

Abschlussbericht

# Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Sandfiltration Kläranlage Kloten/Opfikon

(ergänzende Untersuchungen zum Projekt **Strategie MicroPoll**)



**Abwasserreinigung Kloten/Opfikon**

Dübendorf, August 2011

aufgestellt

**Eawag**

Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung,  
Abwasserreinigung und Gewässerschutz

**Projektbearbeitung**

**Eawag**

Marc Böhler

Ben Zwickenpflug

Mariangela Grassi

Markus Behl

Silvio Neuenschwander

Hansruedi Siegrist

Falk Dorusch (Spurenstoffanalytik)

Juliane Hollender (Spurenstoffanalytik)

Brian Sinnet (Schwermetallanalyse)

**BfG, Koblenz (D)**

(zusätzliche Spurenstoffanalytik)

Thomas Ternes

Guido Fink

**Abwasserreinigung**

**Kloten/Opfikon**

Christoph Liebi

Walter Wullschläger

aufgestellt/Stand: M. Böhler/ August 2011

**Titelbild:**

Belebungsbecken der Strasse Süd nach 9 Wochen  
PAK-Dosierung mit Rückführung des Filterspülwassers in die biologische Stufe



# Inhalt

<b>1. ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>6</b>
<b>2. PROJEKTÜBERSICHT</b>	<b>7</b>
2.1 Veranlassung und Hintergrund	7
2.2 Projektverlauf und Versuchsabschnitte	8
<b>3. GRUNDLAGEN</b>	<b>11</b>
3.1 Möglichkeiten der PAK-Anwendung auf Kläranlagen	11
3.1.1 Direktdosierung von PAK in die biologische Stufe (einstufiges Verfahren)	12
3.1.2 Nachgeschaltete Behandlung in separatem Adsorptionsreaktor mit anschliessender Abtrennung der PAK (ein- und zweistufiges Verfahren)	12
3.1.3 Dosierung in den Flockungsraum einer Sandfiltration	14
3.2 Die (Flockungs-) Sandfiltration	15
3.3 Flockungsfiltration Ara Kloten/Opfikon - Auslegung und Regime	17
3.4 Pilot-Filtrationsanlage Eawag	22
3.5 Pulveraktivkohle (PAK) - Aufbereitung und Dosierung	22
<b>4. UNTERSUCHUNGEN PILOT-FILTRATIONSANLAGE EAWAG26</b>	
4.1 Untersuchungen zur möglichen Akkumulation von Feststoffen im Filtermedium	26
4.2 Einfluss des Fällmittels auf den Feststoffrückhalt	27
4.3 Einfluss der Filtergeschwindigkeit und Laufzeit des Filters	28
4.4 Spurenstoffelimination des Pilotfilters	28

<b>5. VOLLTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN KLÄRANLAGE KLOTEN/OPFIKON</b>	<b>30</b>
5.1 Spurenstoffelimination	30
5.2 Spurenstoffelimination im Vergleich	31
5.3 DOC-Entfernung	33
5.4 Feststoffrückhalt in der Filtration	34
5.5 Betriebliche Auswirkungen	37
<b>6 DANKSAGUNG</b>	<b>39</b>
<b>7 LITERATUR</b>	<b>40</b>

# 1. Zusammenfassung

Nach einer verfahrenstechnischen Optimierung zur direkten Dosierung von Aktivkohle vor der Filtration in einer halbtechnischen Pilotanlage der Eawag konnte in einer zweiten grosstechnischen Anwendung auf der Kläranlage Kloten/Opfikon eine effiziente und hinreichende Spurenstoffelimination über 9 Wochen vollzogen werden.

Zentral in dieser Verfahrensvariante ist die weitestgehende Abtrennung der dosierten Pulveraktivkohle vom gereinigten Abwasser. In der Dosierzeit konnte die feine PAK effizient im Filtermedium zurückgehalten werden. Im Vergleich zur Referenzstrasse erhöhten sich die AFS-Ablaufwerte um rd. 1 - 2 mgAFS/L, lagen jedoch durchgehend deutlich unter dem geforderten Grenzwert von 5 mgAFS/l.

Im vorgestellten Verfahren scheinen die Art der Einmischung der Aktivkohle und die Höhe der dosierten Flockungsmittel entscheidend für den Rückhalt zu sein. In der optimierten Anwendung wurde eine feinblasige, wenig turbulente Durchmischung des Flockungsraumes gewählt. Zudem wurde eine sehr geringe Eisenmenge im Verhältnis zur PAK-Fracht dosiert, welches wahrscheinlich nur eine Entstabilisierung der PAK-Partikel verursacht und zudem weniger Feststofffracht (Eisenhydroxid) generiert. Auf die Verwendung von Flockungshilfsmittel wurde gänzlich verzichtet. Durch die Art der Einmischung und Flockung ergeben sich eher feine und kompakte Feststoffe, die anscheinend tief in den Raumfilter eindringen können und somit weniger Druckverlust im Filtermedium verursachen.

Insgesamt zeigte sich das vorgestellte Adsorptionflockungsfiltrations-Verfahren (AFF-Verfahren) in der Anwendung als sehr robust. Auch bei sehr hoher Dynamik des Zulaufes bei sommerlichem Starkregen mit sprunghaft hohen Filtergeschwindigkeiten bis zu 16 m/h konnte ein guter Rückhalt erreicht werden. Ein Durchbruch von Feststoffen in den Ablauf der Filter erfolgte nie.

Durch den verbesserten und nahezu vollständigen Rückhalt der Kohle im Filter konnte die Spurenstoffelimination deutlich verbessert werden, da die Kontaktzeit der im Filter zurückgehaltenen PAK mehr als die Hälfte der Filterlaufzeit von 24h beträgt.

Die Dosierung der Kohle in den Filter bewirkte eine durchschnittliche Gesamtelimination von rd. 71% bezogen auf den Ablauf der Nachklärung (Anzahl aller betrachteter Einzelstoffe 41). Durch die Rückführung der teilbeladenen Kohle in die Biologie konnte für einige schwer sorbierbare Stoffe erst eine effiziente und ausreichende Reduktion erreicht werden, welche für nahezu alle betrachteten Mikroverunreinigungen >80% bzw. im Mittel 85% bezogen auf den Ablauf der Vorklärung betrug. Viele Substanzen wurde zu 100% eliminiert.

Unter Berücksichtigung des leicht höheren Abtriebes in der PAK-Versuchsstrasse der ARA verringert sich allerdings die gesamthafte Spurenstoffelimination um etwa 10%, wenn das Mehr an Feststoff im Abtrieb PAK ist, da dann gebundene Mikroverunreinigungen die ARA verlassen. Eine Bestimmung der Zusammensetzung des Feststoffabtriebes wurde nicht vorgenommen.

Innerhalb der Teststellung wurden zwei verschiedene PAK getestet, wobei die Gesamteliminationsleistungen der Kohlen, nahezu identisch waren. Bei der Betrachtung der Elimination im Filter, daher der frisch dosierten PAK, zeigte sich jedoch eine rein auf Holzkohle basierendes Produkt um rd. 10% besser in der Elimination als eine PAK basierend auf ein Ausgangsrohstoffgemisch.

Negative Auswirkungen des zweistufigen Verfahrens auf die Nährstoffelimination oder den Schlammeigenschaften durch die Rückführung der PAK zur weiteren Beladung in die Biologie konnten nicht beobachtet werden. Bei einer dauerhaften Anwendung ist zu empfehlen, die eingesetzten Aggregate wie Pumpen und Rohrleitungen, etc. aufgrund der hohen Abrasivität der PAK in einer entsprechenden Materialqualität (zum Beispiel Kunststoff) zu wählen.

Die bisherigen Erfahrungen und Ergebnisse mit dem vorgestellten Verfahren zur Spurenstoffelimination aus kommunalem Abwasser mittels PAK zeigen auf, dass diese im Vergleich deutlich kostengünstigere Verfahrensvariante ein hohes Potentials zur dauerhaften Umsetzung auf Kläranlagen besitzt. Die mehr als zweimonatige Teststellung mit Anwendung des Verfahrens auf 50% der Kläranlage Kloten/Opfikon (rd. 60'000EW) haben aufgezeigt, dass das Verfahren noch Belastungsreserven aufweist. Es sollte jedoch noch über einen längeren Zeitraum (etwa 1 Jahr) mit stark variierenden Schwebstofffrachten getestet werden. Im Weiteren sollte auch der PAK-Gehalt im Schwebstoffabtrieb der Filtration untersucht werden, um den tatsächlichen PAK-Anteil in der Ablauffracht zu bestimmen.

## **2. Projektübersicht**

### **2.1 *Veranlassung und Hintergrund***

Spurenstoffe - sogenannte Mikroverunreinigungen - im kommunalen Abwasser werden aufgrund ihrer schlechten biologischen Abbaubarkeit in konventionellen Abwasserreinigungen nur unzureichend oder gar nicht entfernt. Somit stellen Abläufe der Kläranlagen neben diffusen Quellen und Mischwasserentlastungen den Haupteintragspfad für die Oberflächengewässer dar.

Um jedoch eine deutliche Reduktion dieser Schmutzfrachten für ein möglichst breites Stoffspektrum zu erzielen, ist nach heutigem Kenntnisstand eine Nachrüstung bestehender Kläranlagen durch die Integration zusätzlicher Reinigungsstufen unerlässlich.

Am 1. Oktober 2009 gab das Bundesamt für Umwelt in seinem Synthesebericht bekannt, dass es innerhalb der Schweiz einer Nachrüstung von rund 100 vorwiegend grösseren Kläranlagen bedarf, um den Eintrag von organischen Spurenstoffen aus der Siedlungswasserwirtschaft in die Umwelt signifikant zu reduzieren. Für die künftige Umsetzung dieser Vorhaben stellen praxisorientierte Voruntersuchungen und Pilotierungen daher eine wichtige Entscheidungsgrundlage dar, da es bis heute nur wenige konkrete Erfahrungen mit dem Einsatz von Verfahren der Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen gibt.

Neben oxidativen Verfahren wie der Ozonung des Kläranlagenablaufs ist auch eine adsorptive Behandlung mit PAK grosstechnisch machbar und wirtschaftlich vertretbar, um Spurenstoffe in derselben Grössenordnung wie bei der Ozonung aus dem Abwasser effizient zu eliminieren (min. >80%). Im Zuge dieser Behandlung werden die im Abwasser enthaltenen Mikroverunreinigungen grösstenteils an der PAK adsorbiert und so dem Abwasser entzogen. Voraussetzung für den grosstechnischen Einsatz dieses Verfahrens ist jedoch ein nahezu vollständiger Rückhalt der dosierten Kohle bzw. die sichere Abtrennung vom gereinigten Abwasser durch z. Bsp. Sedimentation und Filtration, um einem Eintrag ins Gewässer vorzubeugen.

Die Anwendung von PAK auf kommunalen Kläranlagen kann in verschiedenen Verfahrensvarianten realisiert werden. Je nach Einsatzort (zum Beispiel als separate Behandlungsstufe für den Ablauf der Nachklärung) werden jedoch zusätzliche bauliche Infrastrukturen benötigt, um einen hinreichenden Kontakt der PAK mit dem Abwasser zu gewährleisten und die beladene PAK effizient zurückzuhalten. Hierzu wurden umfangreiche Untersuchungen an der Eawag vorgenommen (vgl. hierzu Zwickenpflug et al., 2010). Die Investitionskosten und der Betrieb der Anlagen werden die spezifischen Jahreskosten der Anlage deutlich erhöhen. Zudem benötigen diese zusätzlichen Bauwerke Flächen, welche auf vielen Kläranlagen nur bedingt zur Verfügung stehen.

Einige Kläranlagen der Schweiz verfügen über eine Reinigungsstufe in Form einer Flockungsfiltration, die eine deutliche Verbesserung des Ablaufes bezüglich Nährstoffe - insbesondere Phosphor - und Feststoffe bewirken kann.

Vor diesem Hintergrund gibt es Überlegungen die PAK kombiniert mit Flockungsmittel direkt in den Flockungsraum zu dosieren. Oftmals ist der Feststoffabtrieb aus den Nachklärungen bei guten Belebtschlammeeigenschaften gering, so dass der Sandfilter mit einer zusätzlichen Feststofffracht - bestehend aus beladener PAK und Fällungsprodukten - beaufschlagt werden könnte.

Da die vorgestellte Verfahrensvariante eine vergleichsweise kostengünstige Alternative zur Umsetzung der Spurenstoffelimination auf Kläranlagen darstellt, ist es Ziel des hier vorgestellten Projektes das Verfahren grundsätzlich zu testen und bezüglich ihrer Effizienz und der technischen Machbarkeit hin zu prüfen sowie zu optimieren.

## **2.2 Projektverlauf und Versuchsabschnitte**

In 2008 wurden die ersten Überlegungen zur Idee der direkten Dosierung von PAK in die Flockungsfiltration vorgenommen. Im weiteren Verlauf zur Umsetzung des Forschungsprojektes ergaben sich im Wesentlichen 4 Projektabschnitte, welche sich inhaltlich aufbauend bis 2010 zeitlich erstreckten. Zur Übersicht hier verkürzt die wesentlichen Bearbeitungsabschnitte. Details zu den ersten zwei Projektabschnitten finden sich auch im Zwischenbericht:

### **⚡ Sommer 2008 - halbtechnische Pilotierung an der Eawag**

Um die generelle Machbarkeit bzw. das grundsätzliche Rückhaltevermögen bezüglich PAK einer Sandfiltration zu testen, wurde eine Flockungssandfiltration in der Versuchshalle der Eawag



installiert und in Betrieb genommen. Im Hinblick auf eine grosstechnische Anwendung wurde in Anlehnung der grosstechnischen Begebenheiten der Flockungsfiltration der Kläranlage Kloten/Opfikon der Aufbau der Pilotanlage vorgenommen, so dass wesentliche Betriebsparameter der Anlage der derjenigen von Opfikon entsprachen.

Mit wenigen Versuchsläufen mit und ohne Eisendosierung wurde der Rückhalt der PAK bei einer Dosierung von **10 respektive 20mgPAK/L** (Norit SAE Super) prinzipiell getestet. In diesen ersten einfachen Tests wurde die Filtergeschwindigkeit konstant auf **4.5m/h** (310l/h) begrenzt. Die Durchmischung des Flockungsraums erfolgte mittels feinblasiger Belüftung (keramische Belüftersteine). In den Testläufen mit Fällmitteldosierung wurde ein Verhältnis von **0.4gFe/gPAK<sub>dosiert</sub>** vorgenommen, welches sich aus umfangreichen vorgängigen Jar-Tets ergab. Kriterium zur Festlegung des Fällmittel zu PAK-Verhältnisses war die subjektive, visuelle Beurteilung der gebildeten Flocken.

Die Beprobung erfolgte in den Filterläufen (24h) mittels 4 bis 5 Stichproben des Zu- und Ablaufes innerhalb von 24h. Das Spülprogramm zum Reinigen des Filters entsprach qualitativ und quantitativ dem von Opfikon. Details zum Aufbau des Systems und zur Durchführung finden sich im Zwischenbericht zum Projekt (Böhler et al., 2009).

In den Versuchen konnte **ein hinreichender Rückhalt der Aktivkohle** festgestellt werden. Die Feststoffablaufkonzentrationen lagen im Mittel bei **1 bis 2mgAFS/l** und lagen in der Grössenordnung des Abtriebes der Nachklärung. **Unter Berücksichtigung der Dosierungen von PAK und Eisen konnten rd. 80% der Gesamtfeststofffracht zurückgehalten werden. Die Beladung des Raumfilters lag bei 0.8 respektive 2.6 kgAFS/m<sup>3</sup>\*d.**

Eine Betrachtung der Spurenstoffelimination wurde in diesen ersten Versuchen nicht vorgenommen.

### ⚡ **Herbst 2008 - volltechnische Anwendung auf der Kläranlage Kloten/Opfikon**

Die aus den Vorversuchen ermittelten Prozessgrössen wurden auf die Filtration der Strasse Süd der Kläranlage Kloten/Opfikon übertragen. Auch hier wurde eine **konstante Filtergeschwindigkeit von rd. 4.3m/h** gewählt, so dass anteilig Abwasser direkt abgeschlagen wurde. Dosierte wurden **15mgPAK/l** mit einem Fe/PAK-Verhältnis von **0.4gFe/gPAK<sub>dosiert</sub>**. Die **konstante Zulaufwassermenge betrug 93.5m<sup>3</sup>/h**. Die Dosierungen erfolgten in den Flockungsraum vor dem Filter. Gemischt wurde dieser durch eine hoch turbulente und grobblasige Belüftung. Es wurde immer der Selbe Filter 5 betrieben, welcher automatisiert alle 24h rückgespült wurde. Das Rückspülwasser wurde in den Zulauf zum Sandfang geleitet.

Der Testlauf wurde über vier Wochen durchgeführt, wobei die ersten zwei Wochen als Referenzzeitraum dienen. Im Zeitraum der Dosierung wurden zudem Proben aus der Strasse Nord als Referenz genommen. **Neben der Spurenstoffelimination wurden auch Ökotox-Messungen mittels Testbatterie vorgenommen.**

**Für einige Spurenstoffe konnte eine hohe Elimination zwischen 80 und 90% erreicht werden, wohingegen jedoch für einige Stoffe nur eine Entfernung im Bereich zwischen 40 und 50% erzielt werden konnte, darunter beispielhaft Benzotriazol sowie**

**Sulfamethoxazol, welche beide als Indikatorsubstanzen zur Überprüfung der Effizienz der Spurenstoffelimination vom Bafu derzeit vorgeschlagen werden.**

**Die Ergebnisse der ökotoxikologischen Untersuchungen können hingegen als sehr positiv und eindeutig bezeichnet werden. Durch den Einsatz der PAK bzw. durch die Elimination der Spurenstoffe aus dem Ablauf der Kläranlage konnte eine deutliche und hohe Reduktion der negativen Effekte (auf 80 bis 90%) ermittelt werden.**

**Nicht zufriedenstellend war hingegen der Rückhalt der Feststoffe im Filter.** Bei einer Zulaufbelastung von rd. 34 mgAFS/l bzw. 3.5 kgAFS/m<sup>2</sup>\*d oder **2.2 kgAFS/m<sup>3</sup>\*d** wurden AFS-Ablaufwerte von **bis zu 9 mgAFS/l im Ablauf gefunden**. Insgesamt erfolgten wenige Ablaufmessungen bezüglich Feststoffe.

Dies ist insbesondere bei einem Grenzwert von 5 mgAFS/l zu hoch, da so nicht unerheblich mit Spurenstoffen beladene PAK in den Vorfluter gelangt. Der PAK-Schlupf des Filters vermindert den Anteil dosierter PAK am Eliminationsprozess, wobei nicht bestimmt wurde, welcher Anteil im Feststoffverlust Belebtschlamm (Feinsuspensa) bzw. PAK war. Insgesamt verringert sich somit auch die Gesamteffizienz der Elimination.

Die erzielten Resultate der Vorversuche im halbtechnischen Massstab an der Eawag des Projektabschnittes 1 stehen im Kontrast zu den Ergebnissen der volltechnischen Umsetzung auf der Kläranlage Kloten/Opfikon. Um diesen Widerspruch zu erklären und insbesondere auch eine erfolgreiche grosstechnische Umsetzung des Verfahrens dennoch zu ermöglichen, wurden in 2009 und 2010 erneute Versuche aufgenommen, um die vorgestellte Verfahrensvariante zu optimieren.

#### /// **Herbst 2009 - erneute halbtechnische Pilotierung an der Eawag**

Im Sommer 2010 wurde die Pilotanlage an der Eawag ausgebaut und neue halbtechnische Pilotversuche durchgeführt. Um belastungsfähigere Aussagen aus diesen neuen Versuchsserien zu erhalten, wurden automatische Probennehmer für Zu- und Ablauf (24h-Sammelproben) installiert. Zudem wurde eine Drucksonde zur Dokumentation des Druckverlustes im Filter installiert. Auch wurde der Filter derart umgebaut, dass dieser eine höhere Überstauhöhe aufnehmen konnte zur Kompensation des Druckverlustes durch die Feststoffbeladung im Filterraum.

Mit dieser optimierten Pilotanlage wurden verschiedene Versuche zum Rückhalt der PAK bei verschiedenen hydraulischen Belastungen und Dosierverhältnissen durchgeführt. Zudem erfolgte auch die Beprobung für die Bestimmung der Spurenstoffelimination. Ergebnisse dieses Projektabschnittes finden sich im nachfolgenden Bericht.

#### /// **Sommer 2010 - zweite volltechnische Anwendung auf der Kläranlage:**

Basierend auf den positiven Ergebnissen der zweiten Pilotversuche in 2009 wurde auf der Kläranlage eine erneute grosstechnische Teststellung vorgenommen. Die Optimierungen aus den zweiten Pilotuntersuchungen an der Eawag wurden in Opfikon umgesetzt.

Hierfür wurde der Flockungsreaktor umgebaut, um eine verbesserte Flockenbildung zu generieren. Wesentliche Unterschiede zur ersten volltechnischen Umsetzung in 2008 sind das

Zulaufregime, Durchmischung und Dosierung von PAK und Eisen und zudem erfolgte die Rückführung des mit PAK beladenen Spülwassers in die Biologie zur besseren Ausnutzung der PAK (Gegenstromprinzip). Zum Einsatz kam die bewährte Aktivkohle SAE- Super der Firma Norit, um jedoch auch eine Alternative zu dieser Pulveraktivkohle zu evaluieren, erfolgten Batchversuche mit verschiedenen Kohlen verschiedener Hersteller und Ausgangsrohstoffe (fossile oder pflanzliche Rohkohlen). Auf Basis dieser Ergebnisse wurde daher in der letzten Woche zudem eine zweite PAK grosstechnisch mitgetestet. Die zweite grosstechnische Pilotierung auf der Ara dauerte 9 Wochen.

## 3. Grundlagen

### 3.1 Möglichkeiten der PAK-Anwendung auf Kläranlagen

Allgemeines Hauptziel jeder PAK-Anwendung ist eine möglichst hohe und schnelle Beladung der Aktivkohle, verbunden mit einer ebenso schnellen Reduktion der zu adsorbierenden Stoffe (Adsorbat) in der gelösten Phase des Abwassers, um selbst bei geringen Kontaktzeiten hohe Eliminationsgrade zu erzielen. Hierbei beeinflusst insbesondere der Zugabort in der Kläranlage die Adsorptionskapazität der eingesetzten PAK in entscheidendem Masse.

Die häufigsten Verfahren zur weitergehenden Abwasserbehandlung mittels Aktivkohle stellen nachgeschaltete Behandlungsverfahren dar. Hierbei wird der Kläranlagenablauf zunächst mit der PAK in Kontakt gebracht und selbige, nach einer vorgegebenen Adsorptionszeit, in einer nachfolgenden Trennstufe (i.d.R. Sedimentation/Filtration oder Membranseparation) wieder vom gereinigten Abwasser abgetrennt. Derartige nachgeschaltete Verfahren bieten insbesondere den Vorteil, dass die Konzentration an gut adsorbierbarem DOC, der mit den Mikroverunreinigungen in Konkurrenz um die vorhandenen Adsorptionsplätze der PAK steht, im biologisch gereinigten Abwasser vergleichsweise gering ist.

Bei allen nachgeschalteten PAK Anwendungen ist prinzipiell statt einer **einstufigen - auch eine zwei oder mehrstufige PAK-Anwendung** denkbar, hierbei wird die in der nachgeschalteten Adsorptionsstufe zudosierte und bereits beladene Überschussskohle zur besseren Ausnutzung der Restadsorptionskapazität in die vorgeschaltete biologische Stufe eingeleitet (Gegenstromführung). Aufgrund des höheren Spurenstoffkonzentrationsniveaus erfolgt eine weitere „Beladung“ bzw. Sorption der Aktivkohle. Auch wird der DOC-Gehalt im Ablauf der biologischen Stufe reduziert, so dass diese nicht mehr in Konkurrenz bei der Adsorption der frisch zudosierten Aktivkohle steht und so die Gesamteffizienz der PAK erhöht.

Die Dosierung der **PAK direkt in einen Reaktions- bzw. den Flockungsraum einer Flockungsfiltrationsanlage** mit der Option der Rückführung des Rückspülwassers in die Biologie stellt ein weiteres nachgeschaltetes, zweistufiges Verfahren dar (siehe nachfolgende Detailprozessbeschreibung)

Eine weitere, ausschliesslich einstufig anwendbare, verfahrenstechnische Option stellt die **Direktdosierung von PAK in die biologische Stufe** dar. In diesem Fall steht dem höheren Konzentrationsgradienten zwischen Adsorbat und wässriger Phase eine höhere Konzentration an DOC-Matrix gegenüber, die sich in Konkurrenz zu den Spurenstoffen bei der Adsorption befindet.

Die folgenden Kapitel geben eine Übersicht über möglichen Verfahrenskonzepte bzw. Varianten zur Abwasserbehandlung mittels PAK.

### 3.1.1 Direkt dosierung von PAK in die biologische Stufe (einstufiges Verfahren)

Eine einfache verfahrenstechnische Option der PAK-Anwendung stellt die **Dosierung von unbeladener PAK direkt in die biologische Stufe** dar. Grosstechnisch gesehen liessen sich so die Investitionskosten für zusätzliche Reaktoren einsparen und der erforderliche Platzbedarf erheblich reduzieren, da in diesem Fall lediglich eine Dosiereinrichtung nachzurüsten und Platz für die Lagerung und Aufbereitung vorzusehen ist. Andererseits ist zu erwarten, dass sich die Menge an einzusetzender Kohle deutlich erhöhen wird, da der Hintergrund-DOC dort - im Vergleich zum Ablauf der Nachklärung - in höherer Konzentration vorliegt. Ausserdem ist die Zugänglichkeit der Kohlepartikel durch deren Einbindung in die Schlammmatrix und die Belegung mit extrazellulärer polymerer Substanz (EPS) möglicherweise eingeschränkt (Baumgarten, 2007).

Untersuchungen der Eawg haben aufgezeigt, dass es etwa der doppelten Menge an PAK bedarf im Vergleich zur Anwendung in einem Adsorptionsreaktor mit Sedimentation und Rückführung der Überschussschle in die Biologie (zweistufiges Verfahren), um auf eine vergleichbare Elimination zu erreichen. Auch bedarf es bei dieser Variante einer Filtration, welche ggf. neu erstellt werden muss.

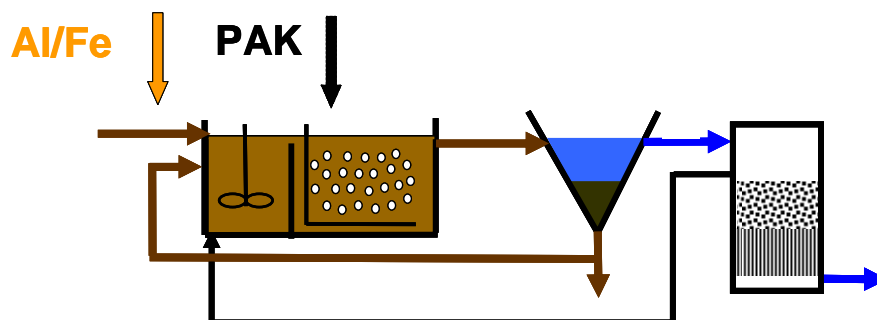


Abbildung 1: Dosierung von PAK in den Belebtschlamm

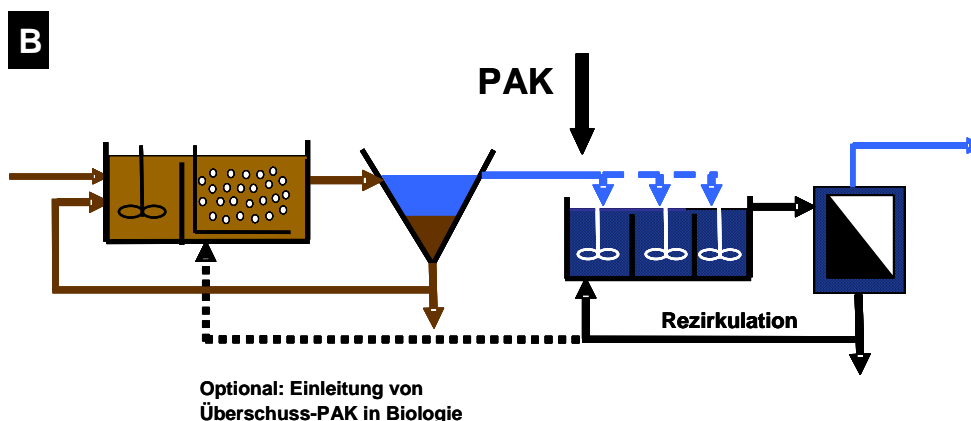
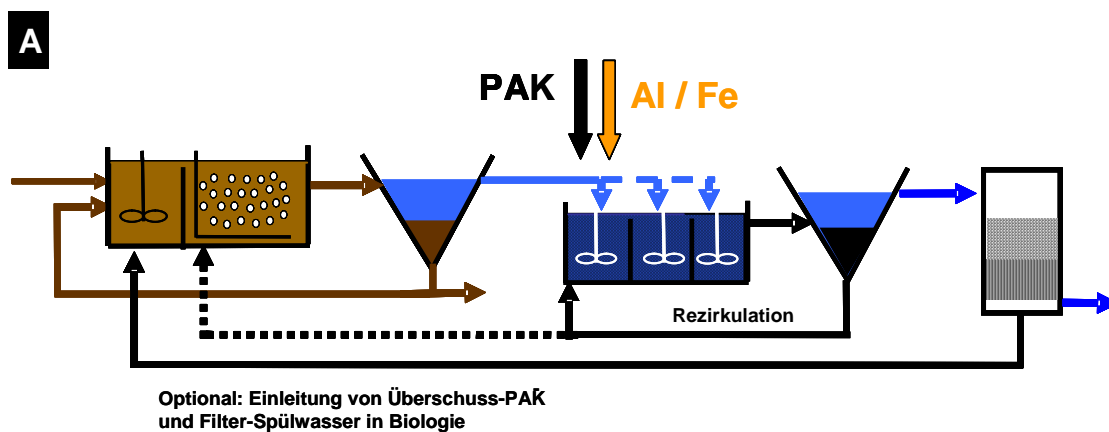
### 3.1.2 Nachgeschaltete Behandlung in separaten Adsorptionsreaktor mit anschliessender Abtrennung der PAK (ein- und zweistufiges Verfahren)

Die Dosierung der PAK erfolgt in **einen separaten Adsorptionsreaktor**, wo sie mit dem zuvor biologisch gereinigten Abwasser in Kontakt gebracht wird. Dieser kann als SBR oder als Durchlaufbecken gestaltet sein. Nach einer vorgegebenen Kontaktzeit (15 - 30 min) wird die beladene Kohle vom gereinigten Abwasser durch Sedimentation oder eine Membran abgetrennt. Da die hydraulische Verweilzeit zu gering ist, um die PAK ins Adsorptionsgleichgewicht zu bringen, kann optional die PAK zum Zweck der weiteren Beladung in den Adsorptionsreaktor rezykliert werden, so mit ist das Schlammalter der PAK deutlich grösser als die hydraulische Verweilzeit im Reaktor ist. **Durch die Trennung der hydraulischen Aufenthaltszeit von der Aufenthaltszeit der Feststoffe, ergibt sich ein gewisses Schlammalter der Aktivkohle im Adsorptionsreaktor. Das Schlammalter der**

**Kohle sollte zwischen 2-4 Tagen betragen.** Ein gewisser Anteil der Kohle wird als Überschuss dem System entzogen und kann optional in die Biologie eingeleitet werden (zweistufiges Verfahren).

In diesem Fall verlässt die PAK das System via Überschussschlammabzug aus der Biologie und gelangt in die Behandlungsschritte der Klärschlammensorgung. Zu berücksichtigen bleibt allerdings, dass eine landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm in diesem Fall nicht weiter in Frage kommt und der Schlamm folglich verbrannt werden muss, um die enthaltenen Spurenstoffe bei hohen Temperaturen zu zerstören.

Zur Abtrennung kann wahlweise eine Sedimentation in Kombination mit einer Filtration (siehe Abbildung 2A und B) zum Einsatz kommen. Im ersten Fall wird dem Adsorptionsreaktor in der Regel auch Flockungsmittel zudosiert, um die Effizienz der Abtrennung durch Sedimentation der PAK zu erhöhen.



**Abbildung 2: PAK-Behandlung in einem separaten Adsorptionsreaktor mit anschliessender Abtrennung der Kohle mittels Sedimentation und Filtration (A) oder Membranseparation (B)**

**Dennoch kann zum Schutz der Vorfluter in der Regel nicht auf die Filtration im Anschluss an die Sedimentation verzichtet werden,** insbesondere unter Berücksichtigung des Umstandes, dass ein Feinanteil der PAK trotz Flockung nach wie vor teilweise schlecht sedimentiert. Für die Ausgestaltung der Filtrationseinheit kommt neben einer Sandfiltration auch

grundsätzlich eine Tuchfiltration in Frage, da seitens der Eawag hier gute Erfahrungen gemacht wurden (Zwickenpflug et al., 2010, Boehler et al. 2011a, Boehler et al., 2011c). **Der Einsatz der Sandfiltration hat den Vorteil, das durch biologische Prozesse innerhalb des Filterbetts ein Teilabbau einiger Spurenstoffe bereits stattfindet**, der bei der hinsichtlich Investitionskosten kostengünstigerer Tuchfiltration nicht gegeben ist. Das bei der Rückspülung der Filtrationseinheit anfallende, kohlehaltige Spülwasser kann in den Zulauf der Kläranlage oder optional vorzugsweise zur Ausnutzung des Gegenstromprinzips ebenfalls in die Biologie zurückgeführt werden.

Durch Rückführung der Kohle in die biologische Stufe (zweistufiges Verfahrens) kann die weitere Beladung und somit bessere Ausnutzung der PAK erfolgen. **Durch das Gegenstromprinzip wird die Kohle in der Biologie einem höherem Konzentrationsniveau bezüglich Spurenstoffe ausgesetzt, so dass eine weitere Beladung erfolgen kann. Zudem wird ein Teil des in der Nachbehandlung konkurrierenden DOC in der Biologie entfernt.**

Wie bereits erwähnt, beinhaltet die Behandlung des Kläranlagenablaufs mit Aktivkohle den Vorteil, dass die Konzentration an konkurrierenden DOC-Verbindungen durch die vorherige biologische Reinigung des Abwassers vergleichsweise gering ist, wodurch eine bessere Anlagerung der Spurenstoffe an die PAK-Oberfläche ermöglicht wird. **Üblicherweise finden sich im Ablauf der Kläranlagen mit Nitrifikation DOC-Konzentrationen von rd. 5-10 mg/L, so dass im Allgemeinen PAK-Konzentrationen zwischen 10 und 20 mg/L für eine hinreichende Spurenstoffelimination in diesem Verfahren dosiert werden müssen**

### 3.1.3 Dosierung in den Flockungsraum einer Sandfiltration

Eine weiter verfahrenstechnische Option stellt die **Zugabe von PAK und Flockungsmittel in einen vorgeschalteten Flockungsraum mit anschließender Sandfiltration** (Raumfilter) dar (Boehler et al., 2011b). Die zusätzliche Sedimentation nach einem Adsorptionsreaktor entfällt und der Kontaktreaktor (Flockungsraum) ist vergleichsweise klein (HRT 15 - 30min). Dieses Verfahren bietet sich besonders bei Kläranlagen an, die bereits mit einer Flockungsfiltration ausgestattet sind, da so bis auf die Infrastruktur für die PAK- und Fällmitteldosierung und Lagerung keine weiteren Investitionen erforderlich wären.

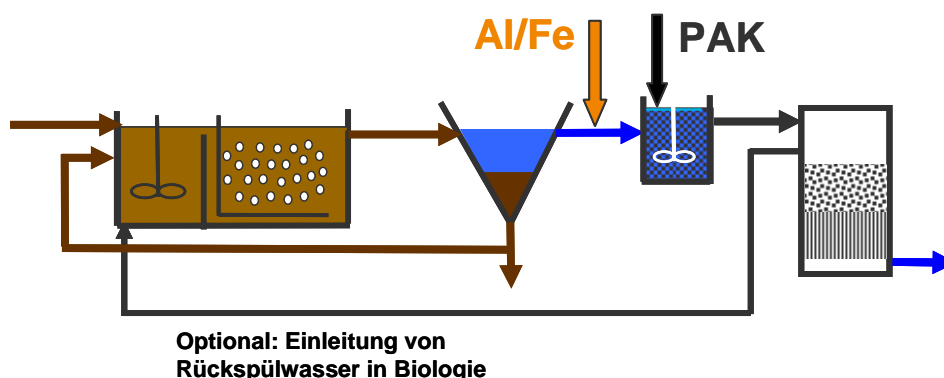


Abbildung 3: Dosierung von PAK und Flockungsmittel in den Flockungsraum des Sandfilters (Prinzip der Flockungsfiltration)

**Die im Sandfilter zurückgehaltene PAK adsorbiert die Spurenstoffe aus dem vorbeifliessenden Abwasser.** Die hohe Beladung des Filters mit Feststoffen resultiert in einer zunehmenden Erhöhung des Filtrationswiderstandes, so dass der Filter in bestimmten Intervallen (rd. 1 - 2 Tage) rückgespült werden muss, wobei die beladene PAK von der Filtereinrichtung weggeführt wird. Da eine Sedimentationsstufe zur Abtrennung und Rückführung der PAK in den Flockungsraum fehlt, ist das Schlammalter der PAK abhängig vom zeitlichen Rückspülintervall der Filtrationseinrichtung. **Die mittlere Verweilzeit der PAK im Filter entspricht folglich der Hälfte des zeitlichen Rückspülintervalls und übersteigt daher kaum 24 h** und ist damit deutlich geringer als in den anderen verfahrenstechnischen Varianten. Mit der Einleitung des Spülwassers in die Biologie zur besseren Ausnutzung der PAK (Gegenstromprinzips, zweistufiges Verfahren) wird das Schlammalter der PAK im Gesamtsystem um etwa das des Biologieschlammes erhöht.

**Zentral in diesem Verfahren ist ein effizienter Rückhalt der PAK durch die Filtration. Ist dieser nicht gegeben, scheidet diese Verfahrensvariante zur Spurenstoffelimination aus, da der Vorfluter mit PAK belastet wird und zudem die effektive Eliminationsleistung durch den PAK-Schlupf vermindert wird.**

Einfluss auf die Effizienz des Rückhalts der PAK im Verfahren hat unter anderem der Aufbau des Filters (Filtermedium und Schichtung Filterpackung) als auch der Betrieb der Anlage (Flockung PAK, Zulaufregime, Belastung des Filters wie AFS-Fracht, Filtergeschwindigkeit, etc.).

Das vorgestellte Verfahren ist nicht neu. Es wurde bereits 1997 durch Menzel im Labormassstab erprobt und als sogenanntes **AFF-Verfahren (Asorptions-Flockungs-Filtration)** vorgestellt (Menzel, 1997), jedoch aber nicht grosstechnisch angewendet.

### **3.2 Die (Flockungs-) Sandfiltration**

Im Zuge der gestiegenen Anforderungen an die Reinigungsleistung der Kläranlagen - insbesondere in Einzugsgebieten von Seen - wurden auf vielen Kläranlagen der Schweiz **Flockungsfiltrationsanlagen mit dem Ziel der weitergehenden Phosphorelimination errichtet.** Durch die erhöhte Suspensaentnahme und zusätzlichen Reduktion des gelösten Phosphors mittels Fällmittel kann eine deutliche Erniedrigung der Gesamtphosphorgehalte der Abläufe erfolgen. Grundlegende Untersuchungen und Arbeiten zur Flockungsfiltration wurden von Boller in den Achtzigerjahren an der Eawag durchgeführt (Boller, 1980).

Die Flockungsfiltration ist ein Verfahren, das Flockungs- und Filtrationsvorgänge in kompakter Bauweise vereinigt. Die Dosierung von Flockungsmitteln führt zur verbesserten Abtrennung der suspendierten Stoffe (Kolloide) durch Änderung der chemischen Oberflächeneigenschaften (Entstabilisierung). Die Mechanismen der Entstabilisierung beruhen auf Wechselwirkungen zwischen den geladenen Kolloidoberflächen und dem gelösten Flockungsmittel (Boller, 1980).

Im Gegensatz zur Trinkwasseraufbereitung, bei der es vorwiegend um die Entfernung der Kolloide geht, **wird beim Einsatz der Flockungsfiltration in der Abwasserreinigung zusätzlich zur Suspensaentnahme die Überführung des gelösten oder kolloidalen Phosphats in eine abfiltrierbare festen Form angestrebt.**

Dies gelingt durch Dosierung höherer Mengen Fäll- bzw. Flockungsmittel, was zur Ausfällung der entsprechenden Metallhydroxide führt. Diese Fällungsprodukte haben die Eigenschaft, im Abwasser gelöstes Phosphat auszufällen oder zu adsorbieren und damit in eine partikuläre Form zu überführen. **Das entstehende Feststoffgemisch aus abwasserbürtigen Partikeln und neu gebildeten Fällungsprodukten weist jedoch gegenüber entstabilisierten Suspensionen ohne Fällung wesentlich andere Filtrationseigenschaften auf, die auf die Feststoffabtrennung bedeutenden Einfluss haben (Boller, 1980).** Dieser Umstand ist von grosser Bedeutung in der hier betrachteten Adsorptions-Flockungs-Filtration, bei der eine weitestgehende Abtrennung der dosierten Pulveraktivkohle durch die Filtration angestrebt wird.

Die Erkenntnisse zur Dimensionierung und Auslegung von Filteranlagen sind im Arbeitsblatt ATV-A 203 „Abwasserfiltration durch Raumfiltration nach biologischer Reinigung“ zusammengefasst (DWA/ ATV, 1995). Heute werden nach Einführung der Flockungsfiltration rd. 60 Abwasserfilteranlagen in der Schweiz und rd. 180 in Deutschland betrieben. Einen Überblick über die Erfahrungen zum Betrieb gibt das Themenheft der DWA (DWA, 2009).

Einfluss auf die Effizienz der Flockungsfiltration hat unter anderem der Aufbau des Filters (Filtermedium und Schichtung der Filterpackung) als auch der Betrieb der Anlage (Art und Weise Fällung/Flockung, Zulaufregime, Beladung des Filters mit Feststoffen und deren Eigenschaften, Filtergeschwindigkeit, Rückspülmodus, nutzbare Überstauhöhe, etc.).

Eine Zusammenstellung über die gängigen Auslegungs- und Betriebskenngrößen von Filtrationsanlagen gibt Tabelle 1.

**Tabelle 1: Auslegungs- und Betriebskenngrößen von Filtrationsanlagen in der kommunalen Abwasserreinigung (nach Barjenbruch, M. (1997u. 2007); Boller, M. (1980) und DWA/ATV, (1995 u. 2009)**

	Filtergeschwindigkeit $V_f$ m/h		Feststoffbeladung	Filterbett-	Überstauhöhe m -	Lauflänge h
	Trockenwetter	Regenwetter	kgAFS/m <sup>3</sup>	höhe m	nutzbare Druckhöhen mWs	
einfache (flache) Sandfilter	k.A.	9 bis 10	1 bis 1.5	Packung 1.2 bis i.D.R. 2.0 (bis max 3.0)	0.5 - 1.0 - 3 bis 6 mWs	i. d. R. 24h min. < 5-10h max. 20 - 30h
unbelüftete Raumfilter	7.5	15	3 bis 4			
Raumfilter ohne Flockung	5	10	3 bis 4			
Flockungsfilter	6 bis 8	15	2.5			
Filtration Kloten/Opfikon: klassische Sulzer Flockungsfiltration, Auslegung $Q_{TW}$ mit 7 bzw. $Q_{RW}$ mit bis 15m/h, Zweischichtfilterbett, h = 1.6m, Lauflänge 24h, Überstau 1m						

Wesentlichen Einfluss auf das Rückhaltevermögen bzw. auf die Filtrationsleistung können verschiedene Faktoren (vgl. Abbildung 4) haben.

Wesentlicher Einfluss hat unter anderem die Höhe der Feststofffracht auf die Filtereffizienz, welche sich in diesem Zusammenhang aus dem Suspensaabtrieb der Nachklärung und der zusätzlichen Fracht aus den Dosierungen ergibt.





Abbildung 4: Mögliche Einflussfaktoren auf die Filtrationsleistung einer Sandfiltration

### 3.3 Flockungsfiltration Ara Kloten/Opfikon - Auslegung und Regime

#### /// Aufbau und Betrieb

Die Flockungsfiltrationsanlage der Kläranlage Kloten/Opfikon entspricht einer klassischen **Sulzer-Zwei-Schicht-Sandfiltrationsanlage**, wie sie auf vielen Kläranlagen der Schweiz realisiert ist.

Die Flockungsfiltration der Ara besteht aus 8 Filtern, wobei diese je Strasse zu je 4 Filter baulich zusammengefasst sind. Nach der Filtration vereinigen sich erst die Abläufe der Strassen Süd und Nord, so dass die Belebungsbecken, Nachklärungen sowie **Filter Nord von Süd** hydraulisch nahezu getrennt sind und somit beide Strassen **getrennte Schlammkreisläufe** aufweisen.

Jeweils ein Flockungsraum ist je Strasse den Filterbecken vorgeschaltet. Dieser ist längs durchströmt. Zudem ist baulich ein Einmischbecken (rd. 8.5m<sup>3</sup>) mit Rührwerk vom Reaktionsbecken abgetrennt bzw. vorgeschaltet. Der Flockungsraum hat gesamthaft ein Volumen von rd. 84 m<sup>3</sup>.

Der Flockungsraum war **bis zur zweiten Teststellung im Sommer 2010 mit einer grobblasigen Belüftung zur Durchmischung ausgerüstet**, welche eine sehr turbulente Durchströmung mit hohem Energieeintrag im den Reaktor verursachte. Obwohl keine Flockungsmittel in den Flockungsraum dosiert werden, ist dieser immer belüftet, um die biologische Aktivität im Sandfilter zu unterstützen bzw. aufrecht zu erhalten. Wir gehen da von aus, dass die grobblasige Belüftung ein ungünstiges Flockenbild bzw. Agglomeration der Pulverkohle erzeugt, welches für einen effizienten Rückhalt der Feststoffe bzw. der PAK im Filtermedium wenig vorteilhaft ist. **Die Versuche an der Eawag erfolgten stets mit einer feinblasigen Belüftung.**

Dieses grobblasige Belüftungssystem wurde seitens der WABAG Winterthur für die Teststellung 2010 mit einer feinblasigen Linienbelüftung ausgetauscht. Dies erfolgte für beide Strassen Nord und Süd und verbleibt dauerhaft im Flockungsraum. Die Linienbelüftung erzeugt eine walzenförmige Strömung im Reaktor und verstärkt die längsgerichtete Plug-flow Bewegung

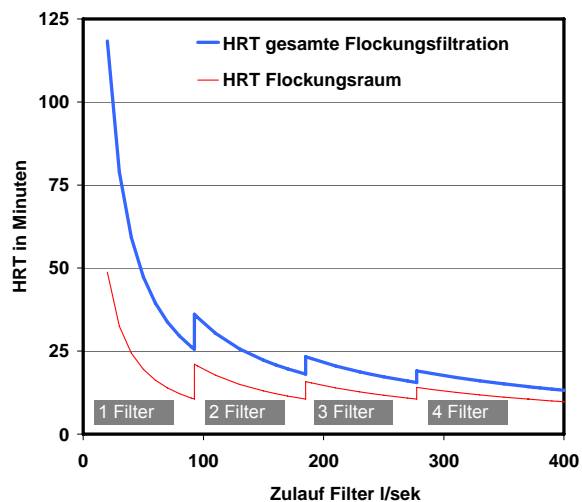
durch den Reaktor. Unterstützt wird dieses Fließregime durch den Einbau einer zusätzlichen Trennwand als unterströmte Tauchwand auf der Hälfte des Reaktors.



**Abbildung 5: Vergleich der Durchmischung bzw. Turbulenz im Flockungsraum zwischen der ehemaligen grobblasigen Belüftung (links) und der neuen feinblasigen Membran-Linien-Belüftung (rechts)**

Ein Filterbecken (Vol. =  $36\text{m}^3$ ,  $3 \times 7.5 \times 1.6\text{m}$ ) hat eine Filterfläche von  $22.5\text{m}^2$  und ist mit einem  $1.6\text{ m}$  dickem Filtermedium ausgestattet. Dieses besteht aus einer  $40\text{cm}$  starken Quarzsandschicht ( $d = 0.7$  bis  $1.25\text{mm}$ ) gefolgt von einer Blähschieferschicht von  $120\text{cm}$  ( $d = 2$ - $3\text{mm}$ ). Über eine Echolotmessung wird der Überstau kontrolliert und über ein Ablaufschieber im Ablauf der Filtration auf einen Überstau von  $1\text{m}$  eingeregelt.

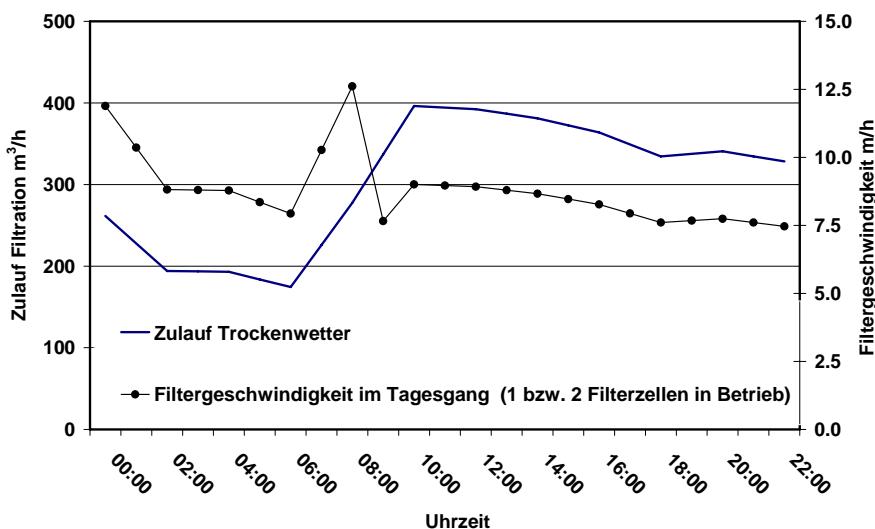
Unter Berücksichtigung der Zulaufwassermenge und des Überstauvolumens ergeben sich folgende Aufenthaltszeiten für das zufließende Abwasser im Kontakt- bzw. Flockungsraum sowie in der gesamten Filtrationsanlage (vgl. **Abbildung 6**). Bei mittlerem Trockenwetterabfluss von  $7500\text{m}^3/\text{d}$  je Strasse ergibt sich eine **mittlere hydraulische Verweilzeit in der gesamten Flockungsfiltration je Strasse von rd. 27min bzw. im Flockungsreaktor von rd. 11min.**



**Abbildung 6** Aufenthalts- bzw. Kontaktzeit Abwasser und Aktivkohle in der Filtrationsanlage (inklusive Überstauvolumen)

### Filterregime

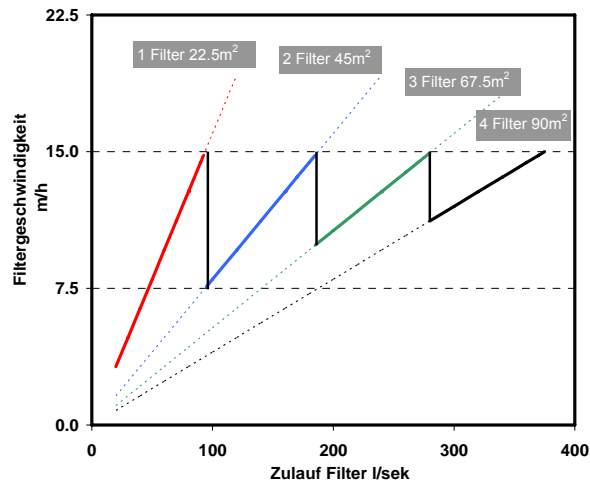
Die Filteranlage in Kloten/Opfikon wird kontinuierlich betrieben. Die einzelnen Filter werden gleich verteilt belastet und daher abwechselnd in Betrieb genommen. Dies hat den Vorteil die biologische Aktivität im Filtermedium aufrecht zu erhalten und den allg. Verschleiss der Anlage gleich zu verteilen.



**Abbildung 7** Trockenwettertagesgang und Filtergeschwindigkeit je Strasse der Kläranlage Kloten/Opfikon. Im Verlauf des Morgens wird aufgrund der steigenden Zulaufwassermenge ein zweiter Filter zugeschaltet

Nach der Reinigung mittels Rückspülung um Mitternacht arbeitet bei einer Zulaufwassermenge < rd. 90l/sek im Nachtminimum ein Filter. Im Verlauf des Morgens bei steigender Zulaufwassermenge wird ab rd. 340m<sup>3</sup>/h ein zweiter Filter zugeschaltet. Unter „normalen“ Trockenwetterverhältnissen werden in Abhängigkeit der Zulaufwassermenge pro Tag maximal zwei Filter betrieben (vgl. Abbildung 7). Somit ergeben sich über den Tag moderate mittlere

Filtergeschwindigkeiten von rd. 7.5 m/h. **Mit stetig steigender Zulaufwassermenge im Regenwetterfall werden weitere Filter zugeschaltet (vgl. Abbildung 8),** so dass die gesamte Filtration je Strasse kurzfristig bis zur vierfachen Trockenwetterzulaufwassermenge aufnehmen kann. Kurz vor Zuschaltung weiterer Filter werden Filtergeschwindigkeiten von 15m/h erreicht.



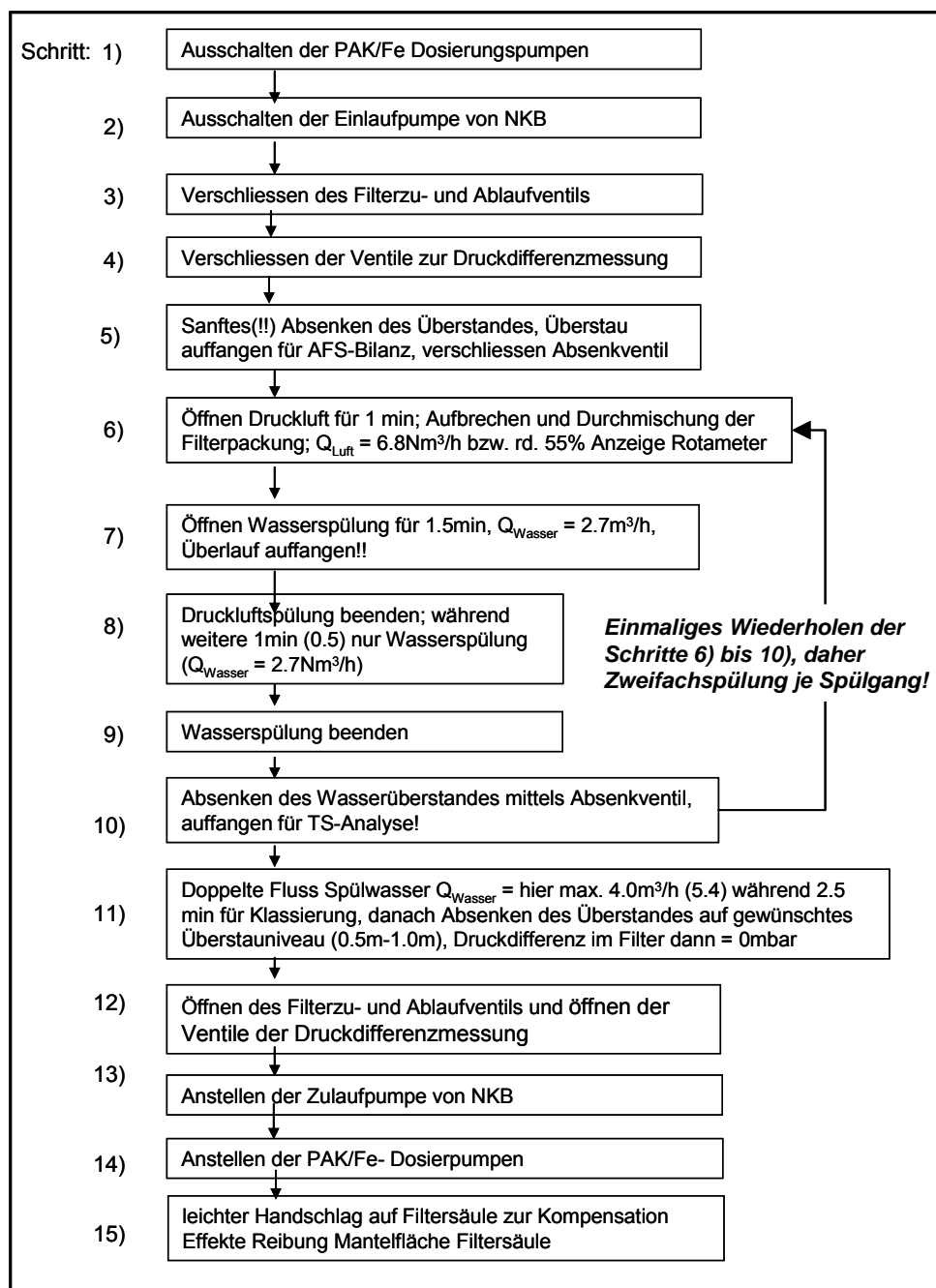
**Abbildung 8 Filtergeschwindigkeiten bei unterschiedlicher Anzahl betriebener Filter in Abhängigkeit der Zulaufwassermengen**

Verringert sich die Zulaufmenge, werden dennoch die bereits aufgestarteten Filter bis zur nächsten Spülung um Mitternacht weiter betrieben, so dass nach der mitternächtlichen Spülung alle vier Filter je Strasse sauber in den nächsten Betriebstag aufstarten können.

### /// Reinigung

Die Reinigung der Filter erfolgt nach einem fest vorgegebenen Spülprogramm. Dieses garantiert durch die Reihenfolge der Arbeitsgänge ein Aufbrechen des kolmatierten Filtermediums und ein effektives Durchmischen mit Austragen der Feststoffe aus dem Filter. Das Rückspülen erfolgt mit Druckluft oder Wasser oder auch in Kombination. Ein letzter Arbeitsgang sorgt für einen geordneten Filteraufbau bzw. Reihenfolge der Filtermedien durch hydraulische Entmischung der Filterfraktionen. Details zur Reinigung bzw. zum Rückspülen kann Abbildung 9 entnommen werden oder dem Zwischenbericht dieses Projektes (Böhler et al, 2009).

Im Gegensatz zur Teststellung 2008 erfolgte die Rückführung des Spülwassers in die Biologie, da die Erfahrungen mit einem Adsorptionsreaktor mit Rückführung der Überschussschlammkohle in die Biologie deutliche Vorteile bezüglich der Effizienz der Spurenstoffelimination zeigten (Zwickenpflug und Böhler, 2010). Einige Stoffe zeigten sogar erst eine deutliche Reduktion in einem zweistufigen Verfahren mit Gegenstromprinzip. Hierzu wurden zusätzliche Pumpen im Pumpensumpf der Filtration installiert, welche mit fliegenden Leitungen das Rückspülwasser mit der darin enthaltenden täglichen PAK-Fracht in die beiden Biologien der Strasse Süd (in die aerobe Zone) rückführten. Die Aktivkohle verlässt so das System via Überschussschlammabzug und gelangt in die weiteren Behandlungsschritte der Klärschlamm Entsorgung.



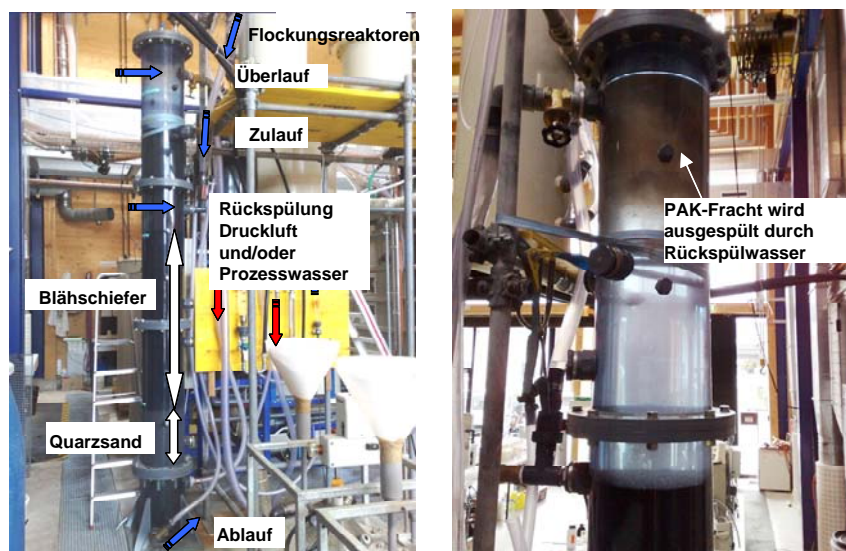
**Abbildung 9 Spülprogramm bzw. Arbeitsanweisung zur Reinigung des Sandfilters. Das Spülprogramm des Pilotsandfilters ist analog zum automatisierten Spülprogramm der Kläranlage Kloten/Opfikon**

Im Normalbetrieb wird das Spülwasser dem Zulauf zum Sandfang zugeführt, welches für die Strasse Nord beibehalten wurde. Das Spülprogramm wurde nicht abgeändert, sondern nur zeitlich auf den Vormittag verlegt, um visuell die Rückführung zu kontrollieren.

### 3.4 Pilot-Filtrationsanlage Eawag

Um die genauen Rahmenbedingungen für die grosstechnische Umsetzung in Kloten/Opfikon zu evaluieren, wurden in der Versuchshalle der Eawag Vorversuche mit einer massstabsgetreuen Sandfilteranlage (Filtermaterial, Körnung, Höhe des Filters, Überstau, Rückspülprogramm, etc.) durchgeführt (Bild 3A und B). Dies insbesondere vor dem Hintergrund, dass ein grosstechnischer PAK-Einsatz erhebliche Ressourcen und technische Aufwendungen auf der Kläranlage Kloten/Opfikon verursacht. Details hierzu finden sich im Zwischenbericht (Böhler et al. 2009).

Für die Optimierungsversuche in 2009 wurde die Pilot-Filtrationsanlage um eine automatisierte Probennahme für Zu- und Ablauf ergänzt. Zudem wurde der Filtersäule auf über 4.5m erhöht, um entsprechend einen höheren Filterüberstau zu erlauben, der den Druckanstieg in der Säule aufnimmt, da im Gegensatz zum volltechnischen Betrieb die Ablaufventilöffnung proportional zum Druckanstieg nicht geöffnet werden kann. Weiterhin wurde eine Drucksonde zur Beobachtung und Dokumentation des Anstieges der Druckdifferenz installiert und das Signal aufgezeichnet.



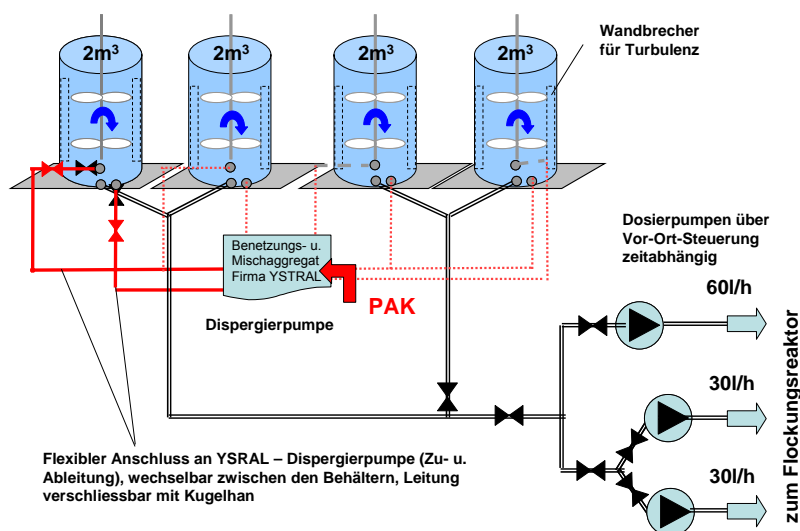
**Abbildung 10A / B:** Pilotfilteranlage in der Versuchshalle der Eawag. Die Anlage entspricht technisch die der grosstechnischen Flockungsfiltration der Kläranlage Kloten/Opfikon. Das Spülprogramm entsprach dem Programmschema der Kläranlage, die Rückspüleinrichtungen wurden jedoch manuell bedient. Das rechte Bild zeigt die Spülphase zur Klassierung der Filtermedien bzw. wird mit PAK-verunreinigtes Spülwasser durch Klarwasser verdrängt.

### 3.5 Pulveraktivkohle (PAK) - Aufbereitung und Dosierung

Die Aufbereitung und Dosierung von PAK ist nicht ganz trivial, da zum einen eine gute Benetzung der feinen Kohle stattfinden muss und es zum anderen bei Verwendung einer PAK-Suspension schnell zu Ablagerungen und Verstopfungen bei der Dosierung selbst kommen kann. Die Abrasivität der PAK bzw. Suspension führt zu einem verstärkten Verschleiss der eingesetzten Materialien bzw. Aggregaten.

In allen Anwendungen wurde die effiziente SAE-Super von Norit gewählt, wobei in der letzten Woche der Anwendung in 2010 ein alternatives Produkt der Firma CSC GmbH (Vettweiss, D) auf Holzkohlebasis verwendet wurde. Das zweitgenannte Produkt wurde im Rahmen eines Screening-Tests (Böhler, 2010) von verschiedenen PAK-Produkten an der Eawag evaluiert und zeigt die gleiche Breitbandwirkung mit hohen Eliminationsleistungen in Bezug zur Spurenstoffelimination und DOC-Entfernung.

In der ersten grosstechnischen Teststellung 2008 wurde vorbefeuchtete PAK (50%-Feuchtegehalt) verwendet, wie diese in der Schwimmbadwasseraufbereitung Anwendung findet. In 2010 wurde jedoch aufgrund der deutlich höheren Mengen handelsübliche PAK (5-6%-Feuchte) verwendet, welche mit einem speziellen Dispergator der Firma YSTRAL GmbH (Ballrechten-Dottingen, D), benetzt wurde. In den Anwendungen wurde jeweils mit einer 50gPAK/l-Suspension gearbeitet, welche in Vorlagebehältern zu je 2 m<sup>3</sup> Volumen gespeichert wurde. Die Dosierung dieser Suspension erfolgte mit Monopumpen.



**Abbildung 11 Prinzip der PAK-Aufbereitung bzw. Herstellung der PAK-Suspension. Es wurden täglich 2 Behälter mit frischer PAK-Suspension angesetzt. Die PAK-Suspension (50g/L) wurde kontinuierlich gerührt**

Es wurden jeweils 15 gPAK/m<sup>3</sup> bezogen auf den mittleren Trockenwetterzulauf dosiert. Die aus der Trockenwetterspitze resultierende tägliche maximale PAK-Fracht wurde auch bei Regenwetterzulauf nicht erhöht, da bei erhöhtem Zulauf eine entsprechende Verdünnung der Spurenstoffe und des konkurrenzierenden DOC stattfindet.

In diesem Zusammenhang ist zu überlegen, ob ab einer bestimmten Zulaufwassermenge die Dosierung gänzlich abzustellen ist, da keine akute Gefahr für das Gewässer besteht.



**Abbildung 12** Dosier- und Aufbereitungseinrichtungen auf der Ara Kloten/Opfikon. Mit Hilfe eines Dispergator (Bild oben rechts) kann die Pulveraktivkohle aus den Transportsäcken staubarm abgesaugt und mit Wasser benetzt werden. Mittels flexibler Zu- und Ablaufleitungen können die PAK-Vorlagebehälter zur Befüllung gewechselt werden. Die Behälter selbst sind an eine Dosierstation - bestehend aus drei Mono-Pumpen - angehängt

Um eine quasi-Q-proportionale Dosierung zu erhalten wurde in Abhängigkeit der Tagesdynamik des Zulaufes die PAK-Fracht mit drei Pumpen verschiedener Leistung über den Tag verteilt dosiert. Zum Einsatz kamen Exzentrerschneckenpumpen mit speziell gehärteten Rotoren, da ein nicht zu vernachlässigbarer Abrieb durch die sehr abrasive PAK-Suspension und Lochfrass durch den hohen pH (rd. 12) zu verzeichnen war. Vermutlich erzeugt der Aschegehalt der PAK den deutlichen pH-Anstieg in der PAK-Suspension. Bild 6 zeigt die Verteilung der Fracht über den Tag. Insgesamt **wurden 112.5 kgPAK pro Tag dosiert.**

Analog zur PAK-Dosierung wurde die Dosierung der Eisen<sup>3+</sup>-Lösung vorgenommen. Das Eisen wurde in den ersten, turbulent gerührten Reaktor des Flockungsraums eingebracht. Die Dosierung der PAK-Suspension erfolgte als zweites in den nachfolgend feinblasig luftgemischten Reaktor. Im Gegensatz zu 2008 wurde die Eisenmenge deutlich reduziert, so dass **ein Verhältnis von 0.1 gFe/gPAK zur Anwendung** kam. Ziel war es eine Entstabilisierung der PAK-Partikel vorzunehmen und kleine kompakte Partikelagglomerate im Gegensatz zu voluminösen Eisenhydroxidflocken zu produzieren, die in den Filter eindringen können und somit die Raumfiltrationswirkung des Filters ausnutzen.

**Insgesamt wurden im 2010 rd. 5.3 t PAK und rd. 0.5 t Eisen in Form von Eisen<sup>3+</sup>-Chlorid in 9 Wochen dosiert.**



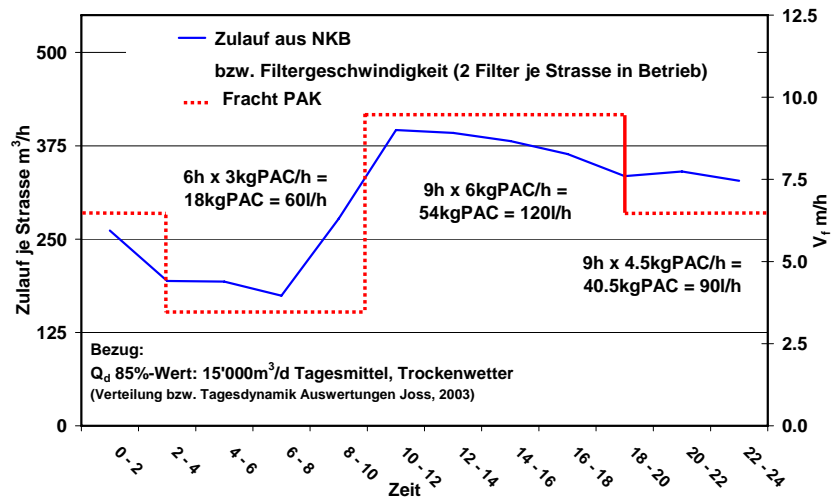


Abbildung 13: Tagesdynamik des Zulaufes zur Sandfiltration Kloten/Opfikon und die daraus resultierenden schwankenden Filtergeschwindigkeiten sowie die Verteilung der dosierten PAK-Fracht

## 4. Untersuchungen Pilot-Filtrationsanlage Eawag

Die konträren Ergebnisse der Versuchsphasen 1 und 2 in 2008 veranlassten eine erneute Versuchsführung in 2009. Das Ziel der erneuten halbtechnischen Untersuchungen mit der Pilotanlage war es die positiven Ergebnisse aus den ersten Pilot-Untersuchungen zu wiederholen bzw. zu verifizieren. Weiterhin sollte das Verfahren derart optimiert werden, dass auch bei einem grosstechnischen Einsatz unter robusten Praxisbedingungen einer Kläranlage neben einem effizienten Rückhalt der Kohle auch eine damit verbundene Verbesserung der Gesamtelimination von Spurenstoffen zu erreichen.

### 4.1 Untersuchungen zur möglichen Akkumulation von Feststoffen im Filtermedium

Aufgrund der geringen Feststoffkonzentrationen im Ablauf der Pilotfiltration in den Versuchen von 2008 wurde vermutet, dass ggf. eine Akkumulation der Feststoffe im Filtermedium in den wenigen Betriebstagen stattgefunden haben könnte und so der gute Feststoffrückhalt generiert wurde. Während des kurzen Betriebs war ggf. die Sättigung des Raumfilter verbunden mit einem möglichen späteren Durchbruch der Feststoffe noch nicht erreicht. Um diesen Umstand zu prüfen wurden Massenbilanzen der Feststofffrachten beim Betrieb des Filters durchgeführt. Hierzu wurden zu den normalen Zu- und Abläufen des Filters auch das Rückspülwasser bezüglich Menge und Feststoffkonzentration untersucht. Zur Untersuchung wurde das gesamte Rückspülwasser aufgefangen und beprobt.

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht, dass keine Akkumulation von Feststoffen im Filter stattfindet und Ein- und Austrag von Feststoffen nahe zu gleich sind. Leichte Unterschiede in der Massenbilanz ergeben sich lediglich aus der Messungenauigkeit, insbesondere durch die schwierige homogene Probenahme des gesammelten Rückspülwassers (vgl. Abbildung 14).

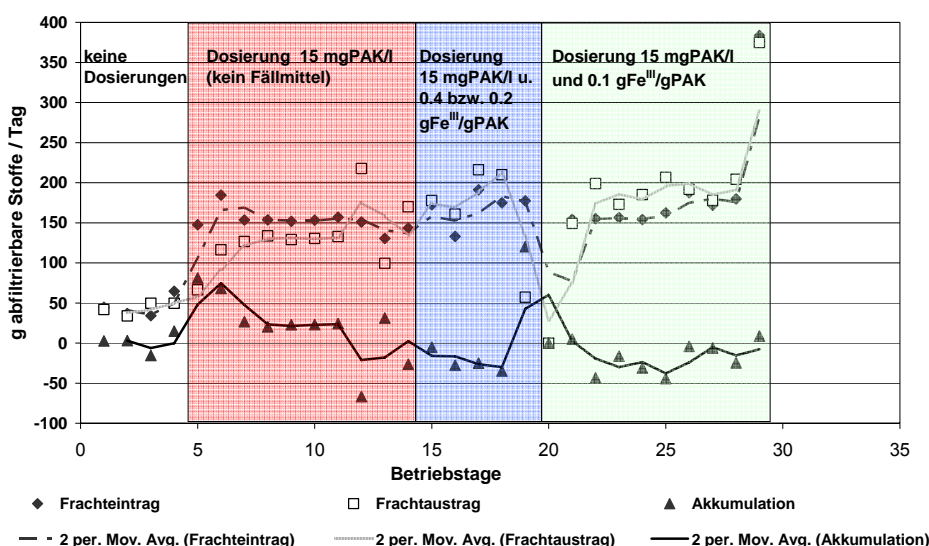


Abbildung 14 Frachtein- bzw. Austrag von Feststoffen in den verschiedenen Versuchsphasen (mit und ohne PAK-Dosierungen und ohne Dosierung von Fällmittel)

## 4.2 Einfluss des Fällmittels auf den Feststoffrückhalt

In den Versuchen wurde der Einfluss des Fällmittels auf den Rückhalt der Feststoffe untersucht. Es wurden verschiedene Dosierverhältnisse von Eisen zu PAK getestet (vgl. Tabelle 2).

Ohne Einsatz von Eisen<sup>3+</sup>-Chlorid konnte nur ein Feststoffrückhalt bis maximal rd. 75% erreicht werden. Der Einsatz von Eisen<sup>3+</sup>-Chlorid vermindert die Feststoffablaufkonzentration und verbessert deutlich den Feststoffrückhalt. Bei der Dosierung von 15 mg PAK und 1.5 mg Eisen je Liter Abwasser konnten über 90% der Feststoffe zurückgehalten werden (vgl. Tabelle 2).

Ein direkter Zusammenhang zwischen der Höhe der dosierten Fällmittel und der Ablaufkonzentration lässt sich jedoch nicht eindeutig herstellen (vgl. Abbildung 15). Dennoch lässt sich erkennen, dass auch bei eher sehr geringem Eiseneinsatz eine Verbesserung bzw. ein stabiler tiefer Ablaufwert bei gleichzeitiger Erhöhung des Suspensaabtriebes aus der Nachklärung erreicht werden kann. Es ist anzunehmen, dass durch den geringen Eiseneinsatz eine Entstabilisierung der PAK-Partikel stattfindet. Es bildet sich vergleichsweise wenig Eisenphosphat und Eisenhydroxid und somit wenige voluminöse Flocken, welche dazu neigen, weniger gut in den Filterraum einzudringen bzw. eher oberflächlich im Filter zurückgehalten werden und zu einem schnellen Druckanstieg im Filter führen.

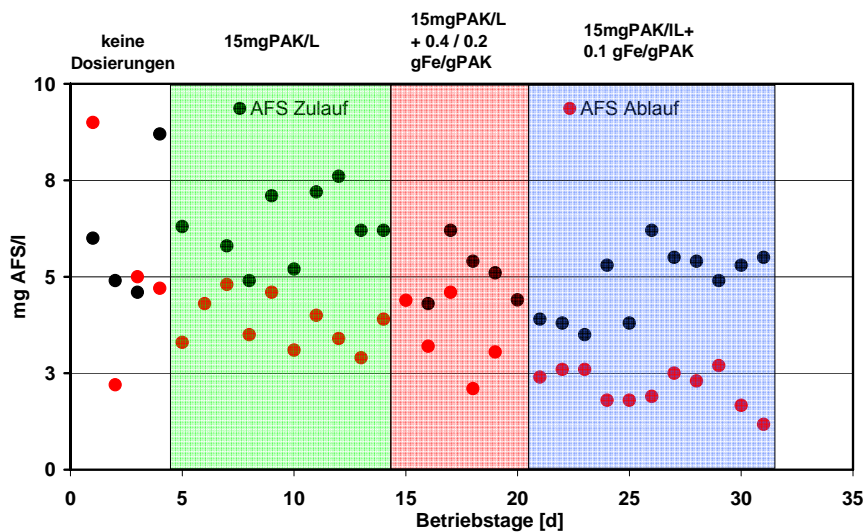


Abbildung 15 Verlauf der Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der Pilotfiltration bei verschiedenen Eisen<sup>3+</sup>-zu PAK-Verhältnissen

### 4.3 Einfluss der Filtergeschwindigkeit und Laufzeit des Filters

Im Zuge der Pilotuntersuchungen wurde auch der Einfluss der Filtergeschwindigkeit untersucht und verschiedene Lastfälle für den Pilotfilter generiert (vgl. Tabelle 2).

**Tabelle 2: Betriebsgrößen und Ergebnisse bei den verschiedenen Untersuchungen mit dem Pilotfilter an der Eawag**  
 (mit <sup>+</sup> Bezugszeitraum zwischen zwei Spülungen; \* Langzeitversuch; <sup>''</sup> Bezug Trockenwetter  $V_f = 4.5\text{m/h}$  ( $0.31\text{m}^3/\text{h}$ ), Filterpackungsvolumen  $0.11\text{m}^3$  und Filterfläche  $0.07\text{m}^2$ )

Versuchseinstellungen	Versuchsdauer d	AFS-Zulauf (Ablauf NKB) g/m <sup>3</sup> Mittel min/max	Dosierung PAK " g/m <sup>3</sup>	Dosierung Fe gFe/gPAK	Gesamtkonz. AFS im Zulauf Filter g/m <sup>3</sup>	Lauf- länge * h	Filterge- schwindigkeit $V_f$ m/h	Flächen- belastung <sup>+</sup> kg/m <sup>2</sup>	Raum- belastung <sup>+</sup> kg/m <sup>3</sup>	AFS-Ablauf Filtration g/m <sup>3</sup> Mittel min/max	AFS- Rückhalt %
keine Dosierung - nur Zulauf aus NKB	4	6.1 (4.6 - 8.7)	0	0	6.1	23	4.5 (0.31m <sup>3</sup> /h)	0.64	0.40	3.8 (2.2 - 5.0)	38%
keine Dosierung - nur Zulauf aus NKB	8	6.2 (4.4 - 7.5)	0	0	6.2	23 (40 *)	4.5 (0.31m <sup>3</sup> /h)	0.65 (1.2 *)	0.41 (0.73 *)	1.6 (0.4 - 2.5)	74%
nur PAK-Dosierung (ohne Flockung)	6	5.2 (3.6 - 8.6)	15	0	21	23 (43 *)	4.5 (0.31m <sup>3</sup> /h)	2.2 (4.2 *)	1.4 (2.6 *)	5.2 (3.6 - 6.8)	75%
nur PAK-Dosierung (ohne Flockung)	10	6.3 (4.9 - 7.6)	15	0	22	19 - 24	4.5 (0.31m <sup>3</sup> /h)	1.9 - 2.4	1.2 - 1.5	3.8 (2.9 - 4.8)	83%
PAK- und Fe <sup>III</sup> - Dosierung	6	5.1 (4.3 - 6.2)	15	0.2 / 0.4	26 / 32	17 - 23	4.5 (0.31m <sup>3</sup> /h)	2.3 - 3.2	1.5 - 2.0	3.5 (2.1 - 4.4)	92% / 86%
PAK- und Fe <sup>III</sup> - Dosierung	11	4.8 (3.5 - 6.2)	15	0.1	23	23 - 24 (49 *)	4.5 (0.31m <sup>3</sup> /h)	2.4 - 2.5 (5.1 *)	1.5 - 1.6 (3.2 *)	2.1 (1.2 - 2.6)	91%
PAK- und Fe <sup>III</sup> - Dosierung	12	4.0 (2.1 - 8)	15	0.1	19	23	6.5 (0.44m <sup>3</sup> /h)	2.8	1.8	2.0 (1.1 - 2.5)	89%
PAK- und Fe <sup>III</sup> - Dosierung bezogen auf 6.5m/h (Trockenwetter)	13	4.9 (3.7 - 7.9)	15 (bezogen auf 6.5m/h Trockenwetter)	0.1 (bezogen auf 6.5m/h Trockenwetter)	variabel bedingt durch Tagesgang, bezogen auf Trockenwetter 21.5	23	Stresstest, variabel 4.5 - 12.5 als Tagesgang (0.31 - 0.86m <sup>3</sup> /h)			2.0 (1.1 - 2.9)	91%

Hier zeigt sich im Pilotversuch, dass auch bei höheren Filtergeschwindigkeiten von bis 15 m/h ein guter Rückhalt gegeben ist. Bei variablen Filtergeschwindigkeiten (zeitlich begrenzt bis 15m/h, Regenwetterlastfall) können die Feststoffe dennoch bis zu rd. 90% zurückgehalten werden. Ablaufkonzentrationen über 5 mgAFS/L werden im Wesentlichen nicht überschritten.

Einzelne Versuche mit Filterlaufzeiten zwischen 40 bis zu 49 Stunden führten zu keinen Filterdurchbrüchen mit hohen AFS-Ablaufkonzentrationen. In diesen Versuchen wurde der Filter mit bis zu 3.2 kgAFS/m<sup>3</sup> Filterraum beladen. Diese Ergebnisse deuten daraufhin, dass auch bei höherem Suspensaabtrieb bei gleichzeitiger PAK-Dosierung von bis 15 mgPAK/L ein hinreichender Rückhalt gegeben sein sollte, da gemäss den Auslegungsempfehlungen eine Beladung von 2.5 bis 4 kgAFS/m<sup>3</sup> Filterraum möglich sein sollte (vgl. Tabelle 1).

### 4.4 Spurenstoffelimination des Pilotfilters

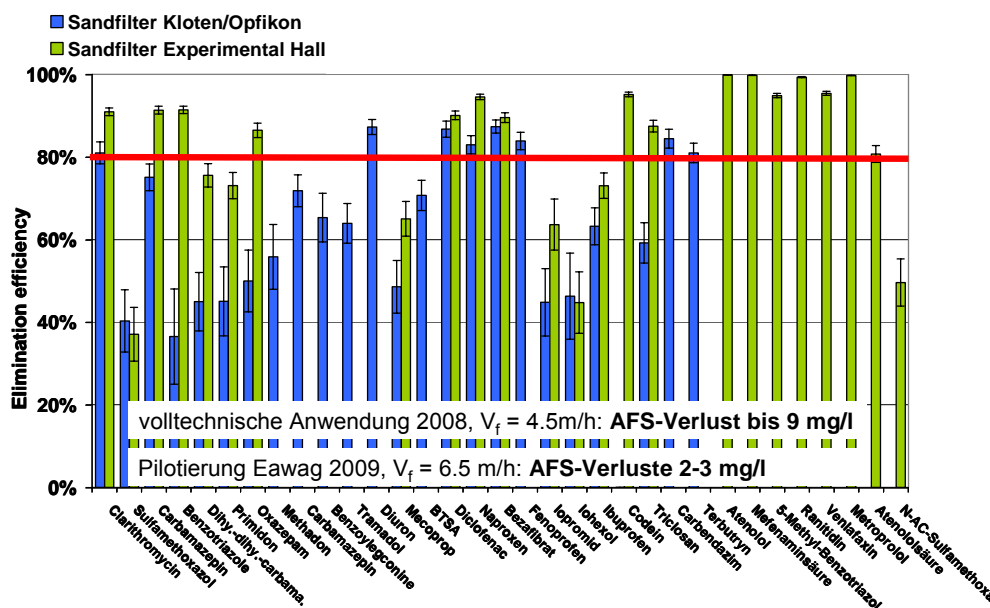
Im Zuge der Pilotierung wurde auch die Spurenstoffelimination betrachtet. Die in 2008 erreichte Spurenstoffelimination im grosstechnischen Versuch auf der Kläranlage Kloten/Opfikon war nur bedingt zufriedenstellend, da für einige Stoffe unzureichende Eliminationsleistungen erreicht wurden.

Da in der Teststellung AFS-Ablaufkonzentrationen von bis zu 9 mgAFS/L erreicht wurden, ist gesamthaft weniger Aktivkohle im Sandfilter zurückgehalten worden. Der Kontakt zwischen gesamthaft zurückgehaltener PAK und vorbeifliessendem Abwasser ist somit kleiner und verbunden mit einer verringerten Adsorption von Spurenstoffen.

**Kann der Rückhalt der PAK verbessert werden, sollte auch die Spurenstoffelimination zunehmen.**

Vor diesem Hintergrund wurde daher auch eine Beprobung für die Spurenstoffanalyse des Pilotfilters durchgeführt. Folgende Abbildung zeigt das Ergebnis bezüglich der Elimination der Spurenstoffe beim Pilotfilter im Vergleich zur grosstechnischen Anwendung 2008.

Es zeigt sich bei gleicher PAK-Dosierung von 15 mgPAK/L eine deutliche Steigerung der Spurenstoffelimination bei gleichzeitig hohem Rückhalt der Feststoffe bzw. der Aktivkohle im Filter. Trotz höherer Filtergeschwindigkeit finden sich im Ablauf des Pilotfilters nur zwischen 2 und 3 mgAFS/L, so dass gesamthaft mehr PAK im Filtermedium des Sandfilters innerhalb des Rückspülintervalls verbleibt und am Adsorptionsprozess mit dem vorbei fliessendem Wassers beteiligt ist. Hieraus ergibt sich die deutlich verbesserte Spurenstoffelimination.



**Abbildung 16: Spurenstoffelimination bei Dosierung von 15mgPAK/L in der volltechnischen Anwendung Ara Kloten/Opfikon und in den Pilotuntersuchungen in 2009 (DOC im Zulauf zur Sandfiltration Kloten/Opfikon 4 - 6 mgDOC/L bzw. im Zulauf der Sandfiltration Versuchshalle Eawag 6.4 mgDOC/L)**

## 5. Volltechnische Untersuchungen Kläranlage Kloten/Opfikon

### 5.1 Spurenstoffelimination

Die Elimination der Spurenstoffe konnte gegenüber der Teststellung 2008 deutlich gesteigert werden. Grund hierfür ist der bereits genannte effiziente Rückhalt der PAK im Filter, so dass bis zur nächsten Rückspülung mehr PAK in Kontakt mit dem vorbei fließenden Abwasser ist. Aufgrund der Rückführung des Filterschlammes ergibt sich zudem der Vorteil des Gegenstromprinzips, die eine höhere Beladung aufgrund des Konzentrationsgefälles zwischen teilbeladener PAK und Abwasser zulässt.

Abbildung 17 zeigt die Elimination der Filter bezogen auf den Ablauf der Nachklärung der Strasse Süd mit PAK-Behandlung im Vergleich zur Referenzstrasse Nord. Die Auswertung erfolgte frachtbezogen.

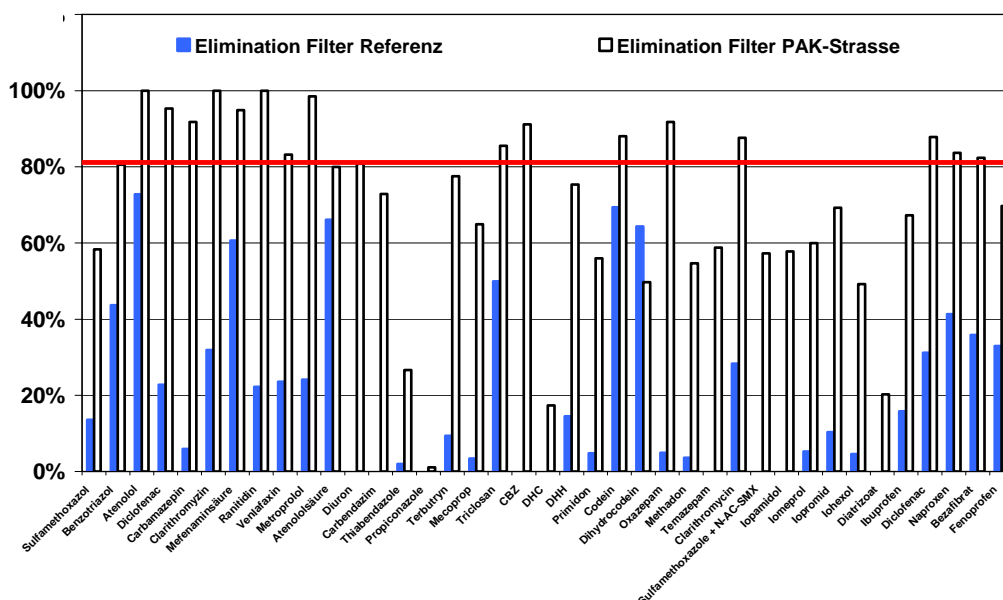
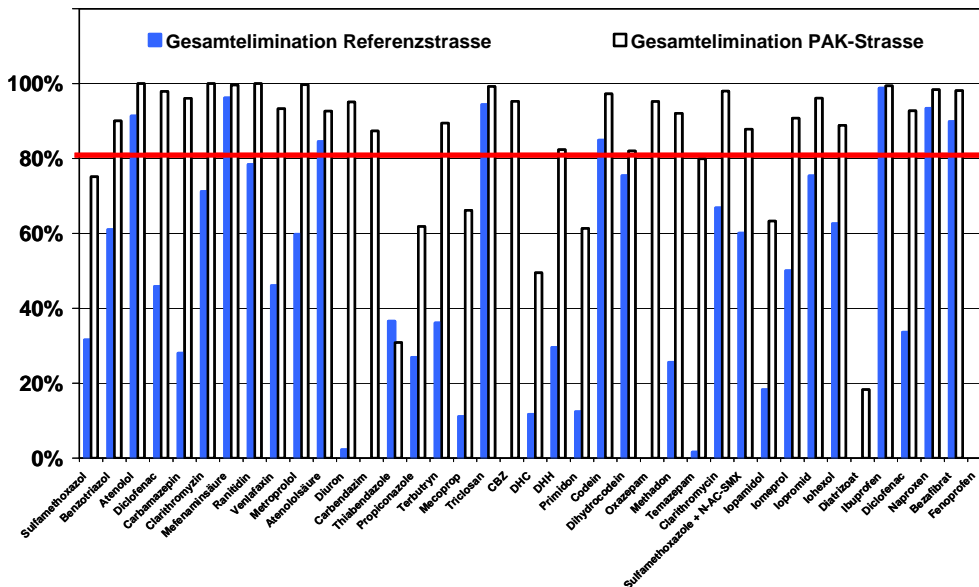


Abbildung 17 Relative Elimination von Spurenstoffen bei Dosierung von 15mgPAK/l in den Zulauf zur Sandfiltration bezogen auf den Ablauf der Nachklärung

Bereits hier zeigt sich für viele Einzelsubstanzen eine gute bis sehr gute Elimination. Für einige Stoffe wie Röntgenkontrastmittel oder das Antibiotikum Sulfamethoxazol zeigen sich aber auch Eliminationen von maximal 60%. **Im Mittel werden in der Filtration mit PAK-Dosierung rd. 71% der Spurenstoffe eliminiert, wobei es deutliche spezifische Unterschiede bei den Einzelsubstanzen gibt.**

Abbildung 18 zeigt die Gesamtelimination bezogen auf den Zulauf zur Biologie (Ablauf Vorklämung). **Die Elimination beträgt für die meisten Stoffe >80% oder mehr und genügt somit dem Vorschlag für eine Anpassung der Schweizer Gewässerschutzverordnung zur gewünschten nachhaltigen Reduktion der**

**Spurenstofffrachten in die Gewässer. Im Mittel sind es 85% bezogen auf alle betrachteten Stoffe.**



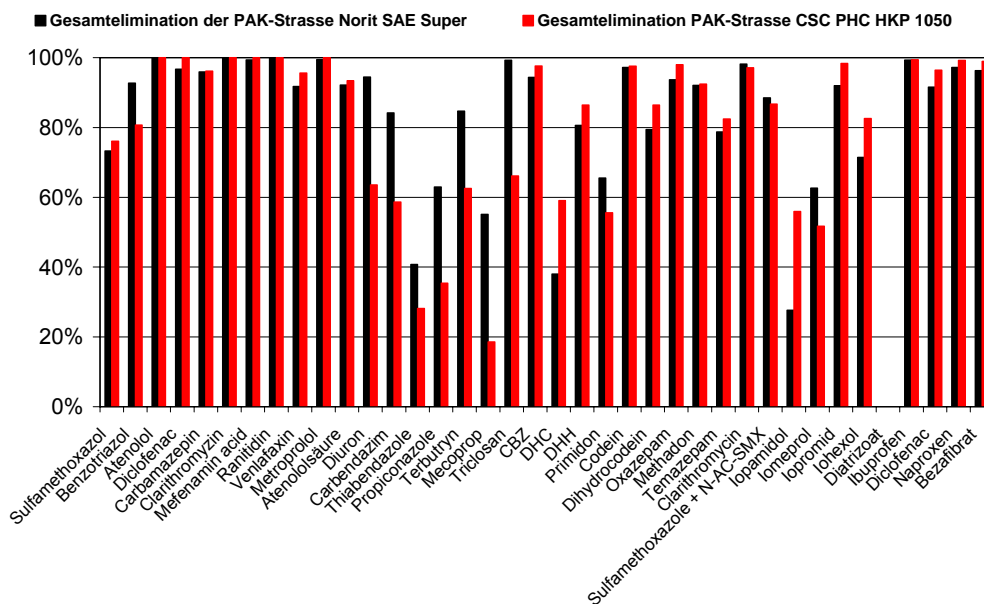
**Abbildung 18** Relative Gesamt-Elimination von Spurenstoffen bei Dosierung von 15mgPAK/l in den Zulauf zur Sandfiltration bezogen auf den Zulauf zur Biologie (Ablauf Vorklärung)

### 5.2 Spurenstoffelimination im Vergleich

In den 9 Wochen der PAK-Dosierung wurden zwei unterschiedliche Pulveraktivkohlen eingesetzt. **In den ersten 7 Wochen wurde das Produkt SAE Super von Norit verwendet.** Dieses Produkt wird bisher am meisten für die Spurenstoffelimination aus Abwasser eingesetzt und besteht aus einem Gemisch aus organischen Rohstoffen und anderer Stoffe (fossile Kohlen). Die genaue Zusammensetzung ist nicht bekannt. In der letzten Woche wurde ein Produkt von der Firma CSC eingesetzt, welches gänzlich auf Holzkohle als Ausgangsrohkohle basiert (Typ CSC PHC HKP 1050).

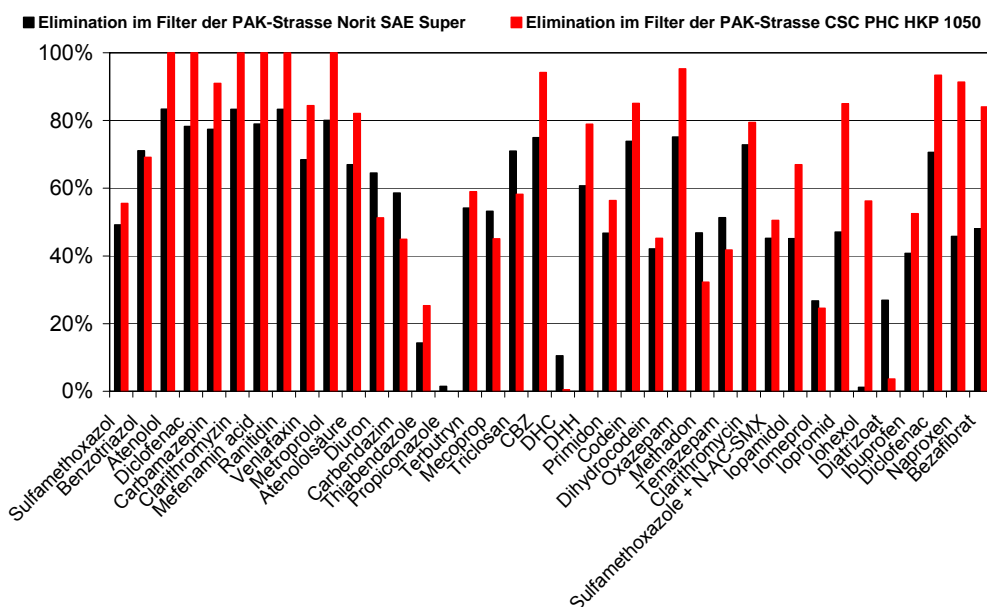
Die zweite Kohle wurde in einem Batch-Test mit verschiedenen Kohlen evaluiert (Böhler, 2010).

Nachfolgend die Gesamt-Eliminationsleistung der zwei unterschiedlichen Kohlen im zweistufigen System, die Eliminationsleistung bezieht sich auf den Ablauf der Vorklärung.



**Abbildung 19 Vergleich der Eliminationsleistung der zwei eingesetzten Aktivkohlen in der gesamten PAK-Strasse (Bezug Ablauf Vorklärung)**

Die Eliminationsleistungen sind im Wesentlichen vergleichbar. Die Aktivkohle der Firma CSC schneidet bei einigen wenigen Stoffen vergleichsweise geringer ab. Grund hierfür könnte sein, dass nach dem siebenwöchigen Einsatz der Norit-Kohle eine Woche pausiert wurde, und so der PAK-Gehalt in der Biologie ohne Rückführung verringert wurde. Dennoch verbleibt eine gewisse Eliminationsleistung der Biologie.



**Abbildung 20 Vergleich der Eliminationsleistung der zwei eingesetzten Aktivkohlen in der Filtration der PAK-Strasse (Bezug Ablauf Nachklärung)**

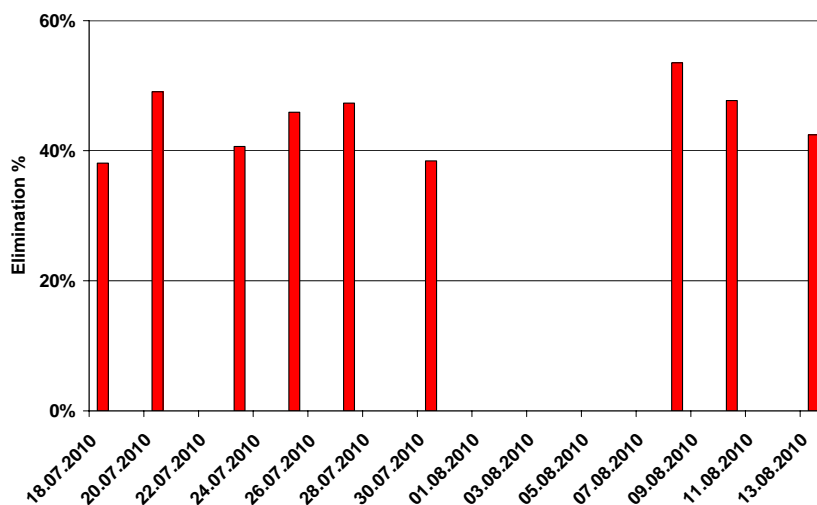


Somit ist auch die gezeigte Eliminationsleistung der PHC HK 1050 nicht völlig korrekt, da diese einen Anteil Leistung der noch in der Biologie befindlichen Norit beinhaltet.

Die Abbildung 20 zeigt die Elimination in der Filtration der betrachteten Kohlen. Hier zeigt sich wie bereits im Batch-Test eine bessere Leistung des Produktes PHC HK 1050. Im Schnitt ist die PAK etwa 10% höher in seiner Elimination. Es zeigen sich auch hier aber spezifische Unterschiede bei den Einzelstoffen.

### 5.3 DOC-Entfernung

Im Zuge der Spurenstoffelimination ergibt sich auch eine deutliche Reduktion der gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen (DOC). Die durchschnittliche DOC-Konzentration im Ablauf Nachklärung der Referenzstrasse ohne Kohlebehandlung betrug im Mittel 5.6 mgDOC/L. Dem gegenüber steht eine reduzierte DOC-Konzentration im Ablauf der Filtration der Strasse Süd von im Mittel 3.1 mgDOC/L. Die 45%-tige Reduktion des DOC ist im Vergleich zu anderen getesteten Verfahrensvarianten als hoch zu betrachten. Eine in etwa gleich hohe Elimination zeigte sich nur bei der Behandlung des Ablaufes der Nachklärung in einem nachgeschalteten Adsorptionsreaktor mit Sedimentation bei einer Dosierung von ebenfalls 15mgPAK/l mit Rückführung der Überschussskohle in die Biologie. In Zusammenhang mit einer allfälligen Abwasserabgabe ist diese zusätzliche Elimination von grosser Bedeutung, da die Abgabe für die CSB-Frachten hierdurch deutlich reduziert würde.



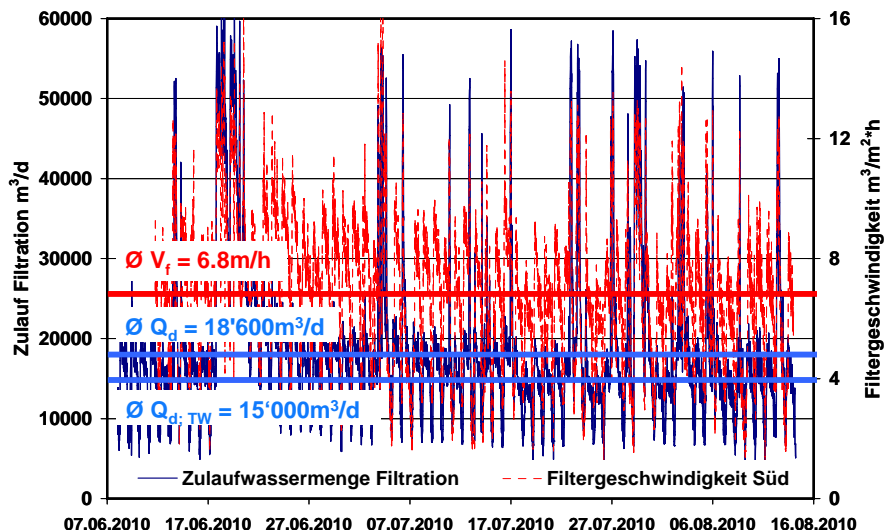
**Abbildung 21** Prozentuale Reduktion des DOC im Ablauf der Filtration der Strasse Süd in den letzten 4 Wochen der Dosierkampagne. Die Ergebnisse der letzten Dosierwoche wurden mit der PAK CSC Typ PHC HKP 1050

## 5.4 Feststoffrückhalt in der Filtration

Zentrale Fragestellung im Projekt war das Rückhaltevermögen der Filtration, da befürchtet werden musste, dass die sehr feine PAK (D50 = 15µm) die Filterpackung bei hohen Filtergeschwindigkeiten (Regenereignisse) und Feststoffbelastungen passieren würde.

In der erneuten grosstechnischen Teststellung 2010 wurde der gesamte Ablauf der Nachklärung über die Filtration geleitet. Innerhalb der 9-wöchigen Dosierkampagne konnten somit sehr unterschiedliche Zulaufsituationen für die Filtration studiert werden.

Neben der Tagesdynamik, bei der die Filtergeschwindigkeit zwischen 4 und rd. 9m/h variieren kann (vgl. Abbildung 7), wurden im Zeitraum der Teststellung durch Regenereignisse kurzfristig sehr hohe Filtergeschwindigkeiten bis 16 m/h mit hoher Dynamik beobachtet. Abbildung 22 zeigt die Zulaufwassermenge zur Filtration und die daraus resultierenden Filtergeschwindigkeiten in der Teststellung.

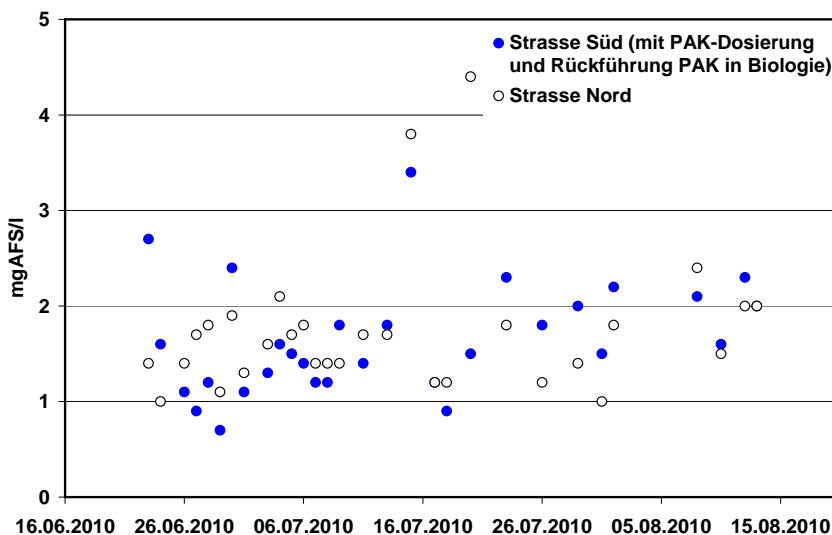


**Abbildung 22: Zulaufverhältnisse zur Filtration im Zeitraum der PAK-Dosierung (9 Wochen). Durch starke Sommergewitter ergibt sich eine sehr hohe Dynamik im Zulauf mit zum Teil sehr hohen Filtergeschwindigkeiten von bis zu kurzfristig 16m/h**

Durchschnittlich wurden rd. 9'000 m<sup>3</sup> Abwasser je Strasse behandelt, wobei wie bereits aufgeführt die PAK-Dosierung in die Strasse Süd auf die Trockenwetterwassermenge von 7'500 m<sup>3</sup>/d fixiert wurde.

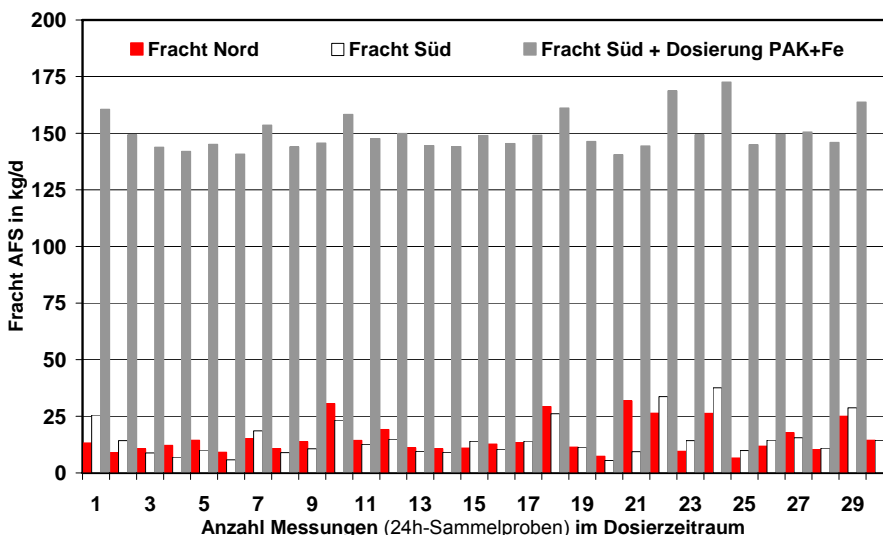
Neben der Filtergeschwindigkeit ist auch die Feststofffracht massgeblich für die Leistungsfähigkeit der Filtration. Nachstehendes Diagramm zeigt den Suspensaabtrieb der Nachklärungen der Strasse Süd und Nord, welche vergleichbar hoch sind. Mit Ablaufwerten zwischen 1bis 3 mgAFS/L ist der Abtrieb vergleichsweise gering bzw. die Trennleistung sehr hoch. Bei einer Lauflänge von 24 Stunden der Filter resultiert hieraus eine geringe Fracht (Abbildung 24) für die Filtration. Auffällig ist, dass trotz der Rückführung der zurückgehaltenen Feststoffe sich der Abtrieb aus der Nachklärung

nicht erhöhte. Das rückgeführte Feinmaterial scheint in die Biomasse der Belebung gut eingebunden zu werden.



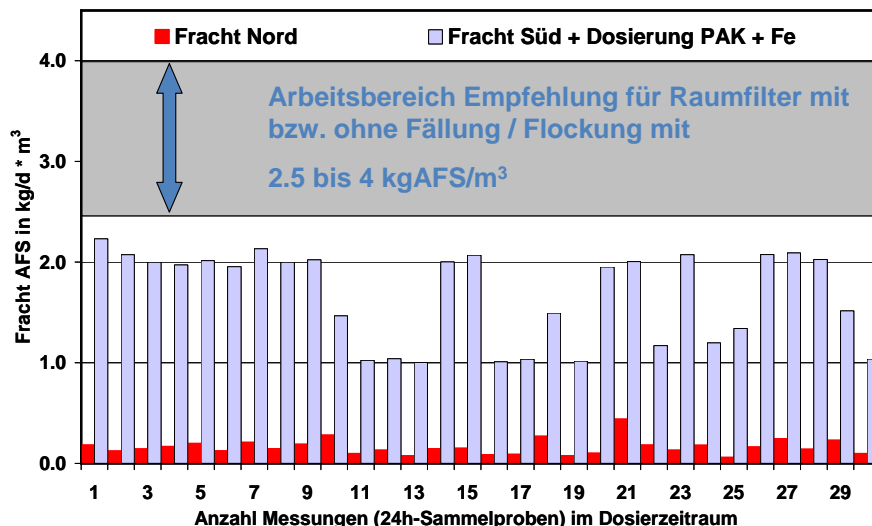
**Abbildung 23: Schlammabtrieb der Nachklärung der Kläranlage Kloten/Opfikon. Trotz Rückführung der PAK und der in der Filtration abgetrennten Suspensa in die Biologie ergeben sich keine erhöhten Abtriebe für die Nachklärung Süd**

Abbildung 24 zeigt die tägliche absolute Fracht zur Filtration (Lauflänge 24h). Die Zulauf fracht aus Abtrieb ist für beide Strassen in der Höhe vergleichbar. Die dritte Kolonne zeigt die Gesamtfracht aus Suspensaabtrieb und den Dosierungen für die Strasse Süd und verdeutlicht die enorme Mehrfracht, die sich mehr als verzehnfacht.



**Abbildung 24: Absolute Feststofffracht zur Filtration Süd und Nord bei einer Filterlauflänge von 24h. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen PAK und Fe-Dosierung ergibt sich für Strasse Süd eine mehr als Verzehnfachung der Beladung des Filters bedingt durch den geringen Suspensaabtrieb der Nachklärungen**

Unter Berücksichtigung der Anzahl täglich betriebener Filter und deren Packungsvolumen ergeben sich folgende spezifische AFS-Beladungen der Filter (Abbildung 25), welche sich auf das Volumen der Filterpackung bezieht.



**Abbildung 25: Spezifische Feststoffbeladung der Filter der Strasse Süd und der Referenzstrasse Nord (ohne Kohledosierung)**

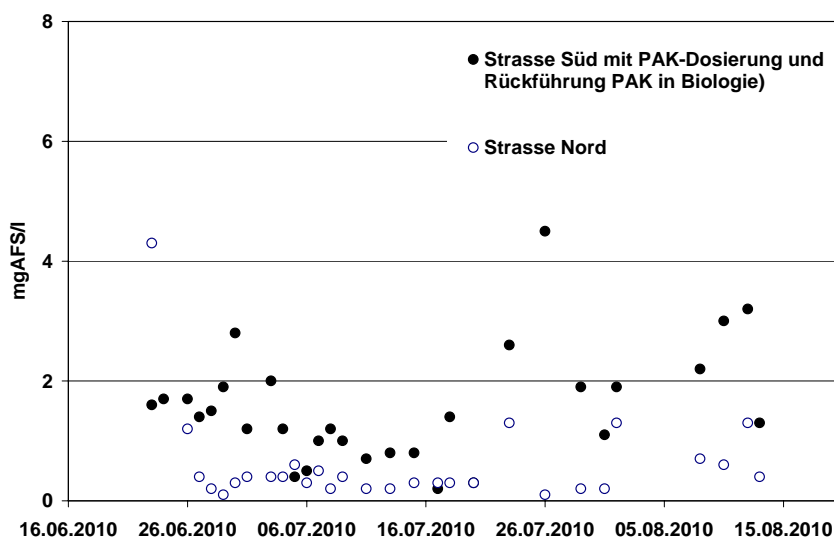
Hier zeigt sich, dass die Filtration unter den betrieblichen Randbedingungen der Teststellung weit unter der möglichen Belastung lag. Trotz zusätzlicher Beladung aus der PAK-Behandlung ergeben sich gerade spezifische Raumbelastungen knapp unter der empfohlenen Beladung von 2.5kgAFS/m<sup>3</sup> für die klassische Flockungsfiltration mit Fällung und Flockung für die weitergehende Phosphorelimination.

Unter Berücksichtigung eines praktisch möglichen höheren Suspensaabtriebes von bis 10mgAFS/l aus der Nachklärung würden sich dann Raumbelastungen von rd. 3kg/m<sup>3</sup> ergeben.

In den halbtechnischen Versuchen an der Eawag wurden auch Filterlaufzeiten von bis 48h getestet. Hier ergaben sich entsprechend hohe Raumbelastungen > 3 kgAFS/m<sup>3</sup> (vgl. Tabelle 2, wobei ein hinreichender Rückhalt der Feststoffe mit Ablaufwerten unter 5 mgAFS/l zu beobachten waren. Ein Filterdurchbruch mit hohen Feststoffverlusten wurde bei allen Pilotversuchen nie beobachtet.

In diesem Zusammenhang ist zudem von Bedeutung, dass die bei der klassischen Flockungsfiltration notwendige Dosierung von Fällungschemikalien zum Zulauf einer Filtrationsstufe deutlich unterschiedliche Feststoffeigenschaften generiert, die bei der Bemessung von Filteranlagen zu berücksichtigen sind. Die in einer der Filtration vorgeschalteten Misch- und Flockungsstufe neu gebildete Partikelagglomerate sind gegenüber den im Abwasser vorhandenen Partikeln (Suspensa) voluminös und leicht abscherbar. Sie führen in der Filtermasse zu hohen Druckverlusten und können bei unsorgfältiger Flockung oder hohen Filtergeschwindigkeiten leicht ausgewaschen werden.

Wir gehen davon aus, dass auch bei höherem Abtrieb aus der Nachklärung und gleichen Dosierverhältnissen ein gesicherter Rückhalt der PAK gewährleistet ist. Dies insbesondere vor dem Hintergrund der genannten verbleibenden Dimensionierungsreserven für Raumfiltrationen ohne und mit Fällung. Auch verbleibt die Option ggf. Spülintervalle zu verkürzen (Laufzeitverkürzung) oder bei sehr hohen Filtergeschwindigkeiten bei Starkregenereignissen die Dosierungen einzustellen, da keine akute Gefährdung durch Spurenstoffe im Gewässers besteht.



**Abbildung 26: Abfiltrierbare Stoffe im Ablauf der Filtration. In Strasse Nord gelingt nahezu der vollständige Feststoffrückhalt bis zur Nachweisgrenze. In der Strasse Süd mit PAK-Behandlung erhöhen sich die Ablaufwerte um rd. 2 mgAFS/l, liegen aber immer noch deutlich unterhalb des Grenzwertes von 5 mgAFS/l**

Bild 14 zeigt die Feststoffkonzentrationen im Ablauf der Filtration. Beide Strassen Süd und Nord erreichen einen sehr guten Rückhalt der Feststoffe, wobei die Strasse Süd mit Kohledosierung leicht erhöhte Werte aufzeigt, aber dennoch weit unter dem Einleitwert von 5mgAFS/l verbleibt.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass mit der optimierten Prozessführung die Flockungsfiltration der Kläranlage Kloten/Opfikon einen guten bis sehr guten Rückhalt der dosierten Kohle vollzieht und Leistungsreserven aufweist.

### 5.5 Betriebliche Auswirkungen

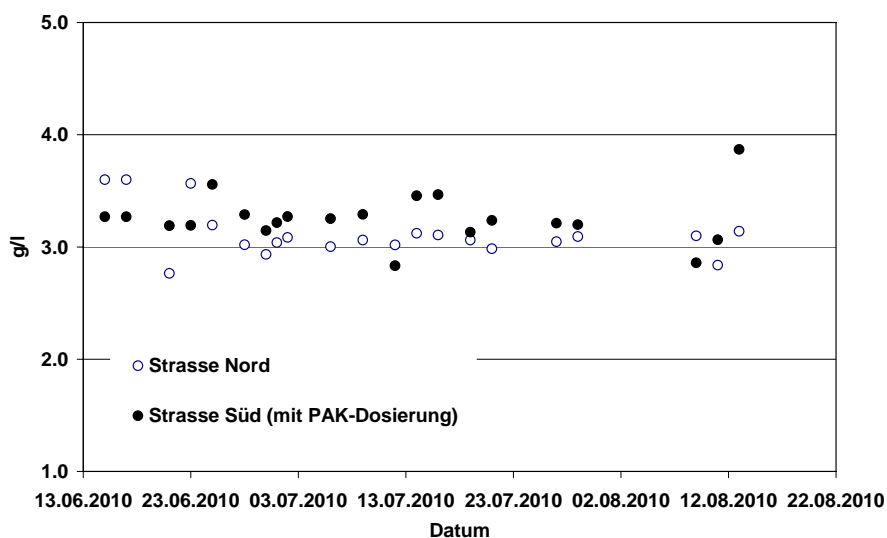
Im Zeitraum der Dosierung liessen sich keine wesentlichen Auswirkungen der PAK-Dosierung bzw. der Rückführung der PAK in die Biologie feststellen.

Abbildung 27 zeigt den Effekt der Rückführung des Schlamm- bzw. Rückspülwassers aus der Filtration in die Biologie. Nach etwa 2 bis 3 Schlammaltern färbte sich die Biologie zunehmend schwarz.



**Abbildung 27** Das rechte Bild zeigt ein Belebungsbecken der Strasse Süd (mit PAK-Behandlung), deutlich ist der durch die Rückführung des Spülwassers aus der Filtration Süd schwarz eingefärbte Belebtschlamm im Gegensatz zur braunen Biologie Nord zu erkennen

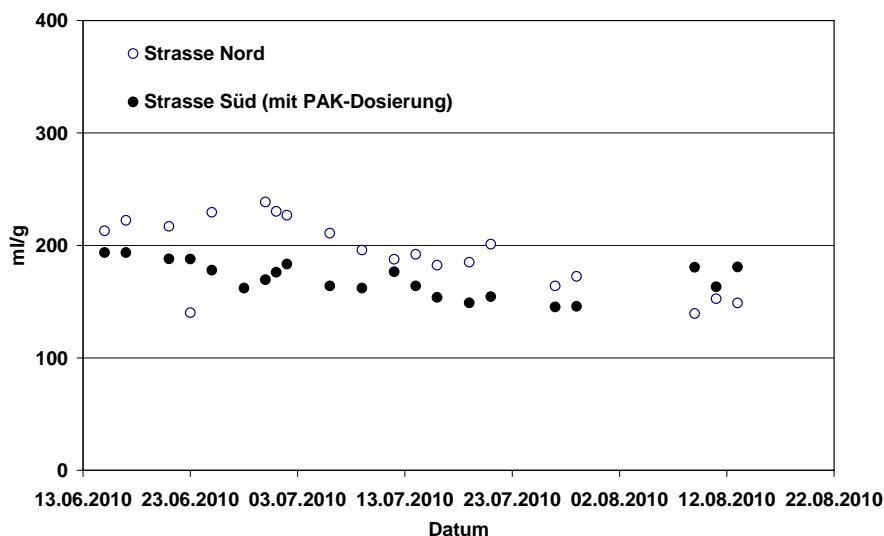
Durch die Rückführung der PAK in die Biologie erhöhte sich der Schlammgehalt in der Biologie Süd leicht (Abbildung 28.)



**Abbildung 28** TS-Gehalte in den Biologien der Strasse Süd und Nord

Ein vermuteter positiver Einfluss der PAK auf die Absetzeigenschaften konnte nicht eindeutig aus den Versuchen abgeleitet werden.

Insgesamt sank der Schlammindex von rd. 200 ml/gTS im Zeitraum der Dosierung auf rd. 150ml/gTS für beide Strassen (vgl. Abbildung 29).



**Abbildung 29** Schlammindezes für Strasse Süd und Nord während der 9 wöchigen PAK-Dosierung mit Rückführung des Schlammrückspülwassers in die Biologie Süd

Die Nährstoffelimination in der Biologie wurde durch die PAK nicht beeinflusst. Nitrifikation und Denitrifikation waren in beiden Strassen gleich. Es wurde keine Hemmung der Nitrifikation durch erhöhte Ammonium oder Nitritablaufwerte beobachtet.

Der Ablauf der Filtration Süd war im Gegensatz zum Ablauf der Strasse Nord glasklar, da eine Entfärbung durch die eingesetzte PAK erfolgte.

## 6 Danksagung

Das hier vorgestellte Projekt wurde nicht durch das nationale MicroPoll-Projekt finanziert, sondern wurde gänzlich durch Dritte namentlich der Umweltämter der Kantone Aargau, Basel-Landschaft, Schwyz, Zürich, Solothurn, Schaffhausen und Thurgau, der Kläranlagen Kloten/Opfikon und Werdhölzli (Entsorgung und Recycling Zürich), dem Ingenieurbüro TBF - Planer und Ingenieure (Zürich), dem Anlagenbauer WABAG Winterthur AG, der Firma Ystrahl GmbH (Mesh AG, CH) sowie der Kohlelieferanten Norit (Dolder AG, CH) und CSC GmbH (Carbon Service und Consult) unterstützt.

Diesen Partnern gilt aufgrund ihrer grosszügigen Unterstützung grossen Dank sowie allen Mitarbeitern der Eawag aus den Abteilungen Verfahrenstechnik und Umweltchemie, die zum positiven Gelingen des Projektes beigetragen haben. Dank auch Prof. Dr. Markus Boller für die wertvollen Tipps im Themengebiet. Auch gilt unser Dank der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz für die speditive Übernahme eines Teils der Analytik.

## 7 Literatur

- [DWA, 1995] ABWASSERFILTRATION DURCH RAUMFILTER NACH BIOLOGISCHER REINIGUNG, ATV-REGELWERK - ARBEITSBLATT A 203, DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT E.V. (HRGS.).
- [DWA, 2009] ERFAHRUNGEN ZUM BETRIEB VON ABWASSERFILTERANLAGEN, DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT E.V. (HRGS.), DWA-THEMENHEFT.
- [BARJENBRUCH, M., 1997] LEISTUNGSFÄHIGKEIT UND KOSTEN VON FILTERN IN DER ABWASSERREINIGUNG, SCHRIFTENREIHE 97, INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT UND ABFALLTECHNIK, UNIVERSITÄT HANNOVER, 1997.
- [BARJENBRUCH, M., 2007] VERFAHREN ZUR ABWASSERFILTRATION - GRUNDLAGEN, AUSLEGUNG UND BETRIEBSERFAHRUNGEN, BEITRAG IN CHEMIE INGENIEUR TECHNIK 2007, 79, NO 11.
- [BOEHLER, M. ET AL., 2009]: AKTIVKOHLEDOSIERUNG IN DEN ZULAUF ZUR SANDFILTRATION KLÄRANLAGE KLOTEN/OPFIKON, ZWISCHENBERICHT, ERGÄNZENDE UNTERSUCHUNG ZUM MICRO POLL- PROJEKT; EAWAG, DÜBENDORF (SCHWEIZ), ABRUFBAR UNTER: [WWW.EAWAG.CH/ORGANISATION/ABTEILUNGEN/ENG/SCHWERPUNKTE/ABWASSER/AKTIVKOHLE/INDEX](http://WWW.EAWAG.CH/ORGANISATION/ABTEILUNGEN/ENG/SCHWERPUNKTE/ABWASSER/AKTIVKOHLE/INDEX).
- [BOEHLER, M., 2010] INTERNER BERICHT, UNVERÖFFENTLICHT, EAWAG, DÜBENDORF (SCHWEIZ).
- [BOEHLER, M., ZWICKENPFLUG, B., GRASSI, M., BEHL, M., HOLLENDER, J, TERNES, T., DORUSCH, F., FINK, G., LIEBI, C., JOSS, A. AND SIEGRIST, H., 2011A] PAC ADDITION FOR MICROPOLLUTANTS REMOVAL IN MUNICIPIAL WASTEWATER - PROMISING FLOW SCHEMES, MANUSKRIFT EINGEREICHT UND AKZEPTIERT ZUR PRÄSENTATION AUF DER IWA MICROPOL & ECOHAZARD KONFERENZ (11-13 JULI 2011 SYDNEY, AUSTRALIA).
- [BOEHLER, M., ZWICKENPFLUG, B., GRASSI, M., BEHL, M., HOLLENDER, J, TERNES, T., DORUSCH, F., FINK, G., LIEBI, C., JOSS, A. AND SIEGRIST, H., 2011B] MICROPOLLUTANT REMOVAL BY POWDER ACTIVATED CARBON ADDITION TO SAND FILTRATION, MANUSKRIFT EINGEREICHT UND AKZEPTIERT ZUR PRÄSENTATION AUF DER IWA LEADING-EDGE TECHNOLOGIES KONFERENZ , 6-10 JUNI 2011, AMSTERDAM, THE NETHERLANDS.
- [BOEHLER, M., ZWICKENPFLUG, B., GRASSI, M., BEHL, M., HOLLENDER, J, TERNES, T., DORUSCH, F., FINK, G., LIEBI, C., JOSS, A. AND SIEGRIST, H., 2011C] PAC ADDITION FOR MICROPOLLUTANTS REMOVAL IN MUNICIPIAL WASTEWATER - PROMISING FLOW SCHEMES, MANUSKRIFT EINGEREICHT UND AKZEPTIERT ZUR PRÄSENTATION AUF DER IWA SPECIALIZED KONFERENZ ON DESIGN, OPERATION AND ECONOMICS OF LARGE WASTE WATER TREATMENT PLANTS, 4-8 SEPTEMBER 2011 BUDAPEST, HUNGARY.
- [BOLLER, M., 1980] FLOCKUNGSFILTRATION ZUR REINIGUNG VON ABWASSER - VERFAHRENS-TECHNISCHE OPTIMIERUNG ZUR ELIMINATION VON PHOSPHOR UND SUSPENDIERTEN STOFFEN, DISSERTATION DER ETH ZÜRICH, DISS. ETH NR. 6748, ZÜRICH 1980.
- [STERKELE, B., GUJER, W. 2009] EINSATZ VON PAK ZUR ELIMINATION VON MIKROVERUNREINIGUNGEN AUS DEM ABWASSER, 2. ZWISCHENBERICHT, STUDIE EAWAG IM AUFTRAG DES BAFU, DÜBENDORF. VERFÜGBAR UNTER:



[http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/eng/schwerpunkte/abwasser/strategie\\_micropoll/pak\\_eawag/zwischenbericht2\\_bafu.pdf](http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/eng/schwerpunkte/abwasser/strategie_micropoll/pak_eawag/zwischenbericht2_bafu.pdf)

[TERNES, T.A. UND JOSS, A. 2006] HUMAN PHARMACEUTICALS, HORMONES AND FRAGRANCES - THE CHALLENGE OF MICROPOLLUTANTS IN URBAN WATER MANAGEMENT. IWA PUBLISHING. ISBN: 9781843390930

[WISTUBA, E. AND MARKIEL, W. 2004]: AKTIVKOHLE IN DER SCHWIMM- UND BADEBECKENWASSERAUFBEREITUNG: QUALITÄTSKRITERIEN – ODER WAS IST BEI AKTIVKOHLE ZU BEACHTEN. VERFÜGBAR UNTER [HTTP://WWW.ETC-GMBH.DE/PDF/QUALITAETSKRITERIEN.PDF](http://www.etc-gmbh.de/pdf/qualitaetskriterien.pdf)

[ZWICKENPFLUG, B.; BOEHLER, M. 2009] EINSATZ VON PULVERAKTIVKOHLE ZUR ELIMINATION VON MIKROVERUNREINIGUNGEN AUS KOMMUNALEM ABWASSER; 3. ZWISCHENBERICHT, STUDIE EAWAG IM AUFTRAG DES BAFU, DÜBENDORF. VERFÜGBAR UNTER:  
[http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/eng/schwerpunkte/abwasser/strategie\\_micropoll/pak\\_eawag/zwischenbericht3.pdf](http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/eng/schwerpunkte/abwasser/strategie_micropoll/pak_eawag/zwischenbericht3.pdf)