ETH zürich

Pilotierung und Umsetzung der GAK-Filtration zur Spurenstoffelimination auf der ARA Muri

Masterprojektarbeit HS 2019

Autor:

Tobias Bührer 14-920-037 buehrert@student.ethz.ch

Leitung:

Prof. Dr. Kai Udert

Betreuung:

Marc Böhler (Eawag)

Dr. Jonas Löwenberg (CSD Ingenieure)

Zürich, 20. Dezember 2019

Professur für Siedlungswasserwirtschaft

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Pilotierung und Umsetzung der GAK-Filtration zur Spurenstoffelimination auf der ARA Muri

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):	**Vorname(n):**
Bührer	Tobias

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt „Zitier-Knigge“ beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum	**Unterschrift(en)**
Zürich, 20. Dezember 2019	T. Bührer

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.

Zusammenfassung

Abwasserreinigungsanlagen (ARA) sind wesentlich am Eintrag von Mikroverunreinigungen (MV) in die Gewässer verantwortlich. Aufgrund der nachteiligen Wirkung auf Wasserlebewesen sind einige Anlagen in der Schweiz gesetzlich dazu verpflichtet, Mikroverunreinigungen zu eliminieren. Die ARA Muri ist eine dieser Anlagen. Es ist geplant auf der ARA Muri eine Eliminierung mittels granulierter Aktivkohle (GAK) zu erreichen. Zu diesem Zweck sollen vier Filterzellen gebaut werden.

Diese Masterprojektarbeit hat zum Ziel, ein Filterschaltungskonzept zu erstellen, so dass die GAK möglichst effizient genutzt wird. Dazu wurden Daten der Pilotierung auf der ARA Muri, Daten von Referenzanlagen und neu erhobene Daten bei spezifischen Messungen in der Pilotanlage genutzt, um ein Matlab basiertes Simulationsprogramm zu schreiben. Mit Grundlage von Abflussganglinien der letzten Jahre wurde der Filterbetrieb für die nächsten 20 Jahre simuliert.

Die Resultate zeigen, dass mit einem parallelen Filterbetrieb und geeigneter Filterschaltung in Muri Standzeiten von 32'000 Bettvolumina erreicht werden können. In einem zwanzigjährigen Betrieb könnten so im Vergleich zu einem nicht parallelen Filterbetrieb bis zu 30 % an Kohle eingespart werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Zielsetzung 3

3 Grundlagen und theoretische Konzepte 4

3.1 Mikroverunreinigungen 4

3.2 GAK 5

3.3 ARA Muri 7

4 Methoden 10

4.1 Pilotierung in Muri 10

4.2 Referenzanlagen 11

4.3 Filterschaltung 11

5 Resultate 15

5.1 Vergleich mit Referenzanlagen 15

5.2 Schichtungsmessung 17

5.3 Regenwettermessung 17

5.4 Filterschaltung 19

6 Diskussion 22

7 Schlussfolgerung 25

8 Literaturverzeichnis 26

Anhang i

1 Einleitung

Für Menschen, Tiere und Pflanzen sind Gewässer eine wichtige Lebensgrundlage, welche erhalten bleiben sollen. Das Leitbild Fliessgewässer Schweiz enthält drei Entwicklungsziele: Ausreichender Gewässerraum, ausreichende Wasserführung und ausreichende Wasserqualität (BUWAL 2003).

Schadstoffeinträge aus Siedlung, Industrie und Landwirtschaft beeinflussen die Wasserqualität negativ (Kunz et al. 2016). Durch stetige Verbesserungen der Siedlungsentwässerung (Kanalisationen, Regenrückhaltebecken und Abwasserreinigungsanlagen) konnte die Wasserqualität der Schweizer Bäche, Flüsse und Seen in den letzten 50 Jahren stark verbessert werden. Seit 1965 erhöhte sich die Anzahl Einwohnerinnen und Einwohner der Schweiz, die an eine zentrale Abwasserreinigungsanlage (ARA) angeschlossen sind, von 14 % auf 97 % im Jahr 2005 (Gälli, Ort und Schärer 2009). Dadurch, aber auch durch die stetige Erhöhung des Ausbaustandes und der Reinigungsleistung (Strähl et al. 2013), konnte eine starke Reduktion des Nährstoffeintrags erzielt werden (Gälli, Ort und Schärer 2009).

Eine aktuelle grosse Herausforderung ist der Eintrag von synthetischen, organischen Spurenstoffen in die Gewässer. In der Schweiz werden über 30'000 synthetische organische Stoffe verwendet. Die sogenannten Mikroverunreinigungen (MV) sind Pflanzenschutzmittel, Biozide, Pharmaka oder Inhaltstoffe von Konsumentenprodukten (Körperpflegeprodukte, Reinigungsmittel, etc.), welche in der Industrie, im Gewerbe und in Haushalten eingesetzt werden. Viele dieser Mikroverunreinigungen gelangen durch gereinigtes Abwasser, aber auch durch diffuse Quellen wie Mischwasser- oder Regenwasserentlastungen, Lecke in der Kanalisation oder in landwirtschaftlichen Anlagen in die Gewässer. Die Mikroverunreinigungen können in den Gewässern in sehr tiefen Konzentrationen (Nano- bis Mikrogramm pro Liter) nachgewiesen werden und nachteilige Wirkungen auf Wasserlebewesen ausüben. Schwer abbaubare Stoffe werden in der ARA meist nur zum Teil zurückgehalten oder abgebaut. Die Stoffe verlassen die ARAs deshalb häufig unverändert. Es kann daher zu Akkumulationen von Mikroverunreinigungen kommen, wenn mehrere ARAs in dasselbe Gewässer entwässern (BUWAL 2003, Maurer und Herlyn 2006).

Aufgrund dieser Problematik hat das Schweizerische Parlament 2014 beschlossen, ausgewählte Kläranlagen in der Schweiz für die Elimination von Mikroverunreinigungen aufzurüsten. Die Kriterien dazu wurden in der Gewässerschutzverordnung spezifiziert. Stark belastete Gewässer werden somit künftig von organischen Spurenstoffen, welche aus dem Abwasser in die Gewässer gelangen, entlastet (BAFU 2014).

Die zur Elimination erforderliche Technologie wird vom Bund nicht vorgeschrieben. Es sind verschiedene Verfahren möglich, welche Mikroverunreinigungen eliminieren können. Dazu gehören die Behandlung mit Pulveraktivkohle (PAK), die Ozonung, die Behandlung mit granu-

lierte Aktivkohle (GAK), der Rückhalt mittels dichter Membranen (Nanofiltration, Umkehrosmose), die Oxidation der Stoffe mit OH-Radikalen, sowie der Einsatz von Ferrat (Abegglen und Siegrist 2012).

Die Behandlung mit PAK und die Ozonung haben sich bereits in der Vergangenheit als besonders tauglich und wirtschaftlich bewährt. Eine grosstechnische Untersuchung der Eawag zeigte, dass die GAK-Filtration ebenfalls geeignet ist (Bitterwolf et al. 2017). Ein Vorteil der GAK-Filtration ist die Möglichkeit der Parallelschaltung von mehreren Filtern. Dies führ zu einer deutlich besseren Ausnutzung der Kohle und damit zu längeren Standzeiten (Benstöm et al. 2016).

Muri liegt im aargauischen Freiamt. Aufgrund des hohen Abwasseranteils im Vorfluter ist die ARA Muri dazu verpflichtet, zukünftig ein Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigung zu betreiben. Eine Ausbaustudie zeigt auf, dass eine GAK-Filtration bei effizienter Auslastung und Gestaltung die wirtschaftlich günstigste Variante für die ARA Muri sein könnte (Kuster + Hager 2016). Das mit dem Bauprojekt beauftragte Ingenieurbüro CSD Envirotec hat im Zuge der Projektierung von November 2018 bis November 2019 eine Pilotierung zur GAK-Filtration durchgeführt. Sie soll wichtige Daten für den Betrieb und die Auslegung einer grosstechnischen GAK-Filtration ergeben. Die vorliegende Masterprojektarbeit hat zum Ziel, mit den bei der Pilotierung gewonnenen Daten, mit Daten von Referenzanlagen, sowie mit zusätzlich erhobenen Daten ein Filterschaltungskonzept zu erstellen. In einem ersten Schritt wurden die Grundlagen beschafft, Annahmen getroffen und zusätzliche Daten erhoben. In einem nächsten Schritt wurde das Konzept zur Filterschaltung erarbeitet, mit dem Ziel, möglichst lange Standzeiten zu erreichen.

2 Zielsetzung

Die ARA Muri ist gesetzlich dazu verpflichtet, Mikroverunreinigungen (MV) zu eliminieren. Eine Vorstudie hat gezeigt, dass die GAK-Filtration ein geeignetes und kostengünstiges Verfahren sein könnte. Das für das Bauprojekt beauftragte Ingenieurbüro hat während einem Jahr eine Pilotanlage mit zwei GAK-Filtern auf der ARA Muri betrieben. Mithilfe der gewonnenen Daten sowie mit Daten von Referenzobjekten der Eawag soll nun im Rahmen dieser Masterprojektarbeit ein Konzept zur Filterschaltung erstellt werden.

Die Masterprojektarbeit soll die folgende Hypothese bestätigen oder wiederlegen:

Durch geeignete Filterschaltung kann mit 3 GAK Filtern auf der ARA Muri eine effiziente Elimination von Mikroverunreinigungen erzielt werden.

Zur Überprüfung der effizienten Elimination wird im Zusammenhang mit dieser Masterprojektarbeit der totale Kohleverbrauch in einem zwanzigjährigen Betrieb untersucht.

Zur Beantwortung der obigen Hypothese sollen noch zwei weitere Unterhypothesen überprüft werden.

Im Rahmen der Pilotierung wurde nicht spezifisch auf Regenwetter geachtet. Bei Regenwetter ist der Zulauf grösser, was kürzere Kontaktzeiten bewirkt (vgl. zu diesem Begriff Abschnitt 3.2.1), und der Zulauf ist verdünnt, was zu geringeren MV-Konzentrationen und schnellerem Erreichen des Gleichgewichts führt. In Bülach wurde gezeigt, dass die Elimination bei Regenwetter massgebend für die Standzeiten ist (Bitterwolf et al. 2017). Der Einfluss des Regenwetters soll deshalb in Muri spezifisch untersucht werden. Daraus ergibt sich folgende Unterhypothese:

Die Eliminationsleistung bei Regenwetter ist schlechter und muss daher im Konzept berücksichtig werden.

Damit das GAK-Material optimal ausgenutzt wird, sollte es von oben nach unten beladen werden. Der GAK-Filter wird regelmässig rückgespült. Durch unterschiedliche Körnung und Dichte des Filtermaterials sollte sich jeweils wieder die gleiche Schichtung einstellen. Falls sich nach dem Rückspülen keine Schichtung einstellt, sondern das GAK-Material sich vermischt, kann der Filter gegebenenfalls schneller erschöpfen (Böhler et al. 2017, Benstöm et al. 2016). Mit der Überprüfung der Schichtung nach mehreren Rückspülungen soll geprüft werden, ob sich eine Schichtung einstellt. Daraus ergibt sich folgende Unterhypothese:

Nach einer Rückspülung stellt sich die gleiche Schichtung ein; die berechneten Eliminationsleistungen können deshalb für die Erstellung des Konzepts genutzt werden.

3 Grundlagen und theoretische Konzepte

3.1 Mikroverunreinigungen

Wie in der Einleitung erläutert, hat das Schweizerische Parlament beschlossen, ausgewählte Kläranlagen in der Schweiz für die Elimination von Mikroverunreinigungen (MV) aufzurüsten. Die Gewässerschutzverordnung spezifiziert, welche Kläranlagen eine Elimination erreichen müssen (Bundesrat 1998). Dies sind:

- Anlagen mit mehr als 80'000 angeschlossenen Einwohnern,
- Anlagen mit mehr als 24'000 angeschlossenen Einwohnern im Einzugsgebiet von Seen,
- Anlagen mit mehr als 8'000 angeschlossenen Einwohnern, die in ein Fliessgewässer mit einem Anteil von mehr als 10 % Abwasser (von bezüglich Mikroverunreinigungen nicht gereinigtem Abwasser) einleiten,
- Anlagen mit mehr als 8'000 angeschlossenen Einwohnern, wenn besondere hydrogeologische Verhältnisse vorliegen.

Die genannten Anlagen müssen eine Eliminationsleistung von 80 %, gemessen anhand von ausgewählten Substanzen, erreichen. Diese ausgewählten Substanzen, auch als Leitsubstanzen bekannt, sind in einer Verordnung des UVEK (2016) spezifiziert und in Tabelle 3—1 aufgelistet.

Die Eliminationsleistung der einzelnen Mikroverunreinigungen wird wie in Formel 3—1 berechnet. Die mittlere Eliminationsleistung berechnet sich aus dem Mittelwert der Eliminationsleistungen aller betrachteten Mikroverunreinigungen.

$$\text{Eliminationsleistung } [\%] = \left(1 - \frac{c_i}{c_{i,0}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{\text{Ablaufkonzentration}}{\text{Zulaufkonzentration}}\right) * 100 \qquad (3—1)$$

Tabelle 3—1: Die zwölf Leitsubstanzen gemäss (UVEK 2016). Sie werden unterteilt in sehr gut und gut eliminierbare Stoffe.

	Stoffname	Stoffgrupp
Sehr gut eliminierbare Stoffe	Amisulprid	Arzneimittelwirkstoff
	Carbamazepin	Arzneimittelwirkstoff
	Citalopram	Arzneimittelwirkstoff
	Clarithromycin	Arzneimittelwirkstoff
	Diclofenac	Arzneimittelwirkstoff
	Hydrochlorothiazid	Arzneimittelwirkstoff
	Metoprolol	Arzneimittelwirkstoff
	Venlafaxin	Arzneimittelwirkstoff
Gut eliminierbare Stoffe	Benzotriazol	Korrosionsschutz
	Candesartan	Arzneimittelwirkstoff
	Irbesartan	Arzneimittelwirkstoff
	Methylbenzotriazol	Korrosionsschutz

3.1.1 SAK

Viele elektronenreiche, organische Moleküle absorbieren Licht bei einer Wellenlänge von 254 nm. Der spektrale Absorptionskoeffizient bei dieser Wellenlänge (SAK_{254}) ist ein Mass für die Schwächung von Lichtstrahlen. Die Einheit ist Extinktion pro Meter. Mikroverunreinigungen werden bei der GAK-Filtration adsorbiert. Der Unterschied des SAK_{254}-Wertes vor und nach einer Behandlung kann dazu genutzt werden, um auf die Eliminationsleistung zu schliessen (Bitterwolf et al. 2017). Die Abnahme berechnet sich wie in Formel 3—2.

$$\text{SAK Abnahme } [\%] = \left(1 - \frac{SAK_{254} \text{ im Ablauf}}{SAK_{254} \text{ im Zulauf}}\right) * 100 \qquad (3—2)$$

Ein Vergleich mehrerer Studien zeigt, dass die SAK_{254} ein geeigneter Ersatzparameter zur Analytik von Mikroverunreinigungen darstellt (Wunderlin 2017). Hubaux, Schachtler und Götz (2017) zeigen eine Korrelation zwischen der Abnahme des SAK_{254} Wertes und der Eliminationsleistung. Im Folgenden wird in dieser Arbeit jeweils SAK als Synonym für SAK_{254} verwendet.

3.2 GAK

Aktivkohle besitzt eine sehr grosse Oberfläche (typisch: 800 – 1200 m^2/g) und hat somit eine hohe Adsorptionskapazität zur Aufnahme gelöster organischer Stoffe. Granulierte Aktivkohle (GAK) weist einen Durchmesser von wenigen Millimetern auf (ca. 0.5 – 4.0 mm) (Benstöm et al. 2016). GAK-Filter werden oftmals als Festbettfilter betrieben. Dabei nimmt die Konzentration der gelösten Stoffe (dazu gehören auch Mikroverunreinigungen) von oben nach unten ab; der Filter wird mit den Stoffen beladen. Die Stoffe adsorbieren dabei an die Oberfläche der GAK.

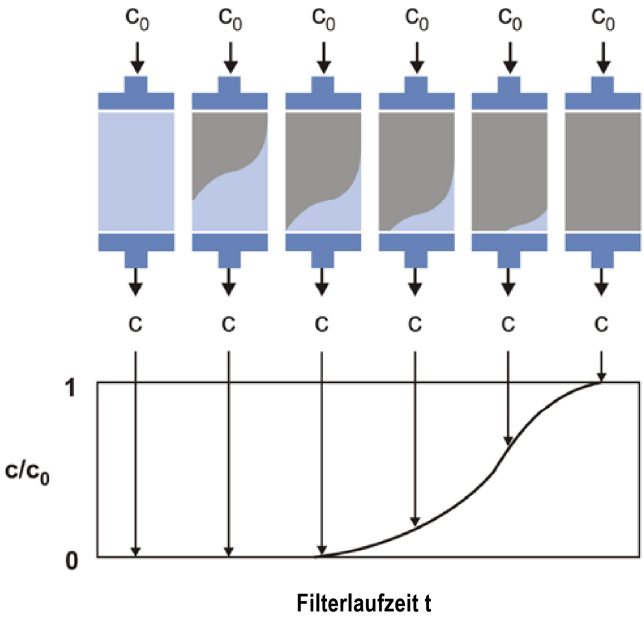

Abbildung 3—1: Verlauf der Beladung (oben) bzw. Konzentrationsprofil eines gelösten Stoffes (unten) im Ablauf von Filtern mit granulierter Aktivkohle (aus Beier 2010, nach Sontheimer et al. 1995).

Zu Beginn werden alle Stoffe adsorbiert, mit der Zeit stellt sich im oberen Bereich ein Gleichgewicht zwischen den gelösten Stoffen und den bereits angelagerten Stoffen ein. Die Adsorptionskapazität ist an dieser Stelle erschöpft; dieser Bereich wird auch gesättigte Zone genannt. Die Zone, in der die Kohle noch nicht im Gleichgewicht ist, wird Arbeitsfront genannt. Die Arbeitsfront wandert von oben nach unten durch den Filter, sobald das Ende des Filters erreicht wird, beginnt der Durchbruch. Die Konzentration der Stoffe beginnt im Abfluss zu steigen. Die Form und die Geschwindigkeit der Arbeitsfront ist je nach Stoff unterschiedlich (Abegglen und Siegrist 2012). Abbildung 3—1 zeigt die Arbeitsfront und die Konzentrationsänderung im Ablauf während der Filterlaufzeit. Wie in Abschnitt 3.1 erläutert, müssen die betroffenen Anlagen Mikroverunreinigungen zu 80 % eliminieren. Das heisst also, dass die Kohle bereits ausgetauscht werden muss, bevor der ganze Filter gesättigt ist. Um diesem Effekt ein wenig entgegen zu wirken, werden oftmals mehrere Filter parallelgeschaltet. Mehr dazu in Abschnitt 3.2.2.

3.2.1 Prozessparameter

Im Zusammenhang mit GAK werden verschiedene Prozessparameter gebraucht. Die wichtigsten werden hier kurz erklärt.

Die Filtergeschwindigkeit wird berechnet als (Benstöm et al. 2016):

$$\text{Filtergeschwindigkeit } v_F\ [m/h] = \frac{Q\ [m^3/h]}{A\ [m^2]} = \frac{\text{zugeführter Volumenstrom}}{\text{Filterfläche}} \qquad (3—3)$$

Die Kontaktzeit oder auch Leerbettverweilzeit (engl. Empty Bed Contact Time, EBCT) wird oftmals als alleinige Grösse zur Beschreibung von GAK-Filtern genutzt. Die Kontaktzeit ist die Aufenthaltszeit, bei der das zu behandelnde Wasser mit der Kohle in Kontakt ist. Sie wird berechnet als (Benstöm et al. 2016):

$$\text{Kontaktzeit EBCT [min]} = \frac{h_{GAK}\,[m]}{v_F\ [m/h]} * 60\ [min/h] = \frac{\text{Filterhöhe}}{\text{Filtergeschwindigkeit}} \text{ oder}$$
$$= \frac{h_{GAK}[m] * A[m^2]}{v_F[m/h] * A[m^2]} * 60\ [min/h] = \frac{V_f\ [m^3_{GAK}]}{Q\ [m^3/min]} = \frac{\text{Filtervolumen}}{\text{zugeführter Volumenstrom}} \qquad (3—4)$$

Für eine normierte Darstellung der Eliminationsleistung von GAK-Filtern werden üblicherweise Bettvolumina (BV) verwendet. Im Gegensatz zu Angaben von Laufzeiten (z.B. Monate), ist bei Bettvolumina auch das Filtervolumen in der Berechnung enthalten; so ist ein Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher GAK-Filter möglich (Benstöm et al. 2016). Die Bettvolumina werden wie folgt berechnet (Bitterwolf et al. 2017):

$$\text{Bettvolumina BV } \left[m^3_{Wasser}/m^3_{GAK}\right] = \frac{V_q\ [m^3_{Wasser}]}{V_f\ [m^3_{GAK}]} = \frac{\text{durchgesetzte Wassermenge}}{\text{Filtervolumen}} \qquad (3—5)$$

3.2.2 Parallelschaltung

Um die GAK maximal zu beladen werden im grosstechnischen Massstab Filterzellen seriell oder parallel betrieben. Konstruktionsbedingt wird auf Kläranlagen der Parallelbetrieb gewählt, da bei seriellem Betrieb das Wasser mehrfach gepumpt werden müsste (Bornemann et al.

2012). Die Parallelschaltung (siehe Abbildung 3—2) führt zu deutlich besserer Ausnutzung der GAK und damit zu längeren Standzeiten bzw. erreichter Bettvolumina. Diese Tatsache liegt darin begründet, dass für die Reinigungsleistung nicht die Ablaufkonzentration der einzelnen, sondern jene aller Filterzellen entscheidend ist. Die Eliminationsleistung einzelner Filterzellen kann deshalb Werte unterhalb 80 % erreichen, wobei die gesamte Eliminationsleistung aller Filterzellen über dem gesetzlichen Ziel liegt. Somit kann die GAK weiter beladen und Adsorptionsleistung bestmöglich ausgenutzt werden. Ein weiterer Vorteil der Parallelschaltung ist das schrittweise Zuschalten von Filterzellen in Abhängigkeit des Zulaufes. Somit werden die einzelnen Filter nicht unnötig beladen und es können längere Standzeiten erreicht werden (Bitterwolf et al. 2017, Crittenden et al. 2012).

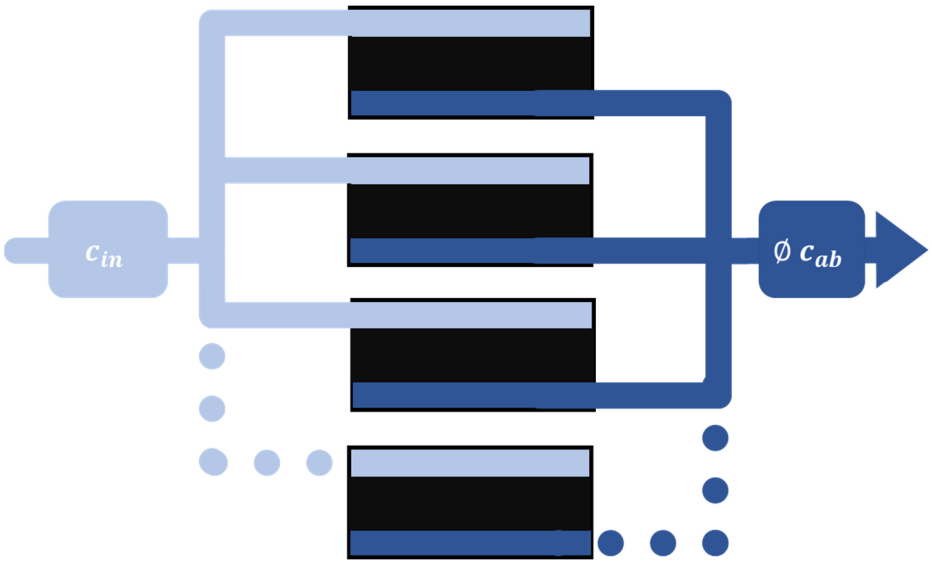

Abbildung 3—2: Schema einer Parallelschaltung von vier Filzerzellen. Drei parallele Filter plus zusätlich ein vierter Reservefilter.

3.3 ARA Muri

Die ARA Muri (8'812 angeschlossene Einwohner) leitet ihr Abwasser in die Bünz ein. Die Anlage wurde 1970 gebaut und 1996 das letzte Mal erweitert. Ein Fliessschema der ARA Muri ist in Abbildung A—1 im Anhang A ersichtlich. Die mittlere hydraulische Aufenthaltszeit liegt bei ca. 19 h, bei Regenwetter kann sie auf bis zu 8 h sinken (ARA Muri 2019a). Der Abwasseranteil in der Bünz liegt bei 50 % (Afu Aargau 2019), die ARA Muri ist deshalb wie in Abschnitt 3.1 erläutert dazu verpflichtet Mikroverunreinigungen zu eliminieren. Eine Studie von Kuster + Hager (2016) hat gezeigt, dass eine GAK-Filtration eine kostengünstige Variante sein könnte. Das Ingenieurbüro CSD Envirotec wurde daraufhin damit beauftragt ein Bauprojekt auszuarbeiten, dazu mehr in Abschnitt 3.3.2. Für die Erstellung dieses Bauprojekts haben CSD Envirotec auf der ARA Muri eine Pilotanlage betrieben (genaueres unter Abschnitt 3.3.1).

3.3.1 Pilotierung

Auf der ARA Muri wurden von November 2018 bis November 2019 zwei Filtersäulen mit unterschiedlichen Kohlen betrieben. Der erste Filter (GAK 1) wurde mit Norit GAC 1020 EN betrieben, eine Kohle mit mesh 10 x 20. Der zweite Filter (GAK 2) wurde mit Cyclocarb 401 mit

mesh 8 x 40 betrieben. Diese Masterprojektarbeit geht nicht mehr weiter auf diese unterschiedlichen Kohlen ein; es wird stattdessen auf eine andere Arbeit verwiesen: Kessler (2019).

Die beiden Filtersäulen sind in Abbildung 3—3 (links) zu sehen. Die schematische Abbildung einer Säule ist in Abbildung 3—3 (rechts) zu sehen. Die Filter werden von oben nach unten durchströmt. Sie haben einen Durchmesser von 0.287 m und eine Höhe von 2.0 m; daraus resultiert ein Filterbettvolumen von 0.13 m^3. Beide Filter wurden konstant mit 0.26 m^3/h Abwasser aus dem Ablauf des Sandfilters beschickt. Dies ergibt eine Filtergeschwindigkeit von 4 m/h und eine Kontaktzeit von 30 min. Wie in der schematischen Abbildung ersichtlich, sind auf verschiedenen Höhen Entnahmestellen vorhanden, welche für Probenahmen genutzt werden können.

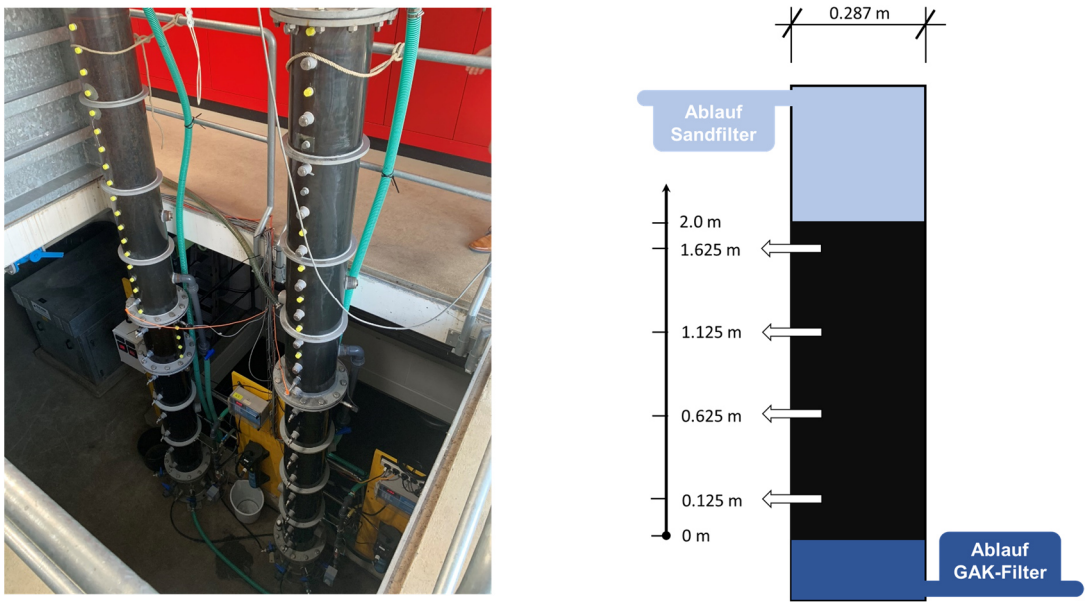

Abbildung 3—3: (Links) eine Aufnahme der zwei Filtersäulen. (Rechts) schematischer Aufbau einer Filtersäule.

Die eigentlichen Probenahmen erfolgten jedoch mithilfe von automatischen Probenehmern im Zulauf zu den GAK-Filtern, sowie in den beiden Abläufen der GAK-Filter. Es wurde eine zeitproportionale Beprobung während jeweils 24 h durchgeführt (alle 30 min ein Volumen von 200 ml). Davon wurden jeweils die SAK-Werte gemessen. Die Analytik zu den Mikroverunreinigungen wurde jeweils an der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) durchgeführt (Kessler 2019). Gemessen wurden zehn der zwölf Leitsubstanzen (Tabelle 3—1), dies sind: Amisulprid, Benzotriazol, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol und Venlafaxin. Zusätzlich wurden noch Mecoprop und Sulfamethoxazol gemessen. Das Probenahmeintervall war zu Beginn der Messperiode zuerst noch mehrmals wöchentlich, später wöchentlich, dann zweiwöchentlich und nach einem halben Jahr dann noch monatlich. Insgesamt stehen von der FHNW ausgewertete MV Daten von 24 Beprobungen (November 2018 – Juli 2019) zu Verfügung. Ausserdem gemessene SAK-Werte von 47 Beprobungen (November 2018 – Oktober 2019).

Aufgrund von Feststoff Anlagerungen und damit verbundenen Druckverlusten müssen GAK-Filter regelmässig rückgespült werden (Benstöm et al. 2016). Die beiden GAK-Filter wurden jeweils ca. alle 1'000 BV zurückgespült.

3.3.2 Projekt

Im Rahmen des Bauprojekts von CSD Envirotec wurden bereits einige Dimensionierungsgrössen definiert (Löwenberg 2019). Die ARA Muri ist auf maximal 140 l/s ausgelegt; dies entspricht der Dimensionierungswassermenge von 504 m^3/h. Bitterwolf et al. (2017) haben gezeigt, dass bei einer Kontaktzeit von 25 min die Eliminationsleistung eingehalten werden kann. Aus diesem Grund wurde eine Kontaktzeit von 25 min gewählt.

Tabelle 3—2: Dimensionierungsparameter zur GAK-Filtration in Muri

Parameter	Werte
Mittlerer Trockenwetterzufluss (Q_{TW})	251 m^3/h
Trockenwetterspitze ($Q_{TW,14}$)	317 m^3/h
Maximaler Zufluss (Q_{max}) = Dimensionierungswassermenge	504 m^3/h
Kontaktzeit	25 min
Nötiges Filtervolumen	210 m^3
Schütthöhe	2 m
Filterfläche	105 m^2
Masse GAK *(Annahme einer Dichte von 0.5 kg/dm^3)*	105 t

Die Schüttmenge eines Filters wurde auf 50 m^3 festgelegt; sie wurde auf die logistischen Rahmenbedingungen (Transportvolumen Silofahrzeug) abgestimmt. Es ist geplant, auf der ARA Muri vier GAK Filterzellen à je 50 m^3 zu bauen. Dies ergibt ein Filtervolumen von 200 m^3. Aufgrund einer kantonalen Vorgabe muss ein Reservefilter vorhanden sein. Bei der maximalen hydraulischen Belastung (504 m^3/h) kann die Kontaktzeit von 25 Minuten mit drei Filtern nicht eingehalten werden. CSD Envirotec argumentiert, dass der Bau eines weiteren Filters zu unverhältnismässig hohen Baukosten führen würde und deshalb eine tiefere Kontaktzeit vertretbar ist. (Löwenberg 2019).

4 Methoden

4.1 Pilotierung in Muri

Wie in Abschnitt 3.3.1 erläutert, wurden während der einjährigen Pilotierung jeweils verschiedenen Proben genommen und analysiert. Im Rahmen dieser Masterprojektarbeit wurden - wie in der Zielsetzung in Abschnitt 2 beschrieben - verschiedene Messungen im Zusammenhang mit der Pilotierung gemacht. Dazu gehört die Schichtungsmessung (Abschnitt 4.1.2) und die Regenwettermessungen (Abschnitt 4.1.3).

4.1.1 Analytik (SAK-Messung)

Die SAK-Messungen wurden mit einer rechteckigen Quarzglasküvette von Hach Lange GmbH mit einer Schichtdicke von 50 mm durchgeführt. Die Wellenlänge wurde beim Hach Spektralphotometer DR6000 manuell auf 254 nm definiert. Ein Volumen von 15 ml Wasserprobe wird in die Quarzglasküvette pipettiert, und im Photometer wird die Extinktion relativ zu destilliertem Wasser gemessen, als Extinktion pro 0.05 m. Die gängige Einheit ist Extinktion pro Meter, deshalb wird das Ergebnis jeweils mit 20 (1 m / 0.05 m) multipliziert

4.1.2 Schichtungsmessungen

Bei Rückspülungen sollte sich durch unterschiedliche Körnung und Dichte der GAK jeweils wieder die gleiche Schichtung einstellen (Benstöm et al. 2016). Falls sich verschiedene Schichten im Filter nach dem Rückspülen jeweils vermischen, kann die GAK gegebenenfalls schneller erschöpfen (Böhler et al. 2017).

Die Schichtungsmessung wurde am 12. November 2019 bei Trockenwetter durchgeführt. Zwischen dem 10. und 12. November gab es in Muri 0 mm Niederschlag (Hydrometrie Aargau 2019). Es wurde jeweils der Zulauf und der Ablauf der Filter beprobt sowie Proben aus Probenahmestellen erhoben, welche über die Höhe des Filters verteilt sind (siehe Abbildung 3—3 (rechts)). Die Probenahmen erfolgten zur Berücksichtigung der Filtergeschwindigkeit jeweils in fünfminütigen Abständen. Eine Probenahmeserie entsprich jeweils der Beprobung beider Filter von Zulauf bis Ablauf. Es wurden insgesamt vier Serien durchgeführt, wobei die Filter zwischen den Serien rückgespült wurden. Nach der Rückspülung wurde jeweils mindestens eine Kontaktzeit von 30 min eingehalten, bevor wieder eine Serie gemessen wurde. Damit konnte abgewartet werden, bis sich zum einen die GAK absetzt, und bis zum anderen das Spülwasser wieder den Filter verlassen hat. Ein genauer Zeitplan ist in Anhang B.1 zu finden.

4.1.3 Regenwettermessungen

Bei Regenwetter (504 m^3/h) ist der Zufluss doppelt so gross wie der mittlere Trockenwetterzufluss (251 m^3/h). Dementsprechend wird der Zufluss verdünnt, was zu geringeren Konzentrationen führt, was wiederum bedeutet, dass das Gleichgewicht im Filter schneller erreicht wird

und der Filter schneller beladen wird. Ausserdem wird durch den erhöhten Zufluss die Kontaktzeit verringert. In einer Studie von Bitterwolf et al. (2017) konnte gezeigt werden, dass die Eliminationsleistung bei Regenwetter entscheidend für die erreichten Bettvolumina ist. Aus diesem Grund wurde bei der Regenwettermessung der Einfluss der Verdünnung näher betrachtet. Auf den Einfluss der Kontaktzeit wurde nicht näher eingegangen; die Filter wurden mit einer konstanten Kontaktzeit von 30 min betrieben.

Die Regenwettermessungen wurden am 29. Oktober 2019 sowie am 26. und 27. November 2019 durchgeführt. In der Regenmessstation Muri wurden am 28. Oktober 2019 6 mm und am 29. Oktober 2019 14 mm Niederschlag gemessen (Hydrometrie Aargau 2019). Am 29. Oktober 2019 betrug der Zulauf zur ARA Muri im Schnitt 112 l/s (ARA Muri 2018). Zwischen dem 24. und 27. November 2019 wurde kein Niederschlag gemessen (Hydrometrie Aargau 2019).

Die Messung vom 29. Oktober 2019 erfolgte in vier Serien. Bei der zweiten und dritten Messkampagne am 26. und 27. Oktober 2019 wurde der Zulauf zu den GAK-Filtern mit Trinkwasser im Verhältnis 1:1 verdünnt. Es wurde somit eine Verdünnung bei Regenwetter simuliert. An beiden Tagen wurde eine Serie unverdünnt und zwei Serien verdünnt gemessen. Die genauen Zeitpläne befinden sich im Anhang B.1.

4.2 Referenzanlagen

Zusätzlich zu den während der Pilotierung auf der ARA Muri gewonnenen Daten wurden Daten von drei Referenzobjekten genutzt (Eawag 2019). Für die drei Referenzanlagen standen jeweils die Eliminationsleistungen und SAK-Abnahmen an verschiedenen Messtagen, sowie die dazugehörenden Bettvolumina zu Verfügung.

4.3 Filterschaltung

Das Ziel dieser Masterprojektarbeit ist die Ausarbeitung eines Konzepts zur geeigneten Filtersteuerung. Es wurden zwei verschiedene Konzepte, sowie eine Nullvariante zum Vergleich, zur Filterschaltung erarbeitet. Die Konzepte (Abschnitt 4.3.2) wurden für einen Zeitraum von 20 Jahren simuliert. Zu diesem Zweck wurde ein Matlab basiertes Simulationsprogramm geschrieben. Zur Erstellung des Programms wurden folgende Grundlagen verwendet:

- Eliminationsleistung (MV), SAK-Abnahme der zwei Pilotanlangen in Muri.
- Eliminationsleistung (MV), SAK-Abnahme der drei Referenzobjekte.
- Regenwettermessungen (Abschnitt 4.1.3)
- Zulaufganglinie der ARA Muri von Januar 2016 bis Mai 2019 (ARA Muri 2019b)
- Projektangaben (Abschnitt 3.3.2)

Für alle Konzepte wurden die Berechnungen in Abschnitt 4.3.1 durchgeführt. Der Unterschied zwischen den Konzepten liegt bei der Wahl der Filter. Das genaue Vorgehen wird in Abschnitt 4.3.2 erläutert. Die folgenden Rahmenbedingungen gelten für alle Konzepte:

- Die Kontaktzeit soll wenn möglich, wie in Abschnitt 3.3.2 erläutert, grösser als 25 min sein.
- Die Eliminationsleistung ist eine Funktion der Bettvolumina.
- Die Eliminationsleistung bei Regenwetter und Trockenwetter ist unterschiedlich.
- Als Eliminationsziel wurde eine mittlere Eliminationsleistung von 85 % gewählt, die Differenz zur gesetzlichen Eliminationsleistung ist ein Sicherheitsfaktor.
- Alle vier Filter sollen regelmässig mit Abwasser beschickt werden, damit die biologische Schicht intakt bleibt. (In Versuchen konnte festgestellt werden, dass Eliminationen von gewissen MV in GAK-Filtern auf eine biologische Aktivität zurückzuführen ist (Reungoat et al. 2011).)

4.3.1 Allgemeine Berechnungen

Die Zulaufganglinie hat eine zehnminütige Auflösung. Die weiteren Berechnungen wurden jeweils in zweistündigen Intervallen vorgenommen. Deshalb wurde die Zulaufganglinie in eine zweistündige Auflösung gemittelt. Die Simulationen wurden jeweils für eine Zeitdauer von 20 Jahren berechnet. Zu diesem Zweck wurden die vorhandenen Zulaufganglinien mehrfach aneinandergehängt.

Für jeden Zulaufwert (Zweistunden-Mittel) werden folgende Berechnungen durchgeführt:

Zuerst wird berechnet, wie viele Filter nötig sind, um eine Kontaktzeit von 25 min einzuhalten. Aufgrund der Bedingung, dass nur drei Filter genutzt werden können (da einer Reserve sein muss (Abschnitt 3.3.2)), ist die maximale Anzahl Filter = 3.

$$\text{Anzahl Filter [-]} = \text{aufrunden}\left(\frac{\text{Zulauf } [m^3/min] * \text{minimale Kontaktzeit [25 min]}}{\text{einzel Filtervolumen } [50\ m^3]}\right) \quad (4—1)$$

Die Wahl, welche der vier Filter genutzt werden wird in Abschnitt 4.3.2 erklärt.

Anschliessend wird die tatsächliche Kontaktzeit berechnet.

$$\text{Kontaktzeit (EBCT) [min]} = \frac{\text{Anzahl Filter} * \text{Filtervolumen } [50\ m^3]}{\text{Zulauf } [m^3/min]} \quad (4—2)$$

Die durchgesetzte Wassermenge je Zeitintervall (2 h) berechnet sich dann wie folgt:

$$\text{durchgesetzte Wassermenge } V_q\ [m^3] = \text{Zulauf } [m^3/min] * 2\ [h] * 60\ [min/h] \quad (4—3)$$

Die erreichten Bettvolumina werden ermittelt durch die Aufsummierung aller durchgesetzten Wassermengen geteilt durch das Filtervolumen, berechnet wie in Formel 3—5.

Die Bettvolumina werden dann in Eliminationsleistungen umgerechnet. Durch die Bildung des Mittelwerts der genutzten Filter wird für jeden Zeitschritt überprüft, ob die Eliminationsleistung von 85 % noch eingehalten werden kann. Wie in den Rahmenbedingungen definiert, ist die Eliminationsleistung eine Funktion der Bettvolumina. Wie diese hergeleitet wurde, wird im folgenden Abschnitt erklärt.

Eliminationsleistung als Funktion der Bettvolumina

Da die Eliminationsleistung in Muri bis zum Schluss sehr hoch ist, konnten nur Annahmen zum weiteren Verlauf (Eliminationsleistung bei höheren erreichten Bettvolumina) gemacht werden. Die verwendete Funktion bei Trockenwetter wurde durch das Expertenwissen von Marc Böhler definiert (Böhler 2019). Die Eliminationsleistung bei Regenwetter ist um einen konstanten Faktor tiefer als die Eliminationsleistung bei Trockenwetter. Der Faktor wird wie folgt hergeleitet:

Mit den Messungen bei Regen- und Trockenwetter wird die mittlere SAK-Abnahme über den Filter berechnet. Die SAK-Abnahme wird mit Hilfe der Korrelation zwischen MV-Elimination und SAK-Abnahme in eine prozentuale Minderung der Eliminationsleistung umgerechnet. Dabei wird mit einer polynomialen Regression eine Kurve an die Daten angepasst (Anhang C). Die berechnete prozentuale Minderung entspricht dem Faktor.

Als Vereinfachung wurde Trockenwetter angenommen, solange nur zwei Filter benötigt werden, und Regenwetter, sobald drei Filter benötigt werden.

Kennzahlen

Zum Vergleich der verschiedenen Konzepte dienen die folgende drei Kennzahlen:

Die **Standzeit** entspricht der erreichten Bettvolumina, bis die verwendeten GAK ausgetauscht werden müssen. Sie wird berechnet als mittlere erreichte Bettvolumina.

Die **Wechselhäufigkeit** für die einzelnen Filter. Sie entspricht der Dauer (in Jahren) bis ein Filter die maximale Standzeit erreicht hat.

Die **Menge an Kohle**, die in 20 Jahren genutzt wird. Sie wird berechnet durch die Anzahl an Filterwechseln multipliziert mit 50 m^3, zuzüglich 200 m^3 Kohle, die in allen Filtern zusammen zu Beginn genutzt werden.

4.3.2 Konzepte

Nullvariante

Bei der Nullvariante handelt es sich um einen grossen Filter mit einem Filtervolumen von 200 m^3.

Option A: Wochenplan

Beim Wochenplan werden Prioritäten erstellt. Wenn gemäss Formel 4—1 ein Filter notwendig ist, dann wird nur Priorität 1 genutzt. Sind zwei Filter notwendig, werden Priorität 1 und Priorität 2 genutzt. Sind drei Filter notwendig, wird zusätzlich zu Priorität 1 und 2 auch Priorität 3 genutzt. Bei Priorität 1 und 2 wechseln die Filter täglich (siehe Tabelle 4—1). Somit wird die Bedingung, dass alle Filter immer wieder mit Abwasser beschickt werden, eingehalten. Als Priorität 3 wird jeweils jener der zwei übriggebliebenen Filter gewählt, der schon mehr Bettvolumina erreicht hat, also schon länger in Betrieb ist (Dazu ein Beispiel in Anhang B.2). Anschliessend wird fortgefahren, wie in Abschnitt 4.3.1 erläutert. Sobald die Eliminationsleistung

von 85 % nicht mehr erreicht werden kann, wird die GAK des ältesten Filters (der Filter mit den meisten Bettvolumina) durch neue GAK ersetzt.

Tabelle 4—1: Der Wochenplan, Prioritäten und die dazugehörenden Filter.

	Filter 1	Filter 2	Filter 3	Filter 4
1. Tag Montag	Priorität 1	Priorität 2		
2. Tag Dienstag		Priorität 1	Priorität 2	
3. Tag Mittwoch			Priorität 1	Priorität 2
4. Tag Donnerstag	Priorität 2			Priorität 1
5. Tag Freitag	Priorität 1	Priorität 2		
6. Tag Samstag		Priorität 1	Priorität 2	
7. Tag Sonntag			Priorität 1	Priorität 2
8. Tag Montag	Priorität 2			Priorität 1
…				

Option B: Maximalplan

Bei Option B werden immer jene Filter gewählt, die bereits am meisten Bettvolumina erreicht haben. Dafür werden für jeden Zeitschritt (Zweistunden-Mittel) einige Bedingungen geprüft. Nachdem die Anzahl der Filter mit Formel 4—1 berechnet wurde, wird zuerst geprüft, ob alle Filter in den letzten Tagen mindestens einmal genutzt wurden. Falls dies nicht der Fall ist, werden die nicht benutzten Filter beschickt und so sichergestellt, dass alle Filter regelmässig genutzt werden.

Die Wahl fällt auf eine Kombination der Filter, in der immer jene Filter enthalten sind, die bereits am längsten in Betrieb sind (am meisten Bettvolumina), solange die Eliminationsleistung grösser als 85 % ist.

Ausserdem muss für jede Kombination auch ohne den Filter mit den wenigsten Bettvolumina die Möglichkeit einer Eliminationsleistung grösser als 85 % bestehen, da ein Filter als Reserve dienen soll.

- Wird nur ein Filter benötigt, fällt die Wahl auf den Filter mit den meisten Bettvolumina, der eine Eliminationsleistung von grösser als 85 % hat.
- Wenn zwei Filter benötigt werden, fällt die Wahl auf eine Kombination von zwei Filtern mit einer mittleren Eliminationsleistung grösser 85 %. Es wird dabei die Kombination der Filter gewählt, die in der Summe bereits am meisten Bettvolumina erreicht haben.
- Wenn drei Filter benötigt werden, fällt die Wahl auf die Kombination von den drei Filtern mit den meisten Bettvolumina.

Sobald die Eliminationsleistung von 85 % nicht mehr erreicht werden kann, wird die GAK des ältesten Filters (der Filter mit den meisten Bettvolumina) durch neue GAK ersetzt.

5 Resultate

5.1 Vergleich mit Referenzanlagen

5.1.1 Mikroverunreinigungen

In Abschnitt 3.3.1 wurde erläutert, dass in Muri nicht die gleichen Mikroverunreinigungen gemessen wurden wie bei den drei Referenzanlagen. Um einen Vergleich zwischen den Messungen in Muri und den Messungen der Referenzanlagen zu erlauben, werden in Tabelle 5—1 die jeweils am schlechtesten eliminierbaren Mikroverunreinigungen von links nach rechts aufgelistet. In kursiver Schrift sind die Stoffe aufgeführt, die nicht bei allen Anlagen untersucht wurden. Die Eliminationsleistung aller Mikroverunreinigungen in den einzelnen Anlagen sind in Anhang C abgebildet. In den Referenzanlagen wurde jeweils Candesartan, das in Muri nicht gemessen wurde, am wenigsten eliminiert. In Muri wurde in beiden Filter Mecoprop am schlechtesten eliminiert.

Tabelle 5—1: Für alle Anlagen von links nach rechts die fünf Mikroverunreinigungen welche am wenigsten eliminiert wurden.

Muri 1	*Mecoprop*	<	*Sulfamethoxazol*	<	Benzotriazol	<	Carbamazepin	<	Clarithromycin
Muri 2	*Mecoprop*	<	*Sulfamethoxazol*	<	Benzotriazol	<	Clarithromycin	<	Carbamazepin
Referenz 1	*Candesartan*	<	Venlafaxin	<	Irbesartan	<	Diclofenac	<	Clarithromycin
Referenz 2	*Candesartan*	<	Irbesartan	<	Carbamazepin	<	Clarithromycin	<	Benzotriazol
Referenz 3	*Candesartan*	<	Carbamazepin	<	Irbesartan	<	Clarithromycin	<	Metoprolol

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird jeweils mit der mittleren Elimination aller jeweils gemessenen Mikroverunreinigungen gerechnet.

Mittlere Eliminationsleistung

In Abbildung 5—1 ist die Eliminationsleistung der fünf Anlagen zu sehen, gemittelt für die zwölf gemessenen MV im zeitlichen Verlauf, aufgetragen über die durchgesetzten Bettvolumina. Die Kontaktzeit der beiden Filter in Muri liegt bei konstant 30 min. Die mittlere Kontaktzeit der Referenzanlage 1 liegt bei 35 min, jene der Referenzanlage 2 bei 21 min und jene der Referenzanlage 3 bei 26 min. Die mittlere Eliminationsleistung der beiden Filtersäulen in Muri liegt bis zum Ende der Messpunkte bei über 95 %. Die Eliminationsleistung der Pilotanlagen in Muri ist im Vergleich zu den Referenzanlagen besser.

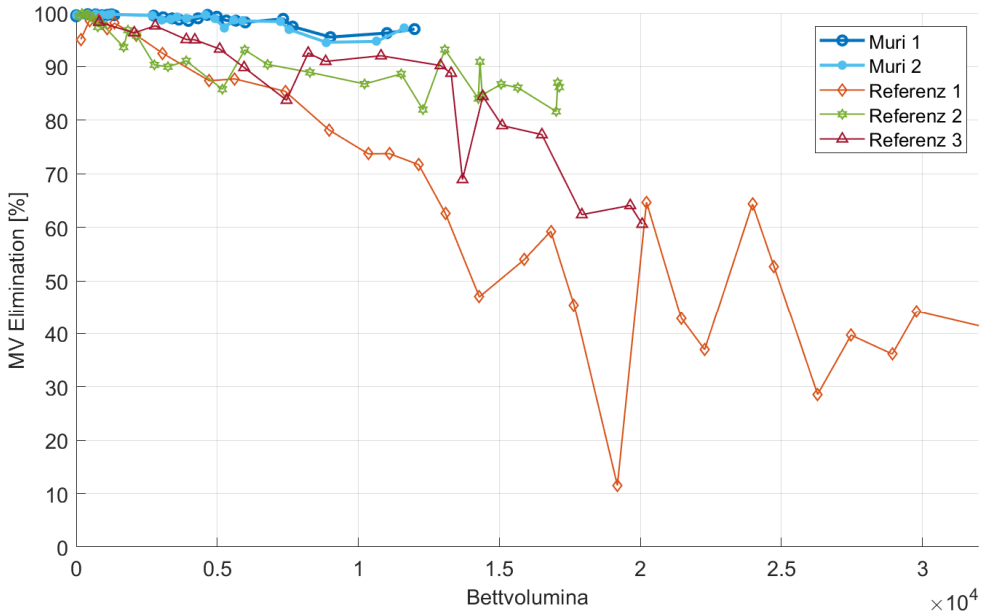

Abbildung 5—1: Die mittlere Elimination der zwölf gemessenen Mikroverunreinigungen (bei den Referenzanlagen sind dies die 12 Leitsubstanzen, in Muri sind dies die Leitsubstanzen ohne Candesartan & Methylbenzotriazol, dafür mit Mecoprop und Sulfamethoxazol) in Bezug zu den erreichten BV.

5.1.2 SAK-Messungen

Die prozentuale Abnahme der SAK-Werte in Bezug zu den erreichten Bettvolumina ist in Abbildung 5—2 zu sehen. Der Verlauf der Abnahme mit zunehmenden Bettvolumina sieht bei allen fünf Anlagen ähnlich aus, wobei die Abnahme in Muri immer ca. 10 % weniger hoch ist.

Die Abnahme bei ca. 10'000 BV ist sehr tief, was aufgrund des bereits sehr tiefen Werts, der im Zulauf gemessen wurde, nicht erstaunt. In der gesamten Woche vor dieser Beprobung gab es keinen Niederschlag (Hydrometrie Aargau 2019).

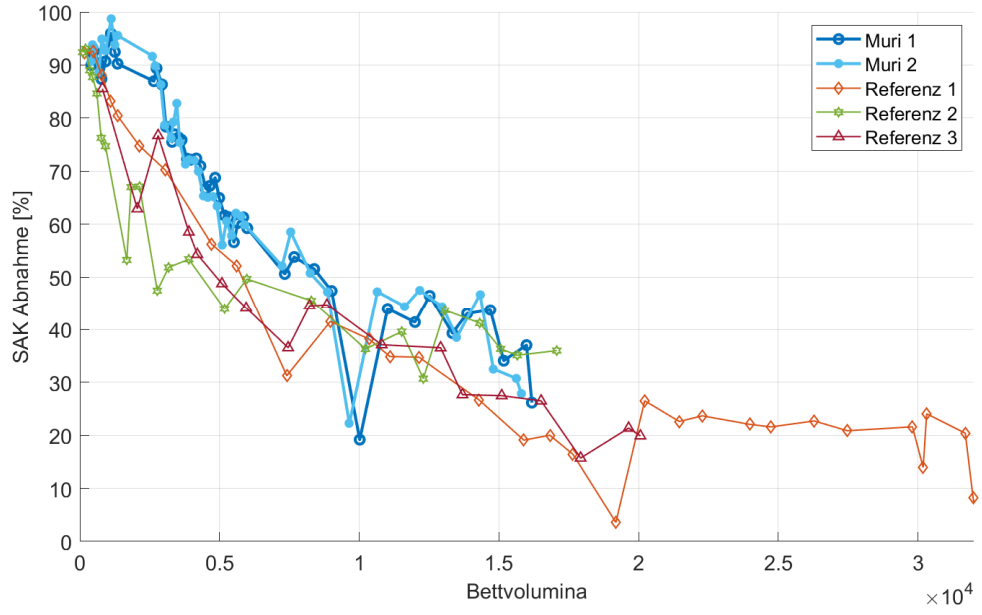

Abbildung 5—2: Die Abnahme von SAK der fünf Anlagen in Bezug zu den durchgesetzten BV.

5.2 Schichtungsmessung

Die Resultate der Schichtungsmessungen, angegeben in Extinktion (SAK-Messung) für den GAK-Filter 2, sind in Abbildung 5—3 zu sehen. Die Resultate zum GAK Filter 1 sind in Abbildung D—11 im Anhang D.2 zu finden. Der Filter wird von oben nach unten durchflossen. Die Extinktion im Zulauf wird bei 2 m angegeben, der Wert im Ablauf bei 0 m. Die Werte, welche in den Probenahmestellen gemessen wurden, sind auf den spezifischen Höhen angegeben. Gezeigt werden die vier Messserien: Die Serie vor der ersten Rückspülung (vor 1), die Serie nach der ersten Rückspülung (nach 1, vor 2), usw. Die Extinktion nimmt über den Filter ab, wobei zwischen den Messungen und somit auch zwischen den Rückspülungen keine Unterschiede ersichtlich sind. Die prozentuale Abnahme der Extinktion ist in Abbildung D—12 im Anhang D.2 zu sehen. Sie nimmt über den Filter zu und beträgt über den ganzen Filter ca. 30 %.

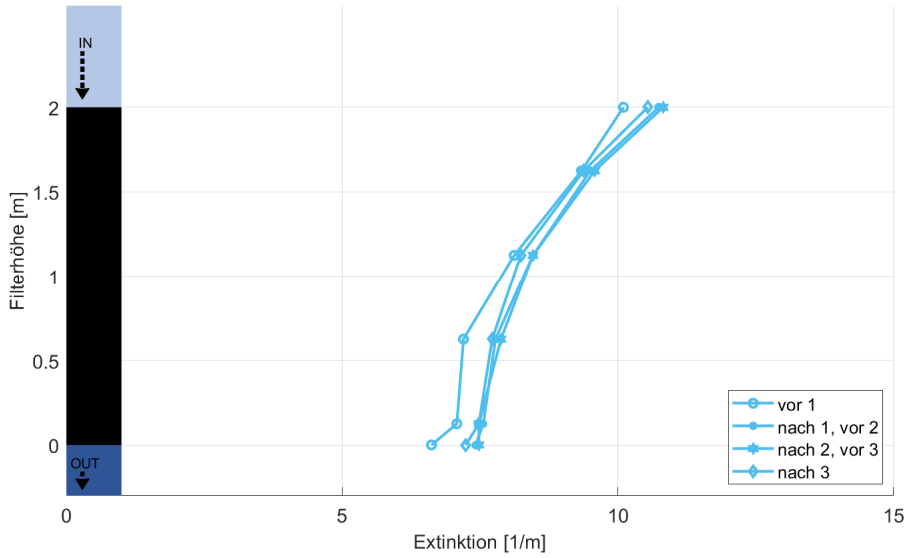

Abbildung 5—3: Resultate der Schichtungsmessung, exemplarisch für Filter GAK2. Der Filter wird von oben nach unten durchflossen, im Zulauf (2 m), im Ablauf (0 m) sowie auf vier verschiedenen Höhen wird der SAK-Wert angegeben.

5.3 Regenwettermessung

Abbildung 5—4 zeigt die Resultate der Messungen am 29.10.2019 in Extinktion pro Meter in Bezug zum Messpunkt im Filter. Dargestellt sind die vier über den Tag verteilten Messserien des Filters GAK 1. Die Messungen zum Filter GAK 2, sowie die prozentualen Abnahmen beider Filter sind im Anhang D.1 abgebildet. Die Extinktion im Zulauf (2 m) ist um 08:00 Uhr am grössten und nimmt danach ab, bis sie um 15:00 Uhr den tiefsten Wert erreicht.

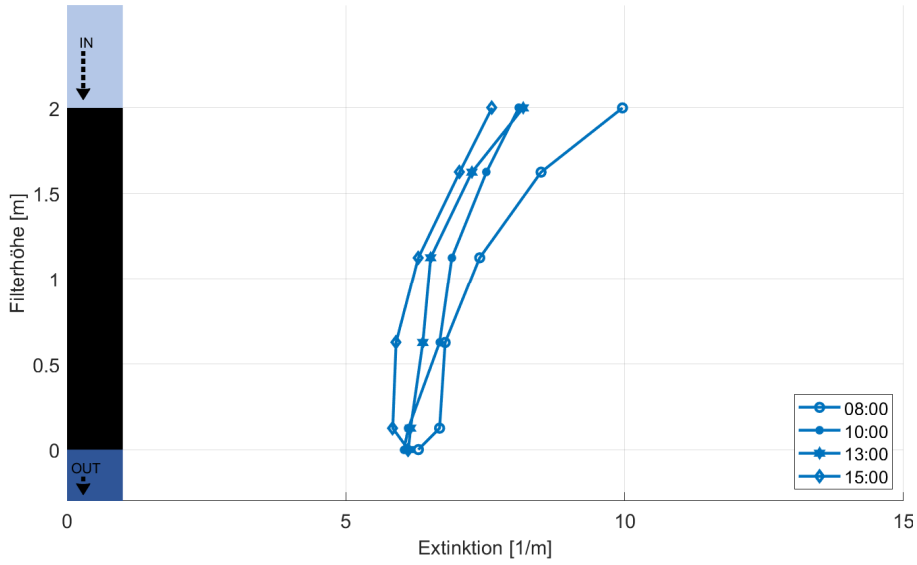

Abbildung 5—4: Resultate der Regenwettermessung (Regenereignis 29.10.2019), exemplarisch für Filter GAK1. Der Filter wird von oben nach unten durchflossen, im Zulauf (2 m), im Ablauf (0 m) sowie auf vier verschiedenen Höhen wird der SAK-Wert angegeben.

Die Verdünnungsmessungen vom 26. und 27. Oktober 2019 sind in Abbildung 5—5 dargestellt. Gezeigt wird die SAK-Abnahme für den Filter GAK 1. Die Werte auf Höhe von 1.625 m entsprechen der Abnahme zwischen dem Zulauf bis zu dieser Höhe. Die Werte auf Höhe 0 m entsprechen der Abnahme vom Zulauf bis zum Ablauf. Die roten Linien (Serien 1 und 6) zeigen die unverdünnten Messungen. Die blauen Linien zeigen die verdünnten Messungen im zeitlichen Verlauf. Weitere Abbildungen zu den Verdünnungsmessungen sind im Anhang D.3 zu finden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abnahme zwischen dem Zulauf und der obersten Messung im Filter (1.625 m) negativ ist. Die Extinktion im Zulauf ist also kleiner als die Extinktion bei der Messung an der höchsten Probenahmestelle des Filters. Die Abnahmen über alle Höhen nimmt über die Versuchsdauer zu.

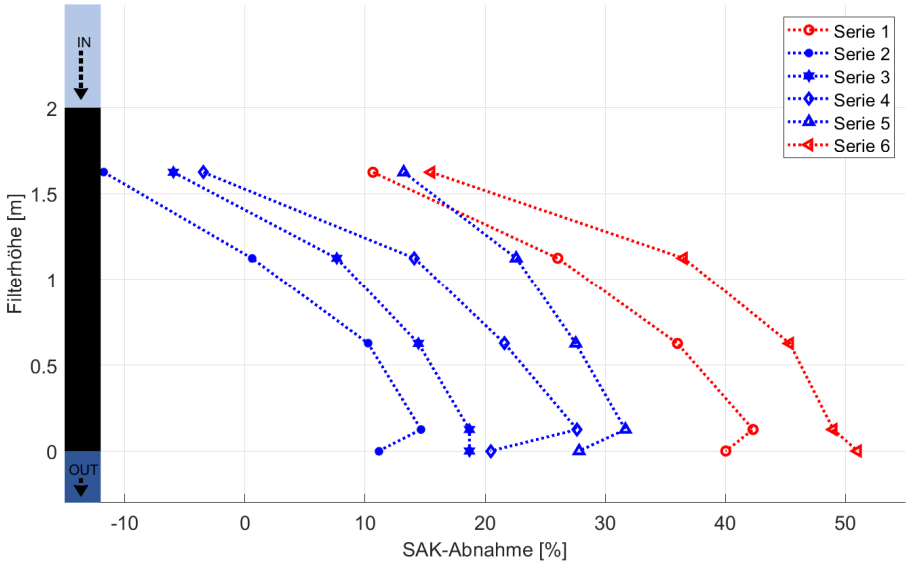

Abbildung 5—5: Resultate der SAK-Abnahme während der Verdünnungsmessung, exemplarisch für GAK1. Die roten Linien zeigen die Resultate bei unverdünntem Zulauf, die blauen Linien bei verdünntem Zulauf.

Alle Messungen bei Regenwetter und Trockenwetter, sowie die dazugehörenden Mittelwerte sind in Abbildung D—16 im Anhang D.4 zu sehen. Der Mittelwert der SAK-Abnahme über den ganzen Filter, von Zulauf zu Ablauf, beträgt für GAK 1 für Regenwetter ca. 25 % und für Trockenwetter ca. 40 %.

5.4 Filterschaltung

5.4.1 Eliminationsleistung als Funktion der Bettvolumina

Der Unterschied von ca. 15 % für die SAK-Abnahme zwischen Trockenwetter und Regenwetter (gezeigt in Abschnitt 5.3) entspricht einer ca. 10 % Abnahme der Eliminationsleistung (MV). Dies wird - wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben - durch eine Korrelation zwischen SAK- und MV-Messungen berechnet (siehe Anhang D.5).

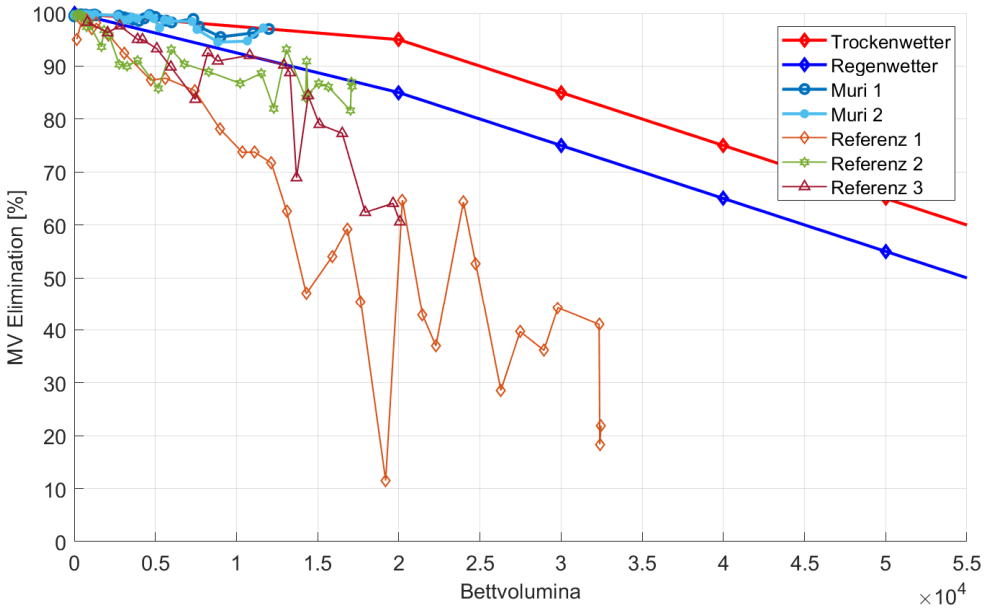

Abbildung 5—6: Die Eliminationsleistung sowohl bei Regenwetter als auch bei Trockenwetter als Funktion der erreichten Bettvolumina.

5.4.2 Simulationsresultate

Die simulierten Kontaktzeiten sind unabhängig von den zwei Konzepten (Option A und Option B). Die mittlere Kontaktzeit liegt bei 33 min. Bei sehr geringem Abfluss liegt die Kontaktzeit bei über 60 min. Bei maximal Abflüssen sinkt die Kontaktzeit auf 21 min. Insgesamt ist bei ca. 15 % der Zeit die Kontaktzeit kleiner als 25 min.

Abbildung 5—7 und Abbildung 5—8 zeigen die erreichten Bettvolumina im Verlauf der Simulationszeit. Abbildung 5—7 enthält für die Option A (Wochenplan) die Ergebnisse der zwanzigjährigen Simulation für alle vier Filter. Es werden im Schnitt Standzeiten von 26'500 Bettvolumina erreicht und das Austauschintervall eines einzelnen Filters ist ca. alle 3 Jahre, wobei jeweils alle 1.5 Jahre zwei Filter zusammen gewechselt werden müssen.

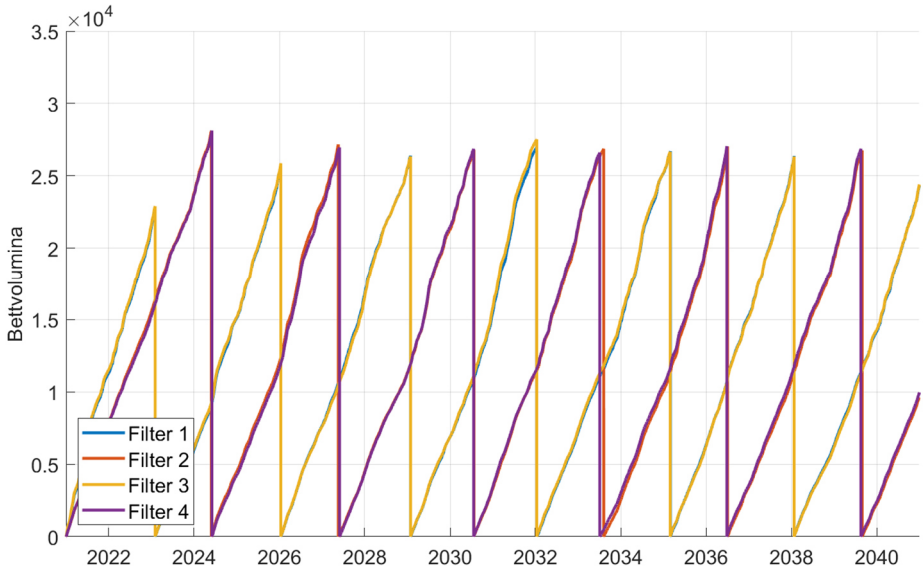

Abbildung 5—7: Erreichte Bettvolumina aller Filter für eine zwanzigjährige Simulation der Option A (Wochenplan).

Die erreichten Bettvolumina für Filter 1 und 3, sowie für Filter 2 und 4 sind jeweils fast identisch. Es ist deshalb jeweils nur die Linie für einen Filter ersichtlich. Der Grund für die gleichen Ergebnisse liegt darin, dass bei einer Trockenwetterperiode die Bettvolumina in allen Filtern etwa gleich ansteigen. Bei Regenwetter werden jedoch jeweils immer die gleichen beiden Filter zusätzlich beschickt. Ein Beispiel dazu ist im Anhang E.1 zu finden.

In Abbildung 5—8 sind die Resultate zu Option B (Maximalplan) für eine zwanzigjährige Simulation zu sehen. Es werden im Schnitt Standzeiten von 32'000 Bettvolumina erreicht. Die Dauer zwischen dem Austausch einer Filterzelle entspricht ca. 3.5 Jahren. Bei dieser Option müsste ca. alle 10 bis 11 Monate ein Filter ausgetauscht werden.

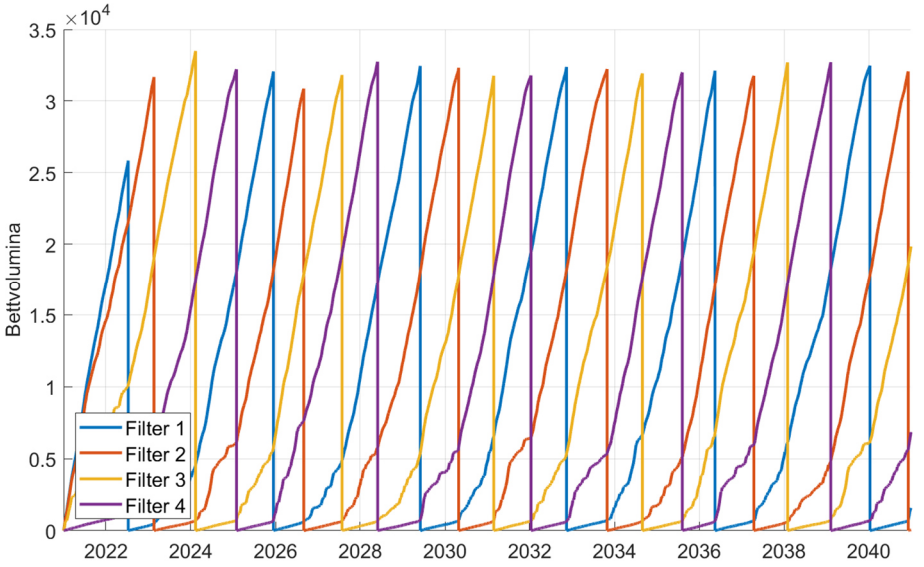

Abbildung 5—8: Erreichte Bettvolumina aller Filter für eine zwanzigjährige Simulation der Option B (Maximalplan).

Exemplarisch für alle Konzepte ist in Abbildung 5—9 die Eliminationsleistung der Option B (Maximalplan) der einzelnen Filter für die zwanzigjährige Simulation zu sehen. Anhang E.1 enthält Abbildungen der Eliminationsleistungen zum Konzept Option A (Wochenplan).

Die einzelnen Filter werden bei einer Eliminationsleistung von ca. 75% ausgetauscht. In Abbildung E—20 im Anhang E.2 ist die mittlere Eliminationsleistung der jeweils genutzten Filter im Verlauf der Simulationszeit abgebildet. Die mittlere Eliminationsleistung sinkt dabei nie unter 85 %. Der Balken in der Eliminationsleistung entsteht dadurch, dass die Eliminationsleistung bei Regenwetter und Trockenwetter unterschiedlich ist.

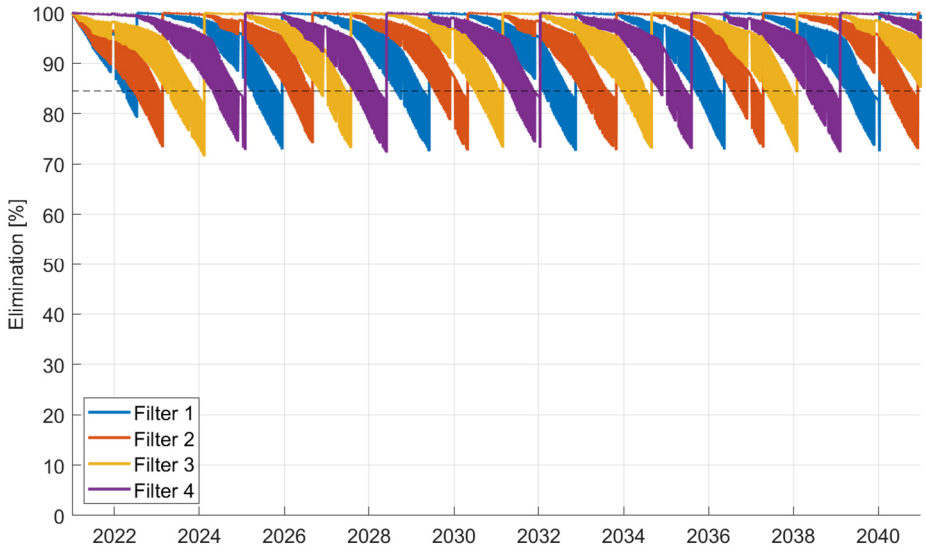

Abbildung 5—9: Eliminationsleistungen der einzelnen Filter für eine zwanzigjährige Simulation der Option B.

Die Resultate der drei Konzepte sind in Tabelle 5—2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit Option B 1.5-fache Standzeiten im Gegensatz zur Nullvariante erreicht werden können. Somit kann ein Drittel der Kohle eingespart werden. Die Standzeiten der Option B sind ca. 20 % länger als bei Option A.

Tabelle 5—2: Resultate der verschiedenen Konzepte für eine Simulation

Konzept	Standzeit	Wechselhäufigkeit	genutzte Kohle
Nullvariante (nicht parallel)	20’000	alle 2.1 Jahre	1800 m^3
Option A: Wochenplan	26’500	alle 3 Jahre	1400 m^3
Option B: Maximalplan	32’000	alle 3.5 Jahre	1300 m^3

6 Diskussion

Vergleich mit Referenzanlagen

Die Proben von der Pilotanlage in Muri wurden nicht auf Candesartan geprüft. Gleichwohl wird ein Vergleich der mittleren Eliminationsleistung angestellt. Denn Götz, Otto und Singer (2015) konnten eine ähnliche Elimination mit Aktivkohle von Candesartan wie von Mecoprop feststellen. Sulfamethoxazol ist gemäss Götz, Otto und Singer (2015) nicht als Indikatorsubstanz geeignet, da die Eliminationsleistung in der Biologie (also bei konventionellen ARAs) bereits sehr hoch ist. Die resultierenden tiefen Zulaufkonzentrationen zum GAK Filter könnten ein Grund dafür sein, dass Sulfamethoxazol am zweitschlechtesten eliminiert wird. Aufgrund der ähnlichen Eigenschaften von Mecoprop und Candesartan, und wegen der Abschwächung der einzelnen Substanzen durch die Mittelung aller Substanzen wird angenommen, dass in Muri die berechnete mittlere Eliminationsleistung mit der mittleren Eliminationsleistung der zwölf Leitsubstanzen übereinstimmt.

Die Eliminationsleistung in Muri ist bis zum Schluss sehr gut und höher als bei den Referenzanlagen. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Filter in Muri mit einer konstanten Kontaktzeit beschickt wurden. Die Referenzanlagen haben zwar vergleichbare mittlere Kontaktzeiten wurden jedoch Zulaufproportional beschickt; womit bei hohem Zulauf auch tiefere Kontaktzeit entstehen, was wiederum impliziert, dass schlechtere Eliminationsleistungen erreicht werden.

Die Resultate zeigen, dass die Eliminationsleistung bezüglich Mikroverunreinigungen und SAK bei den Pilotanlagen in Muri besser ist als bei den Referenzanlagen. Der Unterschied bei der SAK Abnahme ist jedoch weniger deutlich als bei den MV-Messungen. Es ist möglich, dass einige Stoffe, die mit SAK mitgemessen werden, bereits im Sandfilter zurückgehalten werden und deshalb die Abnahme weniger stark ausfällt. Ein möglicher Grund für den tiefen SAK Wert im Zulauf bei ca. 10'000 BV, könnte ein Messfehler sein.

Schichtungsmessungen

Die SAK-Messungen zeigen keine Unterschiede zwischen den Rückspülungen. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass sich nach den Rückspülungen jeweils wieder die gleiche Schichtung einstellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich eine Arbeitsfront einstellt, und diese nicht durch Rückspülungen gestört wird. Die Methode, von der SAK-Extinktion auf verschiedenen Höhen auf die Schichtung zu schliessen, ist nicht ideal, liefert aber eine gute Annäherung. Eine genauere Messmethode zur Überprüfung der Schichtung wäre eine Entnahme von GAK und die Ermittlung der tatsächlichen Schichtung durch Glühverlust- und Sieblinienbestimmung (Benstöm et al. 2012) .

Regenwettermessungen

In Abbildung 5—4 ist der Einfluss des Regens sehr gut zu sehen. Während der ersten Messung um 08:00 Uhr ist die Extinktion noch vergleichbar mit einer Trockenwettermessung (Abbildung 5—3); sie nimmt aber über den Tag ab. Der Grund für die Abnahme der Extinktion

könnte der Einfluss der Verdünnung sein. Bei der ersten Messung (08:00 Uhr) ist die Verdünnung aufgrund der hydraulischen Aufenthaltszeit im Zulauf zum GAK-Filter noch nicht messbar; im Verlauf des Tages wird dann jedoch die Verdünnung immer stärker.

Die negative SAK-Abnahme im oberen Teil des Filters in Abbildung 5—5 könnte dadurch erklärt werden, dass es wegen des verdünnten Zuflusses und der tiefen Stoffkonzentration zur Desorption kommt. Die Stoffkonzentrationen sind zum Teil tiefer als die Gleichgewichtskonzentration, und es können deshalb Stoffe wieder im Wasser gelöst werden (Corwin und Summers 2011). Diese wieder gelösten Stoffe werden dann in der Filtersäule weiter unten wieder adsorbiert. Deshalb kann über den ganzen Filter eine SAK-Abnahme gemessen werden. Dass die SAK-Abnahme über die Versuchszeit zugenommen hat, kann mit dem gleichen Prinzip begründet werden. Es ist möglich, dass bei den Rücklösungen zu Beginn der Messung die Gleichgewichtskonzentration im Filter abnimmt. Deshalb können auch wieder mehr Stoffe adsorbiert werden.

Filterschaltung

Eine Unsicherheit der Filterschaltung ist die Funktion zur Eliminationsleistung. Die Eliminationsleistung kann wegen der guten Eliminationsleistung, die bis zum Schluss der Pilotierung in Muri anhielt, nur geschätzt werden. Wie sich die Eliminationsleistung mit steigenden Bettvolumina tatsächlich verändert, wird erst in einer grosstechnischen Anlage ersichtlich werden. Für das Ziel, der geeigneten Filterschaltung (den Vergleich zwischen den drei Konzepten) kann die Unsicherheit der Eliminationsleistung vernachlässigt werden, verändert sich die Eliminationsleistung doch bei allen Konzepten jeweils gleich. Die prozentualen Unterschiede in den Standzeiten und in der Menge an verbrauchter Kohle bleiben deshalb gleich gross.

Weitere Einflüsse schaffen Unsicherheiten für die Filterschaltung. Für die Zulaufganglinien der Simulationszeit von 20 Jahren wurden die Werte der vorhandenen drei Jahre mehrfach aneinandergehängt. Die Möglichkeit trockenerer oder regnerischerer Jahre ist jedoch gross. Dies würde zu unterschiedlichen erreichten Bettvolumina führen.

In den vorhandenen Zulaufganglinien liegt der maximale Zulauf bei 120 l/s. Es ist jedoch geplant, die ARA in Zukunft mit maximal 140 l/s im Zulauf zu betreiben (Löwenberg 2019). Eine solche Erhöhung würde zu einer grösseren Wassermenge führen, was wiederum zu höheren Bettvolumina führen würde. Ausserdem sinkt bei einem höheren Zulauf die Kontaktzeit, was zu einer Verschlechterung der Eliminationsleistung führen könnte. Das wiederum bedeutet, dass die minimale Eliminationsleistung von 85 % schneller erreicht werden kann. Beide Auswirkungen der höheren Zulaufmengen wirken also negativ auf die Standzeiten ein.

Eine dritte Unsicherheit ist, dass der Fall der Rückspülung bei den Konzepten nicht beachtet wurde. Da bei einer Rückspülung jeweils ein Filter nicht zur Verfügung steht müsste dieser Punkt in einer weiterführenden Untersuchung vertieft werden.

Für die Option B werden Standzeiten von ca. 32'000 BV erwartet. Dies stimmt mit Bitterwolf et al. (2017) überein; sie erwarten ebenfalls Standzeiten von über 28'000 BV. Das

Erreichen von höheren Bettvolumina bei mehreren Filterzellen im Parallelbetrieb im Vergleich zu einem Einzelfilter wurde ebenfalls von Benstöm et al. (2014) gezeigt.

Der Unterschied beim Kohleverbrauch zwischen der Option A und der Option B scheint gering. Wenn jedoch die erreichten Bettvolumina betrachtet werden, zeigt sich, dass bei Option B ein Filter kurz vor Ende des zwanzigsten Jahres zu tauschen ist. Bei Option A aber zwei Filter bereits hohe Bettvolumina erreicht haben und deshalb im darauffolgenden Jahr getauscht werden müssten. Der Kohleverbrauch der Option B ist also klar tiefer als bei Option A. Die dritte Option ist bloss als Referenz angegeben, und es wird nicht darauf eingegangen ob sie in einer Abwasserreinigungsanlage überhaupt betrieblich möglich ist.

Die Option A ist insofern ungünstig, als jeweils zwei Filter fast gleichzeitig gewechselt werden müssen. Es stehen jedoch einfache Möglichkeiten zur Verfügung, um dieses Problem zu vermeiden, zum Beispiel ein vorgezogener Wechsel eines Filters, wenn die Eliminationsleistung der anderen drei Filter noch genügend ist. Für manche Betreiber mag es angenehmer sein, alle 1.5 Jahre zwei Filter gleichzeitig auszuwechseln, als alle 10 Monate einen Filter zu tauschen.

7 Schlussfolgerung

Mit den spezifischen Untersuchungen auf der GAK Pilotanlage der ARA Muri konnte gezeigt werden, dass die Eliminationsleistung bei Regenwetter schlechter ist. Dieser Tatsache wurde quantifiziert und in der Filterschaltung berücksichtigt. Ausserdem konnte gezeigt werden, dass sich nach einer Rückspülung jeweils wieder die gleiche Schichtung einstellt, es konnte also angenommen werden, dass sich die Filter wie erwartet beladen und die berechneten Eliminationsleistungen für die Erstellung der Konzepte verwendet werden können. Die Eliminationsleistung in Muri wurde mit den Eliminationsleistungen der Referenzanlagen verglichen und es konnte gezeigt werden, dass die Eliminationsleistung in Muri tendenziell besser ist als die der Referenzanlagen. Aufgrund der hohen Eliminationsleistung bis zum Schluss der Pilotierung konnten nur Annahmen zur Eliminationsleistung bei höheren Bettvolumina getroffen werden. Hierfür wäre eine längere Versuchszeit wünschenswert gewesen. Bei einer grosstechnischen Anlage müsste in den ersten Jahren die Eliminationsleistung dokumentiert werden und die erstellte Funktion allenfalls angepasst werden. Mit den getroffenen Annahmen zur Eliminationsleistung und der erarbeiteten Konzepte, mit parallelem Betrieb und geeignetem Zuschalten von Filterzellen konnte die Hypothese

Durch geeignete Filterschaltung kann mit 3 GAK Filtern auf der ARA Muri eine effiziente Elimination von Mikroverunreinigungen erzielt werden

bestätigt werden.

Für einen zukünftigen Betrieb auf der ARA Muri sind die berechneten Standzeiten, sowie die Wechselhäufigkeit ein guter Anhaltspunkt für einen erstmaligen Betrieb. Ausserdem können mit der berechneten Menge an Kohle erste Kostenabschätzung gemacht werden.

In den erstellten Konzepten wird immer mit maximal drei Filtern gerechnet. Das zuschalten vom vierten Filter könnte die Kontaktzeit senken und somit die Standzeiten verlängern. Ausserdem könnte man sich überlegen anstatt vier Filter mit 50 m^3, acht Filter mit 25 m^3 zu bauen. Dabei könnte, mit wahrscheinlich geringfügig höheren Baukosten, mehr Spielraum beim Zuschalten von Filtern gewonnen werden. Für beide Ideen wären jedoch weitere Überlegungen und Berechnungen notwendig.

8 Literaturverzeichnis

Abegglen Christian, und Hansruedi Siegrist. „Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Bundesamt für Umwelt, Bern.“ *Umwelt-Wissen* 1214 (2012): 210.

Afu Aargau. „Elimination von Mikroverunreinigungen auf Abwasserreinigungsanlagen.“ Aarau, 2019.

ARA Muri. „Betriebsdaten der ARA Muri (01.01.2008 - 25.10.2018).“ Muri, 2018.

ARA Muri. „Betriebsdaten der ARA Muri (01.01.2019 - 31.10.2019).“ Muri, 2019a.

ARA Muri. „Zulaufgsganglinien 01.01.2016 - 14.05.2019.“ Muri, 2019b.

BAFU. „Erläuternder Bericht zur Änderung der Gewässerschutzverordnung.“ Bern, 2014.

Beier Silvio. *Elimination von Arzneimitteln aus Krankenhausabwasser.* Aachen: Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, 2010.

Benstöm Frank., H. Stepkes, T. Rolfs, D. Montag, und J. Pinnekamp. „Untersuchung einer bestehenden Filterstufe mit dem Einsatz von Aktivkohle zur Entfernung organischer Restverschmutzung auf der Kläranlage Düren-Merken.“ *Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur-und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)*, 2014.

Benstöm Frank, Thomas Rolfs, Hermann Stepkes, David Monta, und Johannes Pinnekamp. „Einsatz von granulierter Aktivkohle auf der Kläranlage Düren.“ *45. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft : "Wasserwirtschaft und Energiewende" : 14. bis 16. März 2012 in der Messe Essen Ost.* Aachen: Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, 2012.

Benstöm Frank, et al. „Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen--Ein Überblick über halb-und großtechnische Untersuchungen-Teil 2: Methoden, Ergebnisse und Ausblick.“ *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 63 (2016): 276-289.

Bitterwolf S., M. Böhler, H. Siegrist, und A Joss. *Elimination von Spurenstoffen durch granulierte Aktivkohle (GAK) Filtration: Grosstechnische Untersuchungen auf der ARA Furt-Bülach. Zwischenbericht.* Dübendorf: Eawag, 2017.

Böhler Marc. „Persönliches Gespräch mit Marc Böhler.“ Eawag Dübendorf, 06. 11 2019.

Böhler Marc., J. Fleiner, H. Siegrist, McArdell , R. Teichler , und M Bourgin . *Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung – ReTREAT. Schlussbericht.* Dübendorf: Eawag, 2017.

Bornemann Catrin, et al. „MIKROFLOCK – Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von

Aktivkohle (Upgrading existing Flocculation Filters on Waste Water Treatment Plants using Activated Carbon).“ 6 2012.

Bundesrat Schweizerischer. „Gewässerschutzverordnung (GSchV). [Stand 2018].“ Bern, 1998.

BUWAL, BLW & ARE. „Leitbild Fliessgewässer Schweiz für eine nachhaltige Gewässerpolitik.“ *Broschüre BBL, Bern*, 2003.

Corwin Christopher J., und R. Scott Summers. „Adsorption and desorption of trace organic contaminants from granular activated carbon adsorbers after intermittent loading and throughout backwash cycles.“ *Water Research* 45 (2011): 417-426.

Crittenden John C., R. Rhodes Trussell, David W. Hand, Kerry J. Howe, und George Tchobanoglous. *MWH's water treatment: principles and design.* John Wiley & Sons, 2012.

Eawag. „Daten von verschiedenen Referenzobjekten zur GAK Filtration.“ Dübendorf, 2019.

Gälli René, C. Ort, und M. Schärer. „Mikroverunreinigungen in den Gewässern--Bewertung und Reduktion der Schadstoffbelastung aus der Siedlungsentwässerung.“ *Umwelt-Wissen* 917 (2009): 103.

Götz Christian, J. Otto, und H. Singer. „Überprüfung des reinigungseffekts.“ *Aqua & Gas*, 2015.

Hubaux Nathalie, Max Schachtler, und C. Götz. „Eignung der UV-VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffelimination.“ *Korrespondenz Abwasser*, 2017.

Hydrometrie Aargau. *Messwerte Niederschlag für die MeteoSchweiz Regenmessstation in Muri.* 2019. https://www.ag.ch/de/bvu/umwelt_natur_landschaft/hochwasserschutz/hydronet_argovia__hydrometrische_messstationen_/hydrometrie.jsp (Zugriff am 16. 12 2019).

Kessler Milena. „Masterprojektarbeit: Ausbau ARA Muri mit Stufe zur Entfernung von Mikroverunreinigungen.“ *Zürich: ETH*, 2019.

Kunz M., Y. Schindler Wildhaber, A. Dietzel, I. Wittmer, und V. Leib. „Zustand der Schweizer Fliessgewässer--Ergebnisse der Nationalen Beobachtung Oberflächengewässerqualität (NAWA) 2011--2014.“ *Umweltwissen. BAFU. Bern*, 2016.

Kuster + Hager. „Ausbaustudie ARA Muri, Technischer Bericht.“ *St.Gallen*, 2016.

Löwenberg Jonas. „ERTÜCHTIGUNG ARA MURI KURZBERICHT: DIMENSIONIERUNG GAK STUFE.“ *Brugg, CDS Envirotec*, 2019.

Maurer Max, und Anja Herlyn. „Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung.“ *Bericht an das Bundesamt für Umwelt, EAWAG, Dübendorf*, 2006.

Reungoat J., B. I. Escher, M. Macova, und J. Keller. „Biofiltration of wastewater treatment plant effluent: Effective removal of pharmaceuticals and personal care products and reduction of toxicity.“ *Water Research* 45 (2011): 2751-2762.

Sontheimer H., B. Frick, J. Fettig, G. Hörner, C. Hubele, und G. Zimmer. „Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung.“ *DGVW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.*, 1985.

Strähl Sabrina, et al. „StickStoffelimination in Schweizer ara.“ *Aqua & Gas No5*, 2013: 74-84.

UVEK. „Verordnung des UVEK zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen.“ Schweizerische Eidgenossenschaft. Bern, Schweiz, 2016.

Wunderlin Pascal. *Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Mikroverunreinigung.* VSA, 2017.

Anhang

A Fliessschema der ARA ii

B Methoden iii

B.1 Probenahmepläne iii

B.2 Beispiel zum Konzept Option A: Wochenplan iv

C Eliminationsleistung v

D SAK Messungen ix

D.1 Regenmessungen 29.10.2019 ix

D.2 Schichtungsmessung 12.11.2019 ix

D.3 Verdünnungsmessung 26.11.2019 x

D.4 Kombination Regenwetter und Trockenwetter xi

D.5 Korrelation MV und SAK xii

E Filterschaltung xiii

E.1 Ergebnisse Option A xiii

E.2 Ergebnisse Option B xiv

A Fliessschema der ARA

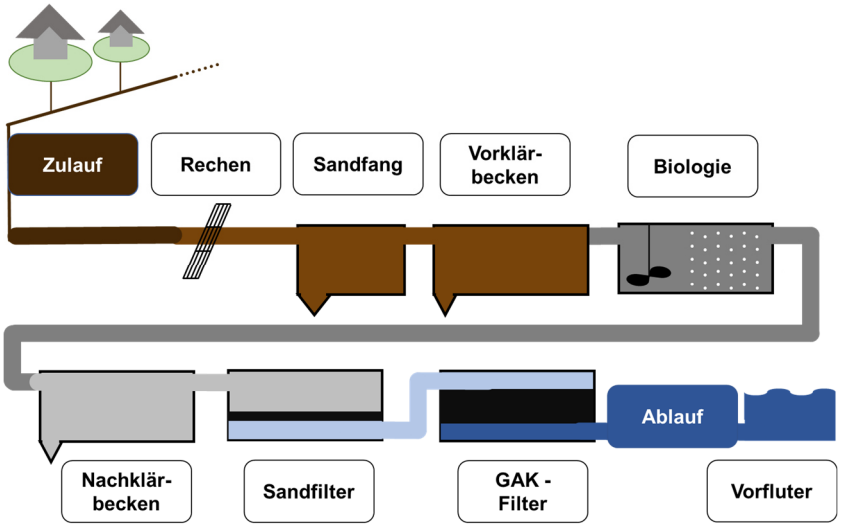

Abbildung A—1: Fliessschema der ARA Muri. Es ist geplant mehrere GAK-Filter nach dem Sandfilter zu installieren.

B Methoden

B.1 Probenahmepläne

Tabelle B—1: Probenahmeplan, sowie Rückspülplan am 12.11.2019, jeweils für beide Filter.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4
Zulauf	07:45	09:15	10:55	12:50
Probenahmestelle auf 1.625m	07:50	09:20	11:00	12:55
Probenahmestelle auf 1.125m	07:55	09:25	11:05	13:00
Probenahmestelle auf 0.625m	08:00	09:30	11:10	13:05
Probenahmestelle auf 0.125m	08:05	09:35	11:15	13:10
Ablauf	08:10	09:40	11:20	13:15
Rückspülen	08:15	09:45	11:25	

Tabelle B—2: Probenahmeplan zur Regenwettermessung am 29.10.2019, jeweils für beide Filter.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4
Zulauf	08:15	10:15	13:15	14:45
Probenahmestelle auf 1.625m	08:20	10:20	13:20	14:50
Probenahmestelle auf 1.125m	08:25	10:25	13:25	14:55
Probenahmestelle auf 0.625m	08:30	10:30	13:30	15:00
Probenahmestelle auf 0.125m	08:35	10:35	13:35	15:05
Ablauf	08:40	10:40	13:40	15:10

Tabelle B—3: Probenahmeplan für den 26. & 27.11.2019, jeweils für beide Filter. Serie 1 und Serie 6 sind unverdünnt (Trockenwetter), bei Serie 2-5 wurde der Zulauf mit Trinkwasser im Verhältnis 1:1 verdünnt (simuliertes Regenwetter).

	26.11.2019			27.11.2019		
	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6
Zulauf	07:45	10:50	12:00	07:45	10:10	12:30
Probenahmestelle auf 1.625m	07:50	10:55	12:05	07:50	10:15	12:35
Probenahmestelle auf 1.125m	07:55	11:00	12:10	07:55	10:20	12:40
Probenahmestelle auf 0.625m	08:00	11:05	12:15	08:00	10:25	12:45
Probenahmestelle auf 0.125m	08:05	11:10	12:20	08:05	10:30	12:50
Ablauf	08:10	11:15	12:25	08:10	10:35	12:55

B.2 Beispiel zum Konzept Option A: Wochenplan

Nach fast zwei Jahren Betriebszeit haben die Filter schon über 10'000 BV erreicht. Am 685. Tag, einem Samstag scheint die Sonne, es werden nur Priorität 1 & 2 benötigt. Am 686. Tag regnet es, es wird deshalb auch Priorität 3 benötigt. Filter 2 & 3 sind bereits mit Priorität 1 & 2 belegt. Für Priorität 3 stehen nun noch Filter 1 & 4 zu Verfügung. In diesem Fall wird nun Filter 1 als Priorität 3 gewählt, das dieser Filter bereits mehr BV erreicht hat (18'000 >14'000).

Tabelle B—4: Beispiel zum Konzept Option A: Wochenplan

		Filter 1 18'000 BV	Filter 2 14'500 BV	Filter 3 17'500 BV	Filter 4 14'000 BV
	Tag 685: Samstag	Priorität 1	Priorität 2		
	Tag 686: Sonntag	Priorität 3	Priorität 1	Priorität 2	

C Eliminationsleistung

Die Abbildung C—2 bis Abbildung C—6 zeigen die Eliminationsleistung bezogen auf MV der verschiedenen Anlagen. Gezeigt werden alle Substanzen, welche in den Anlagen gemessen werden. Dies sind für GAK1 und GAK2: Amisulprid, Benzotriazol, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Venlafaxin, Mecoprop und Sulfamethoxazol. Für die drei Referenzanlagen sind es die zwölf Leitsubstanzen Amisulprid, Benzotriazol, Candesartan, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Methylbenzotriazol und Venlafaxin. Sowohl die X-, als auch die Y-Skala sind nicht einheitlich.

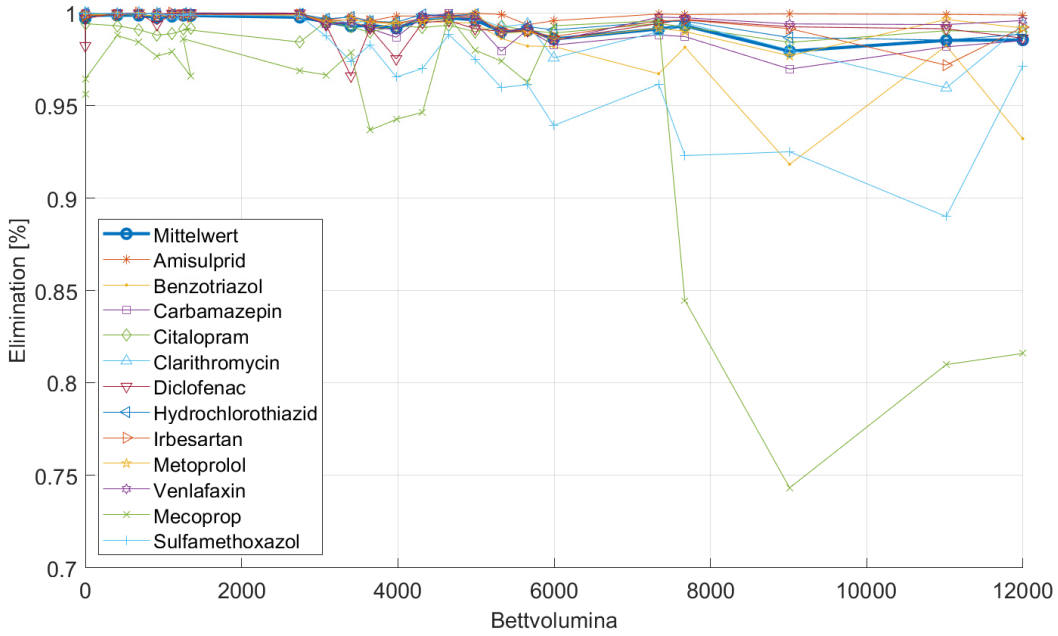

Abbildung C—2: Eliminationsleistung aller zwölf gemessenen MV der Pilotanlage GAK 1 in Muri.

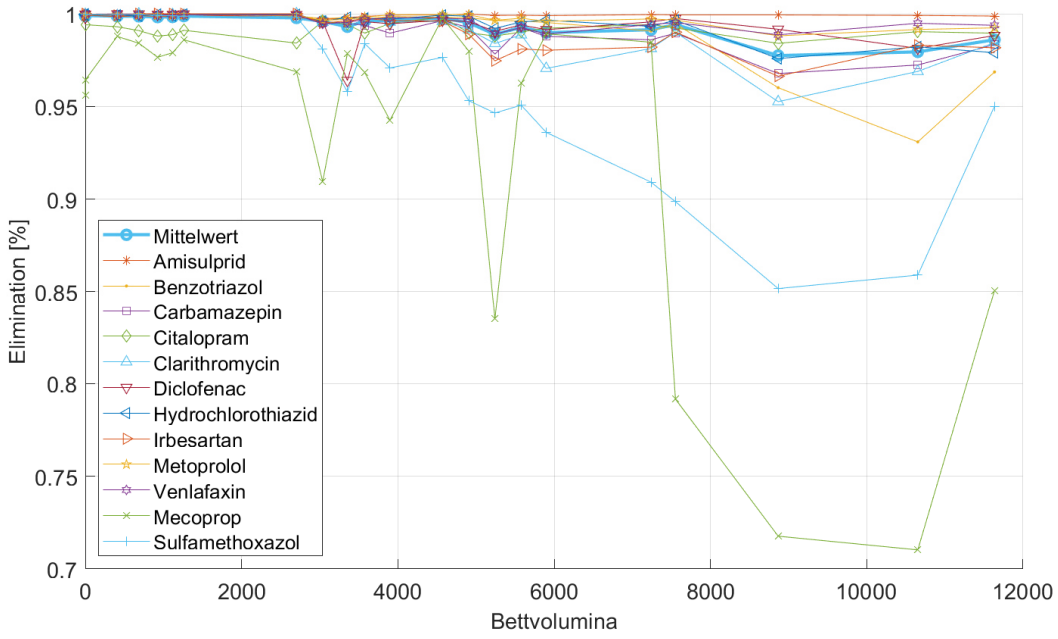

Abbildung C—3: Eliminationsleistung aller zwölf gemessenen MV der Pilotanlage GAK 2 in Muri.

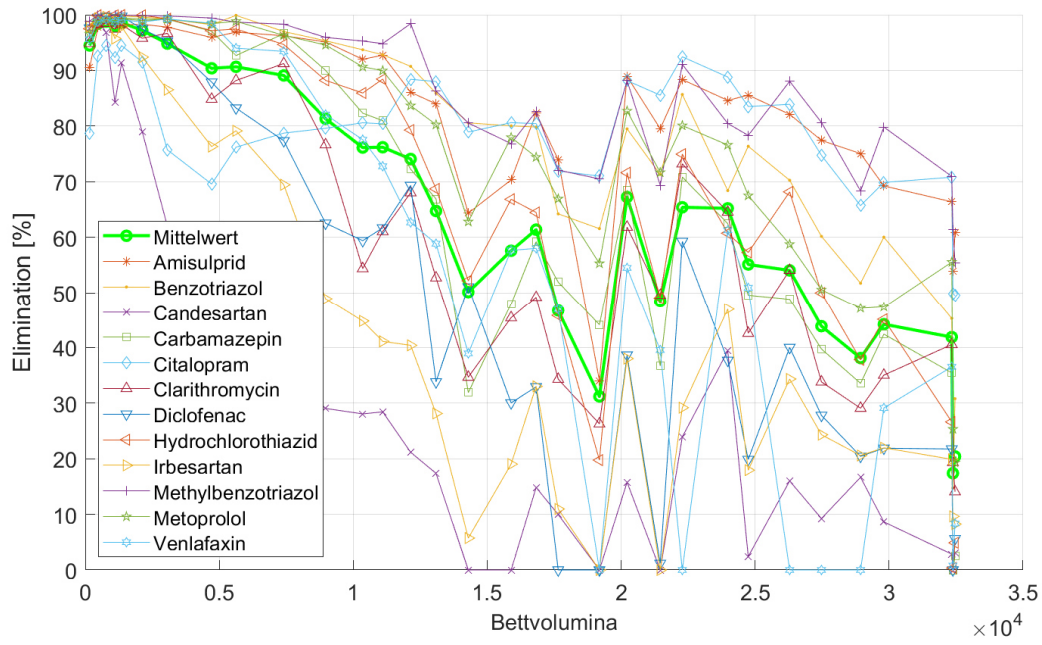

Abbildung C—4: Eliminationsleistung MV der zwölf Leitsubstanzen der Referenzanlage 1.

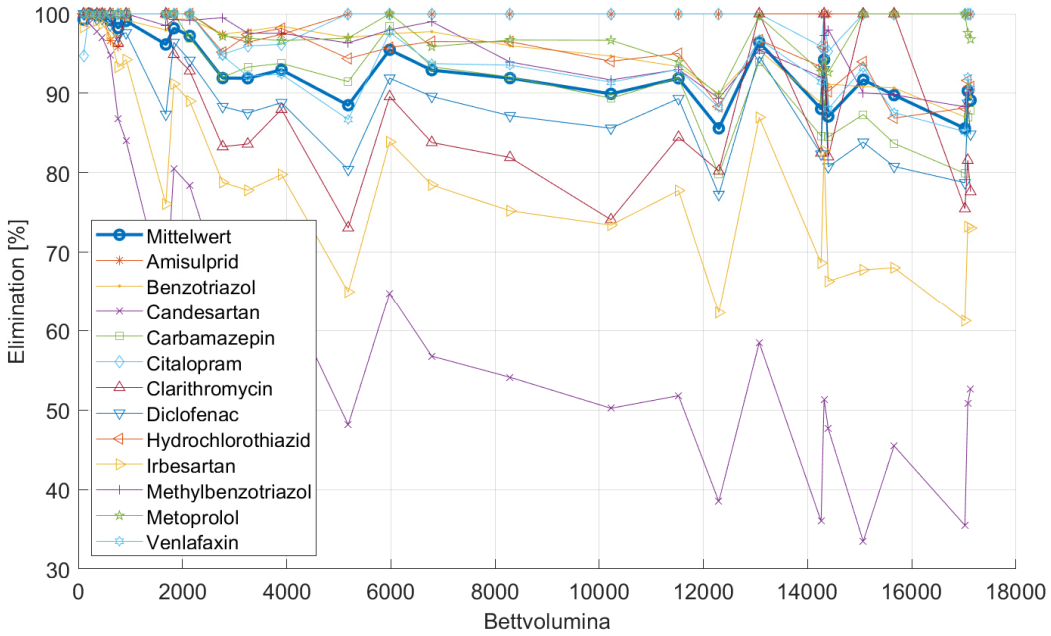

Abbildung C—5: Eliminationsleistung MV der zwölf Leitsubstanzen der Referenzanlage 2.

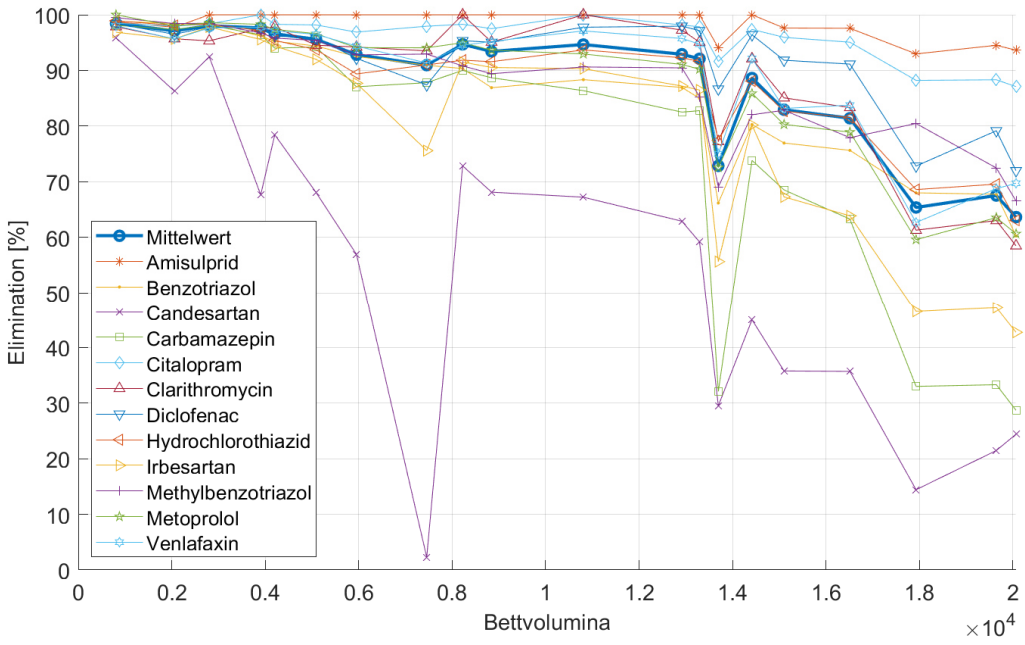

Abbildung C—6: Eliminationsleistung MV der zwölf Leitsubstanzen der Referenzanlage 3.

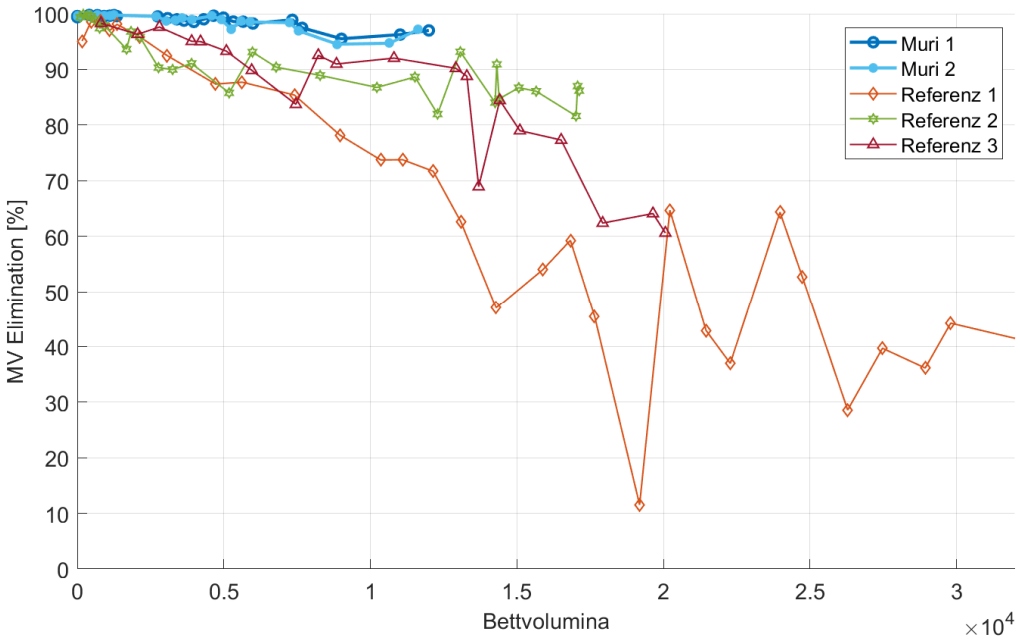

Abbildung C—7: Eliminationsleistung MV von den fünf Anlagen (jeweils alle gemessenen MV).

Die Abbildung C—8 zeigt die mittlere Eliminationsleistung von den fünf Anlagen bezogen auf die zehn Substanzen, welche in allen Anlagen gemessen werden. Dies sind Amisulprid, Benzotriazol, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol und Venlafaxin.

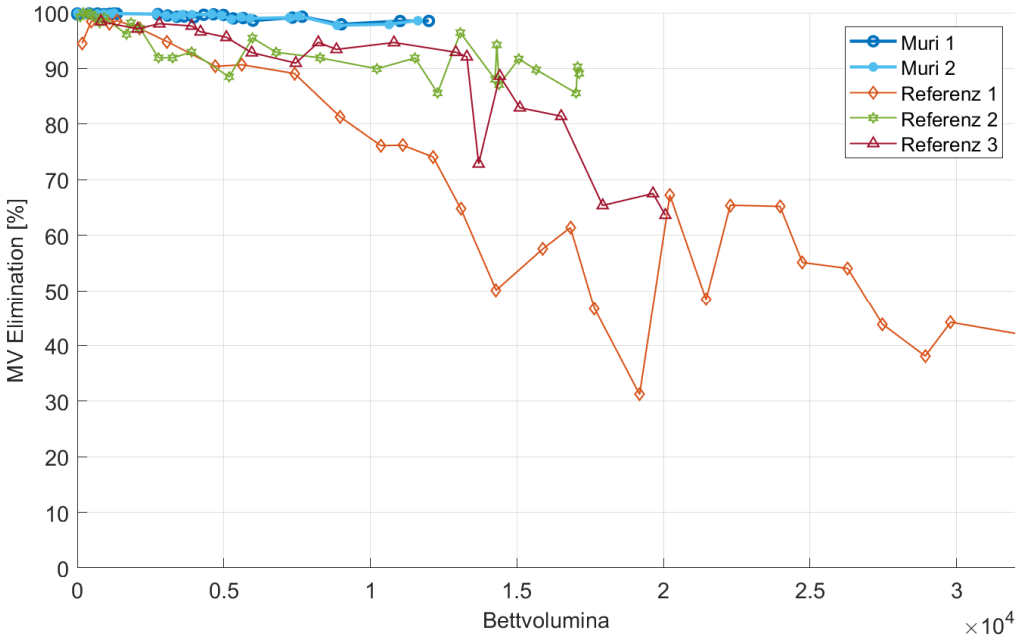

Abbildung C—8: Eliminationsleistung (zehn einheitliche MV) aller fünf Anlagen.

D SAK Messungen

D.1 Regenmessungen 29.10.2019

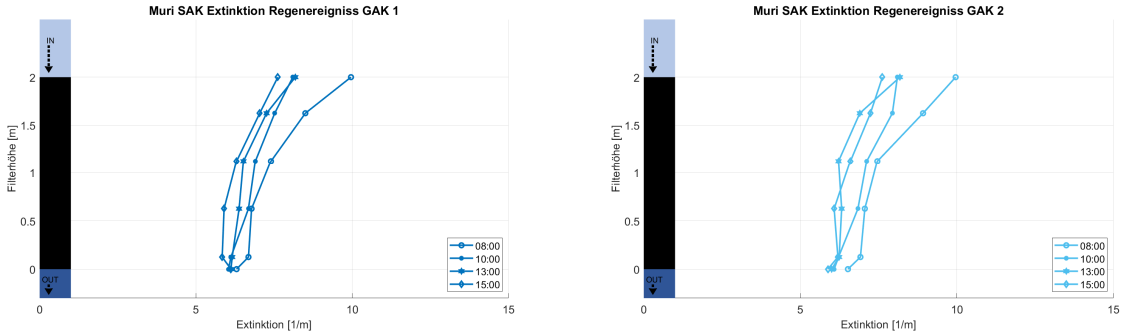

Abbildung D—9: Gemessene SAK Werte über den Filter (links GAK 1, rechts GAK 2) an einem Regentag (29.10.2019).

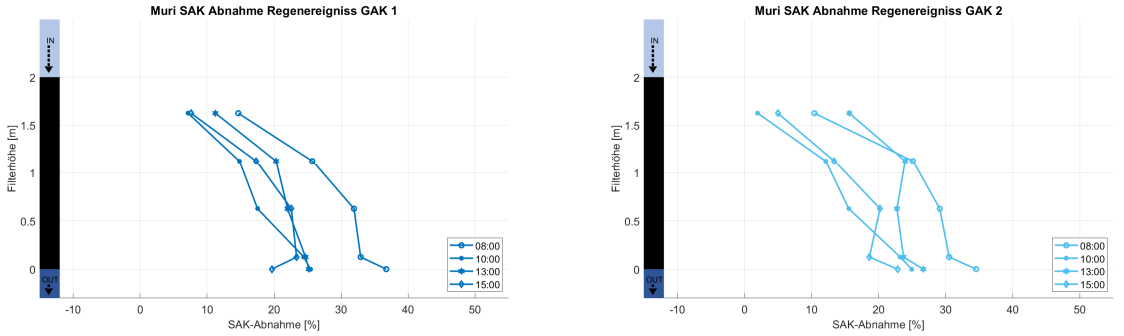

Abbildung D—10: SAK Abnahme über den Filter (links GAK 1, rechts GAK 2) an einem Regentag (29.10.2019).

D.2 Schichtungsmessung 12.11.2019

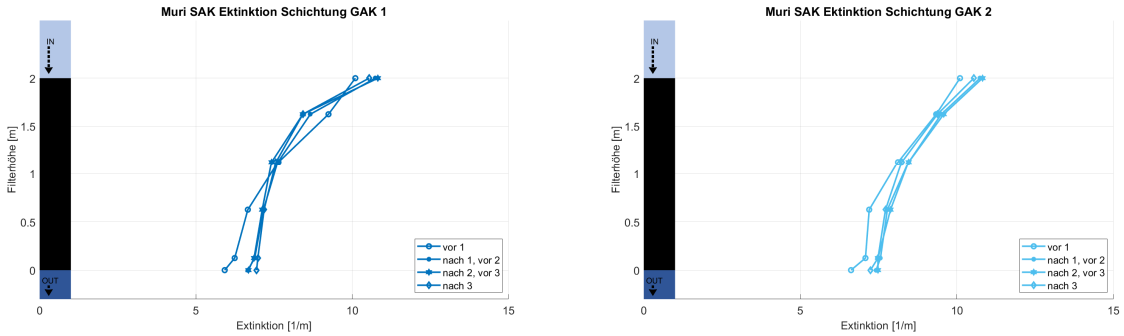

Abbildung D—11: Gemessene SAK Werte über den Filter (links GAK 1 und rechts GAK 2) bei der Überprüfung der Schichtung.

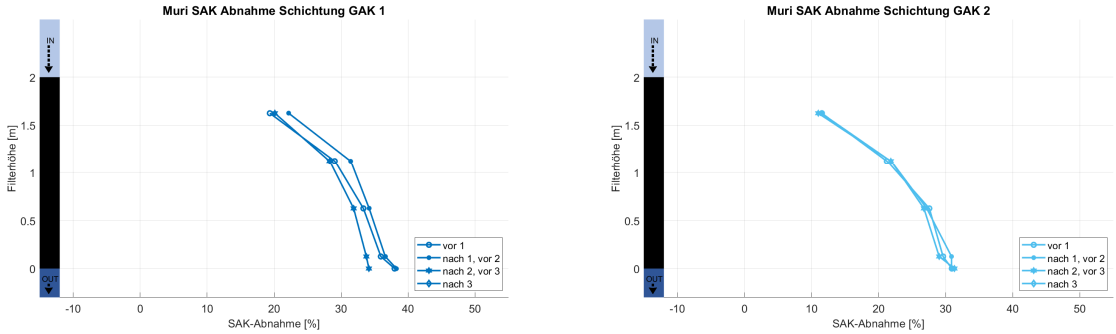

Abbildung D—12: SAK Abnahme über den Filter (links GAK 1 und rechts GAK 2) bei der Überprüfung der Schichtung.

D.3 Verdünnungsmessung 26.11.2019

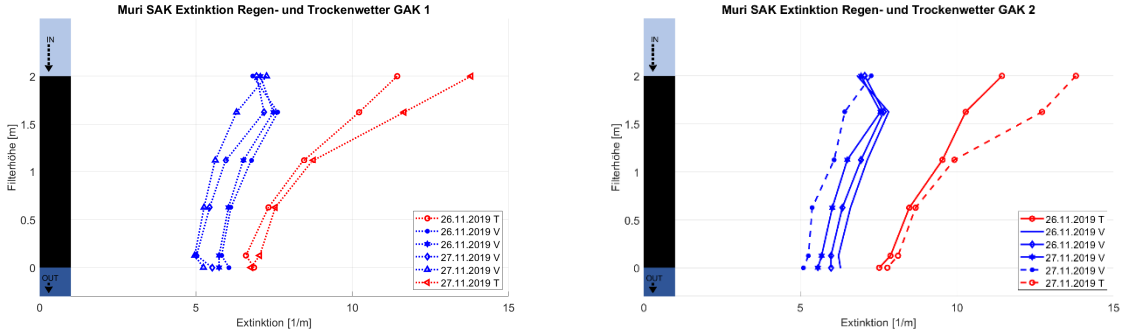

Abbildung D—13: Gemessene SAK Werte über den Filter (links GAK 1 und rechts GAK 2) bei der Verdünnungsmessung. Rote Messpunkte sind ohne Verdünnung, blaue Messpunkte sind mit einer Verdünnung im Zulauf (mit Trinkwasser im Verhältnis 1:1). Die Legenden zeigen von oben nach unten die Serien im zeitlichen Verlauf (Beispiel GAK1: blauer Punkt gehört zu Serie 2, blauer Stern gehört zu Serie 3)

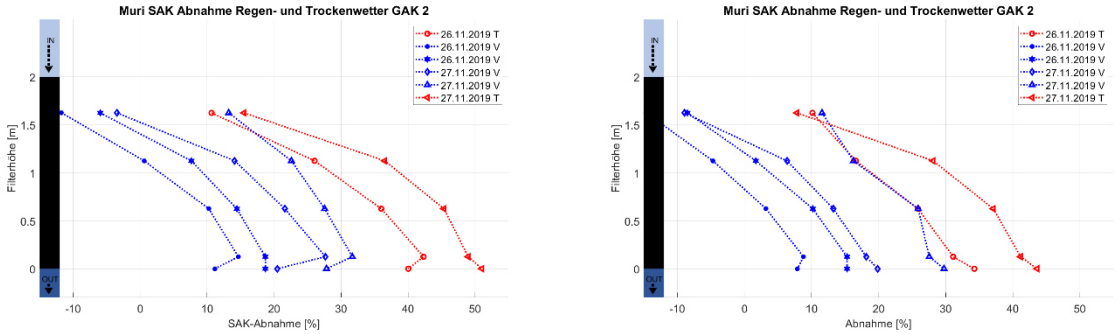

Abbildung D—14: SAK Abnahme über den Filter (links GAK 1 und rechts GAK 2) bei der Verdünnungsmessung. Rote Messpunkte sind ohne Verdünnung, blaue Messpunkte sind mit einer Verdünnung im Zulauf (mit Trinkwasser im Verhältnis 1:1).

D.4 Kombination Regenwetter und Trockenwetter

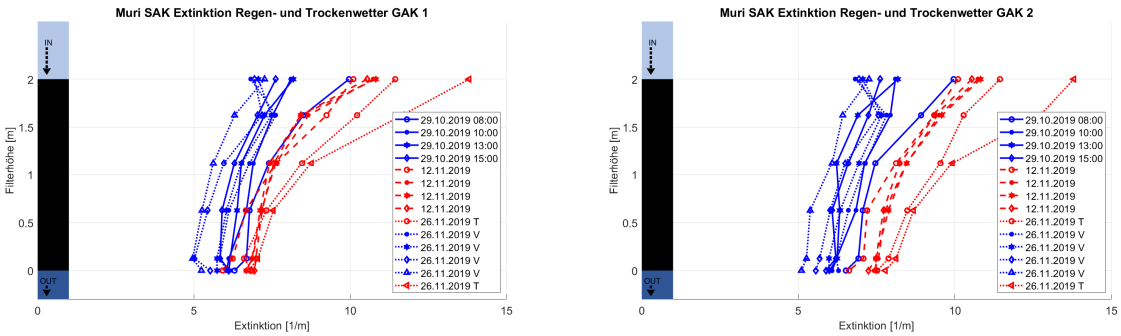

Abbildung D—15: Kombination aller gemessenen Regen- und Trockenwetter SAK-Werte. Links der Filter GAK 1 und rechts der Filter GAK 2.

Erklärung: Die gepunkteten roten Linien sind die Trockenwettermessung vor und nach den Verdünnungsversuchen. Die gestrichelten roten Linien sind die Schichtungsmessungen (Trockenwetter). Die blauen gepunkteten Linien sind die Ergebnisse der Verdünnungsmessungen und die blauen Linien sind die Messungen bei Regenwetter ab 10:00. Die schwarze Linie ist die Messung bei Regenwetter um 08:00 (Trockenwetter). Die stärkere blaue Linie ist der Mittelwert der Regenmessungen, die dickere braune Linie ist der Mittelwert bei Trockenwetter.

Der Unterschied der SAK-Abnahme über den ganzen Filter (0 m) zwischen dem Mittelwert von Trockenwetter und Regenwetter beträgt ca. 16 %.

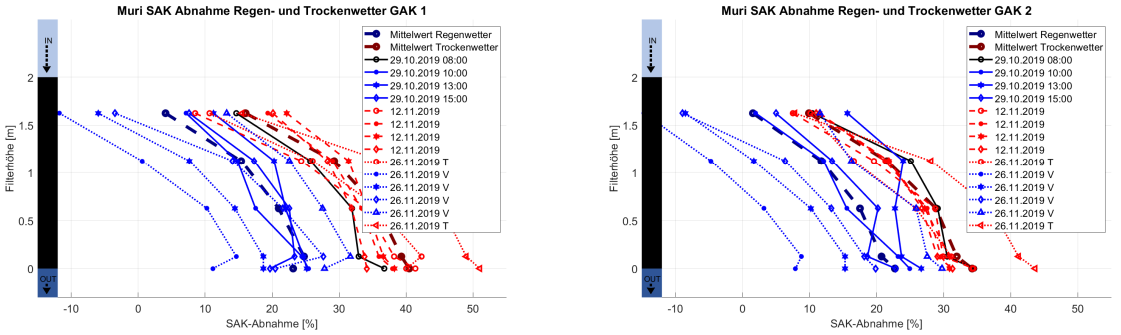

Abbildung D—16: Kombination aller Regen- und Trockenwetter SAK-Abnahmen, sowie die jeweiligen Mittelwerte. Links der Filter GAK 1 und rechts der Filter GAK 2

D.5 Korrelation MV und SAK

Abbildung D—17 zeigt die Korrelation der SAK- und MV-Messungen. Dargestellt sind für alle fünf Anlagen ein Polynom dritten Grades, gefittet für die verfügbaren Datenpunkte. Die Annahme Muri A ist das vertikal verschobene Polynom für die Referenz 2. Die Annahme Muri B ist das vertikal verschobene Polynom für die Referenz 3. Dargestellt mit gezogenen Pfeilen für Filter GAK 1 (Muri 1) und gestrichelten Pfeilen für Filter GAK 2 (Muri 2) ist die SAK Abnahme bei Regenwetter (25 %, bzw. 23 %), sowie bei Trockenwetter (40 %, bzw. 35%). Für beide Filter entspricht der Unterschied in der MV-Eliminationsleistung ca. 10 %.

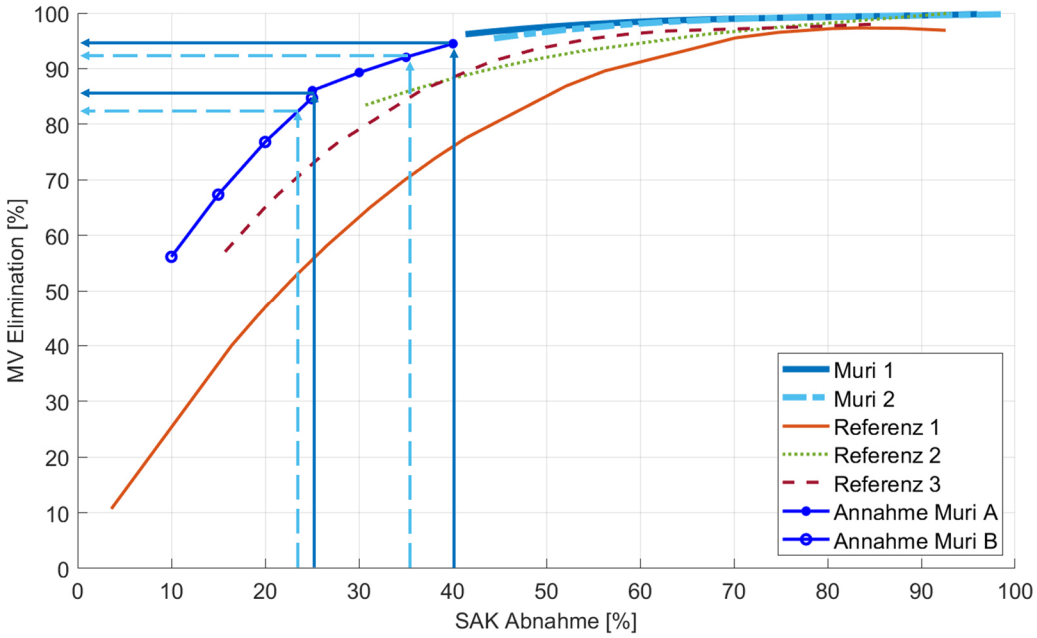

Abbildung D—17: Korrelation (dargestellt als Polynom 3 Grades) zwischen MV und SAK aller fünf Anlagen. Die Annahme Muri A ist eine horizontal verschobene Linie berechnet aus dem Polynom der Referenz 2, die Annahme Muri B ist eine horizontal verschobene Linie berechnet aus dem Polynom der Referenz 3.

E Filterschaltung

E.1 Ergebnisse Option A

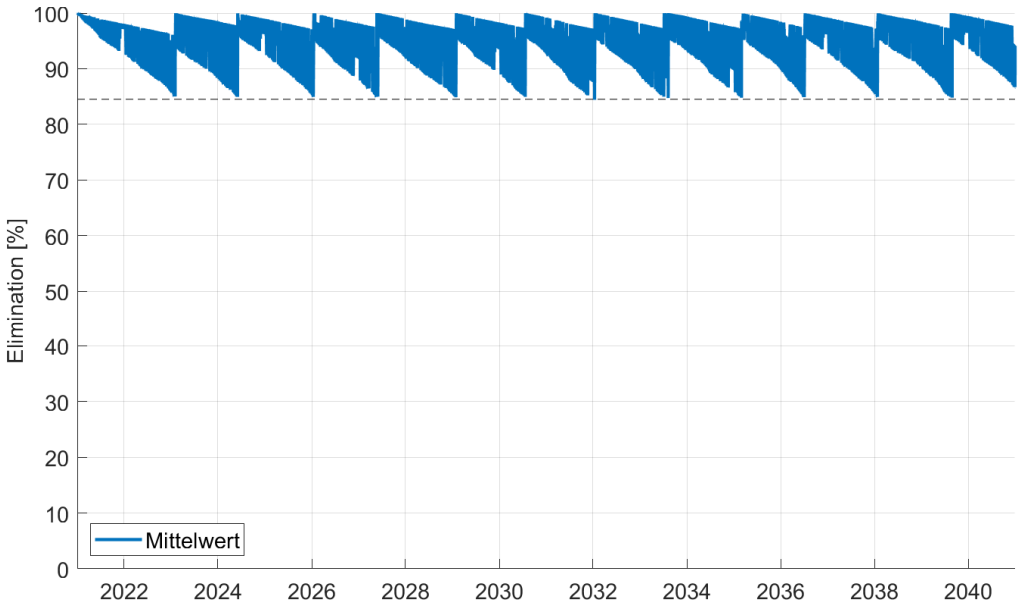

Abbildung E—18: Eliminationsleistung der Option A als Mittelwert der jeweils genutzten Filter. Die Eliminationsleistung ist immer grösser als 85%.

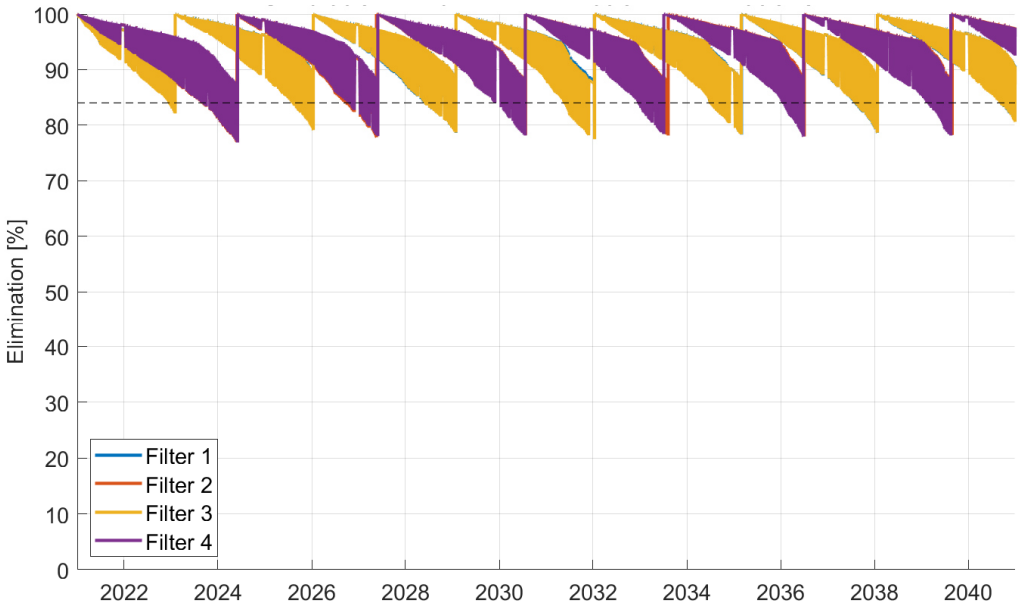

Abbildung E—19: Die Eliminationsleistung der Option A für die einzelnen Filter. Filter 1&3 sowie Filter 2&4 haben jeweils die fast gleiche Eliminationsleistung. Die Eliminationsleistung der einzelnen Filter ist kleiner als 85 %.

Erklärung

Da bei Regen immer der meist genutzte Filter aktiv ist, ist dies in diesem Beispiel immer entweder Filter 1 oder Filter 3. Diese beiden Filter haben deshalb auch immer etwa dieselbe Anzahl erreichter Bettvolumina.

Tabelle E—5: Erklärung zum Konzept Option A: Wochenplan

		Filter 1 18'000 BV	Filter 2 14'500 BV	Filter 3 17'500 BV	Filter 4 14'000 BV
☀	Tag 685: Samstag	Priorität 1	Priorität 2		
🌧	Tag 686: Sonntag	Priorität 3	Priorität 1	Priorität 2	
🌧	Tag 687	Priorität 3		Priorität 1	Priorität 2
🌧	Tag 688	Priorität 2		Priorität 3	Priorität 1
🌧	Tag 689	Priorität 1	Priorität 2	Priorität 3	
🌧	Tag 690	Priorität 3	Priorität 1	Priorität 2	
🌧	Tag 691	Priorität 3		Priorität 1	Priorität 2

E.2 Ergebnisse Option B

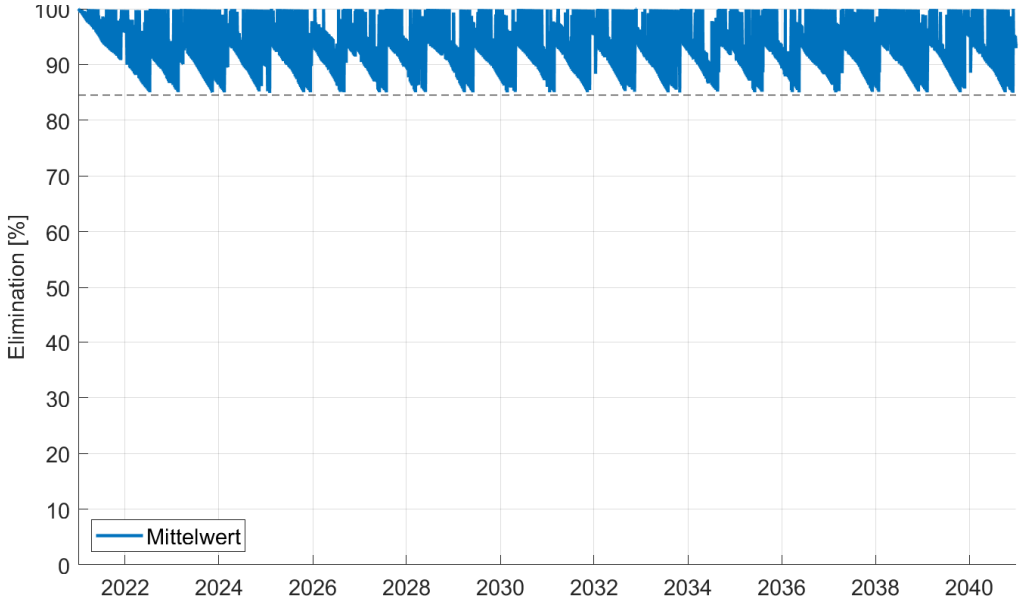

Abbildung E—20: Mittlere Eliminationsleistung der genutzten Filter der Option B: Maximalplan.