

INVASIVE QUAGGAMUSCHELN

Bedrohung für Industrieanlagen und Strategien zur Bekämpfung

Kurzversion



Stefan Bernhardt
Energie- und Umwelttechniker HF
2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Management Summary	3
1. Informationssammlung	4
1.1 Analyse	4
1.1.1 Die Quaggamuschel	4
1.1.2 Auswirkungen auf Industrieanlagen	5
1.1.3 Industrielle Anlagen	7
1.1.4 Präventions- und Bekämpfungsmethoden	8
1.1.5 Rechtliche Rahmenbedingungen	14
2. Vergleich der Massnahmen	19
2.1 Durchlaufkühlung	20
2.1.1 Nicht redundante Durchlaufkühlung	20
2.1.2 Redundante Durchlaufkühlung	25
2.2 Kreislaufkühlung	29
2.2.1 Detaillierte Bewertung der Kreislaufkühlung	30
2.3 Wasseraufbereitung	32
2.3.1 Detaillierte Bewertung der Wasseraufbereitung	33
2.4 Fazit	36
2.5 Ausblicke	37
Verzeichnisse	38
Erklärung zur Verwendung von KI und Übersetzungstools	38
Abkürzungsverzeichnis	39
Abbildungsverzeichnis	40
Tabellenverzeichnis	41
Literaturverzeichnis	41

Management Summary

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Problematik der Quaggamuschel in industriellen Anlagen in der Schweiz. Ziel der Untersuchung ist es, die Auswirkungen dieser invasiven Art auf wasserführende Systeme darzustellen, bestehende Präventions- und Bekämpfungsmethoden zu analysieren sowie eine geeignete Bewertungsmethode für industrielle Massnahmen zu entwickeln.

Die Quaggamuschel breitet sich in Schweizer Gewässern zunehmend aus und verursacht erhebliche Probleme in der Industrie. Besonders betroffen sind Kühlanlagen (Durchlauf- und Kreislaufkühlungen) sowie Wasseraufbereitungsanlagen, da die Muscheln Leitungen, Filter und Pumpen verstopfen. Eine Entfernung ist meist aufwendig und kostenintensiv. Behörden und Betreiber stehen vor der Herausforderung, rechtliche Vorgaben einzuhalten und gleichzeitig die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Ziel dieser Arbeit war es, geeignete Verfahren zur Bekämpfung und Prävention zu identifizieren, zu bewerten und eine nachvollziehbare Entscheidungshilfe für Industrie und Behörden zu erarbeiten.

Zunächst wurden die biologischen Eigenschaften der Quaggamuschel sowie die Auswirkungen auf industrielle Systeme analysiert. Anschliessend erfolgte eine Sammlung und Bewertung von mechanischen, chemischen und physikalischen Bekämpfungsverfahren. Ergänzend wurden die relevanten rechtlichen Rahmenbedingungen (insbesondere Gewässerschutzverordnung und Biozidprodukteverordnung) berücksichtigt. Zur Priorisierung der Massnahmen wurden verschiedene Bewertungsmethoden (Punktesystem, Nutzwertanalyse, Ampelsystem) verglichen.

Die Analyse zeigt, dass keine universell einsetzbare Standardlösung existiert.

- Für nicht redundante Durchlaufkühlungen fehlen derzeit praxistaugliche Verfahren abgesehen von der mechanischen Reinigung.
- Redundante Durchlaufkühlungen bieten durch die Möglichkeit der Trockenlegung in Kombination mit mechanischer Reinigung eine realistische Bekämpfungsoption.
- Kreislaufkühlungen erlauben durch ihre geschlossene Systemstruktur einen gezielten Einsatz von Bioziden (z. B. Chlor).
- In Wasseraufbereitungsanlagen sind Molchsysteme und Chlor praktikabel, andere Verfahren sind aufgrund technischer oder rechtlicher Einschränkungen weniger geeignet.

Die Evaluation der Bewertungsmethoden ergab, dass das Ampelsystem die geeignetste Variante darstellt. Es überzeugt durch seine klare Verständlichkeit, Fokussierung auf rechtliche Rahmenbedingungen und Entscheidungsrelevanz. Damit steht eine praxisgerechte und transparente Grundlage für Industrie und Behörden zur Verfügung.

Für die Industrie ist es notwendig, individuelle, kombinierte Strategien zu entwickeln, die technische Machbarkeit, Kosten, rechtliche Vorgaben und Versorgungssicherheit berücksichtigen. Besonders erfolgversprechend sind Trockenlegungsverfahren in redundanten Systemen sowie kombinierte Ansätze in Kreislauf- und Wasseraufbereitungsanlagen. Weitere Forschung ist erforderlich, um die Wirksamkeit von UV-Bestrahlung und Ozonisierung unter Schweizer Bedingungen zu evaluieren. Zudem sollten Behörden und Betreiber frühzeitig in den Dialog treten, um rechtliche Bewilligungen und Grenzwertfestlegungen klar abzustimmen. Langfristig ist eine kontinuierliche Anpassung der Strategien erforderlich, da sich sowohl die Ausbreitung der Quaggamuschel als auch die technischen Möglichkeiten weiterentwickeln.

1. Informationssammlung

1.1 Analyse

In diesem Kapitel werden die notwendigen Informationen über die Quaggamuschel, Industrieanlagen, Präventions- und Bekämpfungsmethoden sowie über die rechtlichen Rahmenbedingungen gesammelt. Der Fokus liegt dabei stets auf der Industrie.

1.1.1 Die Quaggamuschel

Die Quaggamuschel ist eine stark invasive Art, die ursprünglich aus dem Schwarzmeerraum stammt. Heute ist sie in weiten Teilen Europas, unter anderem auch in der Schweiz, verbreitet. Hat sie sich erst einmal in einem Gewässer angesiedelt, breitet sie sich rasant aus. Sie kommt sowohl in Seen als auch in Flüssen vor. Ein wesentliches Problem besteht darin, dass sie hier kaum natürliche Feinde hat und sich daher problemlos weitervermehren kann. Ihre Larven treiben mit der Strömung und sorgen so für eine schnelle Ausbreitung. Ist die Quaggamuschel erst einmal in einem Gewässer etabliert, ist es nahezu unmöglich, sie wieder zu entfernen (Eawag, 2022).



Abbildung 1: Quaggamuscheln auf einem Rohr im Genfersee. (Eawag, 2022)

Die Quaggamuschel kann innerhalb eines Jahres bis zu eine Million Eier pro Tier produzieren, aus denen nach erfolgreicher Befruchtung Larven entstehen. Eine Larve ist 60–160 Mikrometer gross und setzt sich bei einer Grösse von etwa 0.2 Millimetern fest. Ausgewachsene Muscheln können eine Grösse von bis zu 40 Millimetern erreichen (Genossenschaft EW Romanshorn (EWR), 2024).

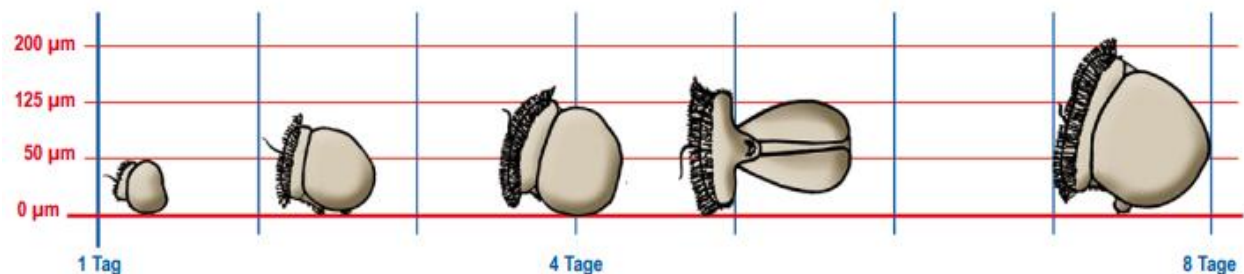


Abbildung 2: Wachstum der Zebra muschellarve – dies ist vergleichbar mit der Quaggamuschellarve. (Dango & Dienenthal, 2025)

Aufgrund der raschen Ausbreitungsgeschwindigkeit und des hohen Schadenspotenzials stehen sowohl die Industrie, die Wasser aus befallenen Gebieten entnimmt, als auch die zuständigen Behörden vor grossen Herausforderungen. Neben der hohen Filtrationsleistung, durch die das Phytoplankton stark reduziert und damit die Nahrungsgrundlage anderer Lebewesen erheblich verringert wird, verstopfen Quaggamuseln auch Leitungen sowie Teile von Wasserversorgungs- und Kühlsystemen. Die Eawag geht davon aus, dass in den betroffenen Gebieten die Biomasse der Quaggamuschel in den nächsten 20–30 Jahren pro Quadratmeter um das 9- bis 20-Fache ansteigen wird (Eawag, 2022).

Gewässer, die bisher noch nicht von der Quaggamuschel befallen sind, müssen konsequent geschützt werden. Die Hauptwege der Verschleppung sind menschliche Aktivitäten, insbesondere der Transport durch Boote, Tauchausrüstungen oder andere Gegenstände, die mit befallenen Gewässern in Kontakt gekommen sind (Eawag, 2022).

Da sich diese Arbeit auf die Problematik in der Industrie konzentriert, werden mögliche Massnahmen zur Eindämmung oder zur Verhinderung der Verschleppung in andere Gewässer nicht behandelt.

1.1.2 Auswirkungen auf Industrieanlagen

Die Quaggamuschel kann sich in nahezu allen wasserführenden Systemen ansiedeln, die Wasser aus einem befallenen Gebiet beziehen. In der Schweiz sind davon vor allem Kühlanlagen (Durchlauf- und Kreislaufkühlungen) sowie Wasseraufbereitungsanlagen betroffen.

Ihre mikroskopisch kleinen Larven können selbst durch kleinste Öffnungen gelangen und dort Ablagerungen verursachen. Die Vermehrung in einer Anlage erfolgt rasant: Die Muscheln setzen sich an Rohrleitungen, Filtern oder anderen wasserführenden Bauteilen fest, wachsen dort und führen zu Verengungen oder vollständigen Verstopfungen.

Dies kann besonders in Kühlsystemen schnell problematisch werden, da bereits geringe Ablagerungen die Leistung deutlich reduzieren. Auch in Wasseraufbereitungsanlagen kann der Befall zu erheblichen Beeinträchtigungen führen, beispielsweise durch verstopfte Rohre oder eine verringerte Wasserentnahme.

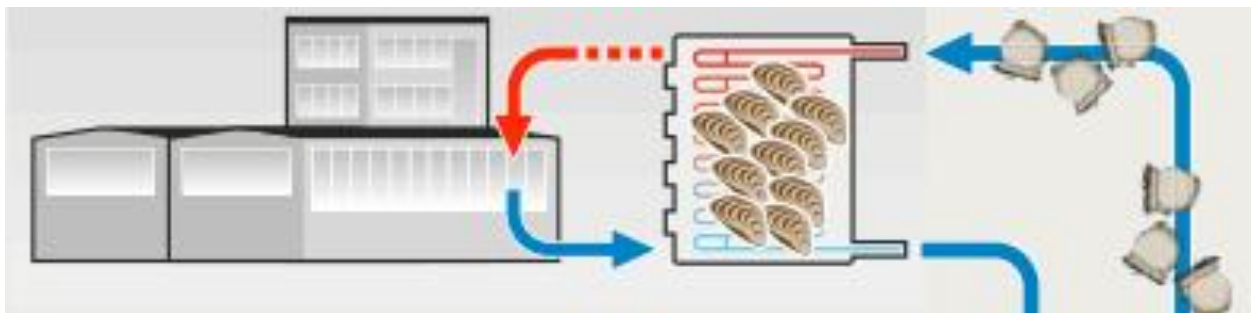


Abbildung 3: Muschelbefall in industriellen Anlagenteilen. (Dango & Dienenthal, 2025)

Hat sich die Quaggamuschel einmal in einer Anlage etabliert, ist ihre Entfernung schwierig und meist mit hohen Kosten verbunden.

1.1.2.1 Fallbeispiele und Schadensdokumentationen

Quaggamuschelbefall in der Kühlwasseranlage der EPFL und UNIL

Die technische Hochschule EPFL und die Universität Lausanne (UNIL) betreiben gemeinsam eine grosse Wärmepumpenanlage, die Wasser aus dem Genfersee bezieht, um Labors und Serverräume zu kühlen.

Das System ist mit Filtern ausgestattet, die verhindern, dass Fische oder grössere Partikel eingesogen werden. Diese Filter können jedoch die winzigen Larven der Quaggamuschel nicht zurückhalten.

Die invasive Muschelart wurde 2015 erstmals im Genfersee nachgewiesen. Im Jahr 2019 entdeckte die UNIL erstmals Quaggamuscheln im Kühlsystem. Der Befall machte eine aufwendige mechanische Reinigung notwendig, bei der die Muscheln entfernt wurden.

Um künftige Probleme zu vermeiden, investierte die UNIL rund 6 Millionen Franken in den Umbau des Systems. Dabei wurde ein Redundanzsystem mit zwei getrennten Kühlwasserkreisläufen geschaffen.

Diese Bauweise ermöglicht es, jeweils einen Kreislauf ausser Betrieb zu nehmen und komplett trockenzulegen. Da Quaggamuscheln ohne Wasser innerhalb etwa einer Woche sterben, lässt sich so ein Befall gezielt abtöten. Nach dem Absterben müssen jedoch die Muschelreste manuell aus den Filtern entfernt werden, um den Durchfluss sicherzustellen. (SRF Schweiz, 2023)



Abbildung 4: Verstopfter Filter der UNIL. (SRF Schweiz, 2023)

Quaggamuschelbefall - Bodenseewasserversorgung Sipplingen

Bei der Wasserversorgung Sipplingen sind sowohl die Entnahmeeinrichtungen als auch die Mikrosiebung von Quaggamuscheln befallen. Das Rohwasser wird in 60 Metern Tiefe aus dem Bodensee entnommen. Aktuell umfasst das Reinigungsverfahren Mikrosiebung, Ozonung, Flockungsfiltration und Desinfektion mit Chlor. Der Muschelbefall wird derzeit durch manuelle Reinigung der Entnahmeeinrichtungen mit Tauchern entfernt. Auch die Schwallkammern und die Mikrosiebe werden regelmässig manuell gesäubert. Zusätzlich wird ein Zwischenpumpwerk installiert, das bei unzureichendem Druck der Hauptpumpe den Druck ausgleicht und so eine kontinuierliche Wasserentnahme ermöglicht. (Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW), 2021)

Quaggamuschelbefall – Services Industriels de Genève (SIG)

Die Services Industriels de Genève (SIG) nutzen Seewasser sowohl für die Trinkwasseraufbereitung als auch für energetische Zwecke. Bei der energetischen Nutzung wird das Wasser nach der Wärmeübertragung wieder in den See zurückgeleitet. Das Seewasserwerk arbeitet mit Flockungsfiltration, Ozonung, Aktivkohlefiltration und Desinfektion mit Natriumhypochlorit.

Seit März 2020 wird die Quaggamuschel im Rohwasserkanal des Seewasserwerks nachgewiesen. Im Juli 2020 kam es zudem zu einer Verstopfung in einer Pilotanlage, die ebenfalls Seewasser ansaugt. Bereits im Rahmen der Bekämpfung der Zebamuschel wurde eine kontinuierliche Chlorierung installiert, die aktuell mit 0.25 ppm Chlor betrieben wird. Die Saugkörbe können zum Reinigen herausgehoben und an der Oberfläche auf einem Ponton gereinigt werden; derzeit erfolgt diese Reinigung einmal pro Jahr. (Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW), 2021)

1.1.3 Industrielle Anlagen

In der Schweiz wird Wasser aus Seen oder Flüssen vor allem in Kühlsystemen sowie in der Wasseraufbereitung genutzt. Bei den Kühlsystemen kommen hauptsächlich zwei Varianten zum Einsatz: die Durchlaufkühlung und die Kreislaufkühlung. In der Wasseraufbereitung ist das Prinzip bei allen Anlagen im Wesentlichen gleich.

1.1.3.1 Durchlaufkühlung

Bei der Durchlaufkühlung wird Wasser direkt aus einem Gewässer entnommen, zur Kühlung technischer Anlagen verwendet und anschliessend wieder in das Gewässer zurückgeleitet. Dieses Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Kühlleistung und vergleichsweise geringe technische Komplexität aus. Allerdings führt der direkte Kontakt des Rohwassers mit den Anlagenkomponenten zu einem erhöhten Risiko von biologischen Ablagerungen, wie etwa durch die Quaggamuschel. Zudem können ökologische Auswirkungen auf das Gewässer entstehen, beispielsweise durch Temperaturveränderungen oder eine Erhöhung des Gehalts an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC).

1.1.3.2 Kreislaufkühlung

Bei der Kreislaufkühlung wird das Kühlwasser in einem geschlossenen System mehrfach verwendet. Nach der Wärmeaufnahme im technischen Prozess wird das erwärmte Wasser in Kühltürmen oder Wärmetauschern wieder abgekühlt, bevor es erneut in den Kreislauf eingespeist wird. Dieses Verfahren reduziert den Wasserverbrauch deutlich im Vergleich zur Durchlaufkühlung und minimiert die direkten ökologischen Eingriffe in natürliche Gewässer. Allerdings erfordert die Kreislaufkühlung einen höheren technischen Aufwand, insbesondere zur Vermeidung von Ablagerungen, Biofouling und Korrosion. Auch hier stellt der Befall mit invasiven Arten wie der Quaggamuschel ein potenzielles Risiko dar, da sich Muschellarven in Leitungen und Kühlsystemkomponenten ansiedeln können.

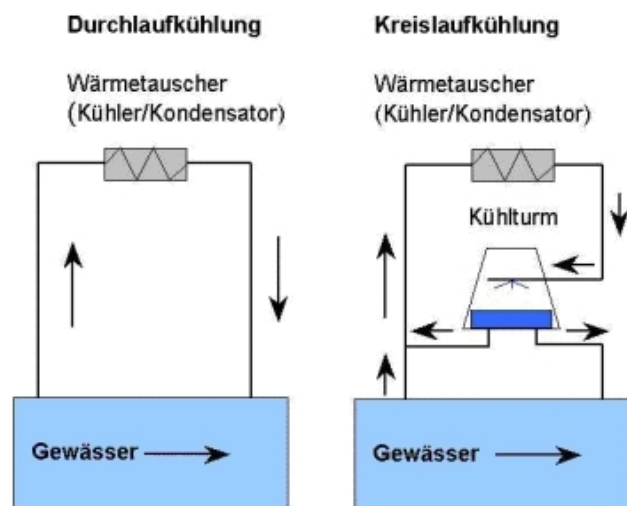


Abbildung 5: Schema einer Durchlauf- und Kreislaufkühlung. (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2025)

1.1.3.3 Wasseraufbereitung

In Wasseraufbereitungsanlagen, beispielsweise zur Gewinnung von Trinkwasser, wird Rohwasser aus Oberflächen- oder Grundwasserquellen entnommen und in mehreren Stufen aufbereitet. Typische Verfahren sind Flockungsfiltration, Ozonung, Aktivkohlefiltration und eine abschliessende Desinfektion, etwa mit Chlor oder Natriumhypochlorit. Ziel ist es, Schwebstoffe, organische Belastungen, Mikroorganismen und Krankheitserreger zuverlässig zu entfernen. Die technischen Prozesse sind im Grundprinzip bei allen Anlagen ähnlich aufgebaut, werden jedoch je nach Wasserqualität und regionalen Vorgaben angepasst. Auch in der Wasseraufbereitung aus Wasser von Oberflächengewässern stellen biologische Belastungen wie der Befall durch Quaggamuseln ein Risiko dar, da sich die Tiere in Entnahmeleitungen und Filtern ansiedeln können und dadurch die Betriebssicherheit beeinträchtigen. Bei der Nutzung von Grundwasser hingegen stellt die Quaggamuschel kein Problem dar.

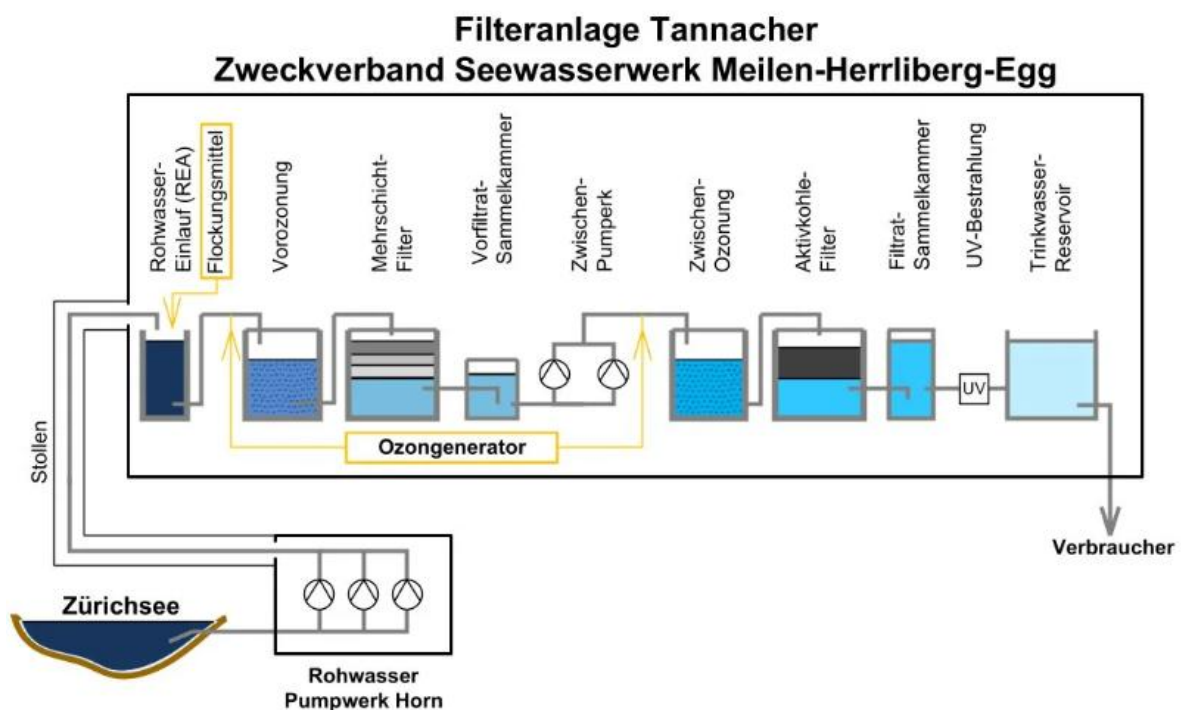


Abbildung 6: Schema einer Wasseraufbereitungsanlage. (Infrastruktur Zürichsee AG, 2025)

1.1.4 Präventions- und Bekämpfungsmethoden

Wenn das Gewässer, aus dem eine industrielle Anlage ihr Wasser bezieht, von der Quaggamuschel befallen ist, ist es wichtig, geeignete Präventionsmassnahmen zu ergreifen. Ist die Anlage bereits betroffen, müssen entsprechende Bekämpfungsmassnahmen umgesetzt werden. Viele Verfahren sind noch nicht vollständig ausgereift, weshalb betroffene Betreiber oft mit Eigenlösungen versuchen, das Problem in den Griff zu bekommen. Je nach Anlage sind unterschiedliche Vorgehensweisen besser geeignet als andere.

Grundsätzlich lassen sich Präventions- und Bekämpfungsmassnahmen in drei Kategorien einteilen: mechanische, chemische und physikalische Verfahren. Es ist ebenfalls wichtig zu beachten, dass es für gewisse Massnahmen und bei bestimmten Anlagen eine redundante Leitungsführung erfordern um die Betriebssicherheit zu garantieren.

1.1.4.1 Mechanische Verfahren

Es stehen verschiedene mechanische Verfahren zur Verfügung, um einen Befall mit Quaggamuschnen zu bekämpfen oder vorzubeugen. Dazu zählen der Einsatz von Molchsystemen zur Reinigung der Leitungen, der Einbau von Filtersystemen zur Rückhaltung von Muschellarven sowie das manuelle Entfernen der Muscheln von betroffenen Oberflächen.

1.1.4.1.1 Manuelle Reinigung

Unter mechanischer Reinigung werden Verfahren verstanden, bei denen Quaggamuschnen und andere Ablagerungen direkt von den betroffenen Oberflächen entfernt werden. Dies kann einerseits manuell durch Taucher erfolgen, die die Entnahmestrukturen, Schwallkammern oder Filter reinigen. Andererseits kommen auch spezielle Reinigungsgeräte zum Einsatz. Dazu zählen Hochdruckwasserstrahler, die Muscheln durch kräftige Wasserstrahlen ablösen, sowie rotierende Bürstensysteme, die Leitungen oder Siebe von Muscheln befreien. Ergänzend können Unterwassersauger eingesetzt werden, die gelöste Muscheln und Sedimente sofort absaugen, um eine Wiederansiedlung zu verhindern.



Abbildung 7: Ein Taucher der Quaggamuschnen mittels Hochdruckreiniger entfernt. (Südkurier, 2022)

Die mechanische Reinigung erfordert einen hohen Personal- und Zeitaufwand, ist jedoch eine bewährte Methode, um auch stark befallene Anlagenteile kurzfristig wieder funktionsfähig zu machen.

1.1.4.1.2 Molchsystem

Das Molchsystem wird hauptsächlich in der Wasseraufbereitung eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem ein sogenannter „Molch“ – ein spezieller Reinigungskolben – durch die Leitung gedrückt wird. Mithilfe einer zweiten Leitung wird der notwendige Druck erzeugt, um den Molch wieder in seine Ausgangsposition zurückzuführen. Auf diese Weise wird verhindert, dass sich Quaggamuschnen in den Leitungen ansiedeln; bereits vorhandene Muscheln und Ablagerungen werden mechanisch durch den Kolben entfernt. Dieses Verfahren, bei dem der Kolben mithilfe einer Druckleitung zurückgeführt wird, wurde von den Energie Services Biel patentiert. (Tagesanzeiger, 2025)



Abbildung 8: Schema eines Molchverfahren. (Energie Service Biel (ESB), 2024)

1.1.4.1.3 Filtersysteme

Wirksame Filtersysteme gegen Quaggamuscellarven erfordern Öffnungen $< 50 \mu\text{m}$ bei gleichzeitig ausreichender Durchflussleistung. Da dabei auch andere Schwebstoffe aus dem Rohwasser zurückgehalten werden, besteht grundsätzlich ein Risiko der Verstopfung. Zudem können sich Muscheln direkt am Filter ansiedeln und den Durchfluss zusätzlich beeinträchtigen.

Ein mehrstufiger Aufbau ist notwendig. Zunächst werden grobe Partikel abgeschieden, anschließend erfolgt die gezielte Rückhaltung der Muscellarven. Gewisse Systeme verfügen über eine automatische Rückspülung mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten, sodass angesammelte Feststoffe und Larven entfernt werden. Dadurch bleibt die Filterfläche frei, die Standzeiten werden verlängert und der Wartungsaufwand minimiert. In Verbindung mit speziellen Beschichtungen kann das Anhaften der Muscheln erschwert werden. (Dango & Dienenthal, 2025)

Dango & Dienenthal bietet ein Filtersystem an, der zur Vermeidung von Muschelbefall in Kühlsystemen dient. Er nutzt eine spezielle Spaltgeometrie mit einer Filterfeinheit von etwa $300 \mu\text{m}$ sowie ein optimiertes Verhältnis von Durchflussmenge zu Filterfläche, wodurch hohe Filtrationsgeschwindigkeiten entstehen. Diese erzeugen Beschleunigungskräfte von über $1.000 g$ auf Muscellarven, was laut Tests zu deren Absterben führt. Das System wird in Filterautomaten, Rückspül-Trommelfiltern und JET-Filtern eingesetzt.

1.1.4.2 Chemische Verfahren

Chemische Verfahren nutzen den gezielten Einsatz von Stoffen oder Veränderungen der Wasserchemie, um Quaggamuscheln abzutöten oder ihre Ansiedlung zu verhindern. Zu den wichtigsten Ansätzen zählen der Einsatz von Bioziden wie Chlor oder die Ozonisierung. Diese Methoden unterscheiden sich hinsichtlich Wirksamkeit, technischer Machbarkeit und ökologischer Auswirkungen. Besonders beim Einsatz von Bioziden ist die Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen von zentraler Bedeutung, da diese Stoffe stark toxisch wirken und erhebliche Auswirkungen auf das Gewässerökosystem haben können.

1.1.4.2.1 Chlor und Wasserstoffperoxid

Chlor wird in Form von Natriumhypochlorit oder Chlorgas eingesetzt und gilt als das am weitesten verbreitete Biozid in der Muschelbekämpfung. Es wirkt, indem es Zellmembranen und Enzyme der Muscheln oxidativ angreift und gleichzeitig die Byssusfäden schwächt, mit denen sich die Tiere an Oberflächen festhalten. Bereits bei sehr niedrigen Konzentrationen nehmen Muscheln Chlor wahr und schliessen ihre Schalen. Dadurch wird eine unmittelbare Wirkung auf adulte Tiere erschwert, während Larven deutlich empfindlicher reagieren. In der Praxis werden bei kontinuierlicher Dosierung Konzentrationen von $0.3\text{--}0.5 \text{ mg/L}$ eingesetzt, womit die Ansiedlung der Larven zuverlässig verhindert werden kann. Für ausgewachsene Muscheln sind hingegen höhere Dosierungen oder längere Behandlungszeiträume erforderlich. Untersuchungen zeigen, dass eine Dosierung von 0.5 mg/L über zwei Stunden eine nahezu vollständige Abtötung der Larven bewirkt, während bei adulten Muscheln Konzentrationen von etwa 2.0 mg/L über mehrere Stunden eine hohe Mortalität erzielen (Getsinger, 2000). Chlor eignet sich somit auch für kurzzeitige Stossbehandlungen, beispielsweise während geplanter Stillstände von Anlagenteilen. Die Vorteile von Chlor liegen in den geringen Kosten und der einfachen Handhabung. Nachteile sind jedoch die Bildung schädlicher Nebenprodukte mit potenziellen Umweltauswirkungen sowie die korrosiven Eigenschaften, die Materialschäden begünstigen können.

Wasserstoffperoxid wirkt ebenfalls über oxidative Prozesse, indem es Hydroxylradikale bildet, die Zellmembranen und Enzyme zerstören. Im Gegensatz zu Chlor wird es von Muscheln nicht unmittelbar wahrgenommen, sodass die Schalen geöffnet bleiben und die Wirkung schneller eintreten kann. Für eine kontinuierliche Dosierung ist Wasserstoffperoxid grundsätzlich geeignet, jedoch deutlich kostenintensiver als Chlor. In der Praxis wird es deshalb überwiegend für Stossbehandlungen eingesetzt. Bei Konzentrationen von 5–10 mg/L über mehrere Stunden lässt sich bei Larven eine hohe Absterberate erreichen (Getsinger, 2000). Adulte Muscheln benötigen in der Regel deutlich höhere Dosierungen oder längere Expositionszeiten. Ein wesentlicher Vorteil liegt darin, dass Wasserstoffperoxid zu Wasser und Sauerstoff zerfällt und somit keine problematischen Nebenprodukte entstehen. Nachteile sind die höheren Kosten sowie die geringe Stabilität der Substanz im Wasser, da sie relativ rasch zerfällt und ihre Wirksamkeit stark von Temperatur und Wasserchemie abhängt.

Da für die Quaggamuschel bislang kaum spezifische Studien zur Wirkung von Chlor und Wasserstoffperoxid vorliegen, wurden hier Ergebnisse aus Untersuchungen an der eng verwandten Zebramuschel herangezogen. Aufgrund der ähnlichen physiologischen Eigenschaften beider Arten ist jedoch von einer vergleichbaren Wirksamkeit der Verfahren auch bei der Quaggamuschel auszugehen.

1.1.4.2.2 Kupferionen

Kupfer kann in Form von Kupfersulfat oder Kupferionenlösungen als Biozid eingesetzt werden. Es wirkt, indem es sich bei höheren Konzentrationen an die Kiemenmembranen der Muscheln bindet und dadurch deren Funktionsfähigkeit beeinträchtigt. Viele Wasserorganismen reagieren empfindlich auf Kupfer, darunter auch die Quaggamuschel.

Laborversuche haben gezeigt, dass Quaggamuscheln besonders sensibel auf Kupfer reagieren. Bei einer Konzentration von 60 µg/L wurde innerhalb von rund zwei Wochen die Hälfte der Tiere abgetötet, während bei 180 µg/L bereits nach acht Tagen eine vollständige Mortalität erreicht wurde (Claudi et al., 2023). Auch im Gewebe zeigt sich die Empfindlichkeit: Bei einer Belastung von etwa 300 mg/kg Kupfer kam es zu vollständigem Absterben (Claudi et al., 2023). Dies verdeutlicht, dass Quaggamuscheln nur geringe Mengen Kupfer tolerieren können, bevor lebenswichtige Prozesse zusammenbrechen.

Für die Praxis bedeutet dies, dass Kupferbehandlungen gegen Quaggamuscheln bereits mit vergleichsweise niedrigen Dosierungen wirksam sein können. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die tatsächliche Wirkung stark von der Wasserchemie abhängt. Faktoren wie pH-Wert, Wasserhärte oder der Gehalt an gelösten organischen Stoffen beeinflussen massgeblich, wie viel Kupfer im Wasser bioverfügbar ist und somit toxisch wirkt. (D. Dahlberg, 2025)

Die Vorteile des Kupfereinsatzes liegen in seiner hohen Wirksamkeit gegenüber Quaggamuscheln. Nachteile sind die geringe Selektivität, durch die auch andere Organismen geschädigt werden können, sowie die mögliche Anreicherung von Kupfer im Wasser, die kurzfristige, und im Sediment, die langfristige ökologische Folgen haben kann.

1.1.4.2.3 Ozonisierung

Die Ozonisierung stellt ein stark oxidatives Verfahren dar, das bereits seit langem in der Trinkwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung eingesetzt wird. Ozon (O_3) wirkt durch die Oxidation von Zellmembranen, Enzymen und organischen Verbindungen und führt so zum Absterben von Mikroorganismen und wirbellosen Organismen. In Bezug auf die Quaggamuschel ist dieses Verfahren jedoch bislang nur wenig etabliert und wurde bisher vor allem in Pilot- und Einzelfallstudien untersucht.

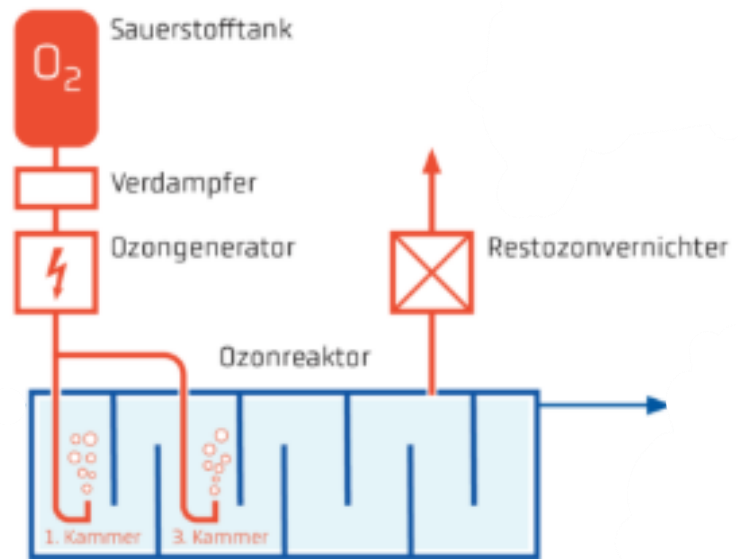


Abbildung 9: Schema einer Ozonisierung einer ARA (VSA, 2025)

Im Hinblick auf invasive Muschelar-ten wie die Zebra- und Quaggamuschel konnte gezeigt werden, dass bereits relativ niedrige Ozonkonzentrationen von etwa 0.5 mg/L über mehrere Stunden eine hohe Mortalität bei Larven verursachen. Bei adulten Muscheln sind höhere Konzentrationen oder längere Expositionszeiten erforderlich, teilweise über mehrere Tage hinweg. Aufgrund der physiologischen Ähnlichkeiten ist davon auszugehen, dass auch die Quaggamuschel in vergleichbarer Weise empfindlich auf Ozon reagiert. (Zonosistem, 2025)

Ein wesentlicher Vorteil von Ozon liegt darin, dass es nach kurzer Zeit zu Sauerstoff zerfällt und somit keine umweltschädlichen Nebenprodukte im Gewässer hinterlässt. Dies macht die Methode ökologisch verträglicher als andere Biozide. Praktische Erfahrungen, etwa bei der Bodenseewasserversorgung, zeigen, dass Ozon gezielt eingesetzt werden kann, um Muschellarven im Rohwasser zuverlässig abzutöten, bevor sie in die Anlage gelangen. (Aqua & Gas, 2019)

Nachteilig sind der hohe technische und energetische Aufwand zur kontinuierlichen Erzeugung von Ozon sowie die vergleichsweise hohen Betriebskosten. Zudem ist die Wirksamkeit stark abhängig von der Wasserchemie (z. B. Temperatur, Gehalt an gelösten organischen Stoffen), wodurch eine präzise Prozesssteuerung erforderlich ist.

1.1.4.3 Physikalische Verfahren

1.1.4.3.1 Ultraviolettes Licht (UV-Licht)

Dieses Verfahren ist bisher in der Schweiz noch nicht zur Bekämpfung der Quaggamuschel etabliert. In den USA wurden jedoch bereits Studien durchgeführt, die die Wirksamkeit von UV-Licht bestätigen. UV-Bestrahlung stellt eine umweltfreundliche Alternative zu chemischen Verfahren dar. Durch die Bestrahlung werden die Larven inaktiviert, wodurch ein Anhaften an Oberflächen verhindert wird. Besonders wirksam sind UV-Behandlungen im UV-B- und UV-C-Bereich des elektromagnetischen Spektrums, also bei Wellenlängen unterhalb von 320 Nanometern.

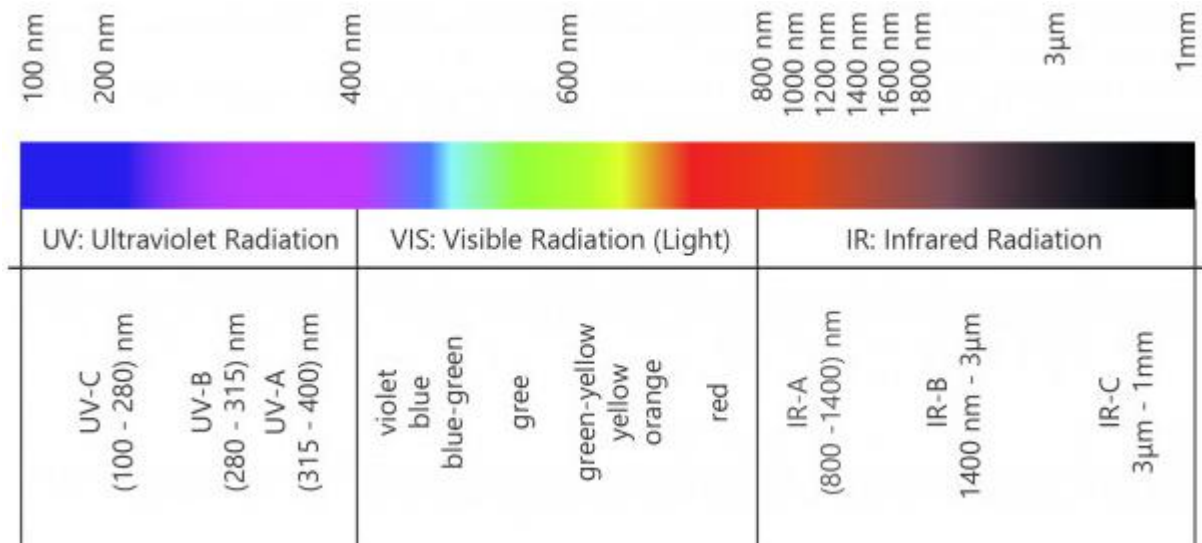


Abbildung 10: Der Wellenlängenbereich elektromagnetischer Strahlungen. (Gigahertz-Optik, 2025)

Das elektromagnetische Spektrum beschreibt die gesamte Bandbreite an Strahlung, von Radiowellen über sichtbares Licht bis hin zu Röntgenstrahlung. UV-Licht liegt direkt unterhalb des für das menschliche Auge sichtbaren Bereichs und ist daher unsichtbar, wirkt aber mit hoher Energie. Diese Energie reicht aus, um Zellstrukturen von Mikroorganismen oder Muschellarven zu schädigen.

In Studien wurden UV-Dosen im Bereich von ca. 26–80 mJ/cm² als ausreichend für eine deutliche Reduktion der Larvenpopulation beschrieben. Entscheidend für den praktischen Einsatz ist dabei die hydraulische Auslegung der Systeme: Verweilzeit, Wassertransmission und Durchflussgeschwindigkeit bestimmen wesentlich, ob die erforderliche Dosis die Organismen zuverlässig erreicht. (Stewart-Malone, et al., 2015)

Der Einsatz von UV-Bestrahlung eignet sich jedoch ausschliesslich zur Prävention, da die durchsichtigen Larvenstadien bestrahlt und geschädigt werden können. Bei adulten Muscheln hingegen ist eine Wirkung nicht mehr gegeben, da das UV-Licht nicht ausreichend durch die feste Schale dringt. (U.S. Fish & Wildlife Service, 2020)

1.1.4.3.2 Trockenlegung

Die Trockenlegung stellt ein wirkungsvolles physikalisches Verfahren zur Bekämpfung der Quaggauschel dar. Da die Muscheln auf eine ständige Wasserzufuhr angewiesen sind, sterben sie innerhalb weniger Tage ab, wenn Leitungen oder Anlagenteile vollständig entleert werden. Erfahrungen aus den Kühlwasseranlagen der Universität Lausanne (UNIL) und der technischen Hochschule EPFL zeigen, dass die Muscheln nach einer Trockenzeit von etwa einer Woche vollständig absterben. Die tatsächliche Dauer kann jedoch je nach Temperatur und Luftfeuchtigkeit variieren.

Ein Nachteil liegt jedoch darin, dass eine redundante Leitung erforderlich ist, wenn der Betrieb ohne Unterbruch weiterlaufen soll. Zudem verbleiben die abgestorbenen Muscheln in den Leitungen und insbesondere in den Filtern. Diese müssen anschliessend in einem mechanischen Verfahren entfernt werden, was den Wartungsaufwand erhöht. Wie häufig dieser Schritt notwendig sein wird, ist bislang noch nicht abzuschätzen. (SRF Schweiz, 2023)

1.1.5 Rechtliche Rahmenbedingungen

Es ist wichtig, dass die gesetzlichen Rahmenbedingungen stets eingehalten werden. Dies dient unter anderem dem Schutz der Umwelt und der Lebewesen. In der Schweiz gibt es zahlreiche Gesetze und Verordnungen. Für diese Arbeit sind zur Bekämpfung der Quaggauschel in der Industrie vor allem die Gewässerschutzverordnung (GSchV) sowie die Biozidprodukteverordnung (VBP) relevant.

In dieser Arbeit werden ausschliesslich die gesetzlichen Vorgaben berücksichtigt, die für den Einsatz von Massnahmen in industriellen Anlagen sowie für die Einleitung von Stoffen in Gewässer von Bedeutung sind. Nicht behandelt werden hingegen Vorschriften, die sich unmittelbar auf den Stoff selbst beziehen, wie etwa Bestimmungen zur Lagerung, zum Transport, zum Umschlag oder zur Handhabung. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden allgemeine Richtlinien, die ohne Behandlung für die Einleitung von Abwasser oder Kühlwasser in ein Gewässer gelten, sowie die gesetzlichen Vorgaben, die sich auf die Eindämmung und Verhinderung der Verschleppung der Quaggauschel in bislang nicht betroffene Gewässer beziehen.

1.1.5.1 Gewässerschutzverordnung (GSchV; SR 814.201)

Die Gewässerschutzverordnung (GSchV) dient dem Schutz ober- und unterirdischer Gewässer vor nachteiligen Einwirkungen und soll deren nachhaltige Nutzung sicherstellen. Nach Art. 3 GSchV beurteilt die zuständige Behörde, ob ein Abwasser bei der Einleitung in ein Gewässer oder bei der Versickerung als verschmutzt oder nicht verschmutzt gilt.

Die Einleitung von verschmutztem Abwasser in ein Gewässer bedarf einer behördlichen Bewilligung. Dies ist insbesondere für Anlagen relevant, die Wasser zurück in ein Gewässer führen, beispielsweise Kühlanlagen. Wird Wasser ohne Behandlung entnommen und wieder zurückgeführt, kann es unter Umständen als nicht verschmutztes Abwasser eingestuft werden. Zu beachten ist jedoch, dass dies von Kanton zu Kanton unterschiedlich gehandhabt werden kann. Sobald dem Wasser jedoch Stoffe wie beispielsweise Biozide zugesetzt werden, gilt es als verschmutztes Abwasser und benötigt zwingend eine Bewilligung. Es ist daher empfehlenswert, frühzeitig den Kontakt mit der zuständigen Behörde aufzunehmen.

Die GSchV legt zudem in Anhang 2 und Anhang 3 Grenzwerte für die Einleitung in die Kanalisation bzw. in Gewässer fest, die jederzeit einzuhalten sind. Spezifische Anforderungen für Durchlaufkühlungen und Kreislaufkühlungen sind in Anhang 3.3 aufgeführt. Besonders wichtig ist hierbei, dass bei der Zugabe von Stoffen – etwa Bioziden – für diese Stoffe spezifische Anforderungen an die Einleitung festgelegt werden. Die zuständige Behörde bestimmt diese Vorgaben im Einzelfall. (Der Schweizerische Bundesrat, 2025)

1.1.5.1.1 Beispiel: Grenzwertbestimmung für Wasserstoffperoxid (H₂O₂) in der Aare

Um die Einhaltung ökotoxikologischer Grenzwerte bei der Einleitung von Abwasser in ein Gewässer zu beurteilen, müssen die massgebenden Abflussmengen sowie die daraus resultierenden Konzentrationen betrachtet werden. Für die Bewertung der maximal zulässigen Schadstoffkonzentration im Abwasser wurden zwei Ansätze berechnet: die Einhaltung des NOEC-Wertes direkt bei der Rückgabe in die Aare sowie die Einhaltung des PNEC-Wertes für Wasserstoffperoxid nach vollständiger Durchmischung mit der Aare. Im folgenden Beispiel wird dies anhand einer Rückgabe in die Aare erläutert.

Tabelle 1: Angaben für Berechnung des Beispiels: Grenzwertbestimmung für Wasserstoffperoxid (H₂O₂) in der Aare.

Angaben für Berechnung:		
Q _{max} Anlage	1800 m ³ /h = 500 l/s	Frei gewählter Wert
Q347 Aare (Brügg)	104 m ³ /s = 104000 l/s	(Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2024)
NOEC-Wert H ₂ O ₂	0.63 mg/l	(ECHA, 2023)
PNEC-Wert H ₂ O ₂	0.0126 mg/l	(ECHA, 2023)

Definition:

- **Der Q_{max}-Wert** bezeichnet den maximalen Abfluss der Anlage
- **Der Q347-Wert** ist eine Kennzahl aus der Wasserwirtschaft und beschreibt die Abflussmenge eines Gewässers, die an 347 Tagen im Jahr gleich gross oder grösser ist – also nur an 18 Tagen unterschritten wird.
- **Der NOEC-Wert** (No Observed Effect Concentration) ist die höchste Konzentration eines Stoffes, bei der in einem Toxizitätstest keine schädlichen Auswirkungen auf Testorganismen beobachtet werden.
- **Der PNEC-Wert** (Predicted No Effect Concentration) ist die höchste Konzentration eines Stoffes, bei der in einem Toxizitätstest keine beobachtbaren schädlichen Auswirkungen auf Testorganismen festgestellt werden.

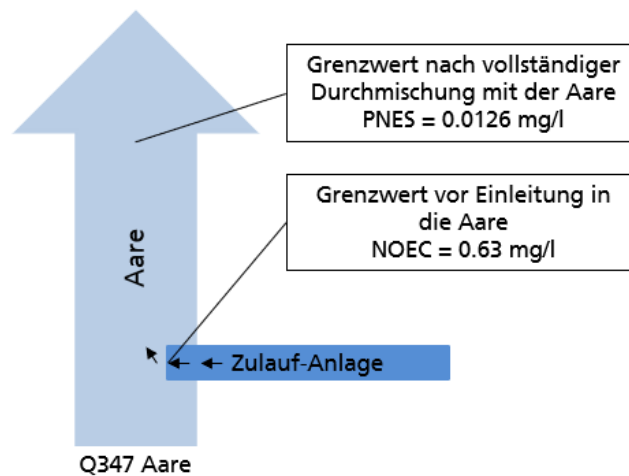


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Einleitung des Anlagenzulaufs in die Aare mit den relevanten Grenzwerten (NOEC vor Einleitung = 0,63 mg/l; PNEC nach vollständiger Durchmischung = 0,0126 mg/l).

Rechnung 1: Einhaltung von NOEC (0.63 mg/l) bei der Rückgabe in die Aare

Der NOEC-Grenzwert beträgt:

$$c_{NOEC} = 0.63 \text{ mg/l}$$

Die Fracht F ergibt sich aus der Konzentration c multipliziert mit dem Abfluss Q :

$$F = c * Q_{Gesamt}$$

Setzt man $Q = 500 \text{ l/s}$ und $c = 0.63 \text{ mg/l}$ ein, ergibt sich:

$$F = 0.63 \text{ mg/l} * 500 \text{ l/s} = 315 \text{ mg/s}$$

Die maximal zulässige Konzentration im Abwasser berechnet sich umgekehrt als:

$$c = \frac{F}{Q_{Anlage}} = \frac{315 \text{ mg/s}}{500 \text{ l/s}} = 0.63 \text{ mg/l}$$

Damit darf das Abwasser der Anlage eine Konzentration von maximal 0.63 mg/l aufweisen, um den NOEC-Grenzwert einzuhalten.

Diese Rechnung dient ausschliesslich als Beispiel. Der Grenzwert führt hier logischerweise zum gleichen Resultat wie der NOEC-Wert. Interessant wird die Berechnung, wenn ein zweiter Abfluss berücksichtigt und eine Durchmischung vor Einlass in das Gewässer einbezogen werden kann. Gesetzlich ist eine solche Durchmischung zwar nicht zulässig, es kann jedoch eine Ausnahme gemacht werden, falls keine andere Lösung möglich ist. Dies muss mit der zuständigen Vollzugsbehörde abgestimmt werden.

Im Kanton Solothurn hatten wir einen Fall, bei dem eine zusätzliche Einleitung von einer dritten Partei erfolgte und sich vor dem Einleiten ins Gewässer mit dem Kühlwasser – welches mit der Quaggamuschel befallen war – durchmischt hat. Daher wurde in diesem Fall diese Berechnung angewandt, das heisst, der Wert Q_{Gesamt} wäre höher als Q_{Anlage} , was zu einem höheren Grenzwert am Auslass vor der Durchmischung führt.

Rechnung 2: Einhaltung von PNEC (0.0126 mg/l) nach vollständiger Durchmischung

Für die vollständige Durchmischung mit der Aare wird das Gesamtabflussvolumen betrachtet:

$$Q_{ges} = Q_{Aare} + Q_{Anlage} = 104000 \text{ l/s} + 500 \text{ l/s} = 104500 \text{ l/s}$$

Der relevante PNEC-Grenzwert beträgt:

$$c_{PNEC} = 0.0126 \text{ mg/l}$$

Die entsprechende Fracht berechnet sich zu:

$$F = c * Q = 0.0126 \text{ mg/l} * 104500 \text{ l/s} = 1317 \text{ mg/s}$$

Die maximal zulässige Konzentration im Abwasser ergibt sich wieder aus:

$$c = \frac{F}{Q_{Anlage}} = \frac{1317 \text{ mg/s}}{500 \text{ l/s}} = 2.6 \text{ mg/l}$$

Somit darf das Abwasser der Anlage bei vollständiger Durchmischung mit der Aare eine Konzentration von maximal 2.6 mg/l aufweisen, um den PNEC-Wert einzuhalten.

Fazit:

Da der Grenzwert von 0.63 mg/l zur Einhaltung des NOEC-Wertes direkt nach der Einleitung kritischer ist als der Grenzwert von 2.6 mg/l zur Einhaltung des PNEC-Wertes nach vollständiger Durchmischung, sollte der massgebliche Grenzwert bei 0.63 mg/l angesetzt werden. Dieser Wert muss jedoch für jede Anlage, Gewässer und jeden Stoff individuell berechnet werden, da sich die relevanten NOEC- und PNEC-Werte unterscheiden können. Zudem ist der aktuelle Zustand des Gewässers zu berücksichtigen, um mögliche negative Auswirkungen vermeiden zu können.

1.1.5.2 Biozidprodukteverordnung (VBP)

Die Biozidprodukteverordnung (VBP) regelt das Inverkehrbringen und die Verwendung von Biozidprodukten sowie die dafür zugelassenen Wirkstoffe (Gemeinsame Anmeldestelle Chemikalien des BAFU - BAG - SECO, 2024)

In den Anhängen 1 und 2 der VBP sind sämtliche zugelassenen Wirkstoffe aufgeführt, einschliesslich der Produktgruppen, für die sie verwendet werden dürfen. Darüber hinaus existiert eine Liste der Wirkstoffe, die von der EU-Kommission zugelassen oder nicht zugelassen sind – einschliesslich neuer Wirkstoffe sowie solcher mit Übergangszulassung (Gemeinsame Anmeldestelle Chemikalien des BAFU - BAG - SECO, 2025). Eine Verwendung ausserhalb dieser Produktgruppen ist nicht zulässig. Die Grundlage für diese Produktgruppenliste wird von der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) vorgegeben und kann dort eingesehen werden (ECHA, 2025).

Für industrielle Anlagen ist insbesondere die Produktart 11 „Schutzmittel für Flüssigkeiten in Kühl- und Verfahrenssystemen“ der Hauptgruppe 2 „Schutzmittel“ relevant. Diese Produktart umfasst „Produkte zum Schutz von Wasser und anderen Flüssigkeiten in Kühl- und Verfahrenssystemen gegen Befall durch Schadorganismen wie z. B. Mikroben, Algen und Muscheln“ (ECHA, 2025).

In den Listen der VBP sind Aktivchlor, Wasserstoffperoxid und Ozon aufgeführt. Kupfer ist für diese Produktart (PT11) derzeit in Prüfung und nicht allgemein zugelassen – der Einsatz ist daher rechtlich stark eingeschränkt. Es ist wichtig zu beachten, dass die Listen laufend aktualisiert werden.

2. Vergleich der Massnahmen

Damit das Ampelsystem übersichtlich und nachvollziehbar ist, werden vier verschiedene Varianten erstellt: Durchlaufkühlung nicht redundant, Durchlaufkühlung redundant, Kreislaufkühlung sowie Wasseraufbereitung. Für alle Varianten wird zunächst zur schnellen Orientierung das Ampelsystem dargestellt. Anschliessend folgt eine ausführliche Erklärung der jeweiligen Anlage mit einer zusammenfassenden Einschätzung.

Für die Bewertung werden folgende vier Kriterien herangezogen – stets unter Berücksichtigung der Anlagentypologie:

- **Kosten:**
Die Kosten werden nicht detailliert berücksichtigt, sondern nur grob (günstig, mittel, teuer) geschätzt, da sie stark von anlagenspezifischen Faktoren wie Grösse, Bauweise und Betriebsbedingungen abhängen. Einheitliche oder verlässliche Kostendaten liegen nicht vor, und eine genaue Wirtschaftlichkeitsanalyse würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Die vereinfachte Kosteneinstufung ermöglicht dennoch eine vergleichbare und praxisnahe Bewertung der Massnahmen.
- **Gesetzliche Anforderungen:**
Dieses Kriterium beschreibt, ob wenige oder sehr strenge gesetzliche Vorgaben bestehen (ausschliesslich in Bezug auf die jeweilige Massnahme). Es wird empfohlen, dies zusätzlich mit der zuständigen Behörde abzuklären.
- **Wirksamkeit:**
Die Wirksamkeit gibt an, wie effektiv die Massnahme im Hinblick auf die Bekämpfung der Quaggauschel ist.
- **Unsicherheiten:**
Dieses Kriterium berücksichtigt, ob das Verfahren in der Schweiz bereits etabliert ist oder bislang kaum zur Anwendung kam.
- **Machbarkeit:**
Die Machbarkeit beschreibt, ob ein Verfahren praktisch umsetzbar ist und ob die gesetzlichen Anforderungen eingehalten werden können. Grundlage der Bewertung sind dabei die gesetzlichen Vorgaben, die Wirksamkeit, bestehende Unsicherheiten sowie die technische Umsetzbarkeit im Hinblick auf den jeweiligen Anlagentyp. Dabei wird der Mittelwert der Kriterien Kosten, gesetzliche Anforderungen, Wirksamkeit und Unsicherheiten gebildet. Die gesetzliche Anforderung fungiert jedoch auch als Killerkriterium: Wenn sie nicht erfüllt werden kann, ist die Massnahme unabhängig von den anderen Kriterien nicht umsetzbar.

Die Variante Kupferionen wird in der Bewertung nicht berücksichtigt, da dieses Verfahren gesetzlich für diese Anwendung nicht zugelassen ist.

Es werden für das Ampelsystem folgende Symbole benutzt:

-  – günstig / gut umsetzbar
-  – eingeschränkt günstig / mit Auflagen oder Vorsicht erforderlich
-  – kritisch / nicht empfehlenswert oder möglich

Für die Machbarkeit wird zusätzlich eine farbige Darstellung (Grün, Orange, Rot) verwendet, um auf einen Blick zu zeigen, ob ein Verfahren leicht umsetzbar (Grün), eingeschränkt umsetzbar (Orange) oder nicht umsetzbar (Rot) ist.

2.1 Durchlaufkühlung

Bei der Durchlaufkühlung ist je nach Massnahme eine redundante Leitung notwendig, deshalb wird hier das Ampelsystem auf zwei Varianten der Anlage aufgeteilt.

2.1.1 Nicht redundante Durchlaufkühlung

Tabelle 2: Vergleich nach Ampelsystem für nicht redundante Durchlaufkühlungen

Verfahren	Kosten	Gesetzliche Anf.	Wirksamkeit	Unsicherheiten	Machbarkeit
Mech. Reinigung	⚠	✓	⚠	✓	✓
Molchsystem	!	✓	!	!	!
Filtersysteme	!	✓	⚠	!	⚠
Chlor	✓	!	⚠	!	!
Wasserstoffperoxid	⚠	!	⚠	!	!
Ozonisierung	!	⚠	⚠	!	!
UV-Licht	!	✓	⚠	!	!
Trockenlegung	!	✓	!	!	!

Bei der nicht redundanten Durchlaufkühlung besteht ein besonders hohes Risiko durch die Quag-gamuschel, da das Kühlwasser direkt aus dem Gewässer entnommen und nach der Nutzung wieder zurückgeführt wird. Eine Trockenlegung, die in anderen Systemen eine wirksame Bekämpfung ermöglicht, ist hier ausgeschlossen, da der Kühlprozess ohne Unterbruch erfolgen muss. Somit kommen ausschliesslich Verfahren infrage, die während des laufenden Betriebs angewendet werden können.

Von den untersuchten Methoden erweist sich einzig die manuelle Reinigung als umsetzbar, da sie rechtlich unproblematisch und technisch machbar ist. Allerdings bietet sie lediglich eine kurzfristige Entlastung und verursacht hohe laufende Personal- und Wartungskosten. Das Filtersystem wäre in Kombination mit der mechanischen Reinigung ebenfalls eine mögliche Variante, ist jedoch in der Schweiz wenig erprobt, das Risiko von Verstopfungen kann sich bei unzureichender Wartung deutlich erhöhen und es ist mit hohen Investitionskosten verbunden.

Andere Verfahren – wie Molchsysteme, Chlor, Wasserstoffperoxid, Ozonisierung, UV-Bestrahlung oder Trockenlegung – sind aufgrund technischer Grenzen, rechtlicher Einschränkungen, fehlender Wirksamkeit oder mangelnder Praxiserfahrung für nicht redundante Durchlaufkühlungen nicht geeignet.

Damit bleibt die manuelle Reinigung derzeit die einzige praktikable, wenn auch aufwendige Massnahme.

2.1.1.1 Detaillierte Bewertung der nicht redundanten Durchlaufkühlung

Tabelle 3: Beurteilung der mechanischen Reinigung bei nicht redundanter Durchlaufkühlung

Mechanische Reinigung:	
Kosten	Kontinuierliche Kosten durch hohen Personal- und Zeitaufwand → mittel bis teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Biozide oder Chemikalien eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Kurzfristig wirksam zur Entfernung von Muscheln und Ablagerungen. Ein Neubefall erfolgt jedoch rasch, da das Kühlwasser permanent aus dem Gewässer entnommen wird → begrenzte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Praxis seit Jahren angewendet, etabliert und erprobt → geringe Unsicherheit .
Machbarkeit	Grundsätzlich in allen nicht redundanten Durchlaufkühlungen umsetzbar. Aufgrund des laufenden Betriebs kann jedoch nur abschnittsweise oder während Stillständen gereinigt werden → machbar, aber aufwendig .

Tabelle 4: Beurteilung des Molchsystems bei nicht redundanter Durchlaufkühlung

Molchsysteme:	
Kosten	Hohe Investitionskosten für Installation und Betrieb des Systems → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Rechtlich unproblematisch, da keine Biozide eingesetzt werden. → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Grundsätzlich sehr wirksam in geschlossenen Druckleitungen, entfernt Ablagerungen zuverlässig. In nicht redundanten Durchlaufkühlungen jedoch nicht anwendbar → keine Wirksamkeit .
Unsicherheiten	Verfahren ist in der Schweiz erprobt (z. B. Energie Service Biel), jedoch ausschliesslich in Wasseraufbereitungsanlagen → hohe Unsicherheit für diesen Anlagentyp .
Machbarkeit	Für nicht redundante Durchlaufkühlungen nicht machbar, da diese nicht über Rückführungsoptionen verfügen und der Betrieb nicht unterbrochen werden kann → keine Machbarkeit .

Tabelle 5: Beurteilung des Filtersystem bei nicht redundanter Durchlaufkühlung

Filtersysteme:	
Kosten	Hohe Investitionskosten für Installation. Zusätzlich kontinuierliche Kosten für Wartung und ergänzende manuelle Reinigung. Die Gesamtkosten liegen höher als bei vielen anderen Verfahren → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Rechtlich unproblematisch, da keine Biozide eingesetzt werden. → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Können Muschellarven zuverlässig zurückhalten. Allerdings besteht ein erhebliches Risiko für Verstopfungen, wodurch die Wirksamkeit eingeschränkt wird → bedingt wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz bislang kaum etabliert; Praxiserfahrungen fehlen weitgehend → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Grundsätzlich auch in nicht redundanten Durchlaufkühlungen umsetzbar. Aufgrund der hohen technischen Anforderungen, des Verstopfungsrisikos und des Wartungsaufwands ist die praktische Umsetzung jedoch schwierig und mit grossem Aufwand verbunden → eingeschränkt machbar .

Tabelle 6: Beurteilung des Chlorverfahren bei nicht redundanter Durchlaufkühlung

Chlor:	
Kosten	Kontinuierliche Kosten für die Bereitstellung und Dosierung von Aktivchlor → günstig bis mittel im Vergleich zu anderen Verfahren .
Gesetzliche Anforderungen	Strenge Vorgaben, da das behandelte Wasser permanent ins Gewässer zurückgeführt wird. Einhalten der Grenzwerte ist kaum möglich → rechtlich problematisch .
Wirksamkeit	Prinzipiell wirksam gegen Muschellarven, jedoch nicht zuverlässig einsetzbar, da im Durchlaufbetrieb keine ausreichende Konzentration und Einwirkzeit erreicht werden kann → eingeschränkte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	Weltweit und auch in der Schweiz als Biozidverfahren etabliert, für nicht redundante Durchlaufkühlungen jedoch ungeeignet → hohe Unsicherheit in diesem Anlagentyp .
Machbarkeit	Aufgrund technischer Einschränkungen und rechtlicher Vorgaben in nicht redundanten Durchlaufkühlungen nicht machbar → keine Machbarkeit .

Tabelle 7: Beurteilung des Wasserstoffperoxidverfahren bei nicht redundanter Durchlaufkühlung

Wasserstoffperoxid:	
Kosten	Deutlich kostenintensiver als Chlor, sowohl bei Beschaffung als auch bei Dosierung. Zudem höherer Aufwand durch die geringe Stabilität im Wasser → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Strenge Vorgaben, da das behandelte Wasser ins Gewässer zurückgeführt wird. Einhalten der Grenzwerte ist kaum möglich → rechtlich problematisch .
Wirksamkeit	Grundsätzlich wirksam gegen Larven und adulte Muscheln, da die Substanz von den Muscheln nicht wahrgenommen wird. In Durchlaufkühlungen jedoch keine wirksame Konzentration realisierbar → eingeschränkte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz für die Quaggamuschelbekämpfung bislang nicht etabliert. Erfahrungen stammen hauptsächlich aus Studien an Zebramuscheln → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Aufgrund der ständigen Rückführung des Wassers ins Gewässer sowie der rechtlichen Einschränkungen für nicht redundante Durchlaufkühlungen nicht machbar → keine Machbarkeit .

Tabelle 8: Beurteilung des Ozonverfahren bei nicht redundanter Durchlaufkühlung

Ozonisierung:	
Kosten	Hohe Investitionskosten für die Ozonanlage. Zusätzlich erheblicher kontinuierlicher Energie- und Wartungsaufwand → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Ozon gilt als Biozid; eine Bewilligung der Vollzugsbehörde ist zwingend erforderlich. → rechtlich eingeschränkt .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Muschellarven und ökologisch vorteilhaft, da Ozon zu Sauerstoff zerfällt. In nicht redundanten Durchlaufkühlungen jedoch keine dauerhaft wirksame Konzentration erzielbar → eingeschränkte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz etabliert in ARAs und Wasserwerken, aber als Präventionsmassnahme gegen Quaggamuscheln bislang nicht erprobt → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Aufgrund des hohen technischen Aufwands, der rechtlichen Einschränkungen und der fehlenden Einwirkzeit in nicht redundanten Durchlaufkühlungen nicht machbar .

Tabelle 9: Beurteilung der UV-Bestrahlung bei nicht redundanter Durchlaufkühlung

UV-Bestrahlung:	
Kosten	Hohe Investitions- und Betriebskosten (Energiebedarf, technische Anlagen) → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Rechtlich unproblematisch, da keine Biozide eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Larven, jedoch nicht gegen adulte Muscheln. In grossen Durchlaufkühlungen nur eingeschränkt einsetzbar; die Wirksamkeit sinkt bei trübem Wasser → eingeschränkte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz bislang nicht erprobt; Erfahrungen stammen überwiegend aus Studien in den USA → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Aufgrund der Dimensionen von Durchlaufkühlungen und der Wassertrübung in der Praxis schwer realisierbar → kaum machbar .

Tabelle 10: Beurteilung der Trockenlegung bei nicht redundanter Durchlaufkühlung

Trockenlegung:	
Kosten	Theoretisch geringe Kosten, da keine teuren Anlagen oder Chemikalien benötigt werden. In der Praxis aber nicht umsetzbar, da der Betrieb komplett unterbrochen werden müsste → keine praxisrelevante Kostenbewertung .
Gesetzliche Anforderungen	Rechtlich unproblematisch, da keine Chemikalien eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	In redundanten Systemen nachweislich sehr wirksam, da Muscheln innerhalb weniger Tage absterben. In nicht redundanten Durchlaufkühlungen jedoch nicht anwendbar → nicht wirksam .
Unsicherheiten	Verfahren gut erprobt (z. B. UNIL/EPFL), aber nicht auf nicht redundante Systeme übertragbar → irrelevant für diesen Anlagentyp .
Machbarkeit	Für nicht redundante Durchlaufkühlungen nicht machbar, da ein vollständiger Betriebsunterbruch notwendig wäre. → keine Machbarkeit .

2.1.2 Redundante Durchlaufkühlung

Tabelle 11: Vergleich nach Ampelsystem für redundante Durchlaufkühlungen

Verfahren	Kosten	Gesetzliche Anf.	Wirksamkeit	Unsicherheiten	Machbarkeit
Mech. Reinigung	⚠	✓	⚠	✓	✓
Molchsystem	!	✓	!	!	!
Filtersysteme	!	✓	⚠	!	⚠
Chlor	✓	⚠	✓	✓	✓
Wasserstoffperoxid	⚠	⚠	✓	⚠	⚠
Ozonisierung	!	⚠	✓	!	⚠
UV-Licht	!	✓	⚠	!	!
Trockenlegung	✓	✓	✓	✓	✓

Bei der redundanten Durchlaufkühlung bietet die zusätzliche Leitungsführung einen wesentlichen Vorteil gegenüber der nicht redundanten Variante: Einzelne Stränge können zeitweise ausser Betrieb genommen und vollständig trockengelegt werden. Dadurch werden Verfahren möglich, die im kontinuierlichen Betrieb ausgeschlossen sind. Besonders die Trockenlegung hat sich in Pilotanlagen bereits als wirksam erwiesen und stellt derzeit die erfolgversprechendste Massnahme dar.

Auch chemische Verfahren wie der Einsatz von Chlor oder Wasserstoffperoxid sind möglich, sofern behördliche Bewilligungen vorliegen, eine kontinuierliche Überwachung gewährleistet ist und der behandelte Strang so lange geschlossen bleibt, bis die notwendige Verweilzeit erreicht ist und das Biozid inaktiv ist.

Mechanische Verfahren wie die manuelle Reinigung sind zwar umsetzbar, jedoch kosten- und personalintensiv und daher eher als unterstützende Massnahmen geeignet. Andere Methoden – etwa Molchsysteme, Filtersysteme, Ozonisierung oder UV-Bestrahlung – sind technisch oder wirtschaftlich nur eingeschränkt realisierbar und bislang kaum erprobt.

Insgesamt eröffnet die redundante Bauweise deutlich mehr Handlungsspielraum, wobei die Trockenlegung als zentrale und praxisbewährte Lösung gilt.

2.1.2.1 Detaillierte Bewertung der redundanten Durchlaufkühlung

Tabelle 12: Beurteilung der mechanischen Reinigung bei redundanter Durchlaufkühlung

Mechanische Reinigung:	
Kosten	Kontinuierliche Kosten durch hohen Personal- und Zeitaufwand → mittel bis teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Chemikalien eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Kurzfristig wirksam, da Muscheln und Ablagerungen zuverlässig entfernt werden. Neubefall erfolgt jedoch rasch → begrenzte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz etabliert und seit Jahren angewendet → geringe Unsicherheit .
Machbarkeit	In allen redundanten Durchlaufkühlungen möglich, allerdings mit erheblichem Aufwand → machbar, aber aufwendig .

Tabelle 13: Beurteilung des Molchsystems bei redundanter Durchlaufkühlung

Molchsysteme:	
Kosten	Hohe Investitionskosten für Installation und Betrieb → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Biozide eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	In Druckleitungen wirksam, entfernt Ablagerungen zuverlässig. Für Durchlaufkühlungen aber nicht anwendbar → keine Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz erprobt (z. B. ESB), jedoch nicht für diesen Anlagentyp → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Für redundante Durchlaufkühlungen nicht machbar, da diese keine Rückführungsoptionen bieten → keine Machbarkeit .

Tabelle 14: Beurteilung des Filtersystems bei redundanter Durchlaufkühlung

Filtersysteme:	
Kosten	Hohe Investitions- und Wartungskosten; zusätzliche Kosten durch ergänzende Reinigung → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Biozide eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Können Larven zuverlässig zurückhalten, jedoch erhöhtes Risiko für Verstopfungen → eingeschränkte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz bislang wenig etabliert → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Grundsätzlich machbar, aber technisch komplex und mit hohem Aufwand verbunden → eingeschränkt machbar .

Tabelle 15: Beurteilung des Chlorverfahren bei redundanter Durchlaufkühlung

Chlor:	
Kosten	Relativ günstig im Betrieb; kontinuierliche Kosten für Dosierung und Überwachung → günstig bis mittel .
Gesetzliche Anforderungen	Strenge Vorgaben, behördliche Bewilligung zwingend erforderlich → rechtlich eingeschränkt .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Larven, in redundanten Systemen durch Leitungsabgrenzung wirksame Konzentrationen realisierbar → wirksam .
Unsicherheiten	Weltweit etabliert, auch in der Schweiz verbreitet → geringe Unsicherheit .
Machbarkeit	In redundanten Durchlaufkühlungen grundsätzlich machbar, erfordert aber Bewilligung und Monitoring → machbar mit Auflagen .

Tabelle 16: Beurteilung des Wasserstoffperoxidverfahren redundanter Durchlaufkühlung

Wasserstoffperoxid:	
Kosten	Deutlich teurer als Chlor, sowohl in Beschaffung als auch Dosierung → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Strenge Vorgaben, behördliche Bewilligung erforderlich → rechtlich eingeschränkt .
Wirksamkeit	Grundsätzlich wirksam gegen Larven und adulte Muscheln; durch Leitungsabgrenzung in redundanten Systemen einsetzbar → wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz noch nicht etabliert; Erfahrungen v. a. aus Studien → mittlere bis hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	In redundanten Durchlaufkühlungen grundsätzlich machbar, erfordert aber Monitoring und Bewilligung → eingeschränkt machbar .

Tabelle 17: Beurteilung des Ozonverfahren bei redundanter Durchlaufkühlung

Ozonisierung:	
Kosten	Sehr hohe Investitions- und Betriebskosten (Energie, Wartung) → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Ozon gilt als Biozid; eine Bewilligung der Vollzugsbehörde ist zwingend erforderlich. → rechtlich eingeschränkt .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Larven, ökologisch vorteilhaft, da Ozon zu Sauerstoff zerfällt → grundsätzlich wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz bisher nicht für Quaggamuscheln erprobt → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Hohe technische Komplexität → eingeschränkt machbar .

Tabelle 18: Beurteilung der UV-Bestrahlung bei redundanter Durchlaufkühlung

UV-Bestrahlung:	
Kosten	Hohe Investitions- und Betriebskosten → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Chemikalien eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Larven, aber nicht gegen adulte Muscheln; Wirksamkeit sinkt bei trübem Wasser → eingeschränkte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz noch nicht erprobt → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	In grosstechnischen Durchlaufkühlungen schwer realisierbar → kaum machbar .

Tabelle 19: Beurteilung der Trockenlegung bei redundanter Durchlaufkühlung

Trockenlegung:	
Kosten	Geringe direkte Kosten, da keine Chemikalien oder teure Anlagen erforderlich → günstig .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Sehr wirksam, da Muscheln innerhalb weniger Tage absterben. Nachteil: manuelle Entfernung abgestorbener Muscheln erforderlich → wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz (z. B. UNIL/EPFL) bereits erfolgreich erprobt → geringe Unsicherheit .
Machbarkeit	In redundanten Durchlaufkühlungen technisch gut umsetzbar → machbar .

2.2 Kreislaufkühlung

Tabelle 20: Vergleich nach Ampelsystem für Kreislaufkühlung

Verfahren	Kosten	Gesetzliche Anf.	Wirksamkeit	Unsicherheiten	Machbarkeit
Mech. Reinigung	⚠	✓	⚠	✓	✓
Molchsystem	!	✓	!	!	!
Filtersysteme	!	✓	⚠	!	⚠
Chlor	✓	⚠	✓	✓	✓
Wasserstoffperoxid	⚠	⚠	✓	⚠	⚠
Ozonisierung	!	⚠	✓	!	⚠
UV-Licht	!	✓	⚠	!	⚠
Trockenlegung	✓	✓	!	!	!

Bei der Kreislaufkühlung entsteht durch die mehrfache Nutzung des Wassers ein geschlossenes System, in dem chemische Verfahren gezielter und ohne direkte Ableitung in Gewässer eingesetzt werden können. Besonders der Einsatz von Chlor und Wasserstoffperoxid ist grundsätzlich möglich, sofern eine behördliche Bewilligung vorliegt und eine kontinuierliche Überwachung gewährleistet ist. Auch Ozonisierung bietet ökologische Vorteile, ist jedoch mit sehr hohen Energie- und Betriebskosten verbunden und bislang kaum etabliert.

Mechanische Verfahren wie die manuelle Reinigung sind in Kreislaufkühlungen zwar durchführbar, aber personal- und kostenintensiv und daher vor allem als unterstützende Massnahme geeignet. Filtersysteme können Larven zurückhalten, erfordern jedoch erhebliche Investitionen und sind in der Schweiz bisher wenig erprobt. Molchsysteme hingegen sind für diesen Anlagentyp praktisch nicht geeignet.

Physikalische Verfahren wie die UV-Bestrahlung sind prinzipiell einsetzbar, ihre Wirksamkeit ist jedoch stark von den Wasserbedingungen abhängig und in der Schweiz bislang nicht getestet. Die Trockenlegung, die sich bei redundanten Durchlaufkühlungen bewährt hat, ist bei Kreislaufsystemen nicht umsetzbar, da diese in der Regel nicht vollständig entleert werden können.

Insgesamt eröffnet die Kreislaufkühlung im Vergleich zur Durchlaufkühlung vor allem im Bereich der chemischen Verfahren Handlungsspielräume. Mechanische und physikalische Methoden bleiben dagegen überwiegend technisch oder wirtschaftlich eingeschränkt und bisher kaum etabliert.

2.2.1 Detaillierte Bewertung der Kreislaufkühlung

Tabelle 21: Beurteilung der mechanischen Reinigung bei Kreislaufkühlung

Mechanische Reinigung:	
Kosten	Kontinuierliche Kosten durch hohen Personal- und Zeitaufwand → mittel bis teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Chemikalien eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Kurzfristig wirksam, da Muscheln zuverlässig entfernt werden. Neubefall tritt jedoch rasch ein → begrenzte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz etabliert und seit Jahren angewendet → geringe Unsicherheit .
Machbarkeit	Grundsätzlich möglich, jedoch aufwendig und nur begrenzt praktikabel → machbar, aber aufwendig .

Tabelle 22: Beurteilung des Molchsystems bei Kreislaufkühlung

Molchsysteme:	
Kosten	Hohe Investitionskosten für Installation und Betrieb → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Für Kreislaufkühlungen kaum praktikabel, da Leitungen nicht für Molche ausgelegt sind → praktisch keine Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz teilweise erprobt, aber nicht für diesen Anlagentyp → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	In Kreislaufkühlungen nicht machbar → keine Machbarkeit .

Tabelle 23: Beurteilung des Filtersystems bei Kreislaufkühlung

Filtersysteme:	
Kosten	Hohe Investitions- und Wartungskosten; zusätzliche Reinigung erforderlich → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Können Larven zurückhalten, Risiko von Verstopfungen aber vorhanden → eingeschränkte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz wenig erprobt → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Theoretisch machbar, jedoch technisch komplex und mit hohem Aufwand verbunden → eingeschränkt machbar .

Tabelle 24: Beurteilung des Chlorverfahrens bei Kreislaufkühlung

Chlor:	
Kosten	Relativ günstig im Betrieb; kontinuierliche Kosten für Dosierung und Überwachung → günstig bis mittel .
Gesetzliche Anforderungen	Strenge Vorgaben, Bewilligung erforderlich → rechtlich eingeschränkt .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Larven; im geschlossenen System gezielt dosierbar → wirksam .
Unsicherheiten	Weltweit etabliert, auch in der Schweiz angewendet → geringe Unsicherheit .
Machbarkeit	In Kreislaufkühlungen grundsätzlich machbar, erfordert Bewilligung und Monitoring → machbar mit Auflagen .

Tabelle 25: Beurteilung des Wasserstoffperoxidverfahren Kreislaufkühlung

Wasserstoffperoxid:	
Kosten	Deutlich teurer als Chlor, sowohl Beschaffung als auch Dosierung → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Bewilligung erforderlich → rechtlich eingeschränkt .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Larven, im geschlossenen System gezielt dosierbar → wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz kaum erprobt; Erfahrungen v. a. aus Studien → mittlere bis hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	In Kreislaufkühlungen grundsätzlich machbar, erfordert Monitoring und Bewilligung → eingeschränkt machbar .

Tabelle 26: Beurteilung des Ozonverfahren bei Kreislaufkühlung

Ozonisierung:	
Kosten	Sehr hohe Investitions- und Betriebskosten → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Ozon gilt als Biozid; Bewilligung erforderlich → rechtlich eingeschränkt .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Larven, ökologisch vorteilhaft, da Ozon zu Sauerstoff zerfällt → wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz bisher kaum erprobt → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Technisch komplex und energieintensiv → eingeschränkt machbar .

Tabelle 27: Beurteilung der UV-Bestrahlung bei Kreislaufkühlung

UV-Bestrahlung:	
Kosten	Hohe Investitions- und Betriebskosten → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Chemikalien eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Larven, jedoch begrenzt bei trübem Wasser oder grossen Volumenströmen → eingeschränkte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz nicht erprobt → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	In Kreislaufkühlungen theoretisch machbar, aber praktisch schwierig → eingeschränkt machbar .

Tabelle 28: Beurteilung der Trockenlegung bei Kreislaufkühlung

Trockenlegung:	
Kosten	Geringe direkte Kosten → günstig .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Grundsätzlich wirksam, aber in Kreislaufsystemen kaum realisierbar, da diese nicht vollständig entleert werden können → kaum wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz nicht etabliert → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	In Kreislaufkühlungen praktisch nicht umsetzbar → nicht machbar .

2.3 Wasseraufbereitung

Tabelle 29: Vergleich nach Ampelsystem für Wasseraufbereitung

Verfahren	Kosten	Gesetzliche Anf.	Wirksamkeit	Unsicherheiten	Machbarkeit
Mech. Reinigung	⚠	✓	⚠	✓	✓
Molchsystem	!	✓	✓	✓	✓
Filtersysteme	!	✓	⚠	!	⚠
Chlor	✓	⚠	✓	✓	✓
Wasserstoffperoxid	⚠	⚠	✓	⚠	⚠
Ozonisierung	!	⚠	✓	!	!
UV-Licht	!	✓	⚠	!	!
Trockenlegung	✓	✓	!	!	!

Mechanische Verfahren wie die manuelle Reinigung sind unmittelbar wirksam und in der Schweiz etabliert, jedoch personal- und kostenintensiv und daher eher als unterstützende Massnahmen geeignet. Molchsysteme können Leitungen zuverlässig reinigen, erfordern aber spezielle bauliche Anpassungen und daher hohe Investitionen, während Filtersysteme Larven zurückhalten können, jedoch technisch komplex und in der Schweiz noch wenig erprobt sind.

Chemische Verfahren wie Chlor und Wasserstoffperoxid sind grundsätzlich wirksam und gezielt dosierbar. Sie sind jedoch gesetzlich stark reguliert und benötigen Abklärungen mit den Behörden, wobei Chlor kostengünstiger und verbreiteter ist, während Wasserstoffperoxid teurer, aber ökologisch vorteilhafter ist. Die Ozonisierung bietet ebenfalls ökologische Vorteile, ist aber mit sehr hohen Energie- und Betriebskosten verbunden und für Entnahmeleitungen technisch nicht geeignet.

Physikalische Verfahren wie die UV-Bestrahlung können Larven im Rohwasser inaktivieren, sind jedoch bei hohen Durchflussmengen oder trübem Wasser eingeschränkt wirksam und in der Schweiz noch nicht etabliert. Die Trockenlegung ist zwar sehr wirksam, lässt sich in Wasseraufbereitungsanlagen jedoch nicht umsetzen, da die kontinuierliche Versorgung gewährleistet werden muss.

Insgesamt zeigt sich, dass chemische Verfahren und das Molchverfahren derzeit die grössten Handlungsspielräume bieten, während die mechanische Reinigung eher unterstützend wirkt und physikalische Verfahren bislang nur eingeschränkt praktikabel sind.

2.3.1 Detaillierte Bewertung der Wasseraufbereitung

Tabelle 30: Beurteilung der mechanischen Reinigung bei Wasseraufbereitung

Mechanische Reinigung:	
Kosten	Kontinuierliche Kosten durch hohen Personal- und Zeitaufwand (Taucher, Reinigungsteams) → mittel bis teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Chemikalien eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Unmittelbar wirksam, da Muscheln und Ablagerungen zuverlässig entfernt werden. Neubefall tritt jedoch rasch auf → begrenzte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz etabliert und seit Jahren angewendet → geringe Unsicherheit .
Machbarkeit	Grundsätzlich möglich, insbesondere an Entnahmeleitungen, Schwallkammern oder Mikrosieben, jedoch aufwendig und nur begrenzt praktikabel → machbar, aber aufwendig .

Tabelle 31: Beurteilung des Molchsystem bei Wasseraufbereitung

Molchsystem:	
Kosten	Hohe Investitionskosten für Installation und Betrieb; zusätzliche Aufwände durch bauliche Anpassungen → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Chemikalien eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	In Druckleitungen wirksam, da Muscheln und Ablagerungen zuverlässig entfernt werden. Für Wasseraufbereitungsanlagen technisch einsetzbar → wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz teilweise erprobt an Pilotprojekten → geringe Unsicherheit .
Machbarkeit	Grundsätzlich machbar, erfordert jedoch spezielle Leitungsführungen mit Rückführungsmöglichkeit des Molchs → eingeschränkt machbar .

Tabelle 32: Beurteilung des Filtersystem bei Wasseraufbereitung

Filtersysteme:	
Kosten	Hohe Investitions- und Wartungskosten; zusätzliche Kosten für Betrieb und Reinigung → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Biozide eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Können Muschellarven im Rohwasser zuverlässig zurückhalten; Verstopfungsrisiko bleibt bestehen → eingeschränkte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz bislang kaum etabliert → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Grundsätzlich machbar, erfordert jedoch komplexe mehrstufige Systeme mit Rückspülung → eingeschränkt machbar .

Tabelle 33: Beurteilung des Chlorverfahren bei Wasseraufbereitung

Chlor:	
Kosten	Relativ günstig im Betrieb; kontinuierliche Kosten für Dosierung und Überwachung → günstig bis mittel .
Gesetzliche Anforderungen	Strenge Vorgaben, Abklärung mit der Behörde notwendig → rechtlich eingeschränkt .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Muschellarven; da das Wasser nicht zurückgeführt wird, ist eine gezielte Dosierung möglich und eine zuverlässige Bekämpfung gewährleistet → wirksam .
Unsicherheiten	Weltweit etabliert, auch in der Schweiz in vergleichbaren Anwendungen verbreitet → geringe Unsicherheit .
Machbarkeit	In Wasseraufbereitungsanlagen grundsätzlich machbar → machbar .

Tabelle 34: Beurteilung des Wasserstoffperoxidverfahren Wasseraufbereitung

Wasserstoffperoxid:	
Kosten	Deutlich teurer als Chlor, sowohl in Beschaffung als auch in der Dosierung → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Strenge Vorgaben, Abklärung mit der Behörde notwendig → rechtlich eingeschränkt .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Muschellarven, zerfällt zu Wasser und Sauerstoff ohne problematische Nebenprodukte → wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz bisher wenig erprobt; Erfahrungen stammen v. a. aus Studien und Pilotprojekten → mittlere Unsicherheit .
Machbarkeit	In Wasseraufbereitungsanlagen grundsätzlich machbar jedoch mit Unsicherheiten verbunden → eingeschränkt machbar .

Tabelle 35: Beurteilung des Ozonverfahren bei Wasseraufbereitung

Ozonisierung:	
Kosten	Sehr hohe Investitions- und Betriebskosten; kontinuierlicher Energiebedarf für Ozonerzeugung → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Strenge Vorgaben, Abklärung mit der Behörde notwendig → rechtlich eingeschränkt .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Muschellarven; ökologisch vorteilhaft, da Ozon zu Sauerstoff zerfällt → wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz bewährt in der Wasseraufbereitung, für Entnahmeleitungen jedoch kaum erprobt → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Für Entnahmeleitungen ungeeignet (rascher Zerfall von Ozon, technische Hürden bei der Dosierung) → nicht machbar .

Tabelle 36: Beurteilung der UV-Bestrahlung bei Wasseraufbereitung

UV-Bestrahlung:	
Kosten	Hohe Investitions- und Betriebskosten → teuer .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen, da keine Chemikalien eingesetzt werden → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Wirksam gegen Larven im Rohwasser, begrenzt bei hohen Durchflussmengen oder trübem Wasser → eingeschränkte Wirksamkeit .
Unsicherheiten	In der Schweiz bisher nicht etabliert → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	Für Entnahmeleitungen technisch nicht umsetzbar → nicht machbar .

Tabelle 37: Beurteilung der Trockenlegung bei Wasseraufbereitung

Trockenlegung:	
Kosten	Geringe direkte Kosten, da keine Chemikalien oder teuren Anlagen notwendig sind → günstig .
Gesetzliche Anforderungen	Keine Einschränkungen → rechtlich unproblematisch .
Wirksamkeit	Grundsätzlich sehr wirksam, da Muscheln ohne Wasser rasch absterben; in Wasseraufbereitungsanlagen jedoch nicht realisierbar → kaum wirksam .
Unsicherheiten	In der Schweiz nicht etabliert → hohe Unsicherheit .
Machbarkeit	In Wasseraufbereitungsanlagen nicht umsetzbar, da eine kontinuierliche Versorgung zwingend erforderlich ist → nicht machbar .

2.4 Fazit

Tabelle 38: Vergleich aller Anlagentypen nach dem Ampelsystem

Verfahren	nicht redundante Durchlauf	redundante Durchlauf	Kreislauf	Wasseraufbereitung
Mechanische Reinigung	☑	☑	☑	☑
Molchsystem	!	!	!	☑
Filtersysteme	⚠	⚠	⚠	⚠
Chlor	!	☑	☑	☑
Wasserstoffperoxid	!	⚠	⚠	☑
Ozonisierung	!	⚠	⚠	!
UV-Licht	!	!	⚠	!
Trockenlegung	!	☑	!	!

Für nicht redundante Durchlaufkühlungen gibt es derzeit keine praxistaugliche Standardlösung. Als einzige grundsätzlich umsetzbare Sofortmassnahme kommt die mechanische Reinigung infrage, die jedoch personal- und kostenintensiv ist. Filtersysteme lassen sich nur in Kombination mit anderen Massnahmen und unter erheblichem Aufwand einsetzen. Chemische und physikalische Verfahren scheitern entweder an rechtlichen Vorgaben, unzureichender Einwirkzeit oder mangelnder Eignung im kontinuierlichen Betrieb.

Bei redundanten Durchlaufkühlungen eröffnet die Redundanz zusätzlichen Handlungsspielraum. Die wirksamste und praxiserprobte Massnahme ist hier die Trockenlegung in Kombination mit der manuellen Reinigung. Auch Chlor oder Wasserstoffperoxid können effektiv eingesetzt werden, sofern die entsprechenden behördlichen Genehmigungen vorliegen, ein Monitoring eingerichtet ist und der Behandlungsstrang während der Wirkungszeit geschlossen ist. Der Einsatz von Ozon und UV-Technik ist dagegen technisch oder wirtschaftlich nur eingeschränkt sinnvoll.

Kreislaufkühlungen als geschlossene Systeme erlauben den gezielten Einsatz von Chlor. Wasserstoffperoxid kann ebenfalls genutzt werden, allerdings werden hier höhere Konzentrationen benötigt, dafür entstehen keine problematischen Ausgangsstoffe. Ozon ist technisch möglich, jedoch teuer und komplex im Betrieb. Mechanische und physikalische Verfahren haben hier eher eine unterstützende oder eingeschränkte Funktion.

In der Wasseraufbereitung erweisen sich Molchsysteme (bei geeigneter Auslegung) sowie der Einsatz von Chlor derzeit als am praktikabelsten. Wasserstoffperoxid ist ebenfalls wirksam, aber teurer und weniger etabliert. UV- und Ozonverfahren sind in der Entnahmeleitung kaum realisierbar, während eine Trockenlegung aus Gründen der Versorgungssicherheit nicht in Betracht kommt.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen:

1. **Keine Einheitslösung:** Die Wahl der Massnahme ist anlagenspezifisch und hängt von Redundanz, Gewässeranbindung, Betriebsweise und rechtlichen Rahmenbedingungen ab.
2. **Recht geht vor:** Ohne Abklärung mit der Behörde und gegeben falls einer Bewilligung sind chemische Verfahren nicht zulässig bzw. nicht verantwortbar.
3. **Kombinationsstrategien bevorzugen:** In der Praxis sind hybride Ansätze am erfolgversprechendsten (z. B. Trockenlegung + mechanische Entfernung der Reste; Filter + periodische Reinigung; chemische Stossbehandlung im geschlossenen/abgegrenzten Strang).
4. **Planungsgrundsatz:** Redundanz (wo möglich) schafft langfristig die grösste Robustheit. Bei Neubau/Umbau sollte Redundanz sowie zugängliche Reinigungspunkte und Mess-/Monitoringinfrastruktur frühzeitig eingeplant werden.
5. **Unsicherheiten aktiv managen:** Mehrere Verfahren sind in der Schweiz bislang wenig erprobt. Daher empfiehlt sich ein Pilotprojekt, das idealerweise durch eine begleitende Studie unterstützt wird. Dies kann Anlagenbetreiber und Behörden bei der Wahl des geeigneten Verfahrens weiter unterstützen.

2.5 Ausblicke

Die vorliegende Arbeit zeigt deutlich, dass die Quaggamuschel in der Schweiz eine ernsthafte Herausforderung für Industrie und Behörden darstellt. Trotz der aufgezeigten Massnahmen existiert derzeit keine universell einsetzbare Standardlösung. Die Wahl geeigneter Strategien hängt stark vom Anlagentyp, den betrieblichen Gegebenheiten sowie den rechtlichen Rahmenbedingungen ab.

Für die Zukunft lassen sich mehrere Handlungsfelder ableiten:

- **Vertiefte Forschung und Pilotprojekte**
Viele Verfahren, insbesondere physikalische Methoden wie UV-Bestrahlung oder die Ozonisierung, sind bislang nur in Pilotstudien oder im Ausland erprobt worden. In der Schweiz besteht ein Bedarf an praxisnahen Pilotprojekten, um Wirksamkeit, technische Machbarkeit und ökologische Auswirkungen systematisch zu untersuchen.
- **Kombination von Massnahmen**
Einzelne Verfahren stossen schnell an ihre Grenzen. Erfolgversprechend erscheint die Kombination verschiedener Ansätze – etwa mechanische Reinigung in Verbindung mit chemischen oder physikalischen Methoden. Künftige Studien sollten sich darauf konzentrieren, integrative Strategien zu entwickeln, die anlagenspezifisch angepasst werden können.
- **Stärkung internationaler Zusammenarbeit**
Da die Quaggamuschel ein globales Problem darstellt, ist ein kontinuierlicher Wissensaustausch mit anderen Ländern essenziell. Von den Erfahrungen und Lösungsansätzen anderer Regionen kann die Schweiz profitieren, insbesondere im Hinblick auf neue Technologien und präventive Massnahmen.

Verzeichnisse

Erklärung zur Verwendung von KI und Übersetzungstools

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden digitale Hilfsmittel und KI-gestützte Werkzeuge genutzt. Der Einsatz erfolgte stets unterstützend; sämtliche inhaltlichen Entscheidungen, Bewertungen und Schlussfolgerungen stammen vom Verfasser.

Einsatz von ChatGPT (KI):

- Unterstützung bei der Literatur- und Quellensuche, insbesondere bei internationalen Fachartikeln und Studien.
- Mithilfe beim Lektorieren des Textes.
- Management Summary erstellt, vom Autor überarbeitet und angepasst.
- Teilweise Unterstützung bei der Übersetzung englischsprachiger Texte.

Einsatz von Übersetzungstools:

- Google Translate wurde verwendet, um ganze PDFs englischsprachiger Studien ins Deutsche zu übertragen.
- DeepL wurde ergänzend genutzt, um Textpassagen präziser und stilistisch besser ins Deutsche zu übersetzen.
- Die Übersetzung diente ausschliesslich dem Verständnis und der Einarbeitung wissenschaftlicher Studien.

Abkürzungsverzeichnis

Abkür- zung	Bedeutung
Anf.	Anforderungen
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BAG	Bundesamt für Gesundheit
SECO	Staatssekretariat für Wirtschaft
Eawag	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässer- schutz
ECHA	European Chemicals Agency (Europäische Chemikalienagentur)
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
UNIL	Université de Lausanne
SIG	Services Industriels de Genève
SVGW	Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches
ESB	Energie Service Biel
GSchV	Gewässerschutzverordnung
VBP	Verordnung über Biozidprodukte
NOEC	No Observed Effect Concentration (höchste Konzentration ohne nachweisbare Ef- fekte)
PNEC	Predicted No Effect Concentration (vorhergesagte Konzentration ohne schädliche Wirkung)
Qmax	Maximale Abflussmenge einer Anlage
Q347	Abflusskennwert: Abflussmenge, die an 347 Tagen im Jahr erreicht oder überschrit- ten wird
mg/l	Milligramm pro Liter
µm	Mikrometer
O ₃	Ozon
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
PDF	Portable Document Format
v. a.	vor allem

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 9: Quaggamuscheln auf einem Rohr im Genfersee. (Eawag, 2022)	4
Abbildung 2: Wachstum der Zebromuschellarve – dies ist vergleichbar mit der Quaggamuschellarve. (Dango & Dienenthal, 2025).....	4
Abbildung 3: Muschelbefall in industriellen Anlagenteilen. (Dango & Dienenthal, 2025).....	5
Abbildung 12: Verstopfter Filter der UNIL. (SRF Schweiz, 2023).....	6
Abbildung 13: Schema einer Durchlauf- und Kreislaufkühlung. (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2025).....	7
Abbildung 6: Schema einer Wasseraufbereitungsanlage. (Infrastruktur Zürichsee AG, 2025).....	8
Abbildung 15: Ein Taucher der Quaggamuscheln mittels Hochdruckreiniger entfernt. (Südkurier, 2022).....	9
Abbildung 8: Schema eines Molchverfahren. (Energie Service Biel (ESB), 2024)	9
Abbildung 17: Schema einer Ozonisierung einer ARA (VSA, 2025)	12
Abbildung 10: Der Wellenlängenbereich elektromagnetischer Strahlungen. (Gigahertz-Optik, 2025)	13
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Einleitung des Anlagenzulaufs in die Aare mit den relevanten Grenzwerten (NOEC vor Einleitung = 0,63 mg/l; PNEC nach vollständiger Durchmischung = 0,0126 mg/l).	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Angaben für Berechnung des Beispiels: Grenzwertbestimmung für Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂) in der Aare	16
Tabelle 2: Vergleich nach Ampelsystem für nicht redundante Durchlaufkühlungen	20
Tabelle 3: Beurteilung der mechanischen Reinigung bei nicht redundanter Durchlaufkühlung	21
Tabelle 4: Beurteilung des Molchsystem bei nicht redundanter Durchlaufkühlung	21
Tabelle 5: Beurteilung des Filtersystem bei nicht redundanter Durchlaufkühlung	22
Tabelle 6: Beurteilung des Chlorverfahren bei nicht redundanter Durchlaufkühlung	22
Tabelle 7: Beurteilung des Wasserstoffperoxidverfahren bei nicht redundanter Durchlaufkühlung ..	23
Tabelle 8: Beurteilung des Ozonverfahren bei nicht redundanter Durchlaufkühlung	23
Tabelle 9: Beurteilung der UV-Bestrahlung bei nicht redundanter Durchlaufkühlung	24
Tabelle 10: Beurteilung der Trockenlegung bei nicht redundanter Durchlaufkühlung	24
Tabelle 11: Vergleich nach Ampelsystem für redundante Durchlaufkühlungen	25
Tabelle 12: Beurteilung der mechanischen Reinigung bei redundanter Durchlaufkühlung	26
Tabelle 13: Beurteilung des Molchsystem bei redundanter Durchlaufkühlung	26
Tabelle 14: Beurteilung des Filtersystem bei redundanter Durchlaufkühlung	26
Tabelle 15: Beurteilung des Chlorverfahren bei redundanter Durchlaufkühlung	27
Tabelle 16: Beurteilung des Wasserstoffperoxidverfahren redundanter Durchlaufkühlung	27
Tabelle 17: Beurteilung des Ozonverfahren bei redundanter Durchlaufkühlung	27
Tabelle 18: Beurteilung der UV-Bestrahlung bei redundanter Durchlaufkühlung	28
Tabelle 19: Beurteilung der Trockenlegung bei redundanter Durchlaufkühlung	28
Tabelle 20: Vergleich nach Ampelsystem für Kreislaufkühlung	29
Tabelle 21: Beurteilung der mechanischen Reinigung bei Kreislaufkühlung	30
Tabelle 22: Beurteilung des Molchsystem bei Kreislaufkühlung	30
Tabelle 23: Beurteilung des Filtersystem bei Kreislaufkühlung	30
Tabelle 24: Beurteilung des Chlorverfahren bei Kreislaufkühlung	30
Tabelle 25: Beurteilung des Wasserstoffperoxidverfahren Kreislaufkühlung	31
Tabelle 26: Beurteilung des Ozonverfahren bei Kreislaufkühlung	31
Tabelle 27: Beurteilung der UV-Bestrahlung bei Kreislaufkühlung	31
Tabelle 28: Beurteilung der Trockenlegung bei Kreislaufkühlung	31
Tabelle 29: Vergleich nach Ampelsystem für Wasseraufbereitung	32
Tabelle 30: Beurteilung der mechanischen Reinigung bei Wasseraufbereitung	33
Tabelle 31: Beurteilung des Molchsystem bei Wasseraufbereitung	33
Tabelle 32: Beurteilung des Filtersystem bei Wasseraufbereitung	33
Tabelle 33: Beurteilung des Chlorverfahren bei Wasseraufbereitung	34
Tabelle 34: Beurteilung des Wasserstoffperoxidverfahren Wasseraufbereitung	34
Tabelle 35: Beurteilung des Ozonverfahren bei Wasseraufbereitung	34
Tabelle 36: Beurteilung der UV-Bestrahlung bei Wasseraufbereitung	35
Tabelle 37: Beurteilung der Trockenlegung bei Wasseraufbereitung	35
Tabelle 38: Vergleich aller Anlagentypen nach dem Ampelsystem	36

Literaturverzeichnis

- Aqua & Gas. (03. 12 2019). www.aquaetgas.ch. Von Quagga-Muschel richtet im Bodensee massive Schäden an: <https://www.aquaetgas.ch/aktuell/branchen-news/20191203-quagga-muschel-bodensee/> abgerufen
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. (10 2025). ifu.bayern.de. Von Kühlwassernutzung: https://www.ifu.bayern.de/wasser/thermische_nutzung_gewaesser/kuehlwassernutzung/index.htm abgerufen

- Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2024). *hydrodaten.admin.ch*. Von Aare - Brugg, Aegerten: <https://www.hydrodaten.admin.ch/de/seen-und-fluesse/stationen-und-daten/2029> abgerufen
- Claudi et al. (2023). *Dose-mortality relationship for quagga and zebra mussels exposed to EarthTec QZ ionic copper: preliminary findings*. Management of Biological Invasions.
- D. Dahlberg. (2025). *Verwendung von Bioverfügbarkeitsmodellierung zur Verfeinerung von Kupferbehandlungen für die Kontrolle von Zebra- und Quagga-Muscheln und besseres Verständnis der Risiken für Nichtzielarten*. scientific reports.
- Dango & Dienenthal. (10 2025). *www.dds-filter.com*. Von Muschel Stop: https://www.dds-filter.com/fileadmin/user_upload/_DD_Filtertechnik/Downloads/Muschel_Stop_DE.pdf abgerufen
- Der Schweizerische Bundesrat. (01. 08 2025). *fedlex.admin.ch*. Von Gewässerschutzverordnung (GschV): https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/2863_2863_2863/de abgerufen
- Diese Arbeit wurde mit ChatGPT lektoriert. (kein Datum).
- Eawag. (2022). *Eawag.ch*. Von Die invasive Quagga-Muschel: <https://www.eawag.ch/de/info/portal/themen-im-fokus/quaggamuschel/> abgerufen
- ECHA. (2023). *echa.europa.eu*. Von Hydrogen peroxide: <https://echa.europa.eu/de/registration-dossier/-/registered-dossier/15701/6/2/1> abgerufen
- ECHA. (10 2025). *echa.europa.eu*. Von Produktarten: <https://echa.europa.eu/de/regulations/biocidal-products-regulation/product-types> abgerufen
- Energie Service Biel (ESB). (2024). *www.esb.ch*. Von Erneuerung Seewasserwerk Ipsach: <https://www.esb.ch/de/esb/projekte/erneuerung-seewasserwerk-ipsach/> abgerufen
- Gemeinsame Anmeldestelle Chemikalien des BAFU - BAG - SECO. (04. 09 2024). *www.anmeldestelle.admin.ch*. Von Biozidprodukteverordnung (VBP): <https://www.anmeldestelle.admin.ch/de/biozidprodukteverordnung-vbp> abgerufen
- Gemeinsame Anmeldestelle Chemikalien des BAFU - BAG - SECO. (25. 06 2025). *www.anmeldestelle.admin.ch*. Von Allgemeine Informationen zu den Wirkstoffen: <https://www.anmeldestelle.admin.ch/de/allgemeine-informationen-zu-den-wirkstoffen> abgerufen
- Genossenschaft EW Romanshorn (EWR). (05. 09 2024). *ewr.ch*. Von Der Kampf gegen die Quagga-Muschel: <https://ewr.ch/der-kampf-gegen-die-quaggamuschel/> abgerufen
- Getsinger, S. L. (2000). *Zebra Mussel Chemical Control Guide*. US Army Corps of Engineers.
- Gigahertz-Optik. (10 2025). *www.gigahertz-optik.com*. Von <https://www.gigahertz-optik.com/de-de/service-und-support/informationsportal/grundlagen-lichtmesstechnik/lichtfarbe/wellenlaengenbereich-optischer-strahlung/> abgerufen
- Infrastruktur Zürichsee AG. (2025). *Infra-z.ch*. Von <https://www.infra-z.ch/wasser/wasserwerke> abgerufen
- Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW). (20. 01 2021). *svgw.ch*. Von Fachaustausch-Quagga-Muscheln: https://www.svgw.ch/media/7141/fachaustausch-quaggamuschel_resistente-aufbereitung-januar-2021.pdf abgerufen
- SRF Schweiz. (06. 12 2023). *SRF.ch*. Von Die Quagga-Muschel breitet sich immer stärker aus: <https://www.srf.ch/news/schweiz/kleines-tier-hohe-kosten-die-quaggamuschel-breitet-sich-immer-staerker-aus> abgerufen
- Stewart-Malone, A., Misamore, M., Wilmoth, S., Reyes, A., Wong, W. H., & Gross, J. (2015). *pmc.ncbi.nlm.nih.gov*. Von The Effect of UV-C Exposure on Larval Survival of the Dreissenid Quagga Mussel: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4505903/?utm_source=chatgpt.com abgerufen
- Südkurier. (01. 05 2022). *www.suedkurier.de*. Von Mit Technik der Zukunft gegen die Quagga-Muschel: <https://www.suedkurier.de/region/bodenseekreis/sipplingen/mit-technik-der-zukunft-gegen-die-quagga-muschel;art372492,11155345> abgerufen
- Tagesanzeiger. (23. 07 2025). *www.tagesanzeiger.ch*. Von Eine Muschel kostet die Zürcher Wasserversorger Millionen: <https://www.tagesanzeiger.ch/am-zuerichsee-muessen-wegen-der-quaggamuschel-die-trinkwasserleitungen-ersetzt-werden-198965097721> abgerufen
- U.S. Fish & Wildlife Service. (2020). *www.fws.gov*. Von UV-Licht zur Bekämpfung invasiver Larven: https://www.fws.gov/project/uv-light-control-invasive-larvae?utm_source=chatgpt.com abgerufen

- VSA. (10 2025). *micropoll.ch*. Von Ozon: Kenngrößen aus der Praxis und Illustrationen: <https://micropoll.ch/verfahren/ozon/ozon-verfahrensfuehrung/kenngroesse-und-illustrationen/> abgerufen
- Zonosistem. (10 2025). *www.zonosistem.com*. Von Ozon bei der Bekämpfung der Zebra- und Quagga-Muschel und anderer invasiver Arten: https://www.zonosistem.com/en_US/blog/exclusive-ozone-news-1/post/ozone-in-the-control-of-the-zebra-mussel-and-other-invasive-species-32?utm_source=chatgpt.com abgerufen