

LIFE CYCLE ASSESSMENT

OXIDATION- UND MEMBRANVERFAHREN ZUR ENTFERNUNG VON MIKROVERUNREINIGUNGEN IM VERGLEICH

Mit neuen Verfahrenstechniken lassen sich Mikroverunreinigungen erfolgreich aus dem Trinkwasser entfernen. Um diese Verfahren nicht nur auf Effizienz, sondern auch auf potenzielle Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus zu bewerten, bietet sich ein Life Cycle Assessment (LCA) an. Im Rahmen des vom Forschungsfonds Wasser (FOWA) geförderten Projekts «Oxibieau» wurden zwei Verfahren im Hinblick auf ihre Umweltauswirkungen verglichen.

Christine Roth, Hochschule für Life Sciences FHNW

Richard Wülser, Industrielle Werke Basel IWB

Robin Wünsch; Michael Thomann, Hochschule für Life Sciences FHNW*

RÉSUMÉ

ANALYSE DU CYCLE DE VIE – PROCÉDÉ D'OXYDATION VS. FILTRATION À MEMBRANE POUR ÉLIMINER LES MICROPOLLUANTS

En principe, les micropolluants ne sont pas souhaitables dans l'eau potable. Ils peuvent notamment être éliminés en utilisant des processus d'oxydation avancée (AOP) ou la filtration à membrane par osmose inverse basse pression (OIBP). Deux scénarios de traitement ont été comparés à l'aide d'une analyse du cycle de vie (ACV) pour un cas concret. Le scénario 1 consistait en une oxydation à l'aide de peroxyde d'hydrogène combiné à des UV puis un filtrage au charbon actif. Le scénario 2 consistait en un traitement de flux partiel par OIBP dans lequel le traitement du rétentat se basait sur une oxydation à l'aide de peroxyde d'hydrogène combiné à de l'ozone et un filtrage au charbon actif. En utilisant trois méthodes d'ACV, il a été démontré que l'impact environnemental du scénario 2 était nettement moins important que celui du scénario 1 avec l'AOP. Les causes principales de cet impact environnemental étaient surtout le courant, le peroxyde d'hydrogène, l'oxygène liquide et le filtrage au charbon actif. L'électricité utilisée avait une influence déterminante sur les résultats: avec une part de courant écologique < 80%, le traitement basé sur l'AOP se révélait être la meilleure option en raison d'un faible besoin en énergie. Les analyses de sensibilité ont montré que la variation des paramètres d'exploitation influençait l'impact environnemental de $\pm 10-30\%$.

HINTERGRUND UND ZIEL DER STUDIE

Die Wasserversorgungen von grösseren Städten wie Basel sind auf Oberflächengewässer angewiesen. In stark urbanisierten Gebieten sind diese aber oft mit Mikroverunreinigungen belastet. Die langfristigen Auswirkungen der Summe von Mikroverunreinigungen auf die menschliche Gesundheit und Ökosysteme sind anhand von Bioassays nur ansatzweise abschätzbar.

Um die Entfernungseffizienz von Mikroverunreinigungen aus dem Rohwasser zu verbessern, prüfte der Wasserversorger des Kantons Basel-Stadt und umliegender Gemeinden, IWB, eine zusätzliche Aufbereitungsstufe. Dabei kam im Rahmen einer Pilotierung die Kombination einer UV/Wasserstoffperoxid-Behandlung mit anschliessender biologischer Langsamfiltration zur Anwendung [3]. Zusätzlich gaben Laborversuche Aufschluss zum Rückhalt der Mikroverunreinigungen.

Der Einsatz zusätzlicher Technologien hat allerdings auch Auswirkungen auf die Umwelt. Um diese zu analysieren, ist das *Life Cycle Assessment* (LCA) heute die umfassendste Methode und der Leitfaden für Entscheidungsträger.

Im Rahmen des FOWA-Projekts «Oxibieau» wurden zwei mögliche erweiterte Verfahren zur Elimination von Mikrover-

* Kontakt: michael.thomann@fhnw.ch

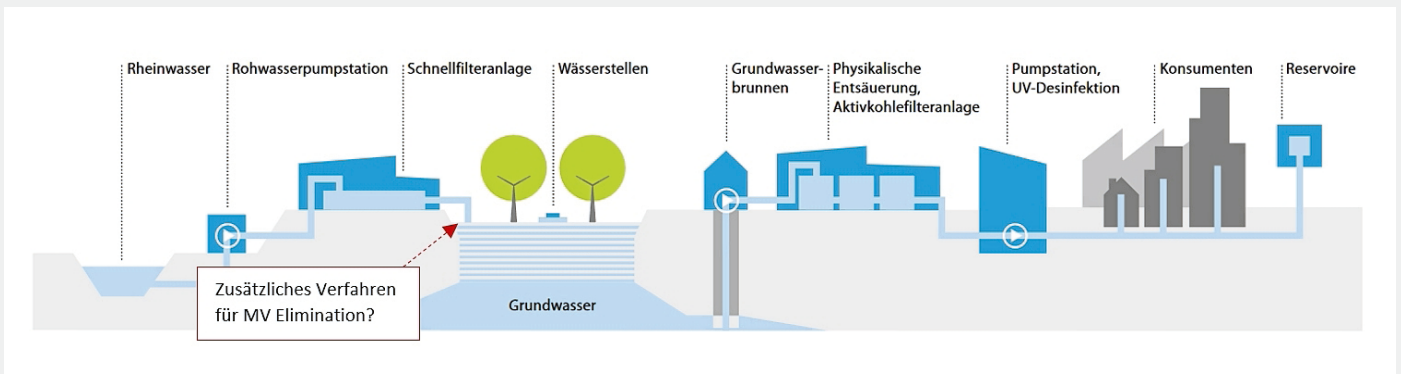


Fig. 1 Schema Grundwasserwerk Lange Erlen, Basel

(© IWB)

unreinigungen für das Grundwasserwerk Lange Erlen in Basel auf ihre Umweltverträglichkeit hin untersucht. Am Projekt «Oxibieau» beteiligt waren die Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), IWB sowie zwei Industriepartner. Die Literaturangaben und detaillierte Ausführung der Studie sind in der veröffentlichten Publikation zu finden [4].

Bodenversickerung angedacht. Einerseits soll ein zusätzliches Verfahren an dieser Stelle den Grundwasser-aquifer vor einer möglichen Belastung mit Mikroverunreinigungen besser schützen; andererseits sollen mögliche synergistische Effekte durch die Kombination AOP (*Advanced Oxidation Processes*) mit dem biologischen Abbau von Mikroverunreinigungen bei der Bodenpassage erzielt werden.

über 100 µg/l. Eine Überschreitung des Höchstwerts gemäss Trinkwasserverordnung von 10 µg/l hätte somit nicht ohne Weiteres ausgeschlossen werden können.

DIE ZWEI BEHANDLUNGSSZENARIOEN

Scenario 1: Vollstrombehandlung mit AOP – Wasserstoffperoxid-Dosierung und anschließende UV-Bestrahlung. Mikroverunreinigungen werden sowohl durch die direkte Photolyse als auch durch Reaktionen mit Hydroxylradikalen teilweise oxidiert. Überschüssiges Wasserstoffperoxid im aufbereiteten Rohwasser wird in einem GAK-Filter entfernt (Fig. 2A).

LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

Unter *Life Cycle Assessment* oder Ökobilanz versteht man die Abschätzung der von einem Produkt oder Prozess ausgehenden potenziellen Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus «von der Wiege bis zur Bahre», d. h. von der Rohstoffgewinnung, Produktion, Betrieb bis zur Abfallbehandlung. Dabei werden die In- und Outputs aller benötigten Energien und Materialien in einer Sachbilanz erfasst und die Umweltauswirkungen bewertet. Ziel ist es, das Umweltprofil eines Prozesses und Optimierungspotenziale zu ermitteln. Die grundsätzliche LCA-Methodik ist international normiert (ISO 14040 und ISO 14044 [1,2])

REINE OZONUNG AUSGESCHLOSSEN

Eine reine Ozonung des Rohwassers wurde schon früher verworfen, um das Risiko von Bromatbildung auszuschliessen. Die Bromidkonzentrationen im Rheinwasser bei Basel liegen teilweise

WASSERAUFBEREITUNG IM GRUNDWASSERWERK LANGE ERLIEN

Die Trinkwasseraufbereitung im Grundwasserwerk Lange Erlen der IWB besteht aus einem Schnellsandfilter, einer kontrollierten Grundwasseranreicherung, einer adsorptiven Aktivkohlefiltration (GAK) und einer Desinfektionsstufe mit UV-Strahlung (Fig. 1). Die zusätzliche Rohwasseraufbereitungsstufe wäre nach der Schnellsandfiltration und vor der

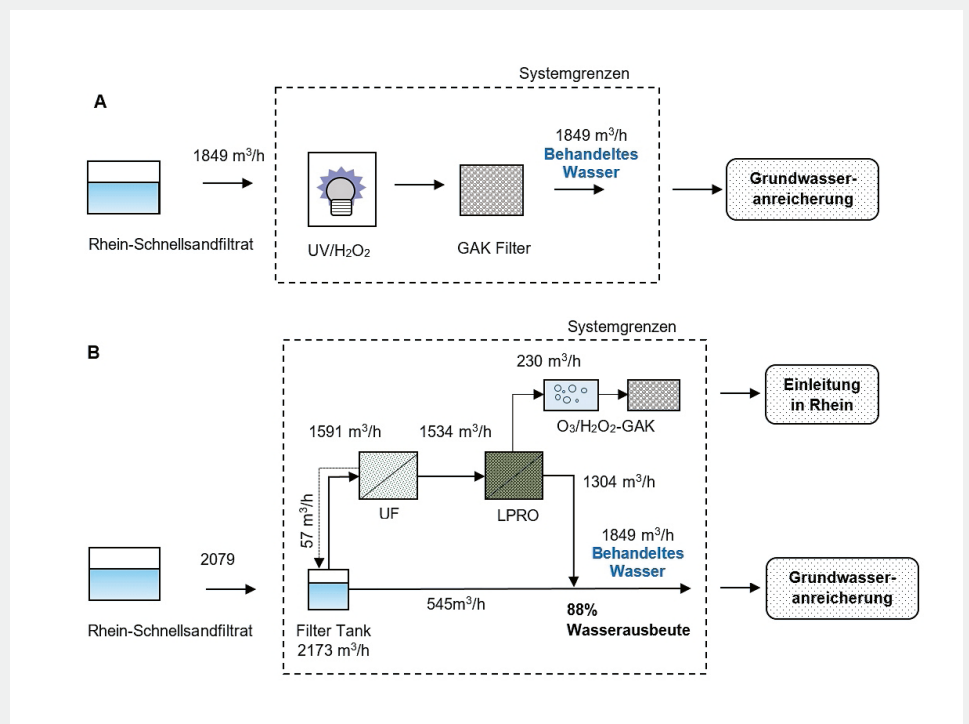


Fig. 2 Behandlungskonzept und Systemgrenzen: A Szenario 1 (AOP-basiert); B Szenario 2 (LPRO-basiert).

UV/H₂O₂ = Ultraviolette Bestrahlung mit Wasserstoffperoxid, GAK = Granulierte Aktivkohle, UF = Ultrafiltration, LPRO = Niederdruck-Umkehrosiose, O₃/H₂O₂ = Ozonung mit Wasserstoffperoxid.

(© nach Roth et al. [4])

Szenario 2: Teilstrombehandlung mit Niederdruck-Umkehrosmose-Membran (LPRO) und Wasservorbehandlung mit Ultrafiltration (UF) Dichte Membranen bilden ein Retentat mit einer deutlich höheren Stoffkonzentration, das vor der Einleitung in den Rhein mit einem ozonbasierten Verfahren unter Beachtung der Bromatkonzentration aufbereitet werden muss. Die empfohlene Umweltqualitätsnorm (*Environmental Quality Standard*) wird vom Oekotoxzentrum für Bromat mit 50 µg/l angegeben. Durch Zugabe von Wasserstoffperoxid vor der Ozon dosierung kann die Bromatbildung während der Ozonung des Konzentrats begrenzt werden. Das ozonierte Retentat wird mit einem GAK-Filter weiterbehandelt, um mögliche Nebenprodukte zu adsorbieren und die Elimination von Mikroverunreinigungen zu verbessern (Fig. 2B).

AUSLEGUNG DER VERFAHREN

Die betrachteten Verfahren wurden so ausgelegt, dass alle Mikroverunreinigungen nach der Grundwasseranreicherung maximal in Konzentrationen von 0,1 µg/l gemessen werden sollten. Diese Maximalkonzentration ist angelehnt an den Höchstwert für Pestizide und relevante Metaboliten im Trinkwasser [5]. Massgebend für die Auslegung der Verfahren waren vier Mikroverunreinigungen, die im 80. Perzentil den Zielwert 0,1 µg/l überschritten: Benzotriazol, Metformin, Guanylarnstoff und Acesulfam. Das ebenfalls in höheren Konzentrationen gemessene EDTA (Ethylendiamintetraacetat) wurde aus der Betrachtung ausgenommen, da es separat in der Trinkwasserverordnung reguliert ist. Der zusätzliche Abbau von Mikroverunreinigungen bei der Bodenpassage wurde mit dem 20. Perzentil gemessener

relativer Abbauleistungen in Säulenversuchen berücksichtigt (konservative Abschätzung). Entscheidend für die Auslegung der Verfahren war bei Szenario 1 Metformin und für Szenario 2 Acesulfam. Bei der zusätzlichen Aufbereitung des Konzentrats (Szenario 2) war das Aufbereitungsziel eine Verringerung um 80% der mässig und schnell Ozon abbaubaren Mikroverunreinigungen zu erreichen – in Anlehnung an aktuelle Vorgaben für gewisse Abwasserreinigungsanlagen.

AUFBEREITUNGSKONZEPT

Auf Basis dieser Zielsetzung erstellten die Industriepartner anschliessend die genauen Aufbereitungskonzepte. Die Auslegung der Verfahrensstufe erfolgte analog der bestehenden Anlage auf einen mittleren Durchsatz von 1849 m³/h. Die Betriebsparameter der zwei Verfahren sind in *Tabelle 1* aufgeführt.

LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

Das *Life Cycle Assessment* basiert auf der Grundlage der ISO 14040 und ISO 14044 [1, 2] und wurde mit dem Programm *SimaPro* durchgeführt. Im ersten Schritt wurde eine Sachbilanz aufgestellt, wobei alle In- und Outputs der Behandlungsverfahren auf eine funktionelle Einheit bezogen werden. Die funktionelle Einheit wurde in dieser Studie mit einem Kubikmeter behandeltem Wasser vor der Grundwasseranreicherung festgelegt. In der Sachbilanz wurde berücksichtigt: Rohstoffe, Bau/Konstruktion, Chemikalien, Energieverbrauch, Gebäude, Transport und Abfallbehandlung/Recycling. Für die Sachbilanz wurde die Datenbank *Ecoinvent* verwendet, in der ausführliche Sachbilanzdaten (In- und Outputs) von z. B. Materialien und Rohstoffen hinterlegt sind.

Als Strom für den Betrieb der Verfahren wurde der von IWB produzierte Strom als Prozess modelliert: 100% erneuerbare Energien, 94% davon stammen aus Wasserkraft.

Die Umweltauswirkungen wurden mit drei Methoden ausgewertet:

- ökologische Knappheit 2013 [6]
- EDIP 2003 [7, 8]
- ILCD 2011 [9]

Die erste Methode wurde als die geeignetste Methode für den betrachteten Fall ausgewählt, da sie die politischen Umweltziele der Schweiz repräsentiert. Es wurden drei verschiedene Methoden verwendet, um die Resultate zu verifizieren und ggf. auch auf andere Länder anwenden zu können. Bei der Auswertung wurden die Auswirkungen aller Umweltkategorien auf eine Einheit berechnet, um die Verfahren vergleichen zu können.

SENSITIVITÄTSANALYSEN DER PROZESSPARAMETER

Um den Einfluss der Prozessparameter auf die gesamten Umweltauswirkungen zu ermitteln, wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Folgende Parameter wurden analysiert: Strom-Mix (Vergleich zwischen IWB, Schweiz und Europa (*European Network of Transmission System Operators*, ENTSO), Erneuerungszyklus der Aktivkohle, UV-Dosis, Wasserstoffperoxid-Dosis, DOC-spezifische Ozondosis sowie das Dosierverhältnis von Wasserstoffperoxid und Ozon. Dies mit dem Hintergrund, dass die festgelegten Aufbereitungsziele auch mit anderen Betriebsparametern erreicht werden können.

Zusätzlich wurde ein Nutzen der Behandlungsszenarien auf LCA-Basis ermittelt. Dabei wurde anhand der eliminierten Mikroverunreinigungen im behandelten Wasser die reduzierte Toxizitätsauswirkung auf Mensch und Umwelt bestimmt. In anderen LCA-Studien, die den Nutzen aus der Verringerung von Mikroverunreinigungen ermittelt haben, war Diclofenac oft die Substanz, die signifikante toxikologische Wirkungen hatte. Weil die historische 80. Perzentil-Konzentration von Diclofenac im Schnellsandfiltrat-Wasser 0,032 µg/l betrug, wurde 0,03 µg/l als Cut-off-Konzentration für die Auswahl der Mikroverunreinigungen gewählt. Dadurch wurde die Entfernung von 21

Parameter	Szenario 1 (AOP)	Szenario 2 (LPRO)
	UV/H ₂ O ₂ + GAK	UF-LPRO + O ₃ /H ₂ O ₂ -GAK
Anteil behandeltes Schnellsandfiltrat	100%	76,50%
UV-Fluenz bei 254 nm [J/m ²]	6700	–
Wasserstoffperoxid-Konzentration [mg/l]	6,5	–
GAK-Art	frisch	regeneriert
GAK-Bettvolumen [BV]	80 000	80 000
Kontaktzeit [Empty bed contact time (EBCT)] [min]	6,6	15
Spezifische Ozondosis [mg O ₃ /mg DOC]	–	0,6
Spezifisches Wasserstoffperoxid-Verhältnis [mol H ₂ O ₂ /mol O ₃]	–	4:1

Tab. 1 Betriebsparameter der untersuchten Behandlungskonzepte.

Mikroverunreinigungen für die Nutzenabschätzung berücksichtigt.

RESULTATE

LIFE CYCLE ASSESSMENT

Die drei angewandten Methoden führten bei den betrachteten Szenarien zu den in *Tabelle 2* aufgeführten Resultaten. *Figur 3* veranschaulicht die absoluten Anteile an den Umweltauswirkungen der einzelnen Prozesse (Bau, Strom, Wasserstoffperoxid, flüssiger Sauerstoff [LOX] für die Ozonproduktion, chemische Reinigung, GAK) anhand des Beispiels der Auswertungsmethode der «Ökologischen Knappheit 2013». Im Detail werden die Resultate nur von dieser Methode präsentiert. Die ausführlichen Resultate der Methoden EDIP 2003 und ILCD 2011 sind in der Publikation [4] beschrieben.

Die wichtigsten Umweltauswirkungskategorien in beiden Szenarien mit Anteilen über 5% waren: globale Erwärmung, Hauptluftschadstoffe und Feinstaub, Schwermetalle im Wasser, Energieressourcen, Schwermetalle in der Luft und Mineralressourcen. Dabei sind die Auswirkungen in Szenario 1 zu 97% auf den Betrieb zurückzuführen. Der Einsatz der Aktivkohle ergab mehr Auswirkungen als das UV/Wasserstoffperoxid-Verfahren mit einem Anteil von 66%. Wasserstoffperoxid allein verursachte 28% der Umweltauswirkungen. Die Auswirkungen für den Bau der Anlagen (Reaktor, UV-Strahler) waren mit 3% im Allgemeinen eher gering, ebenso wie die

Auswirkungen des elektrischen Stroms mit 3%. Die Auswirkungen in Szenario 2 verteilen sich auf 24% für den Bau (davon 60% auf Ressourcen für die Membranen) der Anlagen und 75% für den Betrieb. Das LPRO- und Oxidationsverfahren hatte den grössten Anteil an den Gesamtauswirkungen mit ähnlichen Anteilen von jeweils 43 und 40%, gefolgt von der Ultrafiltration von 12% und Aktivkohlefiltration von 5%. Von den Betriebsmitteln hatte der elektrische Strom mit 33% insgesamt den höchsten Anteil an den gesamten Umweltauswirkungen, gefolgt von Wasserstoffperoxid mit 19% und flüssigem Sauerstoff mit 18%. Reinigungskemikalien zeigten sehr geringe Auswirkungen.

Unterschiede in den resultierten Umweltauswirkungen der drei Auswertungsmethoden (*Tab. 2*) ergeben sich durch andere Berechnungs- und Gewichtungsansätze sowie aus den unterschiedlichen politischen Zielen, die den Methoden zugrunde liegen. Dennoch waren die Ergebnisse der drei verschiedenen Auswertungsmethoden sehr gut vergleichbar und wiesen im Allgemeinen auf dieselben Hauptverursacher der Umwelt-

auswirkungen hin. Dies bestätigt die Validität und Robustheit der Ergebnisse, wodurch die grundlegende Aussage unabhängig war von der angewandten Methodik und in gewissen Grenzen auch auf andere Regionen und Länder übertragen werden könnte.

Beim Vergleich der Szenarien zeigte sich deutlich, dass Szenario 2 im vorliegenden Fall aus der Sicht der LCA die zu bevorzugende Option wäre. Das Szenario 1 zeigte verglichen mit Szenario 2 bei den drei Auswertungsmethoden zwischen 50 und 120% höhere Umweltauswirkungen. In beiden Szenarien war hauptsächlich die Betriebsphase Hauptverursacher der Umweltauswirkungen. Nur bei Szenario 2 hatte der Bau der Anlage auch einen signifikanten Anteil. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Membranverfahren grössere Anlagen erfordert. Bei Szenario 1, dem AOP-Verfahren, könnte darum schon nur anhand der Betriebsmittel wie der spezifischen Aktivkohleverbrauch, Wasserstoffperoxid-Dosis und dem spezifischen Strombedarf eine robuste Schätzung der Umweltauswirkungen bestimmt werden.

Methode	Einheit	Gesamte Umweltauswirkungen pro m ³		Anteil Bau (A) und Betrieb (B)			
		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 1		Szenario 2	
		AOP	LPRO	A	B	A	B
Ökologische Knappheit 2013	UBP	59	27	3%	97%	24%	76%
EDIP 2003	µPt	96	47	5%	95%	24%	76%
ILCD 2011	µPt	9	6	11%	89%	45%	55%

Tab. 2 Zusammenfassung der Umweltauswirkungen von Szenario 1 und Szenario 2. Basisvariante: 100% erneuerbarer elektrischer Strom.

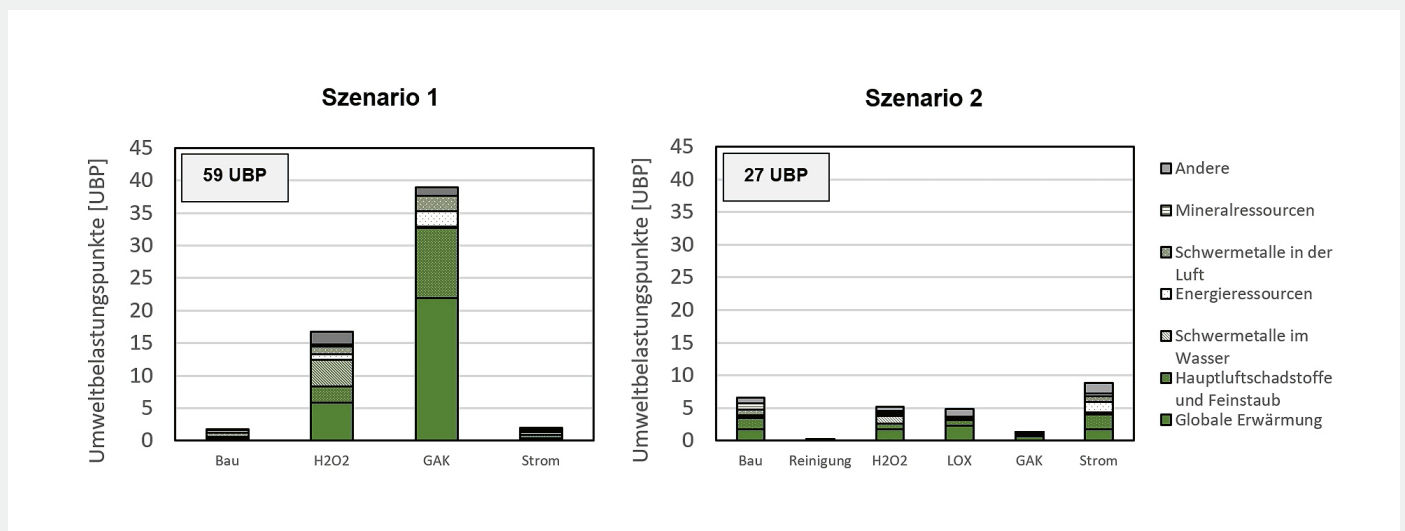


Fig. 3 Umweltbelastungspunkte (UBP) der einzelnen Prozesse: Anlagenbau, Wasserstoffperoxid (H₂O₂), granulierte Aktivkohle (GAK), flüssiger Sauerstoff (LOX), Reinigungskemikalien und elektrischer Strom unterteilt in die relevanten Umweltauswirkungskategorien (Anteile > 10%) in Szenario 1 (links: AOP-Verfahren) und Szenario 2 (rechts: Membran-Verfahren). UBP ermittelt gemäss Methode der «Ökologischen Knappheit 2013».

SENSITIVITÄTSANALYSEN

Um den Einfluss der Prozessparameter auf die gesamten Umweltauswirkungen zu ermitteln, wurden Sensitivitätsanalysen mit der Methode der «Ökologischen Knappheit 2013» durchgeführt. Zusätzlich wurde ein Nutzen der Behandlungsszenarien auf der LCA-Basis mit den Methoden EDIP 2003 und ILCD 2011 ermittelt.

Es zeigte sich, dass die Zusammensetzung des elektrischen Stroms ein entscheidender Faktor für die Ergebnisse der LCA ist (Fig. 3). Mit dem Schweizer Strom-Mix oder ENTSO-Strom (Europa) stiegen die Umweltauswirkungen beim Membranverfahren (Szenario 2) deutlich an, verglichen mit dem AOP-Verfahren (Szenario 1). Dies erklärt sich durch den deutlich höheren spezifischen Energiebedarf: von 0,38 kWh/m³ (LPRO) gegenüber 0,08 kWh/m³ (AOP). Die betrachteten elektrischen Strom-Mixe umfassten Energien aus Kernkraftwerken und fossilen Ressourcen, die radioaktive Abfälle und globale Erwärmung verursachen. Eine Analyse mit unterschiedlichen Anteilen von erneuerbaren Energien, wie beispielsweise dem IWB-Strom-Mix mit einem Anteil von 94% Wasserkraft, zeigte, dass Szenario 2 nur dann weniger Umweltauswirkungen als Szenario 1 hatte, wenn der Anteil erneuerbarer Energien im elektrischen Strom ca. > 80% ist.

Bei der Analyse mit höheren UV-Dosen im AOP-Verfahren, was einem höheren Stromverbrauch und tieferen Wasser-

stoffperoxid-Konzentrationen entspricht, zeigte sich, dass eine höhere UV-Bestrahlungsstärke die Umweltauswirkungen bis zu 10% verringern könnte. Dies wäre jedoch nur mit einem umweltfreundlichen Strom-Mix aus erneuerbaren Energien möglich.

In Szenario 2 war bei der Konzentratbehandlung mit Ozon-Wasserstoffperoxid zu sehen, dass mit der Variation von DOC-spezifischen Ozondosen sowie den Ozon/Wasserstoffperoxid-Verhältnissen die Umweltauswirkungen in einem Bereich von ±30% schwankten. Eine höhere Zugabe von Wasserstoffperoxid und geringerer Ozondosis erscheint sinnvoll, um das gleiche Behandlungsziel zu erreichen: Die Umweltauswirkungen könnten reduziert werden durch den geringeren Stromverbrauch für die Produktion von Ozon aus flüssigem Sauerstoff. Zudem wäre damit das Risiko der Bromatbildung durch Ozon verringert. Die Analyse unter Annahme einer Verdoppelung der Einsatzdauer des GAK-Filters auf zwei Jahre zeigte bei Szenario 1 eine Reduktion der gesamten Umweltauswirkung um 33 Prozent. Entsprechende Bettvolumina wurden in der Literatur als immer noch wirksam beschrieben, um das restliche Wasserstoffperoxid abzubauen. Aus diesem Grund wird der verlängerte Einsatz von GAK für den Wasserstoffperoxid-Abbau als realistische Option angesehen und scheint aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht vorteilhaft. Bei Szenario 2 waren keine signifikanten Unterschiede

zu sehen, da der Anteil der Aktivkohle an den Umweltauswirkungen schon gering war. Die Aufbereitung mit Aktivkohle ist jedoch eng mit dem Ozon/Wasserstoffperoxid-Verfahren gekoppelt, wenn das gleiche Aufbereitungsziel erreicht werden soll. Abhängig von der Nutzungsdauer der eingesetzten Aktivkohle und damit potenziell anderen Ozondosierungen können die Umweltauswirkungen variieren, was in dieser Studie jedoch nicht berücksichtigt wurde.

Der Umweltnutzen im Vergleich zur Umweltbelastung war vernachlässigbar: maximal 2% Kompensation der Belastung. Das würde das zusätzliche Verfahren für die Verringerung der Spurenstoffe aus ökologischer Sicht nicht rechtfertigen. Aufgrund der unterschiedlichen Datenqualität und Berechnungsmethoden weisen die Toxizitätskategorien jedoch im LCA die grössten Unsicherheiten auf. Zudem gibt es keine methodischen Ansätze, um Faktoren einzubeziehen, die ebenfalls einen Nutzen oder eine Belastung, beispielsweise durch die Bildung von Transformationsprodukten, darstellen. Dies zeigt, dass der Einbezug des Nutzens im LCA und die Interpretation der Ergebnisse weiterer Forschung bedarf.

SCHLUSSFOLGERUNG

Das membranbasierte Aufbereitungsverfahren ist aus ökologischer Sicht vorzuziehen aufgrund des lokalen elektrischen Stroms, der vollständig

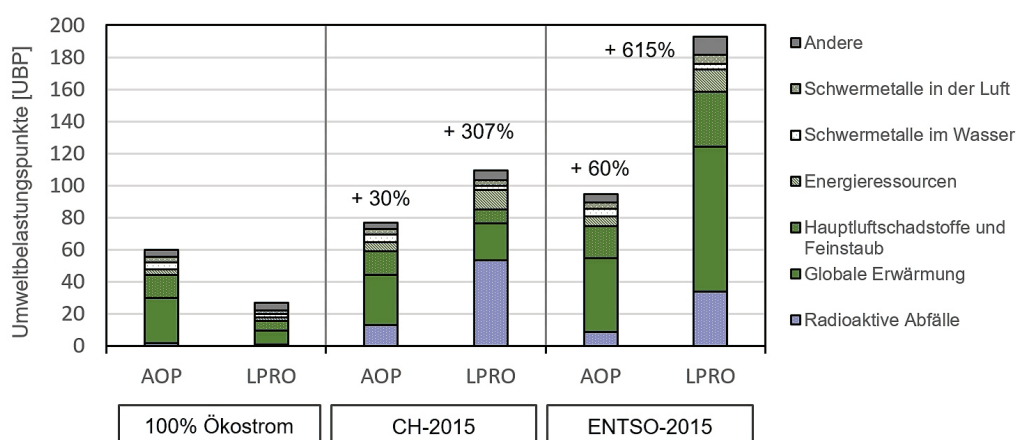


Fig. 4 Absolute Umweltauswirkungen von Szenario 1 (AOP) und Szenario 2 (LPRO) mit der Methode der «Ökologischen Knappheit 2013» und verschiedenen Strom-Mixen: 100% erneuerbare Energien (Base-Case), CH-2015 (Ländermix für die Schweiz 2015) und ENTSO-2015 (Ländermix für ENTSO 2015).

aus erneuerbaren Quellen (94% Wasserkraft) stammt. Es konnte durch die Anwendung von drei verschiedenen Methoden gezeigt werden, dass die Resultate unabhängig von der Methode die gleichen Umweltbeurteilungen der Verfahren erzeugen und sich daher auch auf andere Regionen (Europa) anwenden lassen. Wenn der Anteil an erneuerbaren Energien unter 80% fällt, hätte das AOP-Verfahren weniger Umweltauswirkungen. Die wichtigsten Faktoren, die zu den Umweltauswirkungen beitragen, sind die Betriebsmittel mit einem Anteil von 70 bis 94%, wie z.B. elektrischer Strom, Wasserstoffperoxid, flüssiger Sauerstoff und Aktivkohle. Bei der Ultrafiltration/Umkehrosmose tragen die Membranen und der Bau der Anlagen einen signifikanten Anteil zu den Umweltauswirkungen bei.

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse mit den Betriebsparametern UV-Bestrahlungsstärke, Wasserstoffperoxid, Ozondosis sowie die Häufigkeit der Aktivkohleerneuerung zeigte, dass die Umweltauswirkungen in einem Bereich von ca. \pm 10–30% schwankten. Eine Optimierung der Betriebsparameter, um das gleiche Behandlungsziel mit weniger Umweltauswirkungen zu erreichen, wäre aus Sicht der LCA möglich.

Im Vergleich zur Umweltbelastung ist der geschätzte Nutzen aus der Entfernung der Mikroverunreinigungen –

das heisst eine qualitative Verbesserung der Rohwasserbeschaffenheit – sehr gering. Die vermiedenen Umweltauswirkungen sind vernachlässigbar und würden ein zusätzliches Aufbereitungsverfahren aus rein ökologischer Sicht nicht rechtfertigen.

Um die Praxistauglichkeit der Aufbereitungsverfahren sowie die effektive Leistung der Entfernung von Mikroverunreinigungen wie auch die Bromatbildung in der Konzentratbehandlung zu bestimmen, sind Langzeitpilotierungen empfehlenswert: Untersuchungen mit umweltfreundlicheren Alternativen oder Herstellungsprozessen für Ozon, Wasserstoffperoxid und Aktivkohle. Weiter Forschung ist notwendig, um den gesundheitlichen Nutzen der Elimination von Mikroverunreinigungen mit Hilfe von LCA zu bewerten. Ohne Berücksichtigung des Nutzens eignet sich LCA dennoch für eine vergleichende Evaluation von Umweltauswirkungen bei Trinkwasseraufbereitungsverfahren.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ISO 14040 (International Standard) (2006a) : Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework; Brüssel
- [2] ISO 14044 (International Standard) (2006b): Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines; Brüssel
- [3] Wünsch, R. et al. (2020): Organische Mikroverunreinigungen in der Wasseraufbereitung –

kombinierte technische und naturnahe Verfahren. Aqua & Gas, No. 4, 50

- [4] Roth, C. et al. (2022): Micropollutant abatement with UV/H₂O₂ oxidation or low-pressure reverse osmosis? A comparative life cycle assessment for drinking water production. J. Clean. Prod 336, 130227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130227>
- [5] TBDV (2021): Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen, 817.022.11, 30. Oktober 2021. www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/153/de
- [6] Frischknecht, R. et al. (2013): Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz, Umweltwissen Nr. 1330, Bundesamt für Umwelt, Bern, www.bafu.admin.ch/uw-1330-d (aufgerufen 10. Mai 2020)
- [7] Hauschild, M.; Wenzel, H. (1998): Environmental Assessment of Products, Volume 2. Scientific Background, Chapman & Hall, London
- [8] Hauschild, M.; Potting, J. (2005): Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment – The EDIP2003 methodology. Environmental News No. 80, Danish ministry of the environment, Environmental Protection Agency, Miljønyt, www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614_579-4/pdf/87-7614-580-8.pdf (aufgerufen 1.3.2020)
- [9] European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability (2011): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context, first edition, EUR 24571 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg

WASSER ▼ BODEN ▼ LUFT
Analytische Untersuchungen und Beratung

**NEU ANALYTIK VON PESTIZIDEN
▼ IM ABWASSER**

envilab
ANALYTIK AUS LEIDENSCHAFT

ENVILAB AG
Mühlethalstrasse 25, 4800 Zofingen
T 062 745 70 50, www.envilab.ch