

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit präsentiert die Ergebnisse einer in Kooperation mit der Universität von Karachi durchgeführten ersten Untersuchung des Trinkwasserkreislaufs der Megastadt Karachi, Pakistan. Erst langsam setzt sich die Erkenntnis in den Köpfen der lokalen Entscheidungsträger durch, dass die wichtige Ressource Wasser in dicht besiedelten Regionen nur dann in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen kann, wenn die dafür nötigen ökologischen Voraussetzungen gegeben sind. Internationale Organisationen wie die UN erkennen seit langem diesen Bedarf einer gesicherten Wasserversorgung als Grundlage einer weiteren gesellschaftlichen Entwicklung an. In diesem Zusammenhang gibt es einen dringenden Bedarf an Technologietransfer und dem Kapazitätsaufbau vor Ort. Empfohlen werden von der UN vor allem ganzheitliche, multidisziplinäre Ansätze, welche nicht nur die Expositionskarakteristik abbilden. Vor diesem Hintergrund wurde ein Verfahren entwickelt, welches eine Erfassung der vorliegenden organisch-chemischen Kontamination des Trinkwasserkreislaufs von Karachi sowie eine erste Risikoabschätzung seines Zustandes gewährleisten kann. In der gemeinsamen Anwendung vor Ort und des wissenschaftlichen Austauschs in Form von Schulungen in Karachi und Hamburg wurden zusätzlich Grundlagen für einen Knowledge-Transfer und somit einen Kapazitätsaufbau vor Ort im Bereich der Umweltanalytik geschaffen.

Das entwickelte Verfahren verfolgt einen integrativen Ansatz in Form einer Kombination aus chemisch-analytischen und ökotoxikologischen Untersuchungsmethoden. Aufgrund der speziellen Zielsetzung und den gegebenen Rahmenbedingungen weist die Ausgestaltung und Anwendung des entwickelten Effekt-gerichteten Ansatzes einige Unterschiede in den Prämissen gegenüber herkömmlichen Effekt-gerichteten Ansätzen auf. Der historische Grundgedanke dieses Konzepts ist der Beweis einer Kausalbeziehung zwischen einem spezifischen Effekt und einem bestimmten Verursacher desselben. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten hinsichtlich der massiven Kontamination und für eine erste Untersuchung des Trinkwasserkreislaufs zur allgemeinen Charakterisierung der Belastungssituation ist dies nicht Ziel führend. In der entwickelten Methode hatte der Biotest die Aufgabe, die Vielzahl der entstandenen Fraktionen hinsichtlich ihrer Relevanz zu priorisieren. So konnte der Aufwand der instrumentellen Analytik und ihrer Auswertung in einem vertretbaren Rahmen gehalten werden ohne dass dabei relevante Informationen übersehen werden. Eine weitere wichtige Bedingung, die erheblichen Einfluss auf die Methodenentwicklung hatte, war die Eignung des Verfahrens für einen Technologietransfer in das Untersuchungsgebiet.

Zur Charakterisierung der Kontaminationssituation im Untersuchungsgebiet konnte das entwickelte Verfahren erfolgreich angewendet werden. Dazu wurden 768 Fraktionen aus 32 Proben mit Hilfe des Leuchtbakterientests auf ihre Relevanz hin untersucht. Die Proben stammen aus den Quellen (Grund- und Oberflächenwasser), der Verteiler- und Endverbraucherentnahmestellen für Trinkwasser, den Abwässern sowie den Oberflächengewässern in die letztere eingeleitet werden. Die

ermittelte Belastungssituation zeigt den alarmierenden Zustand des Trinkwasserkreislaufs von Karachi. Die Oberflächengewässer und Abwässer des Stadtgebiets sind massiv kontaminiert, vor allem mit PPCP und Industriechemikalien. Besonders die extrem hohe Belastung mit PPCP ist eine Charakteristik der Kontaminationssituation, die in vergleichbaren Untersuchungen in anderen Ländern bisher nicht festgestellt wurde. Die untersuchten Trink- und Grundwässer wiesen eine im internationalen Vergleich sehr hohe Belastung vor allem mit Rückständen von Industriechemikalien und Desinfektionsnebenprodukten auf. Die Kontaminationsprofile waren in diesem Fall regional sehr unterschiedlich und stellten in vielen Fällen ein Abbild der Umgebungsbelastung dar. In den untersuchten Oberflächengewässern außerhalb von Karachi dominieren vor allem Schadstoffe aus dem Bereich der Industriechemikalien das Kontaminationsprofil.

Die erwartete hohe Belastung der Oberflächengewässer außerhalb des Stadtgebiets mit Pestiziden aufgrund der vor Ort betriebenen Landwirtschaft sowie der Monokulturen im oberen Einzugsbereich des Indus konnte hingegen nicht bestätigt werden. Auch tragen Kontaminanten aus der Klasse der historischen POPs, der Dioxine und PCBs nicht zur Gesamtbelastung bei. Diese Ergebnisse widerlegen das Bild eines Belastungsprofils in Entwicklungsländern, welches dem der Industrieländer in früherer Zeit entspricht. Die vereinzelt durchgeführten Studien zur Umweltverschmutzung in Pakistan sowie erste Ansätze zum Monitoring sind aufgrund theoretischer Überlegungen allein auf Pestizide, POPs, Dioxine und PCBs ausgerichtet. Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit kann diese Fokussierung eindeutig als falsch belegt werden. Die erhaltenen Ergebnisse führen zu einer gefährlichen Unterschätzung des tatsächlichen Zustandes und des daraus resultierenden toxischen Gefährdungspotential.

In toxikologischer Hinsicht sind vor allem die Zustände der Gewässer im Stadtgebiet alarmierend. Hier wurden von vielen Einzelstoffen nicht nur Wirkschwellen, sondern auch  $EC_{50}$ -/ $LC_{50}$ -Werte überschritten. Die betrachteten Gewässer befinden sich ökologisch in einem katastrophalen Zustand. In den Trinkwasserproben werden EU-Grenzwerte und GOWs des UBA überschritten, sie stellen aber noch keine akute Gefährdung der Verbrauchergesundheit dar. Bedenklich sind hier die vielen Schadstoffe von denen chronische Gesundheitsgefährdungen ausgehen. Die größte Gefahr lässt sich jedoch aus den Kontaminationsprofilen ableiten. Diese ähneln denen der massiv kontaminierten Oberflächengewässer und Abwässer aus der jeweiligen Umgebung und belegen somit die bereits stattfindende Versickerung der Abwässer in das Grundwasser sowie die Kreuzkontamination des Trinkwassers mit Abwässern in den schadhafte Leitungssystemen. Die als Quellen genutzten Oberflächengewässer des Hub- und des Indus-Systems weisen, von lokal erhöhten Konzentrationen bestimmter Schadstoffe abgesehen, keine akuten Gefährdungspotentiale auf, sie sind jedoch bereits mit einer Vielzahl von Schadstoffen kontaminiert. Mit sofortigen Maßnahmen zur Reduzierung der Schadstoffemissionen kann die Verwendung dieser Oberflächengewässer zur Trinkwassergewinnung sichergestellt werden. In der Betrachtung der Einzelprofile ergaben sich auch hier durch örtlich erhöhte Konzentrationen bestimmter Schadstoffe eindeutige Hinweise auf die

Verursacherstruktur. Im allgemeinen umweltanalytischen Kontext ergab sich hieraus ein anderer Haupteintragspfad für PPCP, als dies aus bisherigen Untersuchungen bekannt ist. Punktuelle sehr massive Konzentrationsanstiege sowie das Verhältnis der Kontaminanten zu ihren Transformationsprodukten belegen, dass in Karachi die Einleitung von Produktionsabwässern hauptsächlich für die massive PPCP-Belastung ist.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen die Vorteile eines kombinierten Ansatzes im gewonnenen Informationsgehalt gegenüber herkömmlichen rein chemisch-analytischen Ansätzen. Neben der Erfassung der vorliegenden Kontaminationssituation konnte in der gemeinsamen Betrachtung der ökotoxikologischen und chemisch-analytischen Ergebnisse eine erste Risikoabschätzung der Belastungssituation des Trinkwassersystems von Karachi erstellt werden. Dazu gehören die bereits erwähnten Ergebnisse und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen. Auch hinsichtlich der allgemeinen Verursacherstruktur konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden und Empfehlungen für dringende Maßnahmen ausgesprochen werden. So konnte anhand der ermittelten Profile belegt werden, dass vor allem die fehlende Aufbereitung der Industrie- und Haushaltsabwässer sowie die fehlende Infrastruktur zur Entsorgung der festen Abfälle die Hauptverantwortung für die katastrophale Situation tragen. Neben der Entwicklung eines nachhaltigen Konzepts zur Aufbereitung dieser Abfälle ist ein umfassendes Konzept zur Vermeidung von Schadstoffemissionen zu schaffen. Ein weiteres wichtiges Problem, dessen Lösung keinen Aufschub mehr duldet, ist die Verbesserung und Instandsetzung des maroden Leitungssystems. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen eindeutig, dass die Lebensfähigkeit der Megastadt Karachi durch die Kontamination des Trinkwasserkreislaufs akut bedroht ist. Nur eine grundlegende und umfassende Reform der Infrastruktur, welche einen großen Kraftakt der verantwortlichen Institutionen und Entscheidungsträger fordert, kann eine wirksame Lösung bieten.

Des Weiteren wurden in dieser Arbeit viele neue Umweltkontaminanten identifiziert. Mehrere Substanzen aus den Klassen der Pharmazeutika, der Pestizide, der Industriechemikalien und der Desinfektionsnebenprodukte sowie einige neue Transformationsprodukte konnten in der vorliegenden Untersuchung erstmalig in Wasserproben nachgewiesen werden. Dies belegt die hohe Effizienz und Leistungsfähigkeit des entwickelten Methodenansatzes auch in der umweltanalytischen Forschung. Es widerlegt zudem die in der Literatur häufig zitierte Negation der Eignung der Effekt-gerichteten Analytik, insbesondere unter Verwendung eines unspezifischen Biotests, in Non-Target-Screening Ansätzen im aquatischen Bereich.