Praxismagazin für Trink- und Abwassermanagement wwt-online.de

wasserwirtschaft wassertechnik

6/2017

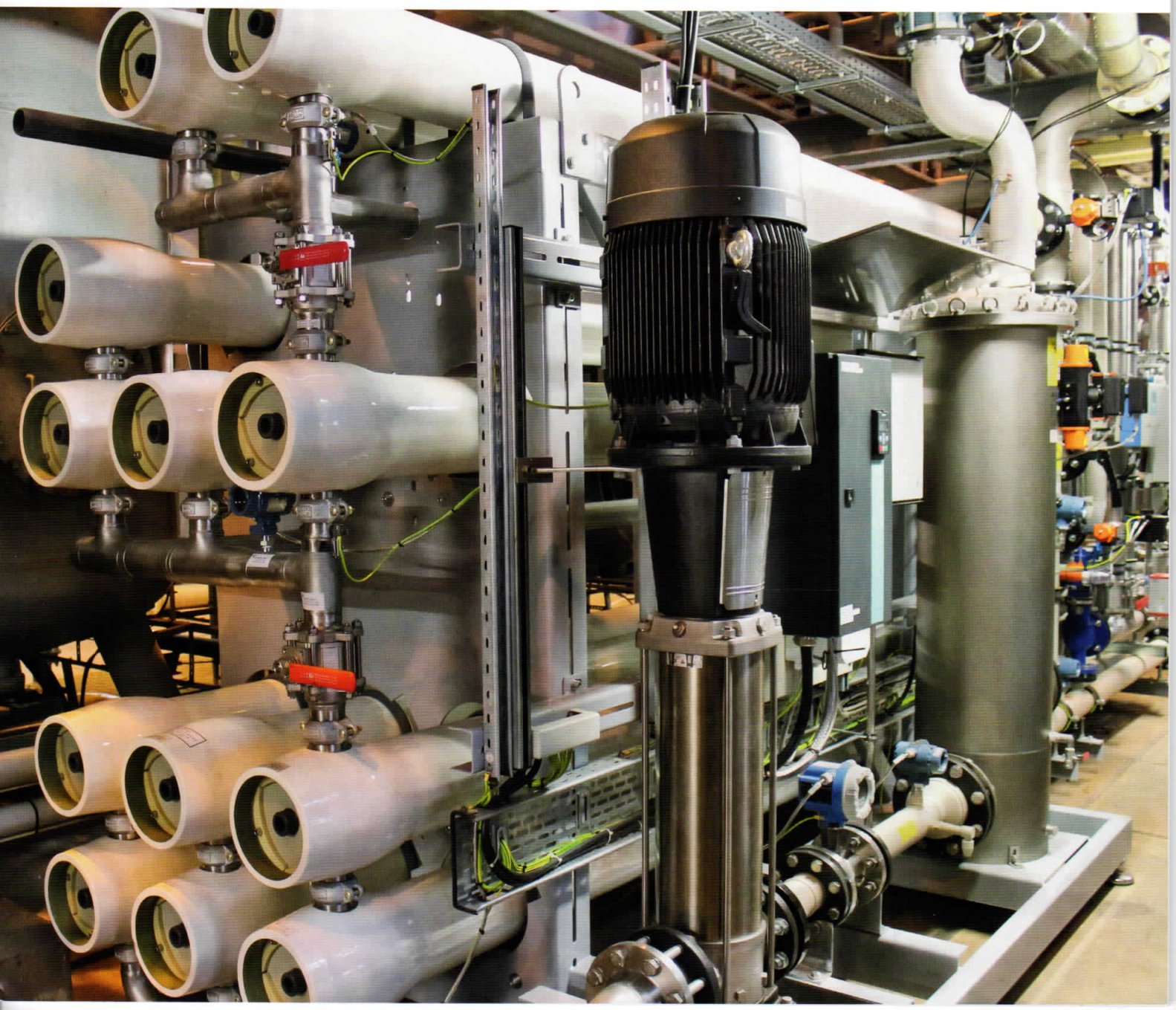
huss
HUSS-MEDIEN GmbH
10400 Berlin
A11195

Wasser + Abwasser 4.0
Digitale Bewirtschaftung der Gewässer
Seite 27

Recyclingverfahren
Phosphor aus Klärschlamm gewinnen
Seite 39

Mit 15 Seiten
SPECIAL
MEMBRANTECHNIK

Rohstoffe aus dem Abwasser
Seite 8



Ralf Bertling; Erwin Nolde

Pilotanlage zur Herstellung von Flüssigdünger aus Schwarzwasser

In einer Pilotanlage ist es gelungen, aus Schwarzwasser einen nährstoffreichen Flüssigdünger herzustellen, der mit konventionellen Düngern vergleichbar ist.

Im Rahmen des Projekts ROOF WATER-FARM (BMBF-Fördermaßnahme INIS) entwickelten die beiden Berliner Firmen Nolde & Partner und Lokus Wasserrecycling GmbH gemeinschaftlich mit dem Fraunhofer-Institut UMSICHT aus Oberhausen eine Anlage zur Aufbereitung von Schwarzwasser (siehe Bild 1). Diese ist seit Sommer 2015 in Betrieb.

Hintergrund

Häusliches Abwasser setzt sich im Alltag aus verschiedenen Wasserströmen zusammen. Hierzu zählen Toiletten-, Dusch-, Bade-, Küchen-, Wasch- und Waschmaschinenwasser. Die einzelnen Wasserströme sind unterschiedlich stark verschmutzt und enthalten verschiedene Inhaltsstoffe wie Fäkalien, Speisereste oder Waschmittel. Das Toilettenabwasser, bestehend aus Fäkalien, Toilettenpapier und Spülwasser, nennt man „Schwarzwasser". Das geringer verschmutzte, fäkalienfreie Abwasser wird als „Grauwasser" bezeichnet. Grauwasser und Schwarzwasser summieren sich zum Abwasser, das in der Regel gemeinsam über eine Abwasserleitung in die Kanalisation eingeleitet wird. Zur jeweiligen Nutzung von Grau- und Schwarzwasser jedoch muss zunächst eine Strangtrennung in zwei separate Abwasserleitungen erfolgen. Bei heutigen innovativen Abwasserkonzepten belässt man es in der Regel bei der Aufbereitung von Grauwasser aus Handwasch-, Dusch- und Badeabwässern, während Küchen- und Waschmaschinenabwässer mit dem Schwarzwasser ungenutzt in den Abwasserkanal geleitet werden. Die Aufbereitung von Schwarzwasser gestaltet sich aufgrund des höheren Verschmutzungsgrads aufwändiger als die des Grauwassers.

Schwarzwasser als Flüssigdünger

Aus dem Schwarzwasser sollte im Projekt ROOF WATER-FARM mit Hilfe einer geeigneten Technologie ein Flüssigdünger zur hydroponischen Pflanzenkultivierung erzeugt werden. In der konventionellen Abwasserbehandlung konzentrieren sich die im Abwasser enthaltenen Nährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium größtenteils im Klärschlamm. Dieser wird heute jedoch wegen enthaltener Schadstoffe (z. B. Schwermetalle und der schwer abbaubaren Flockungshilfsmittel, die der Abwasserbehandlung in der Kläranlage beigegeben werden) nur noch zu einem geringen Teil (rund 29 %) landwirtschaftlich genutzt /1/ und stattdessen überwiegend verbrannt. Somit geht ein Großteil des Nährstoffpotenzials aus dem Abwasser verloren. Die begrenzten Ressourcen von Phosphor sowie die energieaufwändige Herstellung von mineralischem Stickstoffdünger lassen es sinnvoll erscheinen, das Düngemittelpotenzial des Abwassers besser als bisher zu nutzen.

Während Grauwasser wenige Nährstoffe enthält /2/, ist Toilettenabwasser (Schwarzwasser) eine Ressource, die beachtliche Mengen an Phosphor, Stickstoff und Kalium enthält und sich somit potenziell als Nährstoffquelle und Dünger eignet. Jedoch ist vor allem Toilettenabwasser mit Keimen und Mikroschadstoffen, z. B. Arzneimittelrückständen, belastet. Zudem enthält Schwarzwasser Inhaltstoffe, die zwar biologisch abgebaut werden können, für deren Abbau die eingesetzten Bakterien aber erhebliche Mengen an Sauerstoff benötigen. Ein Verfahren zur Aufbereitung von Schwarzwasser zu hygienisch unbedenklichem Flüssigdünger muss deshalb Keime und Schadstoffe entfernen, die Sauerstoff zehrenden organischen Komponenten reduzieren und zugleich Stickstoff, Phosphor und Kalium erhalten.

Ziel von ROOF WATER-FARM ist es, im Schwarzwasser von handelsüblichen 6 Liter WC-Anlagen mit Spül-Stopp-Funktion möglichst viele Nährstoffe in pflanzenverfügbarer Form zu konservieren und zugleich die Schadstoff- und Organikfracht zu reduzie-

Empfehlung

Auf der Homepage von Nolde & Partner findet sich ein anschaulicher Beitrag zu Aquaponik und Hydronik.
Fischzucht und Gemüseanbau werden in der ROOF WATTER FARM von Berlin-Kreuzberg kombiniert. Sogar das Abwasser der Anwohnerhaushalte wird in „Gold" verwandelt.
Und: Trotz ihres Namens steht die Piloatanlage auf einem Hof – nicht auf dem Dach.
www.nolde-partner.de

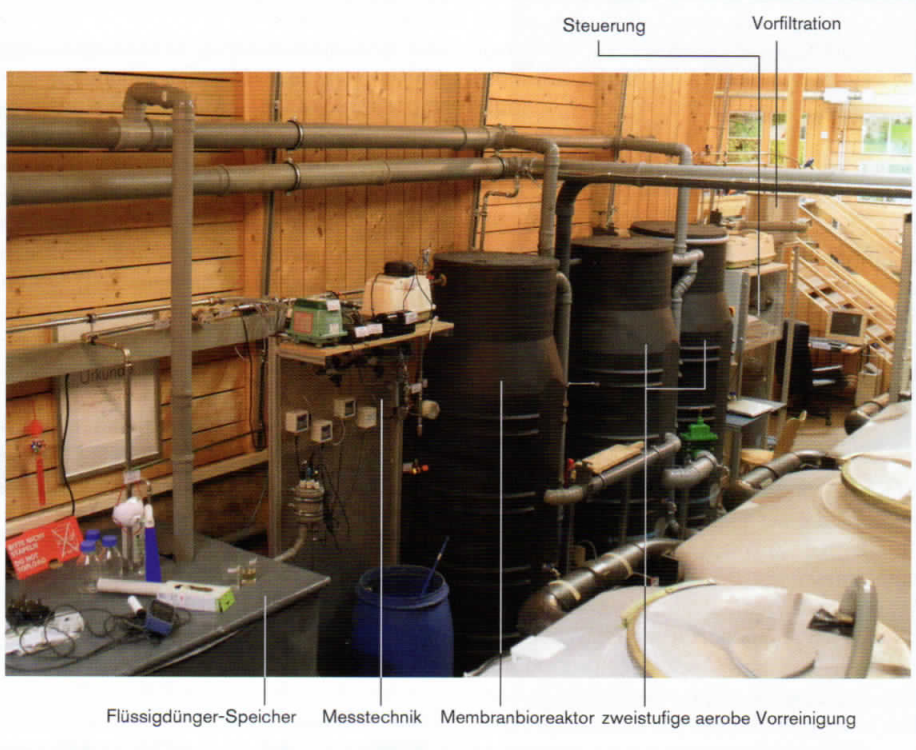


Bild 1 **Anlage zur Aufbereitung von Schwarzwasser** Quelle: Nolde & Partner

Bild 2 **Gläser mit Wasserproben** Quelle: Nolde & Partner

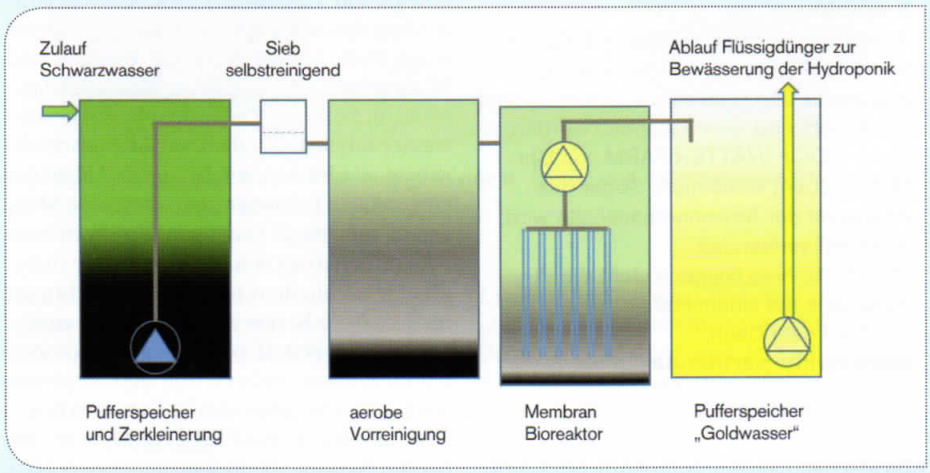


Bild 3 **Anlage zur Schwarzwasseraufbereitung** Quelle: Nolde & Partner

ren. Wissenschaftliche und technische Herausforderung im Projekt war somit das Erreichen einer Balance zwischen Wasserqualität (geringer Schadstoffgehalt, hygienisch unbedenklich) und Düngewert (hoher Gehalt an Pflanzennährstoffen). Bild 2 zeigt die zwei unterschiedlichen Abwasserströme Grauwasser und Schwarzwasser in unbehandelter und behandelter Form. Das zuvor trübe Grauwasser wird durch die Aufbereitung zu klarem Betriebswasser. Das trübe, bräunliche und geruchsintensive Schwarzwasser wird zum geruchsfreien, klaren Flüssigdünger. Der Flüssigdünger wird im Projektkontext wegen seiner leicht gelbgoldenen Färbung als „Goldwasser" bezeichnet.

Schwarzwasseraufbereitungsanlage

ROOF WATER-FARM erforscht die Technologie in einer Demonstrationsanlage und Teststrecke im Block 6, einem IBA-Wohnbau-Projekt von 1987 einem innovativen Wasserkonzept in Berlin-Kreuzberg (vgl. http://www.roofwaterfarm.com/). Zur Aufbereitung des Schwarzwassers wurde dort eine mehrstufige Anlage (siehe Bild 3), ähnlich einer miniaturisierten Kläranlage, konzipiert. Im Unterschied zur Kläranlage steht der Erhalt der Nährstoffkonzentration neben der Reduzierung bzw. Elimination von Chemischem Sauerstoffbedarf (CSB), Bakterien, Viren, Schwermetallen und Spurenstoffen im Fokus.

Die Schwarzwasseraufbereitungsanlage (SWAA) wurde als Pilotanlage modular entwickelt und setzt sich aus einer mechanischen Vorbehandlung, einer aeroben Behandlungsstufe und einem Membranbioreaktor zusammen (siehe Bilder 1 und 3). Erfasst und aufbereitet wird mit der SWAA das gesamte Toilettenabwasser von 50 Personen im Block 6, deren Sechs-Liter-Spül-Stopp-WCs mit Betriebswasser aus der Grauwasseranlage betrieben werden, was 20 % der gesamten in Block 6 anfallenden Schwarzwassermenge entspricht.Hieraus entstehen täglich bis zu 1.500 Liter Flüssigdünger. Der produzierte Flüssigdünger wird in einem Tank gespeichert und für eine Hydroponik zur Produktion von Nahrungsmitteln in einem benachbarten, vom brandenburgischen Unternehmen und Projektpartner Terra Urbana betriebenen Gewächshaus verwendet.

Das Schwarzwasser gelangt über die Hausinstallation und einen Bypass zur Abwasserleitung zunächst in einen Pufferbehälter. Der Pufferbehälter findet sich in einem Kellerraum. Die Aufbereitung erfolgt in einem separaten Anlagengebäude. Aus dem Pufferbehälter wird das Schwarzwasser deshalb über eine rund 80 m lange Druckleitung zur Aufbereitung gepumpt. Förderaggregat ist eine Schneidradpumpe, die beim Pumpen grobe Bestandteile im Schwarzwasser zerkleinert. Im nachfolgenden Filtrationsbehälter, der ersten Behandlungsstufe der Aufbereitung, werden Feststoffe > 1 mm aus dem Schwarzwasser abgetrennt. Der flüssige Filterüberstand gelangt weiter in die zweite Stufe, zwei parallel betriebene, belüftete Reaktoren. In den Reaktoren wird, ähnlich dem Belebungsbecken einer Kläranlage, durch Sauerstoffeintrag organische Fracht abgebaut. Das so vorbehandelte Schwarzwasser wird anschließend weiter in den Membranbioreaktor gepumpt. Hier werden mit Hilfe einer 35 nm-Membran (Modell siClaro® FM 611, Martin Membrane Systems) durch Ultrafiltration Keime und Schadstoffe aus dem Schwarzwasser entfernt.

Das Permeat aus der Membran ist identisch mit dem Zielprodukt: Flüssigdünger. Der Flüssigdünger wird in einem Vorratstank gespeichert und bei Nährstoffbedarf der Hydroponik zugeführt. Die im Prozess entstehenden Schlämme werden als Prozessrückstände vorerst noch in die Kanalisation geleitet. Mittelfristiges Ziel ist die Vergärung der Prozessschlämme zur energetischen Nutzung. Die gesamte Anlage ist mit Messtechnik ausgestattet, so dass verschiedene Parameter wie Durchflüsse, Temperaturen, pH-Wert, O_2-Konzentrationen und Füllstände überwacht werden können. Die

Tab. 1 **Analysewerte von unbehandeltem Schwarzwasser**

Datum/ Analyse	pH	CSB_{ges} (mg/l)	CSB_{gel} (mg/l)	N_{ges} (mg/l)	NH_4-N (mg/l)	NO_2-N (mg/l)	NO_3-N (mg/l)	P_{ges} (mg/l)
21.4.2016		1.194	516	310	230			17
27.4.2016								
28.4.2016		2.080	434	236	240	0	0	32
3.5.2016	8,6	1.912	299	222	144	0	0	34
4.5.2016	8,4	2.202	432	224	208	0	0	35
10.5.2016	8,7	1.576	300	178	162	0	0	38
12.5.2016	8,5	1.508	198	266	171			35
19.5.2016	8,5	1.460	257	263	170			28
Mittel	**8,5**	**1.790**	**320**	**231**	**183**	**0**	**0**	**34**

Quelle: /3/

Tab. 2 **Analysewerte von behandeltem Schwarzwasser (Flüssigdünger)**

Datum/ Analyse	pH	CSB_{ges} (mg/l)	CSB_{gel} (mg/l)	N_{ges} (mg/l)	NH_4-N (mg/l)	NO_2-N (mg/l)	NO_3-N (mg/l)	P_{ges} (mg/l)
21.4.2016		69		208	46		132	20
27.4.2016	7,9	172		132	78		29	18
28.4.2016	8,1	134		164	78		31	22
3.5.2016	7,5	174		198	58	64	53	29
4.5.2016	7,2	176	170	176	60	75	61	22
10.5.2016	7,3	160	151	262	26	92	66	26
12.5.2016	7,3	155	163	139	52	56	70	23
19.5.2016	7,5	137	152	180	48	31	64	29
Mittel	**7,5**	**158**	**159**	**179**	**57**	**64**	**53**	**24**

Quelle: /3/

Tab. 3 **Ergebnisse der Flüssigdünger-Analytik**

Parameter	Einheit	Min.-Wert	Max.-Wert
Blei	mg/l	< 0,02	0,03
Cadmium	mg/l	< 0,02	< 0,02
Kupfer	mg/l	0,07	0,08
Zink	mg/l	0,06	0,48
E. Coli	MPN*/100 ml	1	4
Enterkokken	MPN/100 ml	< 10	< 15
Clostridium P.	KBE**/100 ml	0	1
Legionellen	KBE/100 ml	< 100	< 500
Benzotiazol	µg/l	2,9	3,8
Carbamazepin	µg/l	3,9	4,2
Diclofenac	µg/l	0,18	0,22
Metoprolol	µg/l	5,6	6,2
Iopamidol	µg/l	< 0,1	< 0,1
Acesulfam	µg/l	33	36

* = most probable number
** = Kolonie-bildende Einheiten

Quelle: Laboruntersuchungen im Auftrag von Fraunhofer UMSICHT 2015

gesamte Aufbereitungsanlage kann kontinuierlich und vollautomatisch 24 Stunden am Tag betrieben werden. Mittels Datenfernübertragung lässt sich die Anlage über das Internet überwachen und steuern.

Ergebnisse

Die Tabellen 1 und 2 zeigen ermittelte Werte von unbehandeltem sowie von behandeltem Schwarzwasser. Die in den Tabellen dargestellten Werte stammen aus Versuchsreihen, die von April bis Mai 2016 im Rahmen einer von Fraunhofer UMSICHT und der TU Berlin gemeinsam betreuten Abschlussarbeit durchgeführt wurden /3/.

Vergleicht man die Werte der Nährstoffe von unbehandeltem und behandeltem Schwarzwasser, so wird deutlich, dass 72 % des Phosphors (24 mg/l zu 34 mg/l) und sogar 77 % des Stickstoffs (179 mg/l zu 231 mg/l) im Flüssigdünger verbleiben. Parallel wurde der CSB um mehr als 90 % reduziert. Die Konservierung der Nährstoffe bei gleichzeitiger Reduktion der organischen Fracht charakterisiert einen nährstoffreichen Flüssigdünger. Der aus dem Schwarzwasser produzierte Flüssigdünger ist überdies geruchsfrei, hat eine bernstein-goldene Farbe und ist lagerstabil.

Zur Schadstoffanalyse und gleichzeitig als Qualitätskontrolle werden regelmäßig Flüssigdünger-Proben entnommen. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse verschiedener Flüssigdünger-Untersuchungen. Dargestellt sind Minimal- und Maximalwerte an Schwermetallen, Hygieneparametern und Spurenstoffen.

Probleme mit Störstoffen in der Schwarzwasseraufbereitungsanlage

Im Laufe des Anlagenbetriebs ergaben sich anfangs häufiger Probleme mit Verstopfungen durch Feuchttücher und durch andere im Schwarzwasser mitgeführte Störstoffe (siehe Bild 4). Dies führte phasenweise zum Stillstand des Versuchsbetriebs und erforderte deshalb bauliche Veränderungen im mechanisch-physikalischen Teil der Aufbereitungsanlage.

Die Schneidradpumpe der SWAA hatte Schwierigkeiten, grobe Störstoffe soweit zu zerkleinern, dass sie in den nachgelagerten Leitungs- und Bauteilen keine Verstopfungen verursachen. Vor allem feuchte Reinigungstücher wurden aufgrund ihrer Zähigkeit schlecht durch die Schneidradpumpe zerkleinert, neigten außerdem zu „Verzopfungen" und verstopften die Leitung bis hin zum Siebfilter. Dadurch musste die SWAA einige Male außer Betrieb genommen werden. Zur Lösung des Problems war eine aufwändigere Art der Vorzerkleinerung der Störstoffe im Schwarzwasser erforderlich, da sich in diesem, neben unproblematischen, leicht zu zerkleinernden Inhaltsstoffen wie Fäkalien, Toilettenpapier und Essensresten

AQUALYTIC®

CSB-MESSPLATZ AL200 COD VARIO

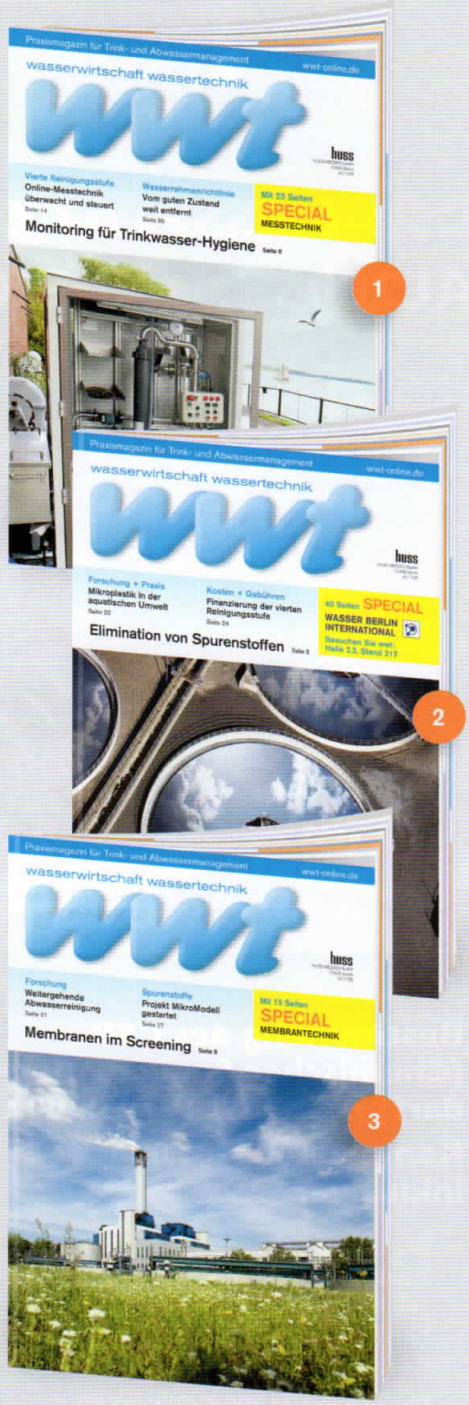
Bestimmung des CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf) nach ISO 15705:2002

Kompletter Messplatz inklusive:

- AQUALYTIC® Küvettentests COD VARIO gebrauchsfertig, je 25 Stück Niedriger Bereich: 0 - 150 mg/l Mittlerer Bereich: 0 - 1500 mg/l
- Photometer AL200 COD VARIO kompaktes Design Einfache Handhabung
- Thermoreaktor AL125 Zum Aufschluss von bis zu 24 Proben

AQUALYTIC®
Schleefstraße 12
44287 Dortmund
Tel. (+49)231/94510-0
Fax (+49)231/94510-30
www.aqualytic.de
verkauf@aqualytic.de

Probefahrt?



Testen Sie jetzt kostenlos **3** Ausgaben der Fachzeitschrift Wasserwirtschaft Wassertechnik und bestellen Sie noch heute unter: **www.wwt-online.de/shop**

Wasserwirtschaft Wassertechnik ist das Fachmagazin für Entscheidungen im Trink- und Abwassermanagement. Es wendet sich an Behörden, Ingenieurbüros, wasserwirtschaftliche Einrichtungen, Unternehmen und Hochschulen.

Die Zeitschrift informiert über aktuelle Trends, Produkte und Entwicklungen zu: Abwasserentsorgung, Kanal- und Rohrleitungsbau, Management, Controlling, Gesetze und Verordnungen.

www.wwt-online.de

Bild 4 **Pfropfen aus Reinigungstüchern**

Bild 5 **Verstopfungen im Anlagenzulauf**

ebenso feste Kunststoffabfälle, Knochen, Olivenkerne und sogar Textilien befanden. Am Zulaufstrang mit Pufferspeicher und Zerkleinerung (siehe Bild 3) wurde durch die Firma Lokus GmbH eine Umbaumaßnahme durchgeführt. Zunächst wurde eine veränderte Rohrleitung mit neuem Membranventil installiert. Das Membranventil ist robuster gegen Verstopfungen durch kleine, feste Teile. Durch die neue Leitungsführung wird das Schwarzwasser im Kreis gefahren. Enthaltene Störstoffe werden so kontinuierlich durch die Schneidradpumpe zerkleinert, wodurch ein flüssiger Brei erzeugt wird, der sich besser fördern lässt und in den Leitungen weniger zur Verstopfung neigt. In der anschließenden Vorfiltration mit 2 mm-Sieb ließen sich wässrige und feste Phase gut voneinander trennen, so dass die Flüssigphase zur Weiterbehandlung in die Reaktoren B2/3 strömen kann und die Feststoffe als Siebrückstand aus dem Prozess entfernt werden können. Letztlich wurde dem Forschungsteam während der Projektbearbeitung bewusst, dass ein reibungsloser Betrieb der SWAA entweder ein hohes Maß an Disziplin bei der Bewohnerschaft erfordert, z. B. die Toilette nicht als Abfalleimer zu benutzen, oder alternativ eine aufwendigere mechanische Vorbehandlung des Schwarzwassers nötig macht.

Fazit

Mit der Schwarzwasseraufbereitungsanlage ist es gelungen, aus Schwarzwasser von Standard-Toilettenanlagen einen Flüssigdünger herzustellen, der hinsichtlich des Nährstoffgehalts mit konventionellen Düngemitteln vergleichbar ist. Die Gehalte an Spurenstoffen und Schwermetallen unterliegen geringen Schwankungen und bewegen sich auf einem unkritischen Niveau. Besonderes Augenmerk galt überdies den mikrobiologischen Parametern, da die Anwendung des Flüssigdüngers unmittelbar mit der Produktion von Lebensmitteln verknüpft ist. Die im Flüssigdünger ermittelten Konzentrationen für die Hygieneparameter überschreiten zwar die Werte der Trinkwasserverordnung, entsprechen aber denen herkömmlicher Flüssigdünger und sind definitiv nicht gesundheitsschädlich. Mittelfristiges Ziel ist es, den gesamten Schwarzwasserstrom aus Block 6 zu behandeln und so von der Pilotphase in die Praxisphase zu gelangen. Voraussetzung für einen langfristig störungsfreien Betrieb ist es, dass zunehmend weniger Störstoffe über die Toiletten „entsorgt" werden. Hierzu sind parallel weitere Aufklärung und Informierung der Anwohner von Block 6 notwendig. Ferner sind zuverlässig arbeitende Barrieren zu entwickeln, die die nachgeschalteten Aggregate vor Fehleinträgen schützen. Zudem soll der als Rest verbleibende Prozessschlamm energetisch genutzt werden. Zusammen mit der Grauwassernutzung offeriert eine Schwarzwasseraufbereitung einen nahezu vollständigen Wasserkreislaufschluss mit einem Mehrwert durch den Gewinn von Lebensmitteln aus dem hydroponischen Anbau. Die Vision für die Zukunft wäre eine flächendeckende Umsetzung des ROOF WATER-FARM-Konzepts in kommunaler Umgebung.

LITERATUR

/1/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2017, http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/klaerschlamm, Zugriff am 29. 5. 2017

/2/ Mangrove, Grauwasserresycling, 2017, https://www.mangro.net/de/Grauwasserrecycling, Zugriff am 29. 5. 2017

/3/ Beneker, C.: Masterarbeit „Start-up and optimization of a pilot MBR-system for blackwater treatment", 2016

KONTAKT

Nolde & Partner
innovative Wasserkonzepte
Dipl.-Ing. Erwin Nolde
Marienburger Straße 31 A
10405 Berlin
Tel.: 030/46601751
Fax: 030/44033410
E-Mail: erwin.nolde@t-online.de
www.nolde-partner.de