

LANGSAMSANDFILTRATION – NEUE PERSPEKTIVEN IN DER INDIVIDUELLEN TRINKWASSERVERSORGUNG

Die Nachfrage nach Lösungen zur Trinkwasseraufbereitung in dezentralen und vor allem alpinen Regionen steigt stetig. Um dieser gerecht zu werden, wurde ein kompaktes Filtersystem entwickelt, das aus einer Kombination von Kies- und Langsamsandfiltration besteht und ohne Strom oder den Zusatz von Chemikalien auskommt. Die Anwendung stellt auch für Entwicklungsländer eine interessante Perspektive dar.

Daniel Urfer, Johann Gigandet, RWB Groupe SA
Franz Störch, Etertub AG*

In abgelegenen und wenig erschlossenen Gebieten kann die Bereitstellung von Trinkwasser eine grosse Herausforderung darstellen. Dies gilt insbesondere auch für Bergregionen in der Schweiz. Hier kann der Anschluss an das nächste Trinkwassernetz unmöglich oder unverhältnismässig kostenintensiv sein. Die Wasserversorgung erfolgt dann in aller Regel individuell, d.h. mit Quellen vor Ort. Deren Qualität kann je nach Topografie, Bodenbeschaffenheit oder Nutzung des Einzugsgebietes stark variieren. So können Starkniederschlagsereignisse zu hohen Trübungswerten oder zum starken Auftreten von *E. coli* oder En-

terokokken führen. Wegen der isolierten Lage mit unzureichender Infrastruktur und fehlender Elektrizität können jedoch herkömmliche Aufbereitungsanlagen oft nicht installiert werden. Mit dem Ziel, eine nachhaltige und praktikable Lösung für die individuelle Wasseraufbereitung in entlegenen Regionen zu finden, wurde von RWB Groupe SA und Etertub AG in enger Zusammenarbeit mit Wissenschaft, Ingenieurdienstleistung und Wirtschaft der *kls*®-Filter entwickelt. Dabei handelt es sich um ein mehrstufiges Behandlungssystem, das sich auf die Reinigungsleistung der Kies- und Langsamsandfiltration stützt und somit ein Multibarrierensystem darstellt.

RÉSUMÉ

FILTRATION LENTE SUR SABLE – DES PERSPECTIVES DANS LE CADRE DE L'APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE INDIVIDUEL

Afin de répondre à une demande toujours plus croissante dans le traitement d'eau potable dans les régions décentralisées, notamment dans les régions montagneuses, le bureau RWB et l'entreprise Etertub ont développé un système de filtration compact fonctionnant sans électricité ni ajout de produit chimique. Les perspectives d'utilisation de ce système de filtration dans les pays en voie de développement sont également intéressantes. Ce système entièrement préfabriqué, appelé *kls*®-filter, est basé sur les technologies éprouvées de la filtration sur graviers et la filtration lente.

Grâce à sa construction modulaire compacte, ce système peut être installé dans les régions difficiles d'accès, par exemple pour des chalets isolés ou encore des restaurants d'altitude. Avec une dizaine de *kls*®-filter installés en Suisse et un projet en cours au Burkina Faso, les concepteurs du système ont acquis une expérience importante et peuvent désormais garantir la production d'une eau potable de qualité et répondant aux normes actuelles.

L'expérience acquise et les divers essais pratiqués sur un filtre test ont permis également d'affiner et améliorer les performances du traitement. Ainsi, l'abattement de la turbidité peut être considéré comme excellent avec des résultats en-dessous de 0,1 FTU. La performance microbiologique atteint quant à elle entre 99 et 99,9% d'élimination pour *E. coli* et Entérocoques pour un système biologiquement mature.

FILTRATION IN DER WASSERAUFBEREITUNG

HISTORIE

Die Kies- und Langsamsandfiltration gehören zu den ältesten Verfahren der Wasseraufbereitung. Ihre Wirkungsweise wurde bereits vor gut 200 Jahren beschrieben und lässt sich gut mit den Prozessen bei der Bodenpassage von Wasser vergleichen [1]. Bereits 1804 bereitete man mit dem Verfahren Prozesswasser aus Wäschereien auf. Mit zunehmender Bevölkerungsdichte, insbesondere durch die aufkommende Industrialisierung, wurde Trinkwasser auch im grossen Massstab durch Langsam-

*Fig. 1 Langsamsandfilter in Farlington, UK
Filtre lent sur sable à Farlington, Angleterre*

* Kontakt: daniel.urfer@rwb.ch

FILTERSYSTEM

FUNKTIONSWEISE

Die ersten *kls*[®]-Filter wurden für Wassermengen von rund 5 m³ pro Tag ausgelegt. Dies entspricht dem durchschnittlichen Verbrauch eines landwirtschaftlichen Betriebes oder eines kleineren Weilers. Es wurden jedoch auch bereits Filter für bis zu 30 m³ pro Tag realisiert. Für kleinere Verbrauchereinheiten sollen in Zukunft Systeme mit ca. 400 l pro Tag verfügbar sein. Das Filtersystem ist folgendermassen aufgebaut (Fig. 3 und 4):

- Die Filterkammer ist vollständig aus Polyethylen (PE) vorgefertigt. Der Vorteil liegt hierbei zum einen im geringen Gewicht, zum anderen kann auf den Erfahrungen mit vorgefertigten Brunnenstuben aufgebaut werden. Somit kann sich die SVGW-Zertifizierung für den *kls*[®]-Filter darauf abstützen.
- Die eigentliche Aufbereitung des Wassers erfolgt - je nach Aufgabenstellung - über ein oder zwei Kiesfilter als Vorfilter und in zwei Langsandsandfilterkammern.
- Die Anströmung des Filters erfolgt durch Schwerkraft.
- Die Filtrationsgeschwindigkeit wird mithilfe eines Regelventils am Ausgang des Filters eingestellt. Dabei durchströmt das Wasser zunächst ein Einlaufbecken, aus dem über einen sogenannten Strümpel das Überschusswasser überläuft.
- Der Kiesfilter wird im Aufstrom durchströmt, die Langsandsandfiltration im Abstrom.

Fig. 2 Beispiel eines in der Schweiz installierten *kls*[®]-Filters
Exemple de filtre *kls*[®] installé en Suisse

sandfiltration aufbereitet (Fig. 1). Beispiele hierfür finden sich in Grossbritannien, Deutschland, Holland oder der Schweiz. Durch die Langsandsandfiltration konnten Anfang des 20. Jahrhundert in Zentraleuropa wasserbedingte Krankheiten wie die Cholera fast vollständig ausgerottet werden. Den Nachweis hierfür lieferten *Louis Pasteur*, *Robert Koch* und *Theodor Escherich*, die den Zusammenhang zwischen dem Auftreten pathogener Keime im Wasser und der Cholera aufdeckten [2]. Die Elimination von pathogenen Mikroorganismen durch Langsandsandfiltration konnte in der Folge in vielen wissenschaftlichen Arbeiten bestätigt werden. Angaben zur Rückhalteleistung gegenüber Bakterien, Viren und Protozoen, wie *Giardia lamblia* und *Cryptosporidium parvum*, finden sich in der Literatur [3-7].

Noch heute stützen grosse Wasserversorger einen Teil ihrer Wasseraufbereitung darauf ab, so zum Beispiel London oder Zürich. Mit dem Aufkommen anderer Aufbereitungsmethoden, wie der bis zu 100-mal schnelleren Schnellfiltration, verlor die Langsandsandfiltration allerdings immer mehr an Bedeutung.

AKTUELLE SITUATION

In den letzten Jahren wurden jedoch wieder die Vorteile der Kies- und Langsandsandfiltration erkannt, und es ist eine regelrechte Renaissance zu beobachten. Insbesondere für kleine Aufbereitungssysteme in Regionen, wo Alternativen fehlen, weist das Verfahren einige Vorteile auf. Diese sind im Wesentlichen:

- einfache Installation
- stromfreier Betrieb
- keine Verwendung von Chemikalien
- stabiler Prozess gegenüber Zulaufschwankungen
- wartungsarm
- geringe Betriebskosten

SITUATION IN DER SCHWEIZ

Dezentrale und schwer zugängliche Regionen fernab bestehender Wasserversorgungen finden sich nicht nur in Entwicklungsländern, sondern auch im Wasserschloss Schweiz. Hier konnten in den letzten drei Jahren etwa zehn *kls*[®]-Filter in Betrieb genommen werden bzw. stehen kurz davor (Fig. 2). Sie befinden sich in den Kantonen FR, JU, LU, SG und ZG und dienen vornehmlich der Aufbereitung von privaten Quellen. Ein weiterer Filter konnte durch Spendengelder finanziert in ein noch entlegeneres Gebiet in Burkina Faso entsendet werden. Im letzteren Fall war vor allem wichtig, dass das System wartungsarm und robust ist [8]. Der älteste *kls*[®]-Filter in der Schweiz wurde in St-Ursanne (JU) installiert und ist seit 2002 erfolgreich in Betrieb.

Fig. 3 Funktionsprinzip des Filtersystems

Principe de fonctionnement du système de filtration

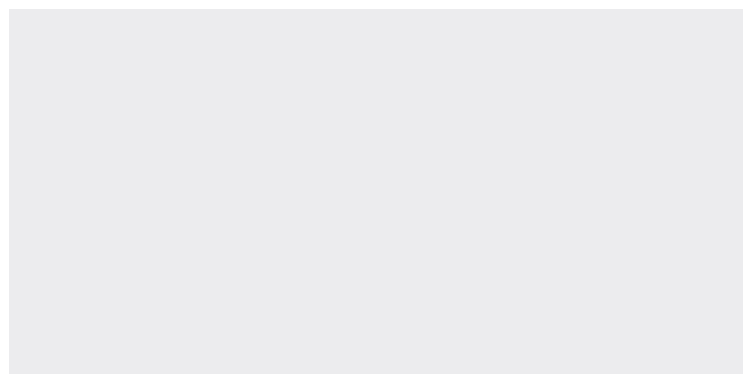


Fig. 4 Fliessschema des Filtersystems

Schéma d'écoulement du système de filtration

- Die Dimensionierung der einzelnen Stufen, wie Höhe des Filtermediums, Korngrösse und Filtrationsgeschwindigkeit, entsprechen dem Stand der Technik gemäss wissenschaftlicher Literatur [3, 9-11].
- Die zweistufige Langsandsandfiltration in Serie ist robust gegenüber Rohwasserschwankungen und ermöglicht einen sicheren Betrieb.

UNTERHALT

Die Unterhaltsarbeiten am *kls*®-Filter beschränken sich auf das Rückspülen des Kiesfilters und das Abtragen der Schmutzdecke an der Oberfläche der Langsandsandfilter im Falle eines zu grossen Druckverlustes. Der Kiesfilter wird durch eine Schnellentleerung der Einlaufkammer durch Ziehen des Strümpfels rückgespült. Die Schmutzdecke (ca. 2 bis 3 cm) wird manuell-mechanisch entfernt, um den hydraulischen Widerstand der Langsandsandfilter zu senken. Die Unterhaltsarbeiten sind stark abhängig von den Umgebungsbedingungen, und ihre Frequenz liegt in aller Regel zwischen zwei und zwölf Monaten.

WIRKUNGSWEISE DES FILTERS

Die Reinigungsleistung des Filtersystems basiert im Wesentlichen auf drei verschiedenen, ineinandergreifenden Reinigungsprozessen:

- Mechanische Reinigung: Die mechanische Reinigungsleistung lässt sich am ehesten mit einem Siebeffekt vergleichen, bei dem grössere Partikel im Zulauf durch kleine Porendurchmesser zurückgehalten werden. Eine sich einstellende Filterkuchenbildung an der Oberfläche kann die Rückhalteleistung verstärken.
- Adsorptive Reinigung: Durch die Tiefenfiltration in den einzelnen Filterstufen kommt es neben dem mechanischen Rückhalt zu ladungsbedingtem Partikelrückhalt. Oberflächenladungen, wie sie bei jedem Partikel in der Natur vorkommen, führen zur adsorptiven Retention der Partikel am Füllmaterial.
- Mikrobiologische Reinigung: Die Wahl des Filtermediums hat einen entscheidenden Einfluss auf die Retentionsleistung des Langsandsandfilters. Resultate hierzu werden im nächsten Absatz dargestellt.

AUFBAU EINER PILOTANLAGE

Um Erfahrungen bei Betrieb und Reinigungsleistung sammeln zu können, wurde eine Pilotanlage in Porrentruy (JU) in Betrieb genommen. Aufbereitet wird hier das Wasser des Bacavoinnes, eines typischen Bachs aus Karst-Quellgebiet mit entsprechend hoher Zulaufvariabilität. So können hier die Trübungswerte in-nerhalb weniger Stunden um mehrere 100 FTU schwanken, ein Worst-Case-Szenario für Filtrationsanlagen. In *Figur 5* ist die Ganglinie der Rohwasserqualität im Zulauf sowie die Reinigungsleistung am Ausgang des Filters dargestellt.

Wegen der grossen Trübungsraten im Zulauf wurde die Pilotanlage mit zwei Kiesstufen ausgerüstet. Damit sollte die erste Langsandsandstufe zusätzlich entlastet werden. In der Literatur finden sich Hinweise, dass die Trübung im Zulauf zur Langsandsandfiltration 10 FTU nicht übersteigen sollte, um ein zu häufiges Abtragen der obersten Schicht der ersten Sandstufe zu vermeiden [3]. Für Testzwecke wurde die zweite Langsandsandstufe in vier parallele, separat durchströmbare Filter unterteilt. Diese können simultan betrieben werden und erlauben es, verschiedene Filtermedien zu vergleichen (*Fig. 6*). Untersucht wurden standardmässiger Quarzsand (Sand A) und oberflächenmodifizierter Sand (Sand B, Filter 606, Filter 607).

ELIMINATION PATHOGENER MIKROORGANISMEN

Besonderes Augenmerk kommt bei der Langsandsandfiltration der biologischen Reinigungsstufe zu. Im Gegensatz zur Schnellfiltration bildet sich bei der Langsandsandfiltration eine sogenannte Schmutzdecke aus: eine biologisch aktive Schicht in den ersten Zentimetern der Sandstufe. Sie besteht aus einer Mischung von mineralischen und organischen Partikeln. Hier siedeln sich nach einer gewissen Reifezeit Mikroorganismen an und übernehmen bis zu 90% der biologischen Reinigungsleistung, also auch der Reduktion von *E. coli* oder Enterokokken [z.B. 10]. Die Reifedauer der Schmutzdecke ist stark abhängig von der Rohwasserqualität, der Wassertemperatur, der Partikelbelastung und der Konzentration des organischen verfügbaren Materials [11].

Bei vollständig eingefahrenen Langsandsandfiltern beträgt die Eliminationsrate gegenüber Mikroorganismen wie *E. coli* und

Fig. 5 Veränderung der Trübung im Roh- und Reinwasser der Pilotanlage zwischen dem 1. und 9. Januar 2012. Gemäss FIV liegt der Toleranzwert für Trübung bei 1 FTU

Modification de la turbidité dans l'eau brute et pure de l'installation pilote entre le 1^{er} et le 9 janvier 2012. Selon l'OSEC, la valeur de tolérance pour la turbidité est de 1 FTU

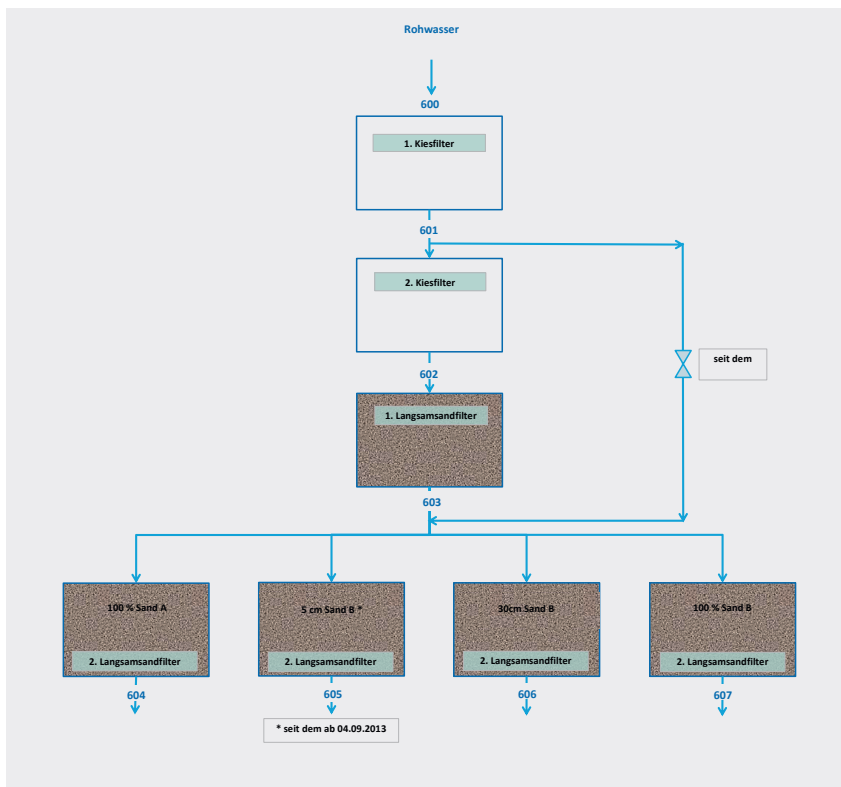


Fig. 6 Funktionsschema der Pilotanlage in Porrentruy (JU)

Schéma de fonctionnement de l'installation pilote à Porrentruy (JU)

Viren 2 bis 3 log-Stufen, also 99 bis 99,9% [3, 4, 7, 12, 13]. Bei Protozoen vom Typ *Giardia* und *Cryptosporidium* liegen die Werte sogar zwischen 3 bis 6 log-Stufen [7, 14]. Dies ist wahrscheinlich auf den grösseren Durchmesser (4 bis 7 µm) der Protozoen verglichen mit Bakterien (ca. 1 µm) zurückzuführen.

Neuere Untersuchungen konnten zeigen, dass sich die Anwesenheit von Aluminiumpartikeln in natürlichen Gewässern positiv auf das Rückhaltevermögen von Langsandsandfiltern auswirkt [15]. Aluminium kommt mit 8,1% als dritthäufigstes Element und damit als häufigstes Metall in der Erdkruste vor.

Die mikrobiologische Retentionsleistung der Pilotanlage ist in den Tabellen 1 bis 3 dargestellt. Der Effekt der Ausbildung der Schmutzdecke auf die Reinigungsleistung des Langsandsandfilters lässt sich an den in Tabelle 1 zusammengefassten Ergebnissen erkennen. Um die Retention der Mikroorganismen in den Langsandsandfiltern mit den beiden Sanden A und B zu vergleichen, wurde ab dem 11. Juni 2013 Wasser vom Auslauf des ersten Kiesfilters während ca. 48 h vor den jeweiligen Probenahmen direkt auf die vier parallelen Langsandsandfilter geführt (Fig. 6). Die Resultate (Tab. 2 und 3) weisen darauf hin, dass mit oberflächenmo-

difiziertem Sand (Sand B) bessere Reinigungsleistungen erzielt werden können.

ELIMINATION DER TRÜBUNG

Die Trübung wurde sowohl im Roh- als auch im Reinwasser gemessen. Darüber hinaus wurden die Rückhalte-Effizienz der vier Versuchskammern mit den unterschiedlichen Sanden untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Unabhängig vom Trübungsgrad im Zulauf konnte die Pilotanlage dauerhaft

einen Trübungswert von unter 0,5 bis 1,0 FTU im Reinwasser gewährleisten. Dies gilt auch bei Starkniederschlagsereignissen mit Zulaufwerten > 100 FTU. Wurden optimierte Filtermedien (Sand B, Filter 606, Filter 607) verwendet, so war das Rückhaltevermögen gegenüber Partikeln am grössten. Ähnliches wurde bereits bei den mikrobiologischen Messungen beobachtet (Tab. 2 und 3). Das ähnliche Verhalten der für die Trübung verantwortlichen mineralischen Partikel und der Mikroorganismen kann in diesem Tiefenfiltrationssystem durch ähnliche Oberflächenladungen erklärt werden. In der Tat haben beide Gruppen beim charakteristischen pH-Wert natürlicher Gewässer eine negative Oberflächenladung [16–19].

Dabei ist festzuhalten, dass bei der Langsandsandfiltration keine Koagulationsmittel eingesetzt werden, die die negativen Oberflächenladungen der Partikel neutralisieren könnten. Vielmehr ist es die Oberflächenladung des Filtermediums, das für das optimierte Rückhaltevermögen verantwortlich ist. Zurzeit laufen verschiedene Versuche, um die Pilotanlage in dieser Hinsicht weiter zu optimieren. Das Ziel ist die Verbesserung der Eliminationsleistung gegenüber Partikeln und Mikroorganismen, insbesondere in der sensitiven Einlaufphase, in der sich die Schmutzdecke ausbildet.

FAZIT

Mit dem *kls*[®]-Filter steht ein einfaches, angepasstes und robustes Wasseraufbereitungssystem für die Trinkwasserver-

Datum	E. coli [KBE/100 ml]		Enterokokken [KBE/100 ml]	
	Einlauf 600	Auslauf 604	Einlauf 600	Auslauf 604
28.08.2012	520	15	780	14
06.09.2012	Elimination der Schmutzdecke auf dem ersten Filter			
17.09.2012	540	101	260	100
22.10.2012	157	9	22	4
19.11.2012	66	4	22	6
17.12.2012	162	2	160	0
07.01.2013	18	4	8	7
04.02.2013	75	1	60	0
11.03.2013	160	0	101	0
08.04.2013	33	0	15	1
27.05.2013	66	0	12	5

Tab. 1 Anzahl *E. coli* und Enterokokken im Rohwasser des Bacavoinen (600) und im Auslauf des zweiten Langsandsandfilters (604)

Quantité d'*E. coli* et d'entérocoques dans l'eau brute du Bacavoine (600) et à la sortie du filtre lent sur sable (604)

sorgung in abgelegenen Gebieten, auch in der Schweiz, zur Verfügung. Sein Betrieb ohne Elektrizität und chemische Zusätze prädestiniert ihn nachhaltig für die Herausforderungen unserer Gesellschaft: Zugang zur Ressource Trinkwasser ohne die Belastung anderer Ressourcen.

Aufgrund der modularen Kompaktbauweise kann das System gut optimiert und an die Rohwasserqualität angepasst werden, insbesondere, indem mit dem Füllmaterial gespielt wird. Somit können ungünstige Einflüsse in der Einlaufphase

wie tiefe Temperaturen oder Nährstoffarmut im Zulauf kompensiert werden. Mit einem eingefahrenen System können sowohl Trübung als auch mikrobiologische Verunreinigungen weitestgehend eliminiert werden: unabhängig vom Zulauf kann die Trübung des Reinwassers kontinuierlich unter 0,5 FTU gehalten werden. Die mikrobiologische Leistungsfähigkeit erreicht bei einem eingefahrenen System 99 bis 99,9% Elimination für *E. coli* und Enterokokken und kann durch Oberflächenmodifikation des Filtermediums noch weiter gesteigert werden.

Datum	E. coli [KBE/100 ml]				
	Einläufe 604–607	Auslauf 604	Auslauf 605	Auslauf 606	Auslauf 607
		100% Sand A	5 cm Sand A 5 cm Sand B* 70 cm Sand A	5 cm Sand A 30 cm Sand B 45 cm Sand A	100% Sand B
11.06.2013	1300	600	580	0	0
24.06.2013	178	38	13	0	0
19.08.2013	79	12	2	0	0
16.09.2013	37	23	4	1	0
14.10.2013	240	22	81	0	0

* Seit dem 04.09.2012; vorher: 80 cm von Sand A

Tab. 2 Anzahl *E. coli* im Ein- und Auslauf der zweiten Langsandsandfilterstufe
Quantité d'*E. coli* à l'entrée et à la sortie du second niveau de filtration lente sur sable

Datum	Enterokokken [KBE/100 ml]				
	Einläufe 604–607	Auslauf 604	Auslauf 605	Auslauf 606	Auslauf 607
		100% Sand A	5 cm Sand A 5 cm Sand B* 70 cm Sand A	5 cm Sand A 30 cm Sand B 45 cm Sand A	100% Sand B
11.06.2013	420	240	200	0	0
24.06.2013	170	28	2	0	0
19.08.2013	32	8	3	0	0
16.09.2013	14	16	3	0	0
14.10.2013	90	8	21	0	0

* Seit dem 04.09.2012; vorher: 80 cm von Sand A

Tab. 3 Enterokokken im Ein- und Auslauf der zweiten Langsandsandfilterstufe
Entérocoques à l'entrée et à la sortie du second niveau de filtration lente sur sable

Datum	Trübung [FTU]				
	Einläufe 604–607	Auslauf 604	Auslauf 605	Auslauf 606	Auslauf 607
		100% Sand A	5 cm Sand A 5 cm Sand B* 70 cm Sand A	5 cm Sand A 30 cm Sand B 45 cm Sand A	100% Sand B
11.06.2013	13,700	1,650	0,850	0,001	0,001
24.06.2013	1,800	0,170	0,001	0,001	0,003
19.08.2013	1,400	0,220	0,230	0,001	0,001
16.09.2013	1,900	0,230	0,002	0,001	0,001
14.10.2013	4,600	n,d	0,105	0,002	0,001
18.11.2013	1,200	0,100	0,002	0,001	0,001

* Seit dem 04.09.2012; vorher: 80 cm von Sand A

Tab. 4 Trübungswerte im Ein- und Auslauf der zweiten Langsandsandfilterstufe
Valeurs de turbidité à l'entrée et à la sortie du second niveau de filtration lente sur sable

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gujer, W. (2007): *Siedlungswasserwirtschaft* (3. Auflage), Springer Verlag
- [2] Grombach, P.; Haberer, K.; Merkl, G.; Trüeb, E.U. (2000): *Handbuch der Wasserversorgungstechnik* (3. Auflage), Oldenbourg, ISBN 3-486-26394-3
- [3] Huisman, L.; Wood, W.E. (1975): *La Filtration Lente*. OMS Genève
- [4] Bellamy, W.D. et al. (1985): *Removing Giardia cysts with slow sand filtration*. JAWWA 77: 52–60
- [5] Galvis, G.; Latorre, J.; Visscher, J.T. (1998): *Multi-Stage Filtration: an innovative water treatment technology*. IRC, The Hague, Netherlands and CINARA, Cali, Colombia
- [6] Hijnen, W.A.M. et al. (2004): *Elimination of viruses, bacteria and protozoan oocysts by slow sand filtration*. Wat. Sci. Technol. 50: 147–154
- [7] Hijnen, W.A.M. et al. (2007): *Removal and fate of Cryptosporidium parvum, Clostridium perfringens and a small-sized centric diatoms (Stephanodiscus hantzschii) in slow sand filters*. Water Res. 41: 2151–2162
- [8] SANDEC, *Water and Sanitation in Developing Countries*, Eawag (1996): *Surface Water Treatment by Roughing Filters*. ISBN 3-908001-67-6
- [9] WHO (2006): *Guidelines for Drinking Water*. ISBN 92 4 154696 4
- [10] Petry-Hansen, H. (2005): *Bakterielle Diversität von Biofilmen in Langsandsandfiltern*. PhD-Dissertation, Universität Duisburg-Essen
- [11] Partinoudi, V. et al. (2007): *Assessing Temperature Influences on Slow Sand Filtration Treatment Performance*. University of New Hampshire, Durham
- [12] *Wasserversorgung Zürich (2000): Zusammenstellung bakteriologischer Untersuchungen Quellwasser-Minifilter*. Unveröffentlichte Resultate
- [13] Karschunke, K. (2005): *Nutzung der Eisenkorrosion zur Entfernung von Arsen aus Trinkwasser*. Dissertation, Technische Universität Berlin
- [14] Cleary, S.A. et al. (2004): *Treatment of a variable turbidity surface water with multistage slow sand filtration*. Proc. AWWA WQTC, San Antonio, TX, USA
- [15] Weber-Shirk, M.L.; Chan, K.L. (2007): *The role of aluminum in slow sand filtration*. Water Res. 41: 1350–1354
- [16] Truesdail, S.E. et al. (1998): *Analysis of Bacterial Deposition on Metal (Hydro) oxide-Coated Sand Filter Media*. Journal of Colloid and Interface Science 203: 369–378
- [17] Elimelech, M. et al. (2000): *Relative Insignificance of Mineral Grain Zeta Potential to Colloid Transport in Geochemically Heterogeneous Porous Media*. Environ. Sci. Technol. 34: 2143–2148
- [18] You, Y. et al. (2005): *Removal and Inactivation of Waterborne Viruses using Zerovalent Iron*. Environ. Sci. Technol. 39: 9263–9269
- [19] Sukdeb, P. et al. (2006): *Removal of E. coli from Water Using Surface-Modified Activated Carbon Filter Media and its Performance over an Extended Use*. Environ. Sci. Technol. 40: 6091–6097