

PAK-STUFE ARA HERISAU

ERSTE GROSSTECHNISCHE UMSETZUNG EINER PAK-STUFE IN DER SCHWEIZ – ERFahrungen NACH EINEM JAHR

Im Juni 2015 wurde auf der ARA Bachwis der Gemeinde Herisau AR die in der Schweiz erste Anlage mit Pulveraktivkohle (PAK) zur weitergehenden Abwasserreinigung in Betrieb genommen. Das erste Betriebsjahr zeigt, dass die ehrgeizigen Ziele zur Elimination der Mikroverunreinigungen (MV) und zur verbesserten Elimination des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) mit der neuen PAK-Stufe erreicht werden können. Dies äussert sich bereits heute in einem besseren Zustand des sensiblen Vorfluters.

Hanspeter Zöllig, VSA, Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»*

Hanspeter Butz, Gemeinde Herisau, Fachstelle Gewässerschutz; Stephan Fischer, Eawag, Abteilung Umwelttoxikologie

Hansruedi Messmer, Gemeinde Herisau, ARA Bachwis; Steffen Zuleeg, Kuster + Hager AG; Priska Eberhard, ARACOM Software GmbH

RÉSUMÉ

EXPÉRIENCES ACQUISES DURANT LA 1^{ÈRE} ANNÉE DE LA PREMIÈRE MISE EN ŒUVRE DE GRANDE ENVERGURE D'UNE ÉTAPE CAP EN SUISSE (HERISAU)

Cet article présente une synthèse des aspects les plus importants de la première mise en œuvre de grande envergure d'une étape CAP en Suisse. Après une phase de planification d'environ trois ans et une phase de construction de deux ans, l'étape CAP, mise en place dans le procédé de traitement d'Ulm, a été introduite avec succès dans la STEP d'Herisau en juin 2015. Au début, il n'y a eu que quelques engorgements dans la trémie d'incorporation du dispositif de dosage de CAP et, au bout d'un an, les tuyaux de dosage étaient bouchés. Ce phénomène doit être évité à l'avenir par un nettoyage régulier des tuyaux. Durant la première année d'exploitation, dans 11 campagnes de mesures sur 12, plus de 80% des micropolluants ont pu être éliminés, ce qui est très positif et permet de satisfaire aux dispositions légales. Toutefois, les éliminations mesurées des différents marqueurs ont en partie présenté des fluctuations considérables d'une campagne de mesure à l'autre. De plus, cette nouvelle étape CAP a permis de diviser quasiment par deux la concentration de substances organiques dans l'effluent de la STEP. Depuis la mise en service de l'étape CAP, les phénomènes de formation de mousse et de décoloration, qui survenaient souvent auparavant dans le milieu récepteur de la Glatt et étaient dus

EINLEITUNG

Am 1. Januar 2016 trat in der Schweiz die neue Gesetzgebung zum Gewässerschutz in Kraft (GSchG [1] und GSchV [2]). Diese verlangt die Elimination von organischen Spurenstoffen (oder Mikroverunreinigungen [MV]) aus kommunalem Abwasser in ausgewählten und von den Kantonen bezeichneten Abwasserreinigungsanlagen (ARA).

Im Moment gibt es mit der Ozonung und der Adsorption an Pulveraktivkohle (PAK) zwei etablierte und gleichwertige Technologien für die Elimination von MV aus kommunalem Abwasser. Die Ozonung wurde auf der ARA Neugut zum ersten Mal gross technisch realisiert [3]. Allerdings ist bei ungünstiger Abwasserzusammensetzung mit der Ozonung Vorsicht geboten [4]. Der Einsatz von PAK ist dagegen bei jeder Abwasserzusammensetzung möglich und wird in Baden-Württemberg seit Längerem zur weitergehenden Elimination von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) eingesetzt [5].

Es gibt verschiedene Verfahren, wie PAK auf der ARA eingesetzt werden kann (www.micropoll.ch). Beim klassischen, sogenannten «Ulmer Verfahren», wird die PAK in separate Kontaktreaktoren dosiert und in einer nachgeschalteten Sedimentation

* Kontakt: hanspeter.zoellig@vsa.ch

abgetrennt. Auf der ARA Bachwis der Gemeinde Herisau AR wurde zum ersten Mal in der Schweiz ein «Ulmer Verfahren» grosstechnisch realisiert. In diesem Artikel werden die wichtigsten Erkenntnisse aus diesem Projekt von der Planung bis und mit dem ersten Betriebsjahr zusammengefasst.

AUSGANGSLAGE

Die ARA Herisau behandelt das Abwasser von 34 000 Einwohnerwerten (EW) inklusive dem Abwasser einer bedeutenden Textilindustrie und ist auf eine maximale hydraulische Belastung von 26 800 m³·d⁻¹ (310 l·s⁻¹) ausgelegt. Das Verfahrensschema der ARA mit der neuen PAK-Stufe ist in *Figur 1A* dargestellt. Vor dem Ausbau bestand die ARA aus einer Rechenanlage, einem Öl- und Sandfang, einer Hochlastbiologie zur Elimination der organischen Stoffe, einer nachgeschalteten Schwach-

lastbiologie für die Nitrifikation sowie einer abschliessenden Sandfiltration. Das gereinigte Abwasser wird dem Vorfluter Glatt zugeführt. Die Glatt entspringt bei Schwellbrunn AR und mündet nach 25 km bei Oberbüren SG in die Thur. Das Q₃₄₇ der Glatt bei Herisau beträgt bescheidene 140 l·s⁻¹, was zu einem teilweise schlechten Verdünnungsverhältnis ARA-Ablauf/Glatt von bis zu 1:1 führt. Trotz der überdurchschnittlichen Reinigungsleistung der ARA Herisau wurden in der Glatt immer wieder sehr hohe DOC-Konzentrationen sowie Verfärbungen und Schaumbildung festgestellt. Der Grund dafür war Abwasser aus der Textilveredelungsindustrie, das stark mit refraktären, organischen Stoffen belastet ist und auf die ARA Herisau abgeleitet wird. Diese refraktären, organischen Stoffe lassen sich mit konventioneller Klärtechnik nur in sehr bescheidenem Umfang aus dem Abwasser entfernen.

Zudem wurden ab dem Jahr 2005 im Zuge grösser angelegter Messkampagnen in den Kantonen St. Gallen, Appenzel, Thurgau und Glarus erhebliche MV-Konzentrationen in der Glatt festgestellt [6]. Tatsächlich war die Glatt eines der am stärksten mit MV belasteten Gewässer in der Ostschweiz. Massnahmen zur Verbesserung der Situation in der Glatt waren deshalb angezeigt. Im Sinne eines gesamtheitlichen Ansatzes wurde unter Einbezug aller Interessengruppen ein Vorprojekt entwickelt. Als Bestvariante zeigte sich eine Lösung mit der Vermeidung von Belastungsspitzen im ARA-Zulauf durch zusätzliche Rückhaltmassnahmen bei der Textilindustrie (Frachtausgleich) und dem Bau einer zusätzlichen Reinigungsstufe auf der ARA Herisau. Die Anforderung an diese Reinigungsstufe war neben der Elimination von MV auch eine substantielle Reduktion der refraktären, organi-

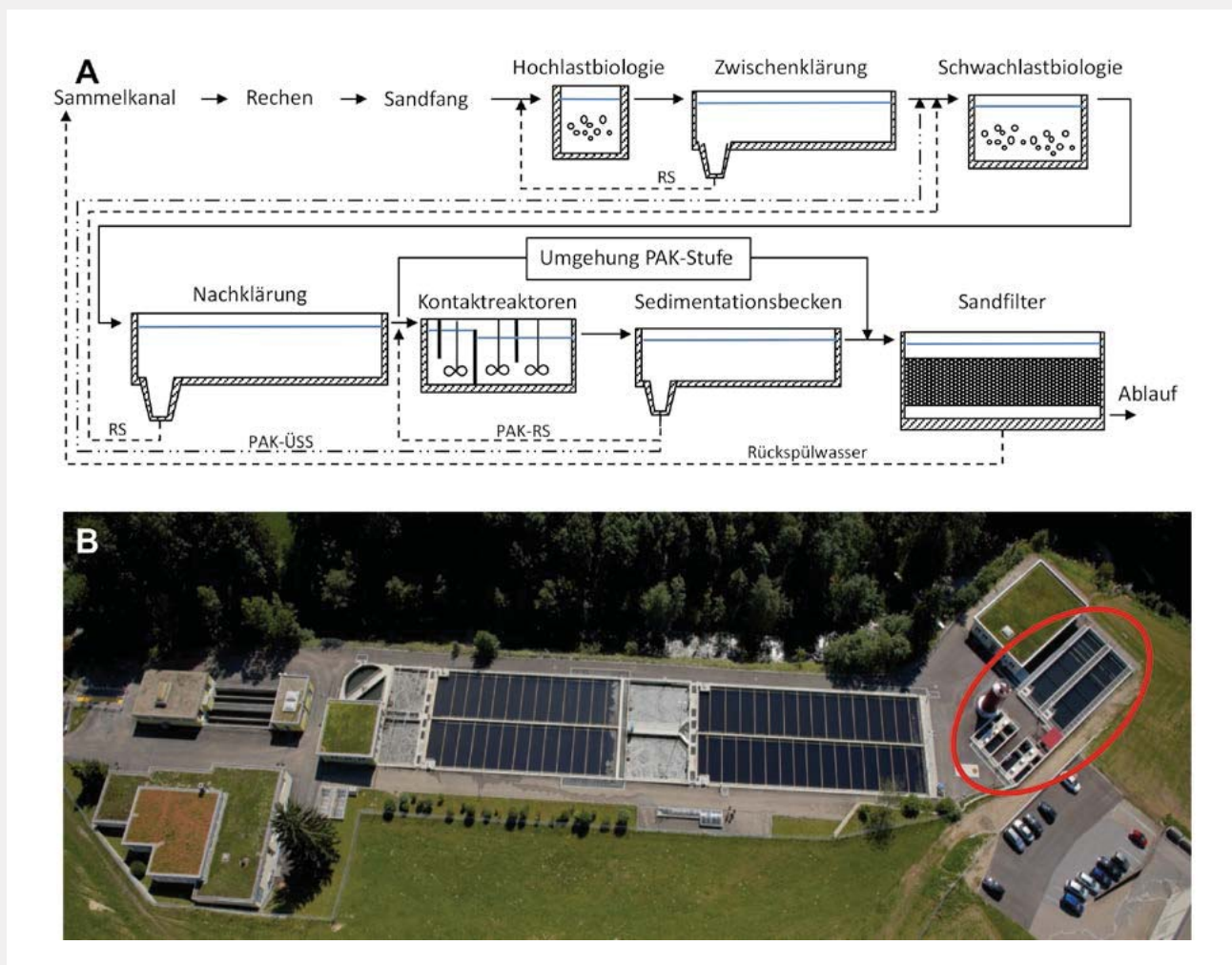


Fig. 1 A: Verfahrensschema der ARA Herisau mit neu integrierter PAK-Stufe im «Ulmer Verfahren». RS: Rücklaufschlamm, ÜSS: Überschussschlamm; B: Luftaufnahme der ARA Herisau nach dem Bau der PAK-Stufe (rot umkreist)
A: schéma de procédé de la STEP d'Herisau avec l'étape CAP nouvellement mise en place dans le procédé de traitement d'Ulm. RS: boues de recyclage, ÜSS: boues excédentaires; B: vue aérienne de la STEP d'Herisau après l'aménagement de l'étape CAP (entourée en rouge)

	alt		ab 1.1.2015	
	Konz.	Reinigungseffizienz	Konz.	Reinigungseffizienz
	[g·m ⁻³]	[%]	[g·m ⁻³]	[%]
GUS	5	–	5	–
DOC (Richtwert)	(10)	85	6	90
NH ₂ -N (T>10°C)	1	90	1	90
P _{tot}	0,8	80	0,3	90

Tab. 1 Relevante Einleitbedingungen der ARA Herisau

Principales conditions de déversement de la STEP d'Herisau

schen Substanzen aus der Textilindustrie. Eine PAK-Stufe wurde daher als das ökonomisch und ökologisch geeignetste Verfahren erachtet. Im Hinblick auf die neue Reinigungsstufe wurden die Einleitbedingungen für die ARA Herisau per 1. Januar 2015 durch den Kanton deutlich verschärft (Tab. 1).

BAU UND BETRIEB DER PAK-STUFE

AUSFÜHRUNG

Die PAK-Stufe wurde zweistrassig als «Ulmer Verfahren» umgesetzt und wird im Teilstrom mit dem Abwasser aus den Nachklärbecken (NKB) der Schwachlastbiologie beschickt. Als Standort bot sich der Platz neben der bestehenden Sandfiltration an (Fig. 1B).

Die wesentlichen Anlagenteile der PAK-Stufe sind das PAK-Silo, die Kontaktreaktoren sowie die Sedimentationsbecken. Im Silo werden Kohleverbackungen mittels Rüttelboden vermieden. Dieser dient auch zur gleichmässigen Entnahme der PAK zur Waage, wo die exakte Dosie-

rung vorgenommen wird. Die PAK wird anschliessend über einen Einspültrichter mit Brauchwasser vermischt und in den durchmischten Vorlagebehälter geführt. Von dort wird die PAK-Suspension mit Schlauchquetschpumpen (eine pro Strasse) zu den Kontaktreaktoren gepumpt. Eine dritte Pumpe wurde für die optionale PAK-Dosierung vor den Sandfiltern vorgesehen.

Die Kontaktreaktoren verfügen über eine Einmischzone, wo die PAK-Suspension ins Abwasser eingemischt wird. Anschliessend fliesst das Abwasser über eine Überfallkante aus einem ersten Reaktorkompartiment in den zweiten Reaktorteil, der mit einer Tauchwand unterteilt ist. Alle drei Reaktorkompartimente sind mit einem Vertikalrührwerk bestückt. Für die Einmischung des Fällmittels (FM) sowie des Flockungshilfsmittels (FHM, kationisch) wurde zusätzlich ein kleines Vertikalrührwerk im Ablauf der Kontaktreaktoren installiert.

Aus den Sedimentationsbecken wird das gereinigte Abwasser über Tauchrohre

abgeleitet und den acht Einschichtsandfiltern zugeführt. Die abgetrennte PAK wird zurück in die Einmischzone der Kontaktreaktoren geleitet. Die überschüssige PAK wird der Schwachlastbiologie zugeführt. Sie könnte aber auch in die Hochlastbiologie geleitet oder direkt abgezogen werden.

Für die Dimensionierung der PAK-Stufe wurde der maximale Trockenwetterzulauf (14 700 m³·d⁻¹), der in diesem Fall ziemlich genau 2 Q_{TW} entspricht, zu Grunde gelegt. Die hydraulischen Aufenthaltszeiten wurden aufgrund von Erfahrungswerten in Baden-Württemberg festgelegt. Diese sind zusammen mit den resultierenden Beckenvolumina in Tabelle 2 aufgelistet. Das PAK-Silo wurde auf 50 m³ plus 50% Reserve dimensioniert, was ungefähr zwei LKW-Ladungen (30 m³) entspricht.

Der Spatenstich für die neue PAK-Stufe erfolgte am 16. August 2013. Diesem ging eine rund dreijährige Planungsphase voraus. In kooperativer Planung zwischen Kanton, Gemeinde und Industrie wurde eine Vorfinanzierung für das Bauprojekt auf die Beine gestellt. Kanton und Gemeinde trugen je 40% und die Industrie 20% der Kosten. Nach Abschluss des Projekts finanzierte der Bund 75% der abgeltungsberechtigten Baukosten (Tab. 3). Beim eigentlichen Bau der Anlage stellte sich die Sicherung des Nordhangs der Baugrube als besonders aufwendig heraus. Der Baufortschritt wurde dadurch nur geringfügig beeinträchtigt, sodass die Anlage planmässig am 3. Juni 2015 den Betrieb aufnehmen konnte.

Anlagenteil	Volumen total	minimale Aufenthaltszeit
	[m ³]	[h]
PAK-Silo	75	–
Kontaktreaktoren	310	0,5
Sedimentationsbecken	1220	2

Tab. 2 Dimensionierung der Anlagenteile für die PAK-Stufe auf der ARA Herisau

Dimensionnement des éléments de l'installation de l'étape CAP dans la STEP d'Herisau

Kostenträger	Anteil	Betrag
	[%]	[CHF]
Bund	71	3 765 741
Gemeinde Herisau	19	1 022 175
Industrie	10	511 087
Total	100	5 299 003

Tab. 3 Finanzierung der PAK-Stufe auf der ARA Herisau inklusive Mehrwertsteuer. Der Bundesbeitrag entspricht 75% der abgeltungsberechtigten Baukosten (5 020 988 CHF)

Financement de l'étape CAP de la STEP d'Herisau, TVA comprise. La contribution de la Confédération est équivalente à 75% de frais de construction donnant droit à une indemnité (5 020 988 CHF)

EINFAHREN UND BETRIEB

Am ersten Betriebstag erfolgte das Hochfahren der Aggregate der PAK-Stufe ohne nennenswerte Probleme, sodass die Anlage sogleich in den automatischen Betrieb übergehen konnte. Für den Aufbau der gewünschten Trockensubstanz-(TS-)Konzentration von 3,5 kg·m⁻³ im Kontaktreaktor wurden im ersten Monat konstant 0,46 kg_{PAK}·m⁻³_{Kontaktreaktor}·d⁻¹ dosiert (Fig. 2B). Die Zugabe von FM (2 g_{Fe(III)}·m⁻³_{Zulauf}) und FHM (0,3 g_{Wirksubstanz}·m⁻³_{Zulauf}) erfolgte im Ablauf der Kontaktreaktoren und war von Beginn weg proportional zum Zulauf zur PAK-Stufe.

In den ersten 20 Tagen erfolgte der TS-Aufbau zunächst schleppend auf eine TS-Konzentration von ca. 1 kg·m⁻³, da die Flockenbildung noch nicht effektiv war. Eine leichte Erhöhung der gesamten ungelös-

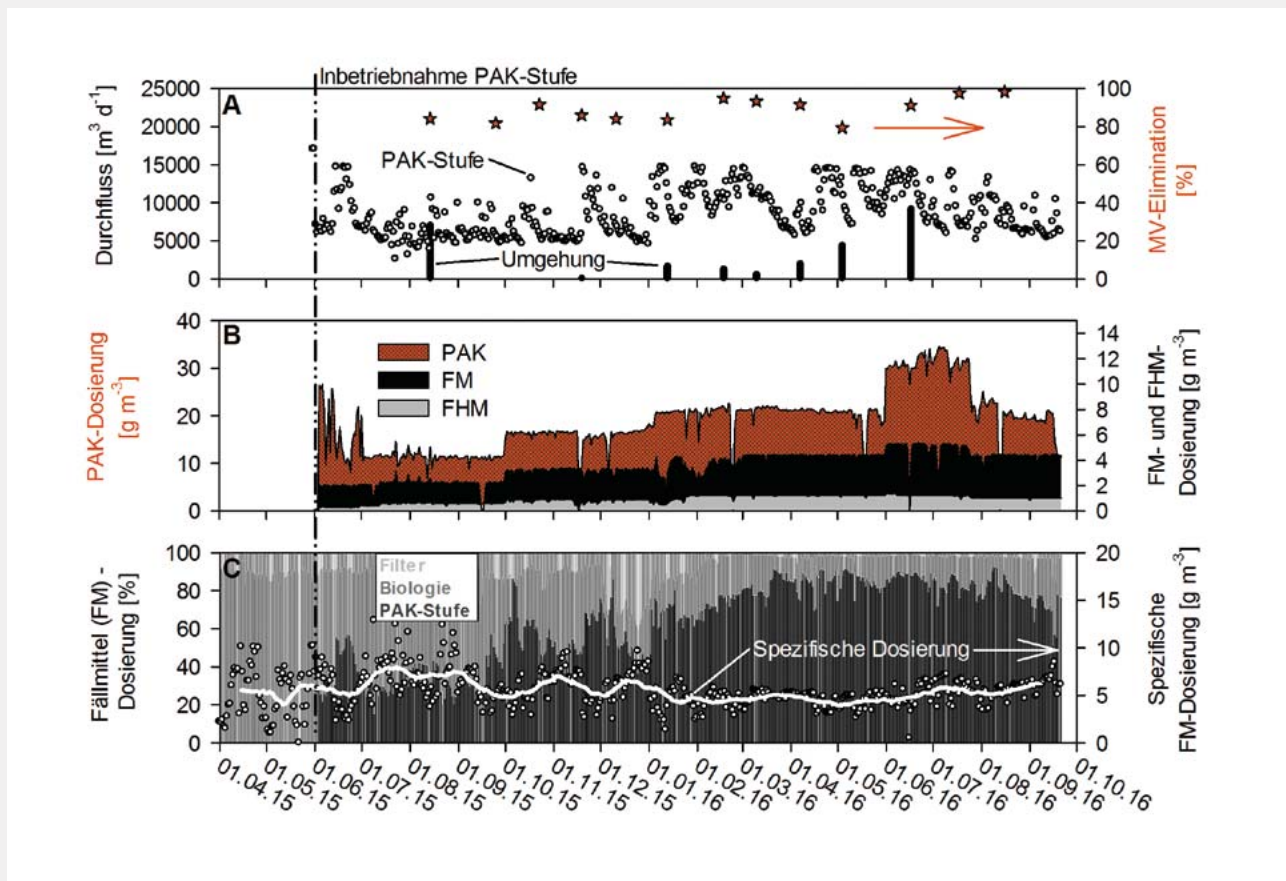


Fig. 2 A: Durchfluss durch die PAK-Stufe und durch die Umgehung der PAK-Stufe bei den MV-Messkampagnen sowie die massgebende MV-Elimination (4+2 beste). B: Betriebsmitteleinsatz in der PAK-Stufe. Die Dosierungen sind pro m^3 Zulauf zur PAK-Stufe angegeben. C: Zugabe an Fällmittel (FM) in den drei Dosierstellen PAK-Stufe, Schwachlastbiologie und direkt vor dem Filter sowie die totale spezifische Dosierung (pro m^3 Zulauf zur ARA) und deren gleitendes Mittel (GM) ± 15 Tage.

A: Débit dans l'étape CAP et dans le contournement de l'étape CAP lors des campagnes de mesure MP, et élimination déterminante de MP (4+2 meilleures). B: Equipements de l'étape CAP. Les dosages sont indiqués par m^3 d'affluent vers l'étape CAP. C: Apport de précipité (PR) dans les trois points de dosage de l'étape CAP, biologie faible performance et directement devant le filtre, ainsi que le dosage spécifique total (par m^3 d'affluent vers la STEP) et moyenne mobile (MM) sur ± 15 jours.

ten Stoffe (GUS) im Ablauf der PAK-Sedimentation ($< 20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) im Vergleich zum Nachklärbecken ($< 12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) bestätigte dies. In den folgenden zehn Tagen erhöhte sich die TS-Konzentration deutlich schneller, sodass nach einem Monat die Zielkonzentration der TS erreicht wurde. Trotz teilweise erhöhter GUS kam es nie zu Problemen mit den Sandfiltern, die ab der Inbetriebnahme der PAK-Stufe alle parallel beschickt und täglich rückgespült wurden.

Nach dem TS-Aufbau im ersten Betriebsmonat wurde auch die PAK proportional zum Zulauf zur PAK-Stufe dosiert (Fig. 2B). Dabei wurde die PAK-Dosierung bis Ende Juli 2016 in Stufen von $10 \text{ g}_{\text{PAK}} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Zulauf}$ auf $30 \text{ g}_{\text{PAK}} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Zulauf}$ gesteigert, ehe die Dosierung wieder auf $20 \text{ g}_{\text{PAK}} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Zulauf}$ reduziert wurde. Die Dosierung von FM und FHM wurde mit jeder Änderung der PAK-Dosierung überprüft und gegebenenfalls angepasst (Fig. 2B).

Der Durchfluss durch die PAK-Stufe ist in Figur 2A dargestellt. Aus der Plafonierung der Messwerte beim Dimensionierungswert ($14700 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) ist ersichtlich, dass die Umgehung der PAK-Stufe häufig angesprochen ist. Dies geschah auch während Messkampagnen der MV (Fig. 2A). Über die bisherige Betriebsdauer (bis 22.9.2016) betrachtet, wurden 85% des Abwassers in der PAK-Stufe behandelt. Dies ist etwas weniger als im Vorprojekt erwartet wurde ($> 90\%$).

OPTIMIERUNG DES BETRIEBS

Der Betrieb des PAK-Silos war bislang unproblematisch. Allerdings wurde aufgrund eines Lieferengpasses der PAK-Puffer im Silo einmal beinahe aufgebraucht. Verklumpungen oder Verbackungen wurden bislang keine festgestellt. Auch die Waage zur Dosierung der PAK hat sich im Betrieb bewährt.

Die grössten Probleme traten beim Anmischen der PAK-Suspension und bei deren Weiterverteilung auf. Anfänglich wurde das Wasser zum Anmischen der Suspension am oberen Rand des Einspültrichters zugegeben (Fig. 3A). Bei Zusetzen des Trichterausgangs kam es darum schnell zu einem Rückstau bis zum Niveausensor, worauf die PAK-Einmischung gestoppt und eine Wartung nötig wurde. Dieses Problem konnte entschärft werden, indem ein grosser Teil des Wassers ($\sim 90\%$) unterhalb des Einspültrichters über eine Wasserstrahlpumpe zugegeben wird (Fig. 3B), ähnlich wie dies auf der Kläranlage Böblingen-Sindelfingen geschieht [7]. Dadurch entsteht am Ausgang des Einspültrichters ein leichter Unterdruck, der ein Zusetzen verhindert. Ein regelmässiger Unterhalt des Einspültrichters (alle 14 Tage) ist dennoch wichtig.

Nach etwa einem Jahr verstopften die PAK-Dosierleitungen (Fig. 3C) und mussten teilweise ersetzt werden. Dies ist vermutlich auf den zeitweise niedrigen Durchsatz bei Trocken-

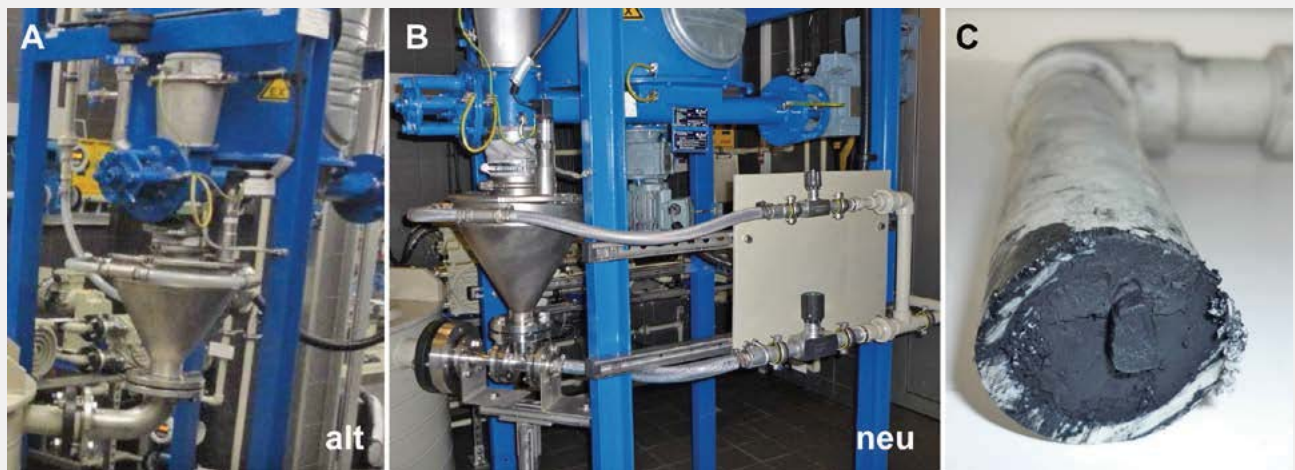


Fig. 3 A: Alte Konfiguration des Einspültrichters mit Zugabe des ganzen Wassers am oberen Rand. B: Neue Konfiguration des Einspültrichters mit Wasserstrahlpumpe am Trichterausgang. C: PAK-Pfropfen in einer ausgebauten Dosierleitung zwischen Vorlagebehälter und Kontaktreaktoren. A: Ancienne configuration de la trémie d'incorporation avec apport de l'eau dans la partie supérieure. B: Nouvelle configuration de la trémie d'incorporation avec pompe à jet d'eau à la sortie de la trémie. C: Tampon CAP dans un tuyau de dosage entre récipient collecteur et réacteurs de contact.

wetter zurückzuführen. Um erneute Verstopfungen zu verhindern, wird nun bei Trockenwetter und geringer PAK-Dosierung Brauchwasser durch die Dosierleitungen gefördert. Zusätzlich werden die Leitungen täglich mit Druck bis 8 bar gespült. Dafür wurde eine Umgehung der Schlauchquetschpumpen nachgerüstet, um Schäden an den Pumpen zu vermeiden.

Eine weitere Optimierung konnte bei der Zugabe von FM und FHM erreicht werden: Eine versuchsweise Dosierung des FM im Zulauf des Kontaktreaktors einer Strasse führte zu einer Verbesserung der Trübung im Ablauf und einer Absenkung des Schlammbedes in der Sedimentation.

Aufgrund eines Defektes des Rührwerks zur FHM-Einmischung einer Strasse konnte der Unterschied mit und ohne Rührwerk verfolgt werden. Die schlechte Einmischung des FHM resultierte in einem deutlichen Anstieg des Schlammpegels in der Sedimentation.

Bei hoher PAK-Dosierung ($> 20 \text{ g}_{\text{PAK}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{Zulauf}}$) hatte das Nachfahren mit dem FM zur Folge, dass ca. 80% des gesamten Eisens in der PAK-Stufe dosiert wurde (Fig. 2C). Dies resultierte in einer ausgeglicheneren und tendenziell geringeren spezifischen FM-Dosierung im Vergleich zum Betrieb vor Inbetriebnahme der PAK-Stufe mit vorwiegender FM-Dosierung in die Schwachlastbiologie. Die hohe Dosierung von FM und FHM in der PAK-Stufe, und damit kurz vor den Filtern, führte jedoch zu aufschwimmendem FM und FHM in den Filtern. Es wird daher angestrebt, wieder mehr FM in der Schwachlastbiologie zuzugeben.

Bis heute konnte in der gesamten Anlage keine erhöhte Abrasion durch die PAK festgestellt werden. Dies deckt sich mit den Erfahrungen in Baden-Württemberg, wo PAK-Stufen bereits seit mehreren Jahren in Betrieb sind [8].

VERFAHRENSTECHNISCHE ERFAHRUNGEN

ELIMINATION DER MIKROVERUNREINIGUNGEN

Die Elimination der Mikroverunreinigungen soll gemäss der departementalen Verordnung des UVEK im ersten Betriebsjahr in zwölf Messkampagnen mit 48-Stunden-Sammelproben im Zu- und Ablauf der ARA überprüft werden [9]. Dies wurde auf der ARA Herisau ab August 2015 umgesetzt. Einmal pro Monat führte das Betriebspersonal eine Messkampagne durch

und das Umweltlabor des Kantons Basel-Stadt analysierte die Proben. Zur Beurteilung der Reinigungsleistung wurden in jeder Messkampagne die 4+2 besten Eliminationsleistungen (Verhältnis 2:1, sehr gut: gut eliminierbar) herangezogen und gemittelt. Diese massgebende MV-Elimination ist in Figur 2A für jede Messkampagne ersichtlich und zeigt, dass die geforderten 80%-MV-Elimination nur in einer Messkampagne knapp nicht erreicht werden konnten. Damit wurden die gesetzlichen Vorgaben erfüllt. Die ungenügende massgebende MV-Elimination im Mai 2016 betrug 79% und unterschied sich damit nicht signifikant von anderen Messkampagnen.

Die Elimination aller zwölf Leitsubstanzen in den jeweiligen Messkampagnen ist in Figur 4A dargestellt. Die Elimination der einzelnen MV schwankte teilweise erheblich von einer zur anderen Messkampagne (zwischen 41 und 99%). Einzig Metoprolol und Benzotriazol wurden durchgehend zu nahezu 80% oder mehr eliminiert. In den Fällen von Citalopram, Clarithromycin, Venlafaxin sowie Candesartan und Irbesartan war eine Quantifizierung der Elimination in manchen Messkampagnen gar nicht möglich. Diese starken Streuungen der einzelnen MV-Eliminationen haben vielfältige Ursachen (Stoff- und PAK-Eigenschaften, PAK-Dosierung, Verdünnung bei Regenwetter, Probenahme, Analytik usw.) und wirkten sich auch auf die massgebende MV-Elimination aus.

Eine leicht erhöhte massgebende MV-Elimination ist mit steigender volumenspezifischer PAK-Dosierung zu erkennen (Fig. 4B). Es muss aber beachtet werden, dass für die Dosierungen von 10 und $30 \text{ g}_{\text{PAK}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{Zulauf}}$ nur je zwei Messwerte vorhanden und die sechs Messpunkte bei $20 \text{ g}_{\text{PAK}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{Zulauf}}$ stark gestreut sind. Die Korrelation ist daher nicht eindeutig. Figur 4C zeigt auch, dass zwischen der DOC-spezifischen PAK-Dosierung, in Bezug auf die gesamte DOC-Fracht im NKB der Schwachlastbiologie, und der massgebenden MV-Elimination eine gute Korrelation bestand, wenn man von zwei Ausreissern absieht. Dies bestätigt den bekannten Zusammenhang der verbesserten MV-Adsorption bei höherer DOC-spezifischer PAK-Dosierung [10].

Aus Figur 2A geht hervor, dass die Umgehung der PAK-Stufe bei gut der Hälfte der MV-Messkampagnen angesprungen ist. Man könnte vermuten, dass die MV-Elimination mit steigender Abwassermenge in der Umgehung sinkt. Es lässt sich aber

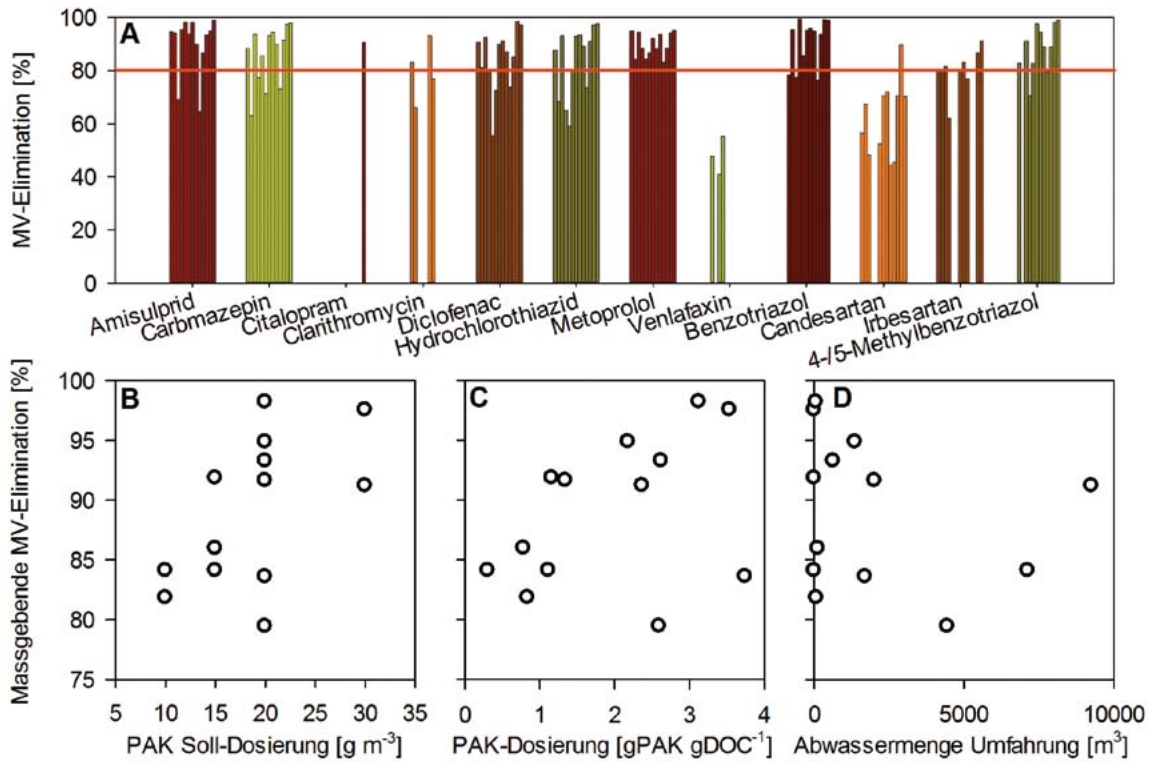


Fig. 4 A: Elimination der einzelnen Leitsubstanzen in den zwölf Messkampagnen des ersten Jahres. B, C, D: Korrelationen der massgebenden MV-Elimination mit der volumenspezifischen PAK-Dosierung während der Messkampagnen (B), der DOC-spezifischen PAK-Dosierung in Bezug auf die DOC-Fracht im NKB der Schwachlastbiologie (C) und dem Durchfluss in der Umgehung der PAK-Stufe (D).

A: Elimination des différents marqueurs dans les douze campagnes de mesure de la première année. B, C, D: Corrélations de l'élimination déterminante de MP avec le dosage CAP adapté aux volumes durant les campagnes de mesure (B), le dosage CAP adapté au COD, en fonction de la charge de COD dans le BDS de la biologie faible performance (C) et le débit dans le contournement de l'étape CAP (D).

keine Korrelation zwischen der massgebenden MV-Elimination und der Abwassermenge in der Umgehung erkennen (Fig. 4D). Dies ist wahrscheinlich auch auf die MV-Elimination in der Schwachlastbiologie aufgrund der Rückführung des PAK-Überschussschlammes (PAK-ÜSS) und der damit einhergehenden Teilbehandlung des Abwassers zurückzuführen.

ELIMINATION VON ORGANISCHEN SUBSTANZEN UND PHOSPHOR

In Figur 5A sind die DOC-Konzentrationen im Ablauf der ARA Herisau zusammen mit den DOC-Konzentrationen im NKB dargestellt. Wegen der starken Streuung der Messpunkte wurde für beide Größen ein gleitender Mittelwert (± 15 Tage) berechnet, um saisonale Tendenzen besser erkennen und die Daten einfacher vergleichen zu können. Im Mittel betrug die DOC-Elimination in der PAK-Stufe 31%, was die DOC-Konzentration im Ablauf deutlich reduzierte. Diese betrug im Mittel noch $7,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ seit Inbetriebnahme der PAK-Stufe. Der neue Grenzwert von $6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (Tab. 1) konnte damit im Mittel nur knapp nicht eingehalten werden. Verfärbungen wurden in der Glatt jedoch nicht mehr festgestellt und auch die Schaumbildung wurde beträchtlich entschärft. Die DOC-Konzentration im Ablauf des Filters korrelierte stark mit der DOC-Konzentration im NKB. Zudem ist eine Korrelation zum gleitenden Mittel der Konzentration des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) im Zulauf zu erkennen (Fig. 5B).

Die aus den gleitenden Mittelwerten der DOC-Konzentrationen im NKB und im Ablauf berechnete DOC-Elimination war nicht von der PAK-Dosierung abhängig (Fig. 5A). Vielmehr gab es eine leichte Tendenz, dass bei steigender DOC-Konzentration im NKB die DOC-Elimination abnahm, obwohl die absolute DOC-Elimination (in $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, Berechnungen nicht gezeigt) stieg. Die bessere Einhaltung des DOC-Grenzwerts zwischen dem 1.6.2016 und dem 1.8.2016 im Vergleich zur Vorperiode vom 1.6.2015 bis zum 31.12.2015 war demzufolge hauptsächlich auf die tieferen Zulaufkonzentrationen zurückzuführen und nicht auf die höhere PAK-Dosierung.

Eine nur auf die PAK-Stufe fokussierte Auswertung lässt allerdings ausser Acht, dass infolge der Rückführung des PAK-ÜSS auch in der Schwachlastbiologie eine Elimination organischer Stoffe durch die PAK erfolgt. Um den Zusatznutzen der PAK-Stufe gesamthaft zu beurteilen, ist darum eine Betrachtung der CSB-Elimination von Zulauf bis Ablauf zielführender. In Tabelle 4 sind die mittleren CSB-Konzentrationen im Ablauf und die totale CSB-Elimination über die gesamte Anlage für die Jahre 2010 bis 2016 aufgelistet. Bei vergleichbaren mittleren CSB-Werten im Zulauf verringerte sich seit Inbetriebnahme der PAK-Stufe der CSB im Ablauf der Anlage von zuvor $36,4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ auf $20,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, also um knapp $16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ bzw. 44%. Daraus folgt eine mittlere spezifische PAK-Beladung von $0,9 \text{ g}_{\text{CSB}} \cdot \text{g}_{\text{PAK}}^{-1}$, wenn man

die gesamte zusätzlich reduzierte CSB-Fracht durch die totale zugegebene PAK-Menge teilt. Ähnliche Werte wurden auch bei Pilotversuchen in Ulm (D) beobachtet [11]. Diese Verbesserung der totalen CSB-Elimination ist auch in *Figur 5B* beim Vergleich mit und ohne PAK-Stufe zu erkennen. Weiter ist in *Figur 5B*

ersichtlich, dass auch die gleitenden Mittel der CSB-Konzentrationen im Zu- und Ablauf korrelierten. Die Konzentration des gesamten Phosphors (P_{tot}) im Ablauf in den Jahren 2010 bis 2014 betrug im Mittel rund $0,54\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ und schwankte nur geringfügig, ähnlich wie in den Mona-

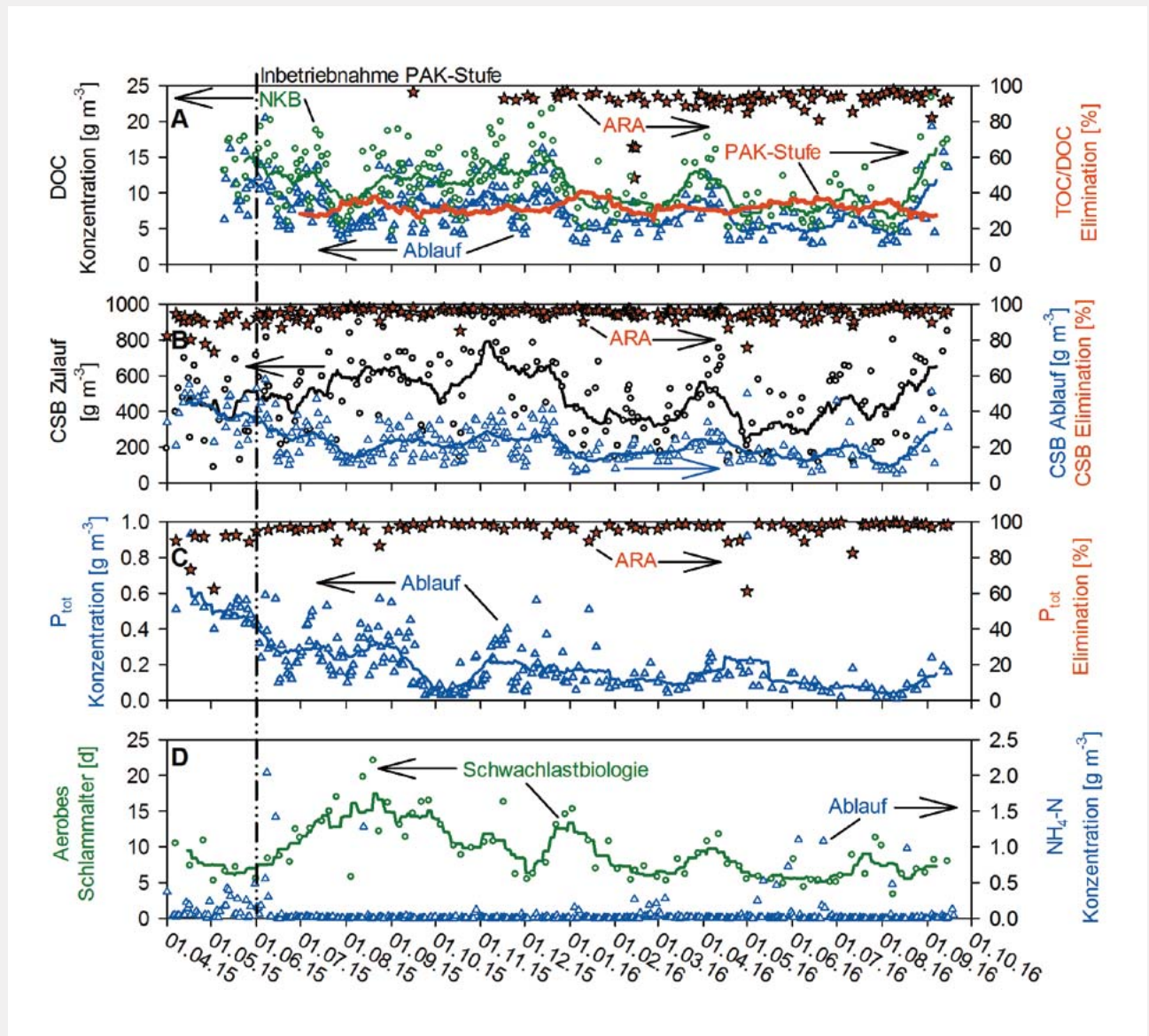


Fig. 5 A: DOC-Konzentrationen im NKB der Schwachlastbiologie (grün) und im Ablauf des Filters (blau) sowie die TOC/DOC-Elimination über die gesamte ARA und über die PAK-Stufe + Filter (rote Linie). B: CSB-Konzentrationen im Zulauf zur ARA (schwarz) und im Ablauf des Filters (blau) sowie die CSB-Elimination über die gesamte ARA. C: P_{tot} -Konzentration im Ablauf des Filters (blau) sowie die P_{tot} -Elimination über die gesamte ARA. D: Schlammalter in der Schwachlastbiologie und Ammoniumstickstoff im Ablauf der ARA. Die durchgezogenen Linien bezeichnen die gleitenden Mittelwerte (± 15 Tage) der Messgrößen.

A: Concentrations de COD dans le BDS de la biologie faible performance (en vert) et l'effluent du filtre (en bleu), et élimination de COT/COD dans l'ensemble de la STEP et dans l'étape CAP + filtre (ligne rouge). B: Concentrations de DCO dans l'affluent vers la STEP (en noir) et dans l'effluent du filtre (en bleu), et élimination de DCO dans l'ensemble de la STEP. C: Concentration de P_{tot} dans l'effluent du filtre (en bleu) et élimination de P_{tot} dans l'ensemble de la STEP. D: Age des boues dans la biologie faible performance et azote ammoniacal dans l'effluent de la STEP. Les lignes continues indiquent les moyennes mobiles (± 15 jours) des paramètres.

Zeitraum		2010	2011	2012	2013	2014	Mittel 2010–2014	Juni 2015–August 2016
CSB im Ablauf	[$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	43	42	35	29	33	36,4	20,5
CSB-Elimination	[%]	90	92	92	93	91	91,6	95,6

Tab. 4 Mittlere CSB-Konzentrationen im Ablauf der ARA Herisau und totale CSB-Elimination der letzten sechs Jahre. Concentrations moyennes de DCO dans l'effluent de la STEP et élimination totale de DCO dans les six dernières années.

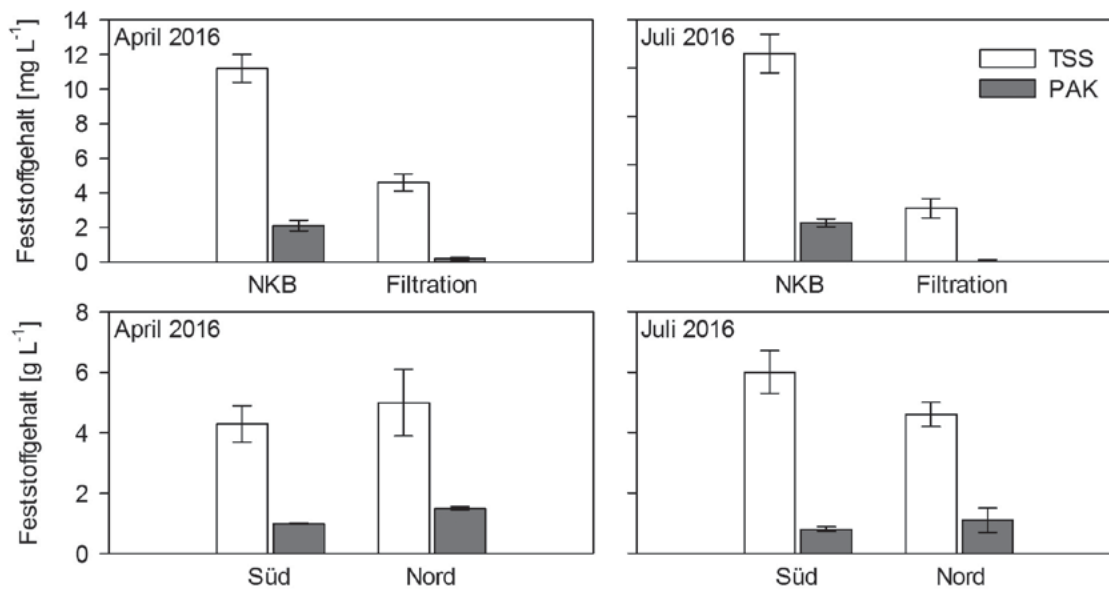


Fig. 6 Feststoff- und PAK-Gehalt von Proben aus den beiden Strassen (Nord und Süd) und dem NKB der Schwachlastbiologie sowie dem Ablauf der Filtration im April und im Juli 2016. Dargestellt sind die Mittelwerte und deren Standardabweichungen ($n = 3$).

Teneur en matières solides et en CAP d'échantillons provenant des deux routes (nord et sud), du BDS de la biologie faible performance et de l'effluent de la filtration, en avril et juillet 2016. Les valeurs présentées sont les moyennes et leurs écarts standard ($n = 3$).

ten April und Mai 2015 vor Inbetriebnahme der PAK-Stufe (Fig. 5C). Mit den neuen Einleitbedingungen (Tab. 1) wurde auch der Grenzwert für den Phosphor im Ablauf der ARA von 0,8 auf 0,3 g·m⁻³ verschärft. Wie Figur 5C zeigt, konnte der verschärfte Grenzwert ab der Inbetriebnahme der PAK-Stufe grösstenteils eingehalten werden. Wie aus Figur 2C ersichtlich, lag dies nicht an einer Erhöhung der FM-Dosierung, sondern daran, dass die P-Fällung aufgrund der Drei-Punkt-Dosierung effizienter wurde. Dies wurde auch auf Anlagen in Baden-Württemberg beobachtet [7].

ABTRENUNG UND RÜCKFÜHRUNG DER PAK IN DIE SCHWACHLASTBIOLOGIE

Bei ansteigendem Durchfluss durch die PAK-Stufe wurde jeweils eine Verfrachtung der PAK ins Sedimentationsbecken beobachtet. Es ist aber nur in einem Fall zu Kohleabtrieb aus der PAK-Sedimentation auf die Filter gekommen. Die Abtrennung der PAK in den Sandfiltern war auch bei maximaler hydraulischer Belastung (15 m·h⁻¹) sehr gut. Im Mittel betrug die GUS-Konzentration im Ablauf 1,6 g·m⁻³, der Grenzwert von 5 g·m⁻³ wurde lediglich in 1% der Messungen leicht überschrit-

ten. Zwei Analysen der Feststoffanteile mittels Thermogravimetrie [12] im April und Juli 2016 im Ablauf der Sandfilter (Fig. 6) zeigten zudem einen Rückgang des PAK-Anteils auf weniger als 5%. Ein Kohleschlupf in den Vorfluter kann damit nahezu ausgeschlossen werden.

Die Rückführung des PAK-ÜSS in die Schwachlastbiologie hat zur Folge, dass ein höherer Anteil des Belebtschlammes aus PAK bzw. inerten Feststoffen besteht. Die thermogravimetrischen Messungen (Fig. 6) ergaben einen mittleren PAK-Anteil von 24% in den Belebungsbecken und 19% im Ablauf NKB (Fig. 6). Trotz dieses hohen PAK-Anteils war die Nitrifikation gleich stabil wie vor Inbetriebnahme der PAK-Stufe. So betrug die mittlere NH₄-N-Konzentration im Ablauf der ARA 0,05 g_N·m⁻³ und der Grenzwert von 1 g_N·m⁻³ wurde nur in 1,5% der Messungen leicht überschritten (Fig. 5D). Die PAK scheint daher die Nitrifikation nicht negativ zu beeinflussen. Vergleicht man jedoch den Zeitpunkt der erhöhten NH₄-N-Konzentration im Ablauf mit dem aeroben Schlammalter (Fig. 5D) fällt auf, dass diese sowohl vor als auch nach Inbetriebnahme der PAK-Stufe mit tiefen Schlammaltern korrelierten.

AUSWIRKUNGEN IM GEWÄSSER

Im Rahmen des *EcoImpact*-Projektes (Eawag/BAFU) untersuchten die Abteilung Umwelttoxikologie (Eawag) und das Oekotoxzentrum (Eawag-EPFL) jeweils im Frühjahr 2015 und 2016 wild gefangene Bachforellen (*Salmo trutta*) aus der Glatt [13]. Um den Einfluss des eingeleiteten Abwassers aus der ARA Herisau zu eruieren, wurden jeweils unterhalb und oberhalb der Abwassereinleitung ansässige Bachforellen entnommen. In den Bachforellen wurde die Regulation von 20 Genen in verschiedenen Geweben analysiert. Damit ist es möglich, nicht nur tödliche, sondern auch vorgelagerte Effekte (Beeinflussung des Hormonsystems, Biotransformation, Metall- und oxidativer Stress usw.) verschiedenster Schadstoffe im Fisch nachzuweisen.

Stellvertretend für die gesamten Ergebnisse sind in Figur 7 die zellulären Stressantworten der Gene Vitellogenin (VTG) und Cyp3a in den Lebern, als Indikatoren für östrogene Wirkung und die Induktion der Biotransformation von organischen MV, wiedergegeben. Im Jahr 2015 zeigten beide Gene in den Fischen, die unterhalb der Abwassereinleitung an-

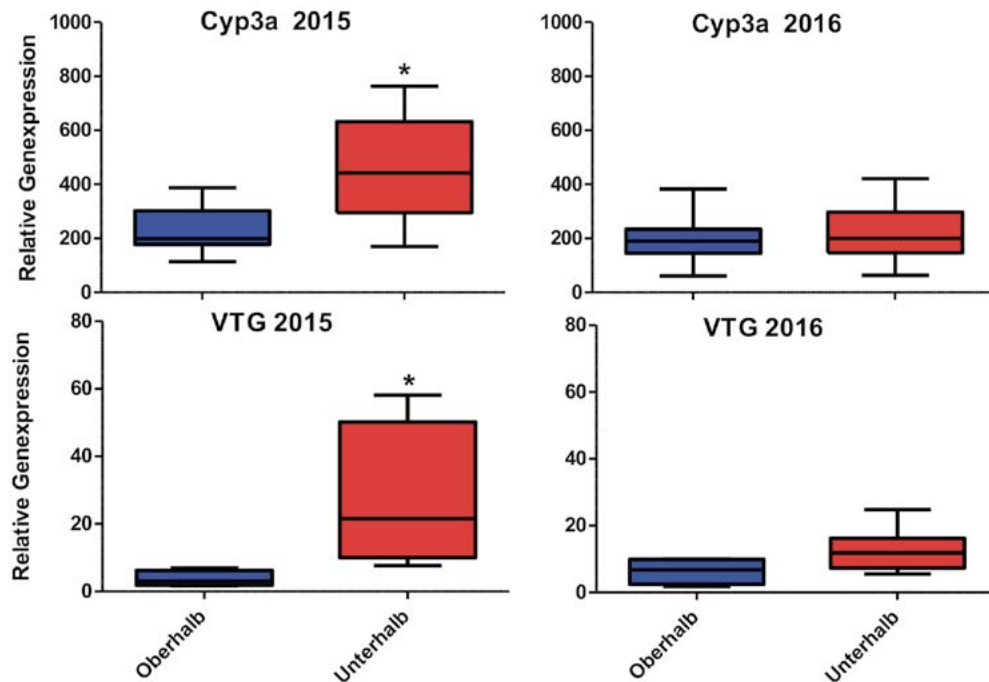


Fig. 7 Genexpressionswerte von Leberproben aller untersuchten Fische aus der Glatt (oberhalb ARA n=12 und unterhalb ARA n=12). Für Vitellogenin (VTG) sind nur die Expressionswerte der männlichen Fische aufgetragen (2015 oberhalb ARA n=5 und unterhalb ARA n=5 und 2016 oberhalb ARA n=5 und unterhalb ARA n=6). VTG wird unter Normalbedingungen nur in weiblichen und nur gering in männlichen Tieren exprimiert. Durch den Einfluss von östrogenaktiven Stoffen kann es aber zu einer erhöhten Expression von VTG in männlichen Tieren kommen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Expression (schwarzer Balken), die Standardabweichungen sowie Maxima und Minima. Statistisch signifikante Unterschiede sind durch Sternchen gekennzeichnet.

Valeurs de l'expression génique d'échantillons de foie de l'ensemble des poissons de la Glatt analysés (en amont de la STEP n=12 et en aval de la STEP n=12). Pour la vitellogénine (VTG), seules les valeurs d'expression des poissons mâles sont présentées (2015, en amont de la STEP n=5 et en aval de la STEP n=5; 2016, en amont de la STEP n=5 et en aval de la STEP n=6). Dans des conditions normales, la VTG ne s'exprime que chez les poissons femelles et dans une faible mesure chez les mâles. Cependant, les substances actives à effet œstrogénique peuvent entraîner une expression plus élevée de VTG chez les mâles. Les valeurs présentées sont les moyennes d'expression (barre noire), les écarts standard, ainsi que les valeurs maximales et minimales. Les différences statistiquement significatives sont marquées d'un astérisque.

gesiedelt waren, eine signifikant höhere Expression im Vergleich zu den Fischen, die oberhalb lebten. Dies deutete auf eine erhöhte Konzentration von östrogenaktiven und anderen organischen Stoffen unterhalb der Abwassereinleitung vor Inbetriebnahme der PAK-Stufe hin. Ein Jahr später (2016) – ein gutes halbes Jahr nach Inbetriebnahme der PAK-Stufe – konnten zwischen ober- und unterhalb lebenden Fischen keine signifikanten Unterschiede mehr nachgewiesen werden, was auf

ein deutlich geringeres Gesundheitsrisiko für die Fische durch die verbesserte Wasserqualität in der Glatt unterhalb der Abwassereinleitung hinweist. Tatsächlich bestätigte die chemische Analytik eine höhere Belastung mit MV im Jahr 2015 im Vergleich zu 2016 (Fischer et al., Publikation in Vorbereitung).

Dieses Umweltmonitoring ist eine vielversprechende Methode für die Überwachung der Wasserqualität und der Fischgesundheit. Die Auswahl der analysierten Gene ist sehr flexibel und wahlweise erweiterbar. Anpassungen für spezifische Effektmessungen sowie andere Anwendungen sind möglich. Bereits jetzt wird das Umweltmonitoring auf etablierte Zelllinien der Fische erweitert. Diese Zelllinien lassen sich im Labor züchten und könnten in Zukunft eine tierfreie Umweltüberwachung ermöglichen [14].

Das Verfahren wird derzeit an der Eawag validiert.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Auf der ARA Herisau wurde die erste grosstechnische PAK-Stufe der Schweiz (Ulmer Verfahren) erfolgreich in Betrieb genommen. Die Anlage läuft weitgehend stabil und zuverlässig. Einzig bei der Dosieranlage der PAK kam es, wahrscheinlich aufgrund ungünstiger Hydraulik, zu Verstopfungen im Einspültrichter und den Dosierleitungen.
- Die gesetzlichen Vorgaben bezüglich der Elimination von Mikroverunreinigungen wurden erfüllt. In elf von zwölf Messkampagnen im ersten Betriebsjahr wurde eine MV-Elimination von mehr als 80% für sechs massgebende Leitsubstanzen erreicht.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei Helmut Kapp, Karlheinz Diethelm, Marc Böhler, Inge Werner, Kirstin Schirmer, Julie Grelot und Christian Abegglen für die wertvollen Kommentare zu diesem Artikel.

- Die PAK-Stufe erlaubte eine weitergehende, sehr gute Elimination des CSB. Im Mittel stieg die Elimination des CSB in der gesamten Anlage von 91,6% auf 95,6%. Die CSB-Konzentration im Ablauf konnte damit nahezu halbiert werden. Deren Dynamik blieb aber von den starken Konzentrationsschwankungen im Zulauf bestimmt.
- Der Eintrag organischer Stoffe sowie von Mikroverunreinigungen in die Glatt wurde dank der neuen PAK-Stufe stark reduziert. Bisher öfter auftretende Verfärbungen und Schaumbildungen sind nicht mehr erschienen. Zudem konnte mittels Genexpressionsanalyse bereits nach einem knappen Jahr ein positiver Effekt auf Bachforellen in der Glatt nachgewiesen werden.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG), SR 814.20, Stand am 1. Januar 2016
- [2] Gewässerschutzverordnung (GSchV), SR 814.201, Stand am 2. Februar 2016
- [3] Fleiner J. et al. (2015): Ozonung ARA Neugut, Dübendorf - Grosstechnische Optimierung der Ozondosierung. Schlussbericht BAFU
- [4] Wunderlin, P. et al. (2015): Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon. *Aqua & Gas*. 7/8: p. 28-38
- [5] Metzger, St. und Hildebrand, A. (2016): Spurenstoffelimination auf Kläranlagen - Erfahrungen und Entwicklungen aus 5 Jahren KomS in Baden-Württemberg. in 7. KomS-Technologieforum Spurenstoffe. Lehr: KomS
- [6] Eugster, M.; Rezzonico, S. (2008): Mikroverunreinigungen in Flüssen und Bächen der Ostschweiz. Untersuchungsbericht. Kanton St.Gallen. St.Gallen
- [7] Schwentner, G. (2016): Betriebserfahrungen und Kostenbetrachtungen aus 5 Jahren Aktivkohlebehandlung in Sindelfingen. in 7. KomS-Technologieforum Spurenstoffe. Lehr: KomS
- [8] Metzger, St. et al. (2014): Kosten der Pulveraktivkohleanwendung zur Spurenstoffelimination am Beispiel ausgeführter und in Bau befindlicher Anlagen. *Korrespondenz Abwasser*. 11(61): p. 1029-1037
- [9] Verordnung des UVEK über die Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen, SR 814.201.231, Stand am 1. Dezember 2016
- [10] Boehler, M. et al. (2012): Removal of micropollutants in municipal wastewater treatment plants by powder-activated carbon. *Water Science and Technology*. 66(10): p. 2115-2121
- [11] Metzger, St. (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH
- [12] Krahnstöver, T.; Plattner, J.; Wintgens, T. (2016): Quantitative detection of powdered activated carbon in wastewater treatment plant effluent by thermogravimetric analysis (TGA). *Water Research*. 101: p. 510-518
- [13] Fischer, S. (2016): Fisch Biomonitoring von Abwasser. Internetseite besucht am 07.11.2016; Verfügbar unter: www.eawag.ch/de/abteilung/utox/projekte/fish-biomonitoring-of-waste-water-effluents/
- [14] Schirmer, K. (2006): Proposal to improve vertebrate cell cultures to establish them as substitutes for the regulatory testing of chemicals and effluents using fish. *Toxicology*. 224(3): p. 163-183

> SUITE DU RÉSUMÉ

à des substances organiques réfractaires, ne se produisent plus que très rarement et sont nettement moins importants. L'amélioration de la qualité de l'eau de la Glatt a également des répercussions sur la faune et la flore. On a pu constater un effet positif de l'étape CAP sur la santé des truites de la Glatt.

rhenov

Professionelle
Wasseraufbereitung

Die sicherste
Wasserdesinfektion
und Abbau von Mikro-
verunreinigungen
mit Ozon

Rheno – Der Schweizer Partner
mit viel Erfahrung und der besten
after-sales Unterstützung



Produktionsleistung 2 g bis 30 kg O3/h

Ozonproduktion aus Luft
oder Sauerstoff im
Vakuum- oder Druckverfahren
zur Behandlung von

Bade-, Trink-, Industrie-
und Abwasser

Rheno Umwelttechnik AG
CH-8952 Schlieren
Tel. 043 444 86 00



www.rheno.ch

ISO 9001