

NEUE REINIGUNGSSTUFE FÜR DIE ARA MURI

SPURENSTOFFENTFERNUNG MIT GRANULIERTER AKTIVKOHLE

Zukünftig werden auf der ARA Muri dank einer neuen Reinigungsstufe Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser entfernt. Die GAK-Filtration bietet viele Vorteile und wird nicht nur verfahrenstechnisch, sondern auch ästhetisch optimal in die bestehenden Strukturen der ARA Muri eingebunden. Zur sicheren Umsetzung wurden in einer Pilotierung wichtige Fragen beantwortet, insbesondere wie die Filterzellen möglichst ideal mit einer Parallelschaltung für eine maximale Beladung zu verschalten sind.

Milena Kessler; Jonas Löwenberg, CSD Ingenieure AG
Marc Böhler, Eawag; Paul Strebel, Gemeinde Muri AG*

RÉSUMÉ

NOUVELLE ÉTAPE DE NETTOYAGE POUR LA STEP DE MURI – ÉLIMINATION DES MICROPOLLUANTS À L'AIDE DE CHARBON ACTIF GRANULÉ

Au cours d'un essai pilote d'un an, la filtration au charbon actif granulé (CAG) s'est avérée être un procédé approprié pour l'élimination des micropolluants à Muri AG. Les conditions d'une longue durée de vie des filtres CAG semblent réunies à Muri, car la concentration en carbone organique dissous (COD) est très faible dans l'affluent du CAG et il y a donc peu d'adsorption concurrente. Grâce à la filtration au sable en amont et aux faibles concentrations de matières en suspension (MES) qui en résultent dans l'affluent de la filtration au CAG, les pertes de pression hydraulique sont, par comparaison, faibles à Muri et les intervalles de rétro-lavage sont peu fréquents et avantageux pour l'exploitation. Un programme de simulation basé sur *Matlab* a permis de simuler le fonctionnement du filtre pour les 20 prochaines années sur la base des courbes de débit des dernières années. Les résultats montrent qu'avec un fonctionnement parallèle du filtre et un circuit de filtrage approprié, il est possible d'atteindre à Muri des durées de vie de plus de 30 000 volumes de lit et une fréquence de remplacement d'environ 3,5 ans. Sur une période de vingt ans, il est ainsi possible d'économiser jusqu'à un tiers de charbon actif par rapport à une exploitation non parallèle du filtre, car les cellules filtrantes peuvent être exploitées jusqu'à 1,5 fois plus longtemps.

AUSGANGSLAGE

Mit der revidierten Gewässerschutzverordnung 2016 soll der Eintrag von Mikroverunreinigungen (MV) in die Gewässer insbesondere bei sehr grossen Abwasserreinigungsanlagen (ARA), bei grösseren ARA im Einzugsgebiet von Seen und bei ARA an Gewässern mit hohem Abwasseranteil verringert werden.

Mit rund 9000 angeschlossenen Einwohnern und einer Abwassereinleitung in die Bünz gehört die ARA Muri zur letzten Gruppe. Aufgrund ihres schwachen Vorfluters ist sie von der Gesetzesänderung betroffen und muss mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe technisch aufgerüstet werden.

Der Vorfluter, die Bünz, weist in Muri AG im langjährigen Mittel einen Abwasseranteil von rund 20% auf, weshalb Mikroverunreinigungen nicht ausreichend verdünnt werden. Während längeren Trockenperioden wie im Sommer 2022 verschärft sich die Situation und der Abwasseranteil ist nochmals deutlich höher. Gemeinsam mit dem anstehenden Werterhalt und dem Ausbau der ARA Muri kann die Stufe zur Elimination von Spurenstoffen ideal realisiert werden. Für die Bünz wird daraus eine wichtige Entlastung der Gewässerökologie erfolgen.

* Kontakt: j.loewenberg@csd.ch

(Titelbild: © AdobeStock)

VERFAHRENSAUSWAHL

Zur Elimination von MV (EMV) wurden die etablierten Verfahren Pulveraktivkohledosierung (PAK) vor Sandfiltration, granuliert Aktivkohle (GAK) im Festbettfilter und die Ozonung bzgl. Stand der Technik, Platzbedarf, Betriebssicherheit, Wartungsaufwand, Umweltauswirkungen, Kosten sowie Eignung des Abwassers (Nebenprodukte) untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass eine GAK-Filtration auf der ARA Muri in vielen Punkten Vorteile gegenüber den anderen Verfahren aufweist:

- Geringe Hintergrundbelastung des gereinigten Abwassers (gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) $\approx 5 \text{ mg/l}$) und entsprechend geringe Konkurrenzadsorption verbunden mit langen Standzeiten der GAK.
- Lange Laufzeiten bzw. Rückspülintervalle aufgrund der Vorbehandlung des Abwassers nach der Biologie mit einer Sandfiltration (tiefe Konzentration gesamt ungelöster Stoffe (GUS)).
- Keine gegebenenfalls schädlichen und unerwarteten Nebenprodukte durch Reaktion mit anderen Wasserinhaltsstoffen durch Ozonung.
- Bessere Nachhaltigkeit aufgrund der Reaktivierbarkeit der GAK und somit ein geringerer CO_2 -Fussabdruck als ein Verfahren mit PAK [1].
- Hohe Reinigungsleistung durch Überlagerung adsorptiver sowie biologischer Eliminationseffekte [2].
- Wartungsarmes, robustes und dem Betrieb bekanntes Verfahren.

Ein Ersatz oder eine Erweiterung der bestehenden Sandfiltration zu einer GAK-Filtration war aus hydraulischen und bautechnischen Gründen nicht möglich. Um genaue projektspezifische Aussagen und Sicherheiten bzgl. den zu erwartenden Betriebskosten, der Reinigungsleistung und den Standzeiten treffen zu können, wurde auf der ARA Muri eine einjährige Pilotierung durchgeführt. Begleitet wurden diese Arbeiten durch zwei Masterprojektarbeiten an der ETH und der Eawag.

PROJEKTIERUNG

PILOTIERUNG

Während der Pilotierung wurden auf der ARA Muri zwei GAK-Typen mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung getestet (Fig. 1B). Aufgrund der niedrigen GUS-Konzentrationen wählte man eine GAK mit hohem Feinanteil (mesh 8 x 40/ Korndurchmesser 0,3–2,6 mm) und stellte diese einer GAK mit gröberer Körnung (mesh 10 x 20/Durchmesser 0,85–2,0 mm) gegenüber. Die GAK mit hohem Feinanteil beinhaltet eine feinere Körnung, als sie gemäss dem Konsenspapier von Eawag und VSA mit Hinweisen zur Planung und Auslegung von diskontinuierlich gespülten GAK-Filtern empfohlen ist [3]. Die Wahl für diese Kohle wurde getroffen, da die GUS-Werte in Muri nach der Sandfiltration mit ca. 1 mg/l sehr tief waren.

Kleine Körner besitzen in ihrer Gesamtheit bei gleichem GAK-Volumen eine grössere äussere Oberfläche, die mit dem Abwasser bzw. den Zielsubstanzen

reagieren kann. Zudem ergeben sich kürzere Transportwege im Inneren des Kornes zu den Adsorptionsplätzen, so dass dadurch eine schnellere Adsorptionskinetik gegeben ist. Bei kleinen Körnern ist jedoch die Packungsdichte höher, wodurch die freien Zwischenräume durch Feststoffe schneller verstopfen können. Es muss dann häufiger rückgespült werden [4]. Rückspülungen sind für den Betrieb ein kostenrelevanter Faktor (Bereitstellung und Rückführung des Spülwassers, Druckluft). Rückspülungen sind zudem zu minimieren, um Kohleverluste, u. a. auch durch Abrasion zu vermeiden. Wegen der geringen Konzentration an Feststoffen in Muri war die Hypothese zu Beginn der Pilotierung, dass mit der GAK mit hohem Feinanteil bessere Eliminationsleistungen erzielt werden können, ohne dass es zu kürzeren Laufzeiten des Filters und damit zu einem weniger wirtschaftlichen Betrieb kommen wird [5]. Beide Kohlen sind steinkohlebasiert und wurden vorgängig durch thermische Behandlung reaktiviert, wodurch sie gegenüber frischer Kohle einen deutlich besseren ökologischen Fussabdruck haben [1]. Die beiden Kohlen wurden in zwei Filtersäulen (vgl. Fig. 1A) gefüllt und mit dem Ablauf der Sandfiltration parallel beschickt. Zur Überprüfung der Eliminationsleistung wurden jeweils 24-h-Sammelproben des ARA-Zulaufs, des GAK-Zulaufs (= Ablauf Sandfiltration) und der beiden GAK-Abläufe genommen und analysiert. Zudem wurden auf unterschiedlichen Höhen im Filter Stichproben entnommen, um Aussagen über das Ad-

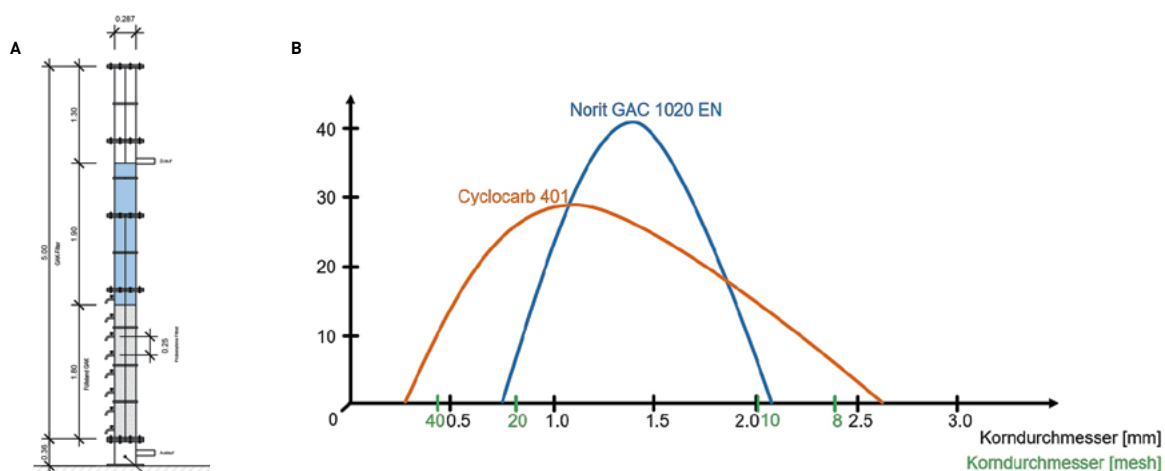


Fig. 1 A Schematische Darstellung der eingesetzten Filtersäulen während der Pilotierung [5].

B Korngrößenverteilung der beiden eingesetzten GAK [5].

sorptionsprofil treffen zu können. Innerhalb der abwärts durchströmten Filtersäulen nimmt die Konzentration von Mikroverunreinigungen von oben nach unten durch Adsorption ab. Der Bereich zwischen der gesättigten und der unbeladenen Kohle wird als Arbeitsfront bezeichnet [4]. Mit Zunahme der behandelten Abwassermenge pro Filtervolumen, den sogenannten Bettvolumen (BV), wandert die Arbeitsfront in Fliessrichtung durch den Filter nach unten – es sind also

mehr Adsorptionsstellen besetzt und die Eliminationsleistung nimmt zunehmend ab. Gemäss Gewässerschutzverordnung müssen im Mittel bei allen Witterungsbedingungen stets $\geq 80\%$ der ausgewählten Leitsubstanzen gemäss UVEK-Liste aus dem Gesamtablauf des Filters entfernt werden. Die maximalen GAK-Standzeiten ergibt sich durch Unterschreiten dieses Abbruchwertes im Gesamtablauf. Die mittleren Eliminationsleistungen der beiden Kohlen sind in *Figur 2* dargestellt

und einer Referenzanlage (Pilotversuche auf der ARA Furt, Bülach; *Böhler et al.* [2]) gegenübergestellt. Die Resultate der Pilotierung zeigten folgende Punkte auf [5]:

- Die gesetzlich geforderte EMV von 80% kann durch ein Verfahren mit GAK-Filtration problemlos erreicht werden. Im Schnitt wurden während der einjährigen Pilotierung durch beide Kohlen 98% der Mikroverunreinigungen eliminiert.
- Beide Kohlen sind für die Elimination von MV sehr gut geeignet und zeigen in der Reinigungsleistung ein vergleichbares Verhalten auf.
- Gegen Ende der Pilotierung zeigte sich eine leichte Abnahme der mittleren MV-Elimination, wobei immer noch sehr hohe Reinigungsleistungen erreicht wurden (95 resp. 97% bei Ende der Pilotierung).
- Eine sichere Prognose, wie viele BV bis zur Erschöpfung der Kohle behandelt werden können, ist nicht möglich, da kein deutlicher Trend zur Abnahme der EMV erkennbar ist.
- Bei konservativer Abschätzung dürfen in Muri sicher 25 000 Bettvolumen pro Einzelfilter erwartet werden.

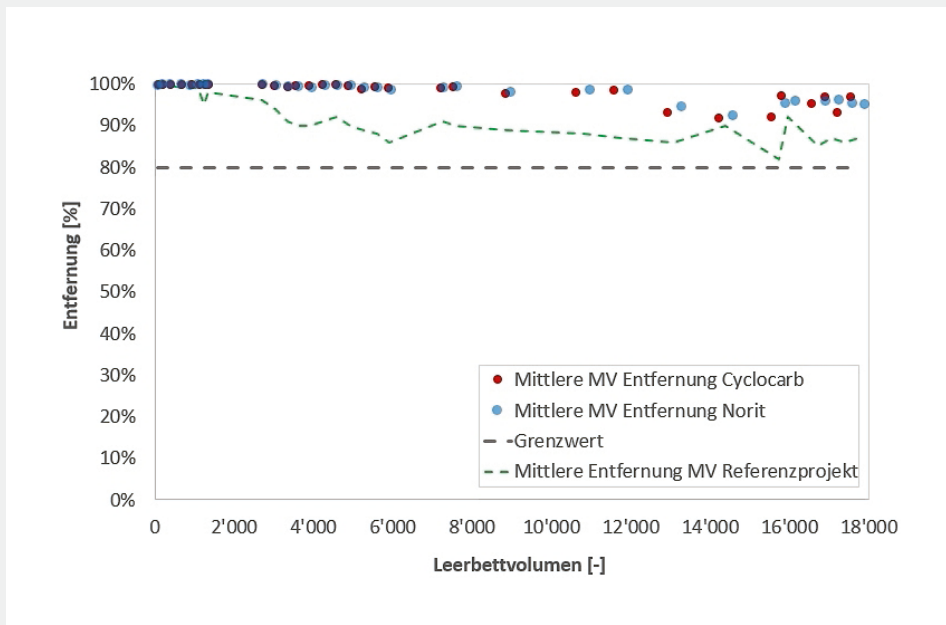


Fig. 2 Vergleich der beiden Kohlen bezüglich Elimination von MV in Muri und die Resultate aus dem volltechnischen Pilotprojekt ARA Furt, Bülach.

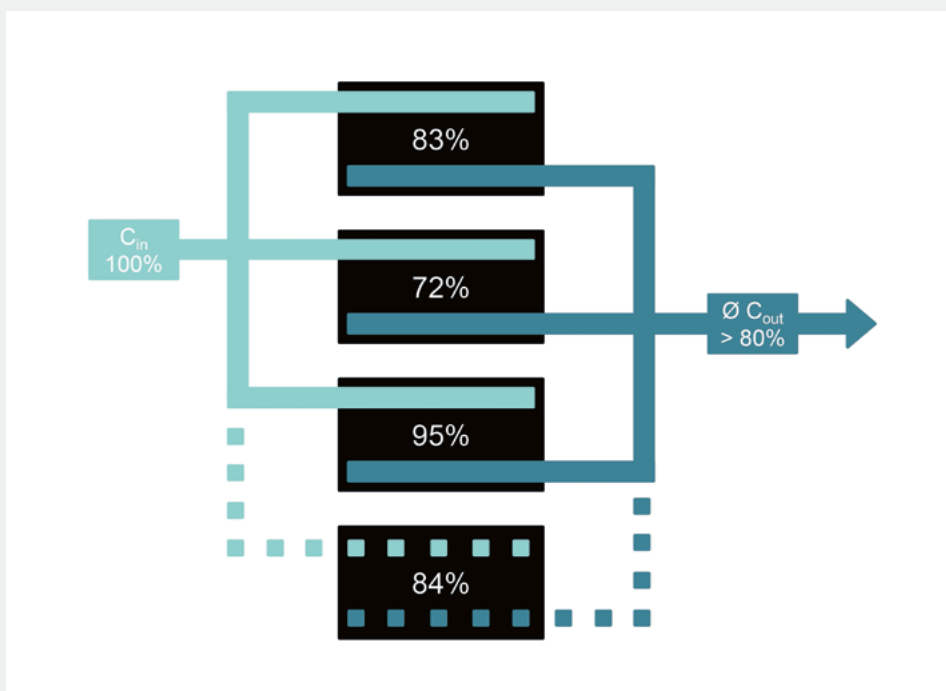


Fig. 3 Schematische Darstellung zur kompensierenden Reinigungsleistung bei Parallelschaltung von vier Filterzellen.

DIMENSIONIERUNG

Dem Konsenspapier von Eawag und VSA zur Planung und Auslegung von diskontinuierlich gespülten GAK-Filtern entsprechend, wurde die Filtration so ausgelegt, dass eine Kontaktzeit von 20 Minuten auch bei maximaler Beschickung sichergestellt ist.

Die ARA Muri ist hydraulisch auf 140 l/s dimensioniert. Die Schüttmenge einer Filterzelle wurde entsprechend dem Transportvolumen der Silofahrzeuge auf 50 m³ festgelegt. Als Filtermedium dient eine 2,5 m dicke Schicht aus GAK. Damit die Kontaktzeit von mindestens 20 Minuten auch bei maximalem Zufluss eingehalten werden kann, wird ein Gesamtvolumen von 168 m³ GAK benötigt. Es ist geplant, auf der ARA Muri vier GAK-Filterzellen mit je einem Volumen von 50 m³ zu bauen. Bei maximalem Zufluss und Betrieb von vier Filterzellen beträgt die Kontaktzeit damit knapp 24 Minuten (*Fig. 3*).

STEUERUNGSKONZEPT

Die Standzeit einer einzelnen Zelle kann mittels Parallelschaltung und zeitlich versetzter GAK-Erneuerung deutlich verlängert werden. Durch die Parallelschaltung können einzelne Filterzellen auch

unterhalb der erforderlichen Reinigungsleistung betrieben werden, da sich die benötigte Elimination auf den Gesamtablauf bezieht und somit ungenügende Leistungen einzelner Filterzellen durch andere kompensiert werden können. Mehrere parallelgeschaltete Filter mit zeitlich versetztem GAK-Austausch ermöglichen daher eine effizientere Ausnutzung der GAK und somit einen wirtschaftlicheren Betrieb, ohne dass der Gewässerschutz beeinträchtigt wird [6].

Mithilfe eines *Matlab* basierten Simulationsprogramm wurde versucht, ein möglichst ideales Filterschaltungskonzept zu erstellen, mit dem die GAK maximal ausgenutzt werden kann [7]. Dazu wurden Daten der Pilotierung auf der ARA Muri, Daten von Referenzanlagen [2, 8] und Daten von simulierten Regenwetterereignissen der Pilotanlage genutzt. Als Grundannahme wurde mit einer Standzeit von 20 000 Leerbettvolumen für eine einzelne Filterzelle gerechnet. Anhand der Abflussganglinien der letzten Jahre wurde der Filterbetrieb über einen Zeitraum von 20 Jahren simuliert. Am effizientesten hat sich eine Filterschaltung erwiesen, in der die Wahl auf eine Kombination der Filter fällt, in der immer jene Filter enthalten sind, die bereits am längsten in Betrieb sind (am meisten BV). In den Simulationen wurde eine 5%ige Sicherheitsmarge dazugerechnet, d.h. die älteste Filterzelle wurde bereits erneuert, wenn die Eliminationsleistung des Gesamtablaufs unter 85% statt der gesetzlich verlangten 80% fiel. Nachfolgend die Kriterien für das Filterregime bzw. Steuerung der Filterzellen:

- Basierend auf dem Zulauf wird die Anzahl Filter berechnet, wobei die Kontaktzeit vom 20 Minuten stets eingehalten werden muss.
- Es wird geprüft, ob alle Filter in den letzten 48 h mindestens einmal genutzt wurden, um sicherzustellen, dass die sich im Filter entwickelnde Biologie mit ausreichend Sauerstoff versorgt wird und intakt bleibt.
- Wird nur ein Filter benötigt, fällt die Wahl auf den Filter mit den meisten Bettvolumen, der eine Eliminationsleistung > 85% hat.
- Wenn zwei Filter benötigt werden, wird dabei die Kombination von Filtern gewählt, die in der Summe bereits am meisten BV erreicht haben. Die Eliminationsleistung von 85% im Gesamtablauf muss stets erfüllt sein.

- Wenn drei Filter benötigt werden, fällt die Wahl auf die Kombination von Filtern, die in der Summe bereits am meisten BV erreicht haben. Die Eliminationsleistung von 85% muss erfüllt sein.
- Ausserdem muss die Eliminationsleistung für jede Kombination auch ohne den Filter mit den wenigsten BV > 85% möglich sein, da ein Filter als Reserve dienen soll.
- Sobald die Eliminationsleistung von 85% nicht mehr erreicht werden kann, wird die GAK des ältesten Filters (der Filter mit den meisten BV) mit neuer GAK ersetzt.

In *Figur 4* sind die simulierten Eliminationsleistungen der einzelnen Filterzellen sowie die mittlere Eliminationsleistung der vier Filterzellen im Verlauf der Simulationszeit abgebildet. Die einzelnen Filterzellen konnten bis zu einer Eliminationsleistung von 70–75% weiterverwendet werden, ohne dass die mittlere Eliminationsleistung dabei unter 85% fiel [7]. Die dicken Linien in der Eliminationsleistung entstehen dadurch, dass die Eliminationsleistungen bei Regenwetter und Trockenwetter unterschiedlich sind und wegen der Skalierung optisch zusammenfallen. Bei den mit Trinkwasser simulierten Regenwetterereignissen

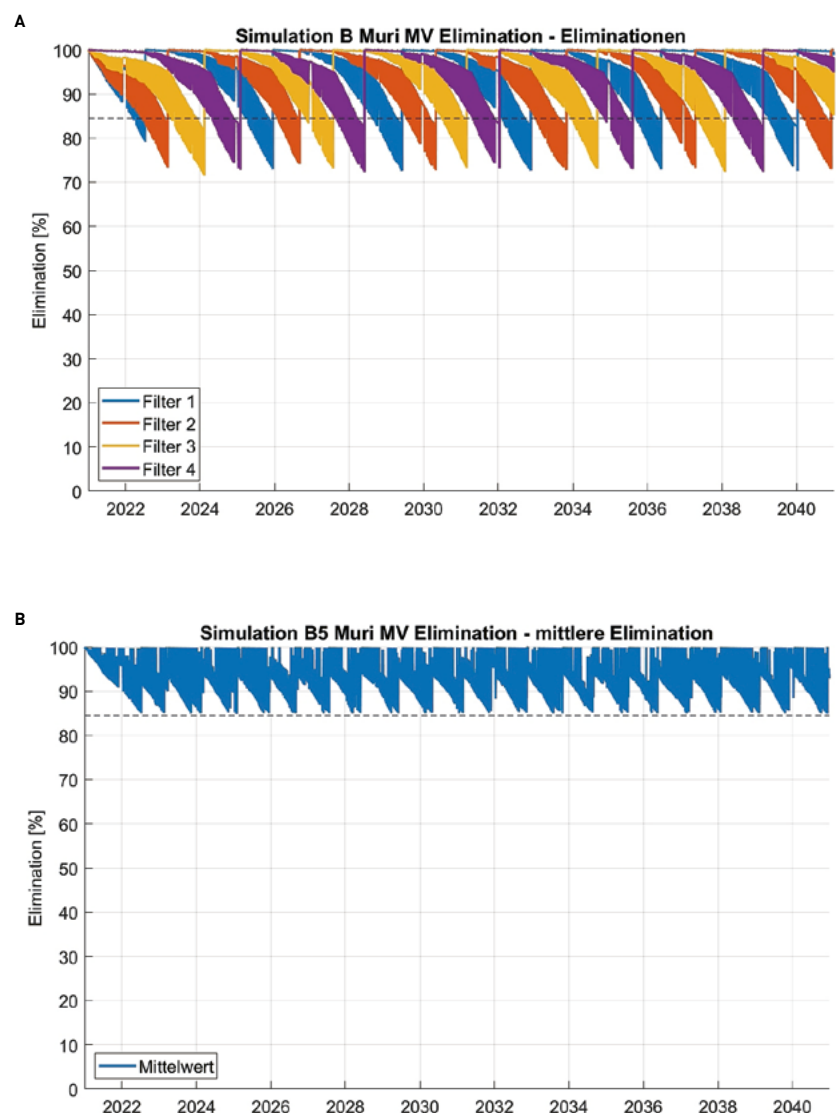


Fig. 4 A Eliminationsleistungen der einzelnen Filterzellen bei optimierter Parallelschaltung für eine zwanzigjährige Simulation [7].

B Mittlere Eliminationsleistung aller Filterzellen bei optimierter Parallelschaltung für eine zwanzigjährige Simulation [7].

	erreichbare BV	Standzeit/Austauschintervall der GAK in Jahren	genutztes Kohlevolumen (m ³)
Nullvariante mit einer Filterzelle mit V = 200 m ³ ohne optimierte Steuerung	20 000	2,1	1800
Parallelschaltung mit vier Filterzellen mit V = 50 m ³ und optimierter Steuerung	32 000	3,5	1300

Tab. 1 Vergleich der erreichbaren Bettvolumen (BV) und Kohleverbräuche zwischen einem Betrieb eines Einzelfilters und einer Verschaltung mehrerer Filterzellen im Parallelbetrieb

(Verdünnung der Abwassermatrix) wurde an verschiedenen Messstellen innerhalb des Filterbetts festgestellt, dass es wegen des verdünnten Zuflusses und der tiefen Stoffkonzentration zu mittleren Eli-

minationseinbußen von rund 10% über das gesamte Filtrivolumen kam. Dies gibt Hinweise, dass ggf. Desorption einzelner Leitsubstanzen stattfindet. Dies ist aber noch nicht sicher abgeklärt bzw. belegt.

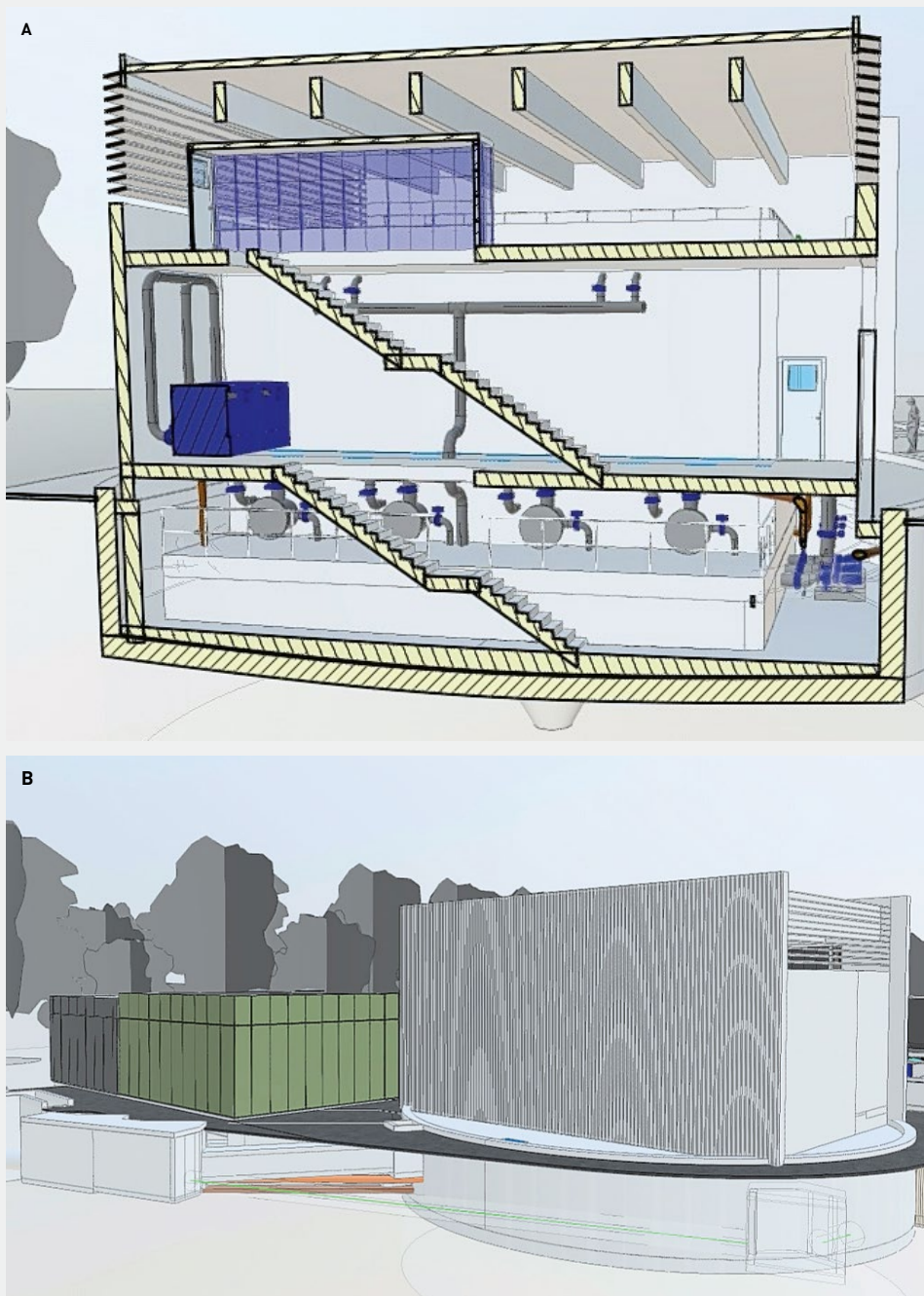


Fig. 5 A Schnitt durch das neue GAK-Filtergebäude auf der ARA Muri. Der Anschluss an den bestehenden Ablaufkanal ist in B erkennbar.

2023 sollen hierzu spezifische Versuche an der Eawag im Pilotmassstab stattfinden.

Die Simulationen verschiedener Varianten haben gezeigt, dass mit parallelem Betrieb von vier Filterzellen und entsprechenden Vorgaben für die Filterschaltung mehr als 30 000 BV pro Filterzelle erreicht werden können (Tab. 1). In einem zwanzigjährigen Betrieb kann die GAK-Filtration so im Vergleich zu einem nicht parallelen Betrieb bis zu 1,5-mal länger betrieben werden, wodurch bis zu einem Drittel der Kohle eingespart werden kann und somit der Nachhaltigkeit Rechnung getragen wird. Für die Umsetzung eines solchen Steuerkonzepts müssen pro Filterzelle die durchgesetzten BV bekannt sein, d. h. es braucht zwingend eine Durchflussmessung im Zulauf und es muss stets bekannt sein, wie viele und welche Filterzellen betrieben werden.

EINBINDUNG IN DIE BESTEHENDE INFRASTRUKTUR

Die GAK-Filtration wird am Standort des ehemaligen Nachklärbeckens realisiert, das in den letzten Jahren für die statische Schlammmentwässerung genutzt wurde. Der Faulschlamm wird in Muri neu mit einer Schneckenpresse maschinell entwässert, weshalb der Standort für die GAK-Filtration genutzt werden kann. Der Standort hat sich als ideal erwiesen, unter anderem weil die Distanz zum Ablauf der Sandfiltration und damit hydraulische Verluste gering sind. Zudem werden durch die Weiternutzung vorhandener Infrastrukturen Einsparungen in Bezug auf Baugrubensicherung, Grundwasserabsenkung sowie Aushub und Rückbau ermöglicht. Durch die Vermeidung von Abbruchmaterial und Einsparung von neuen Baumaterialien wird auch der Nachhaltigkeit Rechnung getragen.

Der geplante Neubau sieht vor, die vorhandenen Strukturen möglichst weiter zu nutzen und Filterzellen, Schlammwasserbecken, Betriebsraum etc. in das bestehende Gebäude zu integrieren. Auch eine Anbindung an den Leitungsgang und den alten Ablaufkanal sind vorgesehen. Die Anordnung von Spül- und Schlammwasserbecken sowie Betriebs- und Elektroraum wurde so angepasst, dass alle Bedienelemente gut zugänglich sind und ausreichend Platz für den Betrieb und die Wartung der Aggregate vorhanden ist.

Bei der Anordnung der verfahrens- und elektrotechnischen Komponenten wurde eng mit dem Betrieb zusammengearbeitet, um deren Platzierung im Hinblick auf Nutzbarkeit, Zugänglichkeit, Platzverhältnisse optimal zu gestalten. Um zudem der Verbindung von Funktionalität und Ästhetik nachzukommen, wurde eine Architektin beauftragt, die optimale Integration des neuen GAK-Gebäudes ins bestehende Gestaltungskonzept der ARA Muri sicherzustellen (Fig. 6). Die Planungs- und Arbeitsmethode *Building Information Modeling* (BIM) unterstütze dabei die Zusammenarbeit zwischen Bauherrschaft, Betrieb, Planer, Architekt und Fachplanern, indem alle fachbereichsübergreifenden Informationen in einer Datenbank zusammengefasst werden konnten und die dreidimensionale Darstellung eine realitätsnahe Visualisierung unter anderem der Zugänge, der Schnittstellen zwischen Bestand und Neubau sowie des Gebäudeaufbaus insgesamt ermöglichte.

AUSBLICK

In den kommenden Jahren werden die Erkenntnisse aus der Forschung dank der geplanten Realisierungen mit wichtigem Praxiswissen ergänzt, wodurch die Empfehlungen von Eawag und VSA möglicherweise konkretisiert und optimiert werden können. Aktuelle Forschungsarbeiten zum Thema Desorption bei Regenwetter an der Eawag sollen zudem wichtige Erkenntnisse liefern, wie sich die Eliminationsleistung für verschiedene Substanzen bei verdünntem Zufluss verändert. Sicherlich wird mit der GAK-Filtration weiterhin eine robuste Technologie zur Verfügung stehen, die dank der Reaktivierbarkeit der Kohle auch im Bereich Nachhaltigkeit punkten kann.

In Muri ist die Realisierung im Jahr 2023 vorgesehen. Bis dahin müssen noch die Baumeisterarbeiten vergeben werden, zudem sollen Abbrucharbeiten sowie



Fig. 6 Das neue GAK-Gebäude auf der ARA Muri, Architektur Mireya Heredero, Architektin ETH SIA.

(Visualisierung: © Nighnurse Images, Zürich)

einige Ausbesserungen im bestehenden Becken durchgeführt werden, so dass im Frühjahr unmittelbar mit dem Bau gestartet werden kann. Voraussichtlich im Spätherbst 2023 wird dann das erste mit granulierter Aktivkohle behandelte und bezüglich Mikroverunreinigungen gereinigte Abwasser von der ARA Muri über die Bünz, den Aabach, die Aare und den Rhein schlussendlich in die Nordsee fließen.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Meier, A.; Remy, C. (2020): Klimafreundlich Gewässer schützen – CO₂-Fussabdruck verkleinern bei der Elimination organischer Spurenstoffe auf Kläranlagen. *Aqua & Gas* 2
- [2] Böhler, M. et al. (2020): Elimination von Spurenstoffen durch granulierte Aktivkohle-Filtration (GAK): Grosstechnische Untersuchungen auf der ARA Furt, Bülach, Schlussbericht Eawag, Dübendorf, Schweiz
- [3] Böhler, M. et al. (2019): Hinweise zur Planung und Auslegung von diskontinuierlich gespülten GAK-Filtern zur Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Konsenspapier zum Ergebnis des Workshops vom 9.12.2019 an der Eawag
- [4] Böhler, M. et al. (2013): Berichterstattung – Ergänzende Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der ARA Neugut, Bafu, Bern
- [5] Kessler, M. (2019): Masterprojektarbeit – Ausbau ARA Muri mit Stufe zur Entfernung von Mikroverunreinigungen, ETH Zürich
- [6] Benstömm, F. et al. (2016): Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen: Ein Überblick über halb- und großtechnische Untersuchungen – Teil 2: Methoden, Ergebnisse und Ausblick, Korrespondenz Abwasser, Abfall 2016 (63) Nr. 4
- [7] Bühler, T. (2019): Masterprojektarbeit – Pilotierung und Umsetzung der GAK-Filtration zur Spurenstoffelimination auf der ARA Muri, ETH Zürich
- [8] McArdell, C.S. et al. (2020): Pilotversuche zur erweiterten Abwasserbehandlung mit granulierter Aktivkohle (GAK) und kombiniert mit Teilozonung (O₃/GAK) auf der ARA Glarnerland (AVG), Ergänzende Untersuchungen zur PAK-Dosierung in die biologische Stufe mit S-select®-Verfahren in Kombination mit nachfolgender GAK. Schlussbericht Eawag, Dübendorf, Schweiz