

NATURNAHES WASSER-RECYCLING IM ZOO ZÜRICH

LEISTUNGSFÄHIGKEIT EINES BEPFLANZTEN SANDFILTERS

Im Zoo Zürich wurde erstmals der bepflanzte Sandfilter zur Wasserreinigung der Gewässer im Löwengehege auf seine Leistungsfähigkeit überprüft. Durch chemische, physikalische und biologische Wasseranalysen wurde die Wasserqualität im Gewässersystem beurteilt. Aufgrund der Ergebnisse wurden Empfehlungen zur Optimierung erarbeitet.

*Thomas Hebler; Andreas Schönborn, ZHAW Wädenswil, Fachgruppe Wetlands
Andreas Bally, BiCon AG Kreuzlingen*

LE RECYCLAGE NATUREL DE L'EAU AU ZOO DE ZÜRICH

La recirculation des eaux des ruisseaux et étangs des enclos de jardins zoologiques et l'épuration par des filtres à sable constituent une nouveauté. Jusqu'à présent, les milieux scientifiques ont prêté peu d'attention à l'étude de l'application de marais artificiels dans des domaines en dehors de celui du traitement des eaux usées privées et communales [1, 2]. Au zoo de Zurich, l'installation de recyclage d'eau du nouvel enclos des lions (année de construction: 2006) a été étudiée dans le cadre d'un mémoire de bachelor de ZHAW. Il s'agit d'un filtre à sable vertical planté permettant le drainage et l'épuration naturels d'un flux partiel du système des eaux. On a étudié la mesure dans laquelle ce marais artificiel de taille plutôt modeste contribue à la qualité de l'eau du système. A cet effet, on a prélevé des échantillons d'eau sur différents points du circuit aux fins d'une analyse de différents paramètres chimiques, physiques et biologiques et un bilan de l'eau a été établi. Comme les directives officielles pour la qualité de l'eau dans des systèmes de recirculation de jardins zoologiques font défaut jusqu'à présent, les résultats ont été comparés avec les recommandations pour les eaux naturelles provenant de l'OFEV et de l'ODEEA. Selon les analyses chimiques, des conditions pauvres en substances nutritives peuvent être maintenues au niveau de l'azote. Le COD et le phosphore total s'accumulent au fur et à mesure dans le circuit. A certains points, le nombre de colibacilles était supérieur à la valeur impérative. Ce phénomène est probablement dû aux fortes précipitations des jours précédents. >

EINLEITUNG UND FRAGENSTELLUNG

Zoologische Gärten mit grösseren Wasserbecken oder naturnah angelegten Teichen und Bachläufen haben einen sehr hohen Wasserbedarf. Schon vor Jahren hat der Zoo Zürich damit begonnen, das Wasser in solchen Anlagen möglichst in Kreisläufen zu führen und diese mit natur nahen Reinigungsstufen auszustatten, die in die Landschaftsgestaltung der Gehege integriert sind. So können die erheblichen Trinkwasserkosten und Abwassergebühren reduziert werden.

In verschiedenen Zoos weltweit sind heute bepflanzte Sandfilter oder einfachere Pflanzenkläranlagen zur Reinigung des Wassers von Becken und naturnahen Teichen im Einsatz [1, 2]. Untersuchungen der Reinigungsleistung dieser Systeme und ihres Effekts auf die Wasserqualität des gesamten Wasserkreislaufs fanden bisher kaum statt [3, 4]. Auch die Reinigungsleistung der naturnahen Klärsysteme des Zoos Zürich wurde noch nie untersucht.

Im 2006 neu erbauten Löwengehege wurde ein bepflanzter Sandfilter (vertikal) integriert, über den ein Teilstrom des Gewässersystems geleitet und naturnah gereinigt wird. Im Rahmen einer Bachelor-Arbeit sollte die Funktionsfähigkeit dieser Wasserreinigungsanlage überprüft und Vorschläge für deren Optimierung erarbeitet werden. Durchgeführt wurden die Untersuchungen im Frühling und Sommer 2011.

Da im Zoo Zürich der Platzbedarf ein zentrales Problem ist, konnte den Sandfiltern bei der Planung nur wenig Fläche zu-

geteilt werden. Besondere Massnahmen zur Entfernung des Phosphors wurden trotzdem nicht eingeplant, weil nur sehr geringe Nährstoffeinträge aus der Umgebung und durch die Tiere prognostiziert wurden (Löwenkoten nicht ins Wasser). Dies führte von Anbeginn an zu einem kritischen Verhältnis des zu reinigenden Teilstroms zur gesamten Wassermenge. Schon bei der Planung wurden deswegen zeitweise Einbussen bei der Wasserqualität in den Becken einkalkuliert, sollte die Nährstoffeinträge höher als erwartet ausfallen. Diese Ausgangslage ist für die Interpretation der Messergebnisse von Bedeutung.



Fig. 1 Das Gehege der indischen Löwen im Zoo Zürich wurde einem Habitat des indischen Nationalparks «Gir Forest» nachempfunden (Foto: Zoo Zürich, R. Zingg)
L'enclos des lions indiens du zoo de Zurich a été inspiré par un habitat au parc national indien «Gir Forest»

BESCHRIEB DER ANLAGE

LÖWENGEHEGE

Die Lebensraumgestaltung des Geheges für die indischen Löwen (*Panthera leo persica*) wurde einem Habitat des «Gir Forest» in Indien nachempfunden (Fig. 1). Die Gesamtfläche des Aussengeheges beträgt 1700 m². Darin wurden zwei gestaltete Betonbecken und ein künstlicher Bachlauf angelegt. Auch in der Indooranlage (Innengehege) ist ein kleines Innenbecken gebaut worden. Im Untersuchungszeitraum lag die Bestands-

grösse der indischen Löwen bei sieben Individuen (davon vier Jungtiere). Daneben wurden sechs Individuen des asiatischen Zwergotters (*Amblonyx cinerea*) getrennt von den Löwen entweder in einem kleinen Bereich des Aussengeheges oder im Innengehege gehalten. Im grossen Becken der Aussenanlage leben Fische (Rotfeder, Karausche, Regenbogenforelle).

WASSERREINIGUNGSANLAGE

Die Löwenanlage verfügt über zwei Kreisläufe zur Wasserumwälzung und einen Kreislauf zur Reinigung des Wassers (Fig. 2), die im Jahr 2006 in Betrieb genommen wurden. Bei der Wasserumwälzung wird ständig vom grossen Aussenbecken (600 m³) in die zwei kleineren Gewässer (15 m³ und 4 m³) sowie in den Bachlauf

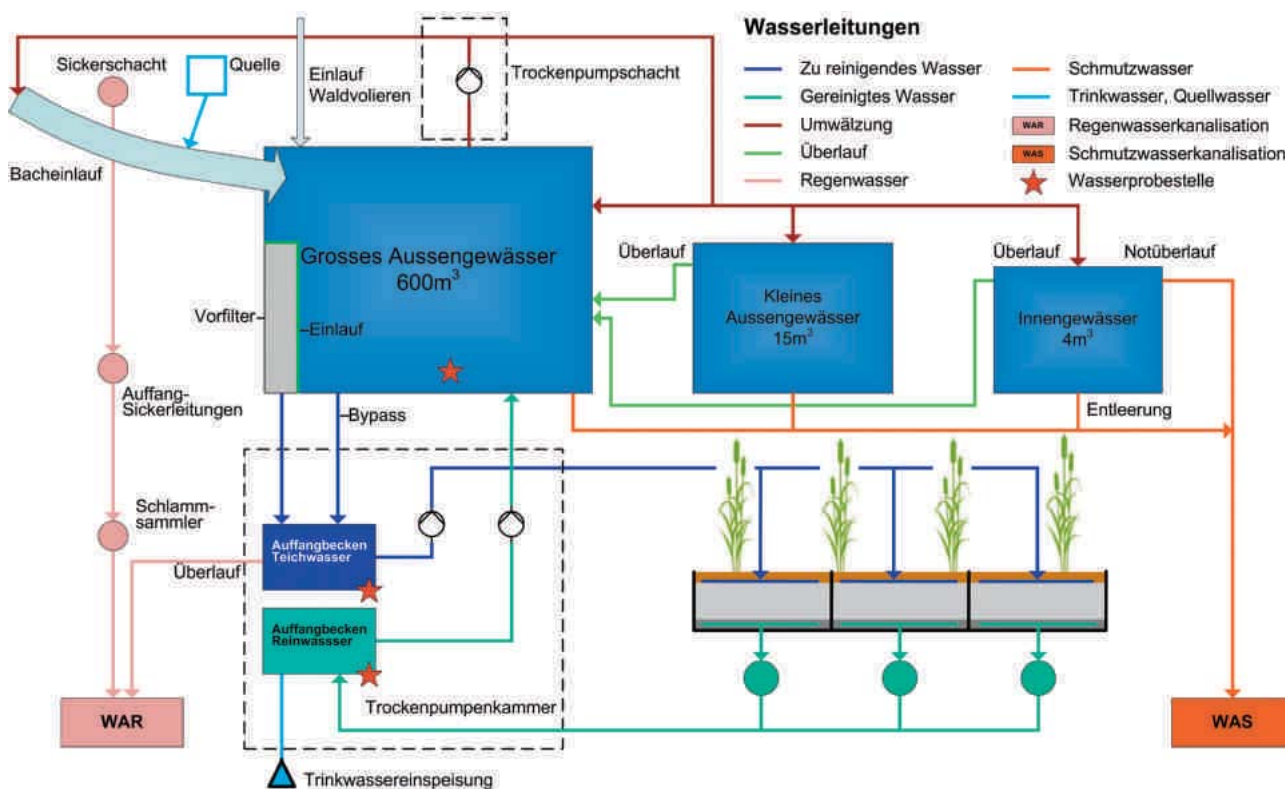


Fig. 2 Vereinfachte Darstellung der Wasserflüsse in der Löwenanlage. WAS = Schmutzwasserkanalisation; WAR = Regenwasserkanalisation
Illustration simplifiée des flux d'eau de l'enclos des lions. WAS = Canalisation des eaux usées; WAR = Canalisation des eaux pluviales

gepumpt, das dann anschliessend wieder zurückfliesst. Das gesamte System hat ein Wasservolumen von rund 632 m³.

Für den Reinigungskreislauf wird ein Teilstrom aus dem grossen Aussenbecken über den Vorfilter abgeleitet. Das vorfiltrierte Wasser wird unterirdisch im Auffangbecken «Teichwasser» (Fig. 2) gesammelt und gestapelt. Die Beschickung der bepflanzten Sandfilter erfolgt zweimal täglich schwallweise. Die dünne Wasserschicht versickert im Sand und wird dabei durch biologische, physikalische und geochemische Vorgänge gereinigt. Das gereinigte Wasser wird im unterirdischen Auffangbecken «Reinwasser» (Fig. 2) gesammelt und wieder ins grosse Aussengewässer gepumpt.

AUFBAU SANDFILTER

Der innere Aufbau des etwa 14 m² grossen Vorfilters besteht im oberen Bereich aus Filtersand (Schichtdicke 50 cm), der mit Binsen und Seggen bepflanzt wurde. Darunter liegt eine Drainageschicht, die das gefilterte Wasser abführt.

Der Hauptfilter hat eine Filterfläche von 39 m² und ist in drei gleich grosse, mit Schilf beplante Kompartimente unterteilt. Jedes Kompartiment ist bezüglich Filterschichtung identisch aufgebaut. Die obere Substratschicht ist 75 cm dick und besteht aus Fein- bis Grobsand. Die da-

runterliegende, 25 cm dicke Drainageschicht besteht aus Siebkies und leitet das gereinigte Wasser über den Auffangschacht zum Auffangbecken «Reinwasser» in der Trockenpumpenkammer.

WASSERHAUSHALT

Der Wasserkreislauf des Löwengeheges erhält im Normalbetrieb Zuflüsse durch Niederschläge, durch Abflusswasser aus der oberhalb gelegenen Waldvoliere sowie durch einige kleine Quellen. Zusätzlich wird das Magnetventil für die Trinkwasserzufuhr geöffnet, sobald der Wasserpegel im grossen Aussengewässer durch Wasserverlust auf einen minimalen Wasserstand sinkt. Wasserverluste entstehen vor allem durch Evapotranspiration – Verdunstung von Wasser aus Tier- und Pflanzenwelt – und wenn überschüssiges Wasser durch den Überlauf in die Regenwasserkanalisation abfließt.

METHODE

WASSERBILANZ

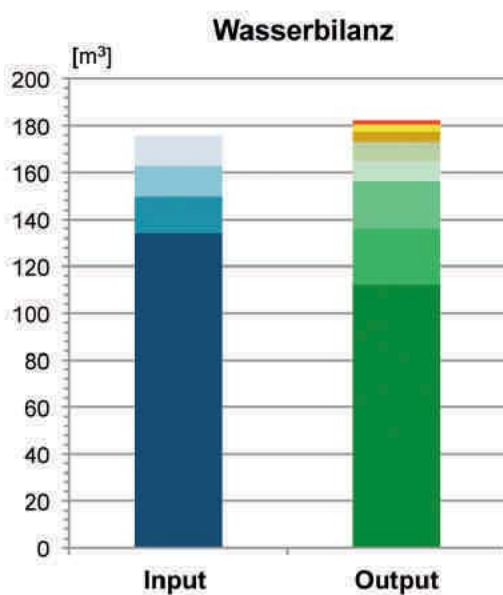
Um die im Umlauf befindlichen Wassermengen und die Zu- und Abflüsse etwas abschätzen zu können, wurde eine Wasserbilanz für die Monate April bis Juli 2011 (122 Tage) erstellt.

Die Wasserflüsse innerhalb des Systems wurden über die Förderströme der jewei-

ligen Pumpen ermittelt. Niederschlag und Verdunstung (Evapotranspiration nach *Primault*) wurden anhand der Daten der Messstation Zürich-Fluntern (MeteoSchweiz) in Wasserflüsse umgerechnet. Die Verdunstung der Schutzpflanzen im Vor- und Hauptfilter wurde mit Hilfe von Literaturangaben berechnet. Der Input aus Quellen wird als sehr gering eingeschätzt [5] und wurde deshalb vernachlässigt.

Im Löwengehege gibt es Sickerleitungen, die direkt in die Kanalisation geleitet werden. Damit sollen zusätzliche Nährstoffeinträge aus der Umgebung verhindert werden. Deswegen gelangt nur ein Anteil des oberflächlich abfliessenden Regenwassers («Schwemmwasser», Fig. 3) in das Wassersystem. Die Versickerung wurde aufgrund der Bodenart und deren Durchlässigkeitsbeiwert abgeschätzt und das Schwemmwasser daraus errechnet. Der Zulauf aus der oberhalb liegenden Waldvoliere wurde durch den oberflächlich abfliessenden Anteil an Regenwasser abgeschätzt. Der Wasserverbrauch durch Löwen und Otter wurde anhand der Angaben der Tierwärter geschätzt. Vereinfachend wurde angenommen, dass getrunkenes Wasser dem System entzogen wird. Weder der Input durch Trinkwasserzufuhr noch ein allfälliger Output durch den Überlauf der Becken konnten im Rahmen der Bachelorarbeit erfasst werden.

Der Zulauf aus der oberhalb liegenden Waldvoliere wurde durch den oberflächlich abfliessenden Anteil an Regenwasser abgeschätzt. Der Wasserverbrauch durch Löwen und Otter wurde anhand der Angaben der Tierwärter geschätzt. Vereinfachend wurde angenommen, dass getrunkenes Wasser dem System entzogen wird. Weder der Input durch Trinkwasserzufuhr noch ein allfälliger Output durch den Überlauf der Becken konnten im Rahmen der Bachelorarbeit erfasst werden.



Input	Art
	Zulauf von Waldvoliere ^a
	Schwemmwasser im Aussengehege ^a
	Niederschlag auf Hauptfilter ^b
	Niederschlag auf Aussengewässer ^b
Output	
	Wasserverbrauch Otter ^c
	Evapotranspiration Auffangbecken ^b
	Wasserverbrauch Löwe ^c
	Evapotranspiration im Vorfilter ^a
	Evapotranspiration im Innengewässer ^a
	Evapotranspiration im Fliessgewässer ^b
	Evapotranspiration im Hauptfilter ^b
	Evapotranspiration im Aussenbecken ^b

Fig. 3 Vergleich des Wasser-In- und -Outputs der Löwenanlage (links). a: Schätzung; b: Berechnung anhand der MeteoSchweiz Station Zürich-Fluntern; c: gemäss Angaben der Tierpfleger

Comparaison de l'input et de l'output d'eau dans l'enclos des lions (sur la gauche). a: estimation; b: calcul effectué sur la base des données de la station de MétéoSuisse à Zurich Fluntern; c: sur la base des informations des gardiens d'animaux

WASSERPROBEENTNAHME UND WASSERANALYSEN

Das Löwengehege konnte für Probenahmen nicht betreten werden. Alle beprobten Stellen mussten deswegen von aussen zugänglich sein. An drei verschiedenen Standorten (Fig. 2) wurden während der Monate April bis Juli 2011 regelmäßig Wasserproben entnommen, ins Labor transportiert und dort auf biologische und chemische Parameter analysiert. Das Nachweisverfahren von *E. coli* wurde gemäss dem schweizerischen Lebensmittelbuch [16] durchgeführt. Die chemischen Parameter wurden mit photometrischen Küvetten-Tests (Hach Lange, Rheineck) analysiert. Einige Parameter wurden direkt am Standort der Wasserprobeentnahme mit einer portablen Multisonde (HQ40, vom selben Hersteller) gemessen.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

WASSERBILANZ

Die berechnete Wasserbilanz (Fig. 3) zeigt, dass während des untersuchten Zeitraums etwa die gleiche Wassermenge durch Niederschläge in das Wassersystem eingetragen wurde, wie durch Verdunstung verloren ging. Dadurch wurde in 122 Tagen rund 30% des gesamten Volumens ausgetauscht. Der grösste Teil des Inputs stammte dabei aus Niederschlägen, die direkt auf die Gewässer fallen. Der Eintrag durch nicht versickertes Wasser (oberflächlich abgeschwemmtes Platzwasser) machte gemäss den Berechnungen nur 7,5% des totalen Wasserinputs aus. Ein etwa gleich grosser Anteil floss von der oberhalb gelegenen Waldvoliere zu. Da aber diese beiden Inputs mit Tierfäkalien verschmutzt sein können, stellen sie potenzielle Eintragspfade für Nährstoffe dar.

Der grösste Wasserverlust entstand durch die Evapotranspiration. In der Zeitspanne von April bis Juli 2011 wurden alleine aus den zwei stehenden Aussengewässern 112 m³ verdunstet. Der direkte Wasserverbrauch durch die Löwen und Otter war demgegenüber sehr klein.

Da weder die Trinkwasserzufuhr noch der Überlauf in die Kanalisation erfasst wurden, lässt diese Bilanz keine abschliessende Aussage zu, ob der gesamte Wasserbedarf des Löwengeheges während der Untersuchungsperiode allein durch Niederschlagswasser gedeckt werden konnte. Je nach Wasserniveau im grossen Aussenbecken kann bei Niederschlägen grundsätzlich

Physik	Median \bar{x} pH	Median \bar{x} Leitfähigkeit [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	O ₂ -Gehalt [mg/L]	O ₂ -Sättigung [%]	Anzahl Messungen
Aussenbecken	8,24	438,0	7,81	88,34	5
Inflow	7,86	444,5	5,56	62,72	6
Outflow	7,95	449,0	7,00	77,18	6

Chemie	Median \bar{x} Konz. [mgx/L]	Flächenbelastung [g/m ² * d]	Median \bar{x} Fracht [gx/d]	Umsetzungsrate	Anzahl Messungen
Ammonium NH₄-N					
Aussenbecken	0,018		0,58	–	5
Inflow	0,032	0,026	1,04	> 54,6%	6
Outflow	< 0,015		< 0,47		6
Nitrit NO₂-N					
Aussenbecken	0,017		0,56	–	5
Inflow	0,021	0,017	0,67	–	6
Outflow	0,025		0,79		6
Nitrat NO₃-N					
Aussenbecken	1,100		35,2	–	5
Inflow	1,201	0,985	38,4	12,46%	6
Outflow	1,068		33,6		6
Gesamt-N N₆					
Aussenbecken	1,650		52,8	–	5
Inflow	2,000	1,641	64,0	16,56%	6
Outflow	1,695		53,4		6
Ortho-P PO₄-P					
Aussenbecken	0,052		1,66		4
Inflow	0,055	0,045	1,76	33,81%	4
Outflow	0,037		1,17		4
Gesamt-P P₆					
Aussenbecken	0,081		2,59		6
Inflow	0,084	0,069	2,69	51,97%	6
Outflow	0,041		1,29		6
DOC					
Aussenbecken	6,490		207,7	26,81%	6
Inflow	4,750	3,890	152,0	25,2%	6
Outflow	3,605		113,6		6
CSB					
Aussenbecken	12,30		393,6	24,95%	6
Inflow	9,23	7,570	295,4	45,39%	6
Outflow	5,12		161,3		6

Farbcode

sehr gut gut mässig ungenügend schlecht

Tab. 1 Ergebnisse der Wasseranalysen in der Zeitspanne April bis Juli 2011 an den Probestellen «Aussenbecken» (Grosses Aussengewässer), «Inflow» (Auffangbecken Teichwasser) und «Outflow» (Auffangbecken Reinwasser). Fracht und Umsetzungsrate des Vor- und Hauptfilters sowie Flächenbelastung des Hauptfilters wurden berechnet

Résultats des analyses de l'eau effectuées pendant la période d'avril à juillet 2011 aux points d'échantillonnage suivants: «Bassin extérieur» (grande surface d'eau extérieure), «Inflow» (bassin collecteur, eaux de l'étang) et «Outflow» (bassin collecteur, eaux propres). La charge et le niveau de transposition du préfiltre et du filtre principal ainsi que la charge surfacique du filtre principal ont été déterminés

Wasser bis zum Niveau des Notüberlaufs in die Kanalisation gestapelt werden.

WASSERANALYSEN

Die Ergebnisse der Wasseranalysen sind in *Tabelle 1* dargestellt. Es wurden – je nach Standort – im untersuchten Zeitraum vier bis sechs Proben analysiert. Die Ergebnisse wurden mit den Empfehlungen des BAFU [6] und des AWEL [7] für natürliche Gewässer verglichen. Zur besseren Lesbarkeit wurde dazu der vom BAFU verwendete Farbcode gewählt. Bei der Interpretation der Daten ist zu beachten, dass das Gewässersystem des Löwengeheges keineswegs natürlich ist. Es handelt sich um Betonbecken mit sehr wenig Schlammablagerung am Grund.

STICKSTOFF

Im Grossen Aussengewässer sind während der untersuchten Periode alle Formen von Stickstoff im Median nur in geringen Konzentrationen aufgetreten (*Tab. 1*).

Ammonium

Durch den Abbau von Harnstoff (im Urin) und Proteinen in Exkrementen, Futterresten oder Biomasse (Algen, Laub) entsteht Ammonium. Im Grossen Aussengewässer war die Ammoniumkonzentration stets niedrig. Einerseits ist der Koteintrag ins Gewässer durch die Löwen und Otter eher gering [8]. Andererseits kann dort eine Nitrifikation stattfinden, weil die Sauerstoffversorgung im Aussenbecken ausreichend ist. Die Daten zeigen ausserdem, dass die bereits tiefe Ammonium-Konzentration durch den bepflanzten Sandfilter weiter gesenkt wird.

Nitrit

Das als Zwischenprodukt in der Nitrifikation entstehende Nitrit ist im Normalfall instabil. Erhöhte Werte würden auf eine Störung der Nitrifikation durch toxische Stoffe oder Sauerstoffmangel hinweisen [9]. Bei einem pH-Wert unter 7 wirkt Nitrit schon in kleinen Konzentrationen als Fischgift (Grenzwert Karpfen 0,004 mg/l) [10]. Weil der pH-Wert im Löwenbecken nie unter 7 lag, war auch die höchste gemessene Nitrit-Konzentration für die Fische nicht kritisch. Auch hier macht sich die Nitrifikationsleistung des bepflanzten Sandfilters bemerkbar.

Nitrat

Das Endprodukt der Nitrifikation ist Nitrat. In unbelasteten natürlichen Gewäs-

sern liegt Stickstoff im Wesentlichen als Nitrat und nur in sehr geringen Mengen als Ammonium vor. Die Konzentration des Nitrats im Aussenbecken kann als sehr tief bewertet werden. Möglicherweise findet im Vorfilter (wahrscheinlich) oder im Sandfilter (eher unwahrscheinlich) eine gewisse Denitrifikation statt.

PHOSPHOR

Phosphor kann z. B. durch Exkremente der Tiere, Futterreste, Laub oder durch verwendete Materialien (z. B. phosphorhaltiger Sand) in das System eingetragen werden. Er kann grundsätzlich im Schlamm der Becken gebunden, durch Adsorption oder Fällung im Sandfilter festgelegt, von den Pflanzen aufgenommen oder durch den Überlauf mit abfließendem Wasser abgeführt werden. Von einer eigentlichen Fällungsstufe oder eisenhaltigen Beimischungen in den Sandfilter wurde schon in der Planungsphase abgesehen. Im vorliegenden Fall kann der Phosphor somit nur durch das Entfernen von Schlamm (Sediment in den Becken) oder durch den Überlauf in die Kanalisation aus dem System abgeführt werden. Da beides nicht effizient ist und zudem nicht regelmässig geschieht, ist mit einer Anreicherung von Phosphor im Wasser des Löwengeheges zu rechnen, bis wieder ein grosser Wasserwechsel erfolgt (Reinigung der Becken).

Die Gesamtphosphor-Konzentration im grossen Aussenbecken ist dementsprechend eher hoch. Sie wird gemäss dem kantonalen Bewertungsschlüssel [7] für stehende Gewässer als «schlecht» taxiert (*Tab. 1*). Das für die Pflanzen verfügbare Ortho-Phosphat (limitierender Faktor der Algen-Primärproduktion natürlicher Gewässer) übertrifft die Zielvorgabe des BAFU für Fliessgewässer [6]. Bei Schwimmteichen, die vom Bauprinzip her dem Wassersystem der Löwenanlage ähnlich sind, wird eine Konzentration von weniger als 0,01 mg P/l gefordert, um klares Wasser zu erreichen [11].

Um die Phosphoreinträge minimieren zu können, wären weitergehende Untersuchungen und Abklärungen erforderlich.

ORGANISCHE STOFFE

Organische Stoffe gelangen von aussen durch Exkremente der Tiere, Futterreste oder Laub ins Gewässer. Sie können aber auch aus Wurzelexsudaten der Wasserpflanzen oder absterbendem Phytoplankton in den Gewässern entstehen.

DOC

Der *Dissolved-Organic-Carbon* (DOC)-Gehalt ist ein Mass für die gelösten, organisch gebundenen Kohlenstoffe. Der eher unbefriedigende DOC-Gehalt dürfte auf Algenwachstum zurückgehen, das seine Ursache wiederum im relativ hohen Phosphorgehalt des Gewässers hat. Zudem ist nicht auszuschliessen, dass von der Rohfleischfütterung kleinere Futterreste in die Gewässer gelangten [8].

CSB

Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) umfasst sowohl biologisch abbaubare als auch biologisch schwer oder nicht abbaubare organische Kohlenstoffverbindungen [12]. Auch der CSB hängt mit dem Algenwachstum zusammen. Er erreicht im Löwenbecken 12,3 mg/l, was einem gering bis mässig belasteten, natürlichen Gewässer entspricht.

E.-COLI-NACHWEIS

E. coli-Bakterien sind ein Mass dafür, wie stark ein Gewässer mit Kot in Kontakt gekommen ist. Es gibt keinen gesetzlichen Richtwert für künstliche Wassersysteme, wie sie das Löwengehege darstellen. Als Vergleich wurden deswegen die Empfehlungen des Bundesamts für Gesundheit für Badewasser von öffentlicher, künstlich angelegter Badeteiche herangezogen [13]. Der dort genannte Grenzwert von 100 KBE/100 ml wurde im «Löwen-Aussenbecken» bei keiner Wasserprobe unterschritten (*Tab. 2*). Auch im vorfiltrierten Wasser (*Inflow*) wurden nie unter

<i>E. coli</i>	Min. KBE/100ml	Entfernung	Max. KBE/100ml	Entfernung	Anzahl Messung
Aussenbecken	128	–	1357	3,91%	3
Inflow	128	96,1%	1304	99,23%	4
Outflow	5		10		4

Tab. 2 *E.-coli*-Reinigungsleistung im Vor- und Hauptfilter

Performances d'épuration (colibacilles) du préfiltre et du filtre principal

100 KBE/100 ml bes timmt. Beim gereinigten Wasser hingegen war der höchste *E.-coli*-Nachweis 10 KBE/100 ml – eine exzellente Reinigungsleistung. Auffällig gegenüber den anderen drei Messungen sind die um den Faktor 10 erhöhten *E.-coli*-KBE am 18. Juli 2011 (Fig. 4). Gemäss Aussage des Zoowärters koten Fischotter und Löwen nicht direkt in die Gewässer. Eine Kombination von Koteinschwemmung durch Niederschläge mit guten Bedingungen zum Überleben könnte diesen Anstieg aber erklären. Durch den starken Niederschlag (49 mm) vom 12. und 13. Juli wurde wahrscheinlich Kot aus dem Gelände des Löwengeheges und der Waldvoliere (Fig. 2) in das Wassersystem eingetragen. Die Wassertemperaturen von 18–20 °C im grossen Aussenbecken könnten dann für das Überleben von *E. coli* günstig gewesen sein. Gemäss einer Untersuchung der Universität München wurde bei einem *E.-coli*-«Wildtyp» eine Überlebensdauer von 40 Tagen im Wasser eines Oberflächengewässers mit der Temperatur von 20 ± 2 °C nachgewiesen [9].

BEPFLANZTER SANDFILTER

Fracht und Reinigungsleistung

Der bepflanzte Sandfilter wird zwei Mal täglich schwallweise mit je 16 m³ Wasser beschickt. Die gesamte Wassermenge der Löwengewässer wird damit in 20 Tagen einmal vollständig durch den bepflanzten Sandfilter geleitet. Die hydraulische Belastung des Filters von 820 mm/d beträgt somit beinahe das Siebenfache des Richtwerts von 120 mm/d, der für einen kolmationsfreien Betrieb bepflanzter Vertikalfilter zur kommunalen Abwasserreinigung genannt wird [14]. Trotz dieser hohen hydraulischen Belastung wird der bepflanzte Sandfilter seit seiner Inbetriebnahme 2006 ohne Anzeichen von Kolmation (= Verstopfung) betrieben. Ein Grund dafür dürfte sein, dass die organische Belastung des bepflanzten Sandfilters aufgrund des sehr «dünnen» Abwassers gering ist. Seine CSB-Flächenbelastung von 7,57 g/m²*d liegt deutlich unter den 20 g/m²*d, die beispielsweise für die Behandlung von kommunalem Abwasser in Vertikalfilterbeeten als Richtwert in der Literatur angegeben wird [14]. Tabelle 3 fasst die Reinigungsleistung des Sandfilters der Löwenanlage zusammen und vergleicht sie mit derjenigen, die ge-

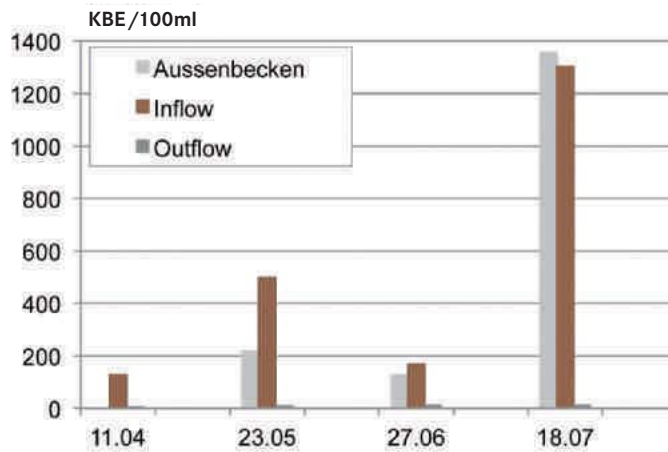


Fig. 4 *E.-coli*-Nachweis von der Zeitspanne April bis Juli 2011 in der Löwenanlage
Preuve pour la présence de colibacilles dans l'enclos des lions (avril à juillet 2011)

Parameter/Prozess	Erfahrungswert Reinigungsleistung im Mittel [%]	Vertikalfilter Löwenanlage Reinigungsleistung [%]
Nitrifikation	92	sicher über 54,5
Gesamt-N	20	16,5
Gesamt-Phosphor	60	52
CSB	90	45,5

Tab. 3 Reinigungsleistung des Sandfilters der Löwenanlage im Vergleich zu Erfahrungswerten für Vertikalfilter aus der kommunalen Abwasserreinigung [14]
Performances d'épuration du filtre à sable de l'enclos des lions: comparaison avec les valeurs empiriques pour filtres verticaux provenant du traitement des eaux usées communales [14]

Parameter	Vorhandene Menge im System *	Abbau im Sandfilter **	Aufenthaltszeit im System [Tage]
Ammonium	11,4 gN	> 0,57 gN/Tag	< 20
Gesamt-N	1043 gN	- 0,6 gN/Tag	kein Abbau
Ortho-Phosphat	32,9 gP	0,50 gP/Tag	66
Gesamt-P	51,2 gP	1,3 gP/Tag	39
DOC	4101 g	94 g/Tag	44
CSB	7773 gO ₂	232 gO ₂ /Tag	34

Tab. 4 Anteil der im bepflanzten Sandfilter abgebauten Parameter bezogen auf die Gesamtmenge im Gewässersystem der Löwenanlage. *: Median-Konzentration im Aussenbecken × Gesamtvolumen (= 632 m³); **: Median-Konzentration im Aussenbecken - Median-Konzentration im Auslauf Sandfilter × Beaufschlagung Sandfilter pro Tag
Quote-part des substances décomposées par le filtre à sable planté par rapport à la quantité totale mesurée dans le système des eaux de l'enclos des lions. *: Concentration médiane (CM) dans le bassin extérieur × volume total (= 632 m³); **: CM dans le bassin extérieur - CM dans l'écoulement du filtre à sable × charge horaire effective du filtre à sable par jour

mäss [14] von bauähnlichen Anlagen mit kommunalem Abwasser erreicht werden. Die berechnete prozentuale Reinigungsleistung ist beim Sandfilter der Löwenanlage vergleichsweise geringer, weil das zu reinigende Wasser der Löwenanlage viel weniger mit Nähr- und Schmutzstoffen belastet und die hydraulische Belastung sehr viel höher als bei den Anlagen ist, mit denen hier verglichen wird.

Abbauleistung im Gesamtsystem
In Tabelle 4 ist dargestellt, wie gross die Gesamtmenge an Stoffen im Gewässersystem des Löwengeheges ist, im Vergleich zu der pro Tag im Sandfilter entfernten Menge. Daraus wurde errechnet, wie viele Tage es bei einer angenommenen konstanten Abbauleistung dauern würde, bis diese Menge komplett abgebaut ist.

<i>E. coli</i>	Vorhandene Menge im Gewässersystem [KBE]	Abbau Vor- und Hauptfilter [KBE/Tag]	Abbau pro Tag in %
Minimal	$8,09 \cdot 10^7$	$3,93 \cdot 10^6$	4,86%
Maximal	$8,58 \cdot 10^8$	$4,31 \cdot 10^7$	5%

Tab. 5 Anteil der im Vor- und Hauptfilter abgebauten *E.-coli*-koloniebildenden Einheiten pro Tag der vorhandenen Gesamtmenge im Gewässersystem (Löwenanlage)

Quote-part des unités formant colonies (*E. coli*) étant éliminées quotidiennement par le préfiltre et le filtre principal par rapport à la quantité totale présente dans le système des eaux

Damit ein Stoff sich im System nicht anreichert, dürfte seine Aufenthaltszeit im System theoretisch nicht grösser sein als die Dauer, bis das gesamte Volumen einmal durch den Sandfilter gelaufen ist (20 Tage). Gemäss Tabelle 4 ist dies nur für Ammonium der Fall. Für alle anderen Stoffe ist der Sandfilter alleine gemäss dieser Berechnung zu klein, um sie bei diesem Betriebsmodus vollumfänglich aus dem System zu entfernen.

Diese Folgerung wird durch die Ergebnisse der Wasseranalysen (Tab. 1) bestätigt. Sie zeigen, dass sich Phosphor im Wasserkreislauf der Löwenanlage anreichert, und dass auch die DOC-Konzentration eher etwas zu hoch ist. Wie dies erklärt werden kann und wie dem entgegenwirkt werden könnte, wird im letzten Kapitel diskutiert.

Zu ergänzen ist noch, dass die Eliminationsrate von *E.-coli*-Bakterien hervorragend ist (Tab. 5), sie beträgt 96–99%.

Theoretisch könnte an einem Tag 4,8–5% der gesamten *E.-coli*-Kolonien im Gewässer der Löwenanlage eliminiert werden. Trotz dieser hervorragenden Eliminationsrate würde die Grösse des Filterbeckens nicht ausreichen, um in den Sommermonaten im Grossen Aussenbecken eine Seebadwasserqualität zu erzielen (< 100 KBE/100 ml).

BEWERTUNG UND AUSBLICK

Die Wasserrecycling-Anlage des Löwengeheges ist seit mittlerweile sechs Jahren in Betrieb und verrichtet ihre Arbeit mit geringem Wartungsaufwand und tiefen Kosten. Ein bepflanzter Sandfilter ist eine wenig aufwendige Technologie, die sparsam im Unterhalt ist. Ersatzteil- und Personalkosten können niedrig gehalten werden. Gerade deshalb ist der Einsatz von bepflanzten Sandfiltern zur Reinigung von Zoogewässern ökonomisch interessant.

Die Rahmenbedingungen von bepflanzten Sandfiltern in Zoogewässern sind nicht direkt mit anderen Einsatzgebieten naturnaher Kläranlagen vergleichbar. Am

ehesten ähneln diese Gewässer naturnahen Schwimmteichen. Das Wasser ist vergleichsweise wenig belastet, aber es muss ständig umgewälzt werden. Deswegen müssen grosse Volumina bewältigt werden. Die Wasserqualität ist für die Besucher direkt erfahrbar und sichtbar. Zoogewässer sollen deswegen ästhetisch ansprechend aussehen und dürfen nicht unangenehm riechen. Sie sollen nicht durch Algen überwuchert werden. Dazu kommt der Gesundheitsaspekt: Badende Tiere sollen nicht mit Krankheitserregern in Kontakt kommen. Diese speziellen Bedingungen sollen im Folgenden diskutiert werden.

PHOSPHOR ALS SCHLÜSSELFAKTOR

Ein Schlüsselfaktor bezüglich der Ästhetik ist der Phosphorgehalt. Je geringer der Phosphorgehalt ist, desto weniger Algen wachsen, desto klarer bleibt das Wasser und desto weniger Faulprozesse finden beim Abbau der abgestorbenen Biomasse später statt. In Richtlinien für Schwimmteiche wird ein maximaler Phosphor-Gehalt von < 0,01 mg P/l gefor-

dert, wenn das Wasser klar bleiben soll [11]. Die Gesamt-Phosphor-Konzentration in der Löwenanlage ist aktuell um ca. den Faktor 8 höher (Tab. 1). Um einen tiefen P-Wert von < 0,01 mg P/l in einem Wasserkreislauf-System dauerhaft zu erreichen, sind grundsätzlich die in Tabelle 6 aufgeführten planerisch-baulichen sowie Unterhaltsmassnahmen möglich.

Die Unterhaltsmassnahmen widersprechen teilweise der Grundidee eines wartungsarmen und naturnahen Systems. Als schnell umsetzbare Massnahme könnte ein zusätzlicher P-Adsorber, z. B. im Auffangbecken «Teichwasser», installiert werden. Weitere planerisch-bauliche Massnahmen könnten bei der nächsten Gesamtsanierung des Wassersystems ergriffen werden.

HYDRAULISCHE BELASTUNG

Ein zweiter Schlüsselfaktor bezüglich Reinigungsleistung ist die hydraulische Belastung des bepflanzten Sandfilters. Die Autoren erachten die Beschickung mit zweimal täglich 16 m³ als ungünstig, weil die Kontaktzeit des zu reinigenden Wassers mit dem Filtersubstrat bei so starker Beaufschlagung zu kurz ist. Besser sind häufigere Beschickungen in kürzeren Intervallen. Die Planer der Anlage hatten zweimal 4 m³ pro Tag empfohlen und in den Sommermonaten eine Steigerung auf viermal 4 m³. Die weitere Steigerung auf 32 m³ pro Tag, mit der derzeit die Sandfilter beaufschlagt werden, sollte unbedingt

	Massnahmen	Kommentar
1	Planerisch - bauliche Massnahmen	
1.1	Verhinderung von Kot-Einträgen in den Wasserkreislauf	Umsetzbarkeit hängt weitgehend von der/den gehaltenen Tierart/en ab
1.2	Oberflächliches Schwemmwasser (Platzwasser) ableiten und drainieren	Möglich, in der Ausführung beim Bau anspruchsvoll
1.3	Keine Verwendung phosphorhaltiger Baumaterialien	Erfordert viel Erfahrung bei Materialwahl
1.4	Verwendung von speziell phosphorbindendem Sand-Substrat	Möglich, aber teuer und nur eingeschränkt machbar und effektiv
1.5	Einbau eines P-Absorbers an geeignetem Ort	Einfache Massnahme, jederzeit in bestehendem System umsetzbar
1.6	Phosphatfällung und anschliessendes Abfiltrieren	Einfache Massnahme, jederzeit in bestehendem System umsetzbar
2	Unterhaltsmassnahmen	
2.1	Häufiges Absaugen von abgesetztem Schlamm sowie Algenwatte	Arbeitsaufwand hoch, wegen schlechter Zugänglichkeit im Löwengehege
2.2	Häufigere komplette Wasserwechsel	Arbeitsaufwand und Kosten erhöht

Tab. 6 Zusammenstellung von planerisch-baulichen und Unterhaltsmassnahmen zur Sicherung der Wasserqualität in Kreislaufanlagen in zoologischen Gärten

Résumé des mesures de planification/construction et mesures d'entretien permettant d'assurer la qualité de l'eau de systèmes de recirculation dans des jardins zoologiques

unterlassen werden. Ein gleichmässiger Beschickungsmodus mit kleineren Volumina dürfte den Sauerstoffgehalt im Filtermilieu und auch die Reinigungsleistung des filtrierten Wassers bezüglich der Parameter Stickstoff und DOC verbessern. Grundsätzlich sind auch andere Ansätze und Systeme möglich. Im Tierpark in Arth-Goldau wurde vor einigen Jahren für die Gehege der Wölfe und Bären ein Kreislaufsystem mit naturnaher Wasserreinigung erstellt. Das System hat ungefähr dasselbe Wasservolumen wie das Wassersystem des Löwengeheges. Der bepflanzte Sandfilter ist dort ein Horizontalfilter (ca. zehnmal grösser als im Löwengehege Zürich), und das gesamte Wasservolumen wird nicht in Intervallen, sondern kontinuierlich einmal pro Tag über den Filter umgewälzt [18]. Die Nährstoffkonzentrationen in Arth-Goldau sind mit jener im Löwengehege Zürich vergleichbar.

Nicht nur der Aufbau und die Grösse der Filterkörper, sondern auch die Art ihrer Betriebsweise haben grossen Einfluss auf die Reinigungsleistung vertikaler Sandfilter. Es hat sich gezeigt, dass das Recyclingsystem Löwenanlage auch unter den engen gegebenen Rahmenbedingungen Verbesserungspotenziale aufweist. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen auf, dass viele Faktoren bei der Planung und Dimensionierung von naturnahen Reinigungssystemen von Zoogewässern zu berücksichtigen sind und dass diese Platz brauchen, der nicht zu sehr beschnitten werden darf. Die vorliegende Arbeit lieferte erste Erkenntnisse, die durch weitere Untersuchungen anderer Anlagen von Zoos auf eine breitere und solidere Basis gestellt werden sollten.

DANK

Die Autoren danken dem Zoo Zürich, insbesondere Herrn Jürg Gasser, für die während dieser Arbeit geleistete Hilfeleistung.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bally A., Bittner, K. (2009): Pflanzenkläranlagen – Die ökologische Alternative zur technischen Kleinkläranlage. pp. 80 – 85. *Ingenieurbioologie 4/09*
- [2] Bally A. (2010): Naturnahe Verfahren der Abwasserreinigung – Konzepte und Trends. pp. 3–9. *Ingenieurbioologie 1/10*
- [3] Obarska-Pempkowiak, H. (1994): Application of willow and reed vegetation filters for protection of a stream passing through a zoo. In: P. Aronsson and K. Perttu (eds), *Willow Vegetation Filters for Municipal Wastewater and Sludges*, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, pp. 59–68
- [4] Chen, Q et al. (2007): An off-line filtering ditch-pond system for diffuse pollution control at Wuhan City, Zoo, *Ecological Engineering 30*, 373–380
- [5] Baumgartner U., Vetschpartner AG: persönliche Mitteilung, 01.09.2011
- [6] Liechti, P. (2010): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung von Fliessgewässern. Bern: Bundesamt für Umwelt (BAFU)
- [7] Niederhauser, P. et al. (2006): Wasserqualität der Seen, Fliessgewässer und des Grundwassers im Kanton Zürich. Statusbericht 2006. Baudirektion Kanton Zürich: Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
- [8] Thalmann, A., Zoowärter Zoo Zürich: persönliche Mitteilung, 20.06.2011
- [9] Brandorff, D., Masch, J. (2001): Stickstoff in Oberflächengewässern Nitrat, Nitrit, Ammonium, Ammoniak. Hamburg: Umweltbehörde Hamburg
- [10] Bohl, M. (1998): Zucht und Produktion von Süswasserfischen. 2. Auflage Verlagsunion Agar, DLG Verlag Frankfurt (Main), BLV Verlagsgesellschaft München, Landwirtschaftsverlag Münster Hilstrup
- [11] Baumhauer, J.; Schmidt, C. (2008): Schwimmteichbauer: Handbuch für Planung, Technik und Betrieb, Patzer Verlag, Berlin Hannover
- [12] Bahlo, K.; Wach, G. (1996): Naturnahe Abwasserreinigung. Staufen bei Freiburg: Ökobuch Verlag
- [13] Graf, H. et al. (2004): Erhebungen zur Empfehlung für die hygienische Beurteilung öffentlicher, künstlich angelegter Badeteiche, Bundesamt für Gesundheit (BAG)
- [14] Geller, G.; Höner, G. (2003): Anwenhandbuch Pflanzenkläranlagen, Praktische Qualitätsmanagements bei Planung, Bau und Betrieb. Augsburg: Springer Verlag Berlin Heidelberg New York
- [15] Gujer, P. (2007): Siedlungswasserwirtschaft. ETH-Zürich: Springer-Verlag Heidelberg
- [16] Roth, C. (2004): Untersuchungen zur Überlebensfähigkeit von enterohämorrhagischen Escherichia coli (EHEC) in der Umwelt sowie zum Vorkommen in Kotproben von Wasservögeln. München: Dissertation Universität München
- [17] SLMB (2000): Schweizerisches Lebensmittelbuch, Auszug Kap. 56 E.3, Bern
- [18] Wehrle, M.: Tierpark Arth-Goldau, persönliche Mitteilung

> SUITE DU RÉSUMÉ

L'intégralité de l'eau recirculée est drainée par le filtre à sable planté env. une fois tous les 20 jours. La taille du filtre à sable planté permet d'atteindre des valeurs d'azote basses dans l'eau recirculée. Elle est pourtant insuffisante s'il s'agit d'empêcher l'accumulation de phosphore et de COD. Le filtre à sable planté montrait de très bonnes performances d'épuration sur le plan de l'élimination des colibacilles.

En ce qui concerne le dimensionnement de systèmes de recirculation dans des zoos, il faut tenir compte de facteurs spécifiques: le nombre d'animaux qui peuplent un enclos, le comportement de ces animaux (animaux qui fouillent dans le sol, volume des fientes), les composants des fientes, le matériel de construction employé, la pente et le drainage du terrain pour ne citer que quelques exemples. Les détails de l'influence sur la qualité de l'eau sont souvent inconnus. Compte tenu des conditions de l'espace au zoo de Zurich et d'une analyse des coûts et des avantages, le filtre à sable planté remplit sa fonction. En ce qui concerne le phosphore, les conditions pourraient être améliorées par l'installation d'un absorbeur du P.