

Neuartiges Filtrationskonzept schützt Kühlsysteme vor Totalausfall durch Muschelbefall

Friedrich Wilhelm

1 Einleitung

Invasive Muschelarten wie Quagga- und Zebra-*Muscheln* verbreiten sich mangels natürlicher Fressfeinde rasant in westeuropäischen Binnengewässern. Verursacht und beschleunigt wird die weltweite Verschleppung durch Zugvögel, Ballastwassertransfer, Schiffsrümpfe, Surfbretter und sogar durch Taucheranzüge. Gelangen deren Larven in Anlagen zur Trink- und Kühlwassererzeugung, bilden sie binnen kurzer Zeit großflächige Muschelsteppiche. Besonders kritisch ist das Larvenstadium (Veliger): Die Larven sind kleiner als 90 µm, elastisch und können aufgrund ihrer Morphologie viele herkömmliche Filtermaterialien durchdringen. Sie besiedeln Rohrleitungen, Wärmetauscher und weitere wasserführende Kom-

ponenten. Die Folgen sind zunehmende Druckverluste, verschlechterter Wärmeübergang und schließlich der Ausfall betroffener Komponenten. Für Betreiber entstehen dadurch erhebliche Kosten durch Wartung, Reinigung und Stillstände. Ist ein System erst einmal befallen, wird die Beseitigung der verkrusteten Ablagerungen zur Sisyphusarbeit. Daher ist es essenziell, das Eindringen der Larven direkt hinter der Wasserfassung zu verhindern. Hierzu existiert bereits eine Fülle von chemisch-physikalischen Methoden, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Viele Verfahren – etwa UV-Desinfektion oder der Einsatz von Bioziden – sind in der Praxis häufig kostenintensiv, teilweise umweltbelastend und nicht immer zuverlässig. Auch die vielfach beschriebene Strategie, Larven mittels Scherkräften und Turbulenzen zu schädigen, erweist sich als ineffizient. Die Larven sind aufgrund ihrer flexiblen, unmineralisierten Struktur gegenüber kurzzeitigen hydrodynamischen Belastungen widerstandsfähiger als oft angenommen. Zudem liegen die zur Abtötung erforderlichen Schergradienten deutlich oberhalb dessen, was in realen Anlagenhydrauliken bei üblichen Durchflussgeschwindigkeiten gleichmäßig und dauerhaft erreicht

werden kann. Sowohl eigene Untersuchungen als auch Berichte aus anderen Arbeitsgruppen zeigen, dass Larven selbst nach der Passage von Zonen starker Turbulenzen und Scherkräften vital bleiben (1).

Aus diesen Gründen gelten Scherkräfte zwar als begleitender Einflussfaktor, ersetzen jedoch keine zuverlässige Barriere. Für wasserführende Systeme ist daher eine mechanische Abscheidung mit definierter Trenngrenze die einzige Methode, die den Eintrag lebensfähiger Larven mit hoher Sicherheit verhindert.

Herausforderungen aus Betreibersicht

- Hohe Folgekosten durch verschlammte oder verblockte Wärmetauscher → geringerer Wärmeübergang, höherer Energieeinsatz, mehr CO₂-Emissionen.
- Ungeplante Stillstände → Kühlleistung sinkt, Prozesssicherheit nimmt ab.
- Wiederkehrender Reinigungsaufwand → manuelle Entfernung von Muschelkolonien ist zeit- und personalintensiv.
- Chemische Alternativen verursachen steigende Betriebs- und Genehmigungskosten → Biozide/UV erfordern Dokumenta-

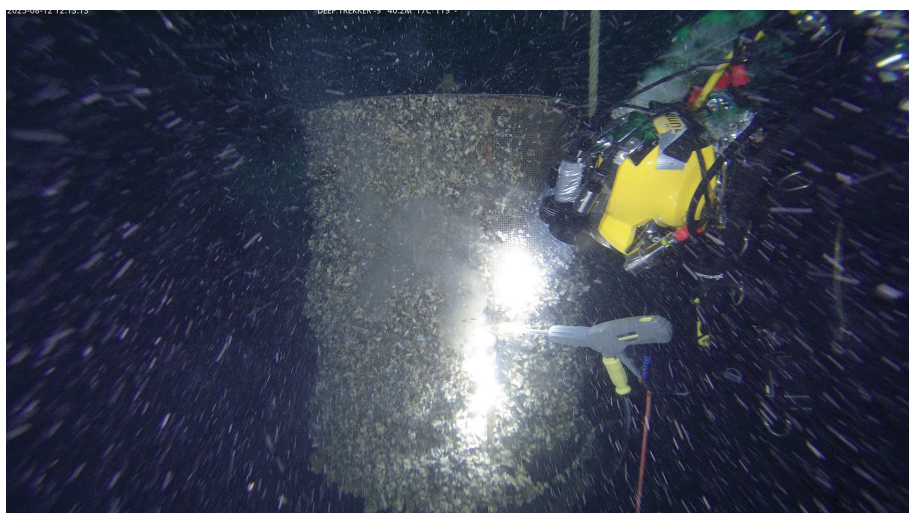


Bild 1. Muschelbefall an einem Saugkorb im Bodensee (Quelle: Universität Konstanz).



Bild 2. Quagga-Muschel (Quelle: Universität Konstanz).

- tion, Überwachung, Wartung.
- Hohe hydraulische Verluste bei Muschelbewuchs → Pumpenarbeit steigt, Energiekosten und Verschleiß nehmen zu.

2 Langzeitversuch zum Nachweis der Larvenbeseitigung

2.1 Hintergrund und Zielsetzung

Gesucht wurde eine effektive, kostengünstige und praxistaugliche Alternative zu bestehenden Verfahren. Die Lösung fand sich in einem Filterkonzept, das sich bereits in der Ballastwasseraufbereitung auf Schiffen bewährt hat. Dort verhindert die Filtration die Verschleppung invasiver Organismen beim Befüllen und Entleeren der Ballastwassertanks. Basierend auf erfolgreichen Tests im eigenen Versuchscontainer in Bremerhaven sowie auf Frachtschiffen wurde die Technologie auf Binnengewässer übertragen. Der Bodensee hat mit einer Besiedlungsdichte von bis zu 25.000 Muscheln pro m² und bis zu 1.400 Larven pro m³ ein echtes Problem mit der Quagga-Muschel. Gemeinsam mit der Universität Konstanz wurden umfangreiche Versuche durchgeführt, um den Nachweis zu erbringen, dass ein vollautomatischer Filter sowohl Makromuschelmaterial als auch mikroskopische Larven über lange Zeiträume und unter realen Lastschwankungen zuverlässig entfernt.

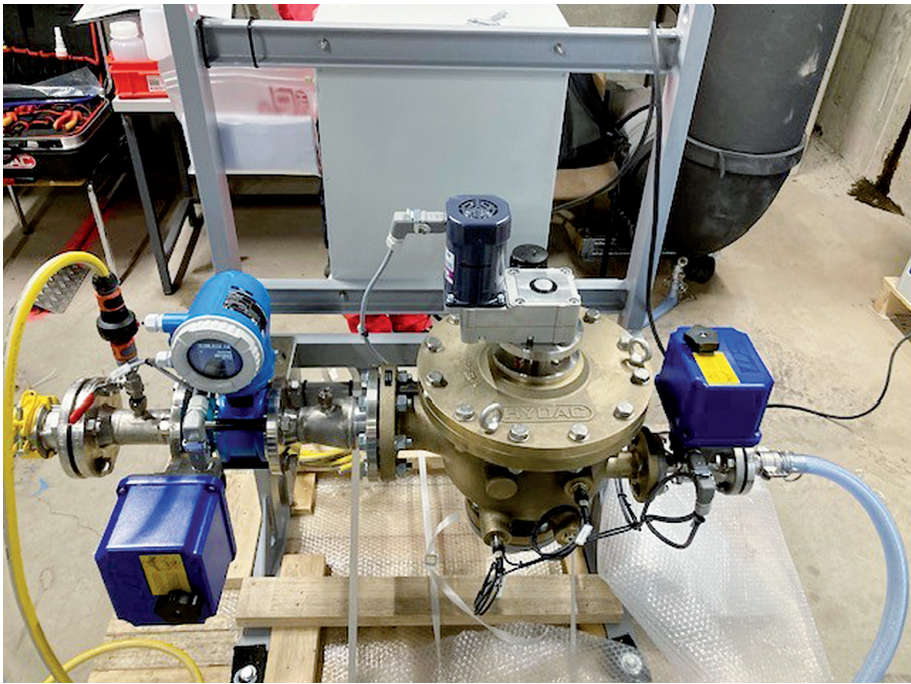


Bild 3. Versuchsfilter mit Durchflussmessung und Datenlogger.

2.2 Versuchsaufbau

Die Versuchsanlage bestand aus einem Automatik-Feinfilter mit Durchflussmessung und Datenlogger. In regelmäßigen Intervallen über sieben Monate wurden Proben vor und hinter dem Filter entnommen. Die Probenahme erfolgte mittels Planktonsieben gemäß limnologischer Standardmethodik. Anschließend wurden die Proben mit Lugolscher Lösung fixiert und in einem limnologischen Labor unter dem Umkehrmikroskop ausgezählt und auf 1 m³ hochskaliert.

2.3 Ergebnisse

Bereits zu Beginn zeigte der Zulauf zum Filter eine hohe Menge an Muschelschalen und Bruchstücken – plausibel, da die Bestandsleitung der Versuchsanlage bereits stark besiedelt war. In den späten Sommermonaten wurden im Zulauf über 1.000 Larven pro m³ ermittelt (Literaturwerte bestätigen diesen Bereich). Auf der Reinseite wurden über den gesamten Zeitraum hinweg nahezu keine



Bild 4. Probenahme mittels Veligersieben.

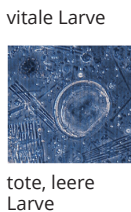
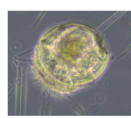
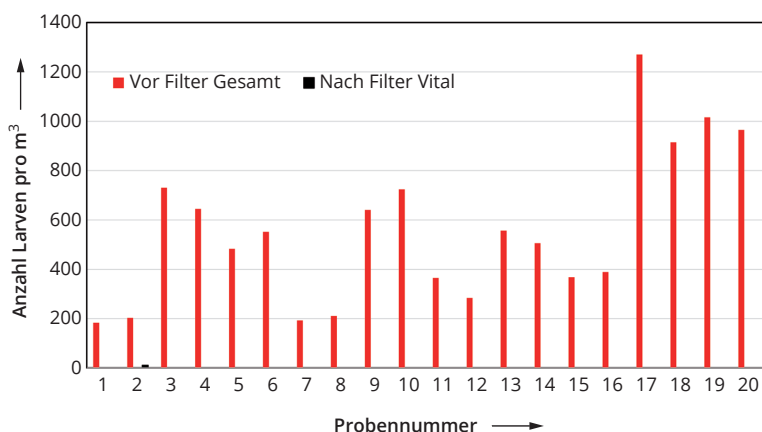
Tab. 1. Verfahren zur Bekämpfung der Zebra- und Quagga Muschel.

Verfahren	Abscheidung bzw. Abtöten der Larven	Kosten	Kommentar
Chlorieren / Ozon / Biozide	ausreichend	gering	Unerwünscht oder verboten; ökologisch bedenklich
pH-Wert Absenkung	ausreichend	gering	Unerwünscht oder verboten; ökologisch bedenklich
UV-Anlagen	ausreichend	sehr hoch	Funktioniert nur bei sorgfältiger Anlagengestaltung (Verweildauer). Sehr teuer durch hohen Energieverbrauch
Thermische Behandlung	ausreichend	sehr hoch	Hoher Energieverbrauch; unpraktikabel
Abtöten durch Turbulenzen (Pumpe)	unzureichend	gering	Ein Großteil der Larven bleibt unversehrt
Abtöten durch Scherkräfte (Spaltsieb)	unzureichend	gering	Nur 45 bis 65% Mortalität. Nachgewiesen durch eigene und Versuche anderer Institute (1)
Sandfilter	ungenügend	sehr hoch	Anschaffungs- und Betriebskosten hoch
Rückspülfilter mit Spaltrohren	ungenügend	gering	Es werden nur Muschelschalen zurückgehalten
Mechanisches Reinigen / Molchen	keine	hoch	Aufwendig, erfordert molchbare Anlagenteile. Larven werden nicht vollständig entfernt
Ultrafiltration (Membranverfahren)	sehr gut	sehr hoch	Hohe Anschaffungs- und Betriebskosten



Bild 5. Quagga Muschelschalen vor dem Filter

Tab. 2. Versuchsergebnisse – Larvenpopulation (Zusammenfassung).



Larven nachgewiesen; lediglich in einer Probe fand sich eine einzige vitale Larve. Das Larven-Monitoring zeigt eine nahezu vollständige Abscheidung über einen langen Zeitraum. Der Rückspülbetrieb verlief während der gesamten Versuchszeit störungsfrei. Die hohe Abscheideleistung beruht auf dem spezifisch ausgelegten Filterkorb, dessen unterschiedliche Filterlagen für diese Trennaufgabe optimiert wurde. In Kombination mit einer Reinigungsdüse, die sehr hohe Spülgeschwindigkeiten erzeugt, entsteht ein hocheffizienter Automatikfilter.

3 Technisches Konzept der Filterkaskade

3.1 Notwendigkeit einer mehrstufigen Filtration

Oberflächengewässer führen stets eine gemischte Feststofffracht. Während im Bodensee eher feine Partikel, Muschelschalen und -larven dominieren, treten in Flüssen häufig zusätzliche Fraktionen auf:

- Grobes Schwemmgut (Äste, Zweige, Pflanzenreste, Plastikteile)
- Sand
- Schlack/Schluff
- Kleinlebewesen
- Algen
- Mikroorganismen (u.a. Muscheln und Larven)

Durch Schifffahrt und Starkwetterereignisse kommt es zudem zu stark schwankender Schmutzfracht.

3.2 Aufbau der Filterkaskade

Aufgrund der heterogenen Fracht ist eine einstufige Filtration in der Regel nicht ausreichend. Große Partikel werden in einer Vorstufe abgeschieden, um die nachgeschaltete Feinfilterstufe vor Überlastung zu schützen. Beide Stufen setzen automatische Rückspülfilter ein, die angeschwemmte Partikel in Intervallen austragen – ohne den Durchfluss zu unterbrechen.

Filtrationsprinzip

Das Filterelement-Paket (Vorfilter) bzw. der Filterkorb (Feinfilter) wird von innen nach außen durchströmt. Partikel, die größer als die Maschen- bzw. Spaltweite sind, werden zurückgehalten. Während der Filtration ruht die Reinigungsmechanik. Eine Differenzdruckmessung ermittelt den Verschmutzungsgrad der Filtereinsätze.

Rückspülung

Erreicht der Differenzdruck typischerweise etwa 0,5 bar, startet der Rückspülvorgang. Beim Vorfilter fährt der Spülarms von Element zu Element und öffnet zugleich die Rückspülmaterie. Beim Feinfilter dreht sich ein Spülarms mit mehreren Düsen entlang



Bild 6. Filterkaskade (Prinzipdarstellung)

des inneren Siebzyllinders. Mit dem Betriebsdruck strömt ein kleiner Teilstrom des Eigenfiltrats in Gegenrichtung durch den Filtereinsatz, löst die Partikel ab und trägt sie über die Rückspülarmatur aus. Da stets nur ein kleiner Teil der Filterfläche gereinigt wird, läuft die Filtration während der Rückspülzyklen ohne Unterbrechung weiter.

4 Anlagenintegration und Auslegung

4.1 Typische Anlagenarchitektur

Die häufigste Reihenfolge bei See- bzw. Flusswasserentnahmen lautet: Saugkorb – Pumpe – Filter(kaskade) – Rohrleitungsnetz – Verbraucher (z.B. Wärmetauscher). Der Saugkorb ist so zu platzieren, dass weder Schwemmgut von der Oberfläche noch Bodensediment angesaugt wird. In Seen – insbesondere bei thermischer Nutzung – wird häufig eine Tiefenentnahme 20 bis 40 m unter der Oberfläche bevorzugt. In Flüssen kommen meist Einlaufwehre mit Pumpenschacht zum Einsatz.

4.2 Bedeutung der Gewässerdaten

Für die Auslegung sind Kenntnisse zur Schmutzbelastung und Partikelgrößenverteilung (gravimetrische Analysen, Partikelverteilungskurven) hilfreich. Falls eigene Untersuchungen nicht möglich sind, können Gewässerämter oft Daten bereitstellen. Während die Filterfeinheit der Feinfilterstufe für den Rückhalt der Quagga-Larven durch die Versuchsergebnisse festgelegt ist, ist die Vorstufe gewässerspezifisch zu definieren. Es gilt: „So grob wie möglich, so fein wie nötig.“

- Seewasser-Tiefenentnahme: 100–200 µm
- Flusswasserentnahme: 200–500 µm

- Bei sehr hohem Schmutzanfall ggf. 3-stufige Kaskade

4.3 Redundanz statt Bypass

Um Wartungsarbeiten auch während dem laufenden Betrieb durchführen zu können, werden Filter häufig mit einem Bypass versehen. Für die Larvenabscheidung bedeutet ein geöffneter Bypass jedoch eine sofortige Kontamination der nachgeschalteten Anlage. Um das Filtrationsziel – den Schutz vor Muschelbefall – nicht zu unterlaufen, ist eine Redundanz mit parallelen Filtrationslinien vorzusehen, z.B.: $2 \times 100\%$ oder $3 \times 50\%$. Alle Komponenten (Filter, Armaturen, Sensoren etc.) können über eine zentrale Steuereinheit oder das Prozessleitsystem des Betreibers angesteuert werden. Eine Rückspülverriegelung verhindert, dass mehrere Filter gleichzeitig spülen.

5 Wirtschaftliche Bewertung

5.1 Belastungsszenario Bodensee

Wie Anfangs bereits erwähnt, war das gesetzte Ziel, eine wirtschaftliche Alternative zu schaffen, die die Aufgabe der Muschelabscheidung bewältigt. Zum Vergleich wird eine Situation betrachtet, die ohne Feinstufe zur Larvenabscheidung auskommt, nämlich ausschließlich nur eine Partikelabscheidung mit herkömmlichen Rückspülfiltern, wie sie derzeit üblich ist (Bild 7: blaue Filter). Am Bodensee werden 1.000–1.400 Quagga-Larven pro m³ gemessen; bei einer Kühlwasserentnahme von 500 m³/h gelangen rechnerisch bis zu ca. 500 Mio. Larven pro Monat in das Rohrleitungsnetz ($500 \text{ m}^3/\text{h} \times 1.400 \text{ Larven}/\text{m}^3 \times \sim 720 \text{ h}/\text{Monat} \approx 504 \text{ Mio.}$). Den zusätzlichen Kosten der

Feinfiltrationsstufe (Bild 7: rote Filter) stehen wesentliche Einsparpotenziale gegenüber:

- entfallende oder verlängerte Revisionsintervalle an Plattenwärmetauschern
- deutlich geringerer Reinigungsaufwand in Rohrleitungen und Komponenten
- niedrigere Pumpenergie durch geringere Druckverluste
- verbesserter Wärmeübergang sowie reduzierte Stillstands- und Ersatzteilkosten
- Der chemiefreie Betrieb erleichtert Umwelt- und Genehmigungsanforderungen.

Auf Basis projektspezifischer Annahmen ergibt sich ein **ROI < 44 Monate**. Die exakte Amortisation ist anlagenspezifisch (u.a. Wärmetauscherflächen, Energiepreise, Reinigungszyklen, Stillstandskosten).

ANSCHAFFUNGSKOSTEN	
BETRIEBSKOSTEN P. A.	7 TEUR
EINSPARPOTENZIAL	31 TEUR
AMORTISATION	< 44 Monate
CO ₂ -EINSPARUNG	17,5 t/Jahr

BERECHNUNGSGRUNDLAGEN		Stand: 2025
Parameter	Wert/Einheit	Quelle
Arbeitslohn	30,17 €/h	Bundesagentur für Arbeit
Industriemechaniker		Statista
Strompreis Gewerbe	0,18 €/kWh	Umweltbundesamt (Strommix Deutschland)
CO ₂ -Ausstoß pro kWh Strom	372 g/kWh	

Bild 8. ROI Modell-Betrachtung (500 m³/h; Bodenseewasser).

6 Zusammenfassung / Resümee

Der Trend geht klar zur Wärmegewinnung aus Fluss- und Seewasser (Aquathermie); zugleich sind Trinkwasserwerke sowie Kühl- und Brauchwasseranlagen auf eine zuverlässige Versorgung aus Binnengewässern angewiesen. Etablierte Filtertechniken (z.B. Trommelsiebe, Rückspülfilter) schützen vor Feststoffen. Mit dem flächendeckenden Auftreten invasiver Muschelarten – insbesondere der Quagga-Muschel – entsteht jedoch zusätzlicher Handlungsbedarf. Deren sehr kleine, elastische Larven passieren viele herkömmliche Filtermaterialien und können in wasserführenden Systemen rasch Kolonien bilden – mit spürbaren Folgen für Effizienz, Wärmeübergang und Betriebssicherheit. Die selbstreinigende, zweistufige Filterkaskade kombiniert eine grobe Vorabscheidung mit einer fein definierten Larvenbarriere. Entscheidend für die Wirksamkeit ist die optimierte Feinfiltrationsstufe mit definierter Trenngrenze sowie der störungsfreie automatische Rückspülbetrieb, der die Abscheideleistung auch unter wechselnden Belastungs- und Schmutzbedingungen stabil hält – vollständig chemiefrei und für den kontinuierlichen Anlagenbetrieb ausgelegt. Der siebenmonatige Bodensee-Langzeitversuch bestätigt die Leistungsfähigkeit der Feinfiltrationsstufe: Sie verhindert nachweisbar den Eintrag lebensfähiger Larven und hält die Reinseite dauerhaft unterhalb der limnologischen Nachweisgrenze. In der zwei-

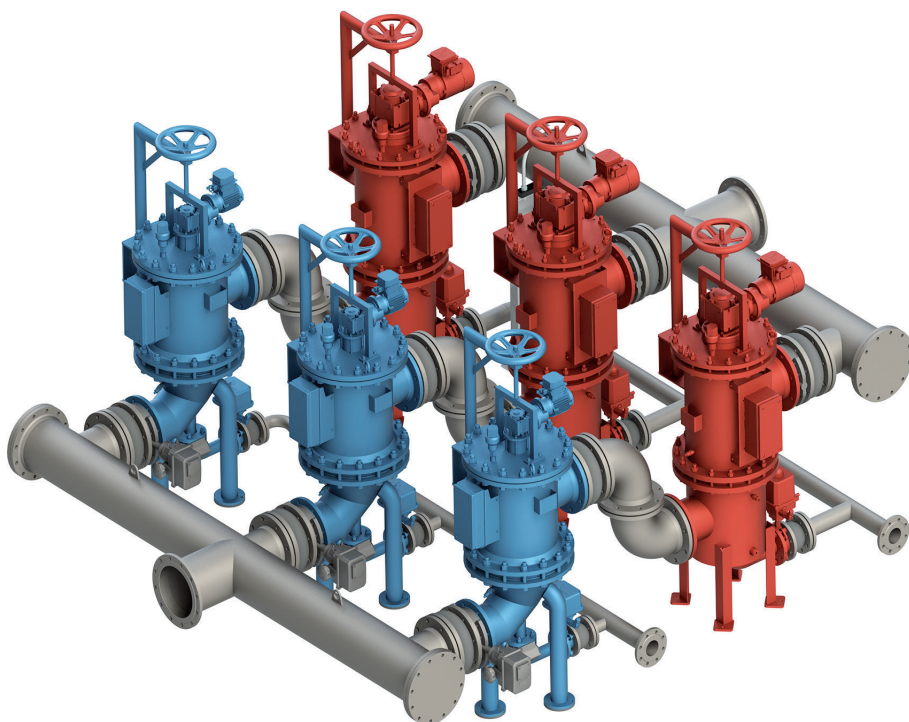


Bild 7. Filterkaskade 3 X 50 %.

stufigen Kaskade bildet sie damit den zentralen Baustein für einen verlässlichen, langzeitstabilen und energieeffizienten Schutz vor muschelbedingten Leistungseinbußen – bei planbarem Wartungsaufwand und hoher Betriebssicherheit.

Für Anlagenbauer, Ingenieurbüros und Betreiber entsteht damit eine technisch wie wirtschaftlich überzeugende Lösung: höhere Betriebssicherheit, geringere Energiekosten durch konstant niedrige Druckverluste und verbesserten Wärmeübergang sowie ein deutlich reduzierter Aufwand für Reinigung, Wartung und Revisionsintervalle. Die Kombination aus mechanischer Barriere, automatischer Rückspülung und redundanter Anlagenarchitektur sorgt für sicheren, langzeitstabilen Schutz vor muschelbedingten Leistungseinbußen und Anlagenstillständen.

Quellenangabe

- (1) Geschäftsbericht 2019 der Bodensee-Wasserversorgung. Weitere projektspezifische Mess- und Versuchsdaten durch HYDAC Process Technology GmbH (interne Unterlagen). |

Abstract

New filtration concept protects cooling systems against total failure by mussel infestation

Invasive mussel species such as quagga and zebra mussels are spreading rapidly in Western European inland waters due to a lack of natural predators. Their global spread is caused and accelerated by migratory birds, ballast water transfers, ship hulls, surfboards, and even diving suits. If their larvae enter facilities for drinking and cooling water production, they form extensive mussel mats within a short time. The larval stage (veliger) is particularly critical: The larvae are smaller than 90 µm, elastic, and, due to their morphology, can penetrate many conventional filter materials. They colonize pipes, heat exchangers, and other water-carrying components.

The consequences are increasing pressure losses, impaired heat transfer, and ultimately the failure of affected components. This

results in significant costs for operators due to maintenance, cleaning, and downtime. Once a system is infested, removing the encrusted deposits becomes a Sisyphean task. It is therefore essential to prevent the larvae from entering the system immediately after water intake. A wide range of chemical-physical methods already exists for this purpose. Many methods – such as UV disinfection or the use of biocides – are often costly in practice, sometimes harmful to the environment, and not always reliable. The frequently described strategy of damaging larvae through shear forces and turbulence has also proven ineffective. Due to their flexible, unmineralized structure, the larvae are more resistant to short-term hydrodynamic stresses than is often assumed. Furthermore, the shear gradients required to kill them are significantly higher than what can be achieved uniformly and sustainably in real-world system hydraulics at typical flow rates. Both our own investigations and reports from other research groups show that larvae remain viable even after passing through zones of strong turbulence and shear forces. |