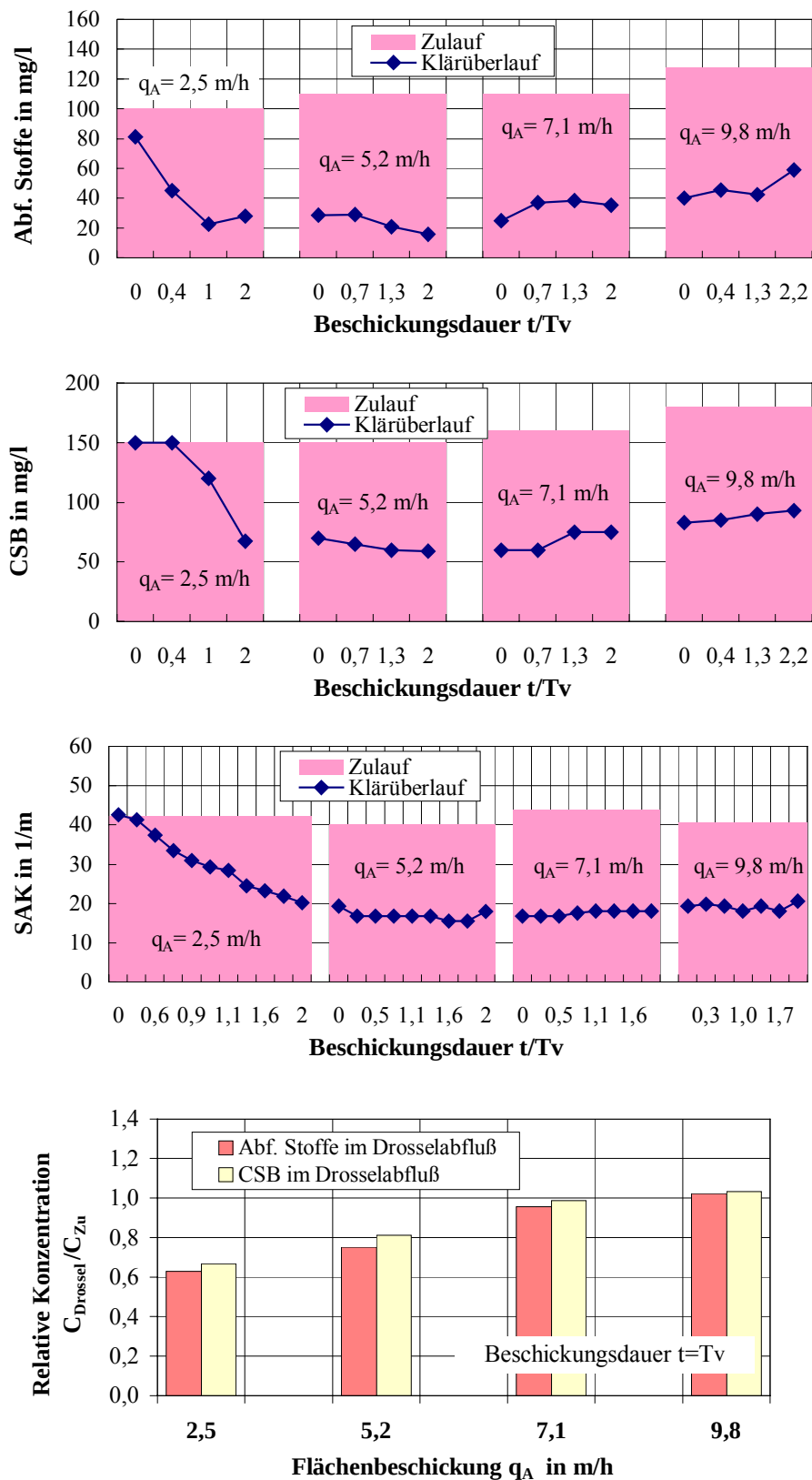
a) Ergebnisse der ersten Versuchsreihe vom 28.04.1998

Anwendung von Flockungsverfahren bei der Regenwasserbehandlung

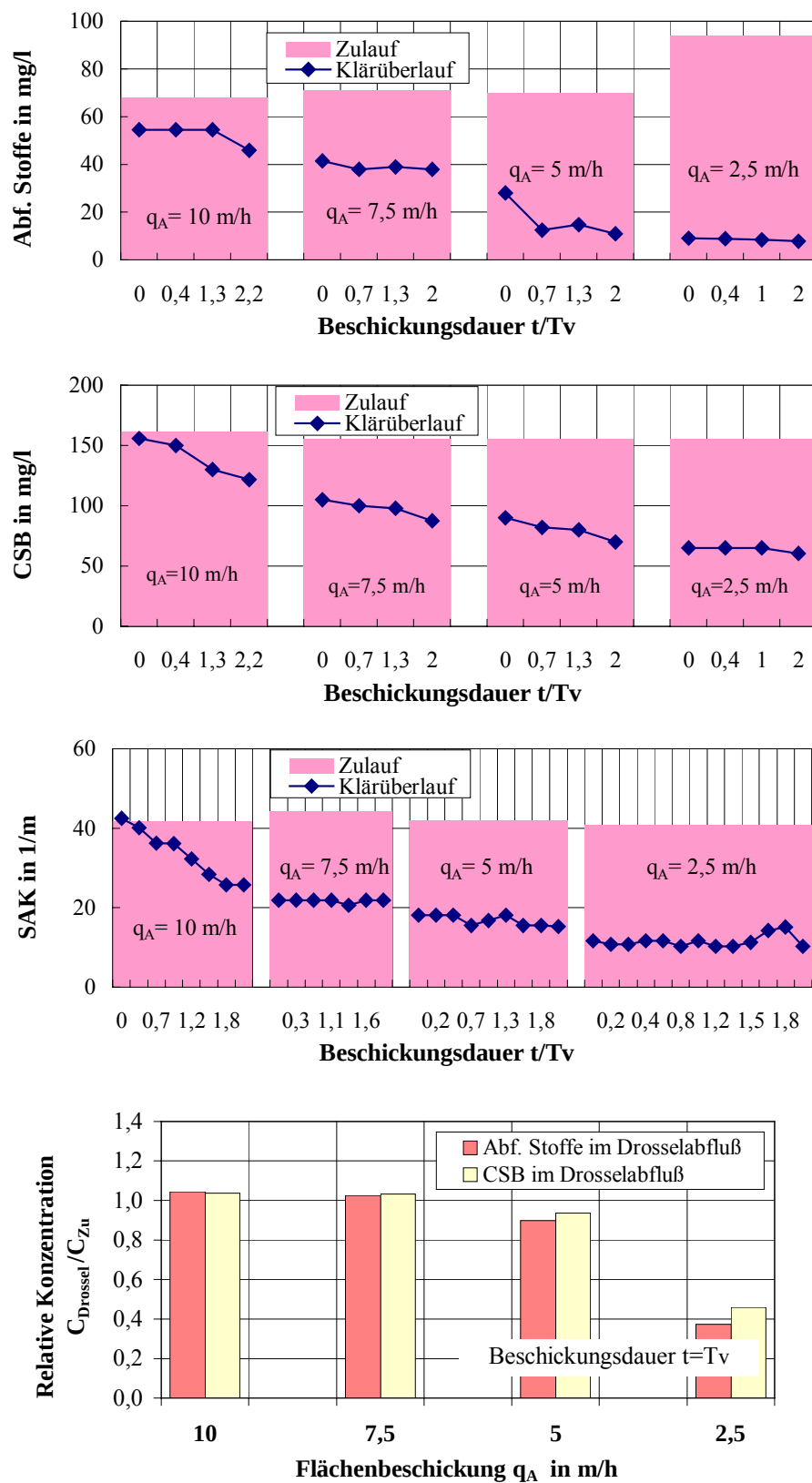


b) Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe vom 02.06.1998

Anwendung von Flockungsverfahren bei der Regenwasserbehandlung

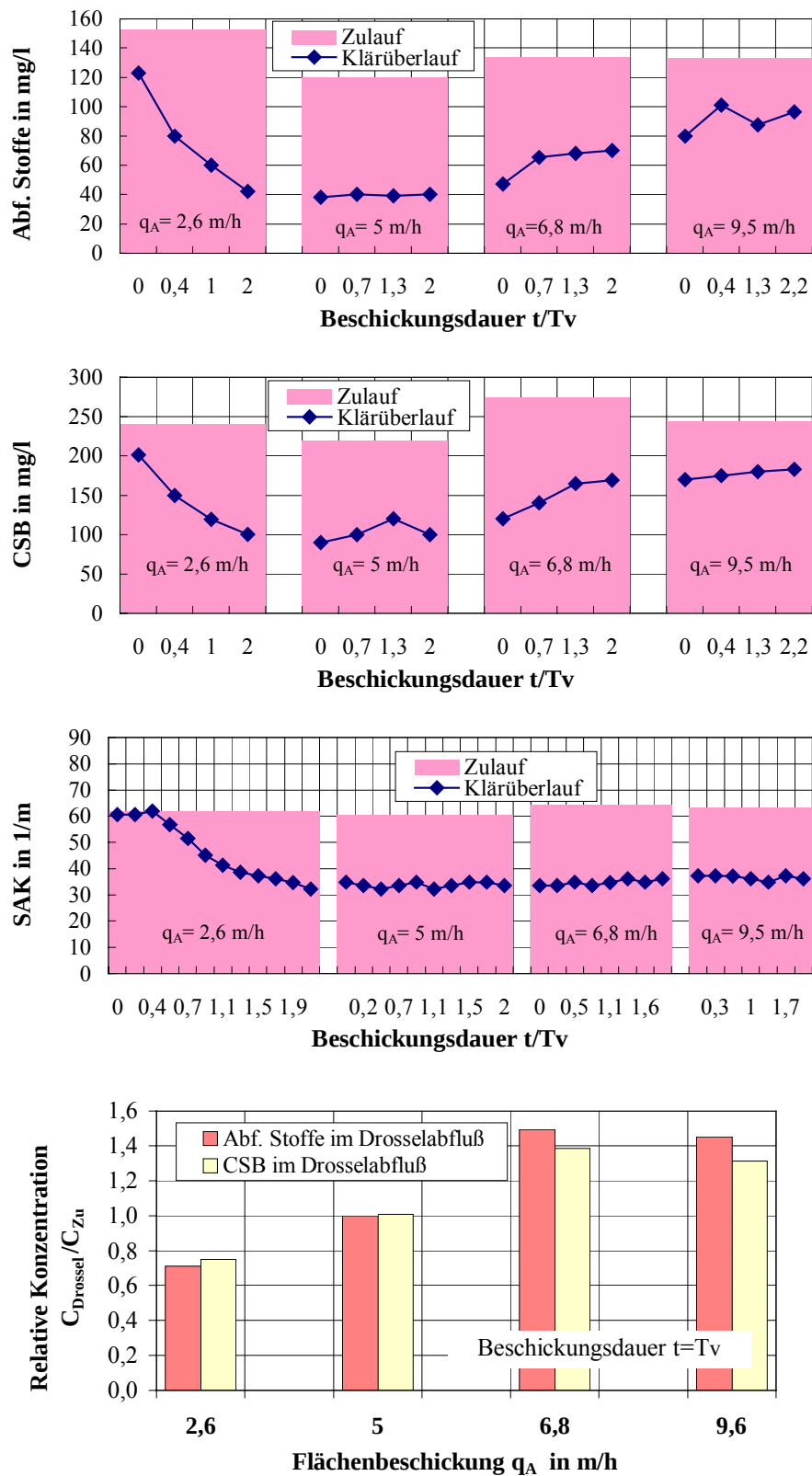


c) Ergebnisse der dritten Versuchsreihe vom 12.06.1998



d) Ergebnisse der vierten Versuchsreihe vom 29.06.1998

Anwendung von Flockungsverfahren bei der Regenwasserbehandlung



e) Ergebnisse der fünften Versuchsreihe vom 08.07.1998

Abb. 28: Zusammenstellung aller Versuchsergebnisse mit Lamellen FS 41.80

Wie Versuchsergebnisse zeigen, bleibt die Abhängigkeit des Stoffaustrages von der hydraulischen Beschickung erhalten. Die Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen und CSB im Klärüberlauf nimmt mit einer Zuflußsteigerung zu. Gleiches gilt für den Drosselabfluß. Die Höhe des Austrages über den Klärüberlauf bei maximalen Zuflüssen ist durch den Lamelleneinsatz jedoch deutlich geringer.

8.4.2 Beurteilung der Ergebnisse

Die in den Versuchen mit Lamellen FS 41.80 erzielte Klärüberlaufqualität ist den Untersuchungsergebnissen ohne Lamelleneinbau in Abb. 29 gegenübergestellt.

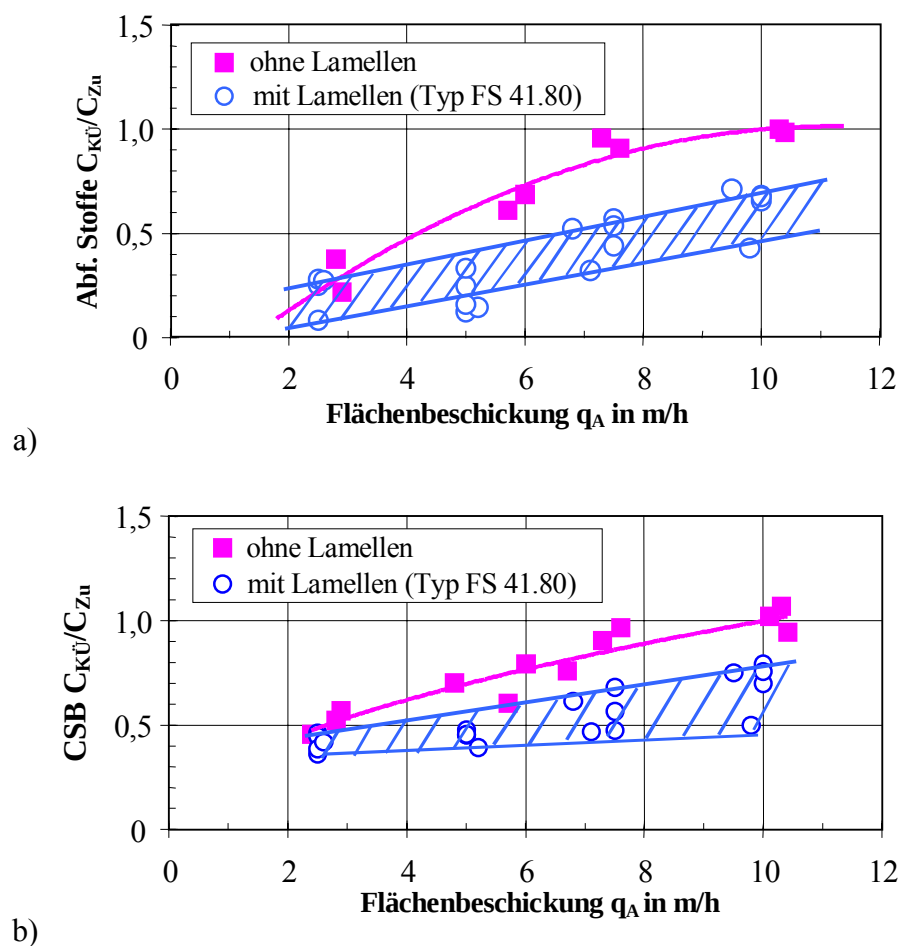


Abb. 29: Erzielte Klärüberlaufqualität bei Einbau der Lamellen FS 41.80 und Vergleich mit den Untersuchungen ohne Lamellen: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB

Der Ergebnisvergleich zeigt deutlich auf, daß durch den Lamelleneinsatz unter gleichen Randbedingungen wesentlich weniger Feststoffe und CSB über den Klärüberlauf ausgetragen wurden. Bei Flächenbeschickungen bis etwa 4 m/h wurde nur ein geringfügiger Unterschied in der Klärleistung beobachtet. Mit Erhöhung der zufließenden Wassermenge steigt die Differenz zwischen den erreichten Konzentrationen an. Bei der Flächenbeschickung q_A von 10 m/h betrug die relative Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen bei dem Lamelleneinsatz durchschnittlich 60 % von den in den Versuchen ohne Lamellen erreichten Werten, beim CSB waren es 70 %.

Ein Vergleich der erzielten Konzentrationswirkungsgrade mit den Untersuchungsergebnissen ohne Lamellen ist in Tab. 20 dargestellt. Er zeigt, daß der Konzentrationswirkungsgrad eines Durchlaufbeckens durch den Lamelleneinsatz bei allen Zuflüssen verbessert wird. Bei der maximalen Flächenbeschickung von 10 m/h wurde durch die Nachrüstung des Beckens mit dem Lamellenabscheider eine bessere Klärung erzielt als bei der Beschickung von ca. 5 m/h ohne Lamellen.

Tab. 20: Erzielte Konzentrationswirkungsgrade - Ergebnisvergleich ohne und mit Lamellen

q_A in m/h	Konzentrationswirkungsgrad η_C in %			
	abfiltrierbare Stoffe		CSB	
	Ohne Lamellen	Mit Lamellen FS 41.80	Ohne Lamellen	Mit Lamellen FS 41.80
2,4 – 2,9	51,5 – 84,2	72 – 91,7	42,8 – 54,2	53,6 – 63,6
4,8 – 6,0	26,3 – 39,7	66,7 – 87,7	18,7 – 38,5	52,0 – 60,7
6,7 – 7,6	3,3 – 19,1	42,9 – 67,7	3,5 – 26,3	31,8 – 53,1
9,5 – 10,4	$\leq 1,5$	28,6 – 57,0	$\leq 2,2$	20,8 – 50,0

Vergleicht man die zufließenden und die über den Klärüberlauf ausgetragenen Frachten, so läßt sich der Rückhalt von Feststoffen und CSB in einem Durchlaufbecken ohne und mit Lamellen entsprechend Abb. 30 einschätzen.

Wie aus dieser Abbildung ersichtlich, werden durch die Lamellen bei einer Flächenbeschickung von 2,5 m/h während einer stationären Entlastungsphase etwa 85 % der Feststofffracht zurückgehalten. Ohne Lamelleneinbau lassen sich bei gleichen Randbedingungen nur etwa 70 % der Feststofffracht eliminieren. Bei einer Flächenbeschickung von 10 m/h wird durch die Lamellen die Rückhalterate von etwa 5 auf 40 % verbessert. Für den CSB kann man mit einer Erhöhung von etwa 65 auf 70 % bei 2,5 m/h und von etwa 5 auf 35 % bei 10 m/h rechnen.

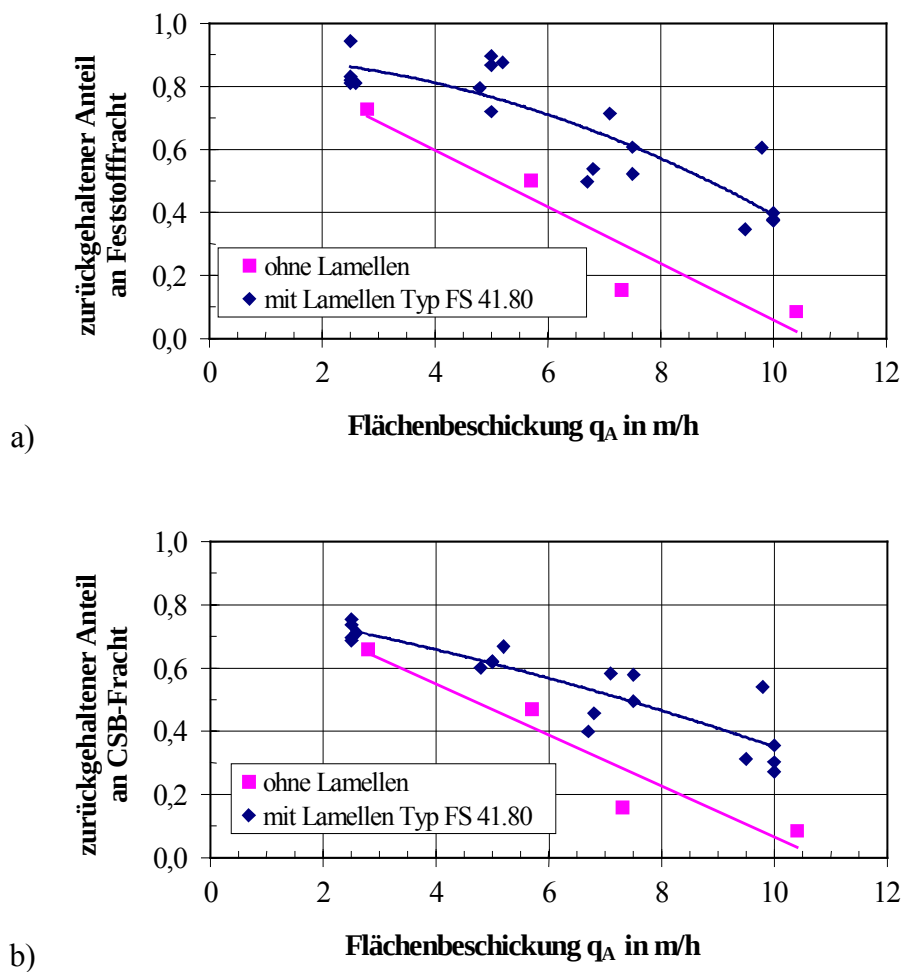
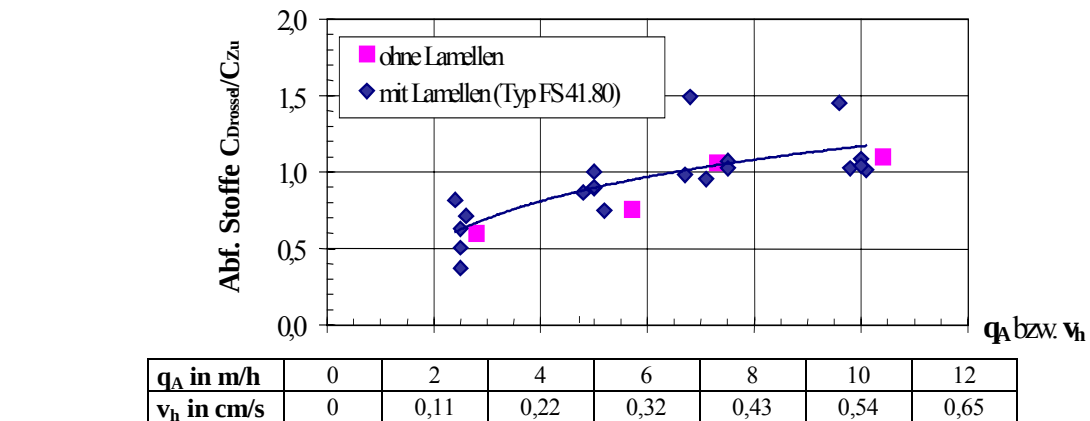


Abb. 30: Erzielter Stoffrückhalt in den Versuchen mit Lamellen FS 41.80 und Vergleich mit den Untersuchungen ohne Lamellen : a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB

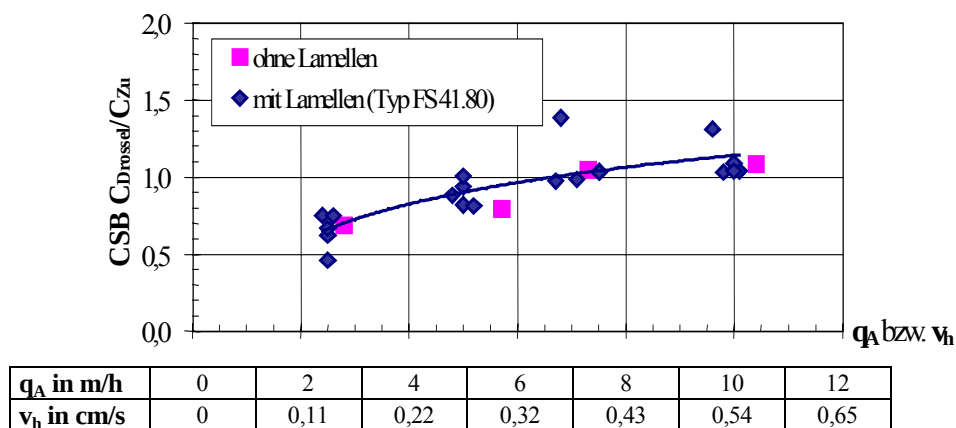
Neben dem zuflußabhängigen Austrag der Schmutzstoffe über den Klärüberlauf findet gleichzeitig ein Stoffaustrag über den Drosselabfluß statt. Die hier gewonnenen Ergebnisse bestätigen die Resultate der vorherigen Untersuchungsphase (Abschnitt 7.7). Mit der Erhöhung der Flächenbeschickung nimmt die Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen und CSB im Drosselabfluß zu (Abb. 31).

In den Versuchen wurden über den Drosselabfluß bei einer mittleren horizontalen Fließgeschwindigkeit v_h von etwa 0,4 cm/s volumenbezogen weniger Feststoffe sowie CSB ausgetragen als in das Becken flossen. Bei den genannten Randbedingungen bleiben die zurückgehaltenen Stoffe an der Beckensohle liegen. Diese Tatsache ist für den Stoffrückhalt eines mit Lamellen nachgerüsteten Durchlaufbeckens von großer Bedeutung. Durch den Einbau von Lamellen nimmt einerseits die Rückhalterate zu. Andererseits erhöht sich die Gefahr

des Austrages der bereits vorhandenen zurückgehaltenen Stoffe über den Klärüberlauf bei hohen hydraulischen Beschickungen, wenn sie über die Drossel nicht abgeleitet werden.



a)



b)

Abb. 31: Beschaffenheit des Drosselabflusses in den Versuchen mit Lamellen FS 41.80 und Vergleich mit den Ergebnissen ohne Lamellen: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB

In den durchgeführten Versuchen (vgl. Abb. 31) fand der Austrag von zusätzlichen Stoffen über den Drosselabfluß ($C_{Drossel} > C_{Zu}$) erst ab einer v_h größer als 0,4 cm/s statt. Diese Daten beziehen sich nur auf das Mischwasser, welches kein hohes Verschmutzungspotential aufwies und wenig schwere Partikel enthielt. Der hier anfallende Schlamm ist in der Regel leichter als im stark belasteten Mischwasser (Spülstoß). Deshalb läßt sich vermuten, daß der Schlamm in den Versuchen bereits bei kleineren Fließgeschwindigkeiten aus dem Becken abtransportiert wurde. Ob der Wert von 0,4 cm/s für v_h ausreichend ist, um das abgesetzte Material bei realen Bedingungen abzuleiten, wird in den nachfolgenden Untersuchungen (vgl. 8.5.2) überprüft.

Im Unterschied zu den Ergebnissen von K. H. PECHER (1997), der im Stauraumkanal durch den Einsatz von lamellenartigen Gleichströmen eine Verminderung des Stoffaustrages über die Drossel beobachtet hat, zeigten die eigenen Untersuchungen mit und ohne Lamellen einen ähnlichen Stoffaustrag über den Drosselabfluß. Zwar erhöht sich durch Lamellen die zurückgehaltene Stoffmenge, jedoch lassen sich die Stoffe bei gleichen v_h abtransportieren.

8.5 Lamellen Typ DH 50

8.5.1 Darstellung der Ergebnisse

Wie schon im Abschnitt 8.3 berichtet wurde, erfolgten die Untersuchungen zum Einsatz der Lamellen DH 50 mit Mischwasser, das bei Regenwetter direkt aus der Zulaufrinne des Klärwerks Stuttgart-Büsnau genommen und zur Versuchsanlage gepumpt wurde. Die direkte Entnahme des vom Einzugsgebiet abfließenden Mischwassers hat ermöglicht, praxisnahe Bedingungen zu erreichen. Innerhalb einer Versuchsreihe wurden nicht nur hydraulische, sondern auch stoffliche Schwankungen inkl. Spülstoß untersucht.

Insgesamt wurden zwei Versuchsreihen am 29.10.1998 und am 04.11.1998 durchgeführt. Die Flächenbeschickungen betrugen in den Versuchen wie bisher etwa 10; 7,5; 5 und 2,5 m/h. Die gewonnenen Ergebnisse sind in Tab. 21 aufgelistet. Die Dauer jedes Versuches entsprach einer Verweilzeit ($t \approx T_v$).

Tab. 21: Untersuchungen zum Einsatz der Lamellen DH 50 - Versuchsergebnisse

Datum	q_A in m/h	Abfiltrierbare Stoffe			CSB		
		Zulauf	Klärüberlauf	Drossel	Zulauf	Klärüberlauf	Drossel
		C_{zu} in mg/l	$C_{KÜ}/C_{zu}$	$C_{Drossel}/C_{zu}$	C_{zu} in mg/l	$C_{KÜ}/C_{zu}$	$C_{Drossel}/C_{zu}$
29.10.1998	10	219	0,27	0,93	275	0,43	0,91
	7,5	85	0,45	0,88	115	0,56	0,86
	5	65	0,36	0,85	112	0,45	0,63
	2,5	45	0,27	0,64	105	0,37	0,54
04.11.1998	10	124	0,52	1,13	192	0,57	0,88
	7,5	299	0,17	0,80	322	0,37	0,74
	5	217	0,18	0,44	320	0,37	0,52
	2,5	149	0,24	0,33	347	0,33	0,32

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß auch bei einem stark belasteten Wassers durch den Lamelleneinsatz eine gute Klärüberlaufqualität erreicht werden kann.

8.5.2 Beurteilung der Ergebnisse

Die bei praxisnahen Bedingungen gewonnenen Ergebnisse bestätigen die Resultate der vorherigen Untersuchungsphase und belegen die verbesserte Klärwirkung durch die Lamellen bei allen Zuflüssen. Die mit den getesteten Lamellen erzielten minimalen und maximalen Konzentrationswirkungsgrade finden sich in nachfolgender Abbildung.

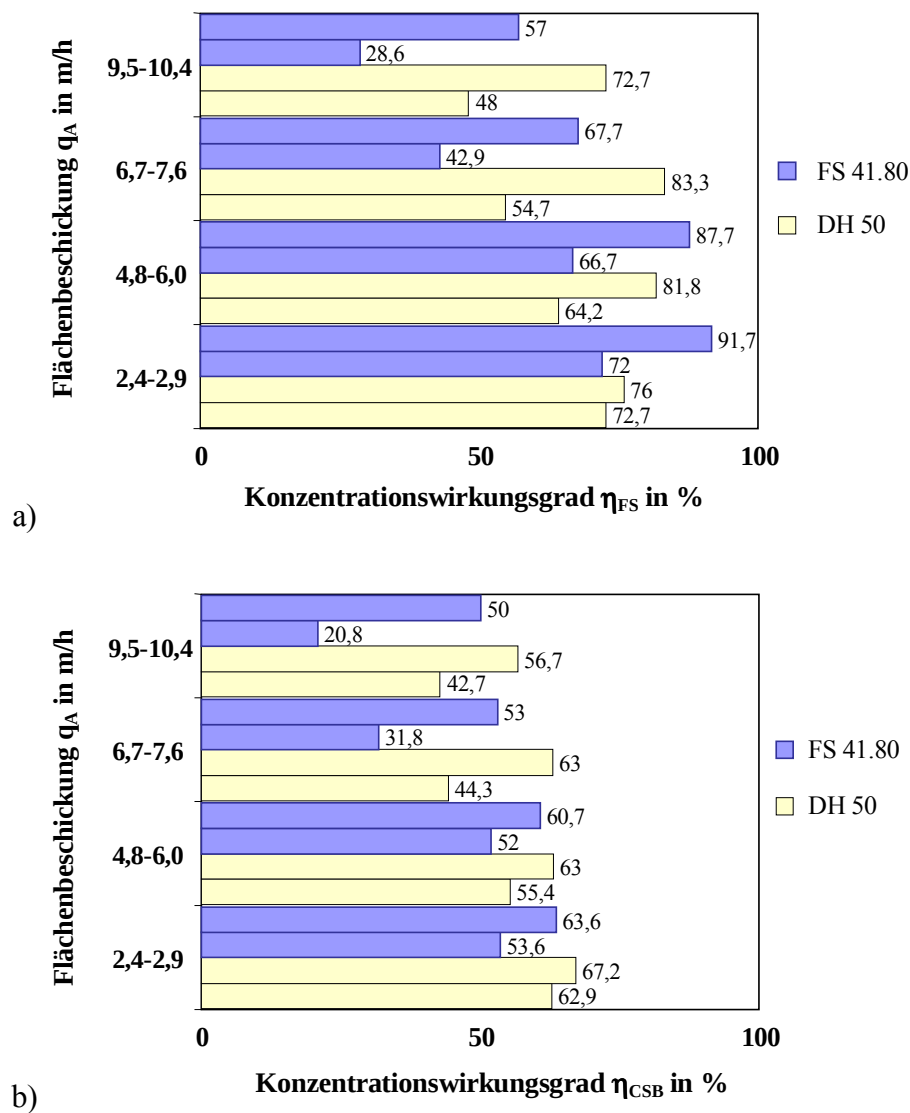


Abb. 32: Zusammenstellung maximaler und minimaler Konzentrationswirkungsgrade bei dem Lamelleneinsatz: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB

Wie aus Abb. 32 ersichtlich, wurde in den Untersuchungen mit den Lamellen DH 50 eine gute Klärung erreicht. In den zwei Versuchen mit hohen Beschickungen wurde stark belastetes Wasser inkl. Spülstoß verwendet. Die erzielten Wirkungsgrade übertrafen die bei vorherigen Untersuchungen mit den Lamellen FS 41.80 gewonnenen Werte. Trotz der höheren Zulaufkonzentrationen wurde durch das Model DH 50 eine bessere Klärüberlaufqualität bei hohen Flächenbeschickungen erreicht. Dies erklärt sich durch die größere Abscheiderfläche. Bei den darauffolgenden Versuchen mit niedrigen Beschickungen wurde schwach belastetes Wasser behandelt, da das Verschmutzungspotential des zum Klärwerk zufließenden Mischwassers abnahm. Aufgrund geringerer Zulaufkonzentration wurden die hier erzielten Wirkungsgrade nicht verbessert. Die Konzentrationen im Klärüberlauf waren dabei jedoch nicht höher als beim Einsatz des Modells FS 41.80. Den Schwankungsbereich für die Konzentrationen an abfiltrierbaren Stoffen und CSB im Klärüberlauf bei unterschiedlichen Lamellen zeigt Abb. 33.

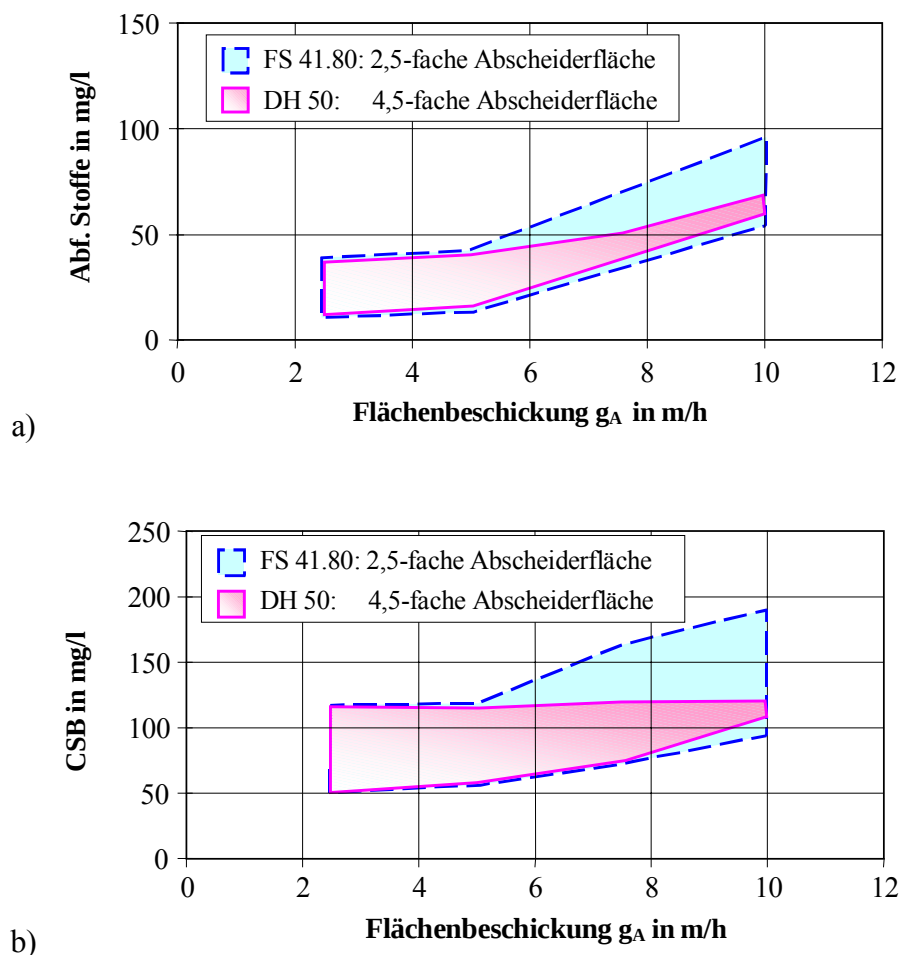


Abb. 33: Vergleich der Klärüberlaufqualität bei dem Einsatz der getesteten Lamellen:
a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB

Bei niedrigen hydraulischen Beschickungen bis etwa 5 m/h lagen die Konzentrationen im Klärüberlauf in gleicher Größenordnung. Mit der Steigerung hydraulischer Belastungen verringerte sich der Stoffaustrag über den Klärüberlauf durch die größere Abscheiderfläche. Beim Einsatz einer 2,5-fachen Abscheiderfläche lag bei einer q_A von 10 m/h die maximale Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen bei 95 mg/l. Mit einer 4,5-fachen Abscheiderfläche betrug bei gleicher hydraulischer Belastung die maximale Konzentration 65 mg/l. Eine größere Abscheiderfläche läßt die Partikel zurückhalten, die eine niedrige Absetzgeschwindigkeit aufweisen.

Abb. 34 gibt den in den Untersuchungen mit Lamellen DH 50 erzielten Frachtrückhalt sowie die Information über den Stoffaustrag durch den Drosselabfluß wieder.

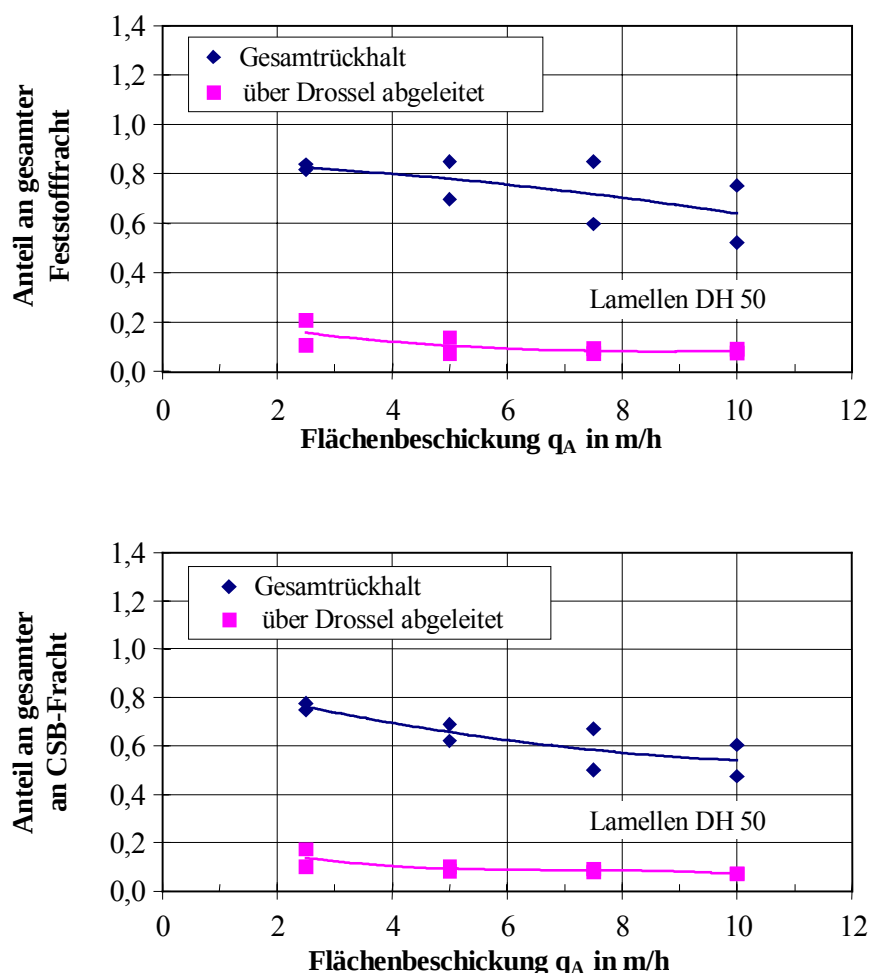


Abb. 34: Erzielter Stoffrückhalt (mit Angaben über den Drosselaustrag) bei praxisnahen Bedingungen mit Lamellen DH 50: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB

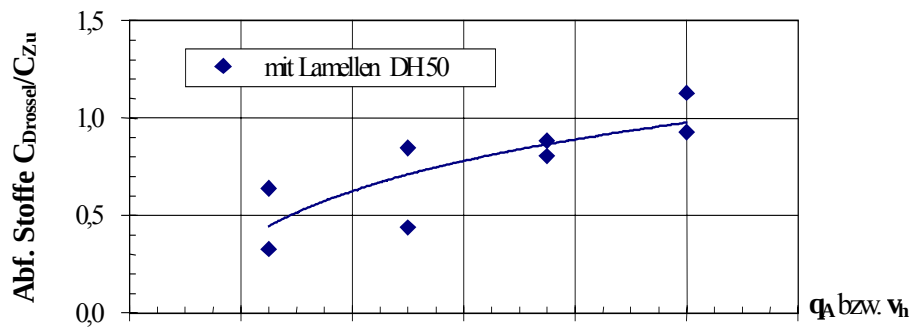
Abb. 34 zeigt, daß bei der Fällung und Flockung inkl. Lamellen in einem heutigen Anforderungen entsprechenden Durchlaufbecken ein guter Rückhalt erreicht werden kann. Die während der Überlaufdauer (ohne Berücksichtigung der Fangwirkung) erzielten Rückhalteraten schwankten in den Untersuchungen für die abfiltrierbaren Stoffe zwischen etwa 85 % bei q_A von 2,5 m/h und 65 % bei q_A von 10 m/h, für den CSB entsprechend zwischen 55 % und 75 %.

Berechnet man die über die Drossel weitergeleiteten Frachten, die sich aus dem entsprechenden Wasservolumen ($Q_{\text{Drossel}} = 2 \cdot Q_s + Q_f$) und der Zukaufkonzentration ergeben (theoretischer Stoffaustrag über die Drossel), so läßt sich die Sedimentationswirkung an dem erzielten Rückhalt mit 70 % bei q_A von 2,5 m/h und 85 % bei q_A von 10 m/h einschätzen. Diese Raten können als zufriedenstellend betrachtet werden.

Für einen sicheren Betrieb muß die Menge des über die Drossel abgeleiteten Schlammes erhöht werden. Durchschnittlich 60 % der zurückgehaltenen Feststoffe blieben in den Versuchen am Beckenboden liegen. Dieses Problem wird im Abschnitt 9.4 betrachtet.

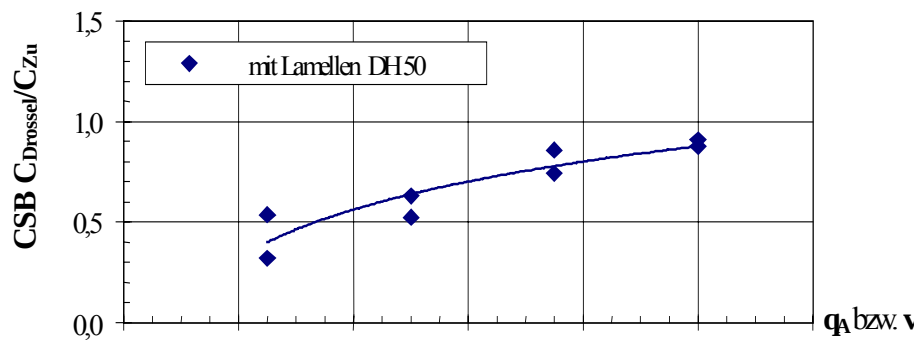
Der über die Drossel abgeleitete Feststofffrachtteil betrug in den durchgeführten Untersuchungen bei q_A von 2,5 m/h etwa 18 % und verringerte sich mit Zuflußsteigerung. Bei einer q_A von 10 m/h erreichte er etwa 10 %. Wenn man diese tatsächliche aufgrund der gemessenen Konzentrationen ermittelten Werte mit dem theoretischen Stoffaustrag über die Drossel vergleicht, so ist deutlich, daß bei niedrigen Flächenbeschickungen die mittlere horizontale Fließgeschwindigkeit im Becken nicht ausreichend ist und zu Ablagerungen an der Beckensohle führt. Der Anteil, der bei einer q_A von 2,5 m/h über die Drossel abgeleitet werden könnte, liegt bei etwa 28 %. Bei q_A von 10 m/h ist es etwa 8 %.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen und CSB im Drosselabfluß bei verschiedenen hydraulischen Beschickungen. Wie daraus ersichtlich, fand in bei praxisnahen Bedingungen durchgeführten Untersuchungen ein Feststoffaustrag über die Drossel, bei dem die Zulaufkonzentration überschritten wurde, erst ab einer v_h von etwa 0,54 cm/s statt. Bei kleineren Fließgeschwindigkeiten kam es zu Ablagerungen im Becken. Diese Ergebnisse beziehen sich auf das Mischwasser mit schwereren Partikel (Spülstoß). Deshalb ist für den Abtransport des hier anfallenden Fällschlammes, wie im Abschnitt 8.4.2 vermutet wurde, eine höhere Fließgeschwindigkeit als bei der vorherigen Untersuchungsphase erforderlich.



q_A in m/h	0	2	4	6	8	10	12
v_h in cm/s	0	0,11	0,22	0,32	0,43	0,54	0,65

a)



q_A in m/h	0	2	4	6	8	10	12
v_h in cm/s	0	0,11	0,22	0,32	0,43	0,54	0,65

b)

Abb. 35. Beschaffenheit des Drosselabflusses bei praxisnahen Bedingungen mit Lamellen DH 50: a - abfiltrierbare Stoffe, b - CSB

8.6 Zusammenfassende Interpretation

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Fällungs- und Flockungsuntersuchungen, daß durch den Lamelleneinsatz die Rückhalterate eines Durchlaufbeckens bei allen Zuflüssen verbessert wird. Die Abhängigkeit des Stoffaustrages über den Klärüberlauf von der Flächenbeschickung bleibt erhalten, jedoch ist die Höhe des Austrages bei der Zuflußsteigerung deutlich geringer. Bei der maximalen Flächenbeschickung von 10 m/h kann durch die Nachrüstung des Beckens mit dem Lamellenabscheider eine bessere Klärung erzielt als bei der Flächenbeschickung von 5 m/h ohne Lamellen.

Als Abscheiderfläche für ein Durchlaufbecken ist eine Fläche, die dem 2- bis 4,5-fachen Wert der Beckengrundfläche entspricht, zu empfehlen. Die während der Überlaufdauer zu erwartende Feststoffrückhalterate (ohne Fangwirkung) kann man bei einer Flächenbeschickung von 2,5 m/h mit 85 % und bei einer maximalen Beschickung von 10 m/h mit 40 bis 65 % einschätzen. Hinsichtlich der Elimination der CSB-Fracht wird bei q_A von 2,5 m/h einen Rückhalt von knapp 80 % und bei q_A von 10 m/h knapp 60 % erwartet. Die Sedimentationswirkung an dem während der Überlaufdauer erzielten Rückhalt liegt im Mittel bei 80 %. Die Vergrößerung der Abscheiderfläche über das 5-fache erhöht bei steigenden Kosten die Klärleistung nur bei hohen Flächenbeschickungen (ab 6-7 m/h). Da diese Beschickungen nach BROMBACH & WÖHRLE (1997) in der Praxis nicht oft auftreten, kann so nur eine unwesentliche Reduzierung der Gesamtfracht bewirkt werden.

Gleichzeitig mit dem zuflußabhängigen Stoffaustrag über den Klärüberlauf findet ein zuflußabhängiger Austrag über die Drossel statt. Mit der Erhöhung der hydraulischen Beschickung nimmt die Feststoffkonzentration im Drosselabfluß ebenso wie im Klärüberlauf zu. Der Stoffaustrag über die Drossel ist für den Stoffrückhalt in einem mit Lamellen nachgerüsteten Durchlaufbecken von wesentlicher Bedeutung. Wenn bei einer größeren Rückhalterate der Schlamm im Becken liegenbleibt, steigt die Gefahr seines Austrages über den Klärüberlauf bei einer Beschickungserhöhung bzw. beim darauffolgenden Regen. Die Möglichkeiten für den Schlammabtransport aus Durchlaufbecken werden im Abschnitt 9.4 betrachtet.

Wie die durchgeführten Untersuchungen zeigten, kann die Ablagerung des Fällschlammes im Becken vermieden werden, wenn eine minimale horizontale Fließgeschwindigkeit von 0,6 cm/s eingehalten wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nicht untersucht, auf welchen maximalen Wert die horizontale Fließgeschwindigkeit zu begrenzen ist. Aufgrund des hohen Anteils der leichten Partikel sollte die im ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) angegebenen Begrenzung von 5 cm/s etwas verringert werden, um ausreichende Sicherheit gegen Schlamm aufwirbelung zu erreichen.

8.7 Schlußfolgerung und Diskussion

Die Fällung und Flockung in einem nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) ausgelegten Durchlaufbecken ist nur dann sinnvoll, wenn das Becken mit Lamellen ausgerüstet ist. Die Abscheiderfläche richtet sich nach der gewünschten Klärüberlaufqualität und hängt von der Beschaffenheit des Mischwassers ab. Für ein Durchlaufbecken im Wohngebiet kann man davon ausgehen, daß die Lamellengröße das 2- bis 4,5-fache der Beckengrundfläche beträgt.

Ein direkter Vergleich der in dieser Arbeit erzielten Rückhalteraten mit der heutigen Wirkung von Durchlaufbecken ist leider nicht möglich. Die Maßstäbe, örtliche Bedingungen sowie die Regen, die den Daten zugrunde liegen, sind sehr unterschiedlich. Im Wesentlichen kommt es auf die Menge an absetzbaren Stoffen im Mischwasser an. Bei Einzugsgebieten, in denen die gut absetzbaren Stoffe bereits bei Trockenwetterabfluß zur Kläranlage abtransportiert werden und nicht im Kanal liegen bleiben, führen die Mischwasserzuflüsse weniger Feststoffe mit. Dadurch kann ein geringerer Wirkungsgrad des Durchlaufbeckens erwartet werden.

Um die gewonnenen Ergebnisse mit den Daten über die heutige Behandlung im Durchlaufbecken zu vergleichen, soll die Wirkung des Beckens hinsichtlich der erzielten Sedimentation beurteilt werden. In den Untersuchungen von SCHÄFER ET. AL. (1997) wurden aufgrund des hohen Drosselabflusses ($3,7 \cdot Q_s + Q_f$) sehr gute Wirkungsgrade bei den abfiltrierbaren Stoffen (77 bis 95 %) erzielt. Die Auflistung der einzelnen Wirkungsgrade zeigt jedoch, daß bei den beprobten kleineren bis mittleren Ereignissen der Sedimentationsbeitrag nur 8 bis 23 % beträgt. Schätzt man den Sedimentationsanteil am erzielten Stoffrückhalt ohne Berücksichtigung der Fangwirkung ein, so läßt sich er mit 10 bis 36 % einschätzen. In den hier dargestellten Untersuchungen lag der prozentuale Anteil durchschnittlich bei 80 %. Der Vergleich der genannten Werte zeigt deutlich, daß die hier getestete Technologie gegenüber dem konventionellen Verfahren aufgrund verbesserter Sedimentationswirkung für einen effektiven Gewässerschutz vorzuziehen ist.

Bei dieser Technologie ist jedoch zu beachten, daß mit dem durch Lamellen gegebenen vermehrten Stoffrückhalt das Risiko des Stoffaustrages über den Klärüberlauf in das Gewässer bei hohen Zuflüssen bzw. darauffolgendem Regen ansteigt. Um dieses Risiko zu vermeiden, muß der im Durchlaufbecken abgesetzte Schlamm über die Drossel zur Kläranlage abgeleitet werden. Entsprechende Einrichtungen sind dafür zu beachten (vgl. 9.4).

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, daß die beiden Lamellentypen, die sich in Form, Abstand und Neigung der Absetzebenen unterscheiden, für den Einsatz im einem Durchlaufbecken geeignet sind. Eine Verringerung des Abstandes zwischen den Ebenen von 80 mm (Typ FS 41.80) auf 50 mm (Typ DH 50) bewirkte keine Betriebsprobleme. Verstopfungen lagen im Rahmen der Untersuchungen nicht vor. Bei beiden Neigungen (55 ° bei FS 41.80 und 60 ° bei Typ DH 50) fand ein guter Schlammabrutsch von den Absetzebenen statt. Für die Festlegung des optimalen Abstandes zwischen den Ebenen muß jedoch ein dauerhafter realer Betrieb beobachtet werden. Ein kleinerer Abstand ist wahrscheinlich nicht sinnvoll.

Die häufig bei den Lamellen auftretenden Betriebsprobleme, wie Verstopfung, ein schlechter Schlammabrutsch bzw. eine Verschlechterung der Klärleistung sind bei Durchlaufbecken selten zu erwarten, da sie nicht ständig mit Wasser gefüllt sind. Im Betrieb befinden sie sich nur von einigen Minuten bis einigen Tagen. Danach erfolgt die Ableitung des Wasser zur

Kläranlage. Auf den Lamellen abgesetzte Partikel werden dadurch mit fallendem Wasserstand abgespült, und die Module trocknen. Auf diese Weise sind die Lamellen sauber und bereit für das nächste Regenabflußereignis.

9 Instrumente zur technischen Realisierung

Für die Entwicklung bis zur Anwendung in der Praxis ergeben sich noch einige zu klärende Punkte, die in dieser Kapitel erörtert werden.

9.1 Chemikaliendosierung

Die für die Mischwasserbehandlung geeigneten Flockungschemikalien und ihre Dosis werden mittels üblicher Laborversuche ermittelt. Bei den vorhandenen Zuflußmessungen sind die Chemikalien durchflußproportional zuzugeben. Wenn der Zufluß im Betrieb nicht gemessen wird, kann eine konstante Dosierung für den Zufluß von 8-10 l/(s·ha) eingestellt werden. Bei besonders ausgerüsteten Becken können die Chemikalienzugabe an den realen Betrieb durch entsprechende MSR-Technik angepaßt werden.

Eine beispielhafte Darstellung der Chemikaliendosierung an einem Durchlaufbecken ist in Abb. 36 dargestellt.

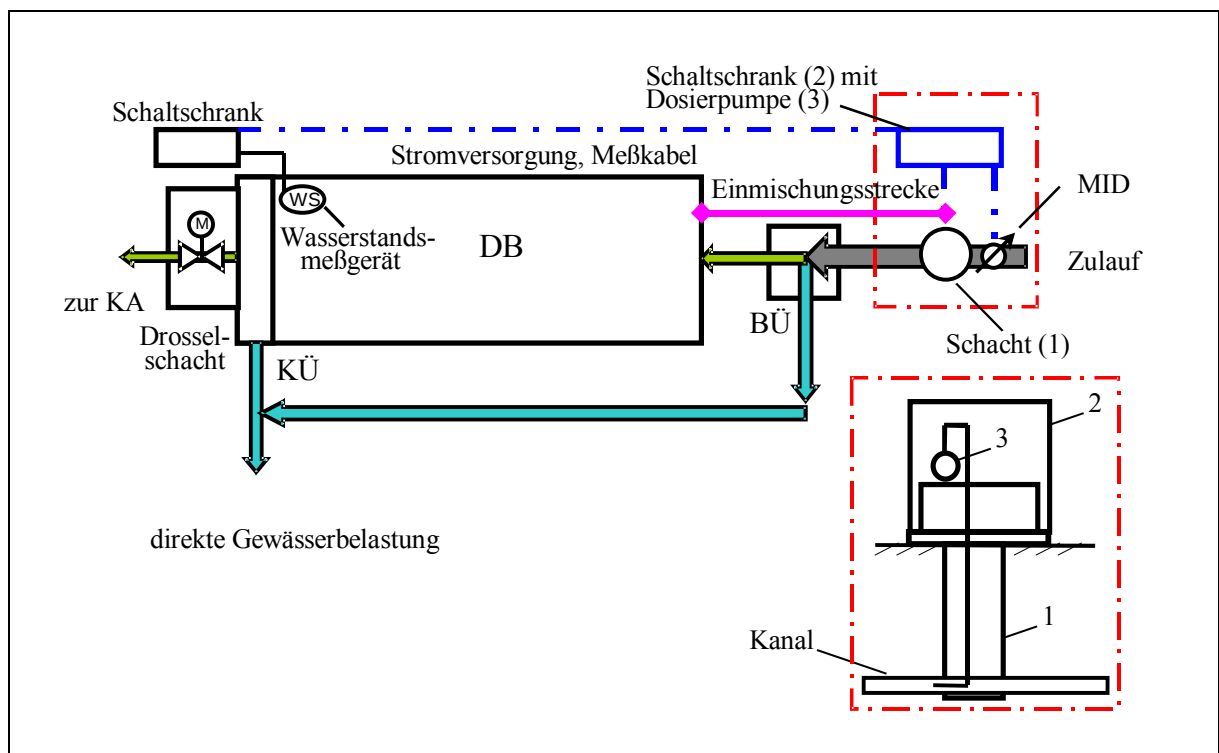


Abb. 36: Beispielhafte Darstellung der Chemikalienzugabe an einem Durchlaufbecken

Die Flockungschemikalien werden direkt in den fließenden Wasserstrom im Kanal dosiert. Als Zugabeort kann der letzte Schacht vor dem Beckenüberlauf dienen. Die Rohrstrecke von dem Zugabeort bis zum Becken muß eine gute Einmischung der zugegebenen Chemikalien ermöglichen (vgl. Abschnitte 7.5 und 7.8). Bei den vorhandenen Leitungen soll die Flockenbildung untersucht und nach Bedarf optimiert werden.

Für die Dosierung können die kleinen, leistungsfähigen Membranpumpen verwendet werden. Die Initialisierung erfolgt durch eine Wasserstandsmeßsonde. Bei Überschreiten eines vorgegebenen Grenzwertes beginnt die Pumpe mit der Zugabe von Chemikalien und bei fallendem Beckenwasserstand schaltet sie automatisch ab, wenn der Grenzwert erreicht wird. Das Dosierungsende kann bei besonders ausgerüsteten Becken optimiert werden. Z. B., bei den lang andauernden Regenabflüssen, wenn die Entlastungskonzentration gering geworden ist, kann durch eine Trübungsmessung die Dosierpumpe früher abgeschaltet werden. Der Zulauf aus dem Einzugsgebiet wird mittels magnetisch-induktivem Verfahren gemessen. Der Wasserstand im Becken wird mit einer Wasserstandsmeßsonde ermittelt. Wenn die Pumpen durchflußproportional betrieben werden, erfolgt ihre Auslegung auf den maximalen Zufluß. Geringere Abflüsse müssen durch Meß- und Regeltechnik beherrscht werden. Beim Umgang mit Flockungschemikalien müssen säureresistente Materialien verwendet und die allgemeinen Schutzmaßnahmen für den Umgang mit Säuren beachten werden.

Für den praktischen Einsatz stellt sich hier nur die Frage, bei welchem Füllstand des Beckens die Flockungschemikalien zu dosieren sind (Abb. 37).

Aus wirtschaftlichen Gründen wäre die beste Lösung, nur das direkt entlastete Wasser zu fällen. Technisch ist dies jedoch nicht realisierbar. Beim Anfang eines Regens ist unbekannt, ob es zum Überlaufen des Beckens kommt. Wartet man, bis der Klärüberlauf anspringt, gelangt der erste verschmutzte Teil des Mischwassers ohne Behandlung in den Vorfluter. Danach muß der Beckeninhalt ausgetauscht werden, um die erreichbare Wirkung zu erzielen. Dazu sind zumindest zwei Verweilzeiten erforderlich. Diese Möglichkeit kann deshalb nicht empfohlen werden.

Zwei Varianten können im Betracht gezogen werden. Die erste ist die Fällung und Flockung des gesamten Mischwassers, wenn der Zufluß $2 \cdot Q_s + Q_f$ überschreitet. Die zweite besteht in Chemikalienzugabe ab einem festgelegten Beckenfüllstand. Die erste betrachtete Variante ist im Hinblick des Gewässerschutzes vorteilhafter. Die zweite ist wirtschaftlich günstiger, da das Volumen des zu fällenden Wassers sich verringert und bei der Beckenentleerung weniger behandeltes Wasser zur Kläranlage abgeleitet wird.

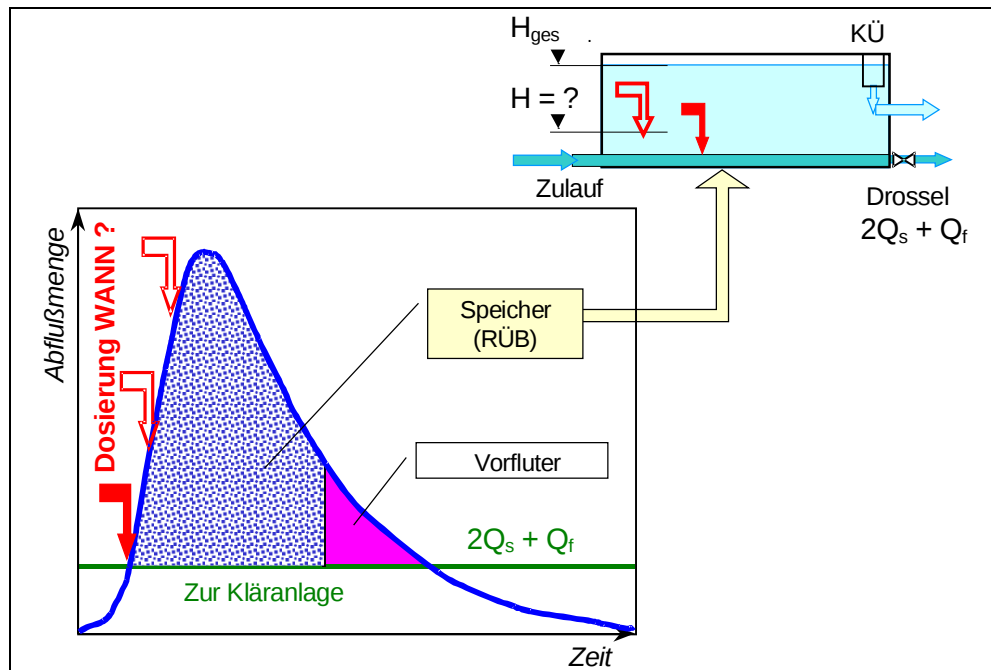


Abb. 37: Überlegungen zum Beginn der Chemikalienzugabe in einem Durchlaufbecken

Um eine unter Berücksichtigung der ökologische Anforderung preisgünstige Lösung zu finden, wurde die von Regenüberlaufbecken ausgehende direkte Gewässerbelastung als jährlicher Feststoffeintrag nach KRAUTH & STOTZ (1985) ohne Spülstoß beurteilt (Abb. 38).

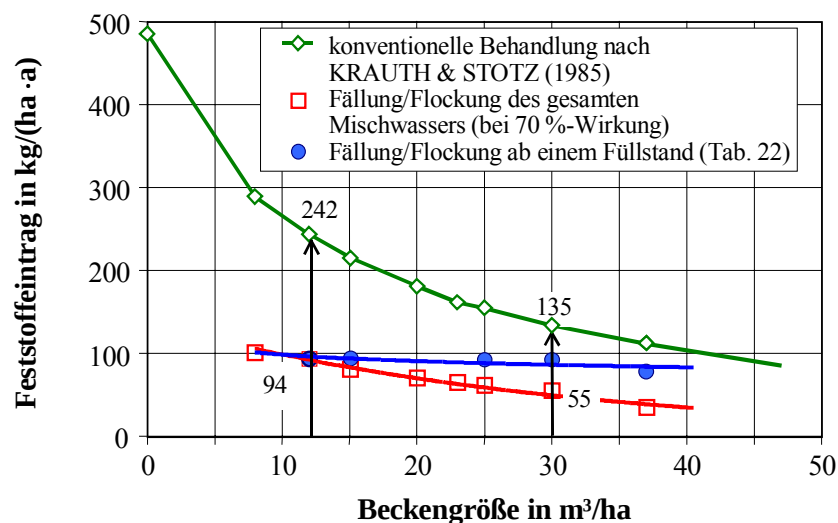


Abb. 38: Zu erwartende Reduzierung der jährlichen direkten Gewässerbelastung durch Fällung und Flockung des Mischwassers

Bei konventioneller Mischwasserbehandlung hängt der Feststoffeintrag in das Gewässer von der Beckengröße ab. Bei kleineren Becken werden mehr Feststoffe ausgetragen als bei größeren. Im ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) wurde die Größe von Durchlaufbecken auf 40 m³/ha beschränkt. Die direkte Gewässerbelastung liegt dabei um ca. 100 kg/(ha·a). Bei heute üblichen Beckengrößen von 12-30 m³/ha beträgt der Feststoffaustrag 242 bzw. 135 kg/(ha·a). Die Fällung und Flockung des gesamten Mischwassers ermöglicht die Belastung auf 94 bzw. 55 kg/(ha·a) zu reduzieren. Diese Werte wurden aufgrund der Untersuchungen mit einer durchschnittlichen Wirkung von 70 % abgeschätzt. Um die Belastung nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) zu erreichen, muß bei Becken bis 12 m³/ha das gesamte Mischwasser gefällt werden. Bei größeren Becken können die Chemikalien nach dem Anfang der Beckenfüllung dosiert werden, da hier nur ein Teil des Mischwassers zu behandeln ist. Dabei fallen geringere Kosten an.

Tab. 22 zeigt eingeschätzte Füllungen, um eine Feststoffbelastung von ca. 100 kg/(ha·a) einzuhalten. Bei besonderen Anforderungen kann in größeren Becken durch die Fällung und Flockung des gesamten Mischwassers die direkte Gewässerbelastung weiter reduziert werden (vgl. Abb. 38).

Tab. 22: Beginn der Chemikalienzugabe in einem Durchlaufbecken

Beckengröße in m³/ha	konventionelle Behandlung	Fällung und Flockung inkl. Lamellen	
	direkte Belastung in kg FS/(ha·a)	Dosierung ab Füllstand $H_{\text{dos}}/H_{\text{ges}}$	zu erwartende direkte Belastung in kg FS/(ha·a)
bis 12	≥ 242	0	bis 100
15	215	0,05	
20	181	0,15	
25	155	0,27	
30	135	0,4	
ab 35	120	0,5	

9.2 Verfahrenstechnische Auslegung des Lamellenabscheiders

Mit Lamellen werden eine Vielzahl von geneigten Absetzebenen bereitgestellt. Dadurch wird die Absetzfläche des Beckens mit einem Faktor vervielfacht. Die erforderliche Vergrößerung der Fläche ist von der Wasserbeschaffenheit und anzustrebender Klärwirkung abhängig.

Auf die theoretische Auslegung eines Lamellenabscheiders wurde im Abschnitt 8.2 bereits eingegangen, die aufgrund der Absetzgeschwindigkeit der Partikel v_s erfolgt. Der v_s -Wert für das zu klärende Wasser sollte im Labor individuell bestimmt werden. Bei der Übertragung der Laborwerte in die Praxis ist ein Sicherheitsfaktor SF von 0,6-0,8 zu berücksichtigen

Die Beschickung der Lamellen q_p (bezogen auf die horizontal projizierte Abscheiderfläche) berechnet sich zu

$$q_p = SF \cdot v_s$$

Die erforderliche projizierte Abscheiderfläche P wird mit Hilfe des Bemessungszuflusses Q_{Bemes} ermittelt

$$P_{\text{erf.}} = \frac{Q_{\text{Bemes.}}}{q_p} \text{ in m}^2$$

Die Höhe der Einbauten hängt vom spezifischen Schlammvolumen ab. Der Schlamm Spiegel muß sich immer weit genug unterhalb der Lamellen befinden. Je größer die spezifische Schlammmenge desto niedriger sollte die Höhe der Einbauten gewählt werden. Als Richtwerte für die Tiefe unterhalb der Lamellen können die folgende Größen empfohlen werden:

bei der Beckenoberfläche	mehr als 50 m ²	≥ 1,5 m
	20 –50 m ²	≥ 1,0 m
	10 –20 m ²	≥ 0,75 m

Die Lamellen können bis zu einem Schlammanfall von 200 ml/l des Wassers eingesetzt werden. Bei der Fällung und Flockung des Mischwassers liegt der Schlammanfall in Abhängigkeit von der Schmutzstoffkonzentration zwischen 15 und 80 ml/l (eigene Messungen) und bereitet in der Regel kein Problem für die Anwendung der Lamellen.

Für das erforderliche Volumen des Lamellenabscheiders gilt

$$V_L = \frac{P_{\text{erf.}}}{P_{\text{spez.}}} \text{ in m}^3$$

wobei $P_{\text{spez.}}$ die spezifische Abscheiderfläche in m²/m³ ist (wirksame Absetzfläche des Abscheiders mit $L \times B \times H = 1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$).

Mit der gewählten Abscheiderhöhe berechnet sich die Abscheidergrundfläche A_L wie folgt

$$A_L = \frac{P_{\text{erf.}}}{H_L \cdot P_{\text{spez.}}}$$

Liegen keine Messungen vor, kann die Absetzgeschwindigkeit der im Mischwasser erzeugten Flocken nach Abb. 10b eingeschätzt werden.

Entsprechend der genannten Abbildung, um 85 % der Flocken abtrennen zu können, sollte die Beschickung der Lamellen q_p für eine Absetzgeschwindigkeit v_s von 3 m/h berechnet werden, da durchschnittlich 15 % der Flocken eine kleinere v_s haben. Bei einem Sicherheitsfaktor SF von 0,7 beträgt die Lamellenflächenbeschickung $q_p = 0,7 \cdot 3 = 2,1 \text{ m/h}$. Bei der zu erzielenden Abscheiderleistung von 70 % ist der Lamellenabscheider auf $q_p = 0,7 \cdot 5,0 = 3,5 \text{ m/h}$ auszulegen. Berücksichtigt man, daß die heutigen Durchlaufbecken mit q_A von 10 m/h bemessen sind, ergibt sich für diese Beispiele eine durch die Lamellen erzielte Vergrößerung der Absetzfläche um das 2,5- bzw. 4,5-fache.

9.3 Wartung und Betrieb

Mit dem Ziel, das Sedimentationspotential von heutigen Durchlaufbecken zu verbessern, werden bei der vorgeschlagenen Technologie zur Mischwasserbehandlung die Flockungskemikalien entsprechend Abschnitt 9.1 zugegeben und das Becken mit Lamellen nachgerüstet, um die erzeugten Flocken bei höheren hydraulischen Beschickungen abscheiden zu können.

Das Becken besteht aus den drei Zonen (von unten): Schlammzone, Abscheiderzone (Bereich mit Lamellen) und Klarwasserzone (Abb. 39). Der Einlauf erfolgt in das Becken unterhalb der Lamellen. Sie werden im Gegenstrom betrieben.

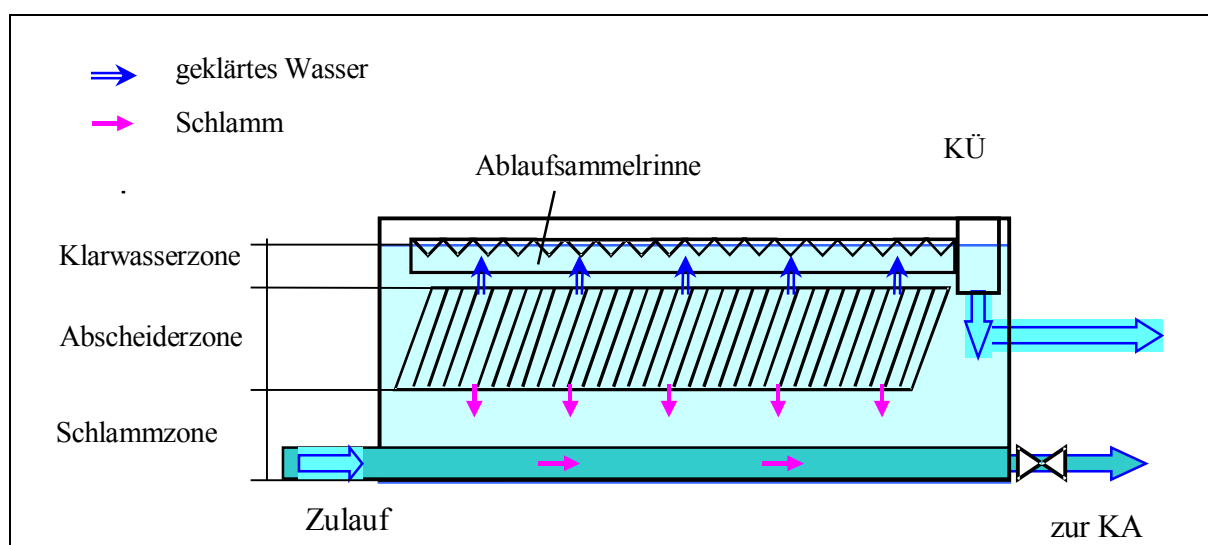


Abb. 39: Anordnung des Lamellenabscheiders im Durchlaufbecken

Die in Einbauten abgeschiedenen Feststoffe rutschen auf den geneigten Ebenen nach unten in die Schlammzone, von der sie zur Kläranlage abgeführt werden. Das geklärte Wasser strömt nach oben in die Klarwasserzone. Dort wird es mittels Sammelrinnen über den Klärüberlauf abgegeben.

Besonders wichtig ist eine korrekte Schlammräumung. Zwischen dem sedimentierten Schlamm und Lamellenunterkante muß ein ausreichender Abstand vorhanden sein. Die Tiefe unterhalb der Lamellen ist entsprechend Abschnitt 9.2 zu wählen. Auch die im Abschnitt 9.4 beschriebenen Aspekte sollen berücksichtigt werden.

Für die Funktion der Einbauten ist auch eine korrekte Einstellung der Sammelrinnen von größter Bedeutung, um alle Absetzröhren gleichmäßig zu durchströmen. Die Rinne sollte bis zum Beckenrand geführt werden. Der Wasserüberstand sollte mindestens 200 mm und maximal 800 mm betragen. Eine ungleichmäßige Einstellung hat zur Folge, daß in einem Teilbereich mehr Schlamm abgeschieden wird. Die Ablaufsammelrinnen müssen deshalb exakt eingestellt sein.

Bei unzureichender Abscheideleistung des Beckens kann die Absetzbarkeit der Feststoffe durch Anpassung der Fällung und Flockung verbessert werden. Um die Funktionsfähigkeit der Fällung und Flockung kontrollieren zu können, ist die Ermittlung der zwei Parameter, Betriebszustand der Dosierpumpe und Füllstand des Chemikalienbehälters, erforderlich.

Lamellenabscheider sind sehr wartungsarm, da sie keine beweglichen Teile besitzen. In der Regel rutschen die abgesetzten Flocken von selbst in die Schlammzone. Die Einbauten sind somit selbstreinigend. Eine regelmäßige Wartung der Lamellen ist deshalb nicht notwendig. Betriebsstörungen können nur von vor- oder nachgeschalteten Anlagenteilen sowie von den Dosiereinrichtungen herrühren und sind dort zu korrigieren. Nach jedem starken Regenereignis wird eine optische Prüfung empfohlen, um zu kontrollieren, ob Störungen vorliegen bzw. ob sich Schwimmschlamm gebildet hat. Bei Bedarf sind die Ablaufrinne und Beckenwände zu reinigen. Gleiches gilt auch für die Ablagerungen am Beckenboden. Obwohl die Lamellen selbstreinigend sind, kann dies jedoch durch eine Reihe von Umständen, wie Flockenausrag bzw. Verstopfung, gestört sein. Kleine, schwer absetzbare Flocken schlagen sich manchmal als Schlamm auf den Wänden der Einbauten, in den Zwischenräumen der Pakete oder in den Totzonen zwischen den Einbauten und Wänden nieder. Nach einer gewissen Zeit bedürfen die Einbauten deshalb einer Reinigung. Es wird davon ausgegangen, daß der Lamellenabscheider einmal je Halbjahr gereinigt werden sollte.

Zur Reinigung werden die Lamellen bei geleertem Becken abgespritzt. Das Abspritzen erfolgt in der Neigungsrichtung der Rohre, damit auch tiefere Sektoren abgespült werden. Die Verunreinigung sind aus dem Becken zu entsorgen. Die Reinigungsdauer kann mit zwei Stunden Arbeitszeit je 100 m² Beckenfläche eingeschätzt werden. Sollte der Betrieb zeigen, daß die Schlammablagerungen geringfügig oder besonders groß sind, müssen

die Wartungsintervalle entsprechend korrigiert werden. Auch kann festgelegt werden, wie oft eine optische Prüfung erforderlich ist.

Verstopfungen können auftreten, wenn Grobstoffe bzw. zu hohe Feststofffrachten vorhanden sind oder Schmutzstoffe zum Verkleben und Verbacken neigen. Eine andere Ursache kann ein hoher Schlammspiegel sein, der sich durch schlechten Schlammabtransport aus dem Becken bildet. Bei Verstopfungen sind schnellstens die Ursachen dafür festzustellen und zu beseitigen. Bei Bedarf sollten Einbauten gereinigt werden. Beim Ablassen des Wassers ist darauf zu achten, daß nur eine Verstopfung bis 10 % keine Beschädigung der Lamellen zur Folge hat, da sie auf eine Maximallast von Eigengewicht plus 100 kg/m^3 Betriebsgewicht ausgelegt sind.

In der Regel ist keine chemische Reinigung erforderlich. Nach jedem Regen wird das Wasser aus dem Becken abgeleitet. Dadurch können Lamellen trocknen. Deshalb ist es unwahrscheinlich, daß sich durch biologische bzw. chemische Vorgänge auf den Absetzebenen Beläge bilden, die das Abrutschen des Schlammes behindern.

9.4 Schlammabtransport über die Drossel

Der Stoffaustrag über die Drossel ist für den Stoffrückhalt in einem mit Lamellen nachgerüsteten Durchlaufbecken von wesentlicher Bedeutung. Mit einem vergrößerten Rückhalt erhöht sich die Gefahr, daß der sedimentierte Schlamm bei Steigerung der Flächenbeschickung bzw. beim darauffolgenden Regen über den Klärüberlauf in das Gewässer gelangt. Um diese Gefahr zu vermeiden, muß der Schlamm über die Drossel zur Kläranlage abgeleitet werden.

Wie die durchgeführten Untersuchungen zeigten, reicht für einen sicheren Betrieb die Menge des über die Drossel abgeleiteten Schlammes nicht aus und muß durch geeignete Einrichtungen erhöht werden.

Prinzipiell kann der abgesetzte Schlamm während eines Überlaufereignisses durch einen Räumler, in die Trichter zur Drossel geschoben werden. Hierzu können Bandräumer verwendet werden bzw. Schnecken bei kleinen Becken. Die Drosselleitung muß so dimensioniert sein, daß die Schleppspannung ausreichend ist, um Ablagerungen zu vermeiden. Die genannte Maßnahme wäre die beste Lösung, da der sedimentierte Schlamm kontinuierlich aus dem Becken abtransportiert werden könnte, ist es jedoch aufgrund der hohen Kosten von Räubern wirtschaftlich nicht günstig.

Deshalb müssen auch kostengünstigere Möglichkeiten untersucht werden. Wenn die abgelagerten Stoffe nach dem Regenereignis bei der Beckenreinigung über die Drossel abtransportiert

werden, können für diesen Zweck die vorhandenen Einrichtungen Verwendung finden. Hier handelt es sich um Becken mit hydraulischer Selbstreinigung bzw. mit Spülkippen.

Bei den erwähnten Einrichtungen besteht während eines Beckenüberlaufs noch die Gefahr, daß bei einer erhöhten hydraulischen Belastung zum Schlammaustrag über den Klärüberlauf kommt. Dies ist aufgrund durchgeführter Untersuchungen nur bei q_A von 8 bis 10 m/h zu erwarten. In der Praxis treten solche Fälle selten auf. Abb. 40 zeigt beispielhaft für ein Durchlaufbecken die Flächenbeschickungen während der Überlaufdauer.

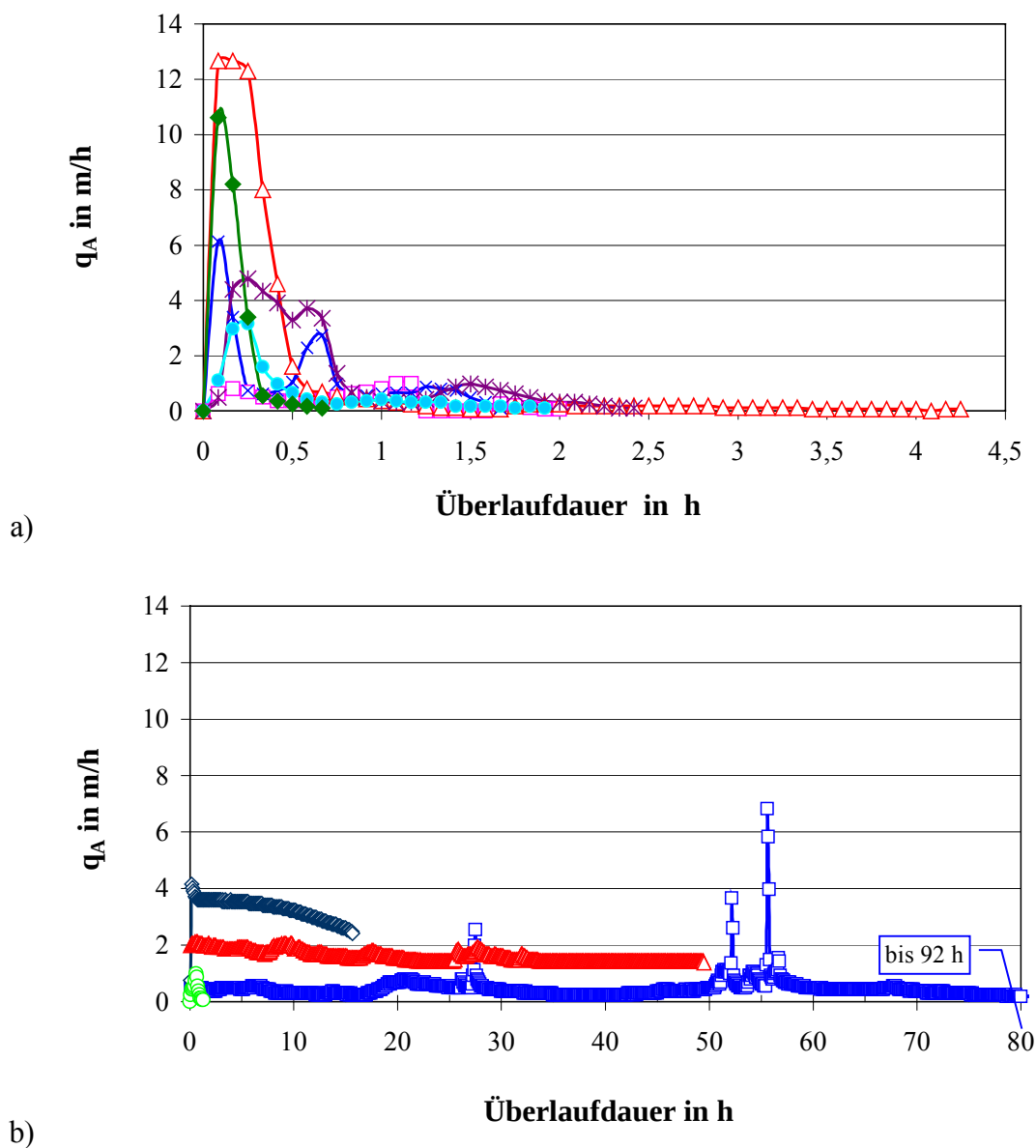


Abb. 40: Beispielhafte Darstellung der Flächenbeschickung innerhalb des Überlaufes eines Durchlaufbeckens: a - während warmer Jahreszeit; b- während kalter Jahreszeit

Nach Abb. 40 tritt eine Flächenbeschickung über 8 m/h in der Regel in der warmen Zeit des Jahres auf. In dieser Jahreszeit ist die Nieseschlagsintensität höher. Deshalb laufen häufig die Becken kürzer über und haben am Anfang eine größere Flächenbeschickung.

Diese Erkenntnis läßt darauf schließen, daß der Schlamm nach jedem Regenereignis vollständig aus dem Becken abzuleiten ist. Am Anfang des nächsten Regens ist kein Schlamm mehr im Becken vorhanden. Dadurch besteht keine Gefahr seines Austrages über den Klärüberlauf.

Es soll jedoch überprüft werden, ob die Höhe der Schlammzone ausreichend ist. Sie ist so zu auszulegen, daß die Schlammzone den anfallenden Schlamm bis zur nächsten Beckenreinigung aufnehmen kann.

10 Wirtschaftliche Aspekte der Mischwasserbehandlung

10.1 Vorgehensweise

Die Kostenuntersuchungen wurden für Beckengrößen von 12 bis 40 m³/ha bei den Einzugsgebieten mit einer befestigten Fläche A_{red} von 10, 50 und 100 ha durchgeführt. Es wurde angenommen, daß der vorhandene Zulaufkanal und der Beckenüberlauf richtig dimensioniert wurden, d.h. daß der ganze Mischwasserabfluß im Becken ankommt.

Die Untersuchungen bestanden in der Berechnung und Beurteilung der Jahreskosten (JK). Die Berechnung erfolgte nach folgender Formel

$$JK = IK \times KFAKR(3;50) + IKR \times KFAKR(3;13) + LK$$

wobei: IK - Investitionskosten, IKR - Ersatzinvestitionen, LK - laufende Kosten, KFAKR (i;n) - Kapitalwiedergewinnungsfaktor.

Gemäß LEITLINIEN ZUR DURCHFÜHRUNG VON KOSTENVERGLEICHSCALCÜLEN DER LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1994) wurden der Zinssatz mit 3 % p. a. und der Untersuchungszeitraum mit 50 Jahren angesetzt. Bei der durchschnittlichen Nutzungsdauer der einzelnen Anlagenteile wurden für den baulichen Teil von 50 Jahren und für den maschinellen Teil sowie für die Lamellen von 13 Jahren ausgegangen.

10.2 Aktueller Stand der Mischwasserbehandlung

Die Berechnung der Baukosten erfolgte nach MILOJEVIĆ (1996) für die geschlossenen Regenüberlaufbecken aus Stahlbeton. Die Kosten für die maschinentechnische Ausrüstung wurden prozentual zu den Baukosten nach Angaben von FELDMANN (1994) ermittelt.

Die Betriebskosten setzen sich aus den Personalkosten für die Reinigung und Wartung des Beckens und Kosten für den Strom und das Spülwasser zusammen. Für Regenüberlaufbecken mit automatischer Beckenreinigung wurden die jährlichen Betriebskosten mit 20 DM/m³ des Nutzungsvolumens (MILOJEVIĆ (1996), PECHER (1996)) abgeschätzt.

Die Ergebnisse der Kostenuntersuchungen sind in Tab. 23 dargestellt. Wie aus dieser Tabelle ersichtlich, liegen die jährlichen Kosten bei einem Beckenvolumen V_s von 12 m³/ha für unterschiedlich große Einzugsgebiete zwischen etwa 41 bis 161 Tausend DM und steigen bis etwa 83–290 Tausend DM bei $V_s = 40$ m³/ha an. Die Kosten der konventionellen

Mischwasserbehandlung hängen von der Größe des spezifischen Beckenvolumens sowie der angeschlossenen Entwässerungsfläche ab.

Tab. 23: Kostenübersicht über die konventionelle Mischwasserbehandlung

Becken- größe V_s	Einzugs- gebiet A_{red}	Becken- volumen V_{ges}	Investitionen ^{*)}		Betriebs- kosten	Jahres- kosten	Spez. Kosten
			Bauteil	Maschinen- teil			
m ³ /ha	ha	m ³	TDM	TDM	DM/a	DM/a	DM/(ha·a)
12	10	120	556	185	2.400	41.482	4.148
	50	600	1.722	304	12.000	107.571	2.151
	100	1200	2.650	361	24.000	161.043	1.610
15	10	150	629	199	3.000	46.162	4.616
	50	750	1.987	310	15.000	121.463	2.429
	100	1500	2.981	350	30.000	178.836	1.788
20	10	200	839	244	4.000	59.540	5.954
	50	1000	2.319	316	20.000	139.912	2.798
	100	2000	3.312	352	40.000	201.910	2.019
25	10	250	938	265	5.000	66.388	6.639
	50	1250	2.622	324	25.000	157.468	3.149
	100	2500	3.588	355	50.000	222.942	2.229
30	10	300	1.060	273	6.000	72.922	7.292
	50	1500	2.981	331	30.000	177.097	3.542
	100	3000	3.643	360	60.000	235.603	2.356
40	10	400	1.281	272	8.000	83.358	8.336
	50	2000	3.091	343	40.000	192.545	3.851
	100	4000	4.416	410	80.000	290.359	2.904

^{*)} - Kostenstand 1999

Die auf ein Hektar der entwässerten Fläche bezogenen spezifischen Kosten machen deutlich, daß der Bau einer konventionellen Anlage in größeren Gebieten wirtschaftlich günstiger ist. Für kleinere Gebiete ist es wirtschaftlicher, anstatt mehrerer Becken ein gemeinsames Speichervolumen vorzusehen, wenn der Anschluß an das gemeinsame Becken keine höhere Kosten verursacht. Diese Lösung weist jedoch den Nachteil auf, daß sich durch den Bau eines Beckens die hydraulische Stoßbelastung des Gewässers erhöht.

Bei angestrebter Minimierung der stofflichen Gewässerbelastung wäre die Kostenbetrachtung bei verschiedenen Beckengrößen allein ohne Berücksichtigung der in das Gewässer eingeleiteten Schmutzfracht nicht sinnvoll. Mit Steigerung des zur Mischwasserbehandlung zur Verfügung stehenden spezifischen Beckenvolumens verringern sich die Entlastungsfrachten bei gleichzeitiger Kostenerhöhung. Aus Gründen des Gewässerschutzes sollten bei den Wirtschaftlichkeitsanalysen die erzielten Rückhalteraten in den Becken berücksichtigt werden. Dazu sind die entstehenden Kosten auf die entnommenen Frachten zu beziehen.

Aus diesen Überlegungen wurden die Kosten für den Rückhalt eines Kilogramms von Feststoffen aus Mischwasser berechnet. Hierzu wurden die Jahreskosten durch die in den Becken zurückgehaltenen Frachten dividiert. Letzere ergeben sich bei der konventionellen Mischwasserbehandlung aus der Differenz zwischen der direkten Gewässerbelastung ohne Regenüberlaufbecken und der Belastung bei entsprechendem spezifischem Volumen nach KRAUTH & STOTZ (1985) (vgl. Abb. 38), bei der Fällung und Flockung inkl. Lamellen aus der Differenz zwischen der direkten Gewässerbelastung ohne Regenüberlaufbecken und einer Belastung von 100 kg/(ha·a) (vgl. Tab. 22). Die Ergebnisse für die konventionelle Mischwasserbehandlung finden sich in Abb. 41. Die Kosten bei der Fällung und Flockung inkl. Lamellen werden im folgenden Abschnitt betrachtet.

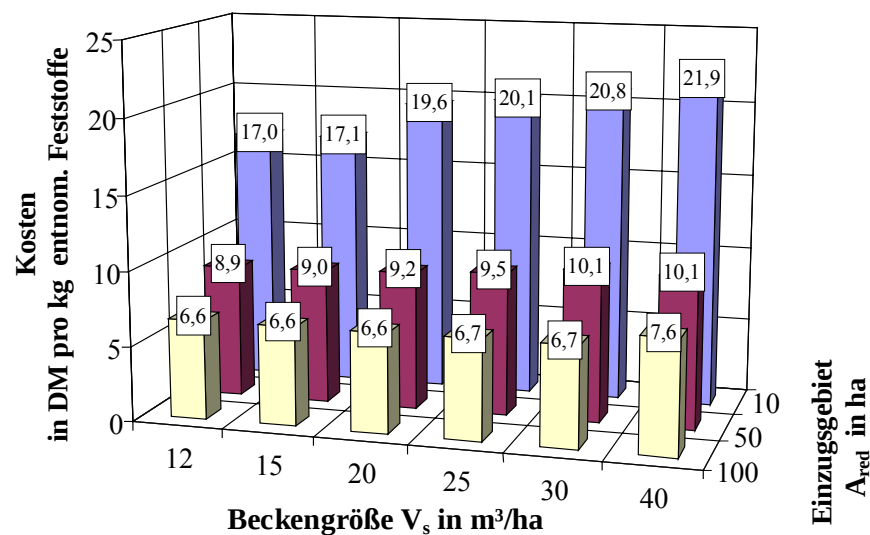


Abb. 41: Kosten der Feststoffentnahme bei der aktuellen Mischwasserbehandlung

Diese Abbildung bestätigt, daß die Mischwasserbehandlung in einem Regenüberlaufbecken in größeren Einzugsgebieten aus Kostengründen vorteilhafter ist. Mit Vergrößerung

der angeschlossenen Fläche verringern sich die Kosten pro Kilogramm entnommener Fracht. So kostet, z. B., bei einer entwässerten Fläche A_{red} von 10 ha der Feststoffrückhalt in Durchlaufbecken mit V_s von 12-40 m³/ha 17 bis 21,9 DM/kg. Der Unterschied beträgt knapp 5 DM. Bei einer Fläche A_{red} von 100 ha liegen die Kosten zwischen 6,6 und 7,6 DM/kg. Die Differenz beträgt nur 1 DM/kg.

Die gewonnenen Ergebnisse lassen darauf schließen, daß es aus gewässergütewirtschaftlichen Gründen zweckmäßig ist, das im ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) genannte maximale spezifische Volumen 40 m³/ha nur in großen Einzugsgebieten einzusetzen. Z. B., bei Anordnung solcher Becken in einem Gebiet mit A_{red} von 10 ha kostet der Rückhalt eines Kilogramms der Feststoffe das doppelte wie in einem Gebiet mit A_{red} von 50 ha.

Bei einer A_{red} von 50-100 ha ist der Einsatz von großem spezifischem Volumen aus ökologischen Gründen vorteilhafter, da die direkte Gewässerbelastung niedriger ist als bei kleinen spezifischen Beckengrößen. Dabei sind hier die für den Rückhalt eines Kilogramms der Feststoffe entstehenden Kosten nur unwesentlich höher. Bei kleinen Gebieten sollten aus wirtschaftlichen Gründen niedrige spezifische Volumina vorgezogen werden, weil die Kosten hier überproportional zur ökologischen Verbesserung ansteigen.

10.3 Mischwasserbehandlung mittels Fällung/Flockung inkl. Lamelleneinbau

Die Investitionen für die erforderlichen Dosierungseinrichtungen (vgl. Abb. 36) setzen sich aus folgenden Kosten zusammen:

Schaltschrank (inkl. elektrischer Teil)	8.000,-	DM
Dosierpumpe mit Regler	5.000,-	DM
Steuerung	10.000,-	DM
Magnetisch-induktive-Durchflußmesser (IDM)	15.000,-	DM
Wasserstandsmeßgerät (WS-Sonde)	15.000,-	DM
Relais und Meßkabel	10.000,-	DM
Insgesamt	63.000,-	DM
inkl. MwSt.	73.080,-	DM

Die Betriebskosten zur Fällung und Flockung wurden aus den Chemikalien- und Energiekosten berechnet. Für diese Berechnungen sind das zu behandelte Mischwasservolumen und die Dosierungsdauer unter den Annahmen des Abschnittes 9.1 nach KRAUTH, KH. (1970) und KRAUTH, KH., G. STOTZ (1985) ermittelt worden. Die Bestimmung der Chemikalienkosten erfolgte für das Flockungsmittel Sachtoc-46,24 nach Herstellerangaben.

Die Energiekosten wurden mit 0,25 DM pro 1 kWh bei einem Energieverbrauch der Dosierpumpe von 0,5 kW und 0,2 kW für andere Messungen (WS-Sonde und IDM) berechnet. Die gewonnenen Ergebnisse sind in Tab. 24 aufgeführt.

Tab. 24: Betriebskosten zur Fällung/Flockung des Mischwassers

Becken- größe V _s	Einzugs- gebiet A _{red}	Mischwasser- volumen		Flockungsmittel				Energie- kosten	Gesamt- kosten
		gesamt	zum Behandeln	Bedarf	Kosten inkl. MwSt.				
					ab Werk	Transport	Gesamt		
m³/ha	ha	m³/a	m³/a	kg/a	DM/a	DM/a	DM/a	DM/a	DM/a
12	10	55.400	55.400	7.455	15.565	882	16.447	516	16.964
	50	277.000	277.000	37.273	77.826	4.341	82.167	516	82.683
	100	554.000	554.000	74.546	155.653	7.470	163.122	516	163.638
15	10	55.970	55.659	7.489	15.638	886	16.524	519	17.043
	50	279.850	278.295	37.447	78.190	4.361	82.551	519	83.070
	100	559.700	556.591	74.895	156.380	7.504	163.885	519	164.404
20	10	56.720	51.521	6.933	14.475	822	15.297	517	15.814
	50	283.600	257.603	34.663	72.377	4.038	76.415	517	76.932
	100	567.200	515.207	69.326	144.753	6.948	151.701	517	152.218
25	10	57.270	38.527	5.184	10.825	619	11.443	499	11.942
	50	286.350	192.635	25.921	54.123	3.024	57.147	499	57.646
	100	572.700	385.271	51.842	108.246	5.199	113.445	499	113.944
30	10	57.740	33.244	4.473	9.340	536	9.877	494	10.370
	50	288.700	166.221	22.367	46.702	2.612	49.314	494	49.807
	100	577.400	332.442	44.733	93.403	4.488	97.892	494	98.386
40	10	58.540	24.273	3.266	6.820	396	7.216	481	7.696
	50	292.700	121.363	16.331	34.098	1.912	36.010	481	36.491
	100	585.400	242.727	32.661	68.197	3.281	71.478	481	71.958

Bei der Kostenermittlung für den Lamelleneinsatz wurde davon ausgegangen, daß die Abscheiderfläche um das 4-fache zu vergrößern ist. Eine weitere Annahme war es, daß die Tiefe des Beckens bei einem Volumen bis 500 m³ 3 m und ab einem Volumen von 500 m³ 4 m und die Abscheiderhöhe entsprechend 1,5 und 2 m beträgt. Die Kostenberechnung erfolgte nach den Herstellangaben für das Model FS 41.80.

Die Investitionen setzen sich aus den Anschaffungskosten inkl. Lieferung und Montage und den Kosten für die Befestigung der Lamellen im Becken zusammen. Kosten für die zusätzlichen Klarwasserrinnen, die eine gleichmäßige Durchströmung der Lamellen bewirken, sind in diesen Berechnungen nicht berücksichtigt. Im Einzelfall sind jedoch Kostenbetrachtungen erforderlich. Die ermittelten Investitionen für den Lamelleneinsatz sind in Tab. 25 wiedergegeben.

Tab. 25: Investitionen für den Lamelleneinsatz in einem Durchlaufbecken

Becken- größe V_s	Einzugs- gebiet A_{red}	Becken- volumen V_{ges}	Becken- oberfläche A_B	Abscheider- fläche P_A	Kosten inkl. MWSt.		
					Anschaffung inkl. Lieferung und Montage	Befestigung	Insgesamt
m ³ /ha	ha	m ³	m ²	m ²	DM	DM	DM
12	10	120	40	160	14.277	2.379	16.656
	50	600	150	600	53.538	6.692	60.231
	100	1200	300	1.200	107.077	13.385	120.462
15	10	150	50	200	17.846	2.974	20.821
	50	750	188	750	66.923	8.365	75.288
	100	1500	375	1.500	133.846	16.731	150.577
20	10	200	67	267	23.795	3.966	27.761
	50	1000	250	1.000	89.231	11.154	100.385
	100	2000	500	2.000	178.462	22.308	200.769
25	10	250	83	333	29.744	4.957	34.701
	50	1250	313	1.250	111.538	13.942	125.481
	100	2500	625	2.500	223.077	27.885	250.962
30	10	300	100	400	35.692	5.949	41.641
	50	1500	375	1.500	133.846	16.731	150.577
	100	3000	750	3.000	267.692	33.462	301.154
40	10	400	133	533	47.590	7.932	55.521
	50	2000	500	2.000	178.462	22.308	200.769
	100	4000	1.000	4.000	356.923	44.615	401.538

Bei den Betriebskosten wurde davon ausgegangen, daß die Lamellen einmal je Halbjahr einer Reinigung bedürfen (vgl. Abschnitt 9.3). Zu den Betriebskosten von 20 DM/(m³·a), die bei

der konventionellen Behandlung entstehen, kommt in diesen Berechnungen eine Erhöhung um 10 % dazu.

Die Ergebnisse der zur Fällung und Flockung inkl. Lamelleneinbau an einem Durchlaufbecken durchgeführten Kostenuntersuchungen sind in Tab. 26 und Abb. 42 dargestellt.

Tab. 26: Kostenübersicht über die Fällung/Flockung inkl. Lamellen in Durchlaufbecken

Beckengröße V_s	Einzugsgebiet A_{red}	Investitionen ^{*)}				Betriebskosten			Jahreskosten	spez. Kosten
		Baukosten	Maschinentechnik	Dosiereinrichtungen	Lamellen	Beckenreinigung inkl. Strom, Personal	Fällung/Flockung	Insgesamt		
m ³ /ha	ha	TDM	TDM	DM	DM	DM/a	DM/a	DM/a	DM/a	DM/(ha·a)
12	10	556	185	73.080	16.656	2.640	16.964	19.604	67.121	6.712
	50	1.722	304	73.080	60.231	13.200	82.683	95.883	203.986	4.080
	100	2.650	361	73.080	120.462	26.400	163.638	190.038	345.274	3.453
15	10	629	199	73.080	20.821	3.300	17.043	20.343	72.331	7.233
	50	1.987	310	73.080	75.288	16.500	83.070	99.570	219.980	4.400
	100	2.981	350	73.080	150.577	33.000	164.404	197.404	367.264	3.673
20	10	839	244	73.080	27.761	4.400	15.814	20.214	85.234	8.523
	50	2.319	316	73.080	100.385	22.000	76.932	98.932	235.150	4.703
	100	3.312	352	73.080	200.769	44.000	152.218	196.218	383.870	3.839
25	10	938	265	73.080	34.701	5.500	11.942	17.442	88.962	8.896
	50	2.622	324	73.080	125.481	27.500	57.646	85.146	236.279	4.726
	100	3.588	355	73.080	250.962	55.000	113.944	168.944	372.347	3.723
30	10	1.060	273	73.080	41.641	6.600	10.370	16.970	94.676	9.468
	50	2.981	331	73.080	150.577	33.000	49.807	82.807	250.928	5.019
	100	3.643	360	73.080	301.154	66.000	98.386	164.386	375.167	3.752
40	10	1.281	272	73.080	55.521	8.800	7.696	16.496	103.943	10.394
	50	3.091	343	73.080	200.769	44.000	36.491	80.491	258.777	5.176
	100	4.416	410	73.080	401.538	88.000	71.958	159.958	414.932	4.149

^{*)} – Stand 1999

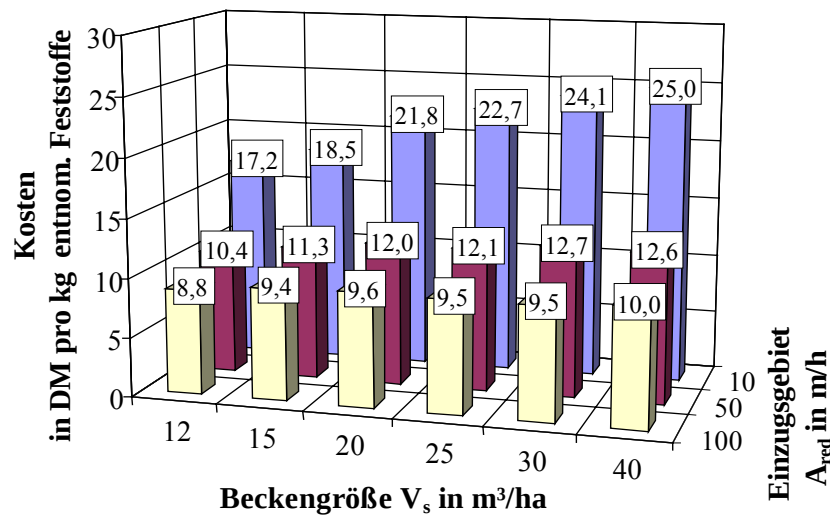


Abb. 42: Kosten der Feststoffentnahme bei der Mischwasserbehandlung mittels Fällung/Flockung inkl. Lamellen

Die jährlichen Kosten für die getestete Technologie (vgl. Tab. 26) liegen in Abhängigkeit von der Einzugsgebietgröße zwischen ca. 67 und 345 Tausend DM bei einem Beckenvolumen von 12 m³/ha und zwischen ca. 104 und 415 Tausend DM bei 40 m³/ha.

Die spezifischen Kosten liegen entsprechend bei ca. 6,7 bis 3,5 Tausend DM/(ha·a) bzw. 10,4 bis 4,1 Tausend DM/(ha·a). Im Vergleich zur konventionellen Reinigung (vgl. Tab. 23) steigen die spezifischen Kosten um ca. 2,6-1,8 Tausend DM/(ha·a) bei $V_s = 12$ m³/ha bzw. um 2,1-1,2 Tausend DM/(ha·a) bei 40 m³/ha an. Diese zusätzlichen Ausgaben verringern die in das Gewässer ausgetragenen Feststofffrachten um ca. 140 bis 30 kg FS/(ha·a). Für den Einwohner ergibt sich dadurch eine Verteuerung von etwa 20-77 DM/(E·a) auf 38-121 DM/(E·a) (vgl. Anlage 3).

Die Reinigungskosten hinsichtlich der entnommenen Fracht können bei $A_{red} = 10$ ha mit 17,2 bis 25 DM/kg FS und bei $A_{red} = 100$ ha mit 8,8 bis 10 DM/kg FS abgeschätzt werden. Der Vergleich mit den heutigen Ausgaben zur Mischwasserbehandlung (vgl. Abb. 41) zeigt in Abhängigkeit von den betrachteten Varianten eine Kostenerhöhung im Bereich von 20 Pf. bis 3,1 DM/kg FS.

10.4 Zusammenfassende Interpretation

Eine zusammenfassende Darstellung der Kosten zur Mischwasserbehandlung bei Einhaltung der direkten Gewässerbelastung nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) zeigt Abb. 43. In dieser Abbildung wird die heutige konventionelle Reinigung mit maximal zulässigem spezifischem Volumen von $40 \text{ m}^3/\text{ha}$ mit unterschiedlichen Varianten der Fällung und Flockung inkl. Lamellen in Becken kleiner als $40 \text{ m}^3/\text{ha}$ verglichen. Bei allen dargestellten Varianten wird eine direkte Gewässerbelastung von $100 \text{ kg FS}/(\text{ha}\cdot\text{a})$, die dem Feststoffeintrag in das Gewässer bei konventioneller Regenwasserbehandlung mit V_s von $40 \text{ m}^3/\text{ha}$ entspricht, nicht überschritten. Die anderen heute angewendeten kleineren spezifischen Beckengrößen werden aus ökologischen Aspekten nicht betrachtet. Sie verursachen geringere Kosten, aber zeigen eine höhere direkte Gewässerbelastung.

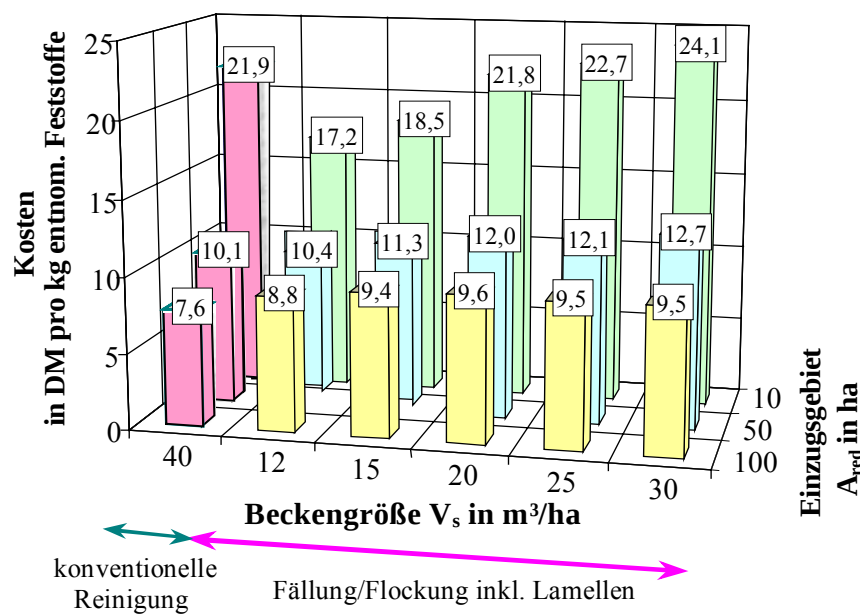


Abb. 43: Kostenvergleich der Mischwasserbehandlung mittels Fällung/Flockung inkl. Lamellen mit aktueller Behandlung nach ATV-ARBEITSBLATT A-128 (1992)

Diese Abbildung macht deutlich, daß in kleinen Einzugsgebieten mit A_{red} bis 10 ha die Fällung und Flockung inkl. Lamellen in einem Durchlaufbecken mit einem spezifischen Volumen von $12\text{-}15 \text{ m}^3/\text{ha}$ wirtschaftlich günstiger ist als die konventionelle Behandlung bei einer spezifischen Größe von $40 \text{ m}^3/\text{ha}$. Die Kosten der Fällung und Flockung sowie des Lamelleneinbaus betragen bei solchen Anlagen nur einen unwesentlichen Teil

der Gesamtkosten. Die Baukosten spielen hier die wichtigste Rolle. Die Vergrößerung des Beckenvolumens hat zur Folge, daß die spezifischen Baukosten abnehmen. Die spezifischen Kosten für die Flockungstechnologie nehmen dagegen wesentlich zu. Besonders steigen diese stark durch Lamellenkosten an, da bei größeren Becken die Grundfläche, die mit Lamellen bedeckt werden soll, zunimmt. Insgesamt führt es dazu, daß die entstehenden Kosten ab einer spezifischen Beckengröße von 20-25 m³/ha die heutigen Kosten bei V_s von 40 m³/h überschreiten.

Bei einem Einzugsgebiet von etwa 50 ha liegen die Kosten des Flockungsverfahrens in Becken mit V_s von 12 m³/ha in gleicher Größenordnung wie die Kosten der konventionellen Anlage mit V_s von 40 m³/ha. Bei einer größeren Fläche erweist sich jedoch die konventionelle Regenwasserbehandlung wirtschaftlich vorteilhafter. Wenn bei $A_{red} = 50$ ha der Vorteil noch geringfügig ist (30 Pf./kg FS), steigt er bis zu 1,2 DM/kg FS bei einer A_{red} von 100 ha an. Hier ist empfehlenswert, die konventionelle Behandlung mit V_s von 40 m³/ha einzusetzen. Nur bei Platzbeschränkung kann die Fällung und Flockung im Betracht gezogen werden.

Der Vergleich der einwohnerbezogenen Kosten ist in der nachfolgenden Tabelle wiedergegeben und bestätigt den wirtschaftlichen Vorteil der Regenwasserbehandlung mittels Fällung und Flockung inkl. Lamellen in kleinen Einzugsgebieten und der konventionellen Behandlung in Gebieten mit A_{red} ab etwa 50 ha.

Tab. 27: Vergleich der einwohnerbezogenen Kosten der Regenwasserbehandlung mittels Fällung/Flockung inkl. Lamellen bei V_s von 12-30 m³/ha mit konventioneller Behandlung bei V_s von 40 m³/ha

Einzugs- gebiet A_{red}	Kosten der Fällung und Flockung inkl. Lamellen bzgl. konventioneller Anlage mit V_s von 40 m ³ /ha				
	Beckengröße				
	$V_s = 12$ m ³ /ha	$V_s = 15$ m ³ /ha	$V_s = 20$ m ³ /ha	$V_s = 25$ m ³ /ha	$V_s = 30$ m ³ /ha
ha	als Ersparnis / Erhöhung in DM/(E·a)				
10	27 / (-)	18 / (-)	--	--	--
50	--	(-) / 7	(-) / 11	(-) / 11	(-) / 15
100	--	--	(-) / 9	(-) / 8	(-) / 9

Zusammenfassend ermöglicht die getestete Technologie, das erforderliche spezifische Speichervolumen herabzusetzen, ohne die Gewässerbelastung nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) zu erhöhen. In kleinen Einzugsgebieten kann dadurch eine Kostenersparnis erzielt werden. Der Bau von kleineren Becken hat den Vorteil, daß sich der Platzbedarf verringert. Dies ist insbesondere für Einzugsgebiete wichtig, bei denen nicht ausreichend Platz zur Verfügung steht. In Einzugsgebieten mit A_{red} ab 50 ha ist es jedoch wirtschaftlich günstiger, eine konventionelle Mischwasserbehandlung durchzuführen, um eine maximale direkte Gewässerbelastung von 100 kg FS/(ha·a) einzuhalten.

Die hier durchgeführten Kostenbetrachtungen gelten für neu zu bauende Anlagen. Falls bestehende Anlagen aufgrund des Anschlusses neuer Flächen bzw. höherer Anforderung an die Wasserqualität der Mischwasserentlastungen erweitert werden müssen, sind weitere Analysen notwendig. Es ist wahrscheinlich, daß es in den meisten Fällen wirtschaftlicher ist, die getestete Technologie in bestehende Becken einzusetzen als weitere Volumina für die konventionelle Behandlung bereitzustellen.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Durchlaufbecken dienen zur Verminderung der bei Regenwetter aus Mischkanalisationen in Gewässer eingeleiteten Schmutzstofffrachten. Sie besitzen einen Abfluß zur Kläranlage, einen Klärüberlauf, der nach Füllung des Beckens anspringt und mechanisch geklärtes Mischwasser dem Gewässer zuführt und einen Beckenüberlauf, der bei gefülltem Becken auch sehr große Zuflüsse in das Gewässer entlastet. Um einen effektiven Gewässerschutz zu erreichen, muß heute nicht nur die Stofffracht aus Kläranlagen minimiert werden, sondern auch die Wirkung von Durchlaufbecken verbessert werden, um die in das Gewässer eingeleiteten Schmutzfrachten zu verringern.

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit der Fällung und Flockung im nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) ausgelegten rechteckigen Durchlaufbecken. Im Rahmen der Arbeit wurden die Mechanismen des Rückhaltes der geflockten Partikel und die Verbesserung der Partikelabscheidung mittels Lamellen untersucht und bewertet. Im Unterschied zu bisherigen Untersuchungen zielte die Arbeit nicht nur auf die Verminderung von entlasteten Schmutzfrachten, sondern auch auf die Reduzierung von erforderlichem Speichervolumen, um eine wirtschaftlich und ökologisch günstige Realisierung der Mischwasserbehandlung in Durchlaufbecken zu ermöglichen. Die Ziele waren es, erstens die direkte Gewässerbelastung zu minimieren, und zweitens bei Einhaltung der direkten Gewässerbelastung nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) Speichervolumen einzusparen.

Die Untersuchungen erfolgten im halbtechnischen Maßstab auf dem Gelände des Klärwerkes Stuttgart-Büsnau und wurden mit an die Realität angepaßten hydraulischen Belastungen durchgeführt. Als Mischwasser dienten reale Zuflüsse von Stuttgart-Büsnau.

Basierend auf bisherigen unzureichenden Kenntnissen über das Absetzverhalten der geflockten Partikel im Mischwasser und auf fehlender Information über ihre Absetzgeschwindigkeit, war es für den Erfolg der Untersuchungen zwingend notwendig diese Daten zu gewinnen. Deshalb wurde zunächst im Labormaßstab der Einfluß der Fällung und Flockung auf den Schlammanfall untersucht und die Absetzgeschwindigkeit der gebildeten Partikel gemessen. Aufgrund dieser Messungen wurde die Abscheiderfläche für die späteren Untersuchungen gewählt.

Da die Absetzbarkeit der Flocken von ihrer Größe abhängt, wurde im nächsten Schritt der Einsatz des Rohrreaktors zur Flockenbildung bei unterschiedlich hohen Zuflüssen untersucht.

Die darauffolgenden halbtechnischen Untersuchungen umfaßten zwei Teile. Im ersten Teil wurden im Durchlaufbecken ohne Lamelleneinbau bei verschiedenen konstanten Flächenbeschickungen

(2,5 bis 10 m/h) der erreichbare Stoffrückhalt und die Verteilung der Schmutzstoffe im Becken untersucht. Die Versuche mit unterschiedlich hoher hydraulischer und stofflicher Belastung dienten zur Ermittlung der Wirkung des Verfahrens bei schwankenden Mischwasserzuflüssen als Folge des Regenabflusses. Im zweiten Teil der Untersuchungen wurde das Versuchsbecken mit Lamellen nachgerüstet. Wegen fehlender praktischen Erfahrungen zum Lamelleneinsatz in Regenbecken wurden zwei Typen mit unterschiedlicher technischer Charakteristik getestet.

Im Anschluß an diese Untersuchungen erfolgte die Anpassung der getesteten Technologie an den realen Betrieb. Folgende Instrumente wurden entwickelt: Chemikaliendosierung, Auslegung des Lamellenabscheiders, Wartung und Betrieb, Einrichtungen für den Schlammabtransport aus dem Becken. Eine wirtschaftliche Analyse rundet das Vorhaben ab.

Die durchgeführten Untersuchungen weisen die prinzipielle Wirksamkeit des Verfahrens zur Mischwasserbehandlung nach und machen den Zusammenhang zwischen dem Stoffaustrag über den Klärüberlauf und der Flächenbeschickung deutlich.

Die Fällungs- und Flockungschemikalien für das Mischwasser und ihre Dosiermenge werden mittels üblicher Laborversuche ausgewählt. Wenn der Zufluß im Betrieb gemessen wird, erfolgt die Chemikaliengabe proportional dem zufließenden Wasservolumen. Falls keine Messungen vorhanden sind, wird eine konstante Dosierung für den Zufluß von 8-10 l/(s·ha) empfohlen. Bei besonders ausgerüsteten Becken können die Prozeßbedingungen an den realen Betrieb durch entsprechende Technik angepaßt werden.

Die Chemikalien können direkt in das Rohr zugegeben werden. Der Einsatz des Rohrreaktors unterstützt eine gute Verteilung der Chemikalien und Aggregation von entstabilisierten Partikeln zu Flocken. Da hierzu vorhandene Rohrleitungen verwendet werden können, entsteht kein Platzbedarf für die zusätzlichen Anlagen. Die Abwesenheit von beweglichen Teilen ermöglicht einen einfacheren Betrieb. Bei effektiven Chemikalien wird empfohlen, den Rohrreaktor nur zur Mikrofloccenbildung auszulegen. Als Bemessungszufluß ist ein Wasservolumen, das einer maximalen Flächenbeschickung von 10 m/h entspricht, zugrunde zu legen, um den Flockenzerfall bei hohen hydraulischen Belastungen zu vermindern. Beim Bemessungszufluß wird eine Fließgeschwindigkeit von 2 bis 2,5 m/s empfohlen. Sie bietet bei schwankenden Zuflüssen eine gesicherte Wirksamkeit des Verfahrens.

Der in den Becken anfallende Fällschlamm wird mit den absetzbaren Stoffen aus dem Einzugsgebiet wie bisher zur Kläranlage weitergeleitet. Eine dezentrale Entsorgung des Fällschlammes ist wegen des hohen Anteils an organischen Stoffen und des hohen Wassergehalts nicht sinnvoll. Für die nachfolgende Kläranlage hat dies eine Erhöhung der Belastung zur Folge. Basierend auf den Ergebnissen von DOHMANN et al. (1994) wird nicht

erwartet, daß diese Erhöhung einen negativen Einfluß auf den Reinigungsprozeß der Kläranlage haben wird.

Der durch die Fällung und Flockung erzeugte Schlamm ist aufgrund geringer Dichte leicht an Gewicht und schwer absetzbar. Diese Tatsache ist für das nachfolgende Kanalnetz positiv zu betrachten, da keine Gefahr von vermehrten Kanalablagerungen besteht.

Für den Entlastungsstrom des Beckens kann dies dazu führen, daß die erzeugten Partikel bei hohen Zuflüssen über den Klärüberlauf ausgetragen werden. Während die meisten Inhaltsstoffe des Mischwassers nach BROMBACH et al. (1993) eine Absetzgeschwindigkeit von 7 bis 40 m/h aufweisen, setzen sich Flocken, wie eigene Messungen zeigten, am häufigsten mit einer Geschwindigkeit von 5 bis 21 m/h ab. Die Summenhäufigkeitsverteilung der Flockenabsetzgeschwindigkeit zeigt, daß bei maximaler Flächenbeschickung von 10 m/h kein befriedigender Feststoffrückhalt in Durchlaufbecken zu erwarten ist. Eine gute Rückhalterate läßt sich nur bei niedrigen Zuflüssen erzielen. Bei einer Flächenbeschickung von 10 m/h kann im günstigsten Fall mit einem Rückhalt von 35 % gerechnet werden (eine Strömungsbeeinflussung wurde bei Übertragung der Labormessungen nicht berücksichtigt).

Die Laborresultate wurden durch die halbertechnischen Untersuchungen bestätigt. Bei der Fällung und Flockung in Durchlaufbecken ohne Abscheidung mit Lamellen wird ein guter Feststoffrückhalt nur bis zu einer Flächenbeschickung von 5 m/h erreicht. Bei weiterer Zuflußsteigerung nimmt er aufgrund des vermehrten Flockenaustrages ab. Bei einer q_A von 10 m/h wurden in den durchgeführten Untersuchungen während der Überlaufdauer etwa 90 % der Feststofffracht über den Klärüberlauf ausgetragen. Der dabei erzielte Frachtrückhalt lag bei 10 % und wurde nur durch die Weiterleitung des Mischwassers über den Drosselabfluß erreicht. Eine Klärung findet bei maximalen Zuflüssen nicht statt. Im Bereich von einer q_A um 2,5 m/h betrug der prozentuale Anteil der Sedimentationswirkung an der Reinigungsleistung des Beckens etwa 70 % (ohne Berücksichtigung der Fangwirkung).

Obwohl die Flocken durch eine effektivere Chemikalie vergrößert werden können, und damit ihre Absetzgeschwindigkeit erhöht wird, ist nicht zu erwarten, daß bei einer Flächenbeschickung von 10 m/h allein durch die Chemikalienzugabe ein befriedigender Wirkungsgrad erreicht wird.

Die Fällung und Flockung in einem Durchlaufbecken ist nur dann sinnvoll, wenn das Becken mit Lamellen ausgerüstet ist. Die Wirkung wird dadurch bei allen Zuflüssen verbessert. Die Abhängigkeit des Stoffaustrages von der hydraulischen Beschickung bleibt erhalten, jedoch ist die Höhe des Austrages bei der Zuflußsteigerung deutlich geringer. Die einzusetzende Abscheiderfläche hängt von der gewünschten Klärüberlaufqualität sowie Beschaffenheit des zu behandelnden Wassers ab. Empfohlen wird eine Abscheiderfläche, die dem 2- bis 4,5-fachen Wert der Beckengrundfläche entspricht. Eine weitere Vergrößerung der Abscheiderfläche hat

bei höheren Kosten nur eine unwesentliche Verbesserung der direkten Gewässerbelastung zur Folge.

Für die Praxis werden Lamellen mit einem Abstand von 50 bis 80 mm zwischen den Absetzebenen und einem Neigungswinkel von 55-60° empfohlen. Bei solchen Modulen treten im halbtechnischen Betrieb weder Verstopfung noch ein schlechter Schlammabrutsch ein. Die Module sollten jedoch im realen Betrieb auf die Verstopfungsgefahr getestet werden.

Der Feststoffaustrag über die Drossel hängt wie der Feststoffaustrag über den Entlastungsstrom vom zufließenden Wasservolumen ab. Mit Steigerung der hydraulischen Belastung nimmt die Konzentration an Feststoffen im Drosselabfluß zu. In einem mit Lamellen nachgerüsteten Durchlaufbecken ist der Feststoffaustrag über die Drossel von besonderer Bedeutung. Mit einem durch Lamellen gegebenen größeren Rückhalt erhöht sich die Gefahr, daß bereits am Beckenboden vorhandener Schlamm bei hohen Zuflüssen bzw. darauffolgendem Regen über den Klärüberlauf in das Gewässer gelangt. Es ist sicherzustellen, daß der Schlamm über die Drossel zur Kläranlage abtransportiert wird. Dafür müssen entsprechende Einrichtungen (vgl. Abschnitt 9.4) vorhanden sein.

Um ausreichende Sicherheit gegen Schlamm aufwirbelung zu erreichen, muß wegen des hohen Anteils leichter Partikel die im ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) angegebene Begrenzung für die horizontale Fließgeschwindigkeit im Durchlaufbecken von 5 cm/s verringert werden. Um die Ablagerung des Fällschlammes an der Beckensohle zu vermeiden, muß eine minimale horizontalen Fließgeschwindigkeit von 0,6 cm/sek eingehalten werden.

Bei welchem Füllstand des Becken die Flockungschemikalien zu dosieren sind, kann in der Praxis individuell entschieden werden. Die direkte Gewässerbelastung hängt vom spezifischen Beckenvolumen ab. Im ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) wird die Größe von Durchlaufbecken auf 40 m³/ha beschränkt. Der jährliche Feststoffeintrag in das Gewässer liegt dabei um ca. 100 kg FS / (ha·a). Um die Belastung nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) bei heute üblichen Becken von 12-30 m³/ha einzuhalten, sollte bei einem spezifischen Volumen bis 12 m³/ha das gesamte Mischwasser behandelt werden; ab einem Volumen von 15 m³/h kann aus den wirtschaftlichen Gründen die Dosierung erst ab einem festgelegten Beckenfüllstand erfolgen. Falls besondere Anforderungen an die Gewässerqualität gestellt werden, läßt sich die direkte Gewässerbelastung nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) durch eine frühere Chemikalienzugabe verringern.

Zusammenfassend lassen diese Untersuchungen darauf schließen, daß das Sedimentationspotential von Durchlaufbecken wesentlich erhöht werden kann. Der Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mit den Daten von SCHÄFER et. al. (1997) zeigt auf, daß durch die Fällung und Flockung inkl. Lamellen die Sedimentationwirkung um das 4-fache verbessert werden kann. Es ist auch möglich,

aus dem Regenabfluß gelöste Stoffe, Phosphate und kleine Feststoffpartikel zu entnehmen, die aufgrund größerer Oberfläche Schadstoffe, insbesondere Schwermetalle, sorbieren. Die ungünstigen Einflüsse von Mischwassereinleitungen auf die Biosphäre können weitgehend verringert werden.

Durch die Fällung und Flockung und Abscheidung der gebildeten Partikel mit Lamellen läßt sich bei heute aktueller maximaler Flächenbeschickung von 10 m/h ein ähnlicher bzw. besserer Feststoffrückhalt erzielen als ohne Lamellen bei halber hydraulischer Beschickung.

Dadurch ergeben sich zwei Anwendungsmöglichkeiten:

- I. bei gleichbleibender hydraulischer Belastung die direkte Gewässerbelastung zu vermindern
- II. unter Beibehaltung der direkten Gewässerbelastung neue Einzugsgebiete an das vorhandene Becken anzuschließen

Die Flockungstechnologie ermöglicht, das erforderliche spezifische Speichervolumen herabzusetzen, ohne die Gewässerbelastung nach ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992) zu erhöhen. Dies ist insbesondere für Einzugsgebiete wichtig, bei denen nicht ausreichend Platz zur Verfügung steht.

In kleinen Gebieten zeigt sich die Flockungstechnologie im Vergleich zur konventionellen Reinigung wirtschaftlich vorteilhafter. Bei den Gebieten mit A_{red} ab etwa 50 ha ist es jedoch wirtschaftlicher, die konventionelle Regenwasserbehandlung mit einer Beckengröße von 40 m³/ha durchzuführen, um eine direkte Gewässerbelastung von 100 kg FS/(ha·a) zu erzielen. Die Anwendung neuer Technologie in solchen Gebieten ist nur dann sinnvoll, wenn besondere Anforderungen an die Gewässerqualität gestellt werden. Diese Kostenbetrachtungen beziehen sich auf neue Anlagen. Falls bestehende Anlagen aufgrund des Anschlusses neuer Flächen bzw. höherer Anforderung an die Wasserqualität erweitert werden müssen, ist es wahrscheinlich in den meisten Fällen billiger, bestehende Becken mit Fällung und Flockung inkl. Lamellen zu ergänzen, als weitere Becken zu bauen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich

- bei der Fa. Sachtleben für die Bereitstellung der Flockungschemikalien für die Untersuchungen,
- bei der Fa. Philipp Müller und Fa. Munters Euroform GmbH für die Bereitstellung der Lamellenabscheider sowie für Informationen, die uns bei den Wirtschaftlichkeitsanalysen sowie bei der Anpassung des Verfahrens an den realen Betrieb sehr nützlich waren,
- beim Personal des Klärwerkes Stuttgart-Büsnau für die freundliche und engagierte Mithilfe bei der Beseitigung der bei der Durchführung der Untersuchungen aufgetretenen Betriebsprobleme.

Prof. Dr.-Ing. Karlheinz Krauth

Dipl.-Ing. Olga Bondareva

Literaturverzeichnis

ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1977): Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungen in Mischwasserkanälen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., St. Augustin

ATV-ARBEITSBLATT A 128 (1992): Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., St. Augustin

BERNHARDT, H., H. SCHELL (1979): Die verfahrenstechnische Konzeption der Phosphor-Eliminierung am Wahnbach mit Hilfe der Flockenfiltration. – Z. Wasser Abwasser Forsch.. **12**, 123-133.

BORCHARDT, D. (1999): Niederschlagsbedingte Gewässerbelastungen: Wie können Probleme identifiziert und Maßnahmen beurteilt werden, S. 175 – 192. – In: FUCHS S., H. H. HAHN, Schadstoffe im Regenabfluß IV, Oldenbourg, München

Präsentation eines

BROMBACH, H., S. MICHELBACH, C. MÜLLER (1990): Sedimentierbare Stoffe in einem Mischwasserkanal – Messung, Menge und Zusammensetzung, S. 147-176. – Präsentation eines BMFT-Verbundprojektes, Bd. **58**, Karlsruhe.

BROMBACH, H., MICHELBACH, S. UND C. WÖHRLE (1992): Sedimentations- und Remobilisierungsvorgänge im Abwasserkanal. – Schlußbericht des Teilprojektes 3 im BMFT-Verbundprojekt NIEDERSCHLAG, Eigenverlag Umwelt- und Fluid-Technik GmbH, Bad Mergentheim.

BROMBACH, H., MICHELBACH, S. UND C. WÖHRLE (1993): Feststoffe in der Mischwasserkanalisation - Sedimentation und Remobilisierung. – Korrespondenz Abwasser, **40**, 1910-1926.

BROMBACH, H., S. MICHELBACH (1997): Entlastungstätigkeit und Rückhaltewirkung von Schmutzfrachten an Regenüberlaufbecken im Untersuchungsgebiet „Alb“, S. 131 – 160. – In: SCHMITT, T. G., Stoffströme in der Urbanhydrologie, Bd. II, Oldenbourg, München

BROMBACH, H., C. WÖHRLE (1997): Entlastungsaktivität von Regenüberlaufbecken, Messungen, Auswertungen und Bewertung, S. 103 – 130. – In: SCHMITT, T. G., Stoffströme in der Urbanhydrologie, Bd. II, Oldenbourg, München

BRUNS, J. (1999): Dynamische Koppelung von Regenwasserbehandlung und Abwasserreinigung bei Mischwasserzufluß, Kommissionsverlag R. Oldenbourg, GmbH, München

DVGW-Merkblatt W 217 (1987): Flockung in der Wasseraufbereitung, Teil 1: Grundlagen, DVGW-Verlag, Eschborn

DOHMANN, M., F. Schweer, M. Weyand (1994): Dezentrale Mischwasserbehandlung – Fällung/Flockung/Filtration. - Schlußbericht zum Forschungsvorhaben des Bundesministers für Forschung und Technologie, Aktenzeichen 02 WA 9007/8, Aachen.

DOHMANN, M., K. H. PECHER (1995): Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Staumkanälen mit unten liegender Entlastung. - Schlußbericht zum Untersuchungsvorhaben des Ministers für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Teilprojekt I, Aktenzeichen IV B 6 – 041 085, Aachen.

FELDMANN, K. (1994): Kostenaspekte im kommunalen Abwasserbereich. - ATV-Kurse zur Abwasser- und Abfalltechnik. H/1-Abwasserableitung, Entwässerungskonzepte, S. 131 – 160.

GEIGER, W. F. (1990): New drain – new dimensions in urban storm drainage. – Proceedings 5th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, **1**, 33-47.

GUPTA, M.K., D. G. MASON, M. J. CLARK, T. L. MEINHOLZ, C.A. HANSEN, A. GEINOPOLOS (1977): Screening/Flotation Treatment of Combined Sewer Overflows. – Bench Scale and Pilot Plant Investigations, Vol. I, EPA-Report 600/2-77-069a

HAHN, H. H. (1987): Wassertechnologie – Fällung, Flockung, Separation, Springer Verlag, Berlin.

HARREMOËS, P., N.B. JOHANSEN (1986): Seeverschmutzung durch Nährstoffe aus der Regenentlastung. – Korrespondenz Abwasser, **33**, 196-203.

HAZEN, A. (1904): On Sedimentation. – Transactions, American Society of Civil Engineers, **53**, 45-88.

HEINZMANN, B. (1993): Beschaffenheit und weitergehende Aufbereitung von städtischen Regenabflüssen. – Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 15, Nr. 113, VDI Verlag, Düsseldorf.

HÜBNER, M. (1997): Beurteilung und Ermittlung der Wirkungsweise von Anlagen zur Regenwasserbehandlung. – Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieur, Universität - Gesamthochschule Essen.

JEKEL, M. (1985): Die Flockung in der Wasseraufbereitung: Einführung und Überblick. – DVGW-Schriftenreihe Wasser, **42**, 9 – 18.

KARI, F. G., R. HERRMANN (1989): Abspülung von organischen Spurenschadstoffen und Schwermetallen aus einem städtischen Einzugsgebiet: Ganglinien, Korngrößenzuordnung und Metallspeziesauftrennung. – Deutsche gewässerkundliche Mitteilungen, **33**, 5/6

KLUTE, R. zitiert bei KARGIOS (1982): Über die Einsatzmöglichkeiten von Eisen (III)- und Aluminiumsalzen in Kombination mit Flockungshilfsmitteln zur Entfärbung reaktivfarbstoffhaltiger Lösungen. – Diplomarbeit, Fachhochschule Reutlingen.

KRAUTH, Kh. (1970): Der Abfluß und die Verschmutzung des Abflusses in Mischkanalisationen bei Regen. – Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, **45**, Oldenbourg, München.

KRAUTH, Kh. (1984): Erläuterung zum ATV-Arbeitsbericht A 128. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 1.3.2 „Regenüberläufe, Regenbecken - Korrespondenz Abwasser, **31**, 545-547.

KRAUTH, Kh., G. STOTZ (1985): Minimierung des Schmutzstoffeintrags aus Siedlungsgebieten in Vorfluter. - Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 624/3-2, Deutsche Forschungsgemeinschaft

Levy, R. L., R. L. White, T. G. Shea (1972): Treatment of Combined and Raw Sewages with the Dissolved Air Flotation Process.- Water Research, **6**, S. 1487-1500.

MEINHOLZ, T. L., D. A. GRUBER, R. A. RACE, C. A. HANSEN, J. H. MOSER, M. J. CLARK (1979): Screening/Flotation Treatment of Combined Sewer Overflows. – Full-Scale Operation, Rasine, Wisconsin, Vol. II, EPA-Report 600/2-77-106a

MILOJEVIĆ, N. (1996): Aufwand für den Bau und Betrieb der Kanalisation, S. 635-641. – In: ATV-Handbuch, Bau und Betrieb der Kanalisation, 4. Aufl., Ernst & Sohn, Berlin

N.N. (1994): Das ACTIFLO-Verfahren. – OTV-Messeprospekt IFAT 1996

NETSCHAEW, A. P. (1990): Загрязненность поверхностного стока и его влияние на состояние водных объектов, С. 121-137. – В: Дикаревский и др., Отведение и очистка поверхностных сточных вод, Стройиздат, Ленинград

PECHER, R. (1987): Gutachten zur Ermittlung der jährlichen Entlastungsdaten und der jährlich entlasteten Schmutzfrachten aus Mischwasserkanalnetzen im Lande Nordrhein-Westfalen. – Erkrath, unveröffentlicht.

PECHER, K. H. (1996): Kosten der Regenwasserbehandlung und -ableitung. – ATV-Seminar am 14. und 15. Februar 1996, BITZ Bremer.

PECHER, K. H. (1997): Optimierung des Stoffrückhalts in Stauraumkanälen, Schriftenreihe Gewässerschutz – Wasser – Abwasser **161**, Aachen.

PFEIFER, R., H. H. HAHN (1995): Regenwasserbehandlung in Trennsystem – Leistungssteigerung durch chemische Flockung, S. 483-517. – Präsentation eines BMFT-Verbundprojektes, Bd. **73**, München

PFISTER, S., A. OHSE, J. WINTER (1997): Weitergehende Mischwasserbehandlung durch Fentons Reagenz. – Korrespondenz Abwasser, **1**, 67-79.

SCHADE, H., A. SAPULAK (1984): Parallelplattenabscheider (Tilted Plate Settler). Systeme, Berechnungen, Einsatzbedingungen und Anwendungsgrenze in der Abwassertechnik. – Korrespondenz Abwasser, **31**, 104-111.

SCHÄFER, M., H. H. HAHN, C. XANTHOPOULOS (1997): Entlastungstätigkeit und Schmutzstoffrückhalt von Regenüberlaufbecken im Einzugsgebiet der Alb – am Beispiel ausgewählter Mikroschadstoffe, S. 161 – 176 – In: SCHMITT, T. G., Stoffströme in der Urbanhydrologie, Bd. II, Oldenbourg, München

SCHÄFER, M., H. H. HAHN, C. XANTHOPOULOS, H. BROMBACH (1997): Folgerungen für die Planung von Regenwasserbehandlungsanlagen, S. 177 – 181. – In: SCHMITT, T. G., Stoffströme in der Urbanhydrologie, Bd. II, Oldenbourg, München

SEYFRID, C. F., D. THÖRLE (1999): Gemeinsame Betrachtung von Kanalnetz und Kläranlage zur Minimierung der Gesamtemissionen, S. 1 – 166. – In: SEYFRIED, C. F., Stoffströme in der Urbanhydrologie, Bd. III, Oldenbourg, München

VAN OLPHEN, H. (1963): Clay Colloid Chemistry. – Interscience Publishers, New York

VERBANCK, M. (1989): Sewer sediment and its relation with the quality characteristics of combined sewer flows. – In: 2nd Wageningen Conference: Urban storm water quality and ecological effects upon receiving waters.

WEYAND, M., H. ILCHMANN (1992): Einsatz des Fällungsverfahrens zur Reduzierung der in ein Gewässer eingetragenen Mischwasserentlastungsfracht. – Korrespondenz Abwasser, **9**, 1370 – 1375.

Anlagen

Anlage 1: Bemessung des Drosselabflusses der halbtechnischen Versuchsanlage

Vorhandenes Beckenvolumen V	m^3	5,58
Bei spez. Volumen V_s	m^3/ha	12
Befestigte Fläche A_{red}	ha	0,465
Einwohnerdichte bzgl. A_{red}	E/ha	100
Einwohner	E	46
Wasserverbrauch w_s	$\text{l}/(\text{s} \cdot \text{E})$	0,003
Schmutzwasserabfluß im Tagesmittel $Q_{s,24}$	l/s	0,14
Tagesstundenmittel x	h	10
Tagesstundenmittel des Schmutzwasserabflusses Q_{sx}	l/s	0,33
Fremdwasserspense q_f	$\text{l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$	0,15
Fremdwasserabfluß Q_f	l/s	0,07
Drosselabfluß $O_{\text{Drossel}} = 2 \cdot Q_{sx} + Q_f$	l/s	0,73

Anlage 2: Halbtechnische Versuchsanlage auf dem Gelände des KW Stuttgart-Büsnau



Versuchsbecken zur Untersuchung von Fällung und Flockung des Mischwassers



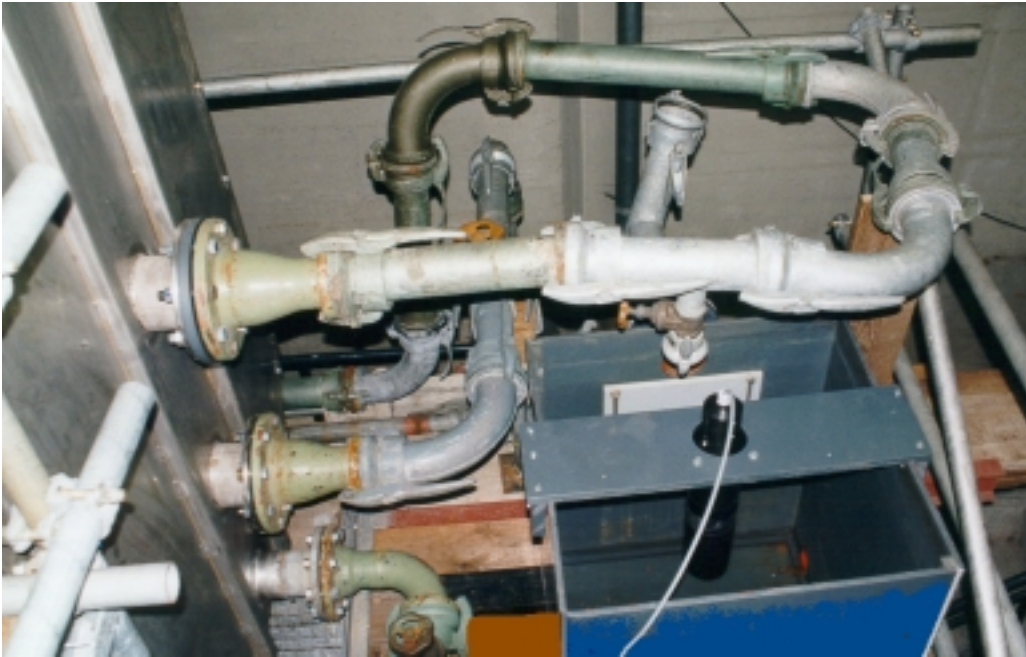
Blick auf das Versuchsbecken von oben



Auslauf des Rohrflockers in das Becken



Ablaufrinne (Klärüberlauf) am Ende des Beckens



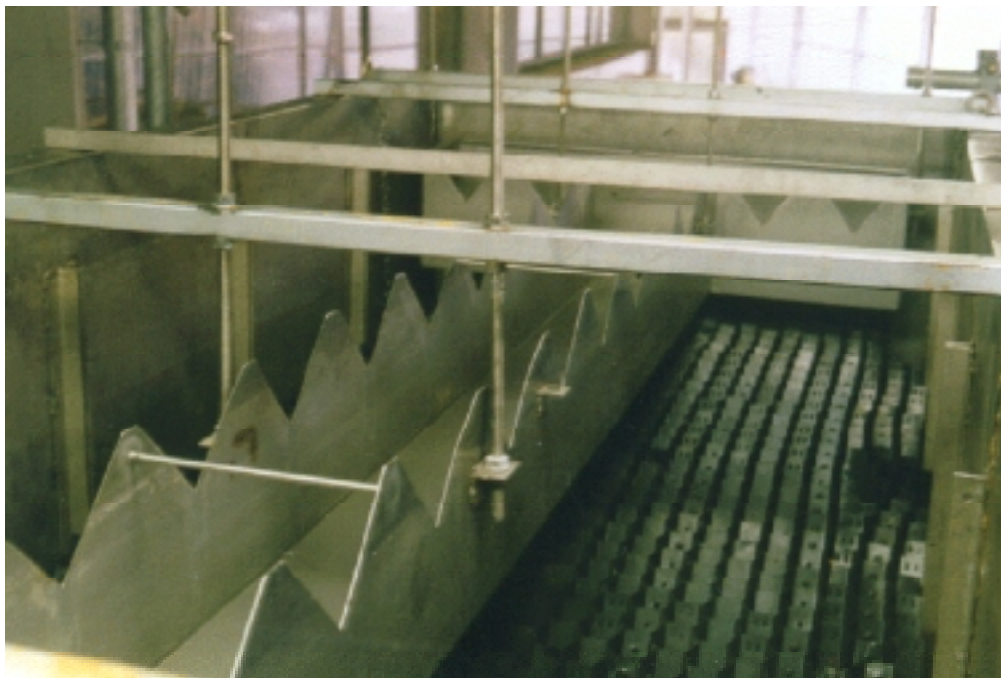
Vorlagebehälter mit UV-Prozeß-Sonde der Fa. Dr. Lange



Meßgerät der UV-Prozeß-Sonde
mit Schreiber



Versuchspumpe und Probennehmer bei Durchführung der Versuche mit direkter Entnahme des Mischwassers



Blick von oben auf das mit Lamellen sowie neuer Ablaufrinne nachgerüstete Versuchsbecken

Anlage 3: Ermittlung der spezifischen einwohnerbezogenen Kosten zur Regenwasserbehandlung beim Mischsystem

Becken- größe V_s	Einzugs- gebiet A_{red}	Becken- volumen V_{ges}	Einwohner- dichte	Einwohnerbez. Kosten		Bemerkungen
				konventionell	Fällung/ Flockung inkl. Lamellen	
m^3/ha	ha	m^3	E/ha	DM/(E·a)	DM/(E·a)	
12	10	120	60	69	112	
	50	--	--	--	--	in der Praxis wird i. R. nicht gebaut
	100	--	--	--	--	
15	10	150	60	77	121	
	50	750	80	30	55	
	100	--	--	--	--	in der Praxis wird i. R. nicht gebaut
20	10	--	--	--	--	
	50	1000	80	35	59	
	100	2000	100	20	38	
25	10	--	--	--	--	i.R. nicht gebaut
	50	1250	80	39	59	
	100	2500	100	22	37	
30	10	--	--	--	--	i.R. nicht gebaut
	50	1500	80	44	63	
	100	3000	100	24	38	
40	10	(400)	60	(139)	--	i.R. nicht gebaut
	50	2000	80	48	--	
	100	4000	100	29	--	