

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

# Technische Filterung von Oberflächenabflüssen aus Siedlungsgebieten

## Pilotanlage Bad Mergentheim „Im Abelt“

von

Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Brombach und Dr.-Ing. Gebhard Weiß

UFT Umwelt- und Fluid-Technik Dr. H. Brombach GmbH  
Steinstr. 7, 97980 Bad Mergentheim

Förderkennzeichen: **BWT 24007**

Die Arbeiten des Programms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ werden mit Mitteln  
des Landes Baden-Württemberg gefördert

November 2007

Inhalt	Seite
<b>1 Einleitung und Aufgabenstellung</b> .....	<b>4</b>
1.1 Verschmutzung von Regenabflüssen von der Oberfläche.....	4
1.2 Die Forderung nach Regenwasserbehandlung im Trennsystem.....	6
1.3 Konventionelle Verfahren und Bauwerke zur Regenwasserbehandlung im Trennsystem.....	7
1.4 Bisherige Anwendungen von Filtrationstechniken zur Abwasserbehandlung.....	11
1.5 Filtration von Oberflächenwasser im Trennsystem.....	12
1.6 Ziel der vorliegenden Studie: Anwendung der mechanischen Filtration zur Regenwasser- behandlung.....	12
<b>2 Das Versuchsbecken Bad Mergentheim RKB „Im Abelt“</b> .....	<b>13</b>
2.1 Bauart und Funktion des vorhandenen Regenklärbeckens.....	13
2.2 Das Einzugsgebiet.....	18
<b>3 Versuchsanlage zur technischen Filtration von Oberflächenwasser</b> .....	<b>20</b>
3.1 Vorüberlegungen zur Konzeption.....	20
3.1.1 Einige Grundlagen zur Filtrationstechnik.....	20
3.1.2 Theoretische Überlegungen zur Filtration.....	21
3.1.2.1 Kuchenfiltration; generelle Filtrierbarkeit der hier anzutreffenden Suspension.....	21
3.1.2.2 Beschreibung des Schichtdickenwachstums.....	23
3.1.2.3 Abreinigungsintervall und erreichbarer Durchsatz.....	24
3.1.3 Bauformen von Filteranlagen.....	25
3.1.4 Anforderungen an die zu konzipierende Versuchsanlage.....	27
3.1.4.1 Korngröße des Filtergutes.....	27
3.1.4.2 Erforderlicher Filterdurchsatz und erste Gedanken zu einem Bemessungsverfahren.....	30
3.1.4.3 Filterfläche und Druckbeschickung.....	33
3.1.4.4 Wohin mit dem Filtergut?.....	33
3.1.4.5 Handhabbarkeit und Robustheit.....	34
3.1.5 Gewählte Konzeption der Filteranlage.....	34
3.2 Laborexperimente mit Filtergeweben.....	36
3.2.1 Untersuchte Arten von Filtergeweben.....	36
3.2.2 Versuche zur Ermittlung der Durchlässigkeit.....	37
3.3 Konstruktion der Versuchs-Filteranlage.....	39
<b>4 Pilotbetrieb der Filteranlage am Regenklärbecken „Im Abelt“: Betriebserfahrungen und Ergebnisse</b> .....	<b>43</b>
4.1 Eingebautes Filtergewebe.....	43
4.2 Abflüsse und Volumina.....	43
4.3 Generelle Betriebserfahrungen mit der Maschinenteknik, Betriebsaufwand.....	49
4.4 Probenahme und Auswertung.....	51
4.4.1 Abfiltrierbare Stoffe im Zulauf und Ablauf der Filteranlage.....	53
4.4.2 Schwermetallanalysen.....	57

4.5	Diskussion der experimentellen Befunde zum Schmutzrückhalt .....	58
<b>5</b>	<b>Erkenntnisse für die künftige Anwendung der mechanischen Filtration zur Regenwasserbehandlung im Trennsystem.....</b>	<b>60</b>
5.1	Gute Wirkung eines Regenklärbeckens zum Schmutzrückhalt .....	60
5.2	Zum erforderlichen Grenzkorndurchmesser zur weitergehenden Reinigung von Regenwasser aus einem RKB.....	61
5.3	Erfahrungen für die technische Konzeption einer Filteranlage .....	61
5.4	Zur Bemessung einer Filteranlage .....	62
<b>6</b>	<b>Ausblick und weiterer Forschungsbedarf .....</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>66</b>

## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Klassische Entwässerungssysteme sind das Mischsystem, bei dem Schmutz- und Regenwasser in einem einzigen Kanal gesammelt werden, und das Trennsystem, bei dem es je einen separaten Schmutz- und Regenwasserkanal gibt. Ersteres wird traditionell vor allem im Süden Deutschlands, letzteres im Osten und Norden angewandt, vgl. Brombach (2006). Im Zuge der Diskussionen über Nachhaltigkeit werden in den letzten Jahren jedoch zunehmend alternative und modifizierte Entwässerungssysteme favorisiert, bei denen die getrennte Ableitung und eine ortsnahe Entsorgung des Regenwassers durch Versickerung oder aber gedrosseltes Einleiten in ein Gewässer im Vordergrund stehen. Gemeinhin gilt das Regenwasser als „sauber“, weil es – anders als im Mischsystem – keine Gelegenheit hatte, sich mit Schmutzwasser zu mischen.

### 1.1 Verschmutzung von Regenabflüssen von der Oberfläche

Die Verschmutzung von Regenabflüssen von der Oberfläche wird allerdings oft unterschätzt. Oberflächenwasser wird in vielen Trennsystemen, ob klassisch oder modifiziert, zumeist ohne jede Behandlung in das Gewässer geleitet. Erst in den letzten Jahren wurde eine Behandlung für Oberflächenwasser häufiger gefordert, vielleicht auch durch das DWA-Merkblatt ATV-DVWK-M 153 (2000) unterstützt, in dem die Verschmutzung je nach Herkunftsfläche quantifiziert wird.



Bild 1: Der Zulauf zum RKB Abelt ist Oberflächenwasser aus einem Trennsystem. Er macht optisch einen verschmutzten Eindruck. Im Herbst kommt Laub, im Frühjahr Blütenstaub hinzu. Fehlanlüsse von Schmutzwasser an den Regenwasserkanal, optisch kenntlich an Toilettenpapier oder Hygieneartikeln, konnten hier nicht nachgewiesen werden.

Es gibt Daten zahlreicher Messprogramme über die Qualität von Oberflächenabfluss, siehe z.B. Brombach und Fuchs (2003). Eine vergleichende Frachtbilanz für das klassische Misch- und Trennsystem auf der Basis dieser Daten (Weiß und Brombach 2004) zeigt, dass das Trennsystem keineswegs für alle Schmutzparameter

dem Mischsystem überlegen ist. Regenauslässe des Trennsystems emittieren insbesondere viel Schlamm und vergleichsweise hohe Schwermetallfrachten.

Der **Schlamm**, parametrisiert durch die abfiltrierbaren Stoffe AFS, wirkt zunächst selbst als wesentlicher Schadstoff im Gewässer, weil er Kiemen und Filterapparate von Fischen bzw. Insekten beeinträchtigt und Sedimentsohlen und Substrate bodenbewohnender Organismen verschlammt, vgl. ATV (1997a). Auch in neueren emissionsbezogenen Ansätzen zur Regenwasserbehandlung ist der Schlamm eine wesentliche Kenngröße, vgl. BWK M3 (2001) oder VSA (2007).

In Bild 2 ist der Verteilung der abfiltrierbaren Stoffe, AFS, aus insgesamt 178 Studien weltweit gezeigt. Der Medianwert, der ebenso oft über- wie unterschritten wird, liegt bei 141 mg/l.

Ein beträchtlicher Teil der **Schwermetalle** ist an Feinsedimente adsorbiert, während davon nur wenig in gelöster Form vorliegt. Bild 3 zeigt als Beispiel Gesamtkonzentrationen von Kupfer im Regenabfluss des Trennsystems. Hier liegt der Median bei 48 µg/l, während der Grenzwert für eine Einleitung in ein Gewässer nach AbwAG (2001) bei 100 µg/l liegt. An der Graphik kann man sehen, dass dieser Grenzwert in etwa 30 % aller Fälle überschritten ist.

Für Mischwasser zeigten Michelbach et al. (1992), dass der größte Teil der Schwermetalle nicht an die ganz feinen und schwer absetzbaren Fraktionen gebunden sind, sondern eher an Fraktionen mittlerer Sinkgeschwindigkeit von ca.  $v_s = 0,4$  cm/s, was etwa Feinsand entspricht (ca.  $d = 0,08$  mm = 80 µm). Eine ältere Studie aus den USA, EPA (1972), zeigt dies auch für die Schwermetalle im Regenabfluss.

Abfiltrierbare Stoffe im Regenwasserkanal der Trennkanalisation, Welt

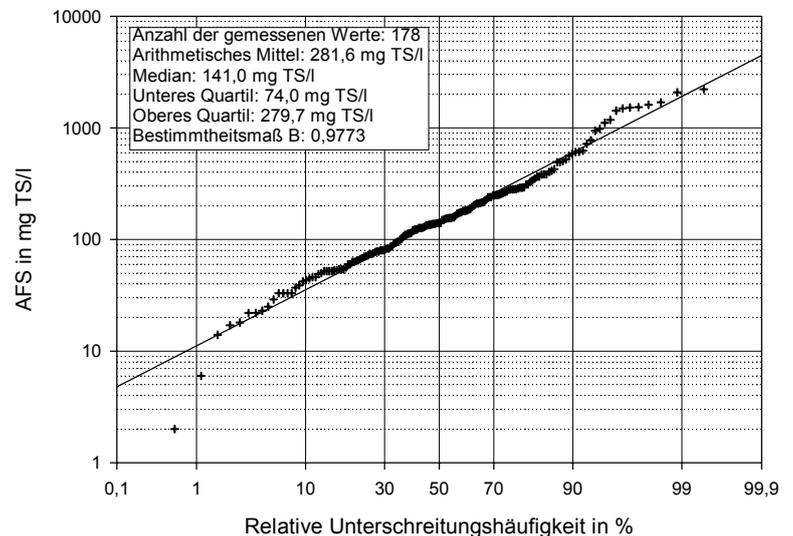


Bild 2: Abfiltrierbare Stoffe im Regenwasserkanal der Trennkanalisation (aus Brombach und Fuchs (2002))

Kupfer im Regenwasserkanal der Trennkanalisation, Welt

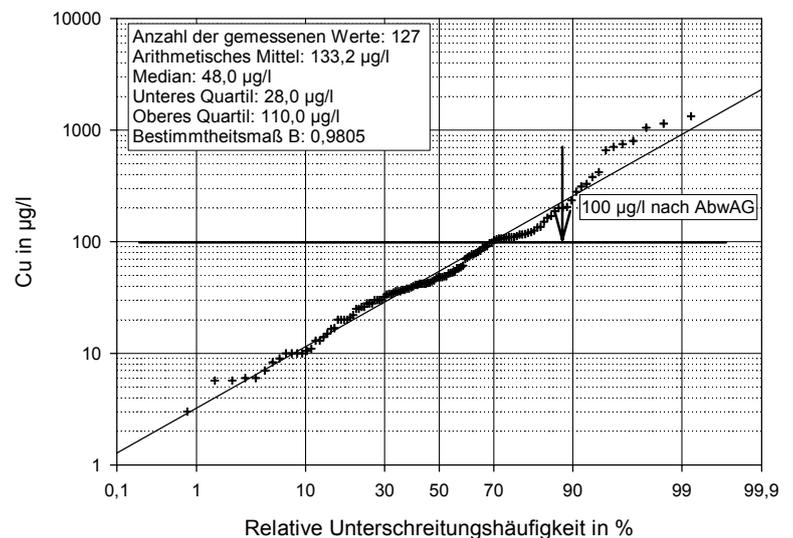


Bild 3: Kupfer im Regenwasserkanal der Trennkanalisation (aus Brombach und Fuchs (2002))

Fuchs und Lambert (2006) berichten hingegen von zwei Trenngebieten in Berlin, wo wiederum beträchtliche Anteile der Belastung an Zink (63 % bzw. 88 %) an die Ton- und Schlufffraktion gebunden waren. Durch Entfernen des Sedimentes aus dem Regenwasser ließe sich also auch ein Großteil der Schwermetalle zurückhalten.

## 1.2 Die Forderung nach Regenwasserbehandlung im Trennsystem

Bis vor einigen Jahren war es noch Usus (und eine wichtige Argumentation für das Trennsystem), Regenwasserkanäle ohne eine Behandlung direkt ins Gewässer zu führen. Hier gibt es seit einiger Zeit eine markante Trendwende. Bei empfindlichen Gewässern ergibt sich nach dem bereits erwähnten DWA-Merkblatt ATV-DVWK-M 153 (2000) die Forderung nach einer Behandlung des Regenwassers im Trennsystem, und zwar umso mehr, je höher das Verschmutzungspotential der Herkunftsfläche ist. In Baden-Württemberg greift neuerdings die Broschüre LfU (2005a) denselben Gedanken auf. Das Merkblatt BWK M3 (2001) stellt die Belastbarkeit des Gewässers in den Vordergrund; auch hier werden Behandlungsmaßnahmen für Regenwassereinleitungen genannt, so etwa Retentionsbodenfilter. In Nordrhein-Westfalen gibt es seit Kurzem einen sogenannten „Trennerlass“ (MUNLV 2004), der relativ stringente Kriterien für eine Regenwasserbehandlung bei im Trennsystem entwässerten Flächen enthält (RKB, Bodenfilter). Der Straßenbau hat in Deutschland traditionellerweise eigene Richtlinien. RiStWag (2002) zeigt z.B. für Anlagen in Wasserschutzgebieten gleichfalls Beispiele zur Regenwasserbehandlung, etwa ein Regenklärbecken. In der Schweiz wurde vor einigen Jahren die Broschüre VSA (2002) veröffentlicht, die gleichfalls den Gedanken verfolgt, Regenwasser aus Trennsystemen vor Einleitung in empfindliche Gewässer, speziell auch vor einer Versickerung, durch Vorreinigung zu behandeln. Es ist also auch für viele Trennsysteme eine Regenwasserbehandlung als Stand der Technik oder sogar als allgemein anerkannte Regel der Technik zu sehen.

Die Regenwasserbehandlung verfolgt grundsätzlich zwei Ziele: Zum einen einen möglichst weit gehenden Frachtrückhalt zur Vermeidung kumulativer, über längere Zeit wirksamer Belastungen. Zum anderen möchte man aber auch den Abfluss vergleichmäßigen, also mit Speichervolumen die Abflussspitzen dämpfen. Dadurch kann der hydraulische Stress im Gewässer und auch die Abweichung vom natürlichen Wasserhaushalt gering gehalten werden. Letzterer Fragenkomplex soll hier jedoch ausgespart werden: Im Rahmen des vorliegenden

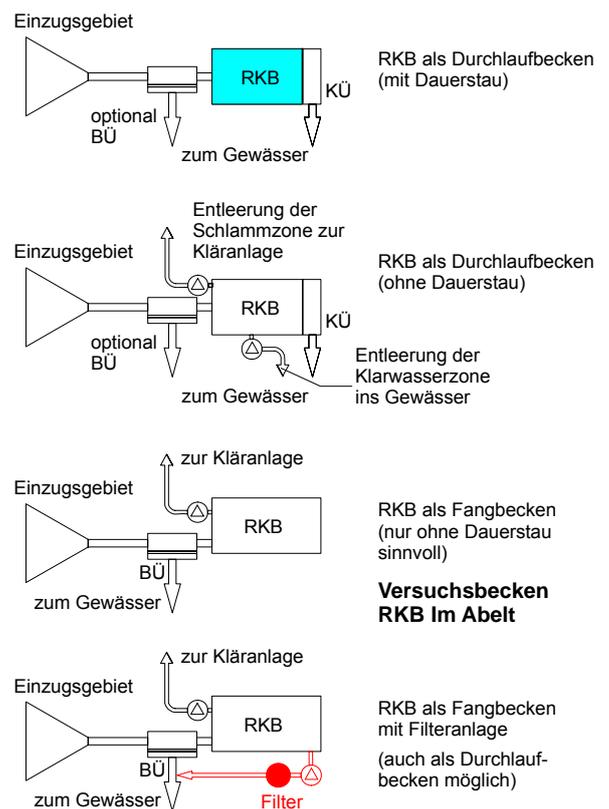


Bild 4: Betriebsweisen für Regenklärbecken

Forschungsprojektes soll ausschließlich ein neues Verfahren zum Frachtrückhalt untersucht werden, mit dem kleine Abflüsse kontinuierlich gereinigt werden. Die bisher für diese Aufgabe herangezogenen Konzepte, Verfahren und Bauwerke werden im nächsten Kapitel eingehender erörtert.

### 1.3 Konventionelle Verfahren und Bauwerke zur Regenwasserbehandlung im Trennsystem

Die einfachste Methode, Regenabflüsse zu behandeln, ist durch Sedimentation des Schlammes in **Regenklärbecken (RKB)**. Gleichzeitig können dabei auch Leichtflüssigkeiten (Öl) und andere Schwimmstoffe gefangen werden. Regenklärbecken gibt es mit oder ohne Dauerstau (Bild 4 oben). Bei Regen passiert das Wasser das Becken über den Klärüberlauf (KÜ). Bei Starkregen springt ein vorgeschalteter Beckenüberlauf (BÜ) an, der ein Aufwirbeln des bereits abgesetzten Schlammes verhindert.

**RKB mit Dauerstau** (Abkürzung nach ATV-DVWK-A 166 (1999): RKBmD) haben den Vorteil, dass auch bei kleinen Zuflüssen ein Sedimentationseffekt wirksam ist. Auch in RiStWag (2002) ist ein solches Regenklärbecken gezeigt. Die Sedimente bleiben im Dauerstau jedoch sehr lange liegen. Es gibt viele solche Becken an Autobahnen (meist als kombinierte Regenklär- und -rückhaltebecken). Diese werden nur einmal jährlich oder noch seltener gereinigt. Nachteilig ist, dass sich durch pH-Wert-Verschiebungen des Wassers aus dem Schlamm Schwermetalle rüchlösen können.

**RKB ohne Dauerstau** (RKBoD) werden nach Regenende entleert. Man lässt dazu das Wasser einige Zeit abstehen und pumpt dann die Klarwasserzone in das Gewässer und den Schlamm auf ein Trockenbeet, oder man entleert den gesamten Beckeninhalt zur Kläranlage. Seltener wird der Schlamm im Becken belassen.

Selten gibt es **Regenklärbecken als Fangbecken**, um einem besonders stark verschmutzten Spülstoß aus dem Einzugsgebiet zu Beginn eines Regens abzufangen (Bild 4 unten). Das ist natürlich nur ohne Dauerstau sinnvoll. Der Beckeninhalt kann hier gleichfalls zur Kläranlage oder aber – wiederum nach Absetzen der Sedimente – in das Gewässer geleitet werden.

Die **Bemessung von Regenklärbecken**, die als Durchlaufbecken wirken, ist mit geringen Abweichungen in mehreren der genannten länderspezifischen Richtlinien (z.B. in Baden-Württemberg LfU (2005a), in Nordrhein-Westfalen MUNLV (2004)) und auch im DWA-Regelwerk beschrieben (ATV-A 166 1999). Wichtige Kenngröße bei Rechteckbecken ist die Oberflächenbeschickung  $q_A = Q_{\text{krit}} / A$ , üblicherweise ausgedrückt in der Einheit m/h, wobei  $Q_{\text{krit}}$  ein noch zu definierender kritischer Zufluss und A die Grundfläche des Beckens ist. Die Oberflächenbeschickung darf je nach Beckentyp einen bestimmten Wert nicht überschreiten, in LfU (2005a) beispielsweise  $q_A \leq 10$  m/h für Regenklärbecken ohne und  $q_A \leq 7,5$  m/h für RKB mit Dauerstau.

Der kritische Zufluss  $Q_{\text{krit}}$  wird vielfach mit der auch in der Mischkanalisation zur Bemessung von Regenüberläufen verwendeten kritischen Regenspende von  $r_{\text{krit}} = 15$  l/(s·ha) berechnet, es ist also  $Q_{\text{krit}} = r_{\text{krit}} \cdot A_U$ , wobei  $A_U$  in ha die undurchlässige Fläche des Einzugsgebietes ist. In einigen Richtlinien wird allerdings  $r_{\text{krit}}$  abhängig vom gewünschten Feststoffrückhalt pauschal erhöht, in LfU (2005a) z.B. auf bis zu 60 l/(s·ha). Die Straßenbau-Richtlinie RiStWag (2002) hat hier besonders strenge Anforderungen: die zulässige Oberflächenbeschickung ist  $q_A \leq 9$  m/h, wobei diese hier aber mit einem 15-minütigen, einjährlichen Bemessungsregen zu berechnen ist, dessen Regenspende je nach Örtlichkeit bei etwa 140 l/(s·ha) liegt.

Weiterhin gibt es in den genannten Regelwerken auch einzuhaltende Angaben über ein Mindestvolumen, über die Proportionen des Beckens, über eine maximale Längsdurchströmungsgeschwindigkeit und eine maximale Wehrschwellenbelastung in l/(s·m). Dadurch sollen ein effektives Absetzen der Sedimente ermöglicht und Totwasserzonen im Becken vermieden werden.

Interessant ist, dass diese Vorgehensweise sich nur auf verhältnismäßig einfache konstruktive Vorgaben beschränkt. Anders als für Regenüberlaufbecken im Mischsystem ist die ins Gewässer abgegebene Schmutzfracht keine Zielgröße, sie taucht vielmehr in den Bemessungsverfahren nicht einmal auf. Offensichtlich ist die Kenntnis über den Zusammenhang zwischen der ins Gewässer abgegebenen Schmutzfracht und der Oberflächenbeschickung bzw. der Gestaltung der RKB derzeit noch unzureichend, um als Stand der Technik zu gelten.

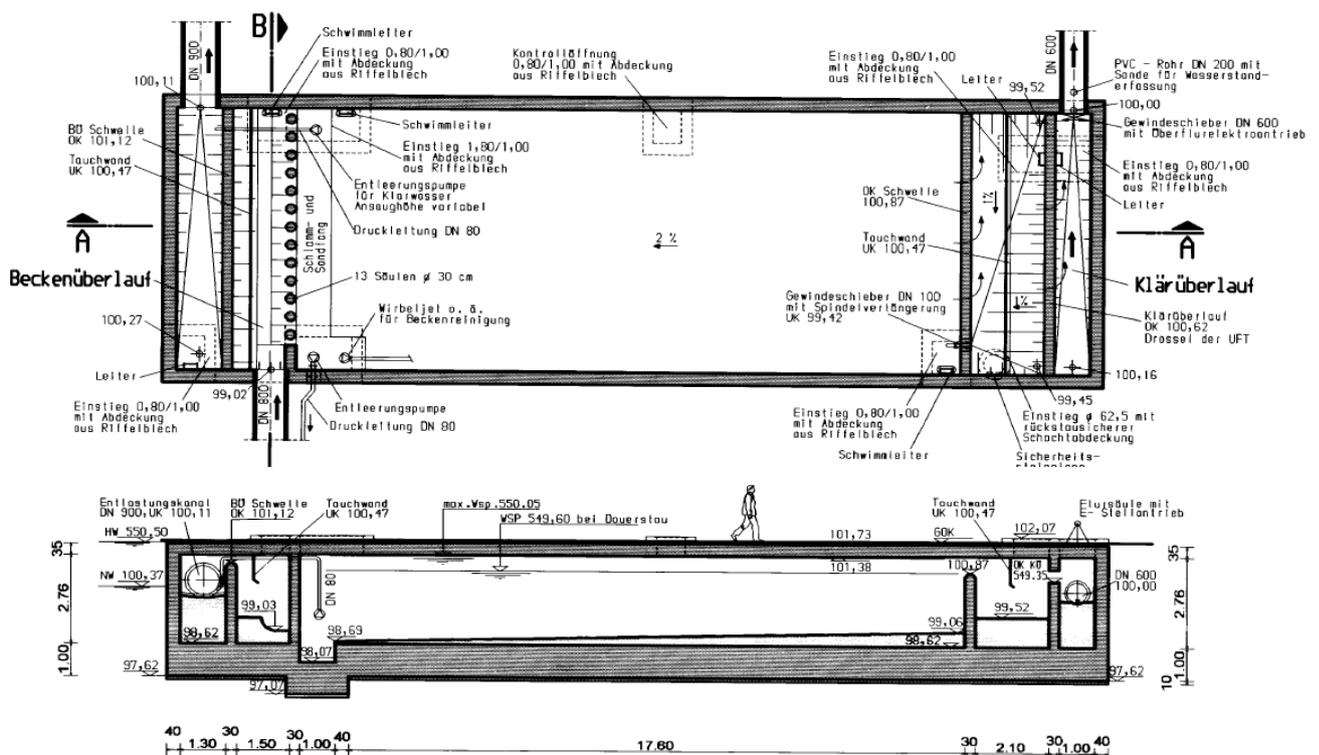


Bild 5: Gestaltungsvorschlag für ein Regenklärbecken mit teilweiser Entleerung in den Schmutzwasserkanal, nach LfU (2002)

Hintergrund der Bemühungen, auch im Trennsystem eine weitergehende Regenwasserbehandlung über eine bloße Anordnung von Regenklärbecken hinaus zu propagieren, ist der geringe Wirkungsgrad von Regenklärbecken, wie er z.B. in Brunner et al. (2002) bemängelt wird; die Autoren zitieren Ergebnisse von Pfeifer und Hahn (1995). Demnach waren die gemessenen Wirkungsgrade für AFS, CSB und Schwermetalle bei einem mit einer Oberflächenbeschickung von 10 m<sup>3</sup>/h bemessenen Regenklärbecken relativ gering, maximal in der Größenordnung von 40 %, bei den Schwermetallen noch schlechter. Das Becken Karlsruhe Grünwinkel hatte allerdings nur ein kleines spezifisches Volumen von 12 m<sup>3</sup>/ha. Ein größeres RKB in Berlin-Dianasee mit 55 m<sup>3</sup>/ha zeigte zwar bessere Wirkungsgrade. Auch bei Grüning und Hoppe (2007) werden höhere Wirkungs-

grade aus verschiedenen Untersuchungen zitiert. Dennoch wäre eine Technik zur Verbesserung des Schmutzrückhaltes an diesen Anlagen wünschenswert.

Eine erste, wichtige Entwicklung hierzu sind **Retentionsbodenfilter (RBF)**, die im Misch- wie auch im Trennsystem eingesetzt werden können und mittlerweile als Stand der Technik gelten können. Sie werden zurzeit als eine Art Universalmaßnahme bei besonders empfindlichen Gewässern verwendet und z.B. in M 153 (2000) oder Brunner et al. (2002) erwähnt bzw. empfohlen. RBF sind abgedichtete Becken mit einem schilfbewachsenen Sandsubstrat, in dem eine Drainage liegt. Das Wasser wird durch den Sandkörper gefiltert, außerdem tragen verschiedene chemische und biologische Prozesse zu einem Schadstoffabbau (Nährstoffelimination) bei. Hinzu kommt bei Regen die Retentionswirkung durch zeitweisen Einstau des relativ großflächigen Beckens. Voraussetzung ist eine vorgeschaltete Regenwasserbehandlung durch ein RKB, um die eingetragene Schlammfracht zu begrenzen und einer zu frühen Verlegung (Kolmation) des Bodenfilters vorzubeugen.

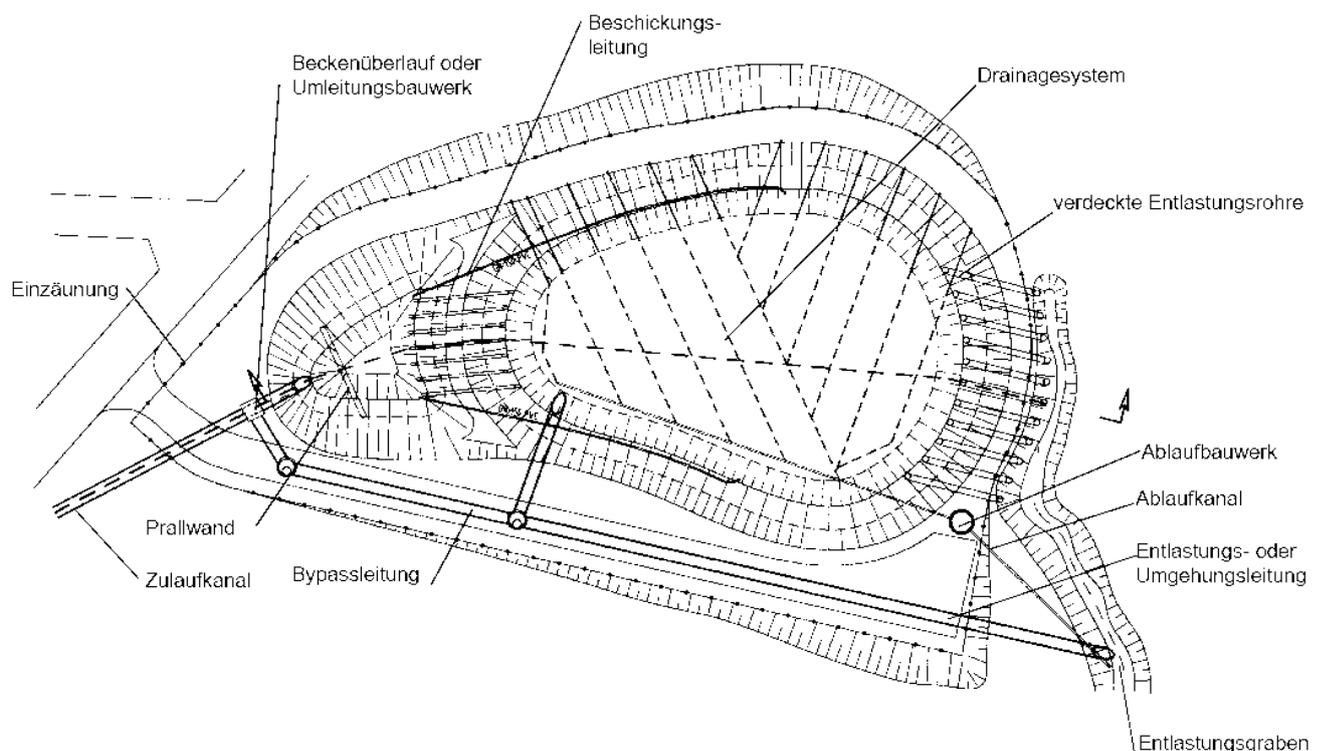


Bild 6: Gestaltungsvorschlag für eine Retentionsbodenfilteranlage im Trennsystem nach LfU (2002). Das zur Vorbehandlung notwendige Regenklärbecken ist hier als offene Vorkammer in das Bauwerk integriert, die Überläufe sind als Entlastungsrohre ausgeführt.

Konstruktiv ist eine Reihe von Vorgaben zu beachten, so etwa für das Filtersubstrat, wo nach anfänglichen Versuchen mit bindigem Boden in neueren Veröffentlichungen karbonathaltiger Sand empfohlen wird. Durch Zusätze (Melioration mit Eisen oder Aluminium) kann z.B. die Phosphor-Bindfähigkeit erhöht werden (vgl. LfU 2002). Hier ist die Entwicklung noch nicht abgeschlossen. Auch die Bepflanzung – meist Schilf – bedarf des besonderen Augenmerks. Insgesamt gehört die Planung in die Hand eines Spezialisten.

Auch betrieblich sind Retentionsbodenfilter nicht immer unproblematisch. Sie dürfen beispielsweise nicht permanent eingestaut sein, sondern müssen häufig trocken fallen – bei Regenwasserkanälen, in die auch Drainagen oder Quelfassungen eingeleitet werden, erfordert dies bereits Vorsicht. Auch das Gegenteil, nämlich zu wenig Regenwasser etwa bei noch nicht voll erschlossener Fläche und einer längeren Trockenperiode, ist schlecht, weil dann das Schilf unter Wassermangel leidet. Besonders in der Anwuchsphase des Schilfes muss dann künstlich bewässert werden.

Der Schlamm bleibt zunächst im Bodenfilter, ebenso die Biomasse des im Winter absterbenden Schilfes, was betrieblich meist begrüßt wird. Es liegen derzeit jedoch noch keine Langzeiterfahrungen über das Anwachsen der Schlammschicht vor. Es ist auch denkbar, dass der oft stark schadstoffbelastete Schlamm nach 10-20 Jahren entfernt werden muss.

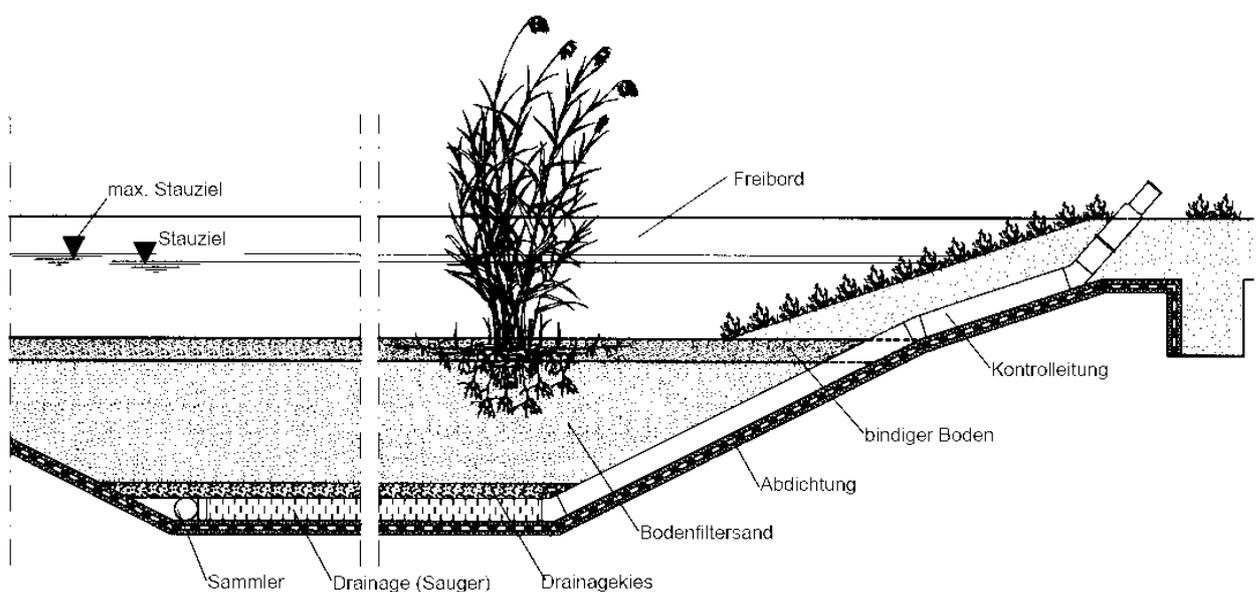


Bild 7: Schnitt durch einen Retentionsbodenfilter nach LfU (2002). Nicht gezeigt sind hier der Ablauf des Drainagesammlers über einen Drosselschacht in das Gewässer sowie auch der Filterüberlauf.

Für die Bemessung von Retentionsbodenfiltern im Misch- und im Trennsystem haben sich Standards entwickelt, die mit geringen Unterschieden z.B. in DWA-M 178 (2005), LfU (2002) und MUNLV (2003) dokumentiert sind. Zum einen ist die Entlastungsrate des vorgeschalteten Regenklärbeckens in den Bodenfilter je nach gefordertem Gewässerschutz zu begrenzen, zum anderen aber auch die hydraulische Filterbelastung  $h_s$  (jährliche Stapelhöhe in m/a; typisch ist  $h_s \leq 40$  m/a). Letzteres ist im Hinblick auf die Kolmationsgefahr bei zu intensiver Beschickung notwendig und z.B. durch Simulation nachzuweisen. Der Drosselabfluss  $Q_{Dr,RBF}$  wird proportional zur Grundfläche  $A_F$  des Filters bestimmt, nach DWA-M 178 (2005) typischerweise zu  $Q_{Dr,RBF} = 0,02 \text{ l/(s} \cdot \text{m}^2) \cdot A_F$ . Die Filtergeschwindigkeit errechnet sich daraus zu  $v_F = Q / A_F = 0,054 \text{ m/h}$ . Für nicht rückgespülte Langsamsandfilter, z.B. aus der Trinkwasseraufbereitung, liegt der Grenzwert bei etwa  $v_F = 0,1 \text{ m/h}$  (LfU 2002).

Im Trennsystem ergeben sich wegen des größeren jährlich über den Bodenfilter geführten Wasservolumens größere Bodenfilteranlagen als im Mischsystem. Wegen der Kolmationsgefahr ist es nicht möglich, einen Bodenfilter etwa bei geringeren Anforderungen kleiner auszuführen, denn dadurch würde die hydraulische Filterbelastung zu groß (es sei denn, man würde nur einen Teil des Regenwassers über den Filter leiten, den Rest aber direkt ins Gewässer geben).

Insgesamt ist ein Retentionsbodenfilter nur dort zu realisieren, wo der nötige Platz vorhanden ist und auch der Untergrund die Anlage des Bauwerkes zulässt. Auch die Gefälleverhältnisse müssen günstig sein. Die Drainage könnte man pumpen, doch Filterbeschickung und Filterüberlauf sind nur in freiem Gefälle zweckmäßig.

Weiterhin zu erwähnen sind **neue Verfahren zur verbesserten Sedimentation**, wie sie versuchsweise auch für die Behandlung von Oberflächenwasser zum Einsatz kommen. Neuerdings gibt es in Baden-Württemberg ein Pilotprojekt in Pforzheim, wo ein konventionelles Regenklärbecken (RKB Klingklamm) mit **Lamellenabscheidern** ausgerüstet ist, siehe Glas und Störr (2007). Angaben über die erreichbare Reinigungsleistung liegen derzeit noch nicht vor. Eine zusätzlich anwendbare Technologie ist die **Flockung**, wo durch Zugabe von Flockungs- und Flockungshilfsmitteln aus Feinstsedimenten größere Flocken erzeugt werden, die dann durch Absetzen oder Filtrieren vom Wasser getrennt werden können. Einige Grundlagenuntersuchungen wurden z.B. von Pfeifer und Hahn (1995) oder von Krauth und Bondareva (2000) durchgeführt. In den USA wird so genanntes High-Rate Treatment der Regenwasserabflüsse mit technischen Anlagen favorisiert. Eine dort häufig angewandte Technik ist die **ballastierte Flockung**, bei der durch Zugabe von Flockungsmitteln und sehr feinem Sand die Schadstoffe in gut absetzbaren Flocken gebunden werden, welche dann in einem Lamellenklärer aus dem Wasser entfernt werden. Der Sand kann anschließend aus dem Schlamm rückgewonnen werden (Actiflo-Prozess der Firma Krüger, vgl. Veolia 2007).

#### 1.4 Bisherige Anwendungen von Filtrationstechniken zur Abwasserbehandlung

An sich ist auch in der Abwassertechnik die Anwendung von Filtrationsverfahren gebräuchlich, siehe z.B. ATV (1997b). Bislang beschränkte sich diese jedoch auf die Kläranlage, und hier speziell auf die 3. Reinigungsstufe, also die zusätzliche Reinigung von bereits biologisch gereinigtem und im Nachklärbecken von den Schlammflocken befreitem Abwasser. Oft werden zusätzlich Fällmittel zugegeben, vor allem um den gelösten Phosphor auszufällen. Die ausgefällten Stoffe werden dann mittels Filtration entfernt.

Dieser Anwendungsort hat den Vorteil, dass dort die zu erwartenden Abflüsse nur verhältnismäßig gering schwanken und der Filter kontinuierlich betrieben werden kann. Außerdem ist durch die zentrale Aufstellung auf der Kläranlage, in der Regel in einem Betriebsgebäude, eine Überwachung durch das Klärpersonal möglich. Hier finden deshalb auch technisch komplexe Filteranlagen Verwendung, etwa Sandfilter mit mehreren Kammern und Rückspülung.

Eine neue Entwicklung ist die Anwendung von Membranverfahren zur Abwasserreinigung, wie sie etwa bei besonders empfindlichen Vorflutern oder aber für Kompaktkläranlagen auf Schiffen genutzt werden. Hier wird

durch spezielle Kunststoffmembranen gefiltert, deren Porengröße je nach Einsatzzweck variiert, aber sehr viel kleiner ist als bei konventionellen Filtermedien.

### 1.5 Filtration von Oberflächenwasser im Trennsystem

ATV-A 166 (1999) nennt in der Kategorisierung möglicher Verfahren und Bauwerke zur Regenwasserbehandlung bereits die mechanische Filtration und unterscheidet in mechanische Filter mit vorgeschalteter Retention (MFvR) und in mechanischen Retentionsfiltern (MRF). Hier könnten Lösungen entwickelt werden, mit deren Hilfe man künftig Regenwasser mit geringem Platz- und Kostenaufwand reinigen kann, und zwar über ein reines Absetzen in einem Regenklärbecken hinaus.

Es gibt dafür weltweit bereits einige Pilotprojekte. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, die Straßeneinläufe mit Filtervorrichtungen auszustatten, etwa mit Filtersäcken (Schreck 1994) oder mit Filterpatronen (System Innolet, Sieker 2004). Etwas aufwendigere Schächte mit eingebauten Filtern sind gleichfalls bereits auf dem Markt, vgl. Dierkes et al. (2005) oder Hydro International (2007), und ihre Anwendung wird auch in einigen aktuellen Forschungsprojekten untersucht (Grüning und Hoppe (2007)). Gemeinsam ist den letztgenannten Filteranlagen das dezentrale Konzept: eine kleine Einzugsgebietsfläche mit behandlungspflichtigem Oberflächenabfluss, etwa ein LKW-Ladehof, wird an einen Filterschacht angeschlossen, in dem austauschbare Einsätze oder Patronen das Filtermaterial bilden. Die Beschickung erfolgt in freiem Gefälle und die Anlage hat wegen ihres dezentralen Charakters möglichst wenig Maschinenteknik. Bei Verstopfung des Filters wird ein Überlauf aktiv. Die Schächte enthalten selbst als ersten Verfahrensschritt eine Absetzkammer; diese muss regelmäßig entschlammung werden, während ein Austausch der (nicht rückgespülten!) Filtermaterialien seltener notwendig ist. Grüning und Hoppe (2007) sprechen von zweimal jährlichem Entschlammung und einem Wechsel des Filtermaterials nur alle 6-10 Jahre bei bis zu 2000 m<sup>2</sup> angeschlossener Fläche.

### 1.6 Ziel der vorliegenden Studie: Anwendung der mechanischen Filtration zur Regenwasserbehandlung

Das vorliegende Forschungsprojekt grenzt sich von den beschriebenen aktuellen Studien und Geräten dadurch ab, dass es die zentrale Behandlung von Regenwasser durch Filtration zum Thema hat. Die Filteranlage soll also zum Einsatz an Einzugsgebieten mittlerer Größe von einigen Hektar versiegelter Fläche dienen, dort, wo man derzeit bei besonderen Anforderungen ein Regenklärbecken und einen Bodenfilter vorsehen würde. Hintergrund ist vor allem der dann geringere Wartungsaufwand durch wenige Wartungspunkte, denn eine dezentrale Lösung mit vielen schlecht überwachbaren und regelmäßig zu entschlammenden kleinen Filterschächten wird sicherlich von vielen Betreibern mit Skepsis gesehen. Im Gegenzug wäre dafür bei einer zentralen Anlage auch ein größerer technischer Aufwand tolerierbar, etwa eine Pumpenbeschickung oder die Fernüberwachung, und die Anlage könnte professionell durch die Kommune gewartet werden.

Das Forschungsprojekt hat hierzu die folgenden Ziele:

1. Konzeption eines technischen Filterverfahrens zur Reinigung von Regenwasser aus einem Trennsystem
2. Entwicklung und Bau einer Filteranlage mit möglichst einfacher und robuster Technik
3. Installation eines Prototyps an einem vorhandenen Regenklärbecken
4. Gewinnen erster Betriebserfahrungen

Zu 1): Erster Schritt des Forschungsprojektes ist eine vergleichende Wertung unterschiedlicher Filtertechniken im Hinblick auf den geplanten Einsatz, der sich durch einen zeitlich unregelmäßigen Dauerbetrieb (nach Regenereignissen mehrere Stunden oder Tage Dauerlauf, dann u.U. mehrere Wochen Stillstand) auszeichnet. Ein wichtiger Aspekt ist dabei auch die notwendige Abreinigung des Filters und der Verbleib des Filtergutes. Hier wurden auch einige theoretische Überlegungen durchgeführt.

Zu 2.): Es ist eine Vielzahl von kommerziellen Filtersystemen für Abwasser auf dem Markt (vgl. Kap. 3.1.3), die theoretisch für den hier vorgesehenen Einsatzzweck geeignet sein könnten. Viele davon sind aber technisch sehr aufwändig (z.B. durch die nötige Rückspülung bei Sandfiltern). Es wurde daher eine Eigenentwicklung durchgeführt, die eine möglichst einfache Funktionsweise hat. Eine serienreife Entwicklung zu einem verkaufsfähigen Produkt ist im Rahmen des Forschungsprojektes hingegen nicht zu leisten.

Zu 3): Jegliche Filteranlage kann nur einen begrenzten Durchfluss verarbeiten. Aus diesem Grund ist eine vorgeschaltete oder eingebaute Retentionseinrichtung in Form von Stauvolumen notwendig, um bei Regen Starkzuflüsse zeitweise speichern und nach und nach durch die Filteranlage reinigen zu können. Zugleich ist es erwünscht, dass sich gröbere Stoffe im Becken absetzen und dadurch eine Vorreinigung stattfindet. Die Filteranlage wurde deshalb als Nachrüstung zu einem vorhandenen Regenklärbecken konzipiert und an einem solchen installiert.

Zu 4): Im Rahmen eines relativ kurzzeitigen Projektes ist keine Praxisreife mit umfassenden Betriebserfahrungen zu erreichen. Vielmehr sollten in einem mehrmonatigen Betrieb Aussagen über das Potential dieser Art von technischer Filtration und über den grundsätzlich möglichen Schmutzrückhalt gewonnen werden.

## **2 Das Versuchsbecken Bad Mergentheim RKB „Im Abelt“**

In Bad Mergentheim gibt es seit etwa 1980 das Regenklärbecken RKB „Im Abelt“ zur Regenwasserbehandlung für eine im Trennsystem entwässerte Gewerbefläche. Wegen seiner offenen, gut zugänglichen Bauweise und der örtlichen Nähe zu unserer Firma wurde dieses als Versuchsanlage ausgewählt.

### **2.1 Bauart und Funktion des vorhandenen Regenklärbeckens**

Das RKB „Im Abelt“ ist als Besonderheit ein offenes Fangbecken ohne Dauerstau, das die Aufgabe hat, einen stark verschmutzten Spülstoß zu speichern – eine eher selten anzutreffende Bauweise. Erst wenn das Be-

cken gefüllt ist, gelangt weiterer Regenabfluss direkt in die Tauber. Nach Regenende wird der Beckeninhalte gezielt zur Kläranlage hin gepumpt. Als weitere Besonderheit ist ein geschlossenes Rückhaltebecken RRB „Im Abelt“ nachgeschaltet. Dessen Funktion ist hier nicht die Begrenzung des Abflusses in die Tauber, sondern ausschließlich eine Volumenpufferung bei Hochwasser, so dass auch dann das Regenwasser aus dem Gewerbegebiet ohne Rückstau ablaufen kann und zur Gewährleistung der Vorflut zwei relativ kleine Hochwasserpumpen genügen.

Die Anlage funktioniert zur Zufriedenheit des Betreibers, es besteht dort also an sich kein Handlungsbedarf zu einer Sanierung (wenn die Betriebsweise auch verbessert werden könnte, siehe unten). Wegen der vorhandenen baulichen Konstruktion eignet sich das Becken sehr gut zum Umbau in eine Versuchsanlage.



Bild 8: Das offene RKB „Im Abelt“

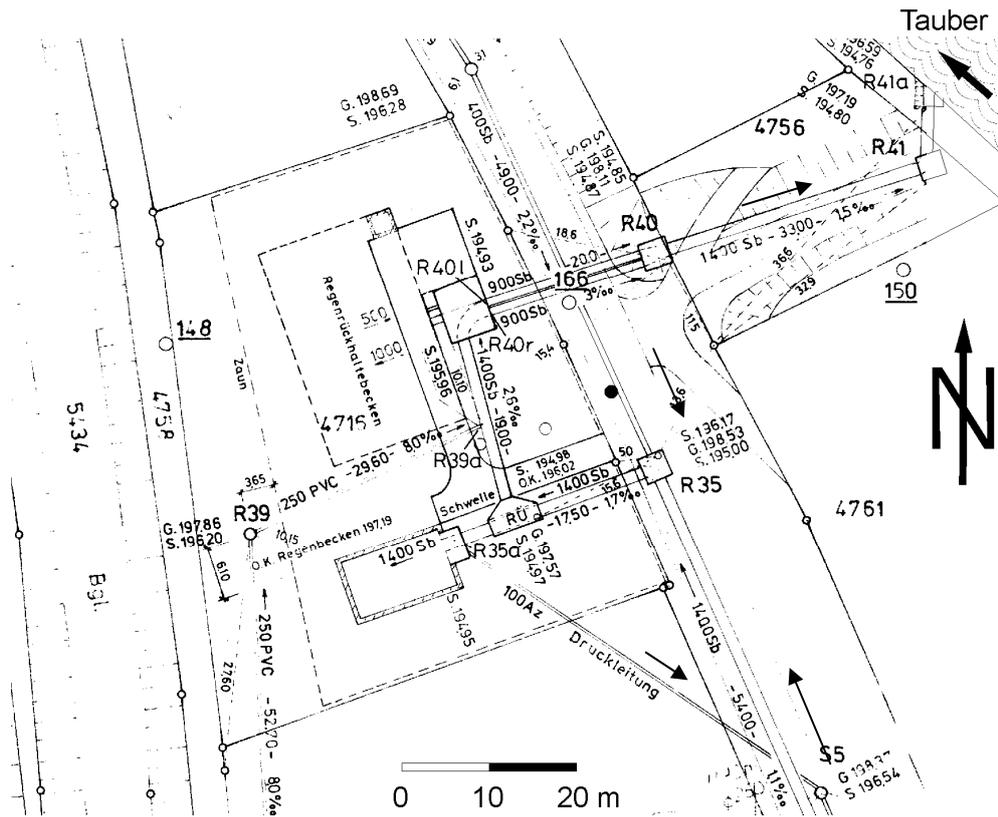


Bild 9: Auszug aus dem Lageplan des Regenbeckens (unmaßstäblich)

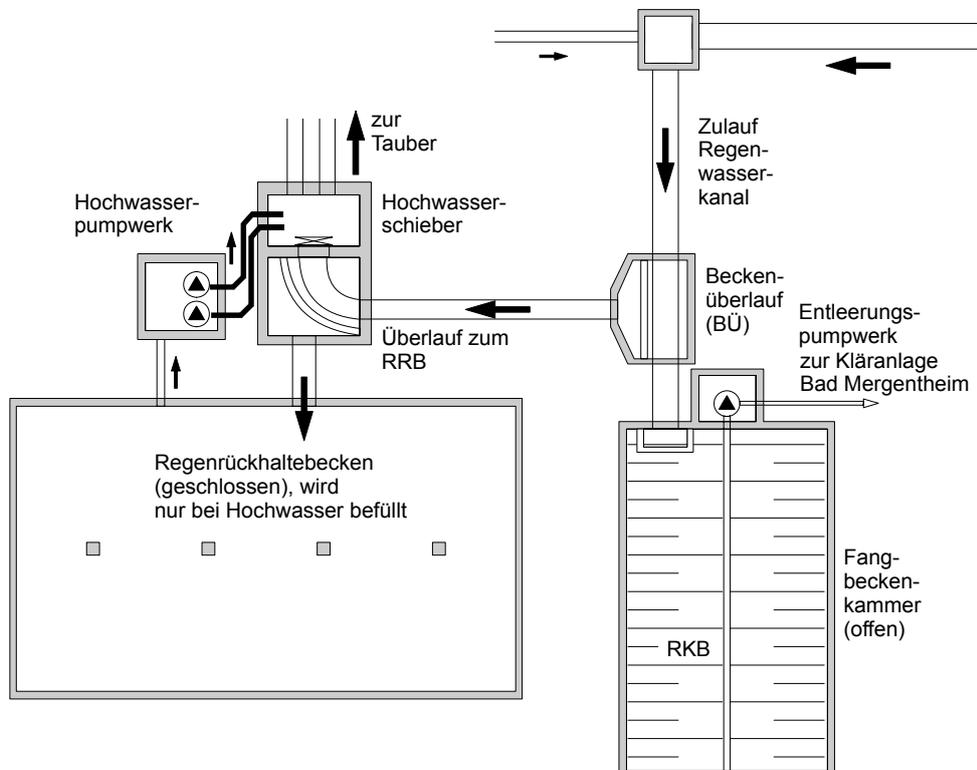


Bild 10: Schematischer Grundriss des RKB Bad Mergentheim „Im Abelt“

### Speicherinhaltslinie RKB Abelt

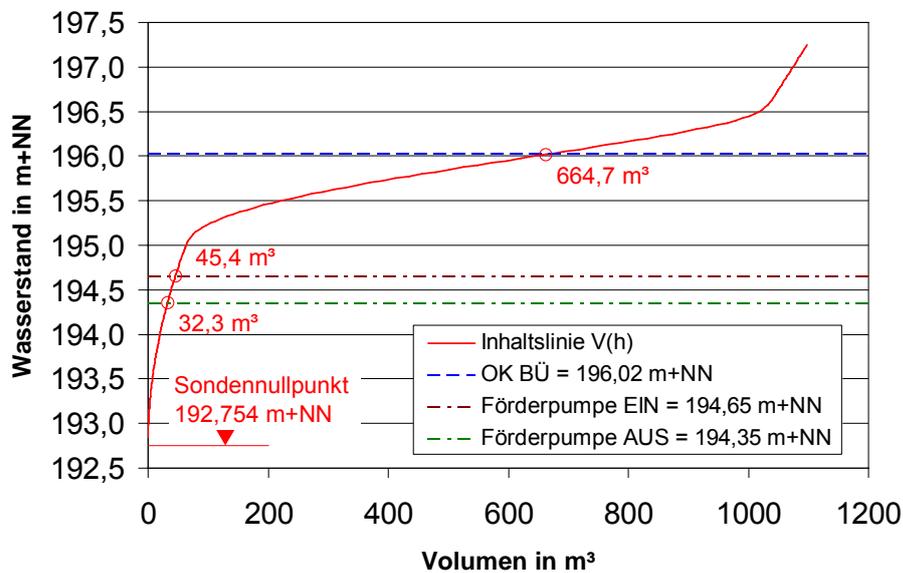


Bild 11: Inhaltslinie des Regenklärbeckens „Im Abelt“ einschließlich des vorgeschalteten Stauraumkanals

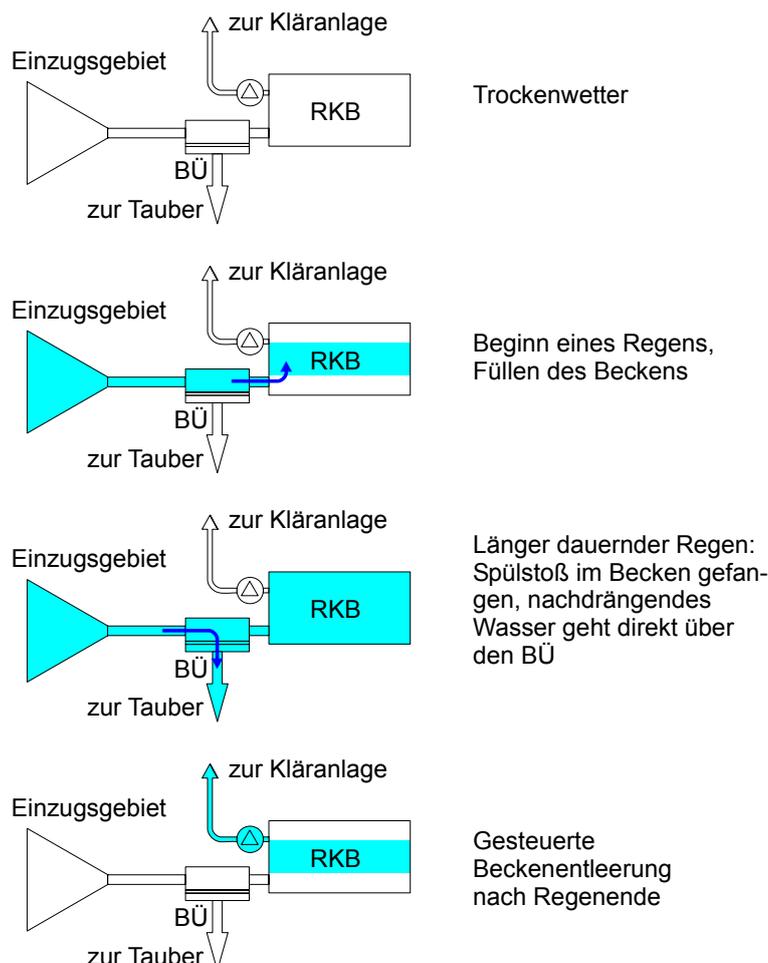


Bild 12: Ursprüngliche Betriebsweise des RKB „Im Abelt“ als Fangbecken

Das RKB besitzt in der eigentlichen Beckenkammer ein Volumen von  $V = 121 \text{ m}^3$  (bis Oberkante Beckenüberlauf gemessen). Hinzu kommt ein erhebliches eingestautes Volumen im Zulaufkanal; insgesamt stehen  $V = 664,7 \text{ m}^3$  zur Verfügung. Das RKB hat damit ein recht großes spezifisches Volumen von ca.  $V_s = 84,1 \text{ m}^3/\text{ha}$  bezogen auf die undurchlässige Einzugsgebietsfläche von  $A_U = 7,9 \text{ ha}$ . Die aus der Geometrie des Bauwerkes und des Zulaufkanals ermittelte Speicherinhaltskennlinie  $V(h)$  ist in Bild 11 wiedergegeben.

Bild 12 zeigt die ursprüngliche Betriebsweise des RKB Abelt als Fangbecken. Bei Regen füllt sich das Becken und speichert, wie bereits erwähnt, den ersten stark verschmutzten Spülstoß. Ist das Becken voll, läuft das nachdrängende Wasser direkt in die Tauber über. Nach Regenende wird der Beckeninhalt mit einer Pumpe ( $Q = 18 \text{ l/s}$ ) in den Schmutzwasserkanal und damit zur Kläranlage entleert. Das geschieht jedoch nicht sofort, sondern erst dann, wenn der Gesamtzufluss zur Kläranlage von maximal  $360 \text{ l/s}$  (bei Regen) auf  $280 \text{ l/s}$  abgeklungen ist. In der Praxis sollte dies erst etliche Stunden nach Regenende der Fall sein. Trotzdem wird durch diese Betriebsweise und die recht starken Pumpen das RKB sehr schnell entleert. Das ist eine untypische und auch ungünstige Konzeption, denn der weitaus größte Teil des jährlich im Trennsystem zum Abfluss kommenden Regenwassers wird letztlich doch zur Kläranlage gefördert, gerade so, als wäre es ein Mischsystem.

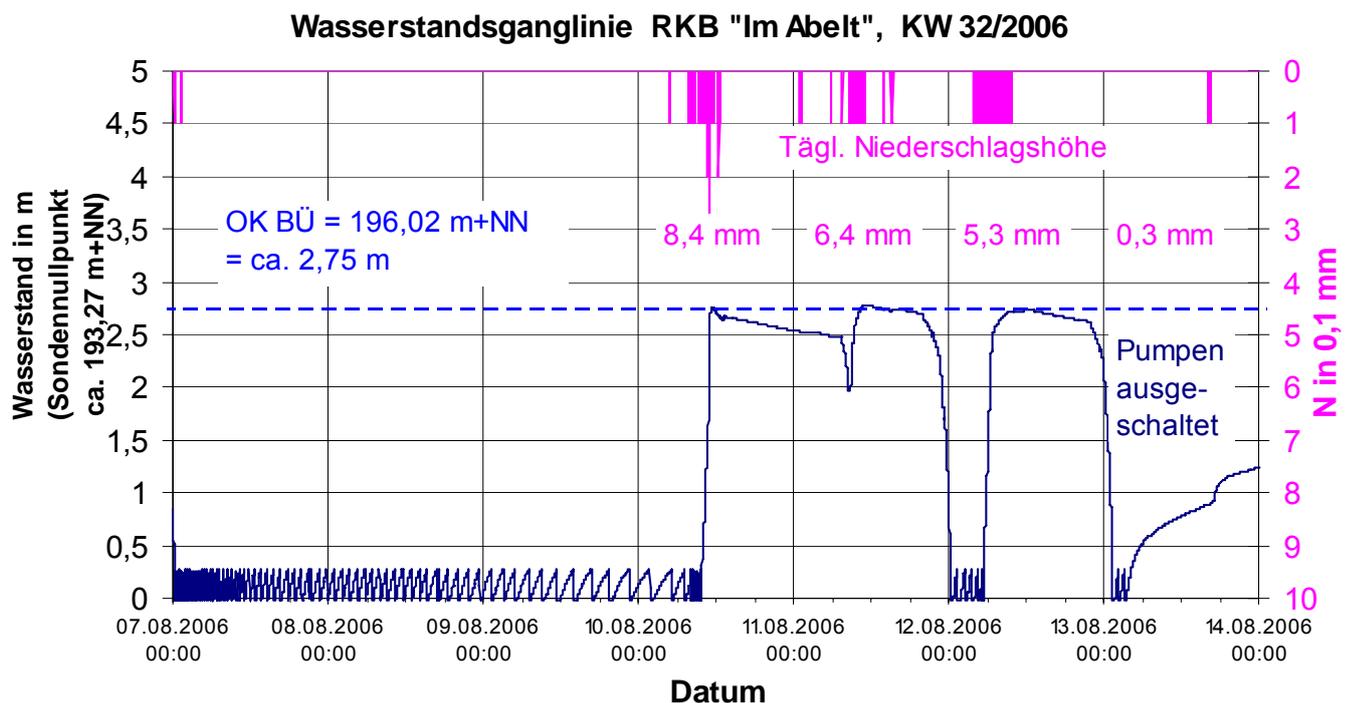


Bild 13: Gemessene Ganglinie des Beckenwasserstandes vor Einbau der Filteranlage

Bild 13 zeigt typische Ganglinien des Beckenwasserstandes bei dieser Betriebsweise. Der sägezahnartige Verlauf bei Trockenwetter zeigt eindringendes Fremdwasser, welches nach Füllen des einige 100 l fassenden Pumpensumpfes mit kurzen Pumpenzyklen unverzüglich zur Kläranlage gefördert wird. Bei Regen – die ma-

gentafarbigen Balken oben im Diagramm – füllt sich das Becken und bei den hier gezeigten recht starken Ereignissen kam es zu dreimaligem Überlaufen. Nach Regenende dauert es typischerweise einige Stunden, bis die Entleerungspumpen anspringen (in dieser Zeit ist offenbar der Zufluss zum Klärwerk noch größer als die genannten 280 l/s, so dass die Pumpen nicht einschalten). Wenn die Pumpen anspringen, entleeren sie das Becken jedoch in kürzester Zeit. An den gezeigten Tagen (10.-12.08.2006) ist trotz kurzzeitigen Überlaufens des RKB fast das gesamte zufließende Wasser zur Kläranlage gefördert worden<sup>1</sup>. Das Trennsystem wird seinem Grundgedanken „Ableitung gering verschmutzten Regenwassers direkt in das Gewässer“ hier also nicht gerecht.

Weiterhin erkennt man bei gefülltem Becken (jeweils nach dem Abklingen des Regenzuflusses, also rechts von den „Berggipfeln“ aus Bild 13) ein langsames Absinken des Wasserspiegels, obwohl die Entleerungspumpen zu diesem Zeitpunkt nicht eingeschaltet sind. Bei eingeschalteten Entleerungspumpen sinkt der Beckenwasserstand infolge deren großen Abflusses von 18 l/s viel schneller, wie man an den steilen rechten Flanken der Ereignisse in Bild 13 sehen kann. Das könnte ein Indiz für Exfiltration sein: der Beckeninhalte versickert durch Undichtigkeiten im Zulaufkanal oder durch angeschlossene Drainagen.

## 2.2 Das Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet ist bereits seit einigen Jahren bebaut; einige Parzellen stehen jedoch noch leer. In diesem Gewerbegebiet sind ein Baumarkt, eine Fensterbaufirma und ein Edelstahl verarbeitender Betrieb (diese mit beträchtlichem LKW-Lieferverkehr) und einige kleinere Betriebe angesiedelt, jedoch ohne untypische oder besonders starke Quellen von Oberflächenschmutz. Eine Übertragung der hier gewonnenen Erkenntnisse über Frachtrückhalt, CSB-Ablaufkonzentrationen usw. auf andere Projekte erscheint deshalb möglich.

Die Gesamtfläche des Gewerbegebietes beträgt  $A_{E,K} = 14,35$  ha. Die tatsächliche versiegelte Fläche ist für das Projekt eine wichtige rechnerische Ausgangsgröße und wurde deshalb durch eine Begehung und anhand von B-Grund-Karten mit eingezeichneten Gebäude- und Hofflächen genauer bestimmt. Zu beachten ist, dass zahlreiche Hofflächen nicht in die Kanalisation, sondern in angrenzende Grünflächen entwässern. Die versiegelte Fläche beträgt  $A_U = 7,9$  ha, was einem Versiegelungsgrad von 55 % entspricht.

Im Untersuchungszeitraum von Anfang August bis Anfang Oktober 2007 herrschte auf der Straße durch das Gewerbegebiet recht starker Verkehr, und zwar bedingt durch eine Brückenbaustelle und Umleitung der Bundesstraße 292 im Einrichtungsverkehr. Weiterhin fiel in diese Zeit auch den Neubau einer sehr großen Halle für die Fensterbaufirma mit erheblichem Baustellenverkehr und Straßenverschmutzung.

---

<sup>1</sup> Bei einer versiegelten Einzugsgebietsfläche von  $A_U = 7,9$  ha und einer in ca. 1 km Entfernung am Regenschreiber in unserer Firma gemessenen Niederschlagshöhe vom 10.-12.08.2006 von  $h_N = 8,4 + 6,4 + 5,3$  mm abzüglich ca. 3 mm Muldenverlust beträgt das Wasserdargebot größenordnungsmäßig  $1350 \text{ m}^3$ . Aus Bild 13 kann man sehen, dass das RKB zweimal ganz und einmal etwa zur Hälfte entleert wurde, das wäre also ein zur Kläranlage gepumptes Volumen von  $2,5 \cdot 664,7 \text{ m}^3 = 1661 \text{ m}^3$ . Das ist eine plausible Übereinstimmung. Bei den Überlaufereignissen ist nur wenig Wasser direkt in die Tauber gelangt.



Bild 14: Lageplan und Luftbild des Gewerbegebietes Bad Mergentheim „Im Abelt“ mit dem Regenklärbecken (ohne Maßstab). Das Kartenmaterial wurde freundlicherweise von GoYellow.de – dem Branchenbuch im Internet zur Verfügung gestellt.



Bild 15: Blick vom benachbarten Berg-  
hang auf das RKB „Im Abelt“, noch ohne  
Filteranlage. Links oben die Tauber.

### 3 Versuchsanlage zur technischen Filtration von Oberflächenwasser

#### 3.1 Vorüberlegungen zur Konzeption

Zu Beginn des Forschungsprojektes wurden umfangreiche Überlegungen theoretischer wie konstruktiver Art darüber angestellt, wie ein erfolgversprechendes Konzept für die technische Filtration von Regenwasser aussehen könnte. Diese Vorüberlegungen sind in den folgenden Kapiteln dokumentiert.

##### 3.1.1 Einige Grundlagen zur Filtrationstechnik

Die Grundlagen der Filtrationstechnik finden sich in vielen Lehrbüchern, z.B. bei Luckert (2004). Die Vorgänge bei der Filtration lassen sich mittels mehrerer unterschiedlicher Modellvorstellungen theoretisch beschreiben (Bild 16):

Die **Kuchenfiltration** geht von der Vorstellung aus, dass das Filtergut auf dem Filter einen Filterkuchen bildet, dessen Dicke mit der Zeit anwächst. In diesem herrscht laminare Durchströmung, die durch das Darcysche Gesetz beschrieben werden kann. In der einfachsten Vorstellung ist der Filterkuchen nicht kompressibel und hat eine konstante Durchlässigkeit. Dann ist der Filterwiderstand linear von der Dicke des Filterkuchens und – bei konstanter Zulaufkonzentration – vom bereits gefilterten Volumen an Flüssigkeit abhängig, zusätzlich auch von der Durchlässigkeit des Filtermediums. Im Folgenden wird auf diesem Ansatz eine Modellvorstellung entwickelt.

Die **Verstopfungs- oder Siebfiltration** hat die Hypothese, dass die Filterporen durch auftreffende Filtergutpartikel sukzessive abgedeckt und verstopft werden. Das führt zu einem anderen Verhalten des Filterwiderstandes, der hier exponentiell mit dem bereits gefilterten Flüssigkeitsvolumen anwächst. Der Druck wird bei komplett belegtem Filter theoretisch unendlich groß. – Es gibt auch Zwischenformen zwischen der Kuchen- und der Siebfiltration, für die man gleichfalls theoretische Ansätze herleiten kann.

Die **Tiefenfiltration** beruht darauf, dass Haftkräfte die Filtergutpartikel im Medium festhalten, so z.B. sehr feine Partikel oder gar Kolloide in einem Sandfilter bei der Trinkwasseraufbereitung. Hier ist es also nicht der mechanische Effekt „Partikel wird von kleinerer Pore festgehalten“, der die Filtration bewirkt. Das Filtermedium muss hier eine gewisse Stärke (Tiefe) haben und kann nicht oberflächlich abgereinigt werden. Unter anderem kann auch die Aufnahmefähigkeit des Filters nach einem gewissen Volumendurchsatz erschöpft sein, so dass es dann zum Trüblauf kommt, bei dem abzuscheidender Stoff den Filter passiert.

Bei der **Querstromfiltration** schließlich strömt das zu filtrierende Fluid mit großer Geschwindigkeit quer zur Filteroberfläche, so dass sich dort kein Filterkuchen bilden kann. Dadurch können auch extrem feine Partikel abgefiltert werden.

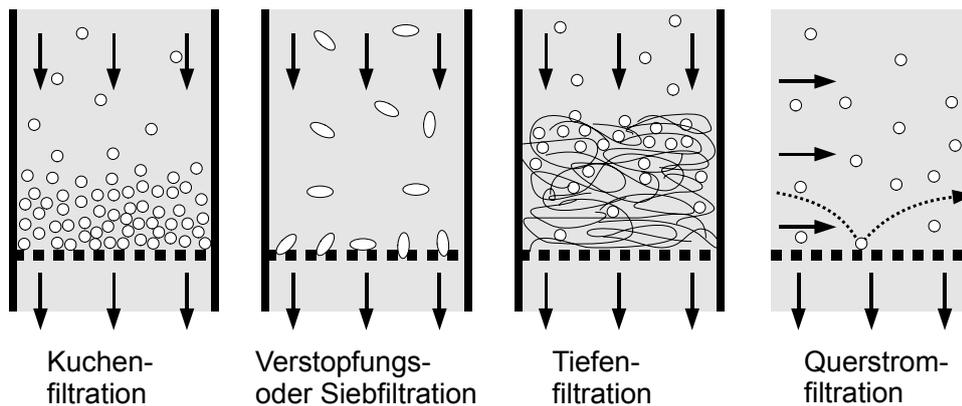


Bild 16: Vier Modellvorstellungen zu den Vorgängen bei der Filtration (nach Luckert 2004)

### 3.1.2 Theoretische Überlegungen zur Filtration

Das unbelegte Filtergewebe ist ein Flächenfilter. Sobald jedoch nennenswert Sedimente aufgelagert sind, ist eine mögliche Modellvorstellung die eines Kuchenfilters, d.h. der Filterwiderstand wird nur anfangs vom Gewebe, später aber vom Kuchen und seiner Durchlässigkeit geprägt. Die folgenden Überlegungen sollen

- ein theoretisches Modell für den zeitlichen Aufbau des Filterwiderstandes (bzw. des erreichbaren Durchsatzes) liefern
- Größenordnungen für die erreichbaren Parameter angeben, um damit den Filter auszulegen.

#### 3.1.2.1 Kuchenfiltration; generelle Filtrierbarkeit der hier anzutreffenden Suspension

Durch die Filterfläche der Größe  $A_F$  fließt zeitabhängig der Durchfluss  $Q(t)$ ; dieser ergibt flächenbezogen die Filtergeschwindigkeit  $v(t) = Q(t)/A_F$ . Dieser Zufluss bringt einen Volumenstrom an Sediment von  $q_{\text{sed}}(t) = C_0 \cdot v(t)$  mit, der sich auf dem Filter anlagert und dort die Dicke des Filterkuchens  $s(t)$  vergrößert, wobei auch ein Anteil  $n$  an Poren eingeschlossen ist. Gleichzeitig wird der Filterkuchen laminar durchströmt, wobei die Gültigkeit des Darcyschen Gesetzes (wie bei einer Grundwasserströmung) angesetzt wird.

Nach dieser einfachen Modellvorstellung ergibt sich folgende Beziehung zwischen dem Druckabfall am Filter (Filterwiderstand) und den weiteren beteiligten Größen (vgl. Luckert (2004), für die hier verwendeten Größen modifiziert):

$$\Delta p = \frac{Q}{A_F} \cdot s \cdot \rho \cdot \nu \cdot r_L \quad (1)$$

wobei  $\rho$  die Dichte der Flüssigkeit in  $\text{kg/m}^3$  und  $\nu$  die kinematische Zähigkeit in  $\text{m}^2/\text{s}$  sind.  $r_L$  heißt spezifischer Filterwiderstand und hat die Einheit  $\text{m}^{-2}$ . Diese Zahl steht mit der aus der Grundwasserströmung bekannten Durchlässigkeit  $k_f$  in  $\text{m/s}$  in reziprokem Zusammenhang, und zwar gilt mit  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  als Erdbeschleunigung:

$$k_f = \frac{g}{v \cdot r_L} \text{ bzw. } r_L = \frac{g}{v \cdot k_f} \quad (2)$$

Alternativ kann Gl. ( 1 ) auch so modifiziert werden, dass nicht die Kuchenstärke  $s$ , sondern die auf die Fläche bezogene, trockene Feststoffmasse  $m_s/A_F$  in  $\text{kg/m}^2$  eingeht. Statt  $r_L$  in  $\text{m}^2$  charakterisiert dann der Parameter  $r$  (ohne den Index L) mit der Einheit  $\text{m/kg}$  das Material:

$$\Delta p = \frac{Q}{A_F} \cdot \frac{m_s}{A_F} \cdot \rho \cdot v \cdot r \quad (3)$$

Zunächst ist es sinnvoll, die generelle Filtrierbarkeit der hier anzutreffenden Suspension zu überprüfen. Nach Luckert (2004) ist der Term  $(r_L \cdot \rho \cdot v)$  in Gl. ( 1 ) für eine Beurteilung der Filtrationseigenschaften einer Suspension geeignet, und zwar sollte  $r_L \cdot \rho \cdot v$  im Bereich von  $10^{11} - 10^{16} \text{ mPa} \cdot \text{s/m}^2$  liegen. Für Wasser bei  $20^\circ\text{C}$  mit  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  und  $v = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  ist dieses Intervall gleichbedeutend mit einer Durchlässigkeit des Filterkuchens im Bereich von  $k_f = 10^{-4} \dots 10^{-9} \text{ m/s}$ . Vergleicht man dieses Intervall mit Werten für Schluff- und Tonböden, wäre der Bereich gering-bis mittelplastischer Tone noch abgedeckt; Schluff- und „grobe“ Tonsuspensionen wären also noch filtrierbar. Hier steckt zwar die Vorstellung darin, dass sich die auf dem Filter abgeschiedenen Schluff- und Tonfraktionen, was ihre Durchlässigkeit betrifft, so verhalten wie im Boden, was so sicherlich nicht zutreffen wird. Als Größenordnung eignet sich diese Analogie aber sicherlich. Im Vorfeld des Forschungsprojektes wurde die maßgebende Korngröße zu  $d = 50 \mu\text{m}$  und die Durchlässigkeit deshalb wie für Schluff mit dieser Korngröße zu  $k_f = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  abgeschätzt. Das läge weit innerhalb des zulässigen Bereiches.

Im Nachhinein lässt sich mit Ergebnissen aus Kap. 4 die Durchlässigkeit des auf dem Filter abgeschiedenen Feinmaterials etwas genauer bestimmen. Auch für den Term  $(r \cdot \rho \cdot v)$  in Gl. ( 3 ) gibt Luckert (2004) ein Intervall für die technische Filtrierbarkeit einer Suspension an, und zwar den Bereich  $(r \cdot \rho \cdot v) = 10^8 \dots 10^{13} \text{ mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m/kg}$ . Dieser Term errechnet sich wie folgt:

$$r \cdot \rho \cdot v = \frac{\Delta p}{\frac{Q}{A_F} \cdot \frac{m_s}{A_F}} \quad (4)$$

Die Filterfläche des Prototypen ist  $A_F = 1,5 \text{ m}^2$ , er wird mit einer Druckdifferenz von  $\Delta p = 6,5 \text{ mWS} = 6,38 \cdot 10^4 \text{ Pa}$  betrieben. Am Ende des Filterzyklus liegt der Abfluss typischerweise in der Größenordnung von  $Q = 0,5 \text{ l/s}$  und es haben sich bis dahin ca.  $m_s = 18 \text{ g}$  (Trockenmasse) an Schlamm auf dem Filter abgesetzt (analysiertes Filtergut vom 25.9.07). Wir erhalten  $r \cdot \rho \cdot v = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m/kg}$ . Dieser Wert ist um 60 % größer als die oben angegebene Intervallobergrenze. Man ist also hier an der Grenze der technischen Filtrierbarkeit zumindest für einen Oberflächenfilter angelangt. Das abgeschiedene Filtergut bildet einen nur sehr dünnen, dabei aber bereits sehr dichten Kuchen aus. 18 g genügen, um  $1,5 \text{ m}^2$  Filterfläche derart „abdichten“, dass nur noch 0,5 l/s hindurchsickern können, obwohl 6,5 m Wasserdruck anstehen.

### 3.1.2.2 Beschreibung des Schichtdickenwachstums

Durch die Filterfläche der Größe  $A_F$  fließt zeitabhängig der Durchfluss  $Q(t)$ ; dieser ergibt flächenbezogen die Filtergeschwindigkeit  $v(t) = Q(t)/A_F$ . Dieser Zufluss bringt einen Volumenstrom an Sediment von  $q_{\text{sed}}(t) = C_0 \cdot v(t)$  mit, die sich auf dem Filter anlagern und dort die Schichtstärke  $s(t)$  vergrößert, wobei auch ein Anteil  $n$  an Poren eingeschlossen ist. Für das Schichtdickenwachstum gilt dann:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{C_0}{(1-n)} \cdot v(t) \quad (5)$$

Der Vorgang beginne idealisiert mit einem noch völlig unbelegten Gewebefilter, es ist also die anfängliche Schichtstärke des Kuchens  $s(t=0) = 0$ . Die wachsende Filterkuchenschicht hat einen zunehmenden hydraulischen Widerstand, für den die Gültigkeit des Darcyschen Gesetzes angesetzt wird, wie es z.B. Grundwasserströmungen beschreibt:

$$v = k_f \frac{\Delta h}{s} \quad \text{bzw.} \quad s = k_f \frac{\Delta h}{v} \quad (6)$$

Der Ansatz geht vereinfachend davon aus, dass der unbelegte Gewebefilter einen viel geringeren hydraulischen Widerstand hat als ein Filterkuchen. In diesem Fall beschreibt Gl. (6) wie gezeigt das hydraulische Verhalten, andernfalls müsste dort auch noch der Widerstand des Gewebes eingehen.

(6) in (5) eingesetzt, ergibt nach einigen Umformungen die folgende Differentialgleichung, die das Anwachsen der Schicht beschreibt:

$$\frac{dv}{dt} = -C_1 \cdot v^3 \quad \text{mit} \quad C_1 = \frac{C_0}{k_f \cdot \Delta h \cdot (1-n)} \quad (7)$$

$C_1$  setzt sich dabei aus lauter Konstanten zusammen. Das Absinken der Filtergeschwindigkeit  $dv/dt$  geschieht proportional zu  $v^3$ . Am Anfang, wenn der Filter noch nicht belegt ist, ist also die Filtergeschwindigkeit groß, der Kuchen wächst schnell und die Filtergeschwindigkeit nimmt sehr schnell ab.

Um eine Aussage über den zeitlichen Verlauf der Filtergeschwindigkeit zu erhalten, muss die Dgl. (7) integriert werden. Die Lösung ist

$$v(t) = \frac{1}{\sqrt{2(C_1 t - C_2)}} \quad (8)$$

Die Integrationskonstante  $C_2$  ergibt sich aus der Bedingung  $v(t=0) = v_0$  zum Zeitpunkt Null (Filtergeschwindigkeit bei noch völlig unbelegtem Gewebefilter) zu

$$v(t=0) = \frac{1}{\sqrt{2(C_1 \cdot 0 - C_2)}} = v_0 \quad \text{und somit} \quad C_2 = \left(\frac{1}{v_0}\right)^2 \quad (9)$$

Für die Filtergeschwindigkeit bei unbelegtem Filter  $v_0$  kann ein empirischer Wert vorgegeben werden, weil diese Größe sehr viel größer als  $v(t > 0)$  bei belegtem Filter ist. Der Filterwiderstand des Kuchens übersteigt

denjenigen des Gewebes im vorliegenden Fall bei Weitem. Der Wert für  $v_0$  hat deshalb keine großen Auswirkungen auf die Entwicklung – und damit auch auf das zeitliche Mittel – des Durchsatzes.

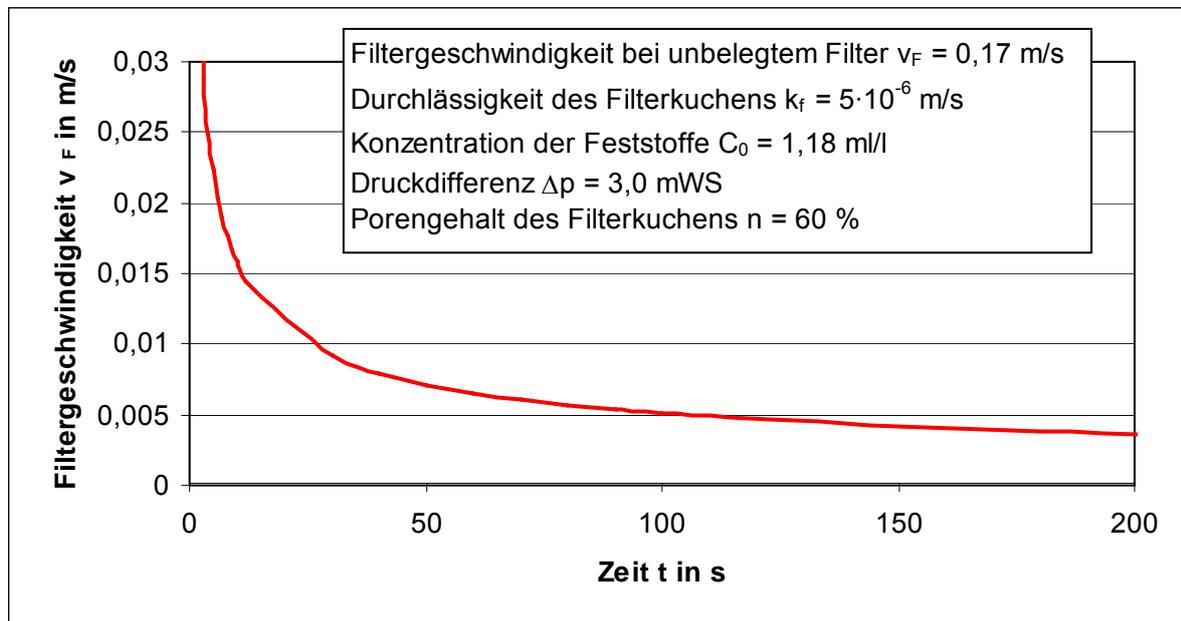


Bild 17: Der Theorie gemäß nimmt der Filterdurchsatz mit der Zeit sehr schnell ab (exemplarische Kurve mit typischen Werten)

### 3.1.2.3 Abreinigungsintervall und erreichbarer Durchsatz

Um im zeitlichen Mittel einen brauchbaren Filterdurchsatz zu erreichen, ist eine periodische Reinigung des Filters sinnvoll, entweder durch regelmäßiges Unterbrechen der Filtration und Einschalten eines Spülzyklus oder aber, z.B. bei einem Trommel- oder Bandfilter, durch kontinuierliche Abreinigung an einer Stelle des Umfangs. Hier würde dann die Zykluszeit durch die Umdrehungszahl bestimmt.

Die Filtergeschwindigkeit ist wie in Bild 17 unmittelbar nach dem Abreinigen groß und später klein. Über die Gesamtfläche lässt sich dann eine mittlere Durchsatzleistung definieren:

$$Q = A_F \cdot \frac{\int_{t=0}^{t_{Abr}} v_f(t) dt}{t_{Abr}} \quad (10)$$

Dabei ist  $t_{Abr}$  das Abreinigungsintervall. Je kürzer dieses ist, umso größer ist  $Q$  (wobei in Gl. ( 10 ) allerdings die Zeitdauer des Abreinigungsvorgangs nicht berücksichtigt ist; in dieser Zeit wird ja nicht gefiltert).

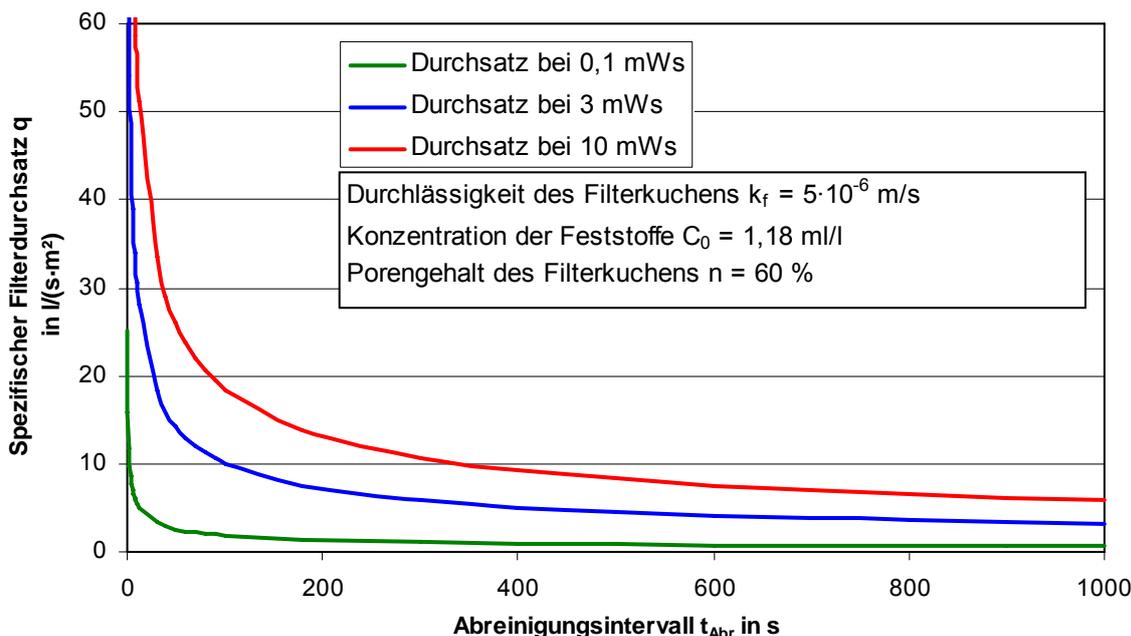


Bild 18: Spezifischer Filterdurchsatz in Abhängigkeit von Druck und Abreinigungsintervall

Bild 18 zeigt die grundsätzliche Abhängigkeit graphisch. In der Praxis wird man das Abreinigungsintervall so wählen, dass ein Optimum an Filterdurchsatz zu erreichen ist; gleichzeitig ist es bei diskontinuierlicher Abreinigung sinnvoll, nicht zu viele Maschinentzyklen durchzuführen wegen des Verschleißes.

Die in Bild 18 angegebenen Parameter wurden zu Beginn des Projektes als typisch abgeschätzt. Größenordnungsmäßig konnte damit für die Konzeption der Filteranlage bei einem Beschickungsdruck von 3 mWS und einer Filterfläche von  $1,5 \text{ m}^2$  abgeschätzt werden, dass bei einem gewünschten mittleren Durchsatz von  $5 \text{ l/s}$  ein Abreinigungsintervall von etwa  $800 \text{ s} = 13,3 \text{ min}$  ausreichend ist. Im Nachhinein erwiesen sich diese Werte allerdings als zu optimistisch.

### 3.1.3 Bauformen von Filteranlagen

Zu Beginn des Projektes wurde in einer unveröffentlichten Diplomarbeit (Baumgärtner 2006) eine Übersicht in Form eines „morphologischen Kastens“ über verschiedene Bauformen von Filteranlagen durchgeführt, um dann eine Bauform herauszufinden, mit der das vorliegende Filtrationsproblem am besten gelöst werden kann. Diese Ergebnisse brauchen im vorliegenden Schlussbericht nicht in ihrer Gesamtheit wiedergegeben zu werden. Es wurden allerdings einige Merkmale von Filteranlagen diskutiert, die im Folgenden nochmals erläutert werden:

**Filtermedium:** Ein generelles Unterscheidungskriterium ist zunächst das verwendete Filtermedium. Oberflächenfilter können mit textilen Geweben oder Vliesen, mit Papier, mit gelochten Filterböden aus Metallblech oder anderen Materialien bis hin zur Sinterkeramik arbeiten. Tiefenfilter verwenden entweder gleichfalls textile Medien, etwa dickere Vliesstoffe, feste Medien wie Einkornbeton, in der Regel wohl aber schüttbare Filterme-

dien wie Sand oder andere Granulate bis hin zu speziellen Medien, die in der Lage sind, zusätzlich zur Filtration auch z.B. Schwermetalle zu adsorbieren. Das verwendete Filtermedium bestimmt unmittelbar die möglichen Abreinigungsformen. Konstruktiv ist bei Oberflächenfiltern die Befestigung des Filtermediums auf einem Träger wichtig, bei Filtern mit schüttbaren Medien hingegen dessen „Unterbringung“. Leichte Austauschbarkeit des Filtermediums dürfte generell wünschenswert sein.

**Beschickungsdruck:** Filteranlagen mit Druck- oder auch mit Vakuumbeschickung eignen sich auch für Material mit geringer Durchlässigkeit, müssen aber wegen der nötigen Druckfestigkeit aufwändiger konstruiert werden. Bei geringem Beschickungsdruck ist eine sehr große Filterfläche erforderlich. Die Abreinigung (sofern man eine solche benötigt) wird dann aufwändig.

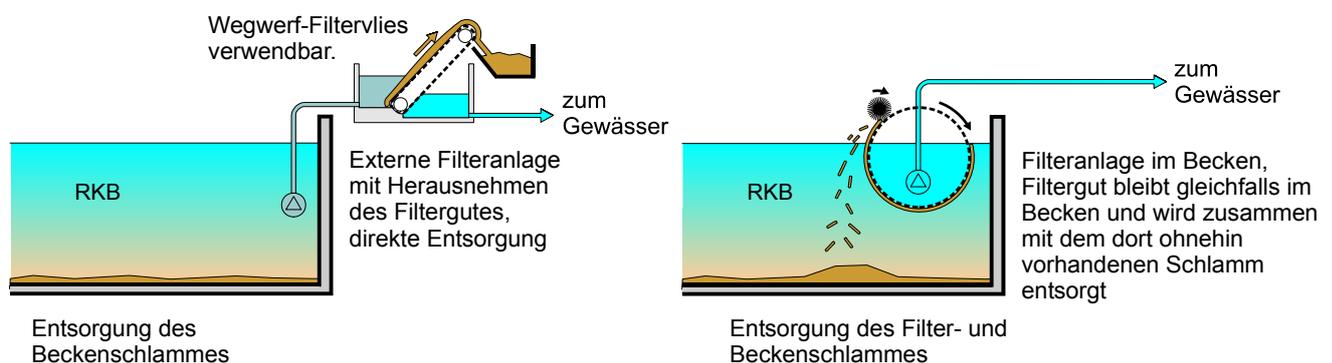


Bild 19: Beispiele zur Konzeption einer Filteranlage aus Baumgärtner (2006), hier zwei theoretische Möglichkeiten ohne Druckbeschickung mit unterschiedlicher Entsorgung des Filtergutes

**Abreinigungsart:** Die einfachste Abreinigungsart ist gar keine Abreinigung, nämlich das Verwenden eines preiswerten Einweg-Filtermediums, das ausgetauscht und nach dem Filterzyklus wie ein Kaffeefilter samt dem Filtergut entsorgt wird. Bei Druckbeschickung wird dies aber konstruktiv schwierig. Hier wird eine effektive, möglichst automatische Abreinigung wichtig. Bei Oberflächenfiltern muss die Oberfläche des Filtermediums gesäubert werden, wofür auch bei unter Druck stehendem Filter z.B. Rückspülen und Absaugen möglich wären. Bei einem drucklosen, trocken gefallenen Filter sind auch Abrakeln, Abbürsten und oberflächliches Abspülen denkbar.

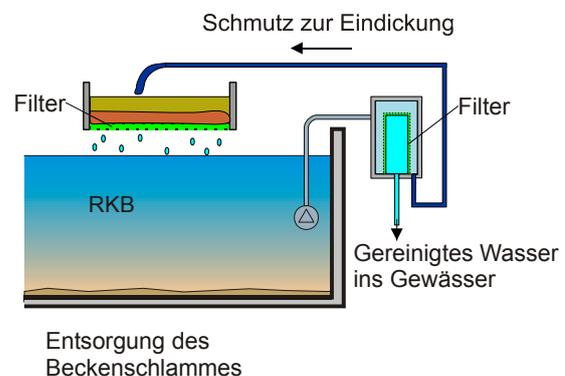


Bild 20: Nacheindickung bei relativ dünnflüssigem Filterschlamm (nach Baumgärtner 2006)

Tiefenfilter sind schwieriger abzureinigen; hier kann man mit Rückspülung oder bei granulären Filtermaterialien mit Herausnehmen und Waschen des Filtermediums arbeiten (wenn man nicht auch hier auf die Abreinigung ganz verzichten und das verschlammte Filtermaterial regelmäßig auswechseln möchte). Wegen dieser Schwierigkeit wurden Tiefenfilter relativ früh aus den weiteren Überlegungen ausgeklammert.

**Entsorgung des Filtergutes:** auch dies ist ein wichtiger Aspekt. Das Filtergut kann herausgenommen und z.B. in einem Container vor Ort gesammelt und entsorgt werden. Auf Abwasseranlagen steht oft aber auch die Möglichkeit offen, Filterschlamm in einen Schmutzwasserkanal zu leiten und auf der Kläranlage zu behandeln, etwa zusammen mit dem im Regenklärbecken ohnehin anfallenden Schlamm.

Je nach Abreinigungsmethode ist das Filtergut mehr oder weniger konzentriert, es reicht in der Konsistenz also von dickflüssigem Schlamm bis zu trübem Wasser. Bei der Frage der Entsorgung spielt auch dieser Aspekt eine Rolle. Auch ein Nacheindicken des Filterschlammes ist denkbar, erfordert aber einen zusätzlichen Verfahrensschritt (Bild 20), der selbst wieder eine Filtration mit denselben Sedimenteigenschaften und allenfalls einem etwas geringeren Volumenstrom darstellt.

### 3.1.4 Anforderungen an die zu konzipierende Versuchsanlage

#### 3.1.4.1 Korngröße des Filtergutes

Brunner et al. (2002) geben eine Tabelle mit einer Verteilung der partikulären Stoffe im Regenabfluss auf Korngrößen an (Tabelle 1). Demnach ist ein beträchtlicher Teil des Schlammes (AFS) wie auch der Schwermetalle an die sehr feinen Fraktionen gebunden. Man kann nun für eine ideale Filteranlage einen Grenzkorndurchmesser festlegen; je feiner dieser ist, umso höher der Wirkungsgrad. Leider sind es die extrem feinen Fraktionen, die die Belastung ausmachen. Ein bereits recht feiner Grenzkorndurchmesser von  $60 \mu\text{m} = 0,06 \text{ mm}$  beispielsweise würde einen Rückhalt von nur 13 % der AFS erlauben und nur 10 % bei den Schwermetallen. Erst ein Grenzkorndurchmesser von  $6 \mu\text{m}$  würde den Wirkungsgrad auf 62 % bei den AFS und auf 85 % bei den Schwermetallen anheben. Die Tabelle ist die Parametertabelle eines Schmutzfrachtmodells und nicht zwangsläufig auf jeden Standort übertragbar, mag aber als erste Abschätzung gelten. Diese idealisierten Wirkungsgrade durch Entfernen aller Fraktionen gröber als X mm gelten für die gesamte Regenwasserbehandlung, hier also für die Kombination aus Regenbecken plus Filteranlage.

Tabelle 1: Verteilung der partikulären Stoffe im Regenabfluss auf Korngrößen (Brunner et al. 2002, auszugsweise)

Partikuläre Fraktion	AFS	Pb	Cd	Cu	Zn
< 0,006 mm	38 %	15 %	15 %	15 %	15 %
0,006 – 0,06 mm	49 %	75 %	75 %	75 %	75 %
0,06 – 0,15 mm	7 %	10 %	10 %	10 %	10 %
0,15 – 0,35 mm	4 %				
> 0,35 mm	2 %				
Summe	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Die Voruntersuchungen zur Eignung des Standortes der Versuchsanlage am RKB Abelt umfassten auch eine Analyse des dort anzutreffenden Sedimentes und des zu erwartenden Filtergutes. Der im Becken vorgefundene Schlamm wurde dazu zunächst auf seine Korngröße hin untersucht, um einen Eindruck von der Feinheit des Materials zu erhalten. Das geschah mithilfe einer Siebanalyse, bei dem das Material nass durch Normsiebe passiert wurde (Bild 21). Es ergab sich auch hier ein sehr hoher Anteil der feinsten Kornfraktion < 0,063 mm, der in der gleichen Größenordnung wie in Tabelle 1 liegt.

Auch Fuchs und Lambert (2006) haben bei Sediment aus dem Oberflächenabfluss eines Trennsystems in Ostberlin diesen Anteil an Feinstmaterial gefunden. In dieser Quelle wird als Grund für diese „Grobstoffabreicherung“ eine Vorbehandlung durch Absetzen im Kanalnetz vermutet, d.h. gröbere Partikel erreichen das RKB gar nicht. Sanddepots im Kanal wurden am Standort Abelt nicht beobachtet. Wahrscheinlich werden aber im Kanal abgesetzte Sedimente bei kleinen Regen, bei denen der Kanal noch nicht einstaut, zum RKB transportiert und dann von dort durch das häufige Abpumpen zur Kläranlage gefördert. Im Becken kommt dann bei längerem Beckeneinstau auch das vorgefundene Feinmaterial zum Absetzen.

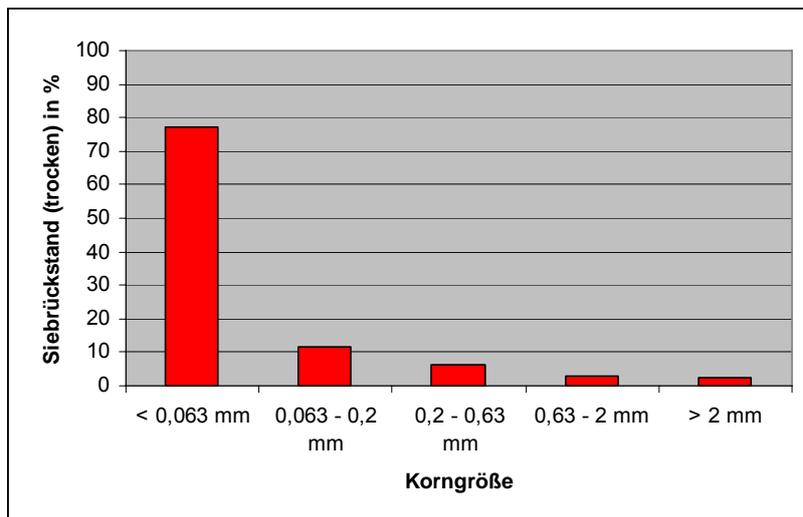


Bild 21: Siebanalyse einer Schlammprobe aus dem RKB Abelt vom 17.03.2004. Das Material weist einen relativ hohen Feinanteil auf.

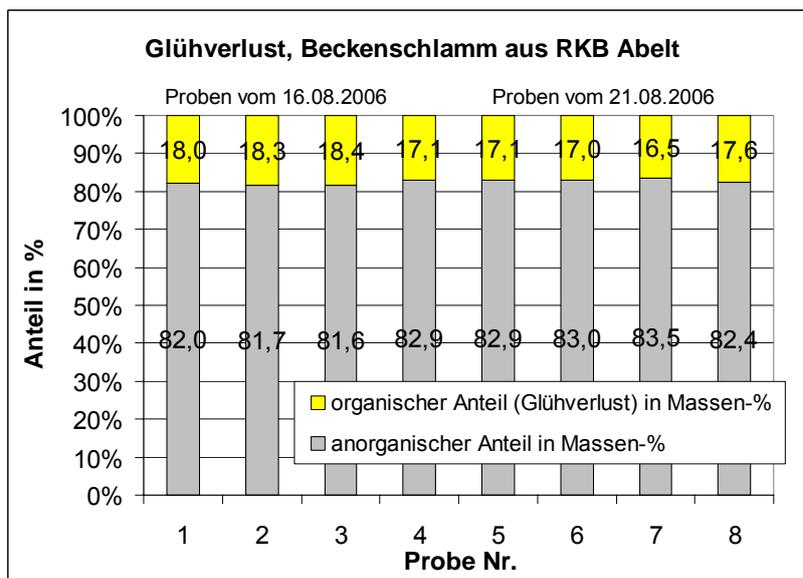


Bild 22: Glühverlust des Beckenschlammes aus dem RKB Abelt

Bild 22 zeigt, dass der organische Anteil im Sediment relativ gering ist. Der Glührückstand, auch Glührückstand, auch Glührückstand genannt und in Anlehnung an DIN 38 409 Teil 2 (1987) ermittelt, beträgt 17-18 %. Es handelt sich damit also in erster Linie um mineralische Schluff- und Tonfraktionen, also um Staub. Organisches Material spielt eine nur geringe Rolle; in wieweit dies an dem Standort jahreszeitlich unterschiedlich ist (Blütenstaub im Frühling), wurde noch nicht untersucht.

Die Filteranlage filtert jedoch nicht das bereits im RKB abgesetzte Material, vielmehr ist von noch feineren Fraktionen auszugehen, die sich im Becken trotz längerer Aufenthaltszeit eben nicht abgesetzt haben. Eine granulometrische Bestimmung einer maßgebenden Korngröße ist hier schwierig, weil sich solch feines Material nicht mehr sieben lässt; außerdem spielen Flockungsvorgänge eine große Rolle.

Für den zu wählenden Grenzkorndurchmesser für die Auslegung der Filteranlage lässt sich nun eigentlich die Forderung stellen, je feiner, desto besser. Wählt man eine Maschenweite des Filters von etwa  $50 \mu\text{m} = 0,05 \text{ mm}$  oder noch etwas feiner, ist dies ein Kompromiss; einerseits sind von vornherein keine sehr guten Wirkungsgrade zu erwarten, andererseits gilt es zwischen dem erreichbaren Durchsatz und dem technischen Aufwand für die Abreinigung, den Filterträger usw. bei noch feinerem Filtermaterial abzuwägen.

### Abfiltrierbare Stoffe im Regenwasserkanal der Trennkanalisation, Welt

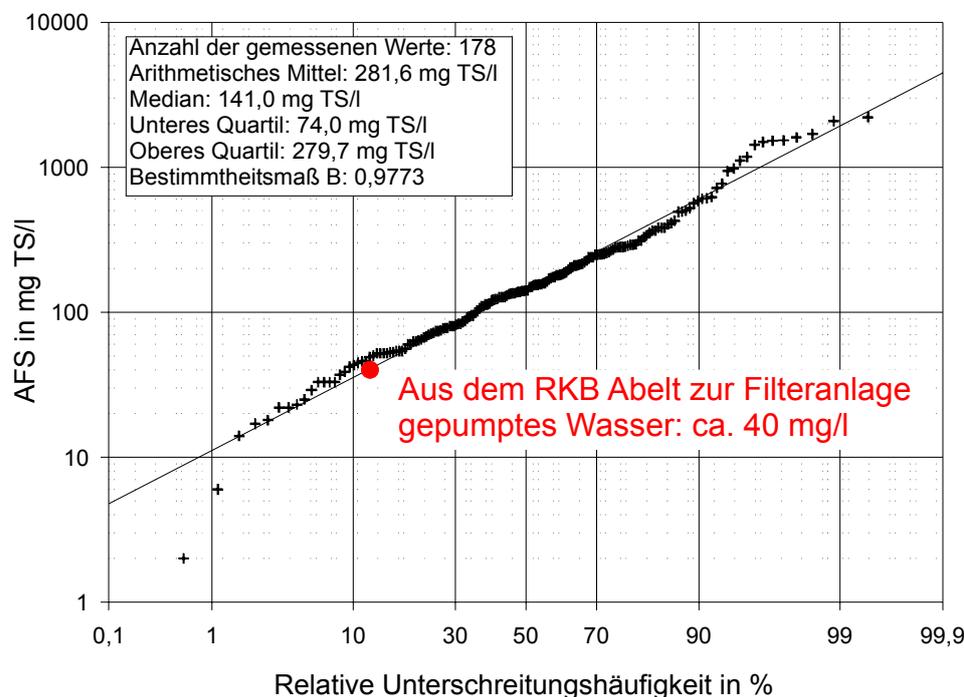


Bild 23: Verglichen mit weltweiten Daten über die Konzentration abfiltrierbarer Stoffe im Regenwasserkanal von Trennsystemen ist das aus dem RKB Abelt zur Filteranlage gepumpte Regenwasser (also vom „Klärüberlauf“ des RKB nach Behandlung durch Absetzen) recht gering verschmutzt.

Die zu erwartenden Konzentrationen an Filtergut sind relativ klein. Im Becken abgesetztes Wasser, wie es später in die Filteranlage gepumpt wird, hat typischerweise Feststoffgehalte (AFS) in der Größenordnung von 30-40 mg/l, wenn untypische Betriebsfälle wie das Einleiten von Baugrubenwasser ausgeklammert werden. Verglichen mit Werten aus dem ATV-Datenpool (Brombach und Fuchs 2002) für die Feststoffe im Regenwasserkanal des Trennsystems ist diese Konzentration recht gering infolge der guten Absetzwirkung des Regenklärbeckens (Bild 23).

***Die geplante Filteranlage muss also für sehr feines Material – Korngröße < 50 µm – geeignet sein, die Zulaufkonzentrationen liegen in der Größenordnung von 40 mg/l AFS.***

#### **3.1.4.2 Erforderlicher Filterdurchsatz und erste Gedanken zu einem Bemessungsverfahren**

Eine weitere Randbedingung ist der erreichbare Filterdurchsatz. Für die spätere Anwendung ist diese Größe ausschlaggebend. Im Rahmen des Forschungsprojektes stand jedoch nicht die Frage nach einer optimalen Nachrüstung des Regenklärbeckens Abelt im Vordergrund, also welche Durchsatzleistung an diesem Standort zur Minimierung der Gewässerbelastung zu wählen sei, sondern die generelle Verwendbarkeit des Filters. Man konnte daher die Versuchsfilteranlage im Hinblick auf ihre Handhabbarkeit auslegen und den damit erreichbaren Durchsatz „hinnehmen“. Auch sehr kleine Durchflüsse ermöglichen das Leerwirtschaften des RKB über mehrere Tage.

Um eine Vorstellung über einen am Standort Abelt notwendigen bzw. wünschenswerten Filterdurchsatz zu erhalten, wurde zu Beginn des Projektes eine hydrologische Simulation für das Einzugsgebiet und das RKB im Abelt durchgeführt. Dazu wurde das Becken ohne Dauerstau angesetzt; es wird entweder mit den vorhandenen Entleerungspumpen oder aber durch die Filteranlage entleert. Als Niederschlagsbelastung diente eine synthetische Langzeitreihe der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. Die Filteranlage wird mit einer konstanten Wassermenge beschickt, sobald das RKB eine bestimmte Füllung hat. Die Entleerungspumpe des RKB ist gleichfalls mitzusimulieren. Sie schaltet angenommenermaßen nach 1 Tag Trockenwetterabfluss ein. Auch ein geringer Fremdwasserzufluss wurde berücksichtigt (Bild 24).

Die Simulation ergab in mehreren, hier nicht dargestellten Vergleichsläufen, dass am RÜB Abelt selbst ein sehr geringer mittlerer Filterdurchsatz von  $Q < 2$  l/s den Schmutzrückhalt gravierend verbessern würde. Bedingung ist dafür jedoch ein Dauerbetrieb der Filteranlage, die im oben simulierten Monat während fast 65 % der Gesamtzeit läuft.

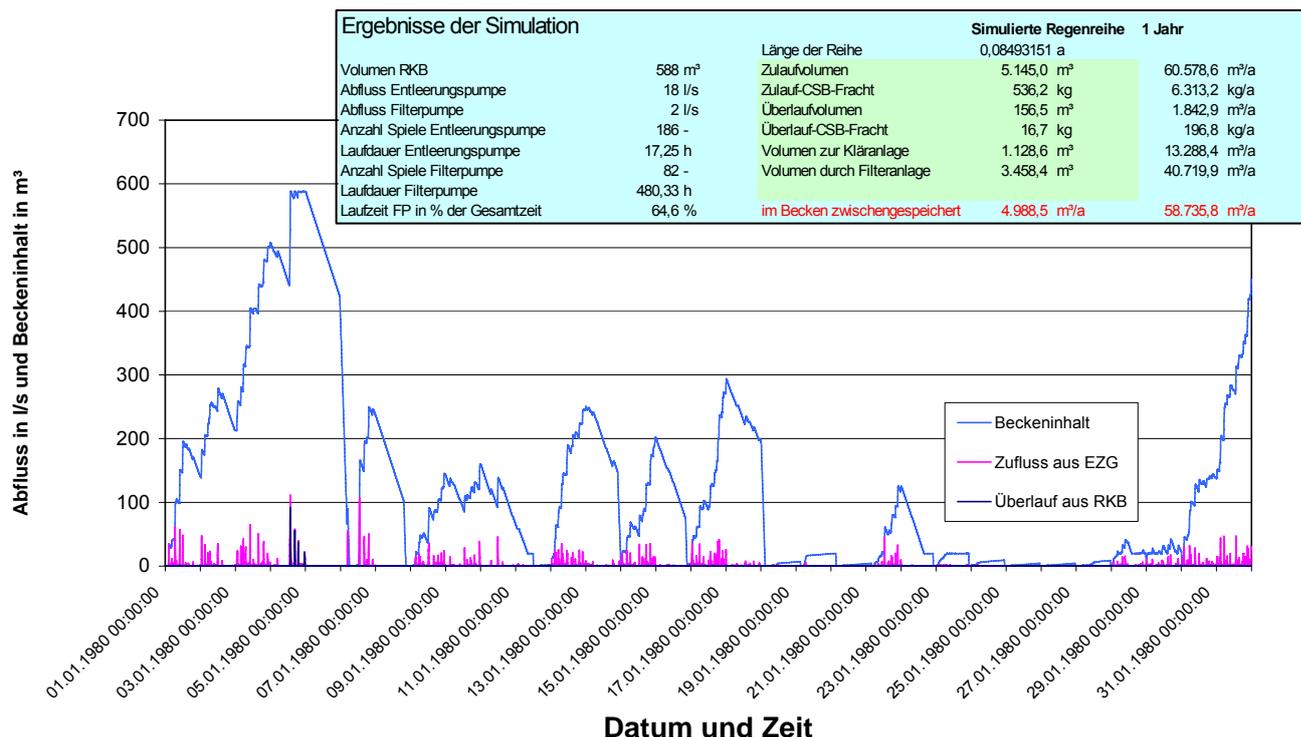


Bild 24: Simulation des bestehenden RKB Abelt mit einer Filteranlage, hier für nur 2 l/s Durchsatz. Zur Demonstration nur 1 Monat Simulationszeit. Die durch den Filter geleitete Wassermenge (3458,4 m<sup>3</sup>) ist sehr viel größer als die unbehindert überlaufende (156,5 m<sup>3</sup>) und auch größer als die von den vorhandenen Entleerungspumpen zur Kläranlage geleitete Wassermenge (1126,6 m<sup>3</sup>).

Die Frage nach einem einfachen Bemessungsverfahren für die Filteranlage, also nach dem zu wählenden Filterdurchfluss in Abhängigkeit der Kennzahlen des Einzugsgebietes, des vorhandenen Beckens, usw. konnte im vorliegenden Projekt vorerst nur grob untersucht werden.

Was bei Regenüberlaufbecken im Mischsystem die Kläranlage, ist bei RKB im Trennsystem mit Filteranlage diese Filteranlage: durch sie wird der Beckeninhalt gereinigt und gelangt dann in das Gewässer. Wie beim Mischsystem ist auch hier davon auszugehen, dass die Idee unwirtschaftlich sein dürfte, das gesamte Regenwasser der Filtration zuzuführen. Auch bei Regenklärbecken wird man also – wie im Arbeitsblatt A 128 (1992) – eine gewisse Entlastungsrate  $e_0$  zulassen müssen: Bei Starkregen springt der Überlauf des RKB an und Regenwasser gelangt dann unter Umgehung des Filters in das Gewässer.

Für eine erste Abschätzung der Größenordnung des erforderlichen Filterabflusses kann ein Vergleich zwischen mechanischer Filteranlage und einem Retentionsbodenfilter dienen. Ein Direktvergleich ist schwierig, weil es sich beim RKB mit nachgeschaltetem Bodenfilter um hintereinandergeschaltete Speicher handelt; der RBF wird beim Überlaufen des vorgeschalteten RKB befüllt. Außerdem ist er mit Rücksicht auf die beschränkte Stapelhöhe (Filterflächenbelastung) zu bemessen. Der Drainageabfluss beim RBF liegt nach DWA-A 178 (2005) bei ca. 0,02 l/(s·m<sup>2</sup>) und die mittlere Stapelhöhe bei z.B. 40 m/a, wobei aber auch im Trennsystem nicht das gesamte Regenwasser den Filter passiert. Setzt man z.B. (wie bei RBF im Mischsystem) 50 % Ent-

lastungsrate der Vorstufe an, so ist für den Bodenfilter bei z.B. 500 mm abflusswirksamem Jahresniederschlag eine Grundfläche von  $62,5 \text{ m}^2/\text{ha}_u$  erforderlich und damit ein Drainageabfluss an gefiltertem Wasser von  $1,25 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{ha}_u)$  bezogen auf die undurchlässige Einzugsgebietsfläche. Mit diesem spezifischen Filterdurchsatz ist es also möglich, das Speichervolumen (hier RKB + RBF) abzuwirtschaften. Dabei ist noch zu berücksichtigen, dass der RBF zur Vermeidung von Kolmation zeitweise trockenfallen muss und deshalb recht schnell entleert werden muss. Der Drainageabfluss ist hier also größer als er es rein hydrologisch gesehen sein müsste.

Als erste Näherung könnte man also auch bei einem mechanischen Filter einen Filterdurchsatz von größenordnungsmäßig etwa  $1 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{ha}_u)$  ansetzen, um damit das Regenklärbecken erfolgreich abzuwirtschaften, d.h. einen Großteil des jährlichen Niederschlagsdargebotes durch Filtrieren behandeln zu können. Anders als ein Retentionsbodenfilter lässt sich ein mechanischer Filter als technische Anlage aber in einem wesentlich breiteren Bereich der jährlich abzuwirtschaftenden Wassermenge betreiben.

Ein anderer Ansatz ergibt sich durch das bekannte Diagramm nach ATV-A 128 (1992), das den Zusammenhang zwischen Drosselabfluss (hier: Filterdurchsatz), spezifischem Volumen des Beckens und der Entlastungsrate wiedergibt (Bild 25). Wie gesagt, verhält sich das RKB mit Filteranlage hydrologisch gesehen wie ein RÜB im Mischsystem. Das Diagramm ist also auch hier anwendbar. Weil der Trockenwetterabfluss entfällt, ist die Regenabflussspende  $q_r$  hier gleich dem Filterdurchsatz bezogen auf die undurchlässige Einzugsgebietsfläche.

Das Diagramm zeigt, dass bei einem mäßig großen spezifischen Speichervolumen des RKB von etwa  $V_s = 20 \text{ m}^3/\text{ha}$  die genannte

Regenabflussspende von  $q_r = 1 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{ha}_u)$  zu einer Entlastungsrate von  $e_0 = 43 \%$  führt. 43 % des Regendargebotes würden dann also am RKB direkt entlasten und 57 % den Filter passieren.

Für die Prototypanlage sind die entsprechenden Werte  $A_U = 7,9 \text{ ha}$  und  $V_s = 84,1 \text{ m}^3/\text{ha}$ ; wie oben angesetzt ergibt sich bei  $Q = 2 \text{ l/s}$  die Regenabflussspende zu  $q_r = 0,253 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{ha})$ . Diese Werte sind wegen des sehr großen spezifischen Volumens weit außerhalb des Diagramms Bild 25. In ATV-A 128 (1992) sind jedoch extrapolierbare Formeln angegeben, mit denen sich die Entlastungsrate zu  $e_0 = 30,2 \%$  abschätzen lässt. Etwa 70 % des jährlich anfallenden Regenwassers würden bei diesen Daten also gefiltert werden.

Für die Anwendung dieses Verfahrens für eine Filteranlage fehlt ein Kriterium, mit dem man die zulässige Entlastungsrate  $e_0$  bestimmen kann. Dies kann im Rahmen des vorliegenden Projektes noch nicht erarbeitet

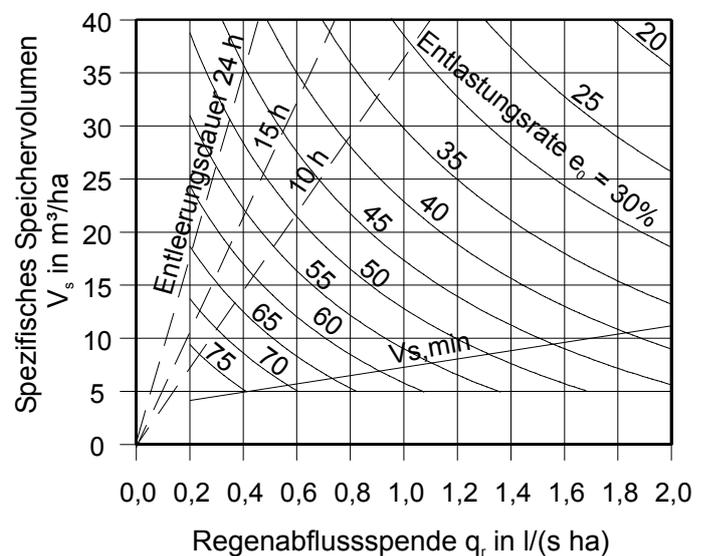


Bild 25: Das Diagramm aus ATV-A 128 (1992) lässt sich auch zur Ermittlung des erforderlichen Filterdurchsatzes verwenden.

werden. Insgesamt erscheinen die genannten 2 l/s als wünschenswerten Filterdurchsatz für die Prototypanlage Abelt aber als vernünftige Größenordnung.

***Die geplante Filteranlage benötigt nur einen geringen Filterdurchsatz (im zeitlichen Mittel wären für diesen Standort  $Q = 2$  l/s wünschenswert, für die Prototypanlage muss jedoch der tatsächlich erreichbare Wert hingenommen werden). Die Filteranlage ist aber für Dauerbetrieb auszulegen.***

### 3.1.4.3 Filterfläche und Druckbeschickung

Das sehr feine Filtergut lässt auf eine sehr geringe Filterdurchlässigkeit schließen. Um den geforderten Durchsatz einhalten zu können, auch wenn dieser recht gering ist, kann man entweder die Filterfläche groß machen, so dass eine Beschickung ohne zusätzlichen Druck möglich ist, oder aber man beschickt den Filter mit einer Pumpe mit Druck und kommt dann mit einer geringeren Filterfläche aus.

Erste Vorüberlegungen zur Zeit des Projektantrages gingen zunächst dahin, im RKB einen großflächigen Filterboden mit 50 – 100 m<sup>2</sup> Fläche einzubauen, der dann mit 20-30 cm Überstau betrieben würde. Darunter würde eine Drainageschicht den Ablauf des Klarwassers ermöglichen. Als Filtermedium könnte dann ein preiswertes Vlies verwendet werden, das mitsamt dem Filtergut – und in diesem Fall sogar samt dem im RKB abgesetzten Sediment – entsorgt würde. Die Idee wurde jedoch wieder fallen gelassen, weil das regelmäßig nötige Auswechseln der dann sehr großflächigen Filtervliesbahnen sehr personalintensiv wäre und auch weil die Dichtheit zwischen den Filterbahnen gewährleistet sein muss, um Umläufigkeit zu vermeiden. Schließlich würde ein solches Konzept auch größere Umbauarbeiten mit sich bringen und wäre nicht bei jedem Regenklärbecken anwendbar.

Die Alternative – weil universeller anwendbar – ist eine kleine Filteranlage, die man flexibel neben dem RKB aufstellen kann, die aber dann mit einer Pumpe beschickt werden muss. Andererseits ist es dann möglich, ohne großen Mehraufwand auch mit relativ hohen Drücken zu arbeiten. Die Wahl fiel auf eine Filterfläche von 1,5 m<sup>2</sup> für die Prototypanlage und eine Beschickung mit bis zu 7 mWS Vordruck.

***Die Filteranlage ist für Druckbeschickung auszulegen, die Filterfläche kann dafür relativ gering gehalten werden (ca. 1,5 m<sup>2</sup>).***

### 3.1.4.4 Wohin mit dem Filtergut?

Lösungen, bei denen das Filtergut herausgenommen wird und dann z.B. in einem Container entsorgt werden kann, wären hier grundsätzlich möglich gewesen. Bei der technischen Konzeption der Filteranlage wurde jedoch aus anderen Gründen die diskontinuierliche Abreinigung durch Rück- und Abspülen favorisiert; diese Technik führt zu „dünnem“ Filtergut, also viel Wasser und wenig Filtergut. Um einen weiteren Trennprozess zu vermeiden, wurde hier das Filtergut in das RKB zurück gegeben, es wird also mit dem Schlamm aus dem RKB zusammen entsorgt. Diese Lösung ist hier möglich; dies dürfte aber auch für viele andere Regenklärbecken im Trennsystem zutreffen, so dass diese Betriebsweise nicht allzu untypisch ist. Das Filtergut mischt

sich dabei freilich mit dem noch nicht gefilterten RKB-Inhalt, so dass unter ungünstigen Umständen Filtergut „im Kreis gepumpt“ wird, doch konnte dies hier für die Versuchsanlage in Kauf genommen werden.

***Das Filtergut kann am Standort Abelt in das RKB zurückgegeben (oder aber alternativ auch herausgenommen) werden.***

#### **3.1.4.5 Handhabbarkeit und Robustheit**

Im Hinblick auf einen späteren Einsatz einer solchen Filteranlage unter widrigen Bedingungen (z.B. vernachlässigte Wartung) war eine Grundforderung die nach einfachem Aufbau (wenig Sekundäranlagen wie Rückspüleinrichtungen etc.) und einer robusten Konstruktion. Die Größe der Filteranlage ist ein Kompromiss zwischen der Handhabbarkeit im Betrieb und dem erreichbaren Durchsatz. Die gewählte Filterfläche von 1,5 m<sup>2</sup> erfordert bei einem stehend angeordneten Filterzylinder eine Anlage von etwa 2,5 m Höhe und 80 cm Durchmesser des äußeren Gehäuses. Die Filteranlage kann zwar als Ganzes transportiert und aufgestellt werden, ist aber in der Praxis bereits recht sperrig. Ungünstig ist insbesondere, dass zum Wechseln des Filtergewebes ein Hebezeug zur Verfügung stehen muss. Für den Versuchsbetrieb erschien es als tolerierbar.

Die Versuchsanlage sollte von vornherein aus rostfreiem Edelstahl bestehen, um Probleme durch Rost zu vermeiden und um in fortgeschrittenen Projektstadien auch Schwermetallanalysen zuzulassen.

Die Konstruktion der Versuchsanlage sollte einen flexiblen Einsatz und auch eventuelle Umbauten ermöglichen, zumal zu Beginn der Konstruktionsarbeiten einige Punkte (z.B. die Frage „Wohin mit dem Filtergut?“) noch nicht endgültig festgelegt waren. Insgesamt erhebt das Forschungsprojekt noch nicht den Anspruch einer umfassenden Optimierung; die Filteranlage braucht also keinesfalls praxisreif im Sinne eines marktfähigen Produktes zu sein. Vielmehr gilt es zunächst das Potential der technischen Filtration aufzuzeigen und grundsätzliche Randbedingungen für den Einsatz zu ermitteln.

***Die Filteranlage sollte einfach aufgebaut, robust und im Rahmen des Versuchsbetriebes flexibel einsetzbar, aber auch bei Bedarf leicht umzubauen sein. Praxisreife wird hingegen nicht angestrebt.***

#### **3.1.5 Gewählte Konzeption der Filteranlage**

Es wurde schließlich folgende Konzeption für die VersuchsfILTERanlage getroffen:

**Oberflächenfilter mit textilem Filtermaterial; Maschenweite in der Größenordnung von 50 µm (später 36 µm); Druckbeschickung und automatischer periodischer (diskontinuierlicher) Abreinigung**

Die Wahl eines Oberflächenfilters erfolgte aus dem Argument heraus, dass eine automatische Abreinigung auf einfache Weise möglich sein sollte und hierfür auch noch mehrere Techniken zur Verfügung stehen bzw. erprobt werden konnten. Gewählt wurden schließlich das Rückspülen von der sauberen zur verschmutzten Seite und gleichzeitiges oberflächliches Abspülen mit zusätzlichem Bürsten der verschmutzten Seite. Auch das Filtermedium lässt sich einfach wechseln. – Eine Volumenfiltration böte zwar möglicherweise Vorteile im Hinblick auf den erreichbaren Durchsatz, bedingte aber entweder ein häufiges Wechseln des Filtermediums

oder aber eine aufwändige Rückspülung (wie bei einem Sandfilter) und schied deshalb bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt aus.

Textiles Filtermaterial wurde wegen der Vielfalt der am Markt erhältlichen Gewebe und Vliese gewählt. Die Filteranlage lässt sich so ohne großen Aufwand auf ein anderes Gewebe, etwa mit engeren Maschen, umstellen.

Die gewählte Maschenweite von etwa 50  $\mu\text{m}$  = 0,05 mm (später 36  $\mu\text{m}$ ) ist, wie bereits erwähnt, ein Kompromiss zwischen der Feinheit der Filtration und dem erreichbaren Durchsatz und dem technischen Aufwand.

Druckbeschickung ist wegen der geringen Durchlässigkeit und der begrenzten Filterfläche ohnehin erforderlich. Filtertechniken mit einem Auswechseln z.B. eines preiswerten Filtervlieses statt einer Abreinigung sind bei Druckbeschickung allerdings schwierig zu realisieren und schieden dadurch aus.

Die periodische Abreinigung wurde wegen der gewählten Reinigungstechnik favorisiert, weil dann zur Abreinigung die Anlage durch Abschalten der Beschickungspumpe und Ablassen des Wassers drucklos gemacht werden kann. Rückspülen (mit einem auf der sauberen Filterseite gespeicherten Vorrat an gefiltertem Wasser) und oberflächliches Abspülen sind so auf einfache Weise möglich und die Mechanik ist relativ einfach.

Bild 26 zeigt die Betriebsweise des RKB Abelt nach der Ausrüstung mit einer Filteranlage. Verschmutztes Oberflächenwasser aus dem Regenklärbecken wird mit einer Pumpe durch den Filter gefördert; die Steuerung der Pumpe erfolgt abhängig vom Beckenwasserstand. Nach Passage des Filters ist dieses Wasser sauber und kann dann direkt zur Tauber geleitet werden. Weil die Filterpumpe kontinuierlich arbeiten kann, bedeutet diese Betriebsweise einen Wechsel vom Fang- zum Durchlaufbecken. Kleinere Regen führen dann gar nicht zum Überlaufen des Beckenüberlaufes, so dass sich dort die Entlastungsfracht stark verringert. Bei Starkre-

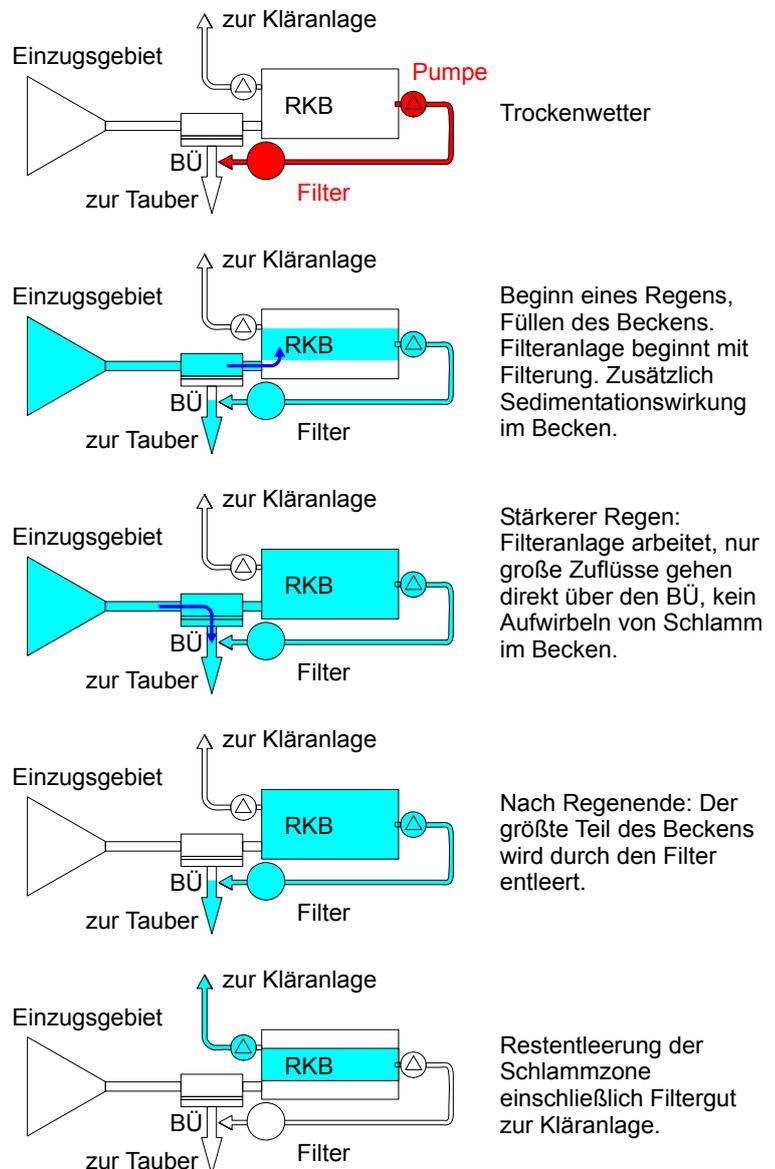


Bild 26: Durch Nachrüstung einer Filteranlage wird das Fang- zum Durchlaufbecken

gen springt der vorhandene BÜ jedoch nach wie vor an und leitet große Zuflüsse am Becken vorbei, so dass dort kein Schlamm aufgewirbelt wird. Nach Regenende kann das Becken nun zum großen Teil durch die Filteranlage in Richtung Gewässer entleert werden, die Schlammzone wird, wie bisher, zur Kläranlage hin entleert.

Für den erreichbaren Rückhaltewirkungsgrad für Schadstoffe ist diese Anordnung sehr viel besser als das ursprüngliche Fangbeckenkonzept. Dort wäre ja nach Füllung des Beckens jeglicher auch noch so kleine Zufluss ohne jede Behandlung in die Tauber gelangt. Mit Filteranlage übernimmt Letztere die Funktion des Klärüberlaufes.

## 3.2 Laborexperimente mit Filtergeweben

In einer ersten Projektphase wurden umfangreiche Laborexperimente mit verschiedenen Filtermaterialien durchgeführt, um ihre Eignung für die geplante Filteranlage zu überprüfen.

### 3.2.1 Untersuchte Arten von Filtergeweben

Textile Filtermaterialien gibt es von vielen Herstellern. Die wichtigsten Merkmale sind die Maschen- oder Porenweite und der Porenanteil. Ebenso wichtig sind jedoch im Hinblick auf die Abreinigung (eventuell durch Bürsten oder Rakeln) die mechanische Festigkeit des Gewebes, das Material und die Herstellungsart. Einige wichtige Typen von Filtertextilien sind die Folgenden:

Vliese („Nonwoven“) sind textile Flächengebilde aus Fasern, deren Zusammenhalt durch die Faserhaftung gegeben ist. Vliese haben keine definierte Porengröße. Bei dickeren Vliesen werden zu filtrierende Teilchen auch in der Tiefe des Filters zurückgehalten. Es gibt auch sehr feine und dünne Vliese, die sich wegen ihrer geringen Kosten auch für eine Wegwerflösung eignen, bei der das Filtertextil zusammen mit dem Filtergut entsorgt wird.

Gewebe („Woven“) bestehen aus sich rechtwinklig kreuzenden Fäden (Schuss und Kette) in verschiedenen Webarten (Leinwandbindung, Atlasbindung, Körperbindung). Es ergeben sich definierte Maschengrößen. Gewebe arbeiten in der Regel als Oberflächenfilter.

Polstoffe sind mit einem Webpelz vergleichbar, bestehen also aus einem Gewebe mit darauf befestigten Polfasern. Diese Fasern legen sich während des Filterns flach auf den Träger und bilden ein filziges Fasergewirr



Bild 27: Gewebe in 5-Schaft-Atlasbindung, wie sie die schließlich in die Versuchsanlage eingebauten Filtergewebe aufweisen (Quelle: [www.solidweave.de](http://www.solidweave.de), besucht am 31.10.2007)

mit sehr kleinen Porengrößen. Abgereinigt werden sie mithilfe einer Saugvorrichtung, wodurch sich die Fasern aufstellen und das Filtergut abgezogen wird.

Weiterhin unterscheiden sich die Filtertextilien nach ihrem Material. Vliese bestehen in der Regel aus Kunstfasern; kompostierbare Naturfasern wären z.B. bei Wegwerfvliesen interessant. Gewebe gibt es in Edelstahl wie natürlich auch aus Kunststoff, wobei die mechanische Festigkeit variiert. Interessant waren für die vorliegende Aufgabenstellung vor allem Gewebe mit kleinen Maschen, die aber wegen der vorgesehenen Bürstenabreinigung mechanisch robust sind. Kunstfasergewebe oder –Vliese können weiterhin auch noch in verschiedener Weise obeflächenbehandelt sein, z.B. durch Kalandrieren, bei dem das Material über eine erhitzte Walze läuft. Dadurch wird ein Zusammenschweißen der Fasern und/oder ein Verengen der Poren erreicht.

### 3.2.2 Versuche zur Ermittlung der Durchlässigkeit

Zunächst wurden einige in die engere Wahl gezogene Gewebe in einem Versuchsstand gemäß Bild 28 auf ihre Durchlässigkeit mit und ohne Filtergut getestet. Es wurde der Druckverlust in Abhängigkeit vom Durchsatz bestimmt. Neben dem „sauberen“ Zustand konnte durch Zugabe definierter Mengen Schlammes aus dem RKB Abelt auch die Durchlässigkeit eines belegten Filters mit unterschiedlicher Kuchenstärke ermittelt werden.

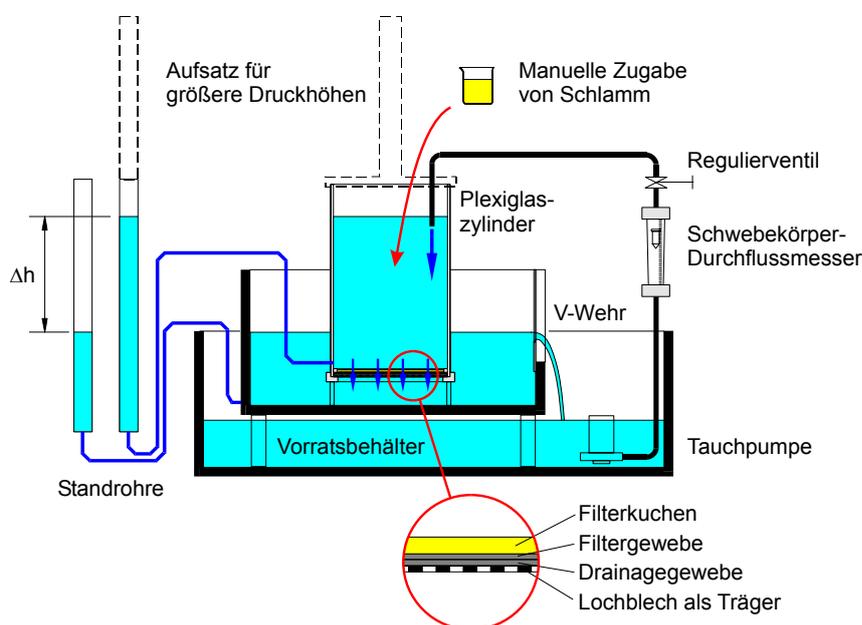


Bild 28: Versuchsapparatur zur Ermittlung des Druckverlustes an sauberen und belegten Filtergeweben

Die Apparatur kann auf mehrere Arten betrieben werden. Bei relativ großem Filterdurchsatz  $Q$  läuft die Pumpe kontinuierlich und der Abfluss wird am Ventil manuell eingeregelt, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Abfluss und Wasserstands-differenz  $\Delta h$  können dann gemessen werden. Bei Versuchen mit Filterkuchen ist der Durchsatz sehr klein. Es wird dann vorsichtig der Behälter maximal aufgefüllt, die Pumpe abgestellt und das Absinken des Wasserstandes mit der Zeit gemessen. Der Filterdurchsatz  $Q$  errechnet sich für jedes Zeit-

intervall aus dem Absinken des Wasserspiegels mal der Zylinderfläche. Er wird auch hier der Wasserspiegeldifferenz  $\Delta h$  zu diesem Zeitpunkt gegenüber gestellt.

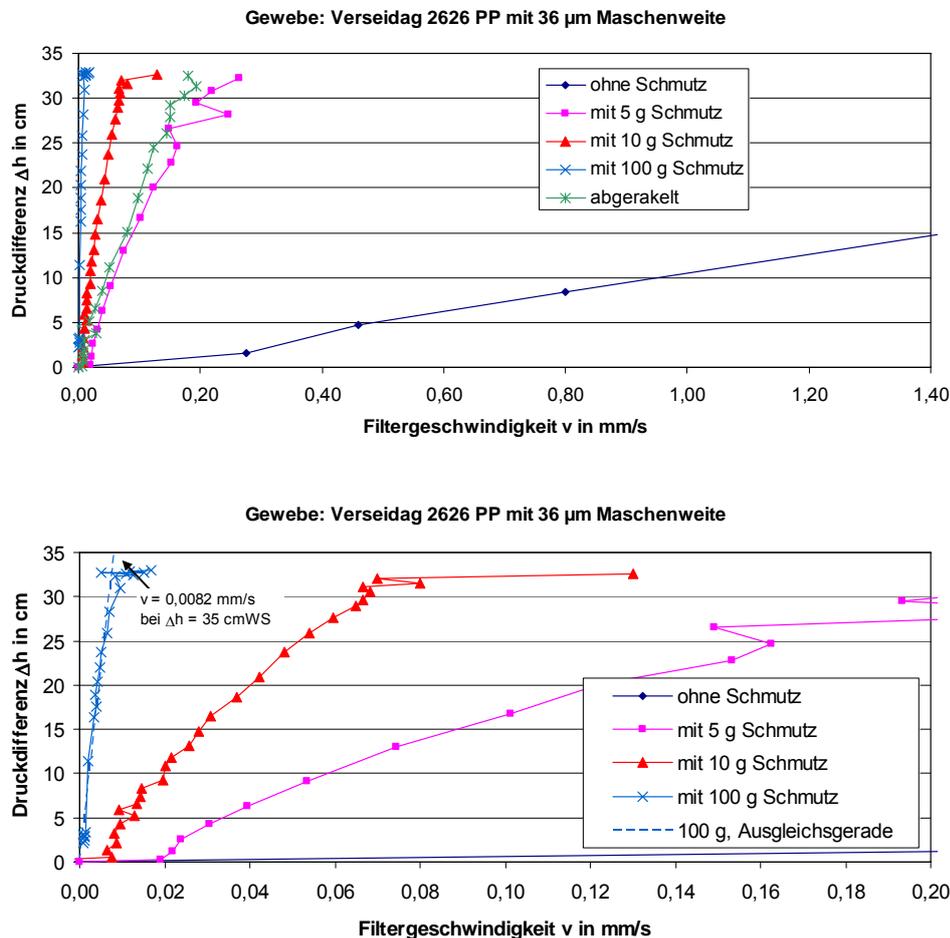


Bild 29: Durchsatzrate als Funktion der Druckdifferenz  $\Delta h$ . Gezeigt ist zweimal dasselbe Diagramm mit unterschiedlicher Skalierung der Abszisse.

In Bild 29 oben erkennt man, dass bereits ein geringfügiger Filterkuchenaufbau den Durchsatz drastisch verringert. Erwartungsgemäß ergaben sich dabei bei unterschiedlichen Filtergeweben keine signifikanten Differenzen in der Durchlässigkeit, sobald Filterkuchen vorhanden ist – dies bestätigt den theoretischen Ansatz aus Kap. 3.1.2. Mit Filterkuchen ergibt sich außerdem eine fast lineare Abhängigkeit des Durchsatzes von der Druckhöhe, auch dies in Übereinstimmung mit der Theorie.

Die Versuche zeigten eine sehr geringe Durchlässigkeit bei Belegung mit Filtergut. Mithilfe der Ergebnisse der Versuche lassen sich die Kennzahlen der theoretischen Ansätze aus Kap. 3.1.2 nun größenordnungsmäßig abschätzen; eine Kalibrierung der Theorie ist nicht angestrebt, zumal die zugegebene Schlammmenge nur ungenau ermittelt werden konnte (nicht reproduzierbarer Wassergehalt). Wegen der großen experimentellen Streuung soll dieses nur für die Kurve mit 100 g Schmutz aus Bild 29 unten gezeigt werden. Bei  $\Delta h = 35 \text{ cm}$  Druckdifferenz ist der Durchsatz (= Filtergeschwindigkeit) nur  $Q = v = 0,0082 \text{ mm/s} = 0,0082 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ . Mit Gl. (6) ergibt sich  $k_f / s = v / \Delta h = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Die Schichtdicke des Filterkuchens bei Zugabe von 100 g nassem Schlamm in die Versuchsapparatur (Fläche  $A = 0,068 \text{ m}^2$ ) kann man abschätzen, indem man für die Feststoff-

fe eine Dichte von  $2650 \text{ kg/m}^3$  ansetzt und einen Gehalt an wassergefüllten Poren von 60 %. Das ergibt eine Dichte von  $2650 \cdot 0,4 + 1000 \cdot 0,6 = 1660 \text{ kg/m}^3$ . Die Schichtstärke ist dann  $s = (0,1 \text{ kg} / 0,068 \text{ m}^2) / 1660 \text{ kg/m}^3 = 0,88 \text{ mm}$ . Rechnet man schließlich aus diesen Daten auch noch den Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  zurück, ergibt sich  $k_f = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \cdot 8,8 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ . Das ist ein extrem kleiner Wert, der die ursprünglich abgeschätzten  $k_f = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  deutlich unterschreitet. Eine Reihe weiterer, hier nicht gezeigter Versuche ergaben jedoch günstigere Werte für  $k_f$ .

Ein belegter Filter hat bei geringer Druckhöhe also eine außerordentlich kleine Durchsatzleistung. Setzt man diese ungünstigen Werte als Eckparameter an, benötigt man für z.B. 10 l/s Durchsatz und eine Druckdifferenz von 35 cm eine riesige Filterfläche von  $1220 \text{ m}^2$  – die Größe eines Retentionsbodenfilters. In einer Maschine ist diese Filterfläche mit vertretbarem Aufwand nicht unterzubringen. Bei Druckbeschickung erhielten wir wegen der Linearität von Gl. ( 6 ) beim zehnfachen Druck (3,5 m) ein Zehntel der Fläche, das sind immer noch  $122 \text{ m}^2$ . Erst bei erheblichen Zulaufdrücken von  $35 \text{ mWS} = 3,5 \text{ bar}$  reduziert sich die Fläche auf erträgliche  $12,2 \text{ m}^2$ .

Der gebaute Filterprototyp hat eine Filterfläche von  $1,5 \text{ m}^2$  und erreicht mit den obigen Daten bei Belegung und Druckbeschickung mit  $6,5 \text{ mWS}$  rechnerisch  $0,22 \text{ l/s}$  an Durchsatzleistung. Vorab erschien dieser errechnete Wert zwar geringer als gewünscht, aber für den Prototypen zunächst ausreichend, zumal keine Mindestdurchsatzmenge gefordert war. Beim Betrieb der Versuchsanlage wurden schließlich etwas größere Durchflüsse erreicht (Kapitel 4).

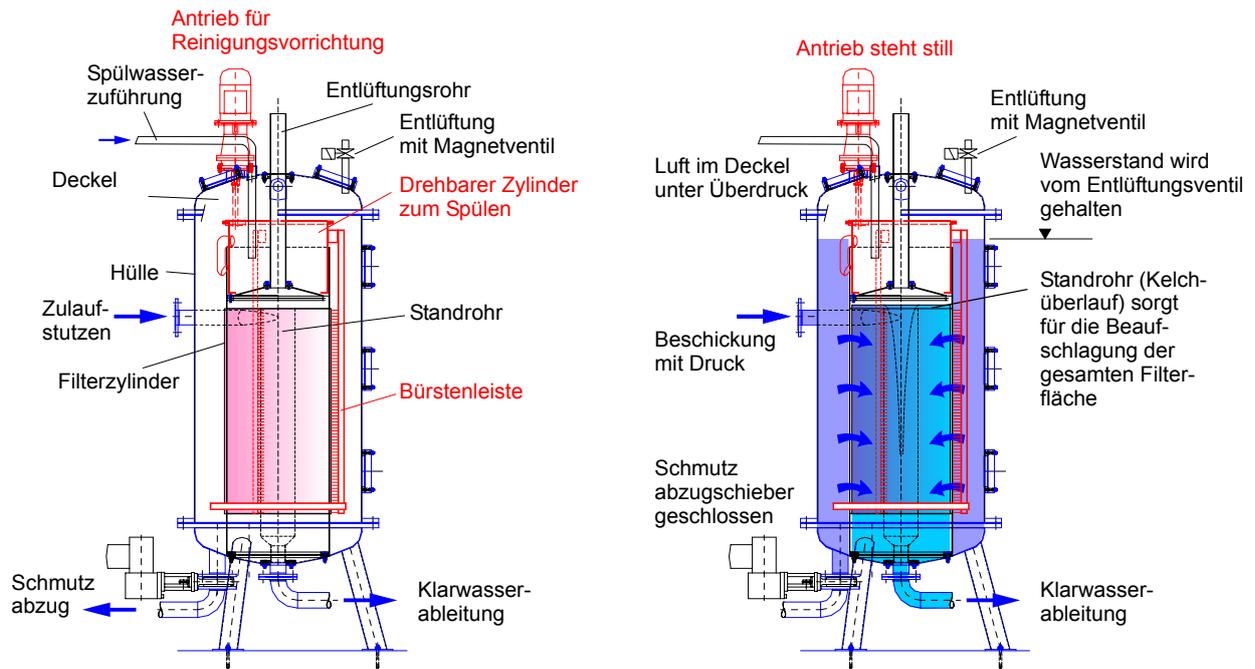
### 3.3 Konstruktion der Versuchs-Filteranlage

Nach umfangreichen Untersuchungen zur Anwendbarkeit verschiedener Beschickungsweisen, Filtermedien und Abreinigungstechniken wurde ein Prototyp gebaut, der folgende Technik nutzt bzw. Eigenschaften hat:

- Filteranlage in Form eines stehenden Zylinders, der von außen nach innen durchströmt wird. Das Filtermaterial ist außen auf einem Lochblechzylinder aufgebracht. Wegen der Druckbeschickung ist ein Mantelbehälter notwendig.
- Brutto-Filterfläche  $1,5 \text{ m}^2$
- Pumpenbeschickung mit einer im RKB angeordneten Tauchpumpe; Druckfiltration mit maximal ca.  $6,5 \text{ m}$  Wassersäule; der Druck kann bei Bedarf auch noch erhöht werden. Der Maximaldurchsatz bei sauberem Filter liegt bei  $8 \text{ l/s}$ .
- Filtermedium: zunächst wurde ein Edelstahl-Tressengewebe mit  $50 \times 70 \mu\text{m}$  Maschenweite verwendet, später Kunststoffgewebe mit  $35 \mu\text{m}$  Maschenweite
- Abreinigung durch Rückspülen des Filters und anschließend Abspülen auf der „schmutzigen“ Seite, gleichzeitig Abbürsten. Das Spülwasser und der Schlamm werden in das RKB zurückgegeben.
- Diskontinuierliche periodische Abreinigung, also Aufeinanderfolgen von Pump- und Abreinigungszyklus. Die Reinigungsintervalle werden nach Maßgabe des Durchsatzes gewählt. Sinkt der Durchsatz bei stärker verschmutztem Wasser sehr schnell ab, wird häufiger abgereinigt.
- Bullaugen zur Inspektion mit drehbaren Scheibenwischern
- Automatische Steuerung (Regelung der Drehzahl der Beschickungspumpe) mit Überwachung von Durchsatz und Druckhöhe
- Datenlogger zur Aufzeichnung aller Betriebsdaten

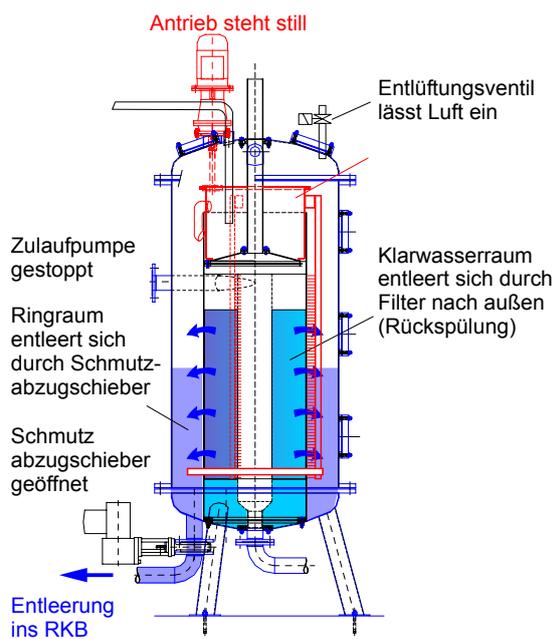


Bild 30 a-d: Die Filteranlage vor Ort

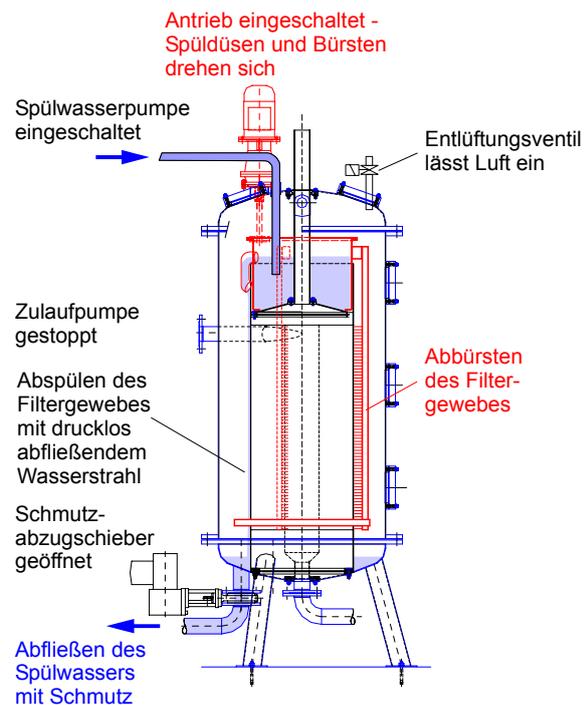


## Aufbau der Filteranlage

## Filtern



## Abreinigen Phase 1



## Abreinigen Phase 2

Bild 31: Aufbau der Filteranlage und Reinigungszyklen

Eine Tauchsonde und eine Druckmessdose registrieren permanent den Wasserstand im Regenklärbecken und die Druckhöhe im Filtergehäuse, ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser (MID) den gepumpten Zufluss. Diese Signale werden zu einer speicherprogrammierbaren Steuerung übermittelt, in der die logischen

Funktionen implementiert sind. Über einen Frequenzumrichter kann die Drehzahl der Beschickungspumpe gesteuert werden, weiterhin wird der Ablassschieber für das Filtergut, eine zweite kleine Pumpe für das Spülwasser sowie der Motor für die Bürstenabreinigung gesteuert sowie ein Magnetventil zur Be- und Entlüftung des Druckgehäuses.

Die Anlage hat die folgende Arbeitsweise: Steigt der Wasserstand im Becken bei Regen über einen bestimmten Wert, wird die Drehzahl der Beschickungspumpe langsam hochgeregelt und das Druckgehäuse der Filteranlage füllt sich. Die Filtration beginnt. Dabei wird ständig der Druck in der Filteranlage überwacht; die Drehzahl der Beschickungspumpe wird so geregelt, dass ein Druck von 6,5 mWS im Normalbetrieb beibehalten wird. Wenn dabei der Durchfluss bei frisch abgereinigtem Filter größer als 8 l/s werden sollte, wird die Drehzahl der Beschickungspumpe verlangsamt. Bei sich zunehmend verlegendem Filter sinkt der Durchsatz allmählich ab. Registriert der MID, dass der Durchfluss eine bestimmte Zeit lang einen Minimalwert nicht mehr überschreitet, startet der Abreinigungszyklus. Dazu wird die Beschickungspumpe abgeschaltet und der Schlammschieber geöffnet, das Filtergehäuse entleert sich. Zusätzlich werden die Spülwasserpumpe und der Bürstenmotor eingeschaltet (Zeitschaltung). Nach Schließen des Schlammschiebers kann der nächste Filterzyklus beginnen.

Die Filteranlage wurde zunächst mehrere Monate lang ausgiebig in der Versuchshalle getestet. Die Beschickung erfolgte mit Klarwasser aus dem Hallenkreislauf, das gefilterte Wasser lief dorthin zurück. Mit einer speziellen Zugabevorrichtung konnte Originalschlamm aus dem RKB Abelt zudosiert werden; es wurde die Durchlässigkeit des Gewebes bei verschiedenen Druckhöhen und Schlammbelegungen getestet. Die geringen Durchlässigkeiten des vorigen Kapitels wurden dabei nochmals bestätigt. Anfangs war noch keine Bürstenabreinigung vorgesehen, sondern lediglich eine Abreinigung durch Rückspülen und zusätzlich oberflächliches Abspülen. Es zeigte sich dann aber ein mit der Zeit deutlich anwachsender Filterwiderstand auch bei frisch abgereinigtem Gewebe, der durch die Theorie nicht erklärbar war. Als Ursache wurden Algen- oder Bakterienrasen ausgemacht, die sich im Laufe der Zeit auf der Filteroberfläche ansiedeln und die gegen das Abspülen mit seiner nur geringen mechanischen Beanspruchung resistent sind. Oberflächliches Abbürsten mit einer weichen Bürste ergab jedoch eine zuverlässige Abreinigung, so dass die Mechanik der Anlage entsprechend erweitert wurde.

Der Prototyp der Filteranlage ist so konstruiert, dass er den Erfordernissen des Versuchsbetriebes entspricht. Vor einem kommerziellen Einsatz in der Praxis an Regenbecken ist jedoch eine Optimierung im Hinblick auf Wartungsfreundlichkeit notwendig.

## 4 Pilotbetrieb der Filteranlage am Regenklärbecken „Im Abelt“: Betriebserfahrungen und Ergebnisse

### 4.1 Eingebautes Filtergewebe

In der Filteranlage eingesetzt wurde schließlich in der ersten Versuchsphase ein Edelstahl-Tressengewebe (5-Schaft-Atlasbindung) mit einer Maschenweite von nominal  $50 \times 70 \mu\text{m}$  vom Typ Tela 5110/140 der Firma GKD, Kufferath. Das Gewebe wurde nicht direkt auf dem Lochblechzylinder befestigt, sondern auf ein Drainagegewebe in Form eines Kunststoffgewebes mit ca.  $0,7 \text{ mm}$  Maschenweite (handelsübliches Fliegengitter). Dies erwies sich jedoch als nicht praxisgerecht, denn nach einiger Betriebszeit zeigte das Metallgewebe einen langen Riss. Grund dafür dürfte der ständige Lastwechsel zwischen Anpressen des Filtergewebes auf die Unterlage während der Filtration und Zug infolge Rückströmung während der Abreinigungsphase sein. Durch das untergelegte Drainagegewebe war das Metallgewebe nur wenig gespannt worden und warf Falten, an welchen der Draht des Gewebes der Walkbeanspruchung nicht auf Dauer standhielt. Diese Wechselbeanspruchung des Filtermediums dürfte ein grundsätzlicher Nachteil bei diskontinuierlicher druckloser Abreinigung sein.

Schließlich wurde das Metallgewebe durch ein Kunststoffgewebe vom Typ Polynova 2626 PP der Firma Ver-seidag ersetzt, ein Polypropylengewebe, gleichfalls mit 5-Schaft-Atlasbindung und mit  $36 \mu\text{m}$  Maschenweite, das trotz der feinen Maschen relativ derb und mechanisch stabil ist. Das Drainagegewebe wurde weggelassen; es war dann möglich, das Filtergewebe stärker zu spannen und die Faltenbildung trat nicht mehr auf. Befürchtungen, dass dann nur ein Teil der Fläche filterwirksam sein könnte (nur über den Löchern des Zylinders), erwiesen sich als unbegründet; die gesamte Oberfläche des Gewebes ist durch Reste von Schlamm gleichmäßig dunkel gefärbt. Offenbar wirkt das Gewebe durch seine dreidimensionale Struktur selbst als Drainage.

### 4.2 Abflüsse und Volumina

Die elektrische Steuerung der Pilotanlage umfasst einen Achtekanal-Datenlogger vom Typ Adamczewski VarioLog AD-VL8-A8, der folgende Messwerte als Ganglinien in 20-Sekunden-Intervallen aufzeichnete:

- Wasserstand im RKB Abelt in m
- Gepumpter Zufluss zum Filter in l/s
- Druckhöhe im Filter in mWS
- Betrieb (AN/AUS, AUF/ZU) der Zulauf- und Spülpumpe, des Spülschiebers, des Abreinigungsmotors und des Entlüftungsventils

Es ist möglich, anhand der Tagesaufzeichnungen des Datenloggers den Betrieb nachzuvollziehen. Eine Echtzeitüberwachung war probenhalber zeitweise ebenfalls eingebaut worden, erwies sich aber als unnötig. Wenn ein Regen aufkam, konnte man das aufgrund der örtlichen Nähe zum RKB Abelt sofort erkennen und zur Beobachtung der Funktion der Anlage oder zur Probenahme unverzüglich hinfahren.

Die Daten wurden im CSV-Dateiformat auf handelsübliche 256 MB-SD-Speicherkarten geschrieben, die am PC lesbar waren und mit einer Tabellenkalkulation ausgewertet wurden. Ein Beispiel ist in Bild 32 und Bild 33 wiedergegeben, und zwar in Bild 32 auf zwei Stunden „gezoomt“, in Bild 33 über zwei Tage.

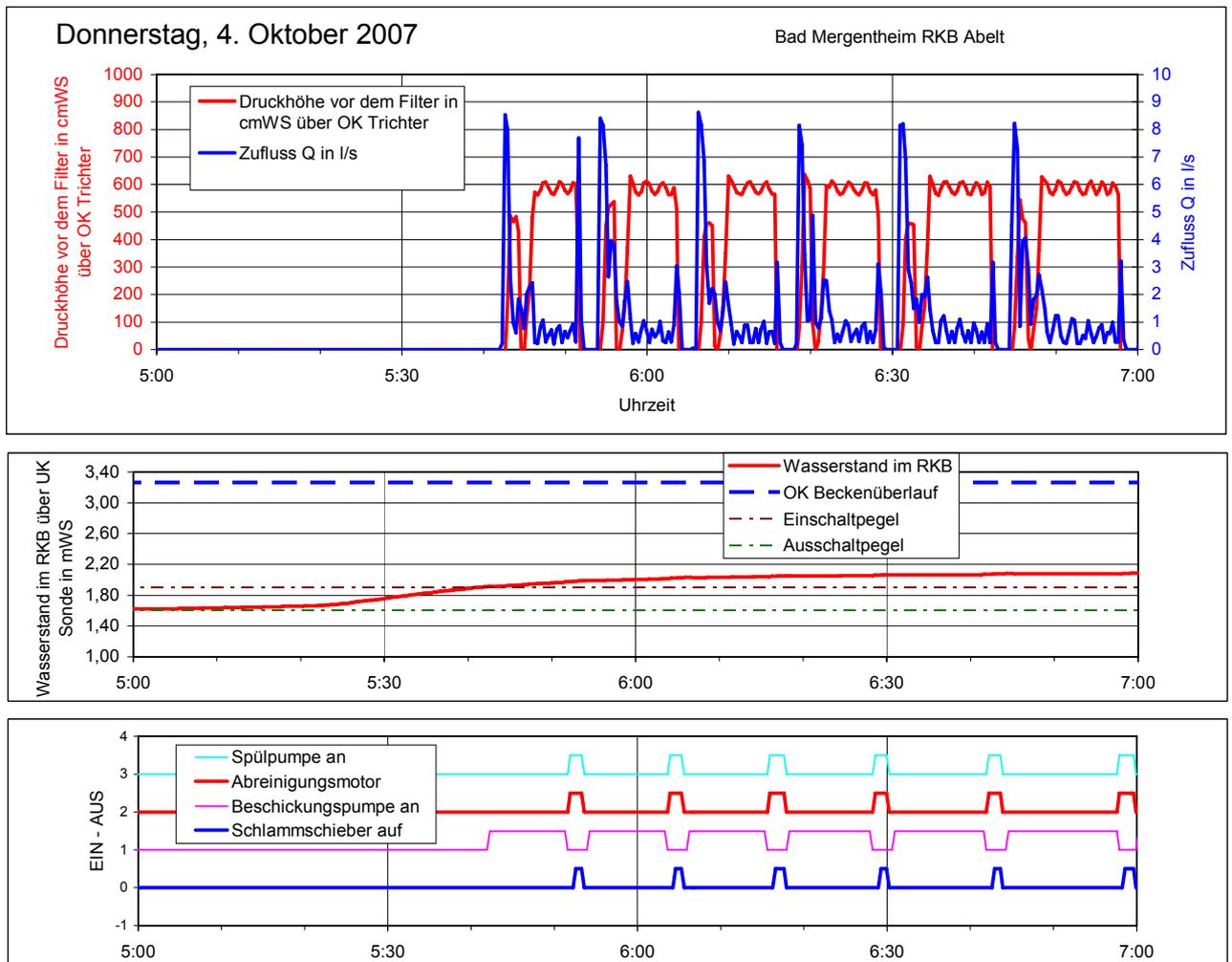


Bild 32: Aufgezeichnete Ganglinien des Verhaltens der Filteranlage bei Beginn des Beckeneinstaus

Die oberste Graphik zeigt blau den in die Filteranlage gepumpten Zufluss. Die markanten Spitzen kennzeichnen die Spülzyklen: Unmittelbar nach Beendigung des nur kurz andauernden Spülzyklus füllt die Beschickungspumpe den leeren Filter mit Wasser und die Filterung beginnt dann mit frisch abgereinigtem Filter. Der Zufluss erreicht dabei einige Minuten lang 8-9 l/s. Der Zufluss nimmt dann aber durch die zunehmende Belegung des Filtergewebes sehr schnell ab auf Werte unter 1 l/s. Die deutliche Oszillation der Kurven ist eine Folge der Drehzahlregelung.

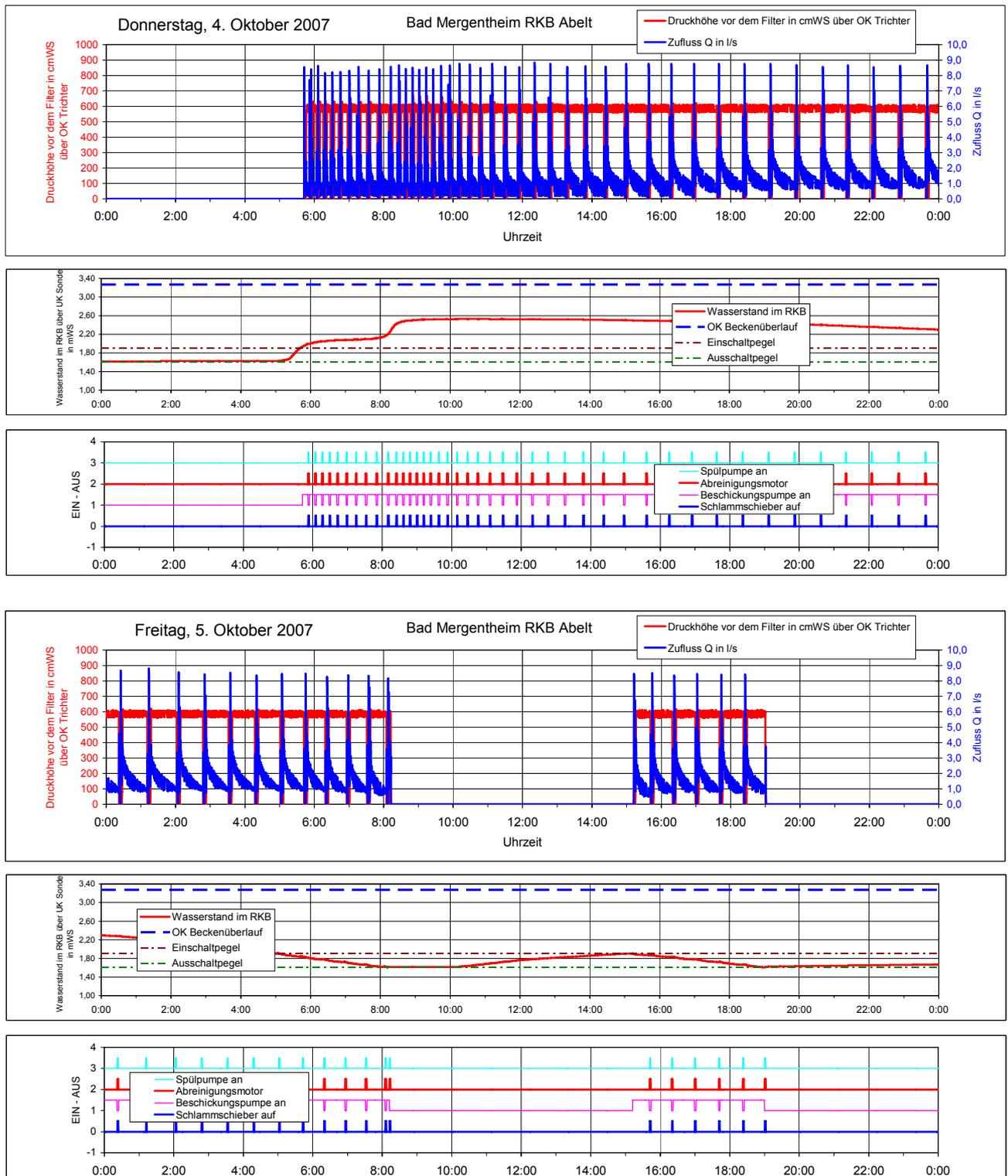


Bild 33: Beispiel einer Ganglinienauswertung über zwei volle Tage

Rot ist die Druckhöhe im Filtergehäuse eingezeichnet. Die Pumpe wird durch die Elektronik so geregelt, dass der Druck 600 cmWS nur unwesentlich überschreitet. Die Spülzyklen folgen hier in Abständen von etwa 10 Minuten, bedingt durch den schnell absinkenden Durchfluss. Mindestens wird jede Stunde ein Reinigungszyklus ausgelöst.

Das mittlere Diagramm zeigt den Wasserstand im RKB Abelt und die Höhenlage der Schalt- und Überlaufschwelen. Bei Überschreiten des Einschaltwasserspiegels (etwa um 05:40 Uhr) setzt sich die Anlage selbstständig in Betrieb.

Das untere Diagramm schließlich zeigt übereinander die Betriebszyklen der bereits genannten Aggregate.

In Bild 33 sind schließlich zwei ganze Regenereignisse gezeigt. Am 04.10.2007 begann etwa um 05:10 Uhr ein Zufluss zum Becken, welcher dieses bis gegen 6:15 und in einer zweiten Zuflussschwelle zwischen ca. 8:00 und 8:45 Uhr anfüllt. Der Wasserstand steigt dabei von 1,60 m bis auf 2,55 m über Sondennullpunkt (192,75 m+NN), also von 194,35 m+NN auf 195,30 m+NN; aus der bereits in Bild 11 wiedergegebenen Speicherinhaltslinie lässt sich entnehmen, dass dabei der Beckeninhalt von 32,3 m<sup>3</sup> auf 121,7 m<sup>3</sup> gestiegen ist, also 89,4 m<sup>3</sup> Wasser zugeflossen sind. Bei diesem verhältnismäßig kleinen Regen kam also auf der versiegelten Fläche des Einzugsgebietes von  $A_U = 7,9$  ha eine Niederschlagshöhe von  $89,4 \text{ m}^3 / 79\,000 \text{ m}^2 = 1,13$  mm zum Abfluss. Der Beckenwasserstand erreicht nach Zufließen von etwas Regennachlauf gegen 12 Uhr den höchsten Wert, ab da wird das Volumen durch die Filteranlage abgearbeitet. Gegen 08:00 Uhr am folgenden Tag ist das Becken wieder geleert; die Entleerungszeit betrug also 20 Stunden und der im Mittel gefilterte Abfluss 1,24 l/s; dass die Filteranlage auch bereits während der Beckenfüllphase arbeitete, ist bei dieser Abschätzung nicht berücksichtigt.

Am 5.10. gab es nochmals einen kleinen Regen, der hier aber innerhalb von 4 Stunden abgewirtschaftet wird.

An der deutlich erkennbaren Abfolge der Spülzyklen lässt sich auch erkennen, dass zu Beginn des Ereignisses und auch während der zweiten „Welle“ offensichtlich stärker verschmutztes Wasser in das Becken gelangte, denn dann verlegt sich der Filter schneller und die Anlage reinigt sich häufiger ab. Dies ist auch aus dem zu Regenbeginn schnelleren Abklingen der blauen Kurve nach jedem Spülzyklus erkennbar.

Das insgesamt über die Filteranlage abgewirtschaftete Volumen lässt sich aus der mit dem MID direkt gemessenen Abflussganglinie aus Bild 33 (blaue Linie in der oberen Graphik) berechnen. Diese Ganglinie muss dazu über ein Regenereignis aufintegriert werden.

Das hier gewählte Konzept der diskontinuierlichen Abreinigung führt dazu, dass bei verlegtem Filter sehr häufig abgereinigt wird. Nicht das gesamte in die Filteranlage gepumpte Wasser gelangt schließlich gefiltert in das Gewässer, sondern es wird auch eine mehr oder minder großes Volumen im Kreis gepumpt (Bild 34), weil bei jedem Spülzyklus das Filtergehäuse mit dem Filtergut ins RKB leerläuft und dann wieder aufgefüllt wird. Dieses Volumen von jeweils ca. 450 l pro Spülzyklus ist jeweils abziehen. Das in Bild 33 gezeigte Regenereignis lieferte für den 04.10. ein gefiltertes Volumen von 69,5 m<sup>3</sup> und für das Restereignis am 05.10. ein solches von 42,9 m<sup>3</sup>, zusammen also 112,4 m<sup>3</sup>. Die Brutto-Betriebszeit der Filteranlage (einschließlich Spülzyklen) war von 05:40 – 08:15 am nächsten Tag, also 26,6 h, was einem mittleren Filterdurchfluss von 1,17 l/s entspricht. Bei anderen typischen Regenereignissen liegt die mittlere Schluckleistung der Filteranlage zwischen ca. 0,6 l/s und 1,2 l/s.

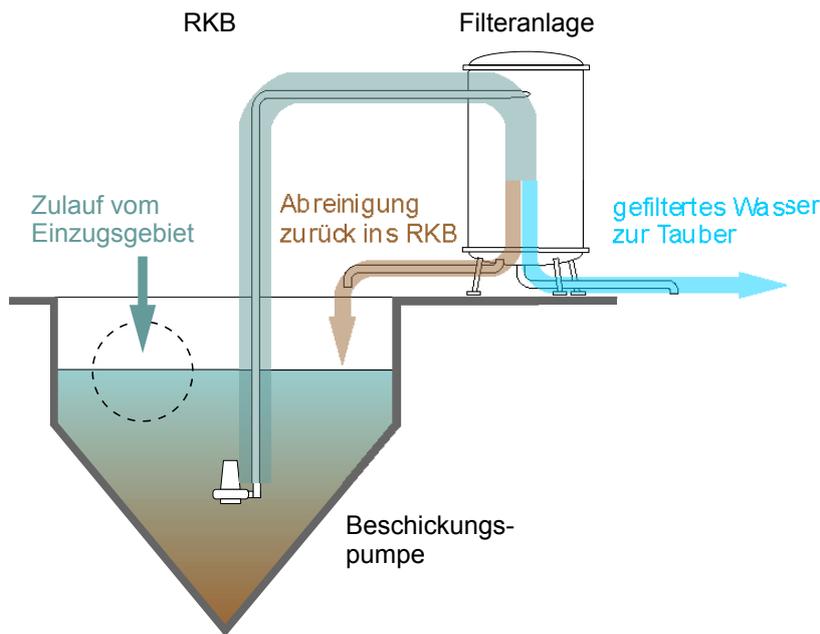


Bild 34: Nur ein Teil des in die Filteranlage gepumpten Wassers gelangt gefiltert in das Gewässer. Durch die Abreinigung wird ein gewisses Volumen im Kreis gepumpt.

Die nach Bild 34 im Kreis gepumpte Wassermenge lässt sich gleichfalls abschätzen, und zwar ist hier der ungünstigste Fall bei etwa 5 Minuten Zeitintervall zwischen den Spülzyklen interessant, wenn zugleich die mittlere Schluckleistung gering ist. Setzt man im Mittel 0,6 l/s gefiltertes Wasser an, gelangen in 5 Minuten nur 180 l gefiltertes Wasser in das Gewässer, wogegen 450 l im Kreis gepumpt werden. Das ist ein sehr ungünstiges Verhältnis von 2,5 : 1, welches aus der geringen Schluckleistung durch das schwer abfiltrierbare Material resultiert. Bei etwa 1-stündigen Spülzyklen und der erwähnten Durchsatzleistung von ca. 1,2 l/s, wie sie hier nach einigen Stunden Betriebszeit durch das Absetzen eines Teils der Sedimente im RKB oft erreicht wurde, stehen pro Zyklus 4320 l gefiltertes Wasser 450 l im Kreis geförderten Wasser gegenüber. Dann ist das Verhältnis mit 1 : 10 viel günstiger (Bild 35). Eine Optimierungsmöglichkeit bestünde darin, das Volumen der Filteranlage klein zu halten.

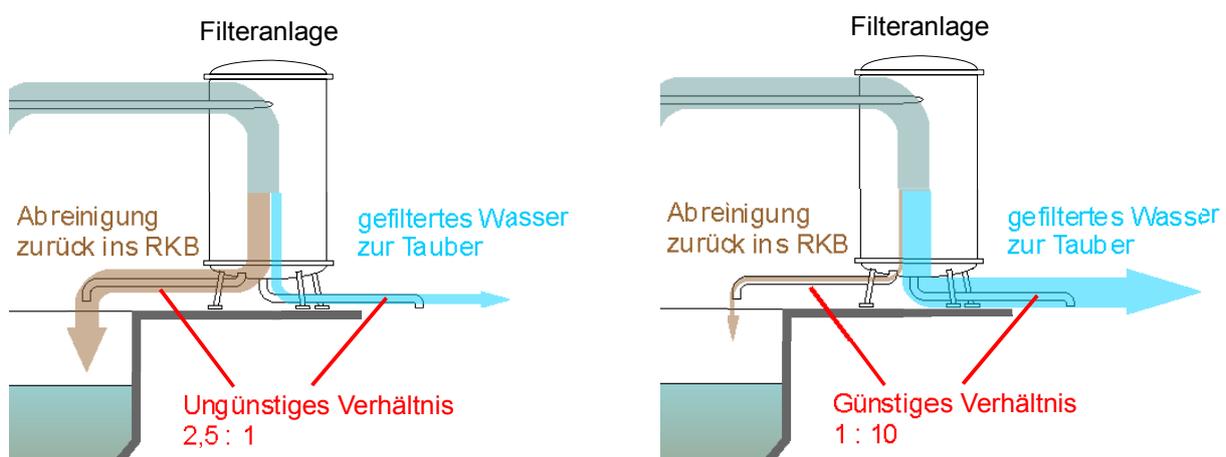


Bild 35: Unterschiedliche Verhältnisse zwischen der zur Abreinigung benötigten und der gefilterten Wassermenge, links bei schnell belegtem Filter zu Anfang eines Regenereignisses, rechts nach einigen Stunden.

Parallel zur beschriebenen Auswertung der gemessenen Durchflüsse wurde der Versuch gemacht, eine Mengbilanz anhand der gleichzeitig gemessenen Beckenwasserstandsganglinie durchzuführen. Aus dieser Ganglinie – der roten Linie in Bild 33, mittlere Graphik – kann bei jedem Ereignis näherungsweise unter Zuhilfenahme der Beckeninhaltslinie  $V(h)$  (Bild 11) die Zu- und Abnahme des Volumens und damit auch das bei der Beckenentleerung abgewirtschaftete Gesamtvolumen berechnet werden. Ebenso können mit dieser Vorgehensweise für jede Ganglinie aktuelle, z.B. zweistündige Abflüsse in l/s ermittelt werden, mit denen das Becken entleert wird. Kürzere Auswertungsintervalle sind nicht sinnvoll, weil der hier angewandte Prozess letztlich eine numerische Differentiation ist, welche die Daten „aufraut“.

Es zeigte sich dabei, dass bei hohen Beckenfüllungen der Abfluss, mit dem das Becken entleert wird, sehr groß wird und die direkt mit dem MID der Filteranlage gemessenen mittleren Abflüsse weit übersteigt. Dies ist ein sicheres Indiz für Exfiltration des Beckeninhaltes entweder durch angeschlossene, tief liegende Drainagen oder aber durch Undichtigkeiten in den Kanalrohren und bestätigt die bereits in Kap. 2.1 angesprochene Vermutung. Auch während der Versuchsphase wurde bei einem Regenereignis, bei dem die Filteranlage bei fast vollem Becken für einige Stunden außer Betrieb genommen werden musste, in dieser Zeit ein Absinken des Wasserspiegels beobachtet (hier nicht dokumentiert).

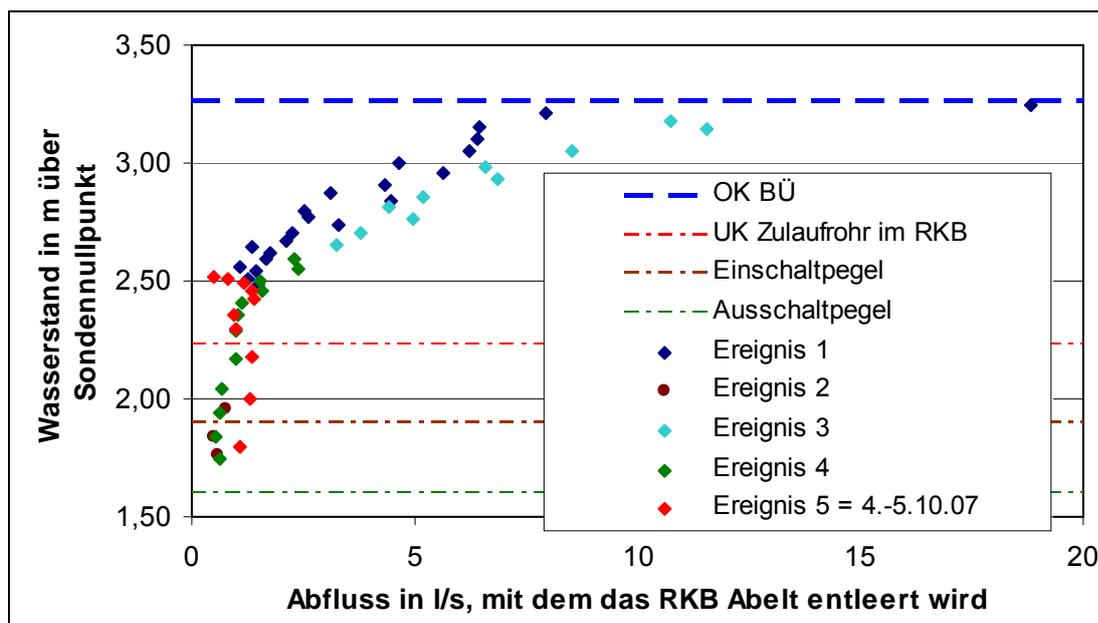


Bild 36: Rückrechnung des Abflusses, mit dem das RKB entleert wird bzw. der daraus diffus versickert, aus den aufgezeichneten Wasserstandsganglinien. Bei höheren Beckenwasserständen ergibt sich ein sehr großer Abfluss – ein Indiz für Exfiltration.

Der bei dem Ereignis vom 04.-05.10.07 aus Bild 33 bestimmte, ereignismittelte Filterdurchfluss von 1,17 l/s passt gut zur Tendenz der entsprechenden Werte in Bild 36. Dieses Ereignis füllte das RKB jedoch nur bis auf etwa 2,50 m über Sondennullpunkt. Bei höheren Wasserständen ist deutlich zu erkennen, dass das RKB mit weit größeren Abflüssen entleert wird als der Filter verarbeiten kann. Das Becken und der eingestaute Zulaufkanal sind offensichtlich undicht.

Bei den hier erreichbaren, nur relativ kleinen Filterdurchflüssen dominiert die Exfiltration natürlich mengenmäßig, und die tatsächlich gefilterten Wasservolumina (durch Auswertung der MID-Aufzeichnung oder der Pumpenlaufzeiten ermittelt) passen deshalb nicht zum Wasserdargebot aus den hydrologischen Größen (abflusswirksame Niederschlagshöhe mal versiegelter Fläche). Diese überraschende Erkenntnis ist bei der weiteren Interpretation der Ergebnisse zu beachten. Auch auf eine noch weitergehende Auswertung der ermittelten Filterabflüsse, etwa im Hinblick auf eine künftige Bemessung einer technischen Filteranlage, musste verzichtet werden.

### 4.3 Generelle Betriebserfahrungen mit der Maschinenteknik, Betriebsaufwand

Durch die Verwendung von Industriestandard-Bauteilen funktionierte die eingesetzte Mess-, Steuer- und Regelungstechnik mit der Pumpe und ihrer Ansteuerung, den Sensoren für Drücke und Abflüsse, mit der speicherprogrammierbaren Steuerung und der Datenaufzeichnung störungsfrei. Diese Technik ist also praxistauglich.

Winterbetrieb mit Temperaturen unter Null wurde nur während einiger Tage im November 2007 durchgeführt, so dass hier erst minimale Erfahrungen vorliegen. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass z.B. die Abreinigungseinrichtung bei Frost blockieren kann. Eine frostsichere Einhausung der Filteranlage wäre wünschenswert bzw. dürfte bei anderen Projekten notwendig werden.

Der Betriebsaufwand der Prototyp-Filteranlage ist natürlich nicht repräsentativ für einen späteren Einsatz in Serie. An dieser Stelle kann daher nur eine Aussage über den Stromverbrauch gemacht werden. Die Laufzeit der Pumpe wurde aus den Tagesganglinien analog zu Bild 33 ermittelt. Als mittlerer gefilterter Durchfluss wird zur vorsichtigen Abschätzung der kleinste Wert aus obiger Auswertung,  $Q = 0,6 \text{ l/s}$ , angesetzt. Man kann dann den Energieverbrauch auf den Kubikmeter gefiltertes Wasser umrechnen (Tabelle 2). Hier beschränkt sich die Auswertung auf einen kurzen Zeitraum von 13 Tagen. Zumindest in ihrer groben Größenordnung können die Ergebnisse aber auch auf längere Zeiträume übertragen werden. Eine Hochrechnung unter Berücksichtigung des in diesem Zeitraum gefallenen Regens wäre gleichfalls möglich, für eine größenordnungsmäßige Aussage genügt aber auch der Ansatz, dass es in den untersuchten 13 Tagen im Mittel pro Tag ebenso viel geregnet hat wie im ganzen Jahr.

Der in Tabelle 2 ermittelte spezifische Energieverbrauch liegt bei  $0,46 \text{ kWh/m}^3$  des in die Tauber abgegebenen Wassers. Dies ist ein überraschend hoher Wert; mit dieser Energie könnte man die hier gefilterte Wassermenge mit einer idealen Pumpe mit 100 % Wirkungsgrad statt durch den Filter auch 169 m hoch pumpen. Wenn man an die Energiekosten denkt und einen Einheitspreis von  $0,20 \text{ €/kWh}$  zugrunde legt, kostet jeder  $\text{m}^3$  gefiltertes Wasser bei der Prototypanlage 9,2 Cent. Geht man im Einzugsgebiet des RKB Abelt davon aus, dass z.B. 50 % des Regenwasserdargebotes durch die Anlage abgewirtschaftet werden soll, wären dies bei einer abflusswirksamen Niederschlagshöhe von größenordnungsmäßig  $500 \text{ mm/a}$  und der versiegelten Fläche von  $A_U = 7,9 \text{ ha}$  ein jährliches Gesamtvolumen von  $19\,750 \text{ m}^3/\text{a}$ , für das jährliche Energiekosten in Höhe von  $1\,817 \text{ €/a}$  anfielen. Auch dies ist ein relativ hoher Wert für die Prototyp-Filteranlage.

Es ist jedoch zu beachten, dass bei diesem Projekt noch keinerlei Optimierung hinsichtlich der Energie durchgeführt wurde. Offensichtlich macht sich der „Grundumsatz“ des Schaltschranks, vor allem aber der Energieverbrauch durch den Bürstenmotor und die Spülpumpe während der häufigen Abreinigungszyklen bemerkbar wie auch der bereits beschriebene Umstand, dass Wasser zur Reinigung der Filteranlage im Kreis gepumpt wird. Die verwendete Beschickungspumpe ist außerdem auf einen größeren Durchfluss ausgelegt und arbeitet gegen den verlegten Filter und auch noch mit reduzierter Drehzahl in einem Bereich sehr schlechten Pumpen-Wirkungsgrades. Auch die oszillierende Betriebsweise der Pumpe (bedingt durch die noch verbesserungsfähige Regelung) ist energetisch ungünstig, hinzu kommen Verluste in der Elektronik.

Tabelle 2: Auswertung der Pumpenlaufzeiten vom 04.09.2007 – 17.09.2007

<b>Pumpenlaufzeiten und Stromverbrauch</b>							
Datum	Startzeit	Endzeit	Gesamtzeit in h	Pumpenlauf- zeit in h	% der Gesamtzeit	Zählerstand in kWh	
04.09.2007	15:00	00:00	9,00	8,17	90,8%	948,59	
05.09.2007			24,00	21,46	89,4%		
06.09.2007			24,00	21,57	89,9%		
07.09.2007			24,00	5,94	24,8%		
08.09.2007			24,00	0,00	0,0%		
09.09.2007			24,00	5,76	24,0%		
10.09.2007			24,00	7,08	29,5%		
11.09.2007			24,00	22,30	92,9%		
12.09.2007			24,00	21,92	91,3%		
13.09.2007			24,00	11,43	47,6%		
14.09.2007			24,00	7,03	29,3%		
15.09.2007			24,00	3,42	14,3%		
16.09.2007			24,00	0,00	0,0%		
17.09.2007	00:00	16:45	16,75	7,32	43,7%	1092,07	
			<b>313,75</b>	<b>143,40</b>	<b>45,7%</b>		
Mittlerer geförderter Abfluss in l/s			0,6				
Gesamtes gefördertes Volumen in m <sup>3</sup>			309,744				
Energieverbrauch in kWh			143,48				
Zeitgemittelter Energieverbrauch in kWh/Tag			11,0				
<b>Spezifischer Energieverbrauch in kWh/m<sup>3</sup></b>			<b>0,46</b>				

Man könnte aus dem hohen Energieverbrauch der Pilotanlage den Schluss ziehen, dass eine Druckfiltration eben wegen der am Filter abfallenden Druckhöhe und des damit einhergehenden Energieverlustes generell unwirtschaftlich und unökologisch sei. Das ist jedoch nicht richtig: Im Vergleich zu einem drucklos beschickten, großflächigen Filter ist physikalisch zur Überwindung der hier gewählten 6,5 m Druckhöhe am Filter eine Mehrenergie von 0,018 kWh/m<sup>3</sup> gefiltertem Wasser erforderlich. Die Energiekosten dafür betragen 0,36 Cent/m<sup>3</sup>. Der höhere Energieaufwand für eine Druckfiltration hält sich also im Rahmen, selbst wenn diese idealen Werte nicht erreichbar sind, und ist kein gewichtiges Gegenargument gegen diese Filtrationsart – solange auch die Druckhöhe im Bereich einiger Meter Wassersäule bleibt.

Durch Optimierung der zur Abreinigung erforderlichen Energie und durch Anpassung der Förderpumpe und ihrer Betriebsweise an den erreichbaren Filterdurchsatz kann der Energieverbrauch noch deutlich gesenkt

werden. Bei Anlagen für relativ kleine Durchflüsse, wie hier, spielen außerdem die Installations- und sonstigen Wartungskosten für die Gesamtwirtschaftlichkeit eine große Rolle. Leider können wegen der noch verbesserungswürdigen Wirkung der Filteranlage mit den bislang ermittelten Daten keine besseren Aussagen über die künftig zu erwartende Wirtschaftlichkeit der technischen Filtration von Regenwasser gemacht werden.

#### 4.4 Probenahme und Auswertung

Die Probenahme erfolgte während oder unmittelbar nach Regenereignissen vor Ort von Hand, und zwar wurden mittels Kugelhähnen und Schläuchen der gepumpte Zulauf zur Filteranlage und der gefilterte Ablauf in zwei handelsübliche 1 m<sup>3</sup>-Polyethylen-Palettencontainer geleitet. Die Probenahme dauerte etwa eine Stunde; es wurde darauf geachtet, dass die Zulaufprobe gleichzeitig mit der Ablaufprobe gezogen wurde und auch etwa ebenso lang dauerte (Einregulierung am Zulauf-Kugelhahn). Außerdem wurden auch einige 2 l-Probeflaschen mit Filterzulauf und -ablauf befüllt. Während eines Spülzyklus wurde die Probenahme unterbrochen und danach wieder fortgesetzt.

Eine volumenproportionale Probenahme, wie sie z.B. mit automatischen Probenehmern möglich ist, wurde hier nicht angewandt, weil durch die lange Aufenthaltszeit des Wassers im RKB die Sedimentdynamik während des Regenereignisses so gut wie keine Rolle spielt.

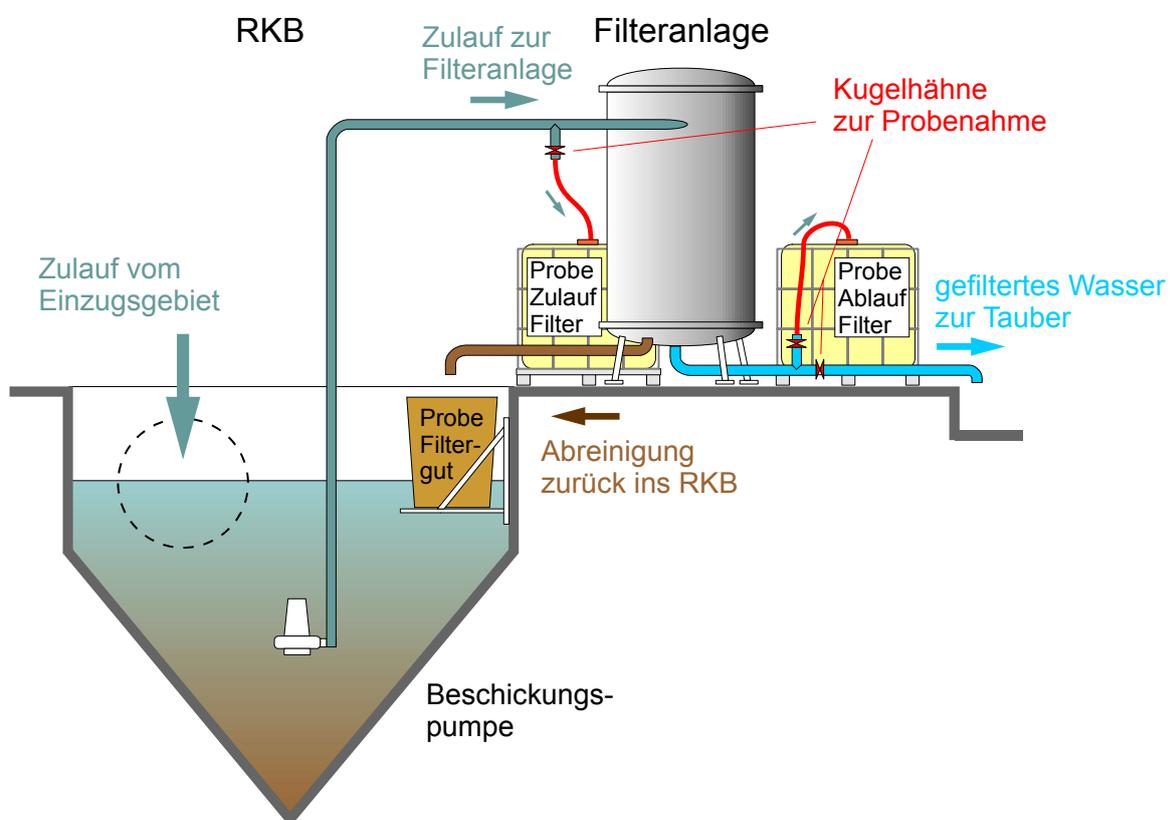


Bild 37: Schema der Probenahme

Bei zwei Ereignissen wurde außerdem der Filtergutablauf in ein 500-l-Fass geleitet und dann wie bei den 1 m<sup>3</sup>-Containern weiter verfahren.

Die Wirkung des Regenklärbeckens selbst wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht zahlenmäßig untersucht. Durch den Umstand, dass ein großer Teil des Einstauvolumens im Kanal liegt, ließen sich nur bei sehr geringen Beckenfüllungen (Wasserstand niedriger als Sohle Zulaufkanal) repräsentative Zulaufproben zum Becken gewinnen. Außerdem ist dieses RKB als Fangbecken keine repräsentative Beckenform, zumal als „Klärüberlauf“ hier ja der tiefsitzende Einsaugstutzen der Filterbeschickungspumpe gelten würde.

Die Container wurden in der Regel einen Tag lang (in einigen Fällen wochenendbedingt auch länger) am RKB stehen gelassen, wodurch sich der Schlamm am Boden absetzte. Dann wurde der Überstand mit einem dünnen Schlauch bis auf einen Wasserstand von 8,5 cm im Container abgesaugt und jeder Container dann möglichst restlos (um allen Schlamm zu gewinnen) in zwei 60-l-Kunststofffässer entleert. Nach wieder mindestens einem Tag Absetzzeit wurde der Überstand am Spundhahn der Fässer abgelassen und der Schlamm im Labor in einige Imhofftrichter gefüllt. Das Schlammvolumen wurde nach abermals einem Tag Absetzzeit abgelesen, sodann der Überstand dekantiert und der Schlamm in einige Aluschalen gegossen. Zum Trocknen des Schlammes wurden die Schalen für 1-2 Tage bei 105°C in einen Trockenofen gestellt. Abschließend konnte der Schlamm gewogen werden.

Es fiel auf, dass im Sommer in den Containern oft eine spontane Ausflockung eintrat, die jedoch an einigen Tagen möglicherweise wegen niedrigerer Temperaturen in nur geringerem Maß stattfand. Deutlich wurde dies an den direkt mehr oder weniger stark sichtbaren Flocken im Schlamm, vor allem aber an stark unterschiedlichen Schlammvolumina. Der Effekt beeinflusst die gewonnene Schlammmenge stark, konnte aber wegen der geringen Anzahl der beprobten Ereignisse nicht quantitativ untersucht werden. Für Aussagen zum Wirkungsgrad wurde davon ausgegangen, dass bei den jeweils gleichzeitig gewonnenen und ausgewerteten Ablauf- und Zulaufproben die gleichen Verhältnisse herrschten. Um reproduzierbare Werte zu erhalten, wurde außerdem bei einigen Ereignissen Fällmittel in Form von je 20 ml 40 %-iger FeCl<sub>3</sub>-Lösung in die beiden 1 m<sup>3</sup>-Container gegeben, und zwar während des Befüllens.

Eine Zugabe von Fällmittel in den Zulauf der Filteranlage (um die Filtrierbarkeit zu verbessern) wurde in diesem Forschungsprojekt nicht untersucht. Als eigene Themenstellung wäre dies ein denkbares Folgeprojekt.

Verglichen wurden folgende Kennzahlen:

- Schlammvolumen bezogen auf die Gesamtwassermenge der Probe in ml/l
- Schlammmasse bezogen auf die Gesamtwassermenge der Probe in mg/l, hierbei auch Berücksichtigung des Feststoffanteils in den Überständen
- Direkt bestimmte AFS in mg/l
- Volumen- und Massenwirkungsgrad  $\eta = 1 - C_{ab}/C_{zu}$  der Filteranlage zwischen Ablauf (Konzentration  $C_{ab}$ ) und Zulauf ( $C_{zu}$ ) ohne Berücksichtigung des vorgeschalteten Regenklärbeckens. C kann die Schlammvolumenkonzentration in ml/l oder die Massenkonzentration in mg/l sein.

Bei einigen Proben wurde die Sinkgeschwindigkeitsverteilung des bereits abgesetzten Schlammes analysiert, weil man hoffte, vielleicht Rückschlüsse auf einen Rückhalt der größeren Fraktionen ziehen zu können. Die

Analyse erwies sich aber als kaum aussagekräftig, weil es sich beim Schlamm im Wesentlichen um aggregierte Flocken feineren Materials handelt. Die Absetzeigenschaften geflockten Schlammes sind recht gut; das Material setzt sich im Imhofftrichter relativ schnell ab. Ein Rückschluss auf die vor der Flockung vorhandenen Sedimenteigenschaften ist aber nicht möglich. Diese Ergebnisse wurden deshalb verworfen.

#### 4.4.1 Abfiltrierbare Stoffe im Zulauf und Ablauf der Filteranlage

Auch mit eintägigem Absetzen im Probecontainer bzw. in den Fässern konnte nicht der gesamte Feststoff gewonnen werden. Exemplarisch wurde deshalb auch der Überstand der 1 m<sup>3</sup>-Container und auch jener der 60-l-Fässer auf AFS untersucht; die betreffenden Konzentrationen lagen bei ca. 4 mg/l in den 1 m<sup>3</sup>-Containern und ca. 25 mg/l in den 60-l-Fässern. Diese Untersuchung wurde jedoch nicht bei allen Proben durchgeführt, weil bei AFS-Gehalten im Überstand von weniger als 5 mg/l keine genaue Bestimmung möglich war. Die genannten Werte von 4 mg/l bzw. 25 mg/l wurden daher bei allen Versuchen gleich angesetzt.

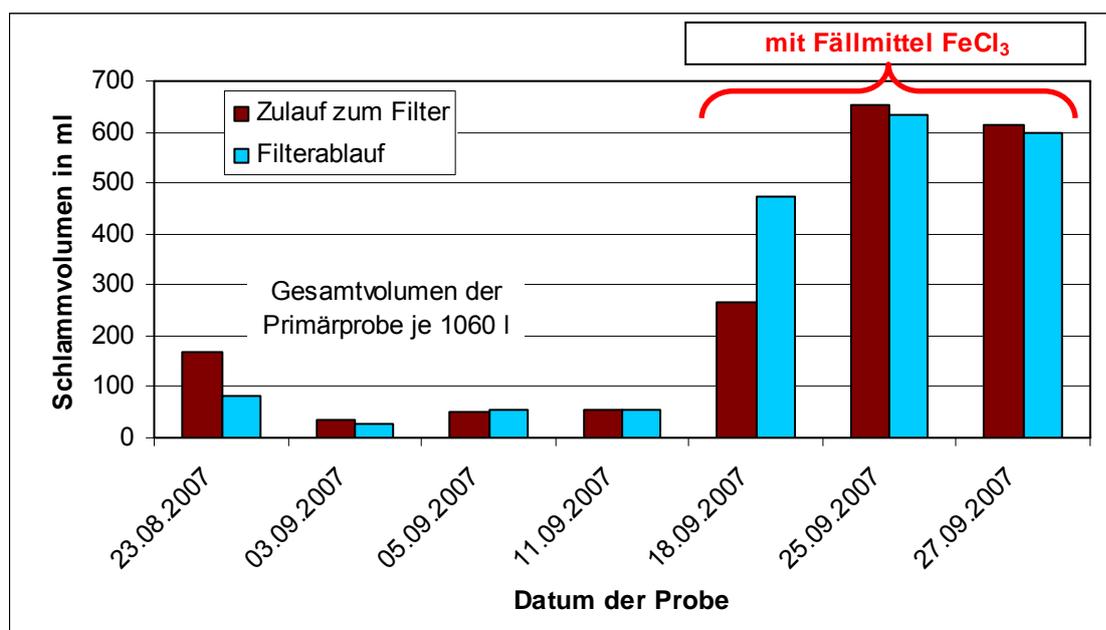


Bild 38: Vergleich der im Filterzulauf (links) und Ablauf (rechts) ermittelten Schlammvolumina (nur abgesetzter Schlamm ohne Feststoffe im Überstand) aus einer Probe von 1060 l

Zunächst kann man von Regenereignis zu Regenereignis eine sehr große Streuung in den registrierten Schlammengen und AFS-Konzentrationen erkennen. Insbesondere beim Regen vom 03.09.2007 wurden nur sehr geringe Schlammengen festgestellt. Ein möglicher Grund hierfür könnte ein geringeres Ausflocken des Schlammes infolge kühlerer Lufttemperatur sein. Leider ließ sich diese Hypothese nicht belegen, weil der Überstand in den Fässern bei diesem Ereignis nicht beprobt worden war. Andererseits ist jedoch auch eine unterschiedliche Sedimentdynamik je nach Stärke des Regenereignisses denkbar. Zulauf- und Ablaufprobe wurden von diesen Effekten jedenfalls in gleicher Weise beeinflusst. Um besser reproduzierbare Werte zu

erhalten, wurde bei den letzten Ereignissen jeweils Fällmittel zugegeben. Die Schlammausbeute wurde dadurch gleichmäßiger, das Schlammvolumen jedoch deutlich erhöht, so dass zwischen Ereignissen mit und ohne Fällmittelzugabe nur das Trockengewicht nach Bild 39, nicht aber das Volumen nach Bild 38 verglichen werden können.

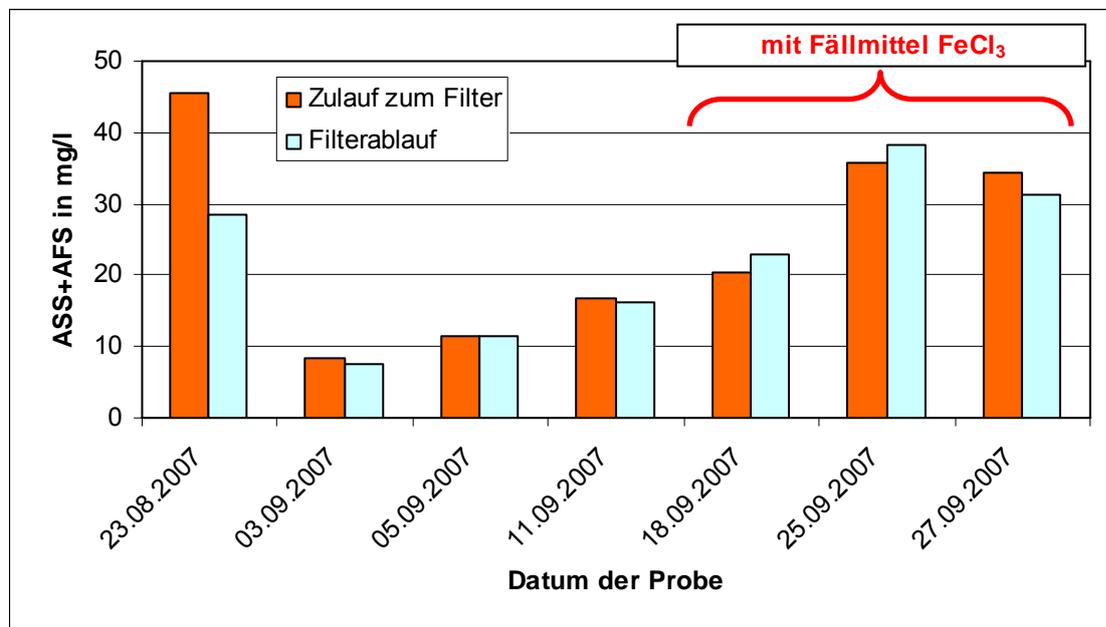


Bild 39: Gesamte Feststoffe (absetzbare Stoffe ASS plus abfiltrierbare Stoffe AFS), getrocknet, in mg/l. Links Proben aus dem Filterzulauf, rechts aus dem Filterablauf. Mit Berücksichtigung des Überstandes in den Containern.

Natürlich muss bei diesen Versuchen die Menge an Fällmittel selbst mit berücksichtigt werden. 40 %-ige  $\text{FeCl}_3$ -Lösung hat bei  $20^\circ\text{C}$  eine Dichte von  $\rho = 1430 \text{ kg/m}^3$ , 1 ml = 1,43 g enthalten 40 Gewichts-% = 0,572 g  $\text{FeCl}_3$ , wovon nach den stöchiometrischen Verhältnissen 0,195 g Eisen- und 0,377 g Chloridionen sind. Es wird angenommen, dass die Eisenionen vollständig im Schlamm gebunden sind, während die Chloridionen in Lösung bleiben. Es ist dann bei 20 ml Fällmittelzugabe die ermittelte Trockenmasse des Schlammes um  $20 \cdot 0,195 = 3,9 \text{ g}$  zu verringern.

Bei drei untersuchten Ereignissen wurde parallel zur beschriebenen Auswertung durch Absetzen auch die direkte AFS-Bestimmung an gut aufgeschüttelten, nicht abgesetzten Proben des Zu- und Ablaufes angewandt. Das geschah in Anlehnung an DIN 38 409 Teil 2 durch Abnutschen eines definierten Volumens der Probe, z.B. 1000 ml, durch einen  $0,45 \mu\text{m}$ -Membranfilter unter ca. 0,3 bar Überdruck. Der Membranfilter mit dem aufgelagerten Schlamm aus der Probe wurde anschließend bei  $105^\circ\text{C}$  für zwei Stunden getrocknet und gewogen; die Differenz zum Gewicht des trockenen Membranfilters vor dem Versuch liefern die AFS in der Probe.

Bild 40 zeigt, dass diese von Flockungseffekten unbeeinflussten Ergebnisse ebenfalls stark streuen. Ein eindeutiger Vorteil der zuerst beschriebenen Methode der AFS-Ermittlung durch Ziehen großvolumiger Proben

und Absetzen war nicht erkennbar, daher wurde (auch wegen des weit geringeren Aufwandes) bei den letzten untersuchten Proben im November ausschließlich die direkte AFS-Bestimmung angewandt.

Die letzten beiden Beprobungen am 19.11.2007 und 23.11.2007 untersuchten das Verhalten der Filteranlage bei besonders trübem Zulauf und mit nur geringer Absetzwirkung des RKB. Am 19.11. wurde für den Neubau einer Fensterbaufirma ein Kanalgraben quer über die Straße gezogen. Das Sickerwasser aus der Baugrube wurde mit einer Schmutzwasserpumpe in den zum RKB Abelt führenden Regenwasserkanal geleitet, während im Becken noch etwas Restwasser von einem vorausgegangenen Regenereignis war. Visuell war der RKB-Inhalt an diesem Tag lehmig-trübe. Offenbar war die Aufenthaltszeit im Becken recht kurz. Die Filteranlage hat hier einen recht guten Wirkungsgrad. Einige Tage später wurde versucht, dieses Ergebnis auch künstlich zu provozieren, indem vorher bei Trockenwetter entnommener Beckenschlamm in Wasser aufgerührt und an der Filterbeschickungspumpe wieder ins RKB gegeben wurde. Dabei war das Becken jedoch höher eingestaut; die Schlammkonzentration am Zulauf zum Filter erreichte hier nicht die hohen Werte vom 19.11. Trotzdem ist auch hier der Wirkungsgrad gut.

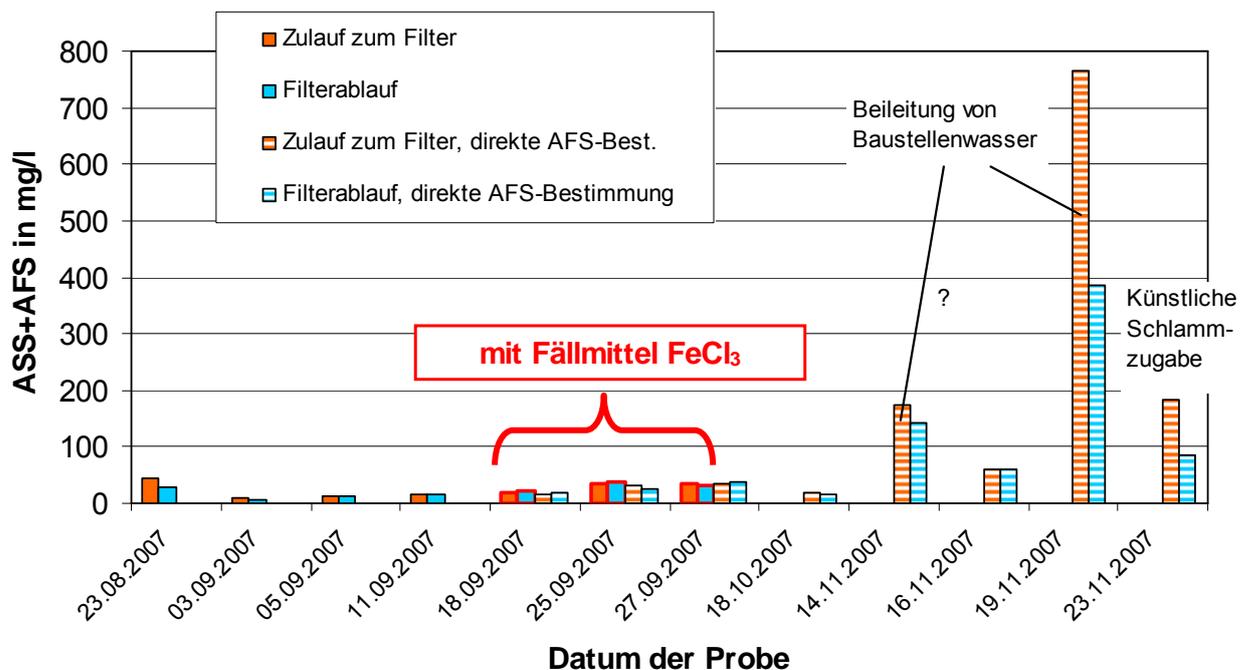


Bild 40: Vergleich zwischen einer Bestimmung der Feststoffe mittels Absetzen (unifarbige Balken) und durch direkte AFS-Filtration (horizontal gestreifte Balken)

Zunächst fällt eine große Streuung der AFS-Werte am Zulauf des Filters von Ereignis zu Ereignis um mehr als eine Zehnerpotenz auf. Spitzenwert war die bereits erwähnte Beprobung am 19.11. mit Baugrubenwasser-Beileitung, wo 750 mg/l überschritten wurden. Um 180 mg/l wurden auch am 14.11. erreicht, wobei möglicherweise auch hier Baugrubenwasser zugeleitet wurde. Der Versuch mit künstlicher Schlammzugabe am 23.11. ist hier auszuklammern, er ergab aber dieselbe Größenordnung. Typischer für den Normalbetrieb war jedoch der September: Ohne Bauarbeiten lag die AFS-Konzentration bei nur 20-30 mg/l. Zusätzlich ist auch

die Hypothese denkbar, dass bei niedrigen Temperaturen das Feinstmaterial weniger stark ausflockt und das Sediment dadurch im Winter länger in Schwebelage bleibt als im Sommer.

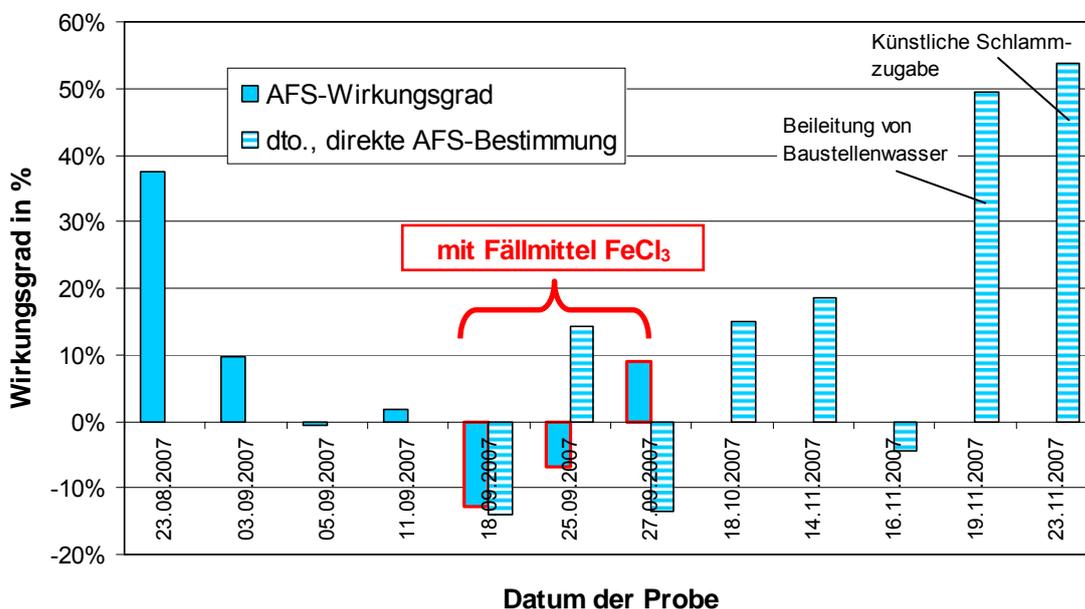


Bild 41: AFS-Wirkungsgrad ermittelt über die Masse des getrockneten Schlammes (AFS + ASS, unifarbige Balken) bzw. aus den direkt filtrierten AFS (gestreifte Balken)

Wirklich überraschend ist es, dass (abgesehen von den beiden untypischen Beprobungen vom 19.11. und 23.11.) bei den meisten Regenereignissen nur ein recht geringer Wirkungsgrad der Filteranlage festgestellt werden konnte (Bild 41). Im Ablauf war also nur selten deutlich weniger Schlamm anzutreffen als im Zulauf. 50 % Wirkungsgrad wurden nie überschritten. Bei einigen Ereignissen ist der Wirkungsgrad sogar negativ. Dies ist ein sehr wichtiger Befund! Es könnte daraus voreilig den Sinn der technischen Filtration und damit das Projekt an sich in Frage gestellt werden.

Um eine Verfälschung der Ergebnisse durch eine eventuelle unerkannte Leckage oder einen erneuten Riss im Filtergewebe mit Sicherheit auszuschließen, wurde die Dichtheit der Filteranlage während der Versuchszeit zweimal in sehr aufwändiger Weise (Abdichten des Filtergewebes mittels Plastikfolie), aber mit jeweils positivem Ergebnis überprüft. Eine Umläufigkeit kann also ausgeschlossen werden.

Bei einigen Ereignissen wurde auch das Filtergut beprobt; das war jedoch immer nur für einen Reinigungszyklus möglich. Weil jedoch die Probenahme im Zu- und Ablauf mehrere Reinigungszyklen umfasste und das pro Reinigungszyklus verarbeitete Volumen nur ungenau bestimmbar ist, ist eine Zuordnung Zulauf = Ablauf + Filtergut nur bedingt möglich. Am 25.09.07 betrug die Trockenschlammmenge (ohne Überstand und um die Fällmittelmenge vermindert) im Zulauf 31,9 g, im Ablauf 34,5 g, was an sich bereits unplausibel ist. Die Probenahme dauerte von 7:50 bis 8:50, also 1 Stunde lang. Während dieser Zeit fanden 3 Abreinigungsvorgänge statt, von denen bei einem die gesamte Spülwassermenge aufgefangen wurde, darin waren 16,9 g Schlamm enthalten. Setzt man an, dass bei jedem dieser Abreinigungsvorgänge dieselbe Filtergutmenge von 16,9 g

vom Filtergewebe abgebürstet werden, wären dies 50,7 g, also deutlich mehr, als im Zulauf überhaupt registriert wurden. Offenbar ist diese Art der Analyse sehr streuungsbehaftet und die Resultate dürfen nicht überinterpretiert werden.

#### 4.4.2 Schwermetallanalysen

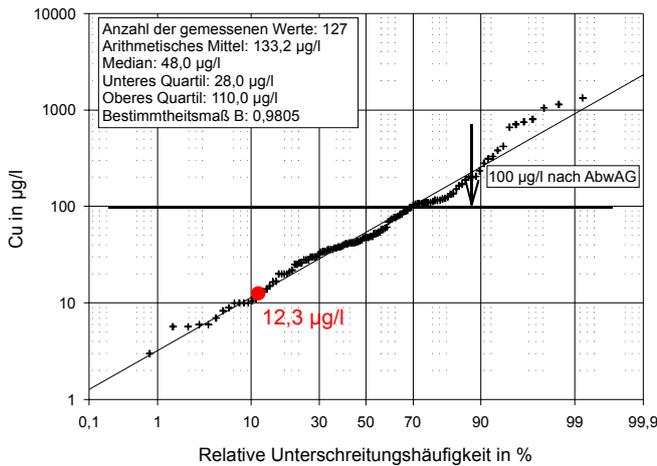
Da die Filteranlage für den Schlamm nicht die erwarteten Wirkungsgrade zeigte, war auch eine eingehende Untersuchung des Schwermetallrückhaltes nicht sinnvoll. Es wurde daher nur zwei Proben des getrockneten Schlammes zur Analyse an das Labor der Universität Karlsruhe übersandt: die eine aus dem Zulauf zum Filter (Probenahme am 18.07.2007), die andere aus dem Filterablauf desselben Ereignisses, wobei diese Probe jedoch wegen des wie erwähnt später festgestellten Risses im Filtergewebe keine Rückschlüsse auf einen Rückhalt im Filter zulässt. Die ermittelten Konzentrationen für die Schwermetalle Kupfer (Cu), Blei (Pb), Cadmium (Cd) und Zink (Zn) sind in Tabelle 3 angegeben. Bei diesem Regenereignis wurde kein Fällmittel eingesetzt. Die Ergebnisse sind hier der Vollständigkeit halber wiedergegeben.

In Bild 42 sind die im Zulauf der Anlage ermittelten Konzentrationen mit den Verteilungen aus dem ATV-Datenpool (Brombach und Fuchs 2002) verglichen. Es fällt auf, dass die Konzentrationen von Kupfer, Blei und Cadmium im Vergleich recht gering sind, insbesondere beim Cadmium, wo das gesamte Kollektiv unterschritten wird. Für das Zink liegen die Konzentrationen im mittleren Bereich.

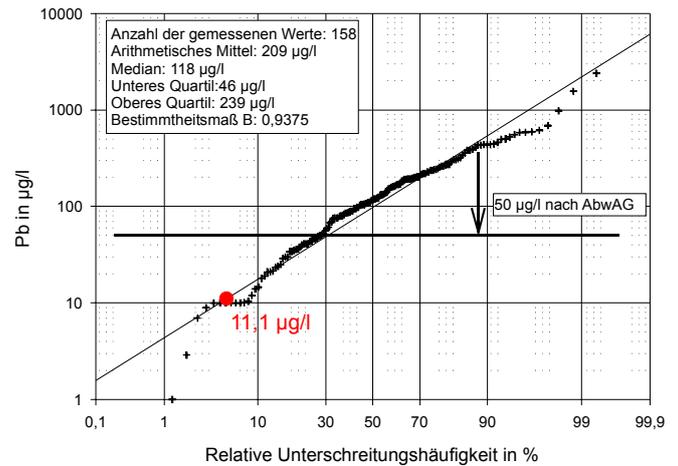
Tabelle 3: Schwermetallkonzentrationen im Schlamm bzw. im Wasser aus dem Zulauf der Filteranlage

		<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Zn</b>
Zulauf zur Filteranlage		149,05 mg/kg	134,65 mg/kg	1,01 mg/kg	2,4 g/kg
	AFS: 82,5 mg/l	<b>12,3 µg/l</b>	<b>11,1 µg/l</b>	<b>0,0833 µg/l</b>	<b>198 µg/l</b>
Ablauf der Filteranlage		138,05 mg/kg	123,85 mg/kg	1,06 mg/kg	2,33 g/kg
	AFS: 80,4 mg/l	<b>11,1 µg/l</b>	<b>10,0 µg/l</b>	<b>0,0852 µg/l</b>	<b>187 µg/l</b>

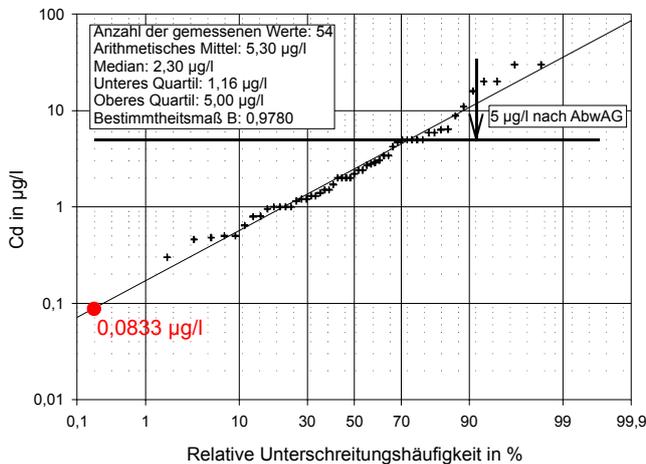
Kupfer im Regenwasserkanal  
der Trennkanalisation, Welt



Blei im Regenwasserkanal  
der Trennkanalisation, Welt



Cadmium im Regenwasserkanal  
der Trennkanalisation, Welt



Zink im Regenwasserkanal  
der Trennkanalisation, Welt

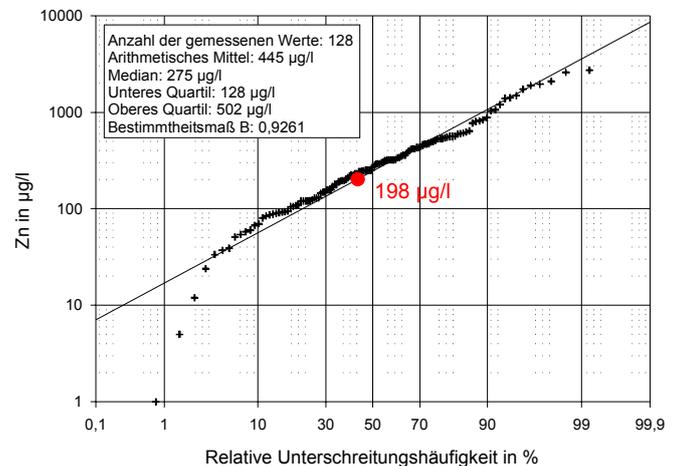


Bild 42: Im Zulauf der Filteranlage ermittelte Schwermetallkonzentrationen im Vergleich zu den Verteilungen aus dem ATV-Datenpool (Brombach und Fuchs 2002)

#### 4.5 Diskussion der experimentellen Befunde zum Schmutzrückhalt

Die experimentellen Befunde aus dem 2-monatigen Betrieb der Prototyp-Filteranlage zum erreichbaren Rückhalt an Schlamm sind im Wesentlichen wie folgt zusammenzufassen:

- **Bei größeren Zulaufkonzentrationen von mehreren 100 mg/l AFS ist der 36 µm-Filter in der Lage, die Schlammfracht deutlich zu reduzieren. Hier sind Konzentrationswirkungsgrade um 30-50 % erreichbar.**
- **Im Normalbetrieb des untersuchten Regenklärbeckens sind solch hohe Zulaufkonzentrationen zur Filteranlage jedoch selten. Typisch ist eine Zulaufkonzentration von etwa 40 mg/l AFS. Bei solchen**

**Regenereignissen konnte durch die Filteranlage nur in wenigen Fällen eine signifikante Reduzierung der AFS-Konzentrationen erreicht werden.**

- **Insbesondere bei größeren Zulaufkonzentrationen ist die erreichbare Durchsatzleistung des Filters sehr gering. Das Filtergewebe verlegt sehr schnell.**

Dieser Beobachtungen können folgendermaßen begründet werden:

1. Das vorgeschaltete Regenklärbecken ist sehr groß und die Aufenthaltszeit des Wassers recht lang. Aus diesem Grund setzen sich alle größeren Sedimentfraktionen im Becken ab. Im Wasser in Schwebelage verbleiben im Wesentlichen die sehr feinen Tonfraktionen. Weil das Sediment weitgehend anorganischen Charakter hat (kenntlich am geringen Glühverlust), betrifft das eine Grenzkorngröße in der Größenordnung von 20 – 25  $\mu\text{m}$ . Die Sinkgeschwindigkeit dieser Fraktion (Dichte wie bei Sand,  $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$ ) liegt nach der Literatur größenordnungsmäßig bei  $v_s = 0,03 \text{ cm/s}$ ; in einem völlig ruhenden Wasserkörper ohne Aufmischungsvorgänge von 2 m Tiefe benötigen solche Partikel also etwa 2 h zum Absetzen. Das sind plausible Werte. Praktisch alles gröbere Material findet sich also im Beckenschlamm. Im Regenbecken sieht die verbleibende Suspension der feineren Fraktionen durchaus trübe aus. Die angetroffene AFS-Konzentration von ca. 40 mg/l für die Tonfraktion deckt sich im Übrigen mit Beobachtungen im Rahmen des Projektes von Fuchs et al. (2006); dieser Autor berichtet in persönlicher Korrespondenz (seine Daten sind derzeit noch nicht zitierbar), dass diese Konzentration typisch für Regenwasser-Oberflächenabfluss nach einer Vorbehandlung sei und zwischen mehreren Standorten nur gering schwanke.
2. Diese feinere Tonfraktion passiert den hier untersuchten 35  $\mu\text{m}$ -Filter zum größten Teil ohne einen nennenswerten Rückhalt, auch wenn dies dem ersten Anschein nach widersprüchlich zur Beobachtung ist, dass der Filter sehr schnell verlegt. Eine Wirkung des Filterkuchens, der mit zunehmender Stärke den Grenzkorndurchmesser durch Verlegung der Filtermaschen herabsetzt, ist bei den durchgeführten Versuchen kaum spürbar, weil durch das sehr schnelle Verlegen des Filters und die daher sehr häufige Abreinigung offenbar die meiste Wassermenge bei gerade abgereinigtem Filter zum Abfluss gekommen ist. Eine andere denkbare Modellvorstellung wäre die der Verstopfungsfiltration, indem wenige größere Flocken die Maschen des Gewebes zunehmend verstopfen, während durch die noch offenen Maschen die Feinsuspension ungehindert passieren kann.
3. Überhaupt registrierbar wird die Tonfraktion erst entweder durch direkte AFS-Bestimmung mit einem extrem feinen 0,45  $\mu\text{m}$ -Membranfilter oder aber durch spontanes oder mittels Fällmittel provoziertes Ausflocken.

## 5 Erkenntnisse für die künftige Anwendung der mechanischen Filtration zur Regenwasserbehandlung im Trennsystem

Zur Verbesserung der Rückhaltewirkung von Regenklärbecken werden bei Brunner et al. (2002) bereits Filteranlagen, auch solche mechanischer Art, genannt. Sie sollten idealerweise in der Lage sein, feinputikuläre Stoffe über einer Korngröße von  $0,01 \text{ mm} = 10 \text{ }\mu\text{m}$  wirkungsvoll abzutrennen, zumal auch die Schwermetalle vorzugsweise an feinen Fraktionen adsorbiert sind. Das vorliegende Forschungsprojekt versuchte, diesem Ziel nahe zu kommen, indem eine mechanische Filteranlage mit einer Grenzkorngröße von  $36 \text{ }\mu\text{m}$  entwickelt und untersucht wurde. Die insgesamt gewonnenen Erkenntnisse für eine künftige Anwendung der mechanischen Filtration zur Reinigung von Regenwasser im Trennsystem lassen sich wie folgt zusammenfassen:

### 5.1 Gute Wirkung eines Regenklärbeckens zum Schmutzrückhalt

Mit einem großen Volumen des Regenklärbeckens erreicht man bei einem Trennsystem ohne Fehlan schlüsse, also mit zumeist anorganischem Schlamm, durchaus eine relativ gute Wirkung für den Rückhalt an größeren Partikeln (Sand- und Schlufffraktion, bis zu etwa  $50 \text{ }\mu\text{m}$  Korndurchmesser). Zwar konnte im Rahmen dieses Projektes der Wirkungsgrad des RKB selbst zahlenmäßig nicht belegt werden, aber es war klar zu erkennen, dass nur feinstes Material in Schwebelag blieb. Dabei ist auch noch der Effekt spontaner Flockung zu beobachten, d.h. ein Teil der feineren Fraktionen bildet insbesondere bei höheren Temperaturen spontan gut absetzbare Flocken, auch dieses Material bleibt im RKB liegen und könnte deshalb der Filteranlage gar nicht zugeführt werden.

Für das Nachschalten einer Filtration lässt sich sagen: Je besser der Wirkungsgrad des RKB selbst, also je größer dessen spezifisches Volumen ist, umso geringer ist das durch die Filteranlage erzielbare Plus an Gewässerschutz. Umgekehrt sollte das RKB aber auch nicht zu klein gewählt werden, weil dann der Filter (egal welcher Bauart) schneller verlegt und dann der erreichbare Durchsatz geringer wird. Bei einem kleineren Beckenvolumen wird es auch häufiger vorkommen, dass das RKB unter Umgehung der Filteranlage ins Gewässer überläuft. Siehe dazu auch Kap. 3.1.4.2.

Man könnte nun auf die Idee kommen, mit der Filteranlage auch die gröberen Fraktionen herauszufiltern, die sonst im RKB liegen bleiben. Weil es die feinen Fraktionen sind, die den erreichbaren Filterdurchsatz bestimmen, wäre dies bei einem Filter mit automatischer Abreinigung durchaus ohne großen Einfluss auf die Leistung denkbar (anders als bei einem nicht abgereinigten Volumenfilter, wo dann die Kapazität schnell erschöpft wäre). Andererseits ergeben sich durch die notwendige Volumenpufferung ohnehin Aufenthaltszeiten des Wassers im RKB, während derer sich die Feststoffe zwangsläufig absetzen.

## 5.2 Zum erforderlichen Grenzkorndurchmesser zur weitergehenden Reinigung von Regenwasser aus einem RKB

Die Filteranlage wird mit dem bereits mechanisch im RKB vorgereinigten Wasser beschickt. Mit der hier untersuchte Filtrationsanlage mit einer Maschenweite (= Grenzkorndurchmesser) von 36  $\mu\text{m}$  gelang es im Normalbetrieb nicht immer, einen zusätzlichen signifikanten Anteil der noch in Schwebelag befindlichen Sedimente herauszufiltern. Im Vergleich von Ablauf und Zulauf der Filteranlage ist der Wirkungsgrad nur gering, weil die feineren Fraktionen den Filter passieren und die gröberen, die der Filter herausholen könnte, zum großen Teil bereits im Regenbecken liegengelassen sind. In der hier untersuchten Art und Ausführung ist die Filteranlage daher wegen der geringen erreichten Wirkung unwirtschaftlich. Beim vorliegenden Projekt wurde dieser Effekt dadurch verstärkt, dass das RKB spezifisch sehr groß und dadurch auch recht effizient ist.

Auch bei einer idealen Filtration entfällt auf den Filter eine deutlich geringere zurückgehaltene Sedimentmenge als auf das vorgeschaltete Becken. Zum Gesamtwirkungsgrad trägt das RKB also den größeren Anteil bei.

Für eine erfolgversprechende technische Filtration muss der Grenzkorndurchmesser kleiner gewählt werden, also zu etwa 10  $\mu\text{m}$ , besser noch 6  $\mu\text{m}$ . Günstig konstruierte und optimal betriebene Bodenfilter können solche feine Fraktionen offenbar zurückhalten. Zwar liegen uns keine entsprechenden Korngrößenanalysen vor, aber der Umstand, dass die AFS-Gehalte im Ablauf sehr viel geringer als in der vorliegenden Untersuchung sind und nur etwa 2-3 mg/l betragen, lässt darauf schließen. Jedoch liegen derart feine Fraktionen unabhängig von der angewandten Filtertechnik wegen ihrer geringen Durchlässigkeit an der Grenze der technischen Filterbarkeit. Die Hoffnung, dass sich durch Bildung eines Filterkuchens auch kleinere Fraktionen abfiltrieren lassen und sich dadurch ein besserer Wirkungsgrad erreichen lässt als man aufgrund der Kornverteilung und der Maschenweite erwarten würde, wurde nicht erfüllt.

## 5.3 Erfahrungen für die technische Konzeption einer Filteranlage

In der Praxis ist an wenigen zentralen Regenklärbecken für den Betreiber auch eine relativ aufwändige Technik vom Wartungsaufwand her akzeptabel. Das Konzept einer zentralen Filteranlage sollte also weiter verfolgt werden.

Eine Druckbeschickung und ein Betrieb der Pumpe in der Art, dass ein bestimmter Druck und gleichzeitig ein zulässiger Abfluss nicht überschritten werden, stellen an sich technisch und betrieblich kein Problem dar und sind mit moderner SPS-Technik komfortabel und bedienerfreundlich zu realisieren. Die Filteranlage lässt sich dann unabhängig von Bauart, Größe und Betriebsweise eines vorhandenen oder geplanten Regenklärbeckens sehr flexibel aufstellen. Sinnvoll ist die automatische Überwachung der Filteranlage durch kontinuierliche Messung von Druckhöhen bzw. Wasserständen und dem Filterdurchsatz, um Effekte wie eine Filterverlebung oder andererseits einen Riss im Filtermaterial oder eine Undichtigkeit zu detektieren. Eine frostsichere Einhausung einer Filteranlage ist wünschenswert.

Der Stromverbrauch der Prototypanlage ist aus verschiedenen Gründen vergleichsweise hoch. Bei einer Anlage für den Praxiseinsatz sind daher Pumpe und Ansteuerung auf den erreichbaren Filterdurchsatz zu optimieren. Dasselbe gilt für die Betriebsweise der Anlage (z.B. die diskontinuierliche Abreinigung). Absolut gesehen ist jedoch der spezifische Energieverbrauch in kWh/m<sup>3</sup> wegen der behandelten kleinen Abflüsse auch bei Druckbeschickung einer Filteranlage nicht übermäßig groß. Der Energieverbrauch ist also kein starkes Gegenargument gegen eine Druckfiltration mit mäßig hohen Drücken (einige Meter Wassersäule), zumal im Rahmen der Gesamtwirtschaftlichkeit die Installations- und Wartungskosten eine große Rolle spielen.

Ein Oberflächenfilter, wie er hier wegen der technischen Einfachheit und der gewünschten automatischen Abreinigung gewählt wurde, ist bei der vorliegenden Filtrationsaufgabe nur unter größeren Schwierigkeiten anwendbar. Das Filtergut ist sehr schwer filtrierbar und dichtet das Filtergewebe in sehr kurzer Zeit weitgehend ab. Es ergibt sich daher trotz großer Filterfläche und hohem Beschickungsdruck nur ein sehr kleiner Filterdurchsatz. Die im vorigen Kapitel geforderten kleinen Grenzkorngrößen sind auch mit noch feineren Filtermedien bei einem Oberflächenfilter nicht ohne Weiteres möglich, weil das Filtergut einen sehr dichten Kuchen bildet. Die diskontinuierliche Abreinigung mit Rückspülung bewirkt eine ungünstige periodische Wechselbeanspruchung des Filtermediums, die konstruktive Vorkehrungen erfordert, um Risse zu vermeiden.

Eine Alternative zur Oberflächenfiltration könnte die Tiefenfiltration mit Schüttmedien sein, doch erfordert diese einen grundsätzlich anderen Aufbau der Filteranlage. Erfahrungen mit dieser Technik konnten im Rahmen dieses Projektes noch nicht gewonnen werden.

Die gesamte Menge an Filterschlamm ist selbst bei idealer Filtration (mit dem genannten kleineren Grenzkorndurchmesser) recht gering, stellt also kein Mengenproblem dar. Insbesondere hält der Filter sehr viel weniger Schlamm zurück als sich bereits vorher im Becken abgesetzt hat. Es wird deshalb in vielen Fällen möglich sein, Beckenschlamm und Filtergut zusammen zu entsorgen, also sie zu einer Kläranlage leiten oder aber am Standort herauszunehmen.

#### 5.4 Zur Bemessung einer Filteranlage

Anders als ursprünglich geplant konnte die Frage nach einer wirtschaftlichen Bemessung einer Filteranlage bislang noch nicht umfassend untersucht werden. Die Filteranlage wirkt hydrologisch ähnlich wie eine Kläranlage im Mischsystem, der Inhalt des Regenklärbeckens wird durch die Anlage entleert. Es gibt also auch hier, wie für das Mischsystem in ATV-A 128 (1992), einen Zusammenhang zwischen dem spezifischen Volumen  $V_s$  des Regenklärbeckens in m<sup>3</sup>/ha, der aus dem Filterdurchsatz zu berechnenden Regenabflussspende  $q_r$  in l/(s·ha) und der damit erreichbaren Entlastungsrate  $e_0$  in %. Durch hydrologische Langzeitsimulation lässt sich dieser Zusammenhang berechnen.

Im Rahmen eines künftigen, relativ einfachen Bemessungsverfahrens könnte man statt einer Simulation für den obigen Zusammenhang näherungsweise auch den bekannten Formelsatz nach ATV-A 128 (1992) anwenden. Es fehlt hierzu allerdings ein noch zu erarbeitendes Kriterium, wie groß die zulässige Entlastungsrate  $e_0$  gewählt werden kann.

Noch ausgefeilter könnte man den erforderlichen Filterdurchsatz unter Berücksichtigung der Wirkung des Filters und damit im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit bestimmen. Diese Optimierungsaufgabe wäre – sobald gesicherte Werte über die erreichbaren Rückhaltewirkungsgrade zur Verfügung stehen – mithilfe der Simulation recht einfach zu lösen.

## 6 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die technische Filtration von Regenwasser im Trennsystem ist eine sehr erfolgversprechende Technologie und sollte – auch wenn einige Ergebnisse des vorliegenden Projektes den Erwartungen nicht ganz entsprechen haben – weiter verfolgt werden. Die Ergebnisse dieses Projektes deuten auf eine beträchtliche technische Komplexität einer solchen Filteranlage hin. Es ist daher sinnvoll, das Konzept einer zentralen Filtration aus Zusatz zu einem Regenklärbecken beizubehalten.

Vordringliche Aufgabe ist es nach den Ergebnissen des vorliegenden Forschungsprojektes, eine Filtertechnik zu entwickeln, die in der Lage ist, deutlich feinere Kornfraktionen als hier untersucht abzufiltern (ca. 6-10  $\mu\text{m}$ ), und zwar bei einfachem, robustem Aufbau. Soll die Filteranlage noch handlich und von den Baukosten her wirtschaftlich sein, wird man nicht ohne Pumpenbeschickung und nicht ohne eine automatische Abreinigung auskommen. Von den Betriebskosten her ist bei Pumpenbeschickung ein Betrieb mit nicht übermäßig hoher Druckdifferenz zu bevorzugen.

Von der Filtertechnik her deuten die Ergebnisse darauf hin, dass eine Oberflächenfiltration wegen des sehr schnellen Verlegens und der geringen Durchlässigkeit des Filterkuchens für diese Anwendung generell wenig geeignet ist. Eine Volumenfiltration verspricht hier möglicherweise bessere Ergebnisse. In wieweit eine Querstromfiltration hier anwendbar wäre, könnte gleichfalls noch untersucht werden. Dasselbe gilt für eine Filtration mit Polstoffen. Eine Membranfiltration, wie sie auf Kläranlagen bereits mancherorts verwendet wird, dürfte verhältnismäßig aufwändig sein. Weil bei der Kombination RKB plus Filteranlage stets weniger Filterschlamm anfällt als sich im Regenklärbecken absetzt, könnte der Filterschlamm zur Entsorgung ins RKB zurückgegeben werden.

Die Frage nach der Wirksamkeit eines Regenklärbeckens selbst wurde zwar bereits von einigen Autoren exemplarisch untersucht, hier besteht aber trotzdem noch Bedarf an Grundlagenforschung. Eine interessante Ergänzung wäre die Anwendbarkeit von Flockungsmitteln als Zugabe in das Becken oder aber in den Zulauf zur Filteranlage. Hier gibt es bereits Grundlagenuntersuchungen, z.B. von Pfeifer und Hahn (1995) oder von Krauth und Bondareva (2000).

Schließlich ist auch die Frage der wirtschaftlichen Bemessung einer technischen Filtration noch näher zu untersuchen. Dafür müssten allerdings Aussagen über den erzielbaren Wirkungsgrad der Filteranlage wie auch über den des Regenklärbeckens zur Verfügung stehen.

## 7 Zusammenfassung

Das vorliegende Forschungsprojekt untersuchte die Nachrüstung eines 20 Jahre alten Regenklärbeckens in einem Trennsystem mit einem mechanischen Filter. Ziel war es, bei bestehenden und geplanten Trennsystemen mäßiger Größe (5-10 ha versiegelte Fläche) die zentrale Regenwasserbehandlung durch den zusätzlichen Verfahrensschritt der Filtration zu verbessern, ähnlich wie das bislang mit Bodenfiltern geschieht. Das Regenklärbecken (RKB) nimmt dabei zum einen die Funktion der Volumenpufferung wahr, wodurch die Filteranlage einen nur geringen kontinuierlichen Abfluss zu behandeln braucht. Zum anderen wird das Regenwasser im RKB auch durch Absetzen effektiv vorbehandelt.

Die gewählte Konzeption einer zentralen Filteranlage ist durchaus praxisgerecht. Anders als bei vielen dezentralen Filterschächten ist dabei auch ein höherer technischer Aufwand, etwa für Pumpenbeschickung und Fernüberwachung, für den Betreiber akzeptabel.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Filteranlage konzipiert und ein Prototyp entwickelt, gebaut und erprobt, die als Oberflächenfilter mit Pumpenbeschickung und diskontinuierlicher Abreinigung technisch verhältnismäßig einfach und robust aufgebaut ist. Als Filtermaterial wurde ein Textilgewebe mit 36 µm Maschenweite gewählt. Die Abreinigung erfolgt durch Rückspülen und zugleich durch oberflächliches Abbürsten und Spülen. Das abgereinigte Filtergut wird in das RKB zurückgegeben und zusammen mit dem sich dort ohnehin absetzenden Schlamm von Zeit zu Zeit zur Kläranlage gepumpt. Eine solche Anlage ist kompakt und weitgehend unabhängig von Bauart und Größe des Regenklärbeckens einsetzbar.

Die Filteranlage wurde neben dem vorhandenen RKB „Im Abelt“ in Bad Mergentheim aufgestellt, einem spezifisch recht großen Fangbecken mit eingestautem Zulaufkanal. Die Erprobung erfolgte während des Sommers und Herbstes 2007 während zahlreicher Regenereignisse. Es wurden Proben des Zulaufes zum Filter und des Filterablaufes gezogen und auf abfiltrierbare Stoffe hin analysiert. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die gewählte Filterfeinheit von 36 µm erwies sich jedoch als zu grob, um bei dem bereits im Becken durch Absetzen vorbehandelten Wasser einen entscheidenden zusätzlichen Schmutzrückhalt zu erreichen. Offensichtlich setzen sich alle gröberen Fraktionen bereits im RKB ab, während die nach der Beckenpassage noch vorhandenen und zum Filter geleiteten Feststoffe deutlich geringere Korngrößen haben und den Filter ungehindert passieren können.

Das zu filternde Feinstmaterial liegt wegen seiner sehr geringen Durchlässigkeit an der Grenze der technischen Filtrierbarkeit. Insgesamt lässt sich sagen, dass die hier angewandte reine Oberflächenfiltration für die vorliegende Aufgabe wenig geeignet ist. Der damit erreichbare Stoffrückhalt ist für eine wirtschaftliche Anwendung nicht ausreichend und außerdem der erreichbare Durchsatz trotz der beobachteten Passage des Feinstmaterials zu gering. Für eine Fortentwicklung sollte daher die Anwendbarkeit einer Volumenfiltration untersucht werden, die in der Lage sein sollte, noch feinere Fraktionen (6 -10 µm Korngröße) zurückzuhalten.

Zur Ermittlung des erforderlichen Durchsatzes einer Filteranlage an einem Regenklärbecken fehlt ein Bemessungsverfahren. Hierzu könnte man die Anlage einer Langzeitsimulation unterwerfen oder aber wie bei der Regenwasserbehandlung im Mischsystem nach ATV-A 128 (1992) vorgehen. Für die Beurteilung der späte-

ren Wirtschaftlichkeit ist jedoch neben dem erreichbaren Durchsatz auch der Wirkungsgrad ausschlaggebend, weshalb diese Frage noch nicht eingehend untersucht werden konnte. Der Prototyp hatte einen relativ hohen Energieverbrauch, der vor einer breiten Anwendung noch optimiert werden muss. Dieser ist allerdings nicht in erster Linie auf die verwendete Druckfiltration zurückzuführen.

Die technische Filtration in zentralen Anlagen ist trotz einiger Fehlschläge im vorliegenden Projekt eine erfolgversprechende Technik zur weitergehenden Reinigung von Regenabflüssen im Trennsystem. Für eine serienreife und wirtschaftliche Filteranlage ist jedoch noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand zu leisten.

Ausfertigungsdatum: 21.11.2007

Geschäftsleitung:

Bearbeitung:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Brombach

Dr.-Ing. Gebhard Weiß

## 8 Literatur

### DWA-Regelwerk:

- ATV-A 128 (1992): Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen
- ATV-DVWK-M 153 (2000): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser
- ATV-A 166 (1999): Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und –rückhaltung. Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung
- ATV-DVWK-M 177 (2001). Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen: Erläuterungen und Beispiele
- DWA-M 178 (2005): Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem

### DIN-Normen

- DIN 38 409 Teil 2 (1987): Summarische Wirkungs- und Stoffkenngößen (Gruppe H). Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe und des Glührückstandes (H 2). Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung
- DIN 38 409 Teil 9 (1980): Summarische Wirkungs- und Stoffkenngößen (Gruppe H). Bestimmung des Volumenanteils der absetzbaren Stoffe im Wasser und Abwasser (H 9). Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung

### Sonstige Quellen:

- ATV (1997a): Bedeutung der Abwasserfiltration aus der Sicht der Gewässer. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.1.6 „Bedeutung der Abwasserfiltration aus der Sicht der Gewässer“ im ATV-Fachausschuss 2.1 „Grundsätze der Abwasserreinigung hinsichtlich der Einleitung in Gewässer und deren Nutzung“. *Korrespondenz Abwasser*, 44. Jhrg., Heft 3, S. 519-523
- ATV (1997b): Abwasserfiltration. Arbeitsbericht des ATV-Fachausschusses 2.8 „Verfahren der weitergehenden Abwasserreinigung nach biologischer Behandlung“. *Korrespondenz Abwasser*, 44. Jhrg., Heft 3, S. 524-544
- Baumgärtner, J. (2006): Entwicklung eines Verfahrens oder Apparates zur technischen Filtration von Regenwasserabflüssen aus Trennkanalisationen. Diplomarbeit, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft (unveröffentlicht)
- Brombach, H. (2006): Abwasserkanalisation und Regenbecken im Spiegel der Statistik. *KA – Abwasser, Abfall* 53.Jhrg., Heft 11, S. 1114-1122
- Brombach, H., Fuchs, S. (2002): Datenpool gemessener Verschmutzungskonzentrationen von Trocken- und Regenwetterabflüssen in Misch- und Trennkanalisationen. Abschlussbericht des Projektes 1-01 des ATV-DVWK-Forschungsfonds 2001, Langfassung, unveröffentlicht. Hennef: DWA
- Brombach, H., Fuchs, S. (2003): Datenpool gemessener Verschmutzungskonzentrationen in Misch- und Trennkanalisationen. *KA – Abwasser, Abfall*, 50. Jhrg., Heft 4, S. 441-450
- Brombach, H., Michelbach, S., Wöhrle, Ch. (1993): Feststoffe in der Mischwasserkanalisation. Sedimentation und Remobilisierung. *Korrespondenz Abwasser*, 40. Jhrg., Heft 12, S. 1910-1926
- Brunner, P. et al. (2002): Handbuch zur Ableitung und Behandlung von Straßenoberflächenwasser. Entwurf, Stand 12.04.2002. Stuttgart: Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (unveröffentlicht)
- BWK M3 (2001): Ableitung von immissionsbezogenen Anforderungen an Misch- und Niederschlagswasser-einleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse. Merkblatt 3/BWK. Düsseldorf: Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V.

- Dierkes, C., Göbel, P., Coldewey, W.G. (2005): Entwicklung und Optimierung eines kombinierten unterirdischen Reinigungs- und Versickerungssystems für Regenwasser. Abschlussbericht, gefördert von der Bundesstiftung Umwelt unter Az. 18622. Münster: HydroCon GmbH
- EPA (1972): Water pollution aspects of street surface contaminants. Office of Research and Monitoring, United States Environmental Protection Agency, Report EPA-R2-72-081
- Fuchs, S., Lambert, B. (2006): Wechselwirkungen zwischen Regenwasserableitung, -behandlung und Gewässerschutz. 12. Abwasserseminar „Integrale Siedlungsentwässerung – Ziele, Aufgaben, Lösungsansätze“, Bauakademie Biberach, 19. Oktober 2006.
- Glas, M., Störr, H. (2007): Lamellenabscheider in der Regenwasserbehandlung. Planung, Bau und erste Betriebserfahrungen. KA – Abwasser, Abfall, 54. Jhrg., Heft 5, S. 462-472
- Grüning, H., Hoppe, H. (2007a): Innovative alternatives for the treatment of stormwater in separate sewage system catchments. Lyon: NOVATECH 2007, Vol. 2, Session 3.2, pp. 649-656
- Grüning, H., Hoppe, H. (2007b): Vergleichende Untersuchungen zu Regenklärbecken und Filtersystemen. DWA, 6. Regenwassertage, 11.-12.06.2007, Passau. Vgl. auch [http://www.holgerhoppe.de/mediapool/42/421938/data/Gruening\\_Hoppe\\_Passau\\_070501.pdf](http://www.holgerhoppe.de/mediapool/42/421938/data/Gruening_Hoppe_Passau_070501.pdf), besucht am 19.11.2007
- itwh (2002): Kontinuierliche Simulation zur Bemessung von Speicherbauwerken in urbanen Entwässerungssystemen. KOSIM 6.3 Anwenderhandbuch, Stand 18.01.2002. Hannover: Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie
- Hydro International (2007): Up-Flo Filter - Stormwater filtration in less than 1/5 the footprint of other filtration devices. [http://www.hydro-international.biz/us/stormwater\\_us/upflo.php](http://www.hydro-international.biz/us/stormwater_us/upflo.php) und [http://www.hydro-international.biz/us/media/SW\\_SS\\_UF\\_05-30-07.pdf](http://www.hydro-international.biz/us/media/SW_SS_UF_05-30-07.pdf), besucht am 19.11.2007
- Krauth, K., Bondareva, O. (2000): Anwendung von Flockungsverfahren bei der Regenwasserbehandlung. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Förderkennzeichen PA 97.189. Universität Stuttgart. <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/fofaweb/print/PA97189SBer.pdf>, besucht am 30.10.2007
- LfU (1999): Arbeitsmaterialien zur fortschrittlichen Regenwasserbehandlung in Baden-Württemberg. Teil 1: Mischsystem. Rundschreiben an die Unteren Wasserbehörden. Stuttgart: Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, 11.03.1999 (unveröffentlicht)
- LfU (2005a): Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten. Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Download unter [www.lfu.bwl.de](http://www.lfu.bwl.de)
- LfU (2005b): Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser: Regenrückhaltung. Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Download unter [www.lfu.bwl.de](http://www.lfu.bwl.de)
- LfU (2002): Bodenfilter zur Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem. 2., überarbeitete Auflage. Reihe Siedlungswasserwirtschaft. Karlsruhe: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
- LUBW (2007): Fremdwasser in kommunalen Kläranlagen: Erkennen, bewerten und vermeiden. Langfassung. Karlsruhe: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- Luckert, K. (2004): Handbuch der mechanischen Fest-Flüssig-Trennung. Hrsg.: Klaus Luckert. Essen: Vulkan-Verlag
- Michelbach, S., Striebel, Th., Wöhrle, Ch. (1992): Absetzbarkeit von schwermetallbelasteten Feststoffen im Mischwasser. gwf – Wasser / Abwasser 133, Heft 8, S. 404-410
- MUNLV (2003): Retentionsbodenfilter: Handbuch für Planung, Bau und Betrieb. Hrsg: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, ISBN 3-9808617-1-6.
- MUNLV (2004): Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren. Runderlass des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz vom 26.05.2004. MBI. NRW 2004, S. 583 ff.
- Pfeifer, R., Hahn, H. (1995): Regenwasserbehandlung in Trennsystemen – Leistungssteigerung durch chemische Flockung? Schadstoffe im Regenabfluß III, Präsentation eines BMBF-Verbundprojektes. Universität Karlsruhe, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Heft 73, S. 483-517
- RiStWag (2002): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau

Schreck, P. (1994): Einlauf- oder Sickerschacht mit einem Filter. Deutsches Patentamt, Patentschrift DE 38 22 661 C2, Veröffentlichungstag 20.01.1994

Sommer, H. (2007): Innolet. Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker GmbH,  
<http://www.sieker.de/modules/wfsection/article.php?articleid=15>, besucht am 19.11.2007

Stotz, G., Krauth, K. (2001): Wirkung von Regenklärbecken für die Reinigung von Niederschlagswasser. KA – Abwasser, Abfall, 48. Jhrg., Heft 5, S. 639-650

Veolia (2007): Actiflo, kompakte Wasseraufbereitung. Webseite der Veolia Wasser.  
<http://www.veoliawasser.de/de/Know-how/Innovationen/Patente/ACTIFLO/>, besucht am 13.11.2007

VSA (2002): Regenwasserentsorgung. Richtlinie zur Versickerung, Retention und Ableitung von Niederschlagswasser in Siedlungsgebieten. Zürich: Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute

VSA (2007): Abwassereinleitungen in Gewässer bei Regenwetter (STORM). Richtlinie für die konzeptuelle Planung von Maßnahmen. 2. Vernehmlassung. Zürich: Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA)

Weiß, G., Brombach, H. (2004): Kritische Bewertung der Immissionsbelastungen der Gewässer durch Regenwassereinleitungen. 37. Essener Tagung, Essen, 24.-26.03.2004. Gewässerschutz-Wasser-Abwasser (Aachen 2004), Heft 193, S. 20/1 – 20/11