

Herleitung einer neuen Berechnungsmethode zur Ermittlung der Nennbesucherzahl

Wasserreinigung in Schwimm- und Badeteichen unter Berücksichtigung der Eintragsgrößen und der Eliminationsleistungen

Dipl.-Ing. Stefan Bruns und Anne Wunderlich, Polyplan GmbH, Ingenieurbüro für Energie- und Umwelttechnik, Bremen

Derzeit befindet sich das FLL-Regelwerk – die „Empfehlungen für Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von öffentlichen Schwimm- und Badeteichanlagen“ (Oktober 2003) der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL), Bonn – in Überarbeitung. Gegenstand der Überarbeitung ist u. a. eine neue Formel zur Ermittlung der Nennbesucherzahl, die sowohl die Effizienz der Wasseraufbereitung als auch die biologische Selbstreinigung durch das Zooplankton berücksichtigt (vgl. dazu auch AB 03/10 S. 167 ff.).

Der folgende Beitrag zeigt die Entwicklung einer Formel auf, die den Stoffabbau der Wasseraufbereitung und die biologische Selbstreinigung abbildet und somit die Grundlage der weiteren Berechnung darstellt. Darauf aufbauend erfolgt ein Vorschlag zur Berechnung der Nennbesucherzahl auf Grundlage einer Linearisierung der Stoffabbau-Formel.*

* Anmerkung der Redaktion: Im anschließenden Beitrag von Dr. Inés Maria Rohlfing werden die Möglichkeiten und Grenzen der neuen Berechnungsart dargestellt. Ferner wird aufgezeigt, wie mit der Stoffabbau-Formel die Nennbesucherzahl auf iterativem Wege ermittelt werden kann.

Hintergrund

Wenngleich es heute als sicher gilt, dass es eine Insitu-Entkeimung gibt – d. h. eine Entkeimungsleistung im Wasserkörper hervorgerufen durch UV-Licht, Zooplankton und weitere Wechselwirkungen –, ist deren absoluter Wert noch unbekannt. Dr. Juan Lopez-Pila et al. haben sich mit der Entfernung von Mikroorganismen für Kleinbadeteiche befasst. U. a. wurde eine Literaturlauswertung zur Eliminationsleistung von UV-Licht durchgeführt.¹⁾ Es wurde die Schlussfolgerung abgeleitet, dass der Eliminationsanteil durch natürliches UV-Licht eine große Rolle in der Gesamtelimination spielen kann, was heute als eine Säule der Insitu-Entkeimung gesehen werden kann.

Eine weitere Säule der Insitu-Entkeimung wird in der Filtration durch Zooplankton gesehen. Der Systemeinfluss dieser Eliminationsleistung wird im Folgenden untersucht.

Die Zooplanktondichten zeigen schnelle zeitliche Entwicklungen. Die Filtrationsleistung kann gemäß der Grundlagenermittlung der KLS-Studie²⁾ je nach Dichte und Artenzusammensetzung von 0,001 bis 11 m³/m³/d variieren. Diese große Schwankungsbreite über die Zeit, aber auch über die einzelnen Bäder, stellt die Betreiber,

Planer und Regelwerksausschüsse vor die Frage, welcher Wert abhängig von äußeren Bedingung anzusetzen ist.

Im Rahmen der Daten aus dem Datenbanksystem DANA wurden hierzu die Daten von 15 Kleinbadeteichen über die Badesaison 2007/2008 herangezogen.

Aufbauend auf die Untersuchung der KLS bzgl. der Zooplanktondichten, unterteilt in die Gruppen

Anzeige



Wellness für Ihre Kunden...

Wellness für Ihre Mitarbeiter...

SCHEIDT & BACHMANN 

www.scheidt-bachmann.de/freizeit

Gattung	Minimum Fmin	Maximum Fmax	Mittelwert Fav
Ciliata	0,012	0,163	0,088
Rotatoria	0,007	16,992	8,500
Copepoda	0,048	129,600	64,824
Cladocera	0,096	66,480	33,288

■ *Tabelle 1: Filtrationsleistungen relevanter Zooplanktongruppen aus Literaturrecherchen (KLS)²⁾*
Einheit ml/Ind./d

■ Flagellata (Geißeltierchen),
 ■ Ciliata (Wimpertierchen),
 ■ Rotatoria (Rädertierchen),
 ■ Cladocera (Wasserflöhe) und
 ■ Copepoda (Ruderfußkrebse, Hüpferlinge),
 wurden Untersuchungen bzgl. der Abhängigkeit der Individuenhäufigkeit und der technischen Filtrationsleistung angestellt.

Zooplanktondichten aus Messungen in öffentlichen Kleinbadeteichen

Die im Rahmen der von KLS vorgefundenen Zooplanktondichten variierten sowohl zwischen den betrachteten Bädern als auch innerhalb der einzelnen Bäder. Bezogen auf die summierten Gruppen liegen die vorgefundenen Werte zwischen 42 Individuen (Ind.)/m³ und 454 729 Ind./m³. Der Mittelwert liegt bei 39 414 Ind./m³.

In Tabelle 1 werden die aus der Literaturrecherche ermittelten Werte für die minimale und maximale Filtrationsleistung der Zooplanktongruppen Ciliata, Rotatoria, Copepoda und Cladocera dargestellt.

Berechnung der Filtrationsleistung

Annahmen

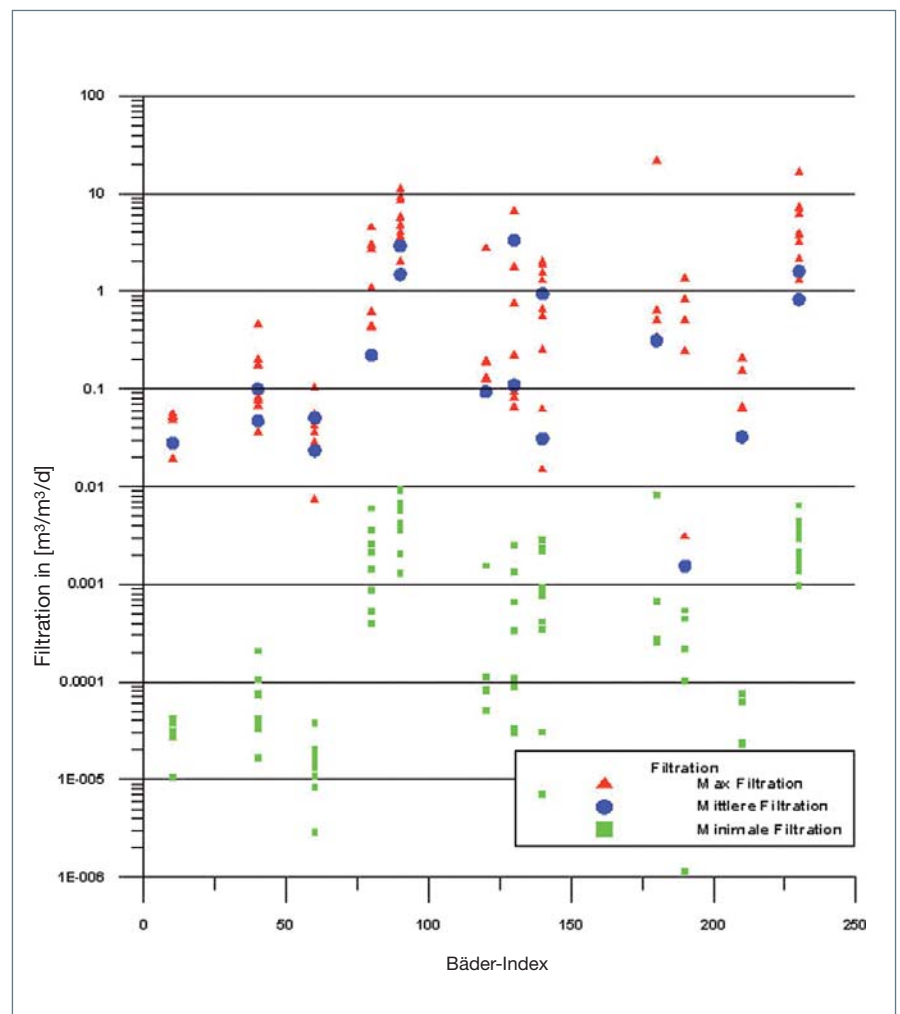
Zur Berechnung der Filtrationsleistung müssen im Vorfeld folgende Festlegungen und Annahmen getroffen werden:

Im Ökosystem „Kleinbadeteich“ gibt es im Vergleich zu Naturgewässern wenig Fressfeinde, wie z. B. Fische, für das Zooplankton. Die Population wird im Wesentlichen durch abiotische Faktoren wie Austrag durch externe Wasseraufbereitungsanlagen sowie dem Temperaturverlauf und biotischen Faktoren wie Nahrungslimitation bestimmt. In

Folge der Nahrungslimitation kann davon ausgegangen werden, dass die Filtration des Zooplanktons eher im Bereich der maximalen Filtrationsleistung gemäß Tabelle 1 liegt. Die abiotische Limitierung fällt mit zunehmender Temperatur, solange eine Wassertemperatur von bis zu maximal 30 °C³⁾ vorliegt. Dies bedeutet, dass höhere Populationen grundsätzlich bei höheren Wassertemperaturen, also in Zeiten erhöhten Badegastaufkommens, zu erwarten sind.

Die Ausdünnung, z. B. durch erhöhten Austrag infolge erhöhter Umwälzrate der Reinigungsanlage, löst potenziell eine Limitierung aus, sodass anzunehmen wäre, dass die maximale Filtrationsmenge pro Ind. minimiert wird. Diese Verringerung der Filtrationsleistung wird allerdings infolge der schnellen Bestandsregulierung durch relatives Nahrungsüberangebot schnell wieder ansteigen.

Darüber hinaus ist das grundsätzliche Problem, dass das Zooplankton nicht homogen im Wasserkörper verteilt ist und entsprechende Ungenauigkeiten in der quantitativen Zooplanktonmessung zu erwarten sind. Das verstärkte Vorkommen von Zooplankton ist auf stark limitierte Systeme, gehäuft in Bereichen erhöhten Nahrungsangebotes, beschränkt. Folglich ist die Übertragung



■ *Abbildung 1: Bäderspezifische Filtrationsleistung des Zooplanktons*

der Zählung auf das gesamte Beckenvolumen mit einer nicht abschätzbaren Ungenauigkeit behaftet.

Berechnung

Die maximale Filtrationsmenge berechnet sich wie folgt:

$$F_{\max} = F_{\max}(\text{Ciliata}) * n(\text{Ciliata}) + F_{\max}(\text{Rotatoria}) * n(\text{Rotatoria}) + F_{\max}(\text{Copepoda}) * n(\text{Copepoda}) + F_{\max}(\text{Cladocera}) * n(\text{Cladocera})$$

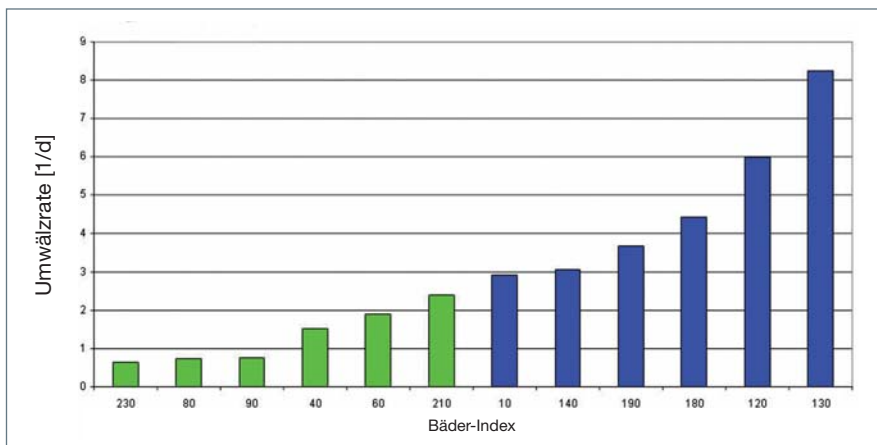
■ Formel 1: Berechnung der Filtrationsleistung

Die Ergebnisse der maximalen Filtrationsleistung in Abhängigkeit der Bäder sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Berechnung der maximalen Filtrationsleistung ist mit Vorsicht zu betrachten, da nicht davon auszugehen ist, dass alle Zooplanktongruppen zeitgleich ihr Filtrationsmaximum erreichen. Es ist allerdings aufgrund der starken Stofflimitierung im Schwimmteich davon auszugehen, dass die Filtrationsleistung aller Zooplanktongruppen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit relativ dicht am Maximalwert liegen wird.

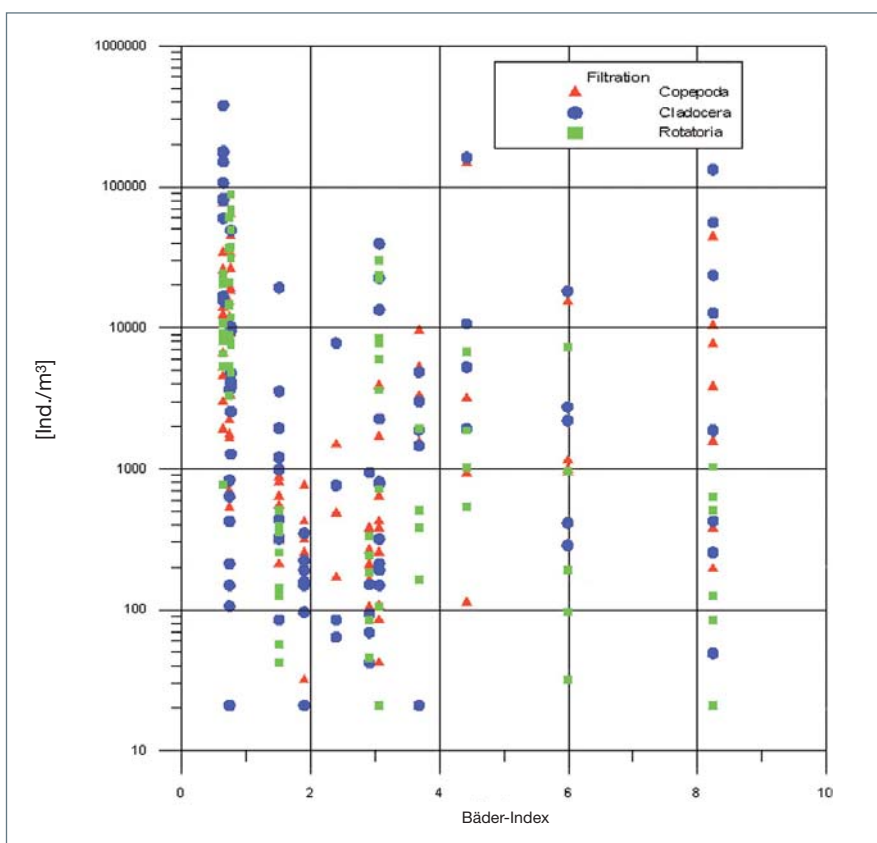
Unterteilung der Bäder in zwei Bäderguppen

Es ist anzunehmen, dass die Zooplanktondichte von der Beckenumwälzung abhängt. Insbesondere hohe Beckenumwälzungen werden in der Regel durch den Wasserabzug über die Überlauftrinnen oder den Skimmer realisiert, d. h. über einen offenen Abzug, durch den infolge hoher Strömungsgeschwindigkeiten ein erhöhter Austrag von Zooplankton angenommen werden kann.

Auch in der Natur ist dieses Phänomen zu erkennen, denn in Fließgewässern liegt eine deutlich geringere Zooplanktondichte vor als in Standgewässern.^{4) 5)} In der Publikation von Uhlmann und Horn⁵⁾ wird dieser Sachverhalt wie folgt beschrieben: „... Erreicht das Alter der „fließenden Welle“ ein Mehrfaches der Generationszeit der Plankton-Organismen, kann sich eine stärkere Besiedlung des Freiwassers einstellen.“ D. h.:



■ Abbildung 2: Nennumwälzraten der Bäder, sortiert nach Umwälzrate in 1/d



■ Abbildung 3: In den Beobachtungen vorgefundene Häufigkeiten von Individuen (Ind.) über die Umwälzrate (Nennbetrieb)

Ist die Aufenthaltszeit größer als die Generationszeit, kommt es zu einer Vergrößerung der Population und im umgekehrten Fall zu einer Auswaschung der Organismen.

Die Unterteilung der Daten für die statistische Auswertung ist aufgrund der geringen Datenmenge in mehr als zwei Gruppen nicht zielführend.

Für die folgenden Betrachtungen wird die Nennumwälzrate angesetzt, da diese für Bäder charakterisierend ist (siehe Abbildung 2). Die realen Umwälzleistungen können zeitweise belastungsabhängig deutlich vom Nennbetrieb abweichen. Die Realdaten wurden nicht herangezogen, da die anzusetzende zeitliche Zuordnung, zwischen zeitgenauer Durchflussrate und Zooplanktondichte, mit großen Unsicherheiten behaftet wäre.

Das Kriterium für die Gruppeneinteilung wurde so gewählt, dass je gleichviele Bäder in jeder Gruppe liegen. Es wird unterschieden zwischen Bädern mit einer hohen Umwälzrate $\geq 2,5$ 1/d und solchen mit einer niedrigen Umwälzrate $< 2,5$ 1/d. Die angegebene Umwälzrate stellt die Nennleistung dar. Die reale Beckenumwälzung kann also zeitlich variierend, je nach Lastzustand, deutlich von der Nennleistung nach unten hin abweichen.

Gruppe 1	Rotatoria	Copepoda	Cladocera	Filtration	Umwälzrate
	Ind./m ³	Ind./m ³	Ind./m ³		
	n	n	n		
0,05-Quantil	21,0	164,5	0,0	0,0321	
0,1-Quantil	85,0	212,0	0,0	0,0416	
0,2-Quantil	149,0	340,0	0,0	0,0647	
0,3-Quantil	223,0	488,0	57,0	0,0947	
Median	1203,0	1635,0	5308,0	1,0666	
Mittelwert	27 165,0	9273,5	13618,8	2,5688	1,19

■ Tabelle 2: Quantile, Gruppe 1

Die reine Gegenüberstellung der Daten mit logarithmischer Abbildung der Individuenzahlen (siehe Abbildung 3) lässt eine Tendenz mit zunehmender Durchmischungsrate nicht erkennen. Es zeigt sich allerdings deutlich die geringere Datendichte mit zunehmender Umwälzleistung.

Statistische Auswertung

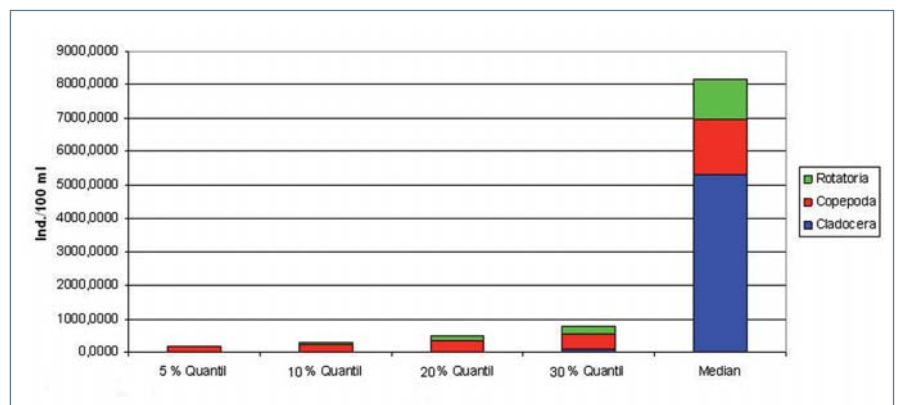
Fokus dieser Untersuchung ist die Validierung der In-situ-Entkeimung infolge der Filtration des Zooplanktons. Aufgrund des Schutzgutes „Mensch“ muss der zu ermittelnde Wert der anzusetzenden Filtrationsleistung einer hohen Sicherheit entsprechen. Vor dem Hintergrund der geringen Datenmenge erscheint die Aufteilung in Quantile als der gangbarste Weg.

Quantil

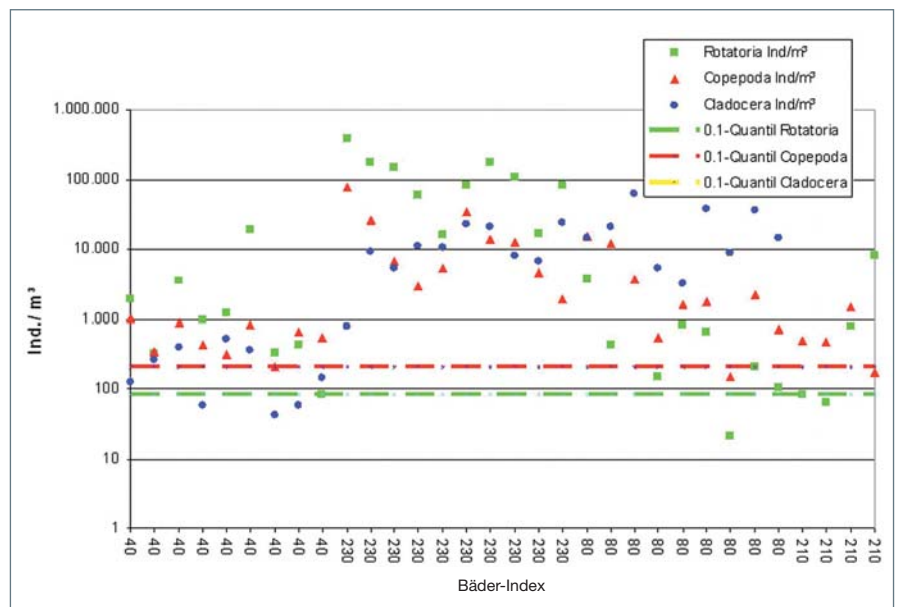
Eine numerische Beschreibung für die Spannweite von Frequenzverteilungen ist das Quantil (früher auch Fraktile genannt). Ein p-Quantil entspricht demjenigen x-Wert der Verteilung, der p * N Beobachtungen einschließt, mit $0 < p < 1$ und N gleich der Anzahl der Beobachtungen. Das p-Quantil wird auch P-Perzentil (mit $P = p * 100$) genannt.

Im Folgenden werden aus den betrachteten Teildaten für die Gruppen 1 und 2 jeweils das 0,05-Quantil, 0,1-Quantil, 0,2-Quantil und 0,3-Quantil berechnet.

Die Aufteilung in Quantile ist im Bereich der Hygienebewertung ein möglicher Weg, der auch im Rahmen der Novellierung der EU-Badegewässerrichtlinie⁶⁾ gegangen wird.



■ Abbildung 4: Gruppe 1, Darstellung der Häufigkeitsverteilung mittels Quantilen

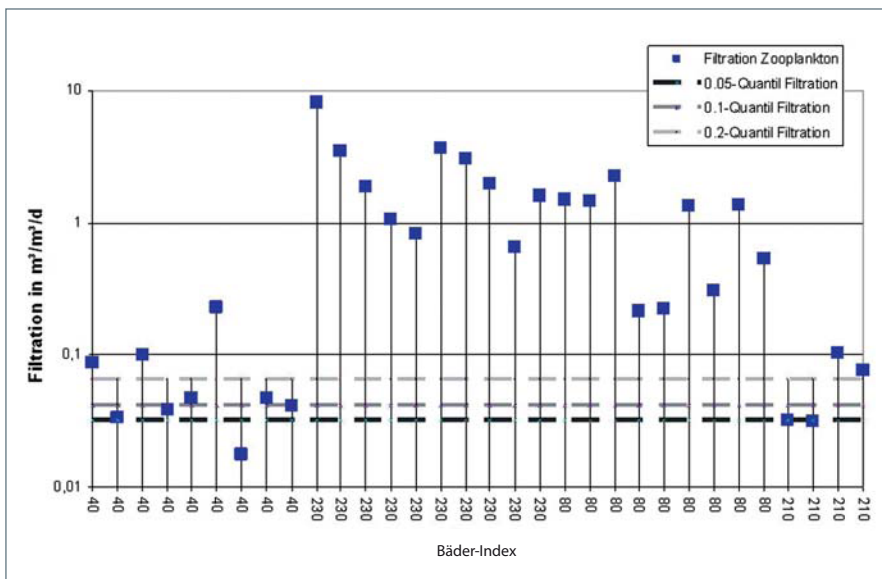


■ Abbildung 5: Gruppe 1, Darstellung der Individuendichten

Im Folgenden werden die Berechnungen der Quantile und deren Ergebniswert für die umgerechnete Filtrationsleistung vor dem Hintergrund der Gesamtdaten dargestellt.

Auswertung Gruppe 1

Die Gruppe 1 ist durch eine niedrige Umwälzrate gekennzeichnet. Die minimale Umwälzung der gegebenen Bäder liegt bei 0,64 1/d und die maximale Umwälzung bei 2,39 1/d.



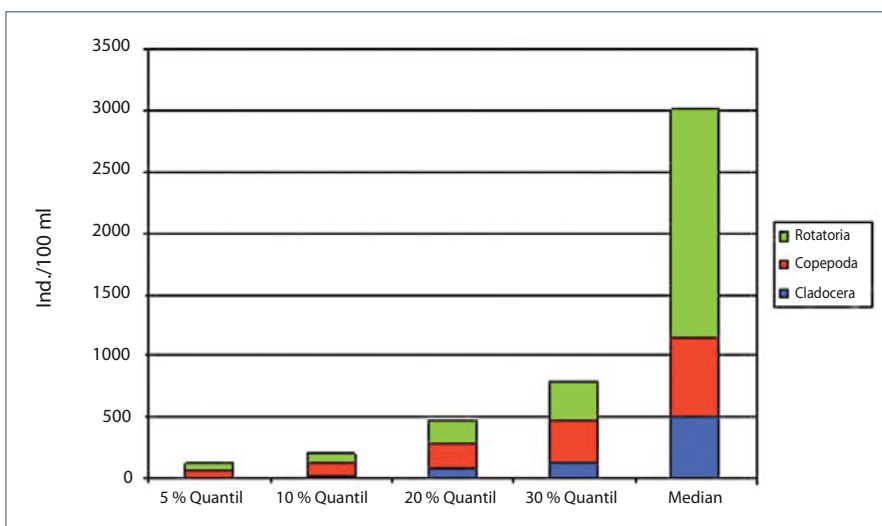
■ Abbildung 6: Gruppe 1, Darstellung der Filtrationsraten

Auswertung Gruppe 2

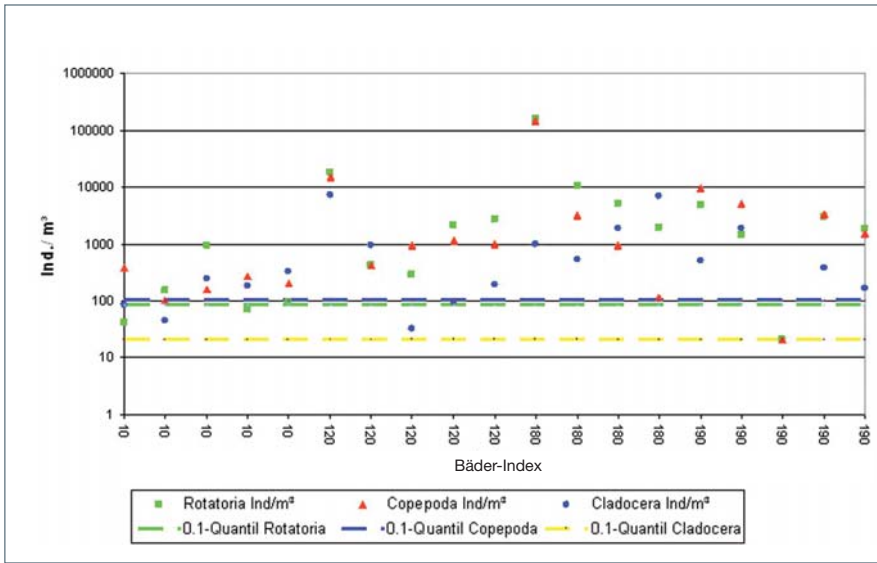
Die Gruppe 2 fasst die Bäder mit einer hohen Umwälzrate zusammen. Die Minimalumwälzrate liegt bei 2,91 1/d und die Maximalumwälzrate bei 8,24 1/d.

Gruppe 2	Rotatoria	Copepoda	Cladocera	Filtration	Umwälzrate
	Ind./m³	Ind./m³	Ind./m³		
0,05-Quantil	47,6	76,4	0,0	0,0183	
0,1-Quantil	83,4	105,2	21,0	0,0497	
0,2-Quantil	195,2	198,4	85,0	0,0626	
0,3-Quantil	311,8	358,8	122,8	0,1183	
Median	1868,0	637,0	510,0	0,3347	
Mittelwert	14 099,9	7198,8	3442,7	1,4014	4,79

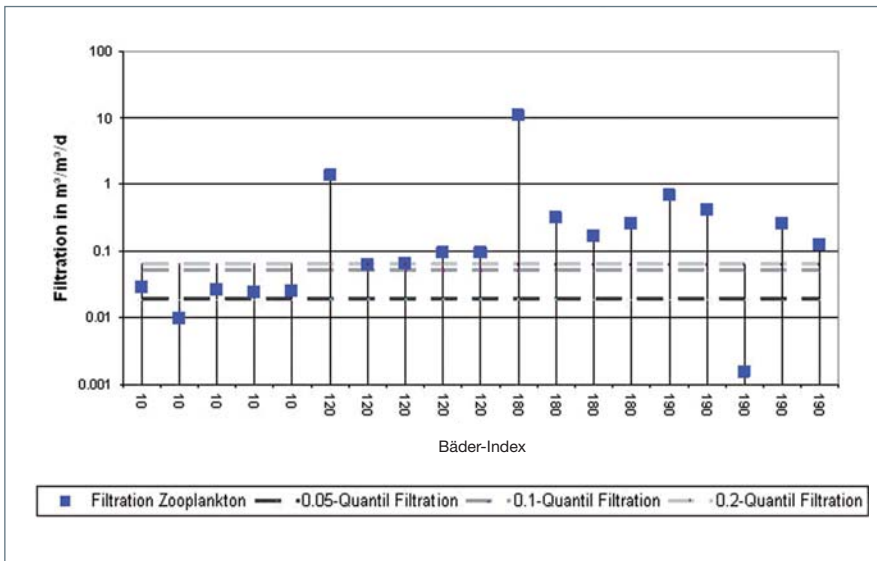
■ Tabelle 3: Quantile, Gruppe 2



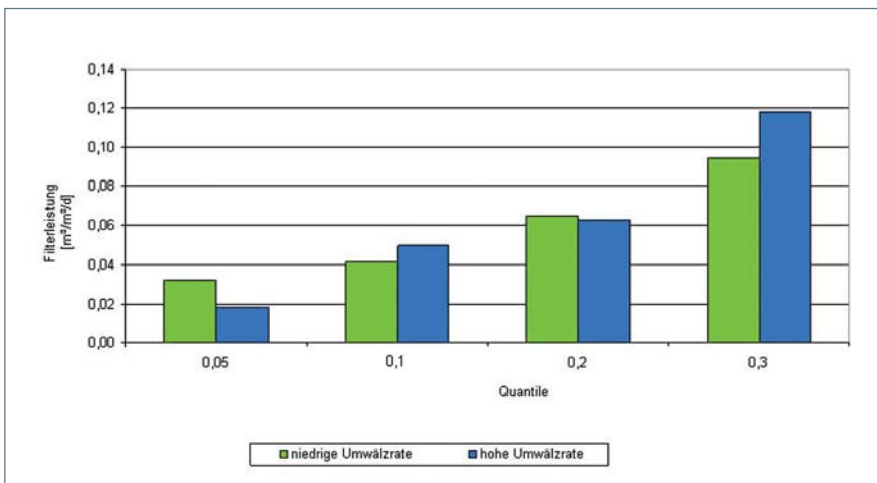
■ Abbildung 7: Gruppe 2, Darstellung der Häufigkeitsverteilung mittels Quantilen



■ Abbildung 8: Gruppe 2, Darstellung der Individuendichte



■ Abbildung 9: Gruppe 2, Darstellung der Filtrationsraten



■ Abbildung 10: Filtrationsleistung bei hoher und niedriger Umwälzrate

Auswertung

Die Tabellen 2 und 3 weisen die Quantile der Gruppen aus. Betrachtet man die Quantile, den Median und den Mittelwert der Filtrationsleistung beider Gruppen, so können diese als Grundlage für die Bestimmung einer Abhängigkeit zwischen der Umwälzrate und der Filtrationsleistung des Zooplanktons dienen.

Bei der Darstellung der einzelnen Quantile beider Gruppen ergibt sich die folgende Abbildung 10.

In Abbildung 10 wird deutlich, dass im Bereich des 0,05- bis 0,3-Quantils keine Abhängigkeit zwischen der Filtrationsleistung und der Umwälzrate aufgezeigt werden kann.

Eine deutlich höhere Filtrationsleistung, bei der niedrigen als bei der höheren Umwälzrate, ist bei dem Median-Wert, d. h. dem 0,5-Quantil, und ebenfalls bei dem Mittelwert zu erkennen (siehe Tabelle 4).

Basierend auf dieser Grundlage kann abgeleitet werden, dass für die minimale Filtrationsleistung keine Abhängigkeit von der Umwälzrate besteht und die Dimensionierung im Bezug auf die In-situ-Entkeimung unabhängig von der Umwälzrate erfolgen kann.

Das 0,1-Quantil erscheint als Grundannahme für die spezifische Filtrationsleistung gerechtfertigt zu sein, da 90 % aller zu erwartenden Filtrationsleistungen die Sicherheit der Wasseraufbereitung hin-

	niedrige Umwälzrate	hohe Umwälzrate
Quantil	in m³/m³/d	
0,05	0,0321	0,0183
0,1	0,0416	0,0497
0,2	0,0647	0,0626
0,3	0,0947	0,1183
Median	1,0666	0,3347
Mittelwert	2,5688	1,4014

■ Tabelle 4: Quantile der Filtrationsleistung

reichend gewährleisten. Darüber hinaus ist die hierbei verbleibende Filtrationsleistung von $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{d}$ entsprechend einer Umwälzleistung von $0,04 \text{ 1/d}$.

Betrachtet man die maximale Filtrationsleistung, so ist es nötig, zwischen Bädern mit einer hohen und niedrigen Umwälzrate zu unterscheiden, da hier die Abhängigkeit zwischen der Zooplanktondichte, d. h. der Filtrationsleistung und der Umwälzrate, deutlich ist (siehe Median und Mittelwert der Tabelle 4).

In Anlehnung an die derzeit laufenden Diskussionen im Rahmen der FLL-Kommission (s. o.) erscheint hier die Festlegung sinnvoll, die maximal anzuset-

zende Filtration durch das Zooplankton auf den Median-Wert, d. h. den 0,5-Quantil, zu begrenzen. Für Bäder mit einer Umwälzrate $\geq 2,5 \text{ 1/d}$ entspricht dies einer maximalen Filtrationsleistung von $0,33 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{d}$ und bei Bädern mit einer niedrigen Umwälzrate von $< 2,5 \text{ 1/d}$ von $1,07 \text{ m}^3/\text{m}^3/\text{d}$ (siehe Abbildung 11).

Bei Ansätzen höher dem 0,1-Quantil sollte aber in jedem Fall eine regelmäßige Zooplanktonbestimmung realisiert werden, um die vom Planer in Ansatz gebrachte Filtrationsleistung zu überprüfen.

Berechnung von Badegastgleichwerten

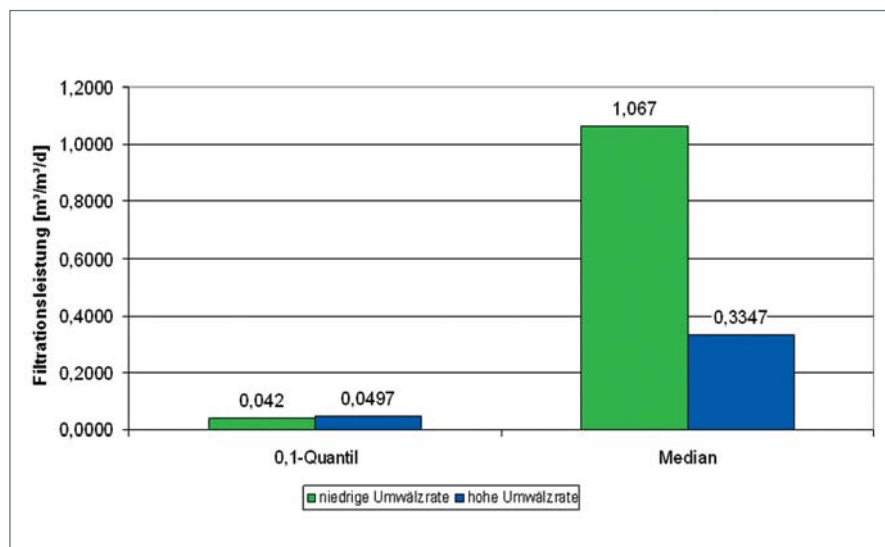
Berechnet man gemäß der Filtrationsleistung des Zooplanktons die Bade-

gastgleichwerte analytisch, so muss beachtet werden, dass die Gewichtung der Elimination durch das Zooplankton hauptsächlich auf dem hygienischen Parameter des *E. coli* liegt. *E. coli* wird stellvertretend für das Vorkommen von Keimen zur hygienischen Bewertung verwendet. Die Eliminationsrate des Zooplanktons für *E. coli*, d. h. für die gesamten Keime, liegt bei 1, d. h. 100 %, wohingegen die Eliminationsrate von Phosphor mit einem Wert von 0,1, d. h. 10 %, anzunehmen ist.

Im Folgenden wird die Berechnung der Badegastgleichwerte unter Einfluss der Insitu-Entkeimung für *E. coli* durch das Zooplankton näher betrachtet. Hierbei wird die Formel 2 zur Berechnung der täglichen Badegastanzahl unter Berücksichtigung von Insitu-Entkeimung und zusätzlichen Wasseraufbereitungsanlagen angewendet:

$$n_{Bg} = \left(\frac{C_0 * Red}{e^{exp}} - C_0 - \frac{C_{Fw} * V_{Fw}}{V_B} \right) * \left(\frac{V_B}{\text{Stoffinput}_{Bg}} \right)$$

■ Formel 2: Badegastgleichwert unter Berücksichtigung des Stoffeintrags durch Badegäste, Füllwasser und der Anfangskonzentration sowie der Elimination durch Zooplankton und weitere Wasseraufbereitungsanlagen⁷⁾



■ Abbildung 11: Maximal und minimal zulässige Filtrationsleistungen in Abhängigkeit von der Umwälzrate

Anzeige



Polyplan Bäderplanung mit Erfahrung und Phantasie

»DIN«- oder »FLL«-Bad? »Bäder zum Wohlfühlen, als kulturelles Zentrum. »Bäder mit durchdachtem und attraktivem Freiraumkonzept. »Dafür steht Polyplan – in Deutschland, Frankreich, Italien, Portugal und Österreich.

Aktuelle Referenzen

aquaLaatzium Hannover, 2009/10
Melbbad Bonn, 2009
Froschloch Dortmund, 2009
Hallenberg, 2009
Freibad Binger Brück, 2009
Freibad Großhabersdorf, 2009
Freibad Glatten, 2009

POLYPLAN

Die Formel 2 wird mit dem folgenden Exponenten berechnet:

$$\text{exp} = - \left[\left(\frac{V_{F-Zoo}}{V_B} * \text{Eli}_{F-Zoo(\text{Stoff})} * \frac{T_{\text{Red-Zoo}(\text{Stoff})}}{24} \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_{F-Wa(i)}}{V_B} * \text{Eli}_{F-Wa(i)} * \frac{T_{\text{Red}(\text{Stoff})}}{24} \right) \right]$$

■ Formel 3: Exponent der Berechnung des Badegastgleichwertes

Variablen:

n_{Bg}	= Anzahl der Badegäste pro Tag [Bg/d]
$C_0(\text{Stoff})$	= Startkonzentration des Stoffes [mg/m ³ ; Ind./m ³]
$\text{Red}_{(\text{Stoff})}$	= Reduzierungsfaktor des betrachteten Stoffes über die Betrachtungszeit [Faktor 1 = 100 %]
$C_{Fw}(\text{Stoff})$	= Konzentration des Stoffes im Füllwasser [mg/m ³ ; Ind./m ³]
V_{Fw}	= Volumenstrom des Füllwassers [m ³ /d]
V_{F-Zoo}	= Filtrervolumenstrom des Zooplanktons [m ³ /d]
V_B	= Beckenvolumen [m ³]
Stoffinput $Bg(\text{Stoff})$	= Stoffeintrag pro Badegast [mg/Bg; Ind./Bg]
V_{F-Zoo}	= Filtrervolumenstrom des Zooplanktons [m ³ /d]
$\text{Eli}_{F-Zoo}(\text{Stoff})$	= Eliminationsrate des Zooplanktons im Wasserkörper bezogen auf den betrachteten Stoff [Faktor 1 = 100 %]
$T_{\text{Red Zoo}}(\text{Stoff})$	= Zeit, in der die Reduzierung Red des Stoffes durch das Zooplankton eintreten soll [h]. Als Stoff ist hier für den hygienischen Badegastgleichwert <i>E. coli</i> und für den chemischen Badegastgleichwert <i>Pges-P</i> einzusetzen.
V_{F-Wa}	= Volumenstrom der betrachteten Wasseraufbereitungsanlage [m ³ /d]
$T_{\text{Red Wa}}(\text{Stoff})$	= Zeit, in der die Reduzierung Red des Stoffes durch die Filteranlage eintreten soll [h]. Als Stoff ist hier für den hygienischen Badegastgleichwert <i>E.coli</i> und für den chemischen Badegastgleichwert <i>Pges-P</i> einzusetzen.
V_{F-Wa}	= Volumenstrom der betrachteten Wasseraufbereitungsanlage [m ³ /d]
$\text{Eli}_{F-Wa}(\text{Stoff})$	= Eliminationsrate der Wasseraufbereitungsanlage bezogen auf den betrachteten Stoff [Faktor 1 = 100 %]. Als Stoff ist hier für den hygienischen Badegastgleichwert <i>E. coli</i> und für den chemischen Badegastgleichwert <i>Pges-P</i> einzusetzen.

Wird ausschließlich die Insitu-Entkeimung als Wasseraufbereitung herangezogen, so wird der Exponent, Formel 3, um den Term der Wasseraufbereitungsanlagen verringert:

$$n_{Bg} = \left(\frac{C_{0(E.coli)} * \text{Red}_{(E.coli)}}{e^{-\left(\frac{V_{F-Zoo(E.coli)}}{V_B} * \text{Eli}_{F-Zoo} * \frac{T_{\text{Red-Zoo}(E.coli)}}{24} \right)}} - C_0 - \frac{C_{Fw(E.coli)} * V_{Fw}}{V_B} \right) * \left(\frac{V_B}{\text{Stoffinput}_{Bg(E.coli)}} \right)$$

■ Formel 4: Berechnung der Badegastgleichwerte ohne zusätzliche Wasseraufbereitungsanlagen

Für die Berechnung der täglich zugelassenen Badegastanzahl müssen im Vorfeld einige Randbedingungen festgelegt werden (siehe Tabelle 5).

Bei der Beispielberechnung wird angenommen, dass im Badewasser bereits eine Konzentration C_0 -(*E. coli*) von 50 Ind. bzw. KBE (Kolonie bildende Einheiten) *E. coli*/100ml vorliegt und somit der Grenzwert von 100 Ind./100 ml eingehalten wird. Formel 4 berechnet den Badegastgleichwert n_{Bg} unter der Maßgabe, dass alle Einträge der betrachteten Stoffe, hier *E. coli*, innerhalb der Zeit $T_{\text{Red Zoo}}$ (*E. coli*) um den Faktor Red wieder reduziert werden. In dieser Berechnung wird auch das Produkt aus Füllwasservolumenstrom V_{Fw} und der Füllwasserkonzentration C_{Fw} (*E. coli*) als Eintrag berücksichtigt.

Der in Ansatz zu bringende Filtrationsvolumenstrom des Zooplanktons V_{F-Zoo} ist das Produkt aus dem Beckenvolumen V_{Becken} und der spezifischen Filtrationsleistung des Zooplanktons in $\text{m}^3 * (\text{m}^3 * \text{d})^{-1}$.

Wird davon ausgegangen, dass die *E. coli*, mit einer Eliminationsrate von 100 % für das Zooplankton, ausschließlich durch das Zooplankton und nicht mittels anderer Wasseraufbereitungsanlagen eliminiert werden, so ergeben sich mit den in Tabelle 5 aufgeführten Parametern die maximal zulässigen Badegastanzahlen pro Tag (siehe Tabelle 6).

In der dortigen Berechnung wird $T_{\text{Red Zoo } E. coli}$ auf 14 h gesetzt. Dieser Wert resultiert aus der Annahme, dass ein Freibad um 19.00 Uhr schließt und sich frühestens um 9.00 Uhr des Folgetages erneut ein reger Betrieb einstellt.

Nach der resultierenden Berechnung ergeben sich für minimale Filtrationsleistungen ein Gleichwert von 0,08 Badegästen/m³ für beide Gruppen, da hier das 0,1-Quantil nahezu identisch ausgefallen ist. Für die maximal anzusetzende Filtrationsleistung resultiert für

Variable	Wert	Einheit	Kommentar
Red	1		1 = keine Eliminierung
C_0 (E. coli)	50	Ind./100 ml	Grenzwert eingehalten
V_{Becken}	2000	m ³	
V_{FW}	100	m ³ /d	FW = Füllwasser
C_{FW} (E. coli)	0	Ind./100 ml	E. coli Konzentration im Füllwasser
$T_{\text{Red Zoo}}$ (E. coli)	14	h	Angesetzte Zeit für die Reduzierung
Stoffinput B_g (E. coli)	60 000	Ind./Bg	
Eli_F Zoo (E. coli)	1	Faktor	1 = 100 % Reduzierung

■ *Tabelle 5: Parameter der Badegastgleichwerte-Berechnung*

Filtrationsleistung des Zooplanktons	Kommentar	Badegastanzahl	BGW
0,04 m ³ /m ³ /d	0,1-Quantil, minimal anzusetzende Filtrationsrate für Bäder mit niedriger und hoher Umwälzrate	168 Bg/d	0,08 Bg/m ³
1,07 m ³ /m ³ /d	Gruppe 1, Median (0,5-Quantil), maximal anzusetzende Filtrationsleistung für Bäder mit niedriger Umwälzrate (< 2,5 1/d)	5112 Bg/d	2,56 Bg/m ³
0,33 m ³ /m ³ /d	Gruppe 2, Median (0,5-Quantil), maximal anzusetzende Filtrationsleistung für Bäder mit hoher Umwälzrate (≥ 2,5 1/d)	1433 Bg/d	0,72 Bg/m ³

■ *Tabelle 6: Badegastgleichwerte (BGW) mit minimal und maximal zulässigen Filtrationsleistungen*

die Gruppe 1 ein Gleichwert von 2,56 Badegästen/m³ und für die Gruppe 2 ein Gleichwert von 0,72 Badegästen/m³.

Die Ergebnisse berücksichtigen ausschließlich die Abbauleistung infolge der Filtrationsleistung durch das Zooplankton. Da das 0,5-Quantil der Zooplanktondichte entgegen dem 0,1-Quantil eine Abhängigkeit zur Umwälzrate aufweist, wurde die Auswirkung auf die Badegastgleichwerte in Tabelle 6 explizit ausgewiesen, um einen Eindruck des Einflusses zu vermitteln.

Bei der Berechnung ist darauf zu achten, dass die Gleichwerte sich ausschließlich auf *E. coli* beziehen und der Grenzwert für die chemische Qualität von Badegewässern für (Stoff) Phosphor nicht mit einbezogen ist. Neben der Anfangskonzentration von Phosphor im Becken ist mit einem Eintrag über das Füllwas-

ser und die Badegäste zu rechnen, der auf Grund der geringen Eliminationsrate des Zooplanktons von 10 % nicht ausreichend eliminiert wird, um die Anfangskonzentration im Hinblick auf den Zeitraum eines Tages konstant zu halten.

Legt man also einen öffentlichen Schwimmteich aus und dimensioniert die interne wie externe Wasseraufbereitung nach dem Verdünnungsansatz wie hier vorgestellt, so ist eine Unterteilung der rechnerischen Badegastgleichwerte in hygienischen Badegastgleichwert (Leitparameter *E. coli*) und chemischen Badegastgleichwert (Leitparameter Phosphor) sinnvoll.

Diskussion

Das Zooplankton ist ein effektiver Filtrierer, was viele limnologische Untersuchungen seit langem bestätigen. Es könnte hinsichtlich der Hygiene als „biologisch-dynamische Filtrationsanlage“ gesehen werden, die sich sogar teilweise selektiv im System bewegt. Leider bezieht sich die Dynamik auch auf die Individuendichten, die aufgrund diverser Störungen abnehmen können. Um eine hohe Sicherheit bei der Filtrationsleistung des Zooplanktons zu gewährleisten, ist als minimaler Toleranzwert das 0,1-Quantil angesetzt, wodurch eine 90 %-ige Sicherheit gegeben ist.

Und es sollte zusätzlich zu den Betrachtungen festgehalten werden, dass parallel eine weitere Wasserreinigung zur Nährstoffentnahme und Entkeimung stattfinden muss, um sowohl die Eutrophierung als auch die Verteilung und den schnelleren Spitzenlastabbau von Keimeinträgen zu erreichen. Hier sollte die Forderung bestehen, dass das Gesamtsystem, bestehend aus Reinigungsanlage und Zooplankton (Insitu-Entkeimung), den personenbezogenen Keimeintrag innerhalb von mindestens 24 h (aus Sicherheitsgründen besser in 14 h) abbaut und eine Konzentration C_0 von 50 Ind./100 ml, d. h. 50 % des einzuhal tenden Grenzwertes von 100 Ind./100 ml, gewährleistet.

Um die Funktionsweise der „biologisch-mechanische Wasseraufbereitungsanlage“ im Sinne der FLL⁸⁾ darzustellen, wird im Folgenden die Konzentrationsabnahme durch das Zooplankton, bzw. mit einem Bodenfilter als zusätzlicher Reinigungsstufe, dargestellt.

Die Konzentrationsabnahme des *E. coli* mittels Zooplankton, mit einer Eliminationsrate von 100 %, und einem Bodenfilter (Wa = Wasseraufbereitungsanlage), mit einer Eliminationsrate von 90 % für *E. coli*, stellt sich gemäß Formel 5 dar:

$$C_t = (C_{0(E.coli)} + C_{Bg(E.coli)} + C_{Fw(E.coli)} * \frac{V_{FW}}{V_B}) * e^{-\left[\left(\frac{V_{F-Zoo}}{V_B} * Eli_{F-Zoo(E.coli)} * \frac{T_{Red-Zoo(E.coli)}}{24} \right) + \left(\frac{V_{F-WA}}{V_B} * Eli_{F-WA(E.coli)} * \frac{T_{Red-WA(E.coli)}}{24} \right) \right]}$$

■ Formel 5: Berechnung der Konzentrationsabnahme infolge der Zooplanktonfiltration und additiver Filtration

Variablen:
 $C_{BG(E.coli)}$ = Konzentrationsanreicherung durch Badegäste
 $C_{BG(Stoff)}$ = $n_{Bg} * \text{Stoffinput}_{Bg(Stoff)}$

Findet die Elimination ausschließlich über die Insitu-Entkeimung des Zooplanktons statt, so wird die Konzentrationsabnahme wie folgt dargestellt:

$$C_t = (C_{0(E.coli)} + C_{Bg(E.coli)} + C_{Fw(E.coli)} * \frac{V_{FW}}{V_B}) * e^{-\left[\left(\frac{V_{F-Zoo}}{V_B} * Eli_{F-Zoo(E.coli)} * \frac{T_{Red-Zoo-WA(E.coli)}}{24} \right) \right]}$$

■ Formel 6: Berechnung der Konzentrationsabnahme infolge der Zooplanktonfiltration

Im Folgenden wird eine Betrachtung der Relevanz des Zooplanktons bzgl. der Abbauraten von Leitkeimen angestellt. In Tabelle 8 wird die Konzentrationsabnahme über einen Zeitraum von 14 Tagen betrachtet. Für die Berechnung werden folgende Parameter (Tabelle 7) festgelegt:

Variable	Wert	Einheit	Kommentar
$C_{0(E.coli)}$	50	Ind./100 ml	50 % des Grenzwertes
V_{Becken}	2000	m ³	
$T_{Red TA(E.coli)}$	24	h	
$Elim_{Zoo(E.coli)}$	1		1 = 100 % Elimination
$Eli_{F-WA(E.coli)}$	0,9		90 % E. coli Elimination in der Wasseraufbereitungsanlage
V_{F-WA}	1000	m ³ /d	Volumenstrom der Wasseraufbereitungsanlage
$V_{Zoo 0,1-Quantil}$	80	m ³ /d	ergibt sich aus dem Produkt aus der Filtrationsrate 0,04 m ³ /m ³ /d und dem Beckenvolumen
$V_{Zoo, Median, niedrige Umwälzung}$	2140	m ³ /d	ergibt sich aus dem Produkt aus der Filtrationsrate 1,07 m ³ /m ³ /d und dem Beckenvolumen

■ Tabelle 7: Parameter zur Berechnung der Konzentrationsabnahme

Bei der Berechnung wird ein zusätzlicher Input über die Abbauzeit durch Füllwasser oder Badegäste ausgeschlossen. Somit erfolgt die Elimination ausschließlich im geschlossenen System mit einer definierten Anfangskonzentration C_0 .

Bei der Berechnung werden vier verschiedene Fälle (1. a-b und 2. a-b) betrachtet:

- 1. die Konzentrationsabnahme bei einer minimalen Filtrationsleistung von 0,04 m³/m³/d

- a. des Zooplanktons mit einer resultierenden Umwälzrate von 0,04 1/d
- b. des Zooplanktons mit additivem Bodenfilter (BF) und einer Umwälzrate von 0,54 1/d
- 2. die Konzentrationsabnahme mit einer maximalen Filtrationsleistung bei einer niedrigen Umwälzrate, d. h. < 2,5 1/d
 - a. des Zooplanktons mit einer Umwälzrate von 1,07 1/d
 - b. des Zooplanktons mit additivem Bodenfilter und einer Umwälzrate von 1,57 1/d

Die Ergebnisse der Fallbetrachtung werden in Tabelle 8 und Abbildung 12 dargestellt.

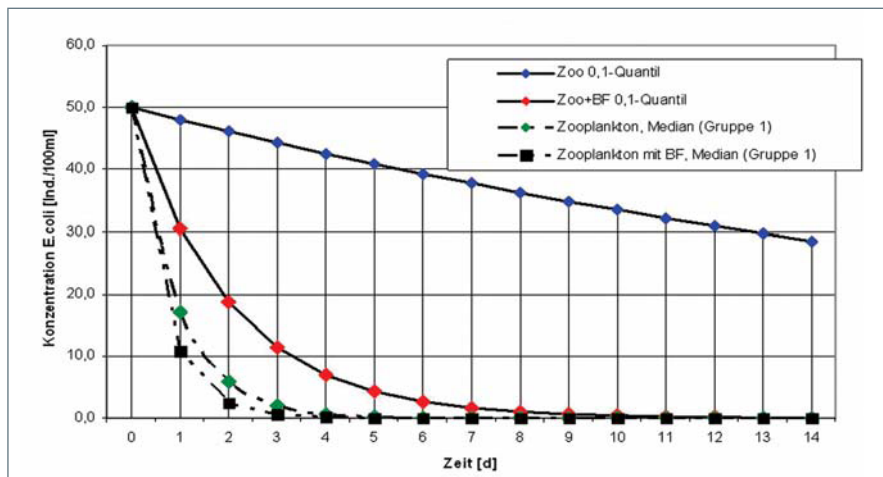
Die Eliminationsrate durch das Zooplankton mit der Filtrationsleistung gemäß dem 0,1-Quantil (blau) ist gemäß Abbildung 12 vergleichsweise gering; sie beträgt in diesem Beispiel ca. 43 % in 14 Tagen. Bei der Filtrationsleistung gemäß dem Medianwert (Gruppe 1) (grün) wird die Elimination um 1 Logstufe nach ca. zwei Tagen erreicht; d. h. nach dieser Zeit sind 90 % der Anfangskonzentration eliminiert.

Bei der Betrachtung der Keimelimination mit einem zusätzlichen Bodenfilter mit einer hydraulischen Leistung von 1000 m³/d zeigt sich, dass bei der Filtrationsleistung gemäß dem 0,1-Quantil (rot) die Elimination um 1 Logstufe nach ca. fünf Tagen eintritt. Die Elimination mit der Filtrationsleistung des Zooplanktons gemäß dem Medianwert für Bäder der Gruppe 1 erfolgt mit Bodenfilter um 1 Logstufe nach ca. 1,5 Tagen.

Zusätzlich sei an dieser Stelle noch einmal erwähnt, dass das Zooplankton nur

Tag Filtrationsleistung des Zooplanktons	Zooplankton 0,1-Quantil	Zooplankton mit BF 0,1-Quantil	Zooplankton Median (Gruppe 1)	Zooplankton mit BF Median (Gruppe 1)
	0,04 m ³ /m ³ /d	0,04 m ³ /m ³ /d	1,07 m ³ /m ³ /d	1,07 m ³ /m ³ /d
0	50,0	50,0	50,0	50,0
1	48,0	30,6	17,1	10,9
2	46,1	18,7	5,8	2,4
3	44,3	11,4	2,0	0,5
4	42,6	7,0	0,7	0,1
5	40,9	4,3	0,2	0,0
6	39,3	2,6	0,1	0,0
7	37,8	1,6	0,0	0,0
8	36,3	1,0	0,0	0,0
9	34,8	0,6	0,0	0,0
10	33,5	0,4	0,0	0,0
11	32,2	0,2	0,0	0,0
12	30,9	0,1	0,0	0,0
13	29,7	0,1	0,0	0,0
14	28,5	0,1	0,0	0,0
Elimination	43,0 %	99,9 %	100,0 %	100,0 %
Umwälzrate	0,04 1/d	0,54 1/d	1,07 1/d	1,57 1/d

■ Tabelle 8: Berechnung der Konzentrationsabnahme
BF: Bodenfilter



■ Abbildung 12: Berechnung des Konzentrationsabbaus mittels Zooplankton mit/ohne additiver Biofiltration bei niedriger Umwälzrate

ein Baustein der In-situ-Entkeimung ist und weitere Bausteine wie natürliches UV-Licht etc. eine additive Rolle spielen.

Es zeigt sich allerdings deutlich, dass ein dichteres Beobachtungsnetz und in dessen Folge eine bessere Datenbasis wünschenswert sind, um diese Ergebnisse zu verifizieren.

Solange letzteres nicht gegeben ist, erscheint die Berücksichtigung des 0,1-Quantils für die Filtrationsleistung des Zooplanktons angemessen.

Anmerkungen

- 1) Juan M. Lopez-Pila et al., Entfernung von Mikroorganismen durch Bodenfilter für Kleinbadeteiche, zitiert nach: Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 2009, 52: 228 - 237
- 2) Inga Eydeler und Jürgen Spieker: Keimelimination durch Zooplankton. Wasserreinigung in Schwimm- und Badeteichen. In: AB Archiv des Badewesens, 03/2010, S. 167 ff.
- 3) Winfried Lampert und Ulrich Sommer: Limnökologie. New York: Thieme Verlag, 2. Auflage 1999, S. 70
- 4) Ebd., S. 55
- 5) Dietrich Uhlmann und Wolfgang Horn: Hydrobiologie der Binnengewässer. Stuttgart: UTB, 2001, S. 283
- 6) Richtlinie 2006/7/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Februar 2006 über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung und zur Aufhebung der Richtlinie 76/160 EWG
- 7) Polyplan GmbH: Berechnung des Badegastgleichwertes. Konzept zur Auslegung von Kleinbadeteichen; noch nicht veröffentlicht
- 8) Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL): Empfehlungen für Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von öffentlichen Schwimm- und Badeteichanlagen, Bonn, Oktober 2003, S. 36, Tab. 11