

Pharmazeutische Rückstände in der aquatischen Umwelt – eine Herausforderung für die Zukunft

Erkenntnisse und Aktivitäten des Europäischen Kooperationsprojektes PILLS



Eine Europäische Partnerschaft von:
Emschergenossenschaft (DE), Waterschap Groot Salland (NL), Centre de Recherche Public Henri Tudor (LU), Eawag (CH), Glasgow Caledonian University (UK) und Université de Limoges (FR)



Diese Zusammenfassung dient der kurzen Übersicht über die Arbeit von 6 Partnerinstitutionen aus 6 europäischen Ländern, die über fast 5 Jahre zum Thema Spurenstoffelimination aus Abwasser an Lösungsmöglichkeiten gearbeitet haben. Ausführliche Informationen und Ergebnisse können dem vollständigen Abschlussbericht entnommen werden, der von den Partnerinstitutionen gerne zur Verfügung gestellt wird (Kontakte siehe Rückseite). Der vollständige Projektname "Eintrag und Beseitigung von Arzneimittelrückständen aus Punktquellen" beinhaltet die Idee der Forschung und Erprobung von Eliminationsmethoden zur weitergehenden Abwasserreinigung. In diesem Sinne kann die Arbeit der Partnerschaft auch als sehr erfolgreich gewertet werden. Das gewachsene Verständnis für die Problematik – sowohl aus wissenschaftlicher Sicht wie auch in den unterschiedlichen beteiligten Gruppen (Politik, Wasserwirtschaft, Öffentlichkeit) hat in den vergangenen 5 Jahren erheblich zugenommen und das PILLS Projekt hat zu den Erkenntnissen beigetragen: Mehr als 50 Veröffentlichungen, über 130 Berichterstattungen in den Medien und über 150.000 Besucher der Webpage. Wir wissen heute, dass es möglich ist, Arzneimittelrückstände an einem wesentlichen Eintragspfad zu beseitigen, an Krankenhäusern. Dies erscheint zielführend zum Beispiel aus ökotoxikologischer Sicht und vor dem Hintergrund der antibiotikaresistenten Bakterien. Allerdings ist dieser Weg ein kostenintensiver und eine ganzheitliche, lebenszyklusbezogene Kosten-Nutzen-Betrachtung muss in eine grundsätzliche Bewertung integriert werden. Alternative Ansätze sollten weiterhin untersucht werden. Die Partnerschaft hat sich auch aus diesen Gründen für die Weiterführung der Zusammenarbeit im Rahmen eines Folgeprojektes entschieden, bei dem der Einfluss von Vermeidungsstrategien und die Optimierung biologischer Abbauprozesse untersucht werden. Vier der sechs PILLS-Partner haben mit lokalen Partnerkrankenhäusern zusammen gearbeitet und hier Abwasserbehandlungsanlagen entwickelt, die speziell für Krankenhausabwässer konzipiert wurden. Die Krankenhäuser haben sich freiwillig zu der Zusammenarbeit bereit erklärt. Die Partnerschaft ist

sehr dankbar für ihre Unterstützung. Ohne diese Bereitschaft der Krankenhäuser wäre das PILLS Projekt nicht möglich gewesen. Das PILLS Projekt wurde mithilfe von Fördermitteln des Interreg IV B Programms Nordwesteuropa bearbeitet. Dieses EU-Förderprogramm bot den beteiligten Partnerinstitutionen exzellente Unterstützung durch die breite Fächerung der Förderung: Expertentreffen und Erfahrungsaustausch wurden ebenso gefördert wie die praktische Entwicklung und Umsetzung von Reinigungstechnologien, begleitende Forschung, Öffentlichkeitsarbeit und Veranstaltungen sowie der gesamte organisatorische und personelle Aufwand innerhalb der Institutionen. Viele Kollegen haben innerhalb der Partnerschaft unterstützend mitgewirkt und PILLS zum Erfolg geführt. Ihnen allen sei an dieser Stelle gedankt, auch wenn sie nicht namentlich genannt sind. Im Auftrag der beteiligten Partnerinstitutionen wurde der PILLS Abschlussbericht von den nachfolgend (in alphabetischer Reihenfolge) genannten Kollegen im Wesentlichen verfasst:

- PILLS Partner 1 Emschergenossenschaft: Kirsten Adamczak, Sven Lyko, Issa Nafu
- PILLS Partner 2 Waterschap Groot Salland: Herman Evenblij
- PILLS Partner 3 Centre de Recherche Public Henri Tudor: Alex Cornelissen, Elorri Igos, Kai Klepiszewski, Silvia Venditti
- PILLS Partner 4 Eawag: Lubomira Kovalova, Christa McArdell
- PILLS Partner 5 Glasgow Caledonian University: Karin Helwig, Ole Pahl
- PILLS Partner 6 Université de Limoges: Olivier Barraud, Magali Casellas, Christophe Dagot, Corinne Maftah, Marie-Cécile Ploy, Thibault Stalder

Der vollständige Abschlussbericht ist der gedruckten Kurzfassung als CD beigelegt.

Veröffentlicht anlässlich der PILLS Abschlusskonferenz am 19./20. September 2012 in Gelsenkirchen, Deutschland

Hintergrund – Warum PILLS ? 4

Ziele und Arbeitsinhalte 6

Charakterisierung des Abwassers 7

Die untersuchten Pilotanlagen 11

Bewertung der Verfahren 16

Schlussfolgerungen 20

Weitere Handlungsansätze für eine nachhaltige Spurenstoffreduktion 22

Anhang 23



HINTERGRUND – WARUM PILLS ?

Aus unserer Gesellschaft sind sie nicht mehr wegzudenken: Hochwirksame, moderne Arzneimittel. Sie helfen Krankheiten zu erkennen oder zu heilen oder erleichtern uns den Alltag. Zum Schutz von Mensch und Tier werden heute große Mengen unterschiedlicher pharmazeutischer Wirkstoffe hergestellt.

Im Zuge der verbesserten medizinischen Versorgung, der steigenden Lebenserwartung sowie der fortschreitenden Industrialisierung der Landwirtschaft werden zunehmend mehr Arzneimittel eingesetzt. Über 3.000 aktive pharmazeutische Substanzen haben heute auf dem europäischen Markt eine Zulassung.

Die darin enthaltenen Wirkstoffe werden in der Regel nicht vollständig vom Organismus aufgenommen und verbraucht, sondern teilweise wieder ausgeschieden. Abhängig von den jeweiligen Rahmenbedingungen haben Untersuchungen der PILLS Partner gezeigt, dass bis zu 70% des gesamten Medikamentenkonzsums innerhalb eines Krankenhauses ausgeschieden oder abgewaschen wird. Auf unterschiedlichen Wegen gelangen diese Rückstände schließlich in den Wasserkreislauf. Doch nicht nur der steigende Einsatz von Arzneimitteln hat zu einer Sensibilisierung für dieses Thema geführt: Durch enorme Fortschritte in der chemischen Analytik können viele Stoffe heute in sehr viel niedrigeren Konzentrationen im Wasser bestimmt werden, als dies noch vor einigen Jahren möglich gewesen wäre. So können mittlerweile Konzentrationen im Nanogramm-Bereich nachgewiesen werden.

Die Konzentrationen von Arzneimittelrückständen, die in Gewässern nachgewiesen werden, sind sehr gering und nach heutigem Kenntnisstand nicht bedenklich für den Menschen. Unklar ist allerdings, welche Wirkungen diese Rückstände auf den Gewässerlebensraum – zum Beispiel auf Mikroorganismen – haben. Einige Substanzen sind bereits als umweltschädigend erkannt worden – in diesen Fällen ist die Politik aufgefordert, zu handeln!

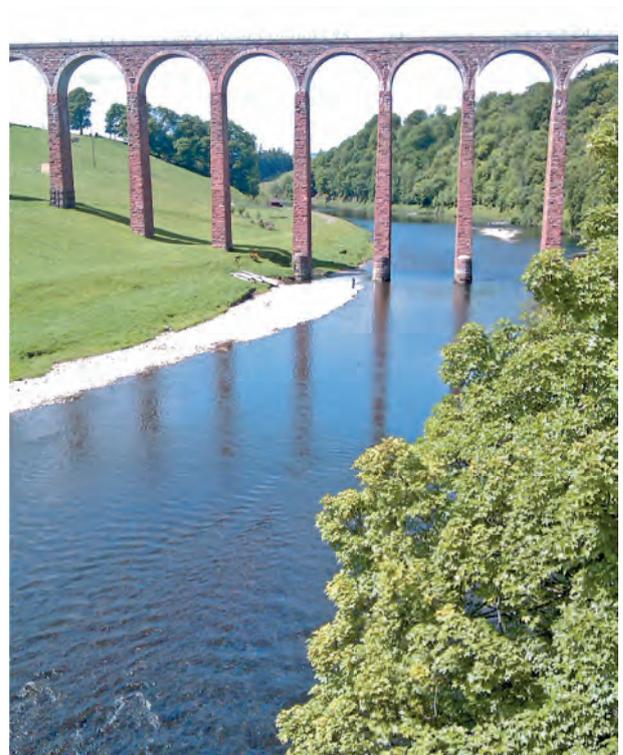
Die EU hat im Januar 2012 einen Entwurf zur Erweiterung der Liste prioritärer Stoffe zur Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) veröffentlicht und wenn dieser Vorschlag durch Rat und Parlament angenommen wird, müssen alle Mitgliedsstaaten erstmalig auch Umweltqualitätsnormen für pharmazeutische Rückstände im Wasser bis 2021 einhalten.

Der Fokus liegt zunächst auf dem natürlichen Hormon Estradiol, dem synthetischen Hormon Ethinylestradiol (Wirkstoff in der Antibabypille) und Diclofenac (ein Schmerzmittel und Entzündungshemmer). Wie die Einhaltung der Grenzwerte dann geschieht, ist offen – es kann durch Abwasserbehandlung, Verbot der Einträge (u.U. faktisch der Stoffe) oder andere Maßnahmen stattfinden.

Im PILLS Projekt wurde der Eintrag von pharmazeutischen Mikroverunreinigungen an Punktquellen näher betrachtet:

- Welchen Einfluss kann die Abwasserbehandlung an Punktquellen bezogen auf den Eintrag von vorrangig in Krankenhäusern verabreichten Substanzen haben?
- Welche Techniken sind für die Behandlung von Krankenhausabwässern mit hohen Konzentrationen an Arzneimittelrückständen geeignet?
- Welchen Effekt hat der „Medikamentencocktail“ auf Bakterienpopulationen bei der Abwasserbehandlung, insbesondere bei der Verbreitung von multiresistenten Bakterien?

Darüber hinaus war von Anfang an klar, dass Punktquellenbehandlung nur ein Teil der Lösung sein kann, da Einträge von Medikamentenrückständen über Privathaushalte damit nicht erfasst werden. Die PILLS Partner strebten jedoch zunächst für klar umrissene Rahmenbedingungen die Erarbeitung erster Handlungsoptionen an.



River Tweed in Schottland nahe der Kläranlage Geloshead



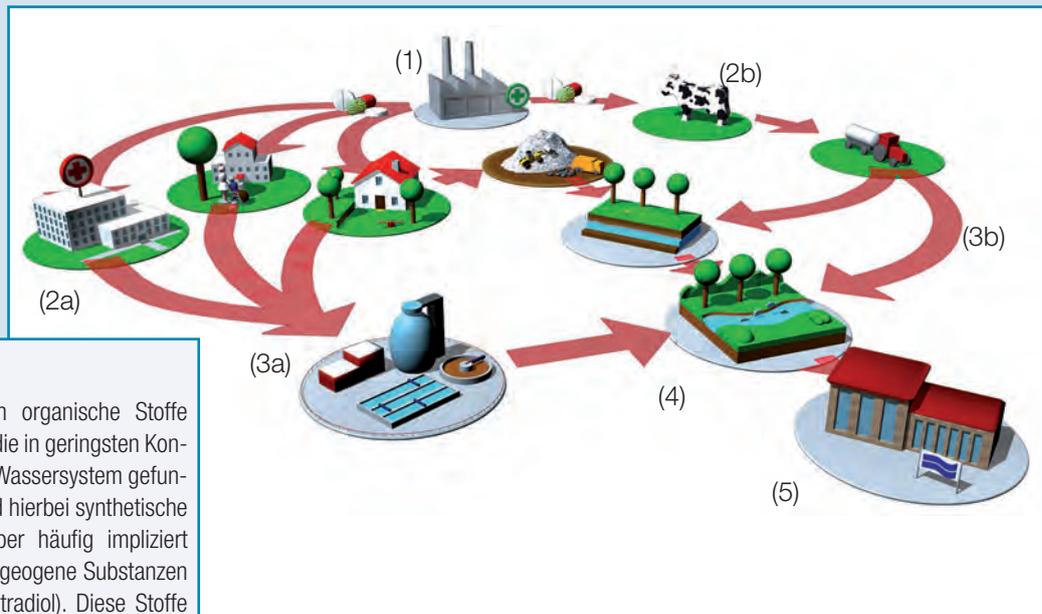


Abbildung 1: Der Lebenszyklus pharmazeutischer Stoffe

Spurenstoffe

Als Spurenstoffe werden organische Stoffe oder Metalle bezeichnet, die in geringsten Konzentrationen (Spuren) im Wassersystem gefunden werden. Generell sind hierbei synthetische Chemikalien gemeint, aber häufig impliziert dies auch natürliche und geogene Substanzen (wie z.B. das Hormon Estradiol). Diese Stoffe werden als „Schadstoffe“ charakterisiert, wenn deren Anwesenheit im Gewässer zu einer Verschmutzung führen kann. Als „gefährliche Stoffe“ werden Spurenstoffe bezeichnet, wenn sie toxisch (giftig), persistent (nur sehr schwer abbaubar) und bioakkumulierbar (sich im Organismus anreichernd) sind oder wenn sie in ähnlichem Maße Anlass zu Besorgnis geben.

Der Lebenszyklus von Arzneimitteln

Es gibt viele Wege, auf denen Rückstände von Arzneimitteln in das Gewässersystem gelangen. Um diese zu identifizieren, ist eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus pharmazeutischer Stoffe notwendig (siehe Abbildung 1).

Dieser Lebenszyklus beginnt mit der Entwicklung und Produktion von Arzneimitteln (1). Bereits hier entsteht produktionsbedingt pharmazeutisch verunreinigtes Abwasser, welches allerdings am Entstehungsort vorbehandelt wird – dennoch ist es möglich, dass schon hier Rückstände in die Gewässer eingetragen werden. Die Arzneimittel werden nach der Produktion in der Human- (2a) oder Tiermedizin (2b) eingesetzt. Bei den vom Menschen eingenommenen Medikamenten (2a), werden die vom Körper nicht vollständig aufgenommenen Wirkstoffrückstände, sowie gebildete Metabolite ausgeschieden und gelangen zusammen mit möglicherweise über den Abwasserpfad entsorgten Arzneimitteln über die Kanalisation in der Regel in die zentralen Kläranlagen (3a). Doch auch moderne Klärverfahren sind nicht in der Lage, sämtliche Stoffe aus dem Abwasser zu eliminieren, da sie primär für die Beseitigung von biologisch abbaubaren Substanzen sowie von Nährstoffen wie Phosphor und Stickstoff konzipiert sind. Dies bedeutet, dass pharmazeutische Rückstände in der Lage sein können, Kläranlagen zu passieren und

in Oberflächengewässer zu gelangen. Weitere Einträge von Spurenstoffen in das aquatische System können durch schadhafte Kanäle, durch Notentlastungen aus der Kanalisation bei ausgeprägtem Regenwetter sowie durch die Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft entstehen. Die Konsequenz daraus ist, dass sich in Oberflächengewässern (4) oder in Rohwässern für die Trinkwassergewinnung (5) pharmazeutische Rückstände – wenn auch in sehr geringen Konzentrationen – nachweisen lassen. Pharmazeutische Rückstände aus dem veterinärmedizinischen Bereich gelangen in erster Linie über die Ausbringung der Gülle auf landwirtschaftliche Ackerflächen (3b) ins Grund- und Oberflächenwasser (4).

Auf den ersten Blick erscheint es sinnvoll, wenn pharmazeutische Rückstände von vorneherein nicht das aquatische System erreichen würden. Ein Verzicht auf die Produktion und Anwendung von Medikamenten stellt allerdings weder ein realistisches noch ein erstrebenswertes Szenario dar. Eine andere Option ist es, das verunreinigte Wasser mit Hilfe technischer Verfahren nachträglich zu reinigen. Allerdings ist eine vollständige Eliminierung von Spurenstoffen aus praktischen und ökonomischen Gründen nicht vernünftig. Insofern ist ein Leben vollkommen ohne pharmazeutische Rückstände in unserer Industriegesellschaft nicht vorstellbar. Der Schwerpunkt muss daher auf einer Verringerung liegen.

Ein vielversprechender Ansatz zu einer Verringerung von pharmazeutischen Rückständen im Wasserkreislauf erscheint die Einbindung aller Akteure entlang des gesamten Lebenszyklus' von pharmazeutischen Stoffen. Nur wenn alle Beteiligten – von der industriellen Produktion über den Konsum bis hin zur Entsorgung und der Trinkwasseraufbereitung – in ihren jeweiligen Bereichen Vorkehrungen treffen, kann eine wirkungsvolle Entlastung des aquatischen Systems erreicht werden.

ZIELE UND ARBEITSINHALTE

Sechs Partner aus Nord-West Europa – zwei Wasserwirtschaftsverbände aus Deutschland und den Niederlanden, zwei Forschungseinrichtungen aus der Schweiz und Luxemburg sowie zwei Universitäten aus Schottland und Frankreich – haben sich zusammengeschlossen, um dieses Thema gemeinsam zu bearbeiten. Weil die Konzentration von Arzneimittelrückständen an Punktquellen (wie zum Beispiel an Krankenhäusern oder Pflegeheimen) als vergleichsweise hoch erachtet wird, hoffen sie hier gute Bedingungen für eine gezielte Behandlung sowie die Erprobung von weitergehenden Abwasserreinigungstechnologien vorzufinden. Um die Ziele zu erreichen haben die Projektpartner folgende Projektbausteine konzipiert:

- **Arbeitspaket 1: Charakterisierung des pharmazeutisch verunreinigten Abwassers**

Die Analyse und die Charakterisierung des mit Arzneimittelrückständen belasteten kommunalen wie Punktquellen-Abwassers stehen hier im Zentrum.

- **Arbeitspaket 2: Konzeption, Bau und Betrieb von Krankenhauskläranlagen, Technologien zur Behandlung der entsprechend pharmazeutisch belasteten Abwasserströme werden weiterentwickelt und in der Praxis durch den Bau von vier Pilotanlagen erprobt.**

Hierzu kooperieren die entsprechenden Partner jeweils mit einem Krankenhaus in ihrer Region.

- **Arbeitspaket 3: Bewertung der verschiedenen Behandlungstechnologien**

Die Effizienz, das Kosten-Nutzen-Verhältnis sowie die Ökobilanz der verschiedenen Behandlungstechnologien werden erforscht. Diese Untersuchungen geben darüber Aufschluss, ob und unter welchen Umständen die dezentrale Behandlung von stark belastetem Abwasser als Handlungsoption zur Reduzierung des Eintrags pharmazeutischer Rückstände gesehen werden kann.

- **Arbeitspaket 4: Kommunikation des Problems sowie der Ergebnisse des Projekts**

Verschiedene Kommunikationsmaßnahmen verstärken einen Erfahrungsaustausch auf fachlich-wissenschaftlichem sowie politischem Gebiet. Darüber hinaus wird das Ziel verfolgt, dieses Thema ins Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit zu rücken und diese für die Problematik zu sensibilisieren.



Spurenstoffe wie pharmazeutische Rückstände sind heute in Gewässern in Konzentrationen unterhalb von Nanogramm pro Liter nachweisbar. Dennoch erlaubt der reine Nachweis dieser Stoffe keine Rückschlüsse auf mögliche Wirkungen in der Umwelt durch einzelne Substanzen oder deren Mischung. Die umweltschädigende Wirkung kann hormonelle, genetische Veränderungen oder auch Antibiotikaresistenzen betreffen. Insofern wurden ebenfalls (öko-)toxikologische Wirktests eingesetzt. Neben der Charakterisierung des Krankenhausabwassers und der Bewertung der Behandlungsergebnisse sollten die ökotoxikologischen Tests auch die Einschätzung ermöglichen, ob schädigende Effekte durch die infolge der Ozon- oder UV-Behandlung entstehenden Transformationsprodukte auftreten.

Ein weiterer potenziell besorgniserregender Umstand sind antibiotikaresistente Bakterien, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in mit Antibiotikaresten belastetem Abwasser vorkommen. Daher wurde das Vorkommen dieser antibiotikaresistenten Bakterien unter dem Aspekt untersucht, inwieweit Abwässer aus Krankenhäusern als Quelle für diese Bakterien gelten können. Weiterhin wurde betrachtet, ob die weitergehenden Behandlungsverfahren geeignet sind, die Ausbreitung und Vermehrung dieser antibiotikaresistenten Bakterien, bzw. ihres Erbgutes, zu mindern.

Die Partnerschaft wird von einem wissenschaftlichen Beirat beraten, der das Projekt während der gesamten Projektlaufzeit begleitet. Die Mitglieder des wissenschaftlichen Beirats kommen aus Wissenschaft, Industrie und öffentlicher Verwaltung. Hauptaufgaben sind die kritische Bewertung der jeweiligen Zwischenergebnisse der Arbeitsgruppen sowie das Bereitstellen von Informationen entsprechend ihrer Kernkompetenzen. Der wissenschaftliche Beirat unterstützt auch die Verbreitung der Projektergebnisse in der Diskussion

In Europa sind schätzungsweise mehr als 100.000 chemischen Substanzen im Umlauf und darunter mehr als 3.000 zugelassene Wirkstoffe als Arzneimittel. Vor diesem Hintergrund war es wichtig, dass die Partnerschaft zunächst die Stoffe definierte, die alle Partner der unterschiedlichen Länder im Rahmen des Projekts gleichermaßen analysieren, um dadurch zu einer vergleichbaren Datenbasis zu gelangen. Bei der Auswahl dieser pharmazeutischen Wirkstoffe standen für die Partnerschaft folgende drei Kriterien im Vordergrund:

- Welche Wirkstoffe werden (in großen Mengen) in Krankenhäusern verwendet und in Gewässern gefunden?
- Welche Wirkstoffe haben bekannte ökotoxikologische Effekte und können daher ein größeres ökologisches Risiko darstellen?
- Was wird mit den konventionellen Klärverfahren nicht beseitigt und muss durch weitergehende Behandlungsmethoden eliminiert werden?

Erwartungsgemäß hat sich gezeigt, dass in den unterschiedlichen Ländern vielfach die gleichen Wirkstoffe gefunden werden. Die Konzentrationen variieren aber von Region zu Region. An manchen

Krankenhäusern wurden aber auch pharmazeutische Wirkstoffe in hoher Konzentration gefunden, die an anderen wiederum gar nicht genutzt werden. Basierend auf diesen Überlegungen hat sich die Partnerschaft darauf geeinigt, 16 einzelne Wirkstoffe der folgenden acht Substanzgruppen zu untersuchen: Analgetika, Anästhetika, Zytostatika, Antibiotika, Röntgenkontrastmittel, Antiepileptika, Lipid-senker und Betablocker.

Medikamentenkonzum und der Beitrag von Krankenhäusern

In der EU variiert die durchschnittliche Bettenzahl je 10.000 Einwohner zwischen 35 (Dänemark und Portugal) und 83 (Deutschland). Daten aus der Schweiz ergeben, dass hier die meisten kommunalen Kläranlagen einen Anteil von 5-50 Betten pro 1.000 angeschlossene Einwohner erfassen.

Abbildung 2 zeigt die Spannweite der verschriebenen Arzneimittel-frachten pro Bett, ermittelt auf der Grundlage der jährlichen verabreichten Mengen. Zum Vergleich lag die maximale Jahresmenge der ausgewählten Medikamente in der Bevölkerung der UK Borders Region unterhalb von 2 Gramm pro Kopf.

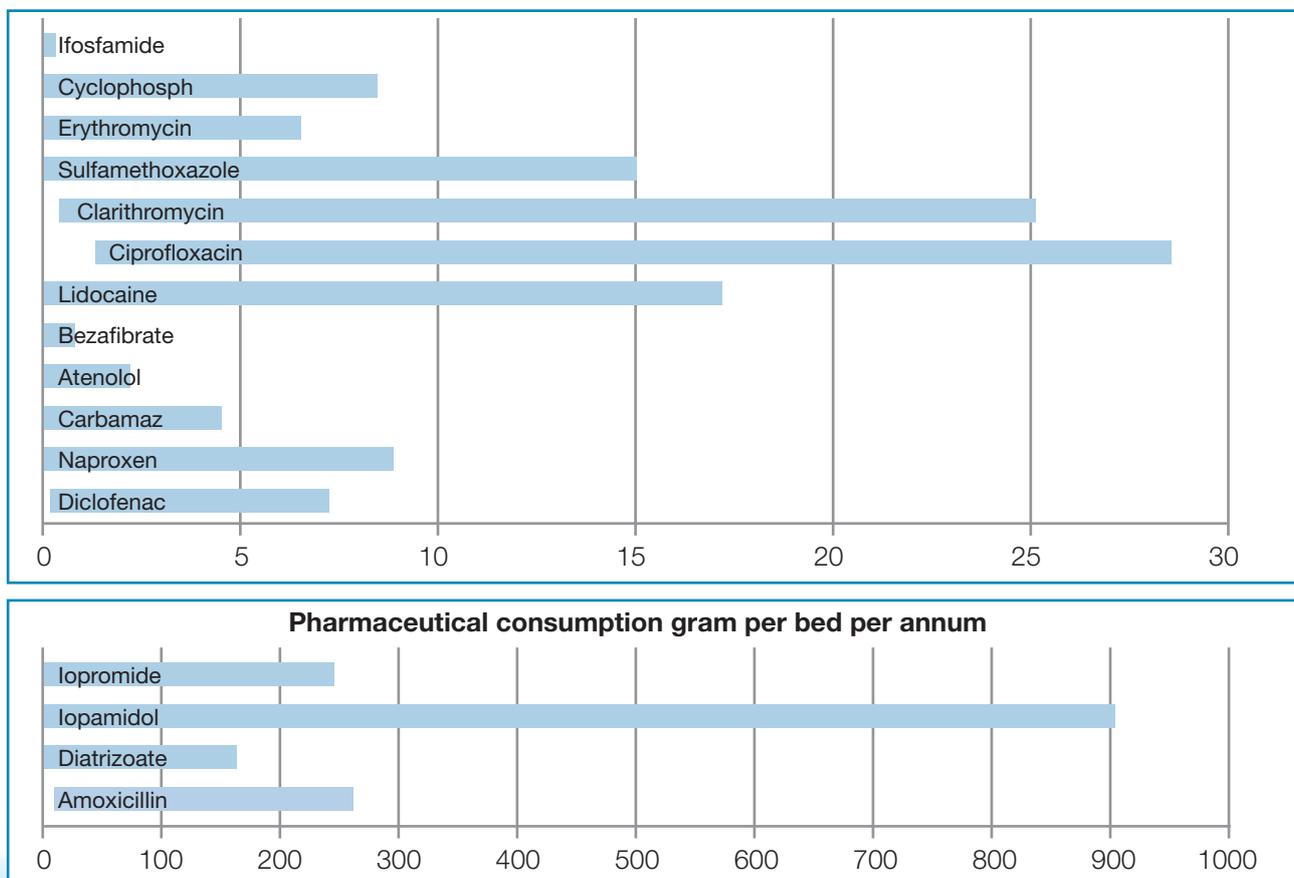


Abbildung 2: Spannweite des Arzneimittelverbrauchs in den untersuchten Krankenhäusern

CHARAKTERISIERUNG DES KRANKENHAUSABWASSERS

Abbildung 3 zeigt die Spannweite des Beitrags der untersuchten Krankenhäuser zum Arzneimitteleintrag in den betrachteten Einzugsgebieten. In den Untersuchungsgebieten zeigte der Beitrag der Krankenhäuser (bei durchschnittlich 6,1 bis 14,1 Betten pro 1.000 Einwohner) erhebliche Unterschiede. Am höchsten waren Belastungen infolge von Krankenhäusern im jeweiligen Einzugsgebiet durch Kontrastmittel (40-100%), Lidocaine (56-62%), und die antibakteriell wirkenden Ciprofloxacin (12-100%) und Clarithromycin (12-60%). Für viele Einzelsubstanzen lag der Beitrag der Krankenhäuser unterhalb 20%.

hinzu, dass die Pflegeeinrichtungen als weniger relevant hinsichtlich der Abwasserbelastung eingestuft werden, da ein nicht unbeträchtlicher Teil der älteren Heimbewohner Inkontinenzeinlagen nutzt (die über den Müll entsorgt werden).

Ökotoxikologisches Potenzial von Krankenhausabwasser

Tabelle 1 gibt einen Überblick über Untersuchungsergebnisse zur Toxizität von Krankenhausabwasser im Vergleich zu kommunalem

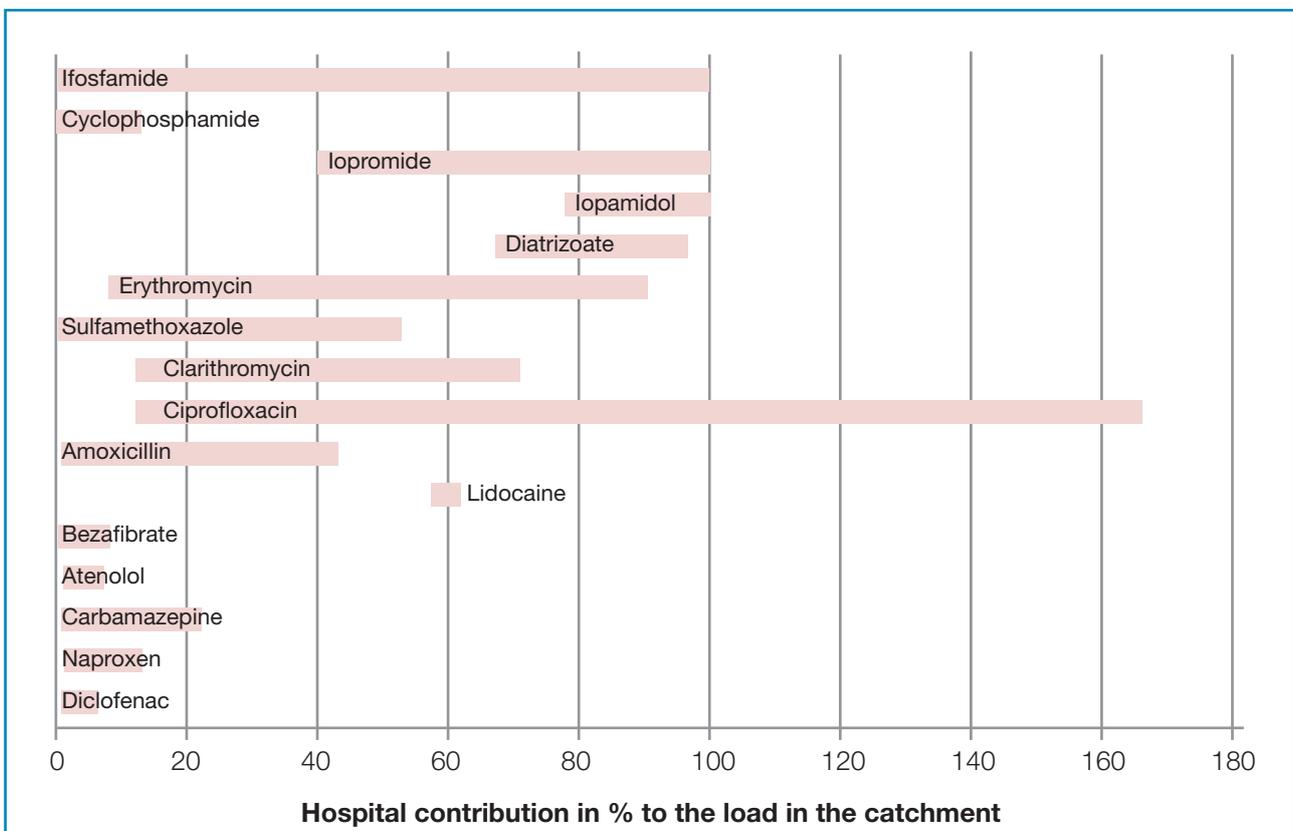


Abbildung 3: Anteil der aus drei untersuchten Krankenhäusern stammenden Substanzen im Verhältnis zu deren Gesamtaufkommen im Einzugsgebiet, bzw. im Bereich der entsorgenden kommunalen Kläranlage

Zusätzlich zu der Bedeutung von Krankenhäusern wurden Untersuchungen durch den schottischen PILLS-Partner zu Pflegeeinrichtungen durchgeführt. Die Strukturen bei der Wohnsituation und Pflege alter Menschen sind allerdings länderspezifisch unterschiedlich. Die Daten lassen vermuten, dass die Medikamentengabe in reinen Seniorenwohnheimen niedriger liegt als in geriatrischen Krankenpflegeeinrichtungen, da letztere sich mit deutlich schwierigeren Krankheitsbildern auseinandersetzen. Zum insgesamt niedrigeren Medikamenteneinsatz als in allgemeinen Krankenhäusern kommt

Abwasser. Das untersuchte kommunale Rohabwasser war nicht zellschädigend oder erbgutverändernd. Hingegen zeigten die Krankenhausabwasserproben im Mittel mäßige zellschädigende und erbgutverändernde Wirkungen.

In allen anderen Biotests mit kommunalem Rohabwasser, Kläranlagenablauf und Krankenhausabwasser unterschiedlicher Herkunft ergaben sich geringe toxische Wirkungen. Kommunales Abwasser hatte eine stärker toxische Wirkung auf Flohkrebse als Krankenhausabwasser. In anderen Untersuchungen war Krankenhausab-

Endpoints	Raw municipal wastewater	Effluent of municipal wasteland treatment plant	Raw hospital wastewater
Viability of cells			
Estrogen effects (EE2 equivalent)	19.7 ng/L		43 ng/L
Mutagenic effects			
Antibiotic effects			
Inhibition of luminescence (concentration Factor EC50)	0,72 - 1.26 fold	33.85 fold	0.26 - 0.84 fold
Inhibition of algae photosynthesis (concentration Factor EC50)	12.07 fold		1.97 fold
Inhibition of algae growth rate	34 %		64 - 88 %
Mortality of scuds	100 %		> 50 %

Samples of different locations tested different institutions. Evaluation ist performed on average values. Color codes:

	Cell viability in the cytotoxicity test (according DIN EN ISO 10993-5)	EC values based on expert judgment	other values (change of effect compared to negative control)
	no negative effects 81 - 100 %	EC50 > 100	< 5 %
	weak or moderate effects 61 - 81 %	20 < EC50 < 100	5 - 20 %
	Strong effects 0 - 60 %	EC50 < 20	> 20 %

Tabelle 1: Schädigungspotenzial von Krankenhausabwasser und kommunalem Abwasser.



CHARAKTERISIERUNG DES KRANKENHAUSABWASSERS

wasser im Vergleich mit kommunalem Abwasser stärker toxisch für Algen und Bakterien. Darüber hinaus hatte das Krankenhausabwasser eine stärkere hormonelle Wirkung als das getestete kommunale Abwasser. Die ermittelten toxischen Effekte können nicht einzelnen chemischen Substanzen zugeschrieben werden. Die Tests erlauben daher keine Rückschlüsse auf die Gefährdung durch einzelne Substanzen oder die Toxizität einer Medikamentenmischung oder anderer Verbindungen.

Einige Biotests zeigten eine große Spannweite von Wirkungen, die von der unterschiedlichen Herkunft und Zusammensetzung der Abwässer abhängen kann. Die wechselnde Zusammensetzung von Krankenhausabwasser und die Verdünnungseffekte in kommunalem Abwasser können auch der Grund für die höhere Toxizität des Krankenhausabwassers im Vergleich zum kommunalen Abwasser sein.

Antibiotikaresistente Bakterien in Krankenhausabwasser

Sowohl die Menge von antibiotikaresistenten Integrons (repräsentativ für die Bedeutung von Antibiotikaresistenzen in einer Umge-

bung unabhängig von der Menge der Bakterien) als auch der Anteil der Bakterien als Träger eines oder mehrere resistenten Integrons in derselben Probe (die relative Menge) wurden gemessen. [Abbildung 4](#) zeigt die Spannweite der gemessenen Konzentrationen von resistenten Integrons und dem Verhältnis Bakterien mit resistenten Integrons im Krankenhausabwasser, im kommunalen Abwasser und in 2 Flusswasserproben. Die Unterschiede in den gemessenen Werten im Krankenhausabwasser resultieren eventuell aus unterschiedlichen Randbedingungen der Krankenhäuser (z.B. Fachkliniken, Infrastruktur, Größe usw).

Spezialkliniken für Geriatrie oder Psychiatrie sind nicht die Quelle multiresistenter Bakterien. Die erhöhten Konzentrationen von Integrons und ihrer relativen Mengen im Krankenhausabwasser (zwischen 5 und 390%) im Vergleich zu den beprobten Oberflächenwässern (0,6 bis 1,9%) zeigten, dass die Krankenhäuser eine potenzielle Quelle von multiresistenten Bakterien sind. Weiterhin können angesichts der gefundenen geringeren relativen Menge von Bakterien mit resistenten Integrons in kommunalem Abwasser (13%) Krankenhausabwässer als „hot spot“ für antibiotikaresistente Bakterien angesehen werden.

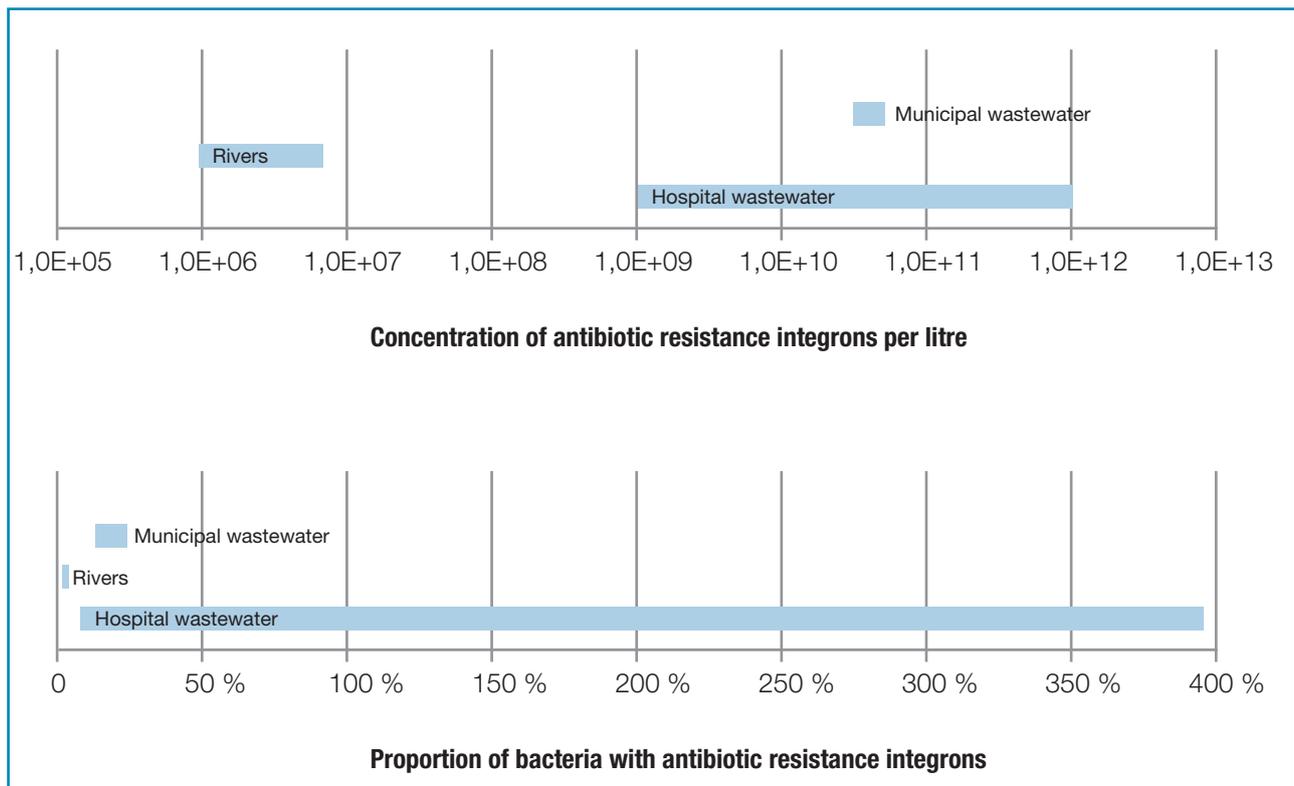


Abbildung 4: Konzentration von antibiotikaresistenten „Integrons“ und Anteil der Bakterien mit antibiotikaresistenten „Integrons“ in Krankenhausabwasser im Vergleich zu kommunalem Abwasser und Flusswasser



Deutsche Pilotanlage



Deutschland: Marienhospital Gelsenkirchen (MHG)

Die deutsche Pilotanlage reinigt das Abwasser des Marienhospitals Gelsenkirchen, ein für deutsche Großstädte typisches Krankenhaus mit einer breiten Palette unterschiedlicher Fachbereiche. Das Krankenhaus hat rund 580 Betten, etwa 1.150 Mitarbeiter sowie ca. 25.000 stationäre Patienten und 50.000 ambulante Patienten pro Jahr. Die Pilotanlage am Marienhospital wurde konzipiert für einen maximalen Zulauf von 25m³/Stunde bei einem mittleren Zulauf von 200 m³/Tag. Da auch befestigte Flächen von der Mischkanalisation im Rahmen des Projektes abgekoppelt wurden, wird die Anlage weitestgehend regenwasserfrei mit konzentriertem Krankenhausabwasser beschickt. Die Abwasserbehandlungsanlage besteht aus einer biologischen Behandlung in einem Membranbioreaktor (MBR) und einer nachgeschalteten Behandlung mit Ozon und Pulveraktivkohle sowie anschließender Sandfiltration. Die Genehmigung der Anlage erlaubt die anschließende direkte Einleitung des behandelten Krankenhausabwassers in ein Oberflächengewässer in unmittelbarer Nachbarschaft des Krankenhauses.

Die Anlage ist in einem eigens hierfür errichteten Gebäude unmittelbar hinter dem Krankenhaus im Bereich der Intensivstation untergebracht. Sie soll dauerhaft auch nach dem PILLS-Projekt weiterbetrieben werden. Dadurch können weitere Forschungen durchgeführt werden. Der Betrieb erfolgt durch die Emschergenossenschaft.

Niederlande: Isala Clinics

Isala Clinics in Zwolle sind gegenwärtig noch an 2 Standorten untergebracht: Weezenlanden und Sophia. Gegenwärtig expandiert

Sophia, um künftig alle Abteilungen an einem Standort zu konzentrieren, wodurch Weezenlanden geschlossen wird. Isala ist das fünftgrößte nichtakademische Krankenhaus der Niederlande, beschäftigt 5.700 Menschen, hat 1.076 Betten, 470.000 ambulante Besucher und 40.000 Übernachtungen pro Jahr. In den letzten Jahren hat Isala immer mehr hochspezialisierte Aufgaben übernommen.



Niederländische Pilotanlage

Der durchschnittliche Zulauf ist für 10m³/Stunde bei einem mittleren Zufluss von 240m³/Tag konzipiert. Die Pilotanlage liegt in der Nachbarschaft der Klinik und entsorgt das gesamte Krankenhausabwasser. Die Anlage besteht aus einer biologischen Behandlung mit einem MBR und einer nachgeschalteten Behandlung mit granulierter Aktivkohle, weitergehende Behandlung als chemische Oxidation mit UV/H₂O₂ und mit Ozon. Die Genehmigung für die Pilotanlage erfordert die Ableitung des gereinigten Abwassers über die Kanalisation zur kommunalen Kläranlage. Der Waterschap Groot Salland ist für den Betrieb der Anlage zuständig.

Schweiz: Kantonsspital Baden

Das Kantonsspital Baden ist ein typisches, regional bedeutsames Krankenhaus in der Schweiz mit 346 Betten für ein Einzugsgebiet mit über 250.000 Einwohnern. 2009 gab es 126.328 stationäre Tage. Das gesamte Spektrum der medizinischen Versorgung wird hier angeboten. Rund zwei Drittel der durchgeführten Röntgenuntersuchungen mit Kontrastmitteln wurden für ambulante Patienten durchgeführt. In 2009 Betrug der gesamte Wasserverbrauch 203.368 m³ im Jahr, darunter 233 m³ pro Tag in dem erfassten Krankenhausbereich.

Die Schweizer Pilotanlage wurde von der Eawag gebaut und untersucht und vollständig aus nationalen Mitteln finanziert, wurde jedoch während der PILLS-Laufzeit ab 2009 betrieben und trug somit wesentlich zu den gemeinsamen Arbeiten bei. Die Anlage war im Untergeschoss eines Krankenhausgebäudeteils untergebracht. Sie war auf eine zeitlich begrenzte Laufzeit ausgerichtet und wurde bereits 2010 wieder demontiert.

Schematic illustration

Average inflow
per day

Switzerland

Influent
1,2 m³

Coarse screening
4 mm

Membrane Bioreactor (MBR)

Luxembourg

Influent
1-3 m³

Coarse screening
2 mm

Membrane Bioreactor (MBR)

Germany

Influent
200 m³

Coarse screening
2 mm

Membrane Bioreactor (MBR)

The Netherlands

Influent
240 m³

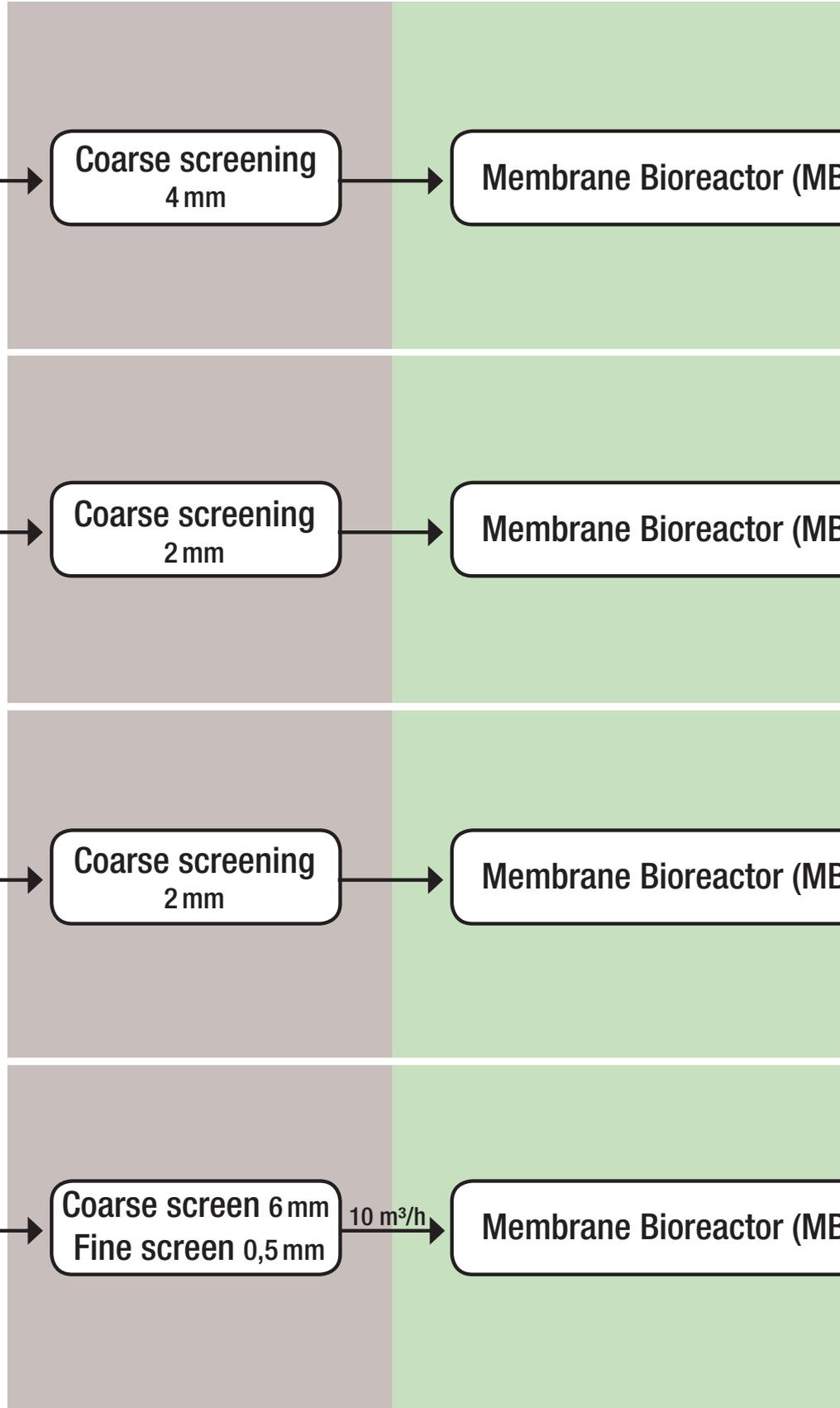
Coarse screen 6 mm
Fine screen 0,5 mm

10 m³/h

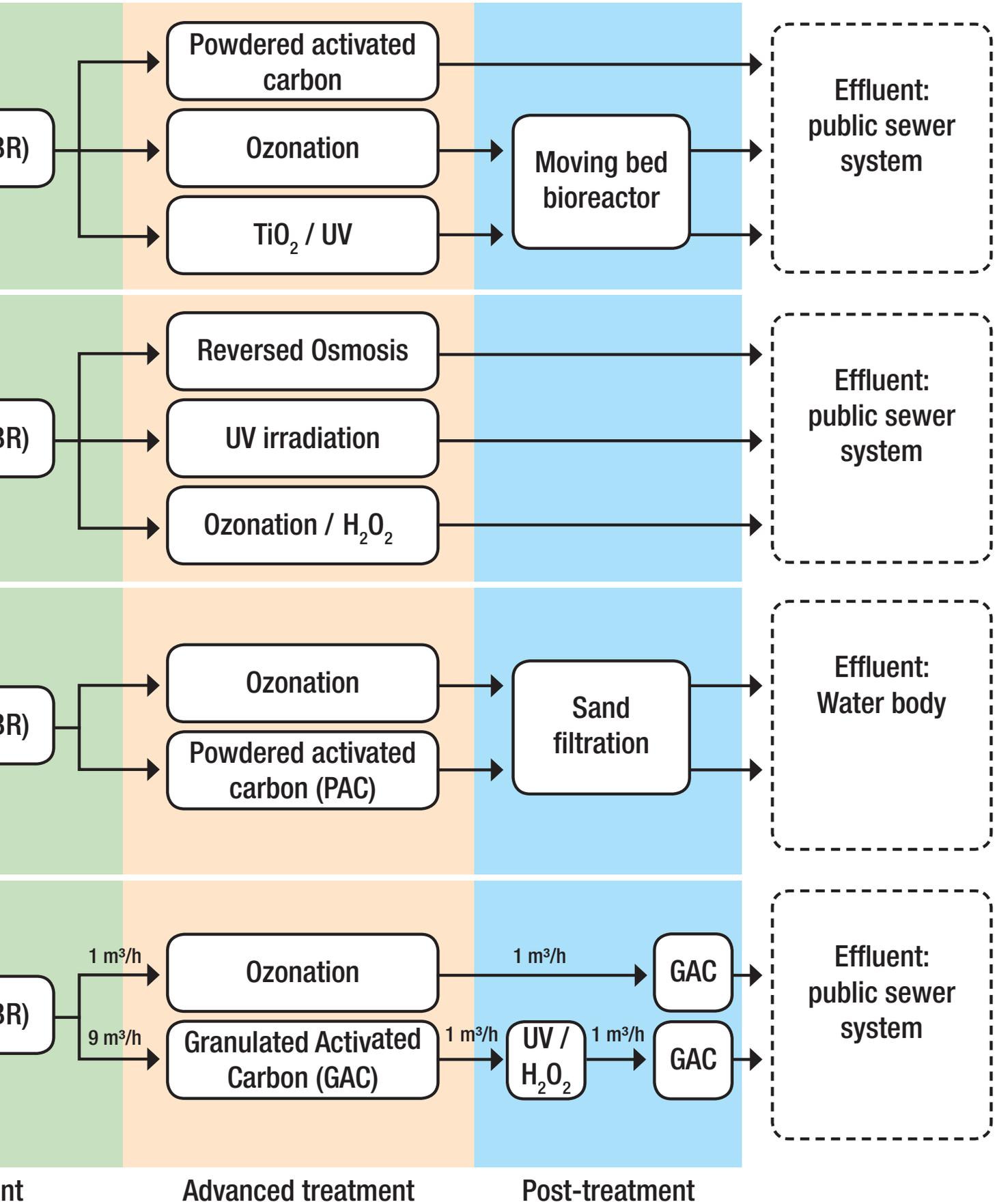
Membrane Bioreactor (MBR)

Pre-treatment

Main Biological treatment



Configuration of the pilot plants



UNTERSUCHTE PILOTANLAGEN



Schweizer Pilotanlage

Die biologische Reinigung erfolgte durch einen MBR. Nachgeschaltete Ozonierung, Oxidation mit UV/TiO₂ und Zugabe von Pulveraktivkohle mit anschließender Ultrafiltration wurden untersucht. Als letzter Schritt wurde eine biologische Nachbehandlung mit einem „moving bed bioreactor“ einbezogen, um die infolge der Oxidationsverfahren gebildeten Transformationsprodukte zu reduzieren.

Luxemburg: Centre Hospitalier Emile Mayrisch (CHEM)

Das Luxemburger Partnerkrankenhaus war das Centre Hospitalier Emile Mayrisch (CHEM) mit 640 Betten, wovon 360 Betten im betrachteten Krankenhausteil waren.

Die Pilotanlage behandelte Teilströme des Krankenhausabwassers und war nur für einen temporären Untersuchungsbetrieb konzipiert. Sie war in einem eigenen Container neben dem Krankenhaus untergebracht. Die biologische Reinigung fand durch einen MBR statt. Zwei weitergehende Reinigungsstufen mit Oxidationsprozessen (UV/H₂O₂, O₃/H₂O₂) und die Umkehrosmose wurden als weitergehende Behandlungstechnologien erprobt.

Die Pilotanlagen zeichnen sich alle durch eine komplexe Technik aus, deren Ziel es ist, neben den biologisch abbaubaren Stoffen und den Nährstoffen auch die zum großen Teil persistenten Arzneimittelrückstände zu eliminieren. Aus diesem Grund sind in den PILLS-Anlagen die konventionellen Abwasserbehandlungsverfahren um zusätzliche Techniken erweitert.

Als Charakteristikum jeder Anlage bildet ein Membranbioreaktor (MBR) das Herzstück, gefolgt von nachgeschalteten physikalisch-chemischen Behandlungsverfahren (UV, Ozon, Aktivkohle, weiterge-

hende Oxidationsverfahren, Umkehrosmose). Die Wirkung der Pilotanlagen wurde hinsichtlich der Eliminationsleistung der Arzneimittelrückstände und der „klassischen“ Parameter (COD, BOD, N, P) sowie des Energieverbrauchs evaluiert. Auch die Effizienz der Anlagen bezüglich der Reduzierung von ökotoxikologischen Wirkungen antibiotikaresistenter Bakterien wurde untersucht.



Luxemburger Pilotanlage



ABWASSERREINIGUNG AN PUNKTQUELLEN – DIE TECHNOLOGIEN

Ozonierung

Ozon ist ein Oxidationsmittel, das u.a. bei der Desinfektion von Trinkwasser zur Anwendung kommt, aber auch in der Abwasserreinigung genutzt werden kann. In Abhängigkeit der eingesetzten Ozondosis werden die Abwasserinhaltsstoffe oxidiert, wobei neben CO_2 und Wasser Transformationsprodukte entstehen. Diese Reaktionsprodukte können auch toxisch oder persistent gegenüber der biologischen Abbaubarkeit sein.

Advanced Oxidation Processes (AOP) = erweiterte Oxidation

Erweiterte Oxidationsprozesse sind Kombinationsverfahren mit dem Ziel, die Bildung von Hydroxyl-Radikalen ($\text{OH}\bullet$) zu intensivieren. Diese Hydroxyl-Radikale sind starke Oxidationsmittel und können ozonrefraktäre Arzneimittelwirkstoffe als auch organische Stoffe oxidieren. Mit Blick auf die mögliche Toxizität oder erschwerte weitere Abbaubarkeit der entstehenden Oxidationsprodukte sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Die am häufigsten untersuchten AOP-Verfahren sind UV/Ozon, UV/ H_2O_2 , Ozon/ H_2O_2 , Fenton-Reaktion und UV/ TiO_2 .

UV/Ozon und UV/ H_2O_2

Die photolytische Wirkung der reinen UV-Strahlung wird effektiv in der Desinfektion von Abwasser eingesetzt. Um die Oxidation von gelösten Abwasserinhaltsstoffen zu ermöglichen, kann es in Kombination mit Ozon oder H_2O_2 zur Bildung von Hydroxyl-Radikalen eingesetzt werden. In diesem Fall wird die indirekte, radikalische Kettenreaktion gezielt gefördert. Diese AOP-Verfahren sind vergleichbar mit Ozon/ H_2O_2 . Daher sind die Kosten für die Auswahl der optimalen Prozesse entscheidend.

Fenton-Reaktion ((UV)/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ oder Fe^{3+})

Beim Einsatz eines Katalysators (Eisen) und bei entsprechenden Milieubedingungen kann die Hydroxyl-Radikal-Ausbeute intensiviert werden.

UV/ TiO_2

Auch bei der Kombination von UV-Licht und TiO_2 wird der Photokatalysator (TiO_2) mittels UV-Licht aktiviert. Der Einsatz bei Umgebungstemperatur und -druck, stellt einen besonderen Vorteil dieses AOP-Verfahrens dar. Eine der Herausforderungen dieser Verfahrensoption besteht in der Abtrennung des partikulären Katalysators vom gereinigten Wasser.

Aktivkohle

Bei der Abwasserbehandlung mit Aktivkohle sorbieren die Substanzen an der Kohleoberfläche; entweder bei Zugabe von Pulveraktivkohle (PAC) mit anschließender Abtrennung der beladenen PAC oder in granulierter Form als Festbett (GAC). Diese Technologien sind bei der Trinkwasserbehandlung etabliert.

Umkehrosmose

In der Umkehrosmose (RO) werden Substanzen durch eine dichte Membrane zurückgehalten. Der MBR-Ablauf wurde für die Untersuchungen an RO verwendet.

Oxidation mit Eisenoxid

Ferrate (Fe(VI)) kann zur Oxidation von Spurenstoffen verwendet werden. Die Experimente wurden mit Modellabwasser und realem Abwasser durchgeführt.



BEWERTUNG DER VERFAHREN

Alle Handlungsansätze der Partner hatten zum Ziel, praktische Ergebnisse für eine Bewertung zum Kosten-Nutzen-Verhältnis zu erarbeiten. Es war von Anfang an klar, dass Beiträge zur europäischen Umweltpolitik sich nicht auf die ausschließlichen Reinigungserfolge konzentrieren dürfen, sondern auch darüber hinaus gehende Effekte mit berücksichtigen müssen, z.B. Energieverbrauch, Abfallprodukte, praktische Betriebsführung und auch schlichtweg die Umsetzbarkeit. Die weitergehenden Behandlungstechnologien an den Forschungskläranlagen wurden mit Hilfe unterschiedlicher Bewertungsverfahren beurteilt.

Leistungsfähigkeit bei der Minderung pharmazeutischer Konzentrationen

Die jeweiligen Anlagenkonfigurationen sowie die weitergehenden Behandlungsverfahren werden in Bezug auf ihre Reinigungsleistungen verglichen. Die Vorbehandlung mittels MBR führt zu einer exzellenten Abwasserqualität hinsichtlich CSB, Nährstoffen und Keimen und ist ein wesentlicher erster Schritt bei der dezentralen weitergehenden Behandlung. Aber die Hälfte der untersuchten Arzneimittelwirkstoffe wurde zu weniger als 50% durch MBR reduziert.

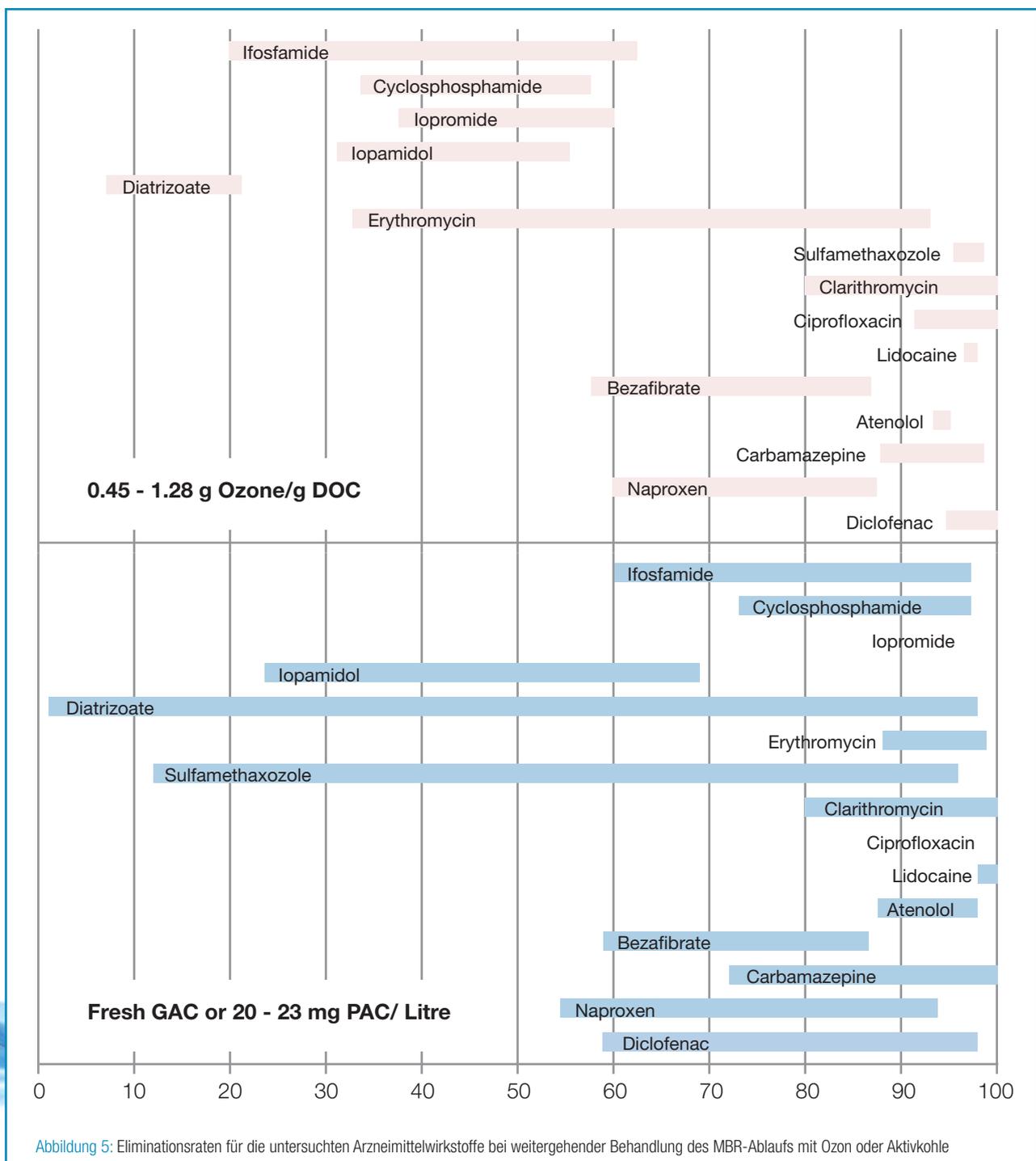


Abbildung 5: Eliminationsraten für die untersuchten Arzneimittelwirkstoffe bei weitergehender Behandlung des MBR-Ablaufs mit Ozon oder Aktivkohle

Eine Gesamtelimination von über 80% wurde für die meisten untersuchten Wirkstoffe bei einer zusätzlichen Behandlung mit 0,5 g Ozon/g DOC (außer für Cyclophosphamid, Ifosfamid und die Röntgenkontrastmittel Diatrizoat, Iopamidol und Iopromid) oder bei einer zusätzlichen Behandlung mit 20 mg/L Pulveraktivkohle (außer für Sulfamethoxazol und die Röntgenkontrastmittel Diatrizoat und Iopamidol) erzielt. Die Gesamtelimination bei Behandlung des MBR-Ablaufs mit frischer granulierter Aktivkohle (GAC) war größer als 95% für alle untersuchten Einzelstoffe (Abbildung 5). Ebenfalls hohe Eliminationsraten konnten auch mit einer nachgeschalteten Umkehrosmose erzielt werden. Bei Anwendung der Kombination aus UV und H₂O₂ mit einer Energieflussdichte von 47.500 J/m² können die betrachteten Substanzen zu mehr als 77% oxidiert werden. Der Energieverbrauch der Vorbehandlung im MBR konnte mit etwa 1,2

– 1,5 kWh/m³ abgeschätzt werden, wobei 0,3 bis 0,6 kWh/m³ auf die mechanische Vorbehandlung entfallen. Der Energieverbrauch beim Pulveraktivkohleeinsatz (0,45 kWh/m³ inklusive Sandfiltration) war höher als für den granulierten Aktivkohlefilter (0,2 kWh/m³). Der Energieverbrauch für die UV-Behandlung lag zwischen 0,5 und 1,0 kWh/m³ und damit höher als bei Ozonierung (zwischen <0,2 und 0,9 kWh/m³). Der Energieverbrauch für Umkehrosmose lag über 1,0 kWh/m³.

Leistungsfähigkeit bei der Reduzierung ökotoxikologischer Wirkungen

Ökotoxikologische Bewertungen wurden mit den Abläufen der unterschiedlichen Behandlungsverfahren durchgeführt. Verschiedene Kurz- und Langzeit-Toxizitätstests wurden angewendet, darunter in-vitro-Tests für die Bewertung spezifischer Effekte (z.B. Zytotoxizität

Bioassays	Endpoints	Effluent of MBR	MBR + O3	MBR +O3 + SF	MBR +PAC/SF
A-YES test (AQUA 1.0)	Estrogenicity (EE2 equivalent)	0.235 ng/L	0.261 ng/L	0.176 ng/L	0.079 ng/L
Ames test (Salmonella thyphimurium, strain YG7108)	Mutagenicity (No. of histidine revertants)		↑	↘	
Bacteria test (Vibrio fischeri)	Inhibition of luminescence (concentration factor EC50)	↓	↓	↘	↓
Algae growth test (72hr)	growth rate inhibition, average for dilutions 80% and 50% wastewater	↓	↗		

Bioassays	Endpoints	Effluent of MBR	MBR + O3	MBR +O3 + GAC	MBR +GAC	MBR + VU	MBR +VU +GAC
Waterscan (antibiotics test)	Sulfanomides (concentration factor EC50)						
Bacteria test (Vibrio fischeri)	Inhibition of luminescence (concentration factor EC50)			↓	↓		↓
Algal photosynthesis test (4.5 and 24hr)	Inhibition of photosynthetic efficiency (concentration factor EC50)					↓	↓

Evaluation is performed on average values. Change of toxicity value after treatment process: ↑ and ↓ indicate increasing toxicity or decreasing toxicity of > 20%, ↗ and ↘ indicate slightly increasing toxicity or slightly decreasing toxicity of < 20%. Color codes:

	EC50 values based on expert judgment	Other values (change of effect compared to negative control)
 no negative effects	EC50 > 100	< 5%
 weak or moderate effects	20 < EC50 < 100	5 - 20%
 Strong effects	EC50 < 20	> 20%

Tabelle 2: Gemessene Wirkungen von Behandlungsprozessen in Biotests (Auszug).

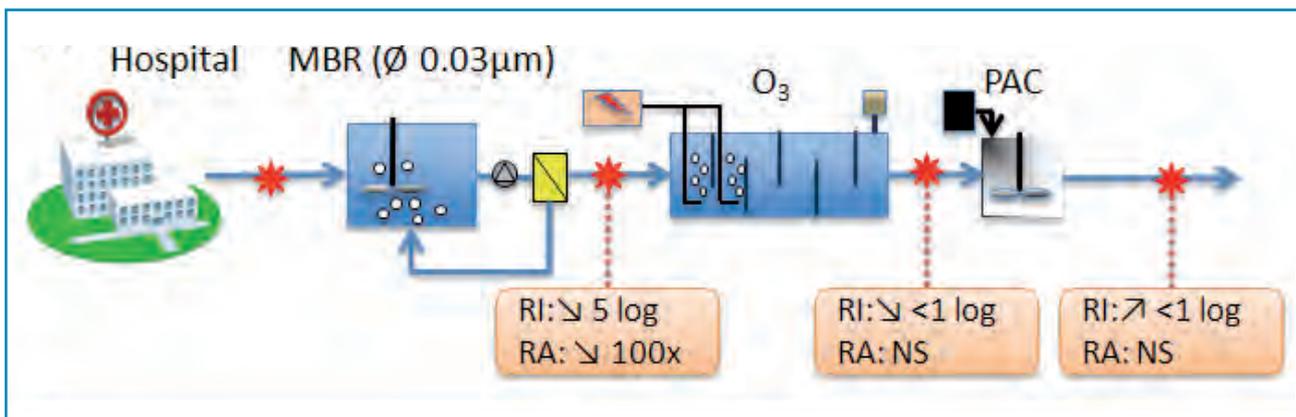
oder endokrine Wirkung) sowie in-vivo-Tests mit Organismen wie Schnecken, Würmer, Wasserflöhe oder Fische. Mit diesen Tests wurden die Wirkungen der Abwässer, einschließlich potentieller Wechselwirkungen des enthaltenen Substanzmix erfasst. Auch mögliche Wirkungen aufgrund von Transformationsprodukten können so erfasst werden.

Einige Ergebnisse der durch die unterschiedlichen Beteiligten durchgeführten Untersuchungen mit Proben verschiedener Pilotanlagen sind in Tabelle 2 dargestellt. Die biologische Behandlung im MBR verminderte die toxischen Wirkungen des Krankenhausabwassers. Aber der MBR-Ablauf war für einige Organismen weiterhin toxisch, beispielsweise für Bakterien, Algen und Schnecken. Die weitergehende Abwasserbehandlung mit Aktivkohle bewirkte im Allgemeinen mindernde Toxizität. Dennoch kann der Ablauf weiterhin für Algen toxisch sein.

Leistungsfähigkeit bei der Reduzierung antibiotikaresistenter Bakterien

Durch Messungen der Menge antibiotikaresistenter Integrons konnte das Vorkommen multiresistenter Bakterien im Krankenhausabwasser nachgewiesen werden. Auch der Anteil von Bakterien mit antibiotikaresistenten Integrons konnte bestimmt werden.

Die Effizienz der weitergehenden Abwasserreinigungsprozesse für Antibiotika zur Reduzierung antibiotikaresistenter Integrons lag zwischen 1 bis 5 log-Stufen, vor allem aufgrund der Eliminationsleistung des MBR mit Membranen bei Porengrößen von 0,03 - 0,04 μm . Die Wirkung der weitergehenden Behandlung mit Ozon oder Aktivkohle zur Verminderung der resistenten Integrons und ihrer relativen Häufigkeit in Abwasser war vernachlässigbar im Vergleich zur Effizienz der MBR mit einer Ultrafiltrationsmembrane.



Decreasing (\geq) or increasing (\leq) rates of the initial concentration (in log₁₀ factor) of resistant integron (RI), and its associated relative abundance (RA) given in fold factor (x). NS: non significant.

Abbildung 6: Bewertung der Leistung von Behandlungsverfahren zur Reduzierung von antibiotikaresistenten Integrons und ihre relative Häufigkeit in dem Abwasser (Auszug)

Ozonierung reduzierte die antibiotischen und hormonellen Wirkungen von Krankenhausabwasser. Dennoch war in einigen Untersuchungen erhöhte Toxizität gemessen worden, durch die bei der Ozonierung oder UV-Behandlung gebildeten Transformationsprodukte. Eine Nachbehandlung des ozonierten Abwassers in einem Biofilter konnte diese Effekte deutlich reduzieren, aber nicht vollständig eliminieren. Auch ein nachgeschalteter Sandfilter war zur Reduzierung der Toxizität durch die Oxidationsprodukte weniger effektiv als in früheren Studien berichtet wurde. Granulierte Aktivkohle war sehr effektiv, um schädliche Wirkungen infolge der UV-Behandlung zu mindern.

Kostenbewertung

Zusätzlich zur Wirksamkeit sind die durch den Bau und Betrieb der Anlagen entstandenen Kosten von Bedeutung. Daher sind die Anlagen einer Kostenbewertung unterzogen worden, bei der die Gesamtkosten wie auch die den jeweiligen Behandlungsverfahren zuzurechnenden Kosten verglichen wurden. Die jährlichen Investitions- und Betriebskosten wurden dafür bestimmt.

Da die Untersuchungen im PILLS-Projekt an Pilotanlagen durchgeführt wurden, die für diesen Zweck entwickelt und gebaut wurden,

	MBR	MBR + GAC	MBR+O3+GAC	MBR+UV/H2O2+GAC
Investment cost	3.25	3.35	3.50	3.65
Variable cost	1.45	1.65	1.75	1.85
Total cost	4.70	5.00	5.30	5.50

Tabelle 3: Kosten in €/m³ für die Behandlung von Krankenhausabwasser mit unterschiedlichen Behandlungstechnologien, Kalkulation basierend auf der Anlage in den Niederlanden

sind in einigen Fällen Ausstattungen für die besonderen Forschungszwecke installiert worden. Eine neue Anlage an einem anderen Ort, die nur für die Krankenhausbehandlung konzipiert wird, würde zu anderen Kosten führen. Die Angaben in Tabelle 3 zeigen ein Kostenniveau für Bau und Betrieb einer neuen Krankenhauskläranlage. Die Kosten von PAC und GAC sind vergleichbar.

Life-cycle-assessment (Ökobilanz)

Die Methode der Ökobilanz (LCA) umfasst normalerweise die drei Lebensphasen von Anlagen: die Errichtung, den Betrieb sowie die Demontage. In diesem speziellen Fall steht der Vergleich von Szenarien mit vergleichbaren Infrastrukturen im Vordergrund, weshalb der Vergleich der ersten und dritten Lebensphase vernachlässigt wird. Nur die indirekten Schadstoffemissionen bezogen auf den Betrieb der Anlagen – beispielsweise durch den Energie- oder den Rohstoffverbrauch – werden berücksichtigt. Die Umweltverträglichkeit der Verfahren wird für verschiedene Kategorien berechnet (z.B. Treibhauspotential, akute und chronische Toxizität in Gewässern, kanzerogene Effekte). Aus Sicht des LCA besteht kein Unterschied zwischen einer zentralen (mit oder ohne weitergehende Abwasserbehandlung) und einer weitergehenden dezentralen Abwasserbehandlung, da der Einfluss von Pharmaka gegenüber anderer Faktoren, wie die Nährstoffelimination (und der dadurch verhinderten Eutrophierung) vernachlässigbar ist.

Beim Vergleich unter Betrachtung der übergreifenden Umweltwirkungen in einem LCA ist die Ozonierung (bei einem geringen Energieeinsatz) effektiver als die Aktivkohlebehandlung und diese wiederum effektiver als eine energieintensivere UV-Behandlung.

Multi-criteria (decision) analysis - Mehrkriterienanalyse

Die PILLS-Partnerschaft hatte ursprünglich geplant, eine Mehrkriterienanalyse als Instrument zur Entscheidungsfindung zu erarbeiten. Nach mittlerweile fast 5 Jahren Grundsatzdiskussionen und der Heranziehung unterschiedlicher Erarbeitungsverfahren – auch mit der Unterstützung externer Fachleute – muss die Partnerschaft erkennen, dass ein solches Instrument nicht ernsthaft und wissenschaftlich fundiert unter den gegebenen Umständen entwickelbar ist. Es gibt eine Reihe von Gründen hierfür. Unterschiede in Politik, Verwaltung und Entscheidungsfindung in den beteiligten Ländern führen zu den Fragen: Wer entscheidet worüber? Wie sind Indikatoren zu gewichten? Worüber wird die Entscheidung überhaupt gefällt? Das Instrument der „Multi Criteria (Decision) Analysis“ wurde wissenschaftlich ursprünglich entwickelt, um eindeutige Entscheidungen für Ideallösungen unter feststehenden Bedingungen herbeizuführen. Dieser Rahmen ist beim Thema PILLS nicht gegeben. Es scheint immer eine Reihe verschiedener Lösungsmöglichkeiten zu geben, so dass gegenwärtig nie eine „beste Lösung“ empfohlen werden könnte. Dennoch ist die PILLS-Partnerschaft überzeugt, dass sie zum Diskussionsprozess auf europäischer Ebene mit ihren Ergebnissen beitragen kann und die ermittelten Daten deutliche Hinweise und Argumentationshilfen geben, was unter welchen Bedingungen hilfreich wäre.

In diesem Sinne bietet PILLS eine Vielzahl von „Entscheidungshilfen“ – Lösungen und Schwerpunktsetzungen hängen von den Prioritätensetzungen unter örtlichen Rahmenbedingungen durch die Entscheider ab.

Bezogen auf die ursprüngliche Projektidee - Pharmaceutical Input and Elimination from Local Sources (Eintrag und Beseitigung von Arzneimittelrückständen aus Punktquellen) – können folgende Punkte als konsensfähige Aussagen des Projektkonsortiums ergehen:

PUNKTQUELLEN

- Krankenhäuser sind ein „hot spot“, denn hier werden im großen Umfang Arzneimittel verwendet und ins Krankenhausabwasser ausgeschieden.
- Dennoch ist der absolute Anteil von Pharmaka im Vergleich zum Konsum in den Haushalten relativ gering (rund 20% des Gesamtkonsums).
- Einige Arzneimittel (Röntgenkontrastmittel, einige Antibiotika, Zytostatika z.B. aus der Chemotherapie) werden in Krankenhäusern in deutlich höheren Mengen als in Privathaushalten angewendet. Das ermöglicht eine gezielte Entfernung großer Teile dieser Stoffe über dezentrale Krankenhauskläranlagen.
- Der Anteil des Krankenhausabwassers in einem Kläranlageneinzugsgebiet ist unterschiedlich und variiert zwischen 5 und 50 Betten auf 1.000 Einwohner.
- Die Pharmakaemissionen von geriatrischen Einrichtungen war unbedeutend: Messungen und Befragungen haben für die untersuchten Bereiche gezeigt, dass die Gefährdungssituation gegenüber den Krankenhäusern nicht vergleichbar ist, da häufig Inkontinenzanlagen verwendet werden.

TECHNOLOGIE

- Weitergehende Behandlung ist erforderlich für die Beseitigung der meisten Arzneimittelrückstände aus dem Abwasser, da die biologische Abwasserreinigung hierfür nicht ausreichend ist.
- Eine weitergehenden Abwasserbehandlung durch z.B. einen MBR plus Ozon, Aktivkohle, UV/H₂O₂ oder Umkehrosmose wurde als wirksam erachtet, um diese Elimination zu erzielen.
- Bereits der MBR erzielt eine exzellente Abwasserqualität bezüglich CSB, Nährstoffen und Keimen und ist ein wichtiger erster Behandlungsschritt für dezentrale Behandlungsanlagen. Die Hälfte der betrachteten Arzneimittelrückstände wird im MBR jedoch zu weniger als 50% eliminiert.
- Für die meisten – aber nicht für alle – betrachteten Substanzen kann die weitergehende Behandlung mittels Pulveraktivkohle

oder mittels Ozon eine mehr als 80%ige Elimination gewährleistet. Hohe Eliminationsraten können in Aktivkohlefiltern mit GAC und mit der Umkehrosmose erzielt werden. Bei hoher Energieflussdichte können auch mit UV/H₂O₂ für alle betrachteten Substanzen hohe Eliminationsraten erreicht werden.

- Der Energieverbrauch für UV-Behandlung war größer als für die Ozonbehandlung. Der Energieverbrauch der Umkehrosmosestufe betrug mehr als 1,0 kWh/m³.
- Für die Gesamtkosten einer dezentralen Behandlung von Krankenhausabwasser wurden 4,70 €/m³ (für den MBR-Teil) bis 5,50 €/m³ (MBR + UV/H₂O₂ + GAC) kalkuliert. Darin enthalten sind variable (Betriebs-)kosten von 1,45 €/m³ (MBR) bis 1,85 €/m³ (MBR + UV/H₂O₂ + GAC).
- Zwar werden toxische Effekte des Krankenhausabwassers im MBR reduziert, aber der MBR-Ablauf kann weiterhin Substanzen mit toxischer Wirkung auf bestimmte Organismen enthalten. Mit den meisten Biotests konnte eine Reduktion der Toxizität infolge der Anwendung weitergehender Behandlungsverfahren nachgewiesen werden. Dennoch fanden sich bei bestimmten Biotests Wirkungen im Ablauf der weitergehenden oxidativen Stufen, die möglicherweise den gebildeten Transformationsprodukten zuzuordnen sind. Eine Nachbehandlung mit Aktivkohle- oder Biofilter ermöglichte eine weitestgehende Reduktion, eine Nachbehandlung im Sandfilter eine teilweise Reduktion dieser Wirkungen.
- Der MBR bewirkte eine signifikante Reduktion antibiotikaresistenter Integrons. Zusätzliche, weitergehende Behandlungsverfahren zeigten darüber hinaus keine signifikante Reduktionen mehr.
- Aus Sicht der LCA ist der Umwelteinfluss von Arzneimittelrückständen im Abwasser gegenüber der Reduktion von Nährstoffoffen zu vernachlässigen.
- Im Vergleich der weitergehenden Behandlungsmethoden ergibt sich unter Berücksichtigung verschiedener Bewertungskriterien folgende Rangfolge (von der besten zur schlechtesten): Ozon (bei geringem Energieverbrauch) > Aktivkohle > Ozon (bei hohem Energieverbrauch) > UV

RISIKOPOTENZIAL

- Das ökotoxikologische Risiko von kommunalem Abwasser wurde als geringer gegenüber Krankenhausabwasser eingeschätzt.
- Die Vielfalt des genetischen Materials („Genkassetten“) von Bakterien ist in Krankenhausabwasser geringer als im kommunalen



Abwasser, aber der Anteil multiresistenter Bakterien (gemessen an Genabschnitten "Integrans") im Bakterienpool ist im Krankenhausabwasser höher als im kommunalen Abwasser.

- Ein Risikopotenzial besteht durch pathogene Keime und antibiotikaresistente Bakterien im Krankenhausabwasser.
- Bei einer Mischkanalisation können Mischwasserentlastungen zu einer Ableitung von Krankenhausabwasser in die Gewässers führen und somit zu einer potenziellen Verbreitung von resistenten Bakterien und Pathogenen.
- Eine dezentrale Abwasserbehandlung an der Quelle würde Risiken für Grund- und Oberflächengewässer verringern.

MULTI CRITERIA DECISION ANALYSIS (MCDA) - MEHRKRITERIENANALYSE

Eine wissenschaftlich belastbare MCDA konnte im Rahmen PILLS nicht entwickelt werden. Die nachfolgenden Kriterien aus den bei PILLS vorliegenden Erkenntnissen können dennoch zumindest zur Entscheidungsfindung beitragen, wenn es um dezentralisierte Behandlung von Krankenhausabwässern geht:

- Wirksamkeit der Behandlung
- Energieverbrauch
- LCA
- Kosten
- Antibiotikaresistente Bakterien
- Ökotoxikologie
- Betriebserfahrungen und Verantwortlichkeiten
- Genehmigungsfähigkeit
- Lokale Besonderheiten



WEITERE HANDLUNGSANSÄTZE FÜR EINE NACHHALTIGE SPURENSTOFFREDUKTION

Es ist offensichtlich, dass noch weitere Forschung für eine umfassende Beurteilung in diesem Bereich erforderlich ist. Allerdings sind viele Beteiligte sich hier einig, dass unter Vorsorgegesichtspunkten weiter gehandelt werden muss. Es gibt auch Zustimmung darüber, dass potenziell umweltgefährdende Substanzen so weit wie möglich zu vermeiden sind oder zumindest ihre Verbreitung so zu reduzieren, dass keine Wirkungen in der Umwelt auftreten. In diesem Zusammenhang sind Vorteile (Lebensqualität) und Risiken (gegenüber Mensch und Umwelt) gegeneinander abzuwägen.

Es ist unstrittig, dass die Abwasserbehandlung nicht allein in der Lage ist, die Umweltbelastungen nachhaltig zu reduzieren. Sind die Mikroverunreinigungen einmal in den Wasserkreislauf gelangt, ist ihre vollständige Beseitigung kaum umsetzbar – auch wenn in vielen Fällen eine Minimierung unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze erreichbar ist oder keine messbaren Effekte darstellbar sind. Aus diesem Grunde ist eine integrierte Strategie notwendig, die den vollständigen Lebenszyklus der Stoffe betrachtet – von der Produktion über die Einnahme bis zur Entsorgung.

Mögliche Handlungsansätze zur Reduzierung von Medikamenteneinträgen:

- Gesetzgeber: Schaffung von Anreizen, die eine Nutzung umweltfreundlicherer Substanzen bei der Herstellung von Arzneimitteln fördern. Festsetzen von Anforderungen an Emissionen pharmazeutischer Rückstände.
- Pharmazeutische Industrie: Berücksichtigung von möglichen Umwelteffekten von einzelnen Wirkstoffen bereits bei deren Entwicklung sowie gezielte Forschung in diesem Bereich.
- Medizinisches Fachpersonal: Weiterbildung zur Veränderung der derzeitigen Verschreibungspraktiken, so dass insgesamt weniger bzw. – soweit möglich – „umweltfreundlichere“ Arzneimittel verwendet werden.
- Medizinische Zentren, Krankenhäuser, Pflegeheime (so genannte Punktquellen): Abwasserseparierung sowie lokale Behandlung des Abwassers bei hohen Konzentrationen von pharmazeutischen Rückständen.
- Abwasserentsorger und Trinkwasserversorger: Weitergehende Abwasserbehandlung in zentralen Kläranlagen sowie verbesserte Trinkwasseraufbereitung zur Eliminierung von Rückständen.





Lead Partner

Emschergenossenschaft

Kirsten Adamczak
Kronprinzenstraße 24
45128 Essen, Germany
Phone: 0049 - 201 104 2606 / 2679
E-mail: adamczak.kirsten@eglv.de

Germany

Emschergenossenschaft

Dr. Issa Nafo
Kronprinzenstraße 24
45128 Essen
Phone: 0049 - 201 104 2779
E-mail: nafo.issa@eglv.de

The Netherlands

Waterschap Groot Salland

Dr. ir. Herman Evenblij
Dr. Van Thienenweg 1
8025 AL Zwolle
Phone: 0031 - 38 455 7431
E-mail: hevenblij@wgs.nl

Luxembourg

CRP Henri Tudor

Dr. Alex Cornelissen
Schlassgoart 66, rue de Luxembourg
4002 Esch-sur-Alzette
Phone: 00352 - 545580 519
E-mail: alex.cornelissen@tudor.lu

Switzerland

Eawag

Dr. Christa McArdell
Ueberlandstraße 133
8600 Duebendorf
Phone: 0041 - 44 823 54 83
E-mail: christa.mcardell@eawag.ch

United Kingdom / Scotland

Glasgow Caledonian University

Dr. Ole Pahl
Cowcaddens Road
Glasgow G4 0BA
Phone: 0044 - 141 331 3572
E-mail: O.Pahl@gcal.ac.uk

France

Université de Limoges

Prof. Dr. Christophe Dagot
33, rue François Mitterand
87032 Limoges
Phone: 0033 - 555 423 697
E-mail: dagot@ensil.unilim.fr

Scientific Board

- Mark Heggie (Scottish Environment Protection Agency, United Kingdom)
- Dr. Florian Keil (vorm.: Institute for Social-Ecological Research ISOE GmbH, Germany)
- Dr. Thomas Schwartz (Karlsruhe Institute of Technology, Germany)
- Dr. Steger-Hartmann (Bayer Schering Pharma AG, Germany)
- Prof. Dr. Pim de Voogt (IBED, University of Amsterdam, The Netherlands)
- Dr. Luc Zwank (Administration de la Gestion de l'Eau, Luxembourg)

