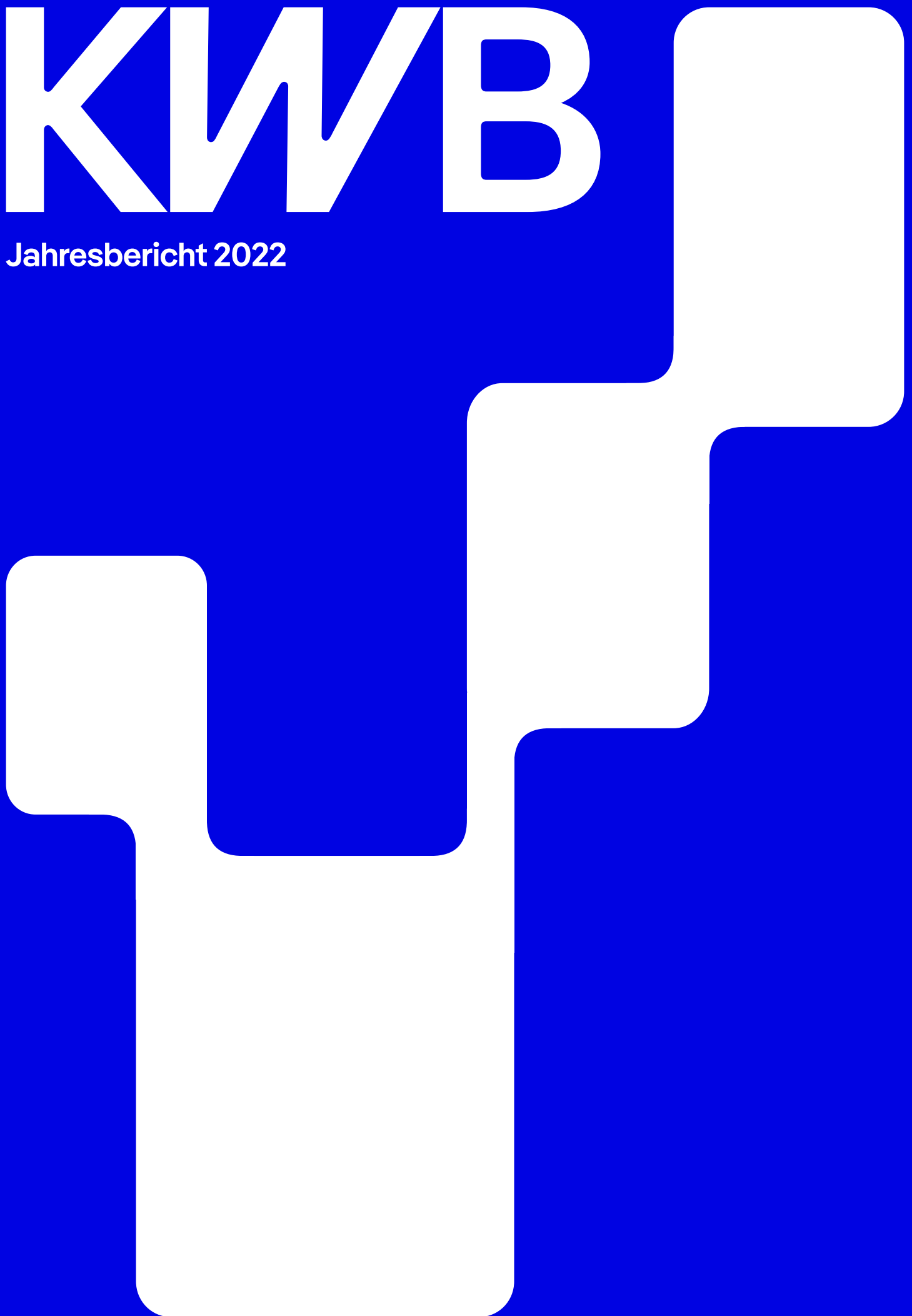


KWVB

Jahresbericht 2022



Editorial	2
Grußwort	2
Executive Summary	4
Eintauchen	8
Was bedeutet die Belastung von Regenwasser für die wassersensible Stadt?	10
Wie nachhaltig ist die Kreislaufwirtschaft?	16
Neue Herausforderungen: Cybersicherheit im Wassersektor	22
Projektauswahl	28
Rausschwimmen	48
Grundwasser sichtbar machen	50
Geometric Deep Learning	54
Wasserwiederverwendung	58
Anlegen	64
Team	66
Forschen und Spielen	70
Projektübersicht	72
Publikationen	75

Grußwort

Wasser ist ein wunderbares Element – und eine kostbare Ressource. Wie kostbar, zeigt sich gerade vor dem Hintergrund der Dürre im zurückliegenden Sommer, die vierte innerhalb der letzten fünf Jahre in Zeiten der Klimakrise. Krisen und die Debatten darüber sind allgegenwärtig, inflationär mag der Gebrauch des dazugehörigen Vokabulars anmuten, auch mit der Gefahr, zu desensibilisieren, wo eigentlich Bewusstsein geschaffen werden müsste. Dennoch lässt es sich nicht anders als unbeschönigt ausdrücken: Die Wasserkrise ist real. Und sie verschärft sich.



[Frank Bruckmann \(links\)](#)
[Nicolas Zimmer \(rechts\)](#)

Düstere Aussichten? Zweifelsohne, aber auch Ansporn zum Handeln für unsere Zukunft! Und das KWB handelt. Im 21. Jahr seines Bestehens hat es sich als wichtiger Player nicht nur in der angewandten Wasserforschung, sondern auch in der Entwicklung sektorübergreifender Lösungsansätze für zentrale Herausforderungen der Klimaveränderung und damit einhergehenden Krisen etabliert, sowohl in der Wasserszene als auch weit darüber hinaus.

Nicht nur, aber gerade auch für Berlin ist das ein großer Gewinn. Durch seine Expertise, die Entwicklung von Ideen und das Einwerben von Projektmitteln auf nationaler und EU-Ebene konnte das KWB signifikante Zuwendungen aus laufenden Projekten an regionale Partner bewirken, so unter anderem an die Berliner Wasserbetriebe, die Technologiestiftung Berlin oder auch die Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz. Vor allem konnte das KWB aber auch Themen und Pilotprojekte nach Berlin bringen, die von höchster Relevanz sind und die Bedeutung weit über die Stadt- und Landesgrenzen hinaus haben: Von der Wasserversorgung, über Klimaanpassungsmaßnahmen bis hin zur Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung. Von Spurenstoffen in Gewässern und im Trinkwasser über Regenwasserbewirtschaftung bis hin zur blau-grünen Infrastruktur und Smart City. Zugleich entwickelt sich das KWB auch intern zukunftsorientiert weiter: Exemplarisch dafür steht die Einrichtung einer sämtliche KWB-Forschungsthemen verknüpfenden Hydroinformatikgruppe – also einer Gruppe, die sich der Wissenschaft widmet, Data Science, Künstliche Intelligenz und Geometric Deep Learning zu nutzen, um dringende Wasserprobleme zu lösen.

All dies geschieht nicht nur vor dem Hintergrund der Klima- und Wasserkrise, sondern auch in einem Europa, in dem Krieg herrscht und dessen Folgen in vielen gesellschaftlichen Bereichen – auch in der Wissenschaft – zu spüren sein werden. Es ist bemerkenswert, wie sicher das KWB durch zunehmend unruhige Zeiten steuert und wie positiv die wirtschaftlichen Mittelfristbetrachtungen ausfallen. Wir sind zuversichtlich, dass das KWB trotz der Widrigkeiten der Gegenwart – etwa dem Corona-bedingt besonders hohen Krankenständen im Jahr 2022 – und auch im Angesicht bevorstehender Herausforderungen diesen positiven Kurs beibehält. Diese Zuversicht speist sich nicht nur aus den brandaktuellen, gesellschaftsrelevanten Themen, die das KWB vorantreibt, derer es nicht weniger werden und die es auch trotz erschwelter Rahmenbedingungen weiterhin zu fördern gilt. Auch die Expertise, der Ideenreichtum und nicht zuletzt die Motivation und Leidenschaft der Mitarbeitenden am KWB lassen uns positiv in die Zukunft blicken. Wir danken den Beschäftigten und dem Management für ihre wichtige und wirkungsvolle Arbeit. Nicht nur lässt sie uns hoffnungsvoller in die Zukunft blicken, sie eröffnet Räume und motiviert uns zu einer noch engeren Zusammenarbeit.

Frank Bruckmann

Finanzvorstand Berliner Wasserbetriebe,
Vorsitzender der Geschäftsführung Berlinwasser Holding GmbH

Nicolas Zimmer

Vorstandsvorsitzender Technologiestiftung Berlin

Executive Summary

Die Arbeit des KWB ist in ihrer Relevanz und Wirkung kaum zu überschätzen. Das gilt 2022 vielleicht mehr als je zuvor und wird sich zukünftig noch weiter steigern. Nein, nicht Hybris lässt mich so in diesen Jahresbericht einsteigen. Es sind vor allem die Klimaveränderung und die damit einhergehenden vielgestaltigen Krisen des Wassers, die die Arbeit des KWB immer wichtiger werden lassen.

Geschäftsführer
Jochen Rabe



Der Klimawandel ist kein Zukunftsszenario mehr, er manifestiert sich bereits im Hier und Jetzt in extremen Starkregenereignissen, immer häufiger ausbrechenden Flutkatastrophen und zugleich immer länger andauernden Hitze- und Dürreperioden, die sich unter anderem auch auf das Grundwasser und damit auf unsere Trinkwasserversorgung auswirken. Die Corona-Pandemie und der Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine verstärken das Gefühl, dass die Welt aus den Fugen zu geraten droht noch zusätzlich. Überall nur Krisen scheint es.

Doch am KWB stecken wir unsere Köpfe nicht in den Sand. Wir richten unseren Blick lieber in die Zukunft, denn die vielfältigen enormen Herausforderungen entlang des Wasserkreislaufs sind vielmehr Triebfeder unseres Ideenreichtums und Tatendrangs und wir leisten gleichermaßen mit Bedacht und Entschlossenheit unseren Anteil, um sie zu meistern. Einen Einblick, was dies konkret bedeutet, liefert Ihnen dieser Jahresbericht.

In unserem ersten Artikel geht es um die Rolle von belastetem Regenwasser und darum, wie ein Wandel zur wassersensiblen, resilienten Stadt mit all ihren Vorteilen für Daseinsvorsorge, Umwelt und Lebensqualität gelingen kann (siehe Seite 10). Erfahren Sie, wie unsere Forschung entscheidend dazu beiträgt, Knowhow zu Quellen, Effekten und möglicher Minderung der stofflichen Belastung von Regenwasser aufzubauen und dieses mit den Ansprüchen der wassersensiblen Stadt zu verknüpfen. Die Vision grün-blauer moderner Städte kann Realität werden und ist, auch Dank unseres Engagements, auf einem guten Weg dahin!

Die im Artikel erwähnten Forschungsprojekte stehen exemplarisch dafür, dass wir für Berlin einen wichtigen Beitrag leisten und in den letzten Jahren viele bedeutende Projekte entwickeln und akquirieren konnten. Mit unseren Forschungsaufträgen bringen wir in Berlin für zentrale Stakeholder aus Politik, Verwaltung, landeseigenen Unternehmen und der Privatwirtschaft einen wichtigen Anteil an Zuwendungen ein – zugleich reichen unsere Arbeit und ihre Wirkung weit über die Stadtgrenzen hinaus. Exemplarisch steht dafür auch das europäische Großprojekt NextGen, das sich mit der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft

beschäftigt hat und dessen Ergebnisse wir im zweiten Artikel dieses Jahresberichts ab Seite 16 vorstellen. Durch unsere Zusammenarbeit mit zahlreichen europäischen Partnerinstitutionen konnten wir kreislaufwirtschaftliche Lösungsansätze entwickeln, um sowohl gesundheitlich unbedenkliches Wasser zur Bewässerung und zur Grundwasseranreicherung zu produzieren als auch qualitativ hochwertige Dünger für die Landwirtschaft herzustellen.

Während NextGen kurz vor dem Abschluss steht, sind unsere großen EU-Green-Deal-Projekte IMPETUS und PROMISCES in vollem Gange. Ersteres beschäftigt sich unter anderem mit den Auswirkungen des Klimawandels auf das regionale Wassermanagement und wir sind stolz, dass wir die Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz als aktive lokale Konsortialpartnerin gewinnen konnten. Letzteres untersucht PFAS und weitere Verbindungen als Gefahr für die Kreislaufwirtschaft. Zu diesen und weiteren Projekten können Sie Neuigkeiten ab Seite 28 lesen. In ihrer Summe demonstrieren sie unser Verständnis von der erfolgreichen Anwendung und Skalierung von Forschungsergebnissen sowie unsere Fähigkeit, deren wirtschaftliche, ökologische und soziale Folgen bestimmen und optimieren zu können. Dieser holistische Blick kommt uns auch bei Problemstellungen und Forschungsprojekten rund um die Digitalisierung und die Smart City zugute. Ein wichtiger Aspekt – gewissermaßen die Kehrseite der Chancen der Digitalisierung – wird dabei ab Seite 22 in unserem Artikel zur Cybersicherheit beleuchtet. Auch in Deutschland berichten Wasserbetriebe, dass in den letzten Jahren die digitalen Angriffsversuche stark zunahmen. Um weiterhin die Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit kritischer Infrastrukturen sichern zu können, spielt die Cybersicherheit zukünftig eine herausragende Rolle. Entsprechend stellen wir im Artikel unseren jüngst veröffentlichten Cybersicherheits-Bericht vor, der neben einer umfassenden Literaturrecherche und Problembeschreibung vor allem eine Reihe von Handlungsempfehlungen als Diskussionsgrundlage gibt, die Anlagenbetreibern auf dem Weg hin zu cybersicheren Infrastrukturen helfen sollen. Damit schaffen wir eine wichtige Grundlage für widerstandsfähigere

Wasserinfrastrukturen und damit für die Resilienz unserer Städte. Dem Zusammenspiel von Resilienz und Digitalisierung widmet sich außerdem eine Begleitstudie im Rahmen der Koordinierungs- und Transferstelle Smart Cities (KTS) des Förderprogramms Modellprojekte Smart Cities (MPSC) mit dem Titel „Resilienz in der Smart City“. Die Studie fragt danach, was die Digitalisierung konkret leisten kann, um die Resilienz einer Stadt zu erhöhen und was nötig ist, um eine nachhaltige Transformation zu ermöglichen. Mehr dazu erfahren Sie auf Seite 40. Neben der wissenschaftlichen Begleituntersuchung sind wir im MPSC-Förderprogramm selbst aktiv an zwei Berliner Projekten beteiligt: Der Startschuss zu den Modellprojekten Data Governance und Smart Water ist kürzlich gefallen, bei denen uns sicher auch mein Einsatz in der Beratung des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen sowie der Berliner Senatskanzlei zu Richtlinien- und Strategieentwicklung zugutekommt.

Im zweiten großen Abschnitt des Jahresberichts, wagen wir es, rauszuschwimmen und einen Blick in die Zukunft zu werfen. Den Auftakt ab Seite 50 bildet dabei die Basis für unsere Zukunft: das Grundwasser. Für die Trinkwasserversorgung ist das Grundwasser, das tief im Boden verborgen liegt, essentiell. Um das Bewusstsein für diese wertvolle Ressource auch in der Bevölkerung zu wecken, entwickelten wir im EU-Projekt digital-water.city neben zahlreichen weiteren Lösungen die Augmented-Reality-App „Grundwasser sichtbar machen“, die Wissen über die Geologie und das Grundwasser in Berlin interaktiv vermittelt. Die App erweitert die traditionellen Visualisierungen zu räumlichen, interaktiven Ansichten für ein breites Publikum. Zugleich bietet unsere Arbeit neue Ansätze zur Darstellung komplexer Informationen, die für die Reproduzierbarkeit von Forschungsergebnissen von entscheidender Bedeutung sind und komplexen numerischen Modellen eine neue quasi-physische Dimension verleihen.

Komplexe numerische Modelle sind auch das passende Stichwort für den nächsten Artikel zum Geometric Deep Learning und graphenbasierten neuronalen Netzen ab Seite 54. Mit unserer neuen Forschungs-

gruppe Hydroinformatik haben wir 2022 eine Querschnittsgruppe am KWB gegründet, die abteilungsübergreifend Lösungen entwickelt, um vor dem Hintergrund der Digitalisierung unsere bestehenden Systeme und Ressourcen besser zu nutzen. Im Artikel werden die Digitalisierungspotenziale detailliert erläutert und zugleich erklärt, wie wir diese konkret realisieren möchten. Als Beispiel sei hier unser Alterungsprognosetool für Abwasserkanäle SEMAplus genannt, das von der Übertragbarkeit, dem Auffüllen fehlender Daten oder der Entwicklung neuer Algorithmen für die Zustandsprognose von Kanalhaltungen zum Ziel einer resilienten, ressourcenschonenden Stadtentwicklung beiträgt. Einen vertiefenden Bericht zu SEMAplus finden Sie außerdem auf Seite 42, der neben unserer Kooperation mit der Stadt Lausanne und der damit wachsenden SEMAplus-Community auch die Potenziale für unsere Trinkwassernetze in den Blick nimmt. Und wo wir schon bei der Digitalisierung sind, sei an dieser Stelle die bei Redaktionsschluss unmittelbar bevorstehende Online-Konferenz BLUE PLANET Berlin Water Dialogues erwähnt, die wir in diesem Jahr erstmals federführend organisieren und in deren Fachbeirat ich vertreten bin. Die Konferenz, die sich dieses Mal mit Künstlicher Intelligenz im Wassersektor beschäftigt, bringt mehrere hundert internationale Vertreter:innen von Regierungen, Nichtregierungsorganisationen, Forschung und Wissenschaft sowie internationalen Entscheidungsträger:innen aus den Bereichen Industrie, Energie und Landwirtschaft zusammen und bietet Möglichkeiten zur Vernetzung, zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und zur potenziellen Anbahnung neuer Forschungs- und Entwicklungs-Kooperationen.

Schließlich rundet der letzte Artikel zur Zukunft der Wasserwiederverwendung ab Seite 58 den Überblick über unsere Arbeit ab. Selbstbewusst können wir uns als Vorreiter:innen auf dem Gebiet der Wasserwiederverwendung bezeichnen: Nach beinahe 10 Jahren Arbeit auf europäischer Ebene freuen wir uns, das Thema nun auch in Deutschland in verschiedenen Forschungsprojekten voranzubringen. Und gewissermaßen schließt sich auch hier der Kreis zu meiner Einleitung, denn vor dem Hintergrund sich reduzierender Wasserressourcen aufgrund des sich ändernden

den Klimas, kann die Wasserwiederverwendung einen Schlüsselbeitrag leisten.

Das KWB ist trotz der unsicheren Zeiten gut aufgestellt und wir blicken mit Einfallsreichtum, Mut und Zuversicht in die Zukunft. Dieser positive Ausblick ist zum einen der überaus erfolgreichen wirtschaftlichen Entwicklung am KWB im Jahr 2022 geschuldet – und auch für die kommenden Jahre konnten wir bereits einen guten Zuwachs an Projektmitteln sichern. Zum anderen ist der Optimismus unseren Mitarbeitenden zu verdanken, die sich engagiert, kompetent und wissenshungrig dafür einsetzen, zukunftsweisende nationale und internationale Forschungsprojekte für das KWB zu akquirieren und zu bearbeiten. Wer hinter der Arbeit des KWB steckt und wie die Arbeit der angewandten Wissenschaft hinter den Kulissen eigentlich aussieht, ist übrigens Dank des fantastischen Auges unserer Fotografin Iryna Dazhura aus der Ukraine zu sehen – lernen Sie unser Team ab Seite 66 besser kennen und begleiten Sie uns auf unserem letzten Betriebsausflug.

Ich wünsche Ihnen viel Freude bei der Lektüre unseres Jahresberichts, der Sie hoffentlich im Angesicht der zahlreichen Herausforderungen rund um Wasser und Stadt, Klimawandel und Digitalisierung inspiriert und Sie an unserem pragmatischen Optimismus teilhaben lässt.



Jochen Rabe

Geschäftsführer | Oktober 2022

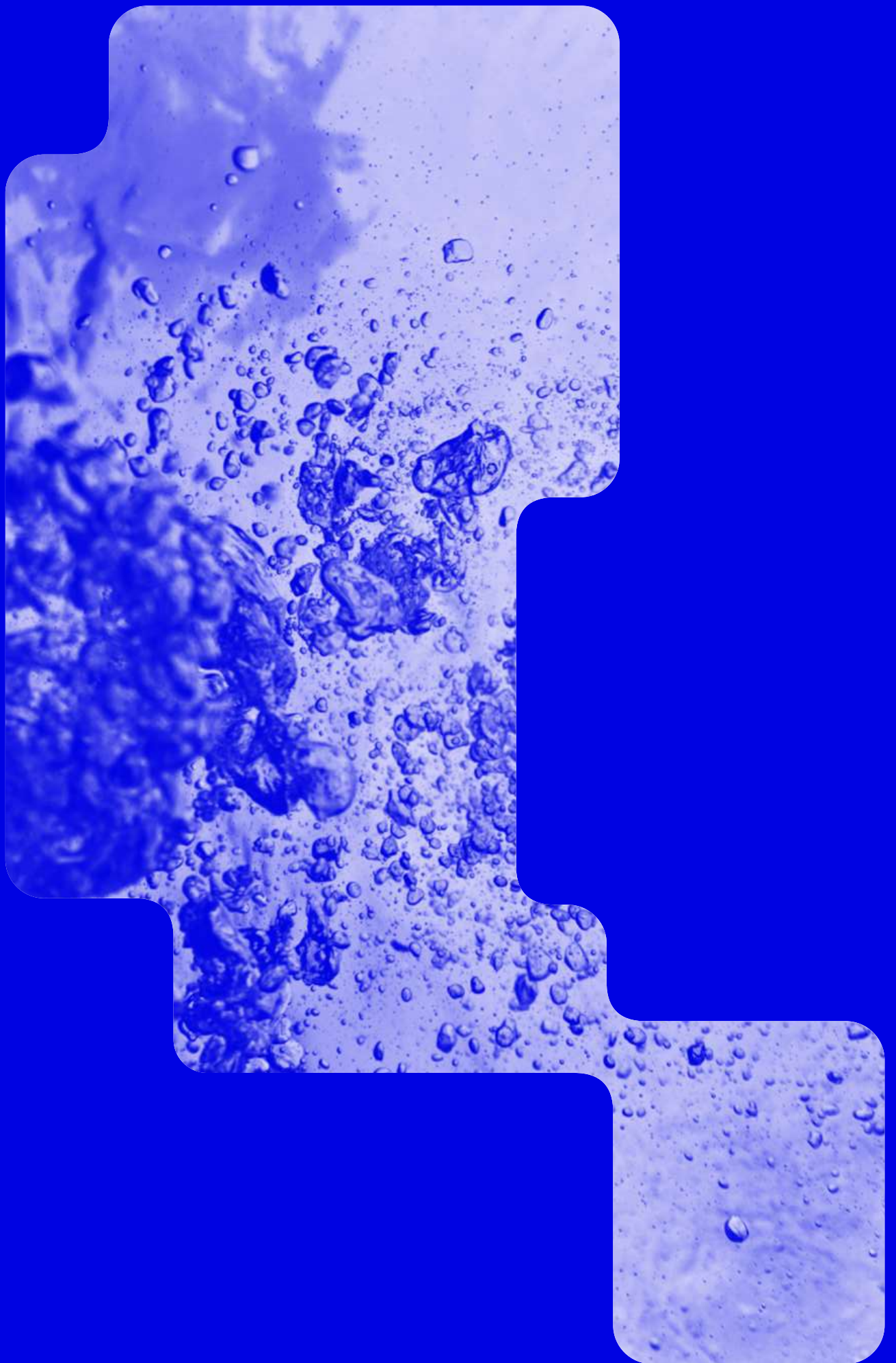


Eintauchen

Tauchen Sie mit uns in die jüngsten Entwicklungen und Forschungsergebnisse am KWB ein. Es erwarten Sie Regenwasser in der wassersensiblen Stadt, innovative Technologien für die Kreislaufwirtschaft, unser Bericht zur Cybersicherheit sowie eine Auswahl aktueller Projekte.

Was uns 2022 beschäftigte, erfahren Sie in folgenden Artikeln:

- ▶ Was bedeutet die Belastung von Regenwasser für die wassersensible Stadt?
- ▶ Wie nachhaltig ist die Kreislaufwirtschaft?
- ▶ Neue Herausforderungen: Cybersicherheit im Wassersektor
- ▶ Projektauswahl



Was bedeutet die Belastung von Regenwasser für die wassersensible Stadt?

Dr. Daniel Wicke

Dr. Andreas Matzinger

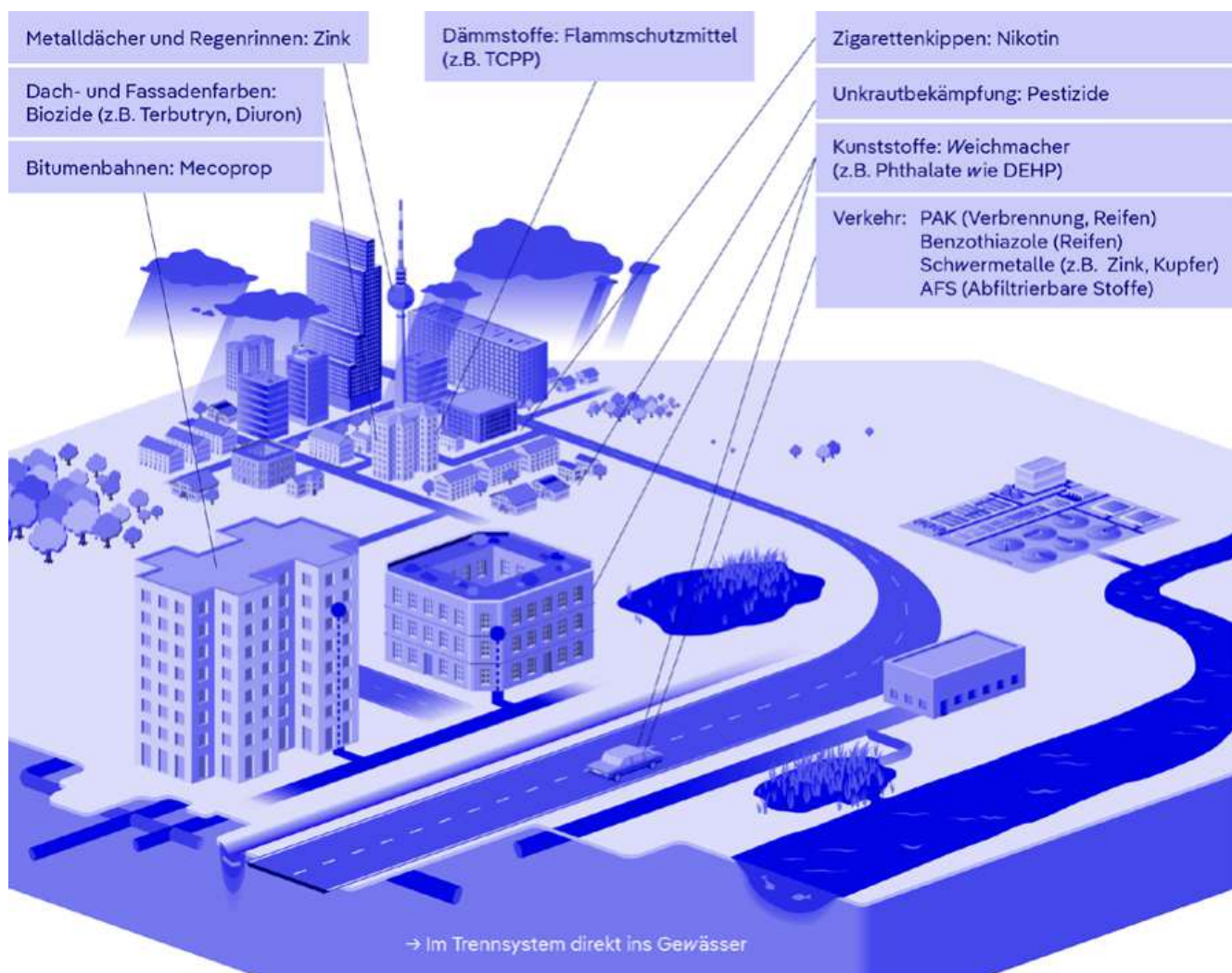


Abb. A: Quellen von Schadstoffen, die in städtischen Regenwasserabfluss gelangen

Der Wandel der klassischen Stadtentwässerung ist in vollem Gange und folgt dabei der grün-blauen Vision einer modernen, wassersensiblen Stadt. Der Paradigmenwechsel verfolgt viele Ziele, vom Gewässerschutz über die Aufenthaltsqualität bis zur biologischen Vielfalt. Die oft verschlechterte Qualität des Regenwassers wird dabei aber kaum betrachtet, obwohl sie die positiven Potenziale der wassersensiblen Stadtentwicklung wie Regenwassernutzung oder Stützung des Grundwasserspiegels durch Versickerung mindern kann. Arbeiten des KWB zeigen hier einen zukünftigen Forschungsbedarf auf der einen und eine Lücke in der Umsetzung auf der anderen Seite.

„Der Wandel der Stadtentwässerung zur wassersensiblen Stadt bringt unbestritten viele Vorteile für Umwelt und Lebensqualität in urbanen Räumen und ist unbedingt zu fördern. Wichtig ist, dass die Vorteile nicht durch belastetes Regenwasser gemindert oder sogar ins Gegenteil verkehrt werden.“

Belastungen des Regenwasserabflusses

In der Stadt kommt Regen mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Oberflächen und Materialien in Kontakt, deren stoffliche Bestandteile dabei aus- und abgewaschen werden. Wie in zahlreichen Studien in den letzten Jahren gezeigt werden

konnte (u.a. in den KWB-Projekten OgRe und BaSaR), gelangt auf diese Weise eine Vielzahl an Stoffen in den Regenwasserabfluss: Biozide aus Baumaterialien, Schwermetalle wie Zink und Kupfer von Metalldachflächen und Verkehrsflächen, Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) aus Verbrennungsrückständen z.B. des Verkehrs, Nikotin aus Zigarettenkippen oder Pestizide wie Glyphosat aus der Unkrautbekämpfung, um nur einige Beispiele zu nennen. Auch Weichmacher aus Kunststoffmaterialien oder Flammschutzmittel wurden in relevanten Konzentrationen im Regenwasserabfluss gefunden.

All diese Stoffe gelangen im Trennsystem, wenn der Regenwasserabfluss separat vom Abwasser abgeleitet wird, direkt und meist unbehandelt in die Oberflächengewässer. In Berlin macht das etwa 70 % des gesamten Regenwasserabflusses aus, der auf direktem Weg in Flüsse und Seen geleitet wird. In den Gewässern gelten für eine Reihe von Schadstoffen zulässige Maximalwerte (Umweltqualitätsnormen – UQN), die zumindest im Regenabfluss teilweise deutlich überschritten werden. Nun kommt es auf die Verdünnung im Gewässer an, ob diese UQN auch im Gewässer überschritten werden. Wie in [Abbildung B](#) zu sehen, sind für einige Stoffe Verdünnungen um den Faktor 5-10 und höher notwendig, wie z.B. bei den gelösten Schwermetallen Zink und Kupfer oder dem PAK Benzo[b]-fluoranthen, damit es im Gewässer nicht zu UQN-Überschreitungen kommt. Dies zeigt die Relevanz der Regenwassereinträge gerade bei kleineren urbanen Gewässern, die bei Regen durchaus einen Anteil von Regenabfluss von mehr als 50 % erhalten mit einer entsprechend niedrigen Verdünnung. Eine Reduktion der Einträge ist deshalb aus Sicht des Gewässerschutzes notwendig. ►

Fokus auf die **wassersensible Stadt**

Die wassersensible Stadtentwicklung führt in der Regel zu einer Abkopplung des Abflusses von Regenwasser von versiegelten Flächen vom Kanal und schützt dadurch urbane Fließgewässer direkt vor solchen Belastungssituationen. In Berlin wird diese Entwicklung durch die Koalitionsvereinbarung der aktuellen Landesregierung stark befördert. Bereits in der letzten Legislaturperiode wurde die Berliner Regenwasseragentur ins Leben gerufen, die die wassersensible Stadtentwicklung durch Informationen, Beratungen, Veranstaltungen und Vernetzung vorantreibt. Auch national und international ist eine ähnliche Entwicklung festzustellen: Nature Based Solutions NBS (EU), Low Impact Development LID (USA), Sustainable Urban Development SUD (GBR), Schwammstadt (VR China), Water Sensitive Urban Design WSUD (Australien) oder dezentrale Regenwasserbewirtschaftung (DE) sind Begriffe, die internationale Anstrengungen im Zusammenhang mit wassersensibler Stadtentwicklung beschreiben. Das KWB unterstützt diese Anstrengungen durch Modellierung und systematische Bewertung der Maßnahmeneffekte sowie die Entwicklung und Anwendung von Planungsmethoden und Planungshilfsmitteln, wie beispielsweise Maßnahmenkarten (BMBF-Projekte KURAS und netWORKS4).

Auch wenn die Maßnahmen und Ziele zwischen Städten und Ländern variieren, steht generell die Idee im Fokus, das Niederschlagswasser vor Ort zu bewirtschaften. Je nach Zielstellung sollen dadurch neben dem Gewässerschutz die Bewässerung von

Stadtgrün, die Verbesserung der Aufenthaltsqualität und des Stadtklimas, die Versorgung von Grundwasser/Kleingewässern oder weitere Nutzungen (z.B. sanitär, Schwimmteiche etc.) angestrebt werden.

Wie sensibel reagiert die wassersensible Stadt auf stoffliche Belastungen des Regenwassers?

Die stoffliche Belastung des Niederschlagswassers verschwindet aber nicht einfach durch eine Abkopplung der versiegelten Flächen vom Kanalsystem. Vielmehr wird sie verlagert. Die Bedeutung dieser Verlagerung ist für den gesamten Stoffcocktail noch unbekannt, es gibt aber bereits Erkenntnisse für verschiedene Inhaltstoffe.

„Die gute Nachricht ist, dass es bereits eine Vielzahl wirksamer Maßnahmen gibt, mit denen Einträge von Schadstoffen in Regenwasserabfluss und die Gewässer reduziert werden können.“

Bei der Versickerung von Regenwasserabfluss besteht ein grundsätzliches Risiko einer Verlagerung in Boden oder Grundwasser. Für die gelösten Schwermetalle von Metalldächern und für Biozide aus Baustoffen wurde durch verschiedene Forschungsgruppen gezeigt, dass diese Stoffe im Boden nicht



Regenwassergespeicher Teich an der Berliner Mälzfabrik

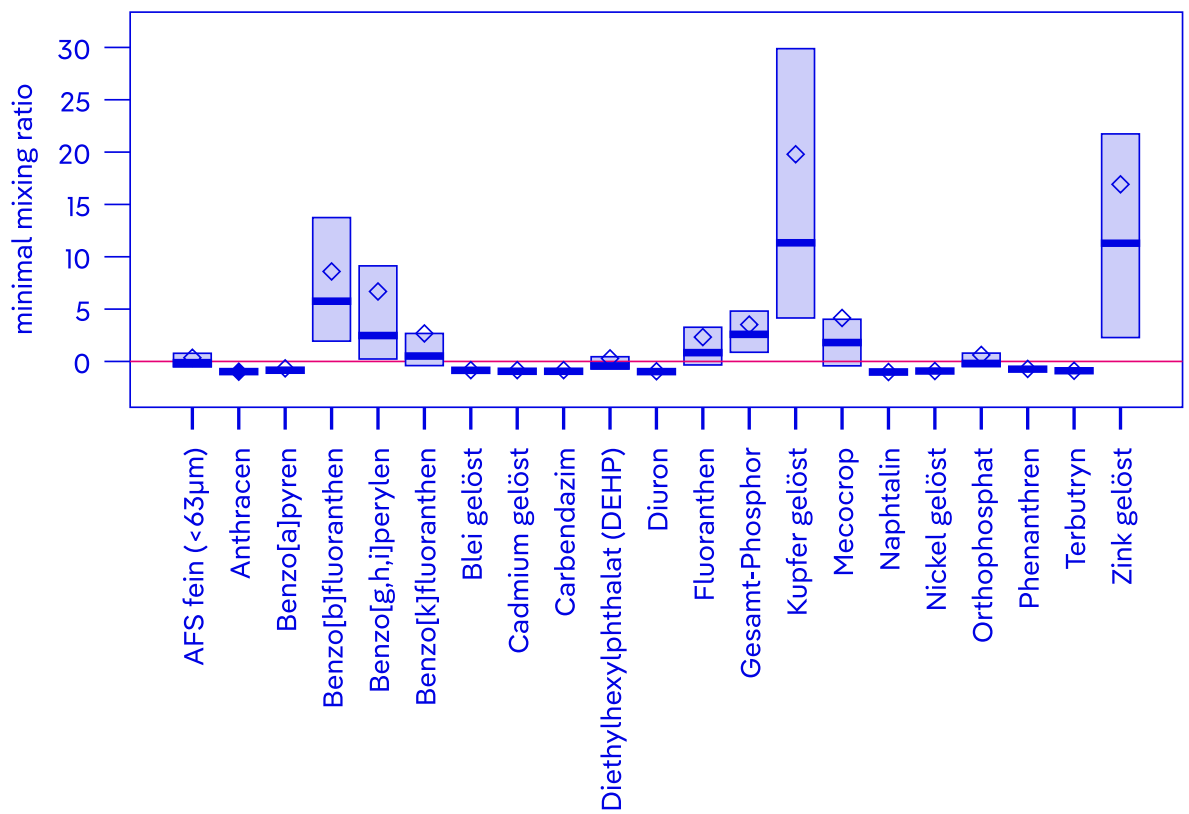


Abb. B: Minimales Mischungsverhältnis zwischen unbelastetem Flusswasser und belastetem Regenwasser, um Umweltqualitätsnormen einzuhalten. Die Boxen zeigen jeweils die mittleren 50% der Messwerte aus dem Projekt OgRe, die Rauten sind Mittelwerte, die Linien Mediane.

ausreichend zurückgehalten werden und ins Grundwasser gelangen können. Erkenntnisse zum Verbleib im Grundwasser fehlen aber noch weitestgehend. Vorsorglich hat Berlin etwa das Versickern von Regenwasser von biozidhaltigen Gebäudeflächen genehmigungspflichtig gemacht (siehe Berliner Niederschlagswasserfreistellungsverordnung).

Soll gesammeltes Regenwasser für Brunnen/Wasserspiele oder die Toilettenspülung genutzt werden, wird aktuell die hygienische Belastung betrachtet, z.B. bei Regenwasserabfluss von Gehsteigen (etwa durch Tierkot). Im Falle einer Bewässerung mit Regenwasser sind vor allem Biozide (aus Baustoffen) sowie gelöstes Kupfer (z.B. aus Dachrinnen oder Dachbeschlägen) problematisch, da sie das Wachstum der bewässerten Pflanzen negativ beeinflussen. Daneben können aber auch weitere Belastungen wie Straßensalz negative Auswirkungen haben.

Für viele Stoffe und Maßnahmen gibt es dagegen keinerlei Erkenntnisse. Mit Ausnahme von Straßen- und Gehwegsabflüssen fällt aber auf, dass Belastungen oft auf derselben Liegenschaft anfallen, wo auch das Wasser bewirtschaftet werden soll.

Die Lösung liegt so nah

Die gute Nachricht ist, dass es bereits eine Vielzahl wirksamer Maßnahmen gibt, mit denen Einträge von Schadstoffen in Regenwasserabfluss und die Gewässer reduziert werden können. So haben wir im Projekt BaSaR drei Maßnahmensteckbriefe entwickelt, die eine Reihe konkreter Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen von Fassaden, Dächern und Grundstücken enthalten. Diese können insbesondere bei Neubauten oder größeren Sanierungen eingesetzt werden. So können beispielsweise Gründächer mit Abdichtungen ohne chemische Durchwurzelungsschutzmittel realisiert werden oder konstruktionsbedingter Witterungsschutz wie ein ausreichender Dachüberstand kann verhindern, dass Regen an die Fassade gelangt. Auch die Wahl der Baumaterialien für Fassaden hat einen großen Einfluss. Dabei sind Maßnahmen zur Vermeidung der Schadstoffeinträge (z.B. die Wahl von Bauprodukten mit keinen oder geringen Emissionen) End-of-Pipe-Maßnahmen (z.B. die Behandlung von belastetem Regenwasser mit Filtern) vorzuziehen.

Die Steckbriefe sind vom Umweltbundesamt (UBA) als Auftraggeber der Studie veröffentlicht und können bei frühzeitiger Berücksichtigung in Planungsprozessen eine Reduktion von Emissionen aus Gebäuden von schätzungsweise mehr als 90% bewirken. Wenn das Regenwasser vor Ort bewirtschaftet werden soll, ist eine Berücksichtigung möglicher Belastungen besonders sinnvoll, um die Nutzungen des Regenwassers nicht einzuschränken.

Die Entwicklung neuer Produkte durch Firmen kann ebenfalls zur Reduktion von Emissionen beitragen. Im Projekt SpuR haben wir dazu zusammen mit zwei Firmenpartnern erfolgreich zwei innovative Lösungen demonstriert: eine Fassadenfarbe mit schnell in der Umwelt abbaubaren Wirkstoffen sowie einen Regenfilter mit neu entwickeltem Substrat, das auch organische Spurenstoffe wie Biozide zu über 90% entfernt.

Wie geht es weiter

Ziel ist es, möglichst wenige Schadstoffe von städtischen Oberflächen in die Umwelt gelangen zu lassen, damit wassersensible Städte mit sauberem Gewässern gedeihen können. Dies kann nur mit gemeinsamen Anstrengungen gelingen. Auch müssen noch Wissenslücken geschlossen werden - so gibt es zur Relevanz belasteter Regenwasserabflüsse für Boden, Grundwasser und Nutzung noch einigen Forschungsbedarf. Zudem sind das Stoffverhalten sowie die Wechselwirkung der Stoffe in den Maßnahmen selbst nur wenig untersucht.

Aus Praxissicht gilt es zum einen, Planungshilfen zu verknüpfen. Das KWB hat sowohl zu Planungshilfen einer Reduktion von Bioziden bei gebäudeseitigen Maßnahmen (BaSaR-Steckbriefe im Auftrag des UBA) als auch zu Planungshilfen für Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung (KURAS-Steckbriefe und netWORKS4-Maßnahmenkarten) beigetragen. Diese lassen sich auch gut kombinieren. Entsprechend bieten wir Beratungsleistungen auf Grundlage unserer umfassenden Erfahrungen an. Zum anderen ist es wichtig, Investoren und Bauunternehmen sowie Produzenten von Baumaterialien ins Bewusstsein zu rufen, dass durch die verstärkte, sinnvolle und lokale Bewirtschaftung von Regenwasser und potenziell weiteren Wasserquellen auch höhere Anforderungen an die Umweltverträglichkeit von Baustoffen gestellt werden müssen.

Bei urbanen Kleinseen trifft das wassersensible Potenzial des Regenwasserabflusses als Wasserquelle direkt auf das Belastungsrisiko. Zum einen

benötigen urbane Kleinseen einen ausreichenden Zufluss, um ihre Ökosystemleistungen weiter erfüllen zu können. Regenwasserabfluss der umliegenden urbanen Flächen bietet sich dabei als Quelle an. Zum anderen führt ungereinigter Regenwasserabfluss von teilweise stark belasteten Flächen zu einer problematischen Belastung der Seen, etwa mit Nährstoffen oder (akkumulierenden) prioritären Spurenstoffen. Seit September 2022 widmet sich das KWB diesem Dilemma im EU-Projekt AD4GD (All data for green deal). Ziel ist es, datengetriebene seespezifische Lösungsansätze vorzuschlagen.

„Knowhow zu Quellen, Effekten und möglicher Minderung der stofflichen Belastung von Regenwasser und die Verknüpfung mit den Ansprüchen der wassersensiblen Stadt sind eine wichtige Basis der Umsetzung einer grün-blauen Vision moderner Städte.“

Der Wandel der Stadtentwässerung zur wassersensiblen Stadt bringt unbestritten viele Vorteile für Umwelt und Lebensqualität in urbanen Räumen und ist unbedingt zu fördern. Wichtig ist, dass die Vorteile nicht durch belastetes Regenwasser gemindert oder sogar ins Gegenteil verkehrt werden. Maßnahmen der Vermeidung oder Behandlung der stofflichen Belastung von Regenwasserabfluss sollten entsprechend bei der Umsetzung der wassersensiblen Stadt mitgedacht werden. Knowhow zu Quellen, Effekten und möglicher Minderung der stofflichen Belastung von Regenwasser und die Verknüpfung mit den Ansprüchen der wassersensiblen Stadt sind deshalb eine wichtige Basis der Umsetzung einer grün-blauen Vision moderner Städte. ●



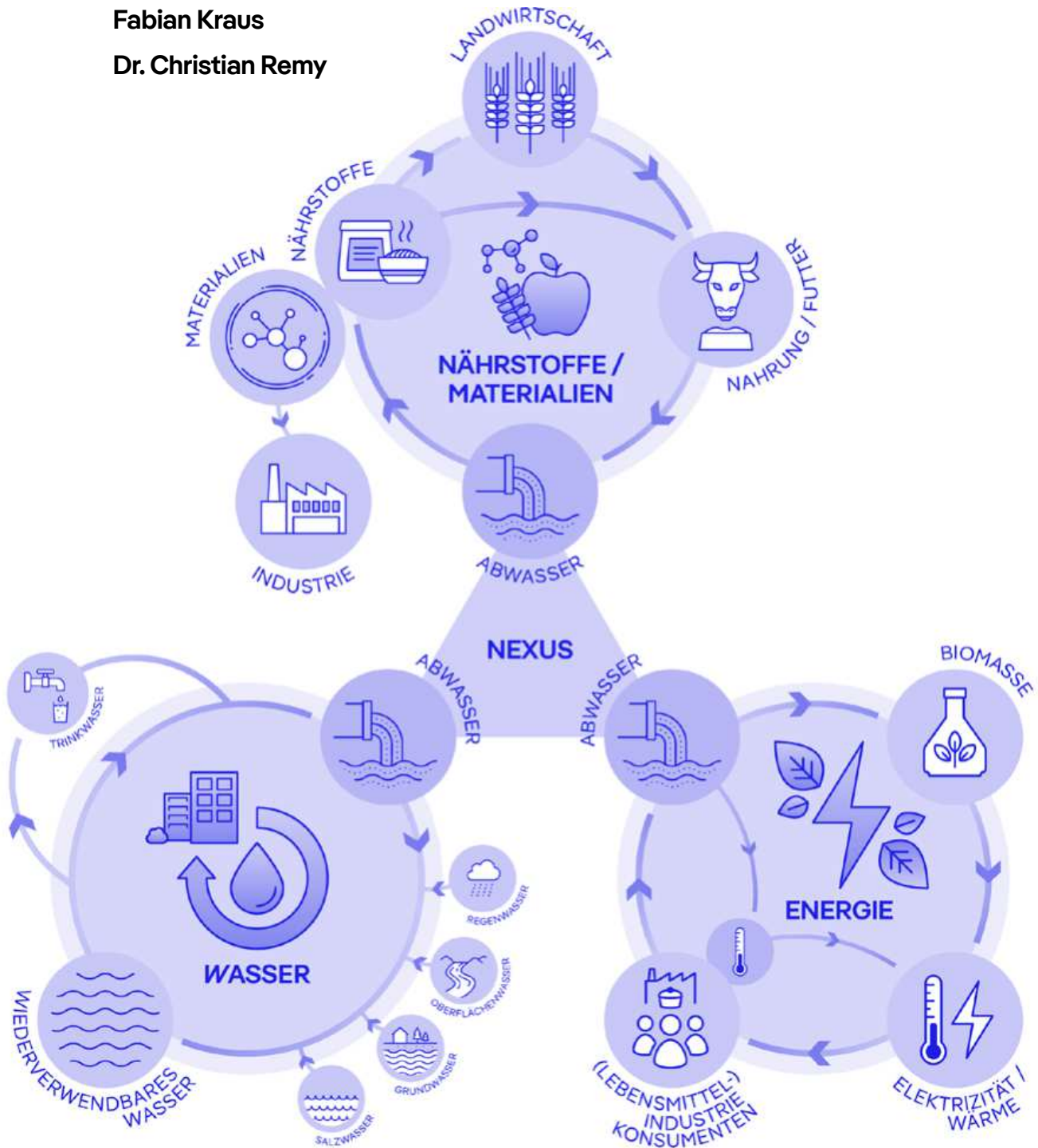
Wie nachhaltig ist die Kreislaufwirtschaft?

Innovative Technologien aus unserem Projekt NextGen

Dr. Anne Kleyböcker

Fabian Kraus

Dr. Christian Remy



Synergien in der Kreislaufwirtschaft: Abwasser ist nicht nur eine Ressource zur Rückgewinnung von wiederverwendbarem Wasser, sondern enthält z.B. auch Nährstoffe und Energie, die zurückgewonnen werden können.

Auch das Jahr 2022 wird wieder eines der heißesten, trockensten und sonnigsten in Deutschland und Europa seit Beginn der Wetteraufzeichnungen gewesen sein. Aufgrund des voranschreitenden Klimawandels ist zu erwarten, dass die erhöhten Temperaturen und sich verändernde Niederschlagsverteilungen der neue Normalzustand werden. Wie können wir mit dieser Situation in Deutschland umgehen, wo bis vor wenigen Jahren die meisten Regionen kaum von Wasserknappheit betroffen waren?

„In der Kreislaufwirtschaft wird Abwasser als wertvolle Ressource betrachtet und zwar zur Wiedergewinnung von Wasser, Nährstoffen und Energie. Bei der technischen Aufbereitung von Abwasser zu wiederverwendbarem Wasser können häufig Synergien genutzt werden.“

Im kürzlich abgeschlossenen EU Horizon 2020 Projekt NextGen hat das KWB im Verbund mit 30 europäischen Partnerinstitutionen anhand von zehn Fallstudien verschiedene Lösungsansätze in Bezug auf Kreislaufschießung von Wasser, Materialien und Energie überlegt, umgesetzt und ausgewertet. Neben Ländern wie Spanien und Griechenland, die schon seit Jahren mit Wasserknappheit zu kämpfen haben, waren auch Rumänien, Schweden, die Niederlande, die Schweiz und Großbritannien beteiligt.

In der Kreislaufwirtschaft wird Abwasser als wertvolle Ressource betrachtet und zwar zur Wiedergewinnung von Wasser, Nährstoffen und Energie. Bei der technischen Aufbereitung von Abwasser zu wiederverwendbarem Wasser können häufig Synergien genutzt werden, sodass gleichzeitig bestimmte im Abwasser enthaltene Ressourcen wie Nährstoffe und/oder Energie in Form von Wärme oder Biomasse zurückgewonnen werden können.

Vier Jahre lang haben wir die Fallstudie in Deutschland (Braunschweig) wissenschaftlich begleitet, verschiedene Ansätze der Kreislaufwirtschaft in ihrer Nachhaltigkeit für die Umwelt bewertet und auch untersucht, ob durch die Schließung von Kreisläufen Risiken für Mensch und Umwelt entstehen können.

Wasserwiederverwendung gegen Wasserknappheit

In den Fallstudien aus Spanien (Costa Brava) und Griechenland (Athen) wurde untersucht, wie durch die Nutzung von weitgehend gereinigtem Abwasser eine Wiederverwendung für die Bewässerung oder zum Auffüllen der natürlichen Grundwasserressourcen möglich ist. An der Costa Brava konnte von spanischen Partnerinstitutionen gezeigt werden, dass die relativ hohen Kosten von Membranverfahren durch die Wiedernutzung gebrauchter Module deutlich gesenkt werden können. Die Qualität des gereinigten Wassers erfüllt dabei trotzdem die hohen Anforderungen zur Grundwasseranreicherung in Spanien. Energetisch ist die Wasserwiederverwendung gegenüber der Entsalzung von Meerwasser deutlich sparsamer und verursacht daher auch weniger Treibhausgasemissionen, insgesamt also eine nachhaltige Lösung.

In Athen wurde ein dezentraler Ansatz getestet, bei dem Abwasser direkt aus dem Kanal „abgezapft“ und vor Ort in einem Membranbioreaktor gereinigt wird. Mit dem aufbereiteten Wasser kann der Frischwasserbedarf einer Baumschule gedeckt werden, allerdings auf Kosten von höherem Energieverbrauch gegenüber der zentralen Wasserversorgung. Damit die Klimabilanz durch diesen Ansatz nicht stärker beeinträchtigt wird, sollten für den Betrieb also erneuerbare Energien wie Wind oder Solarstrom genutzt werden. Wichtig ist bei der Wasserwiederverwendung die gleichbleibend hohe Qualität des gereinigten Wassers: mögliche Krank- ▶



Dezentraler Ansatz für Wasserwiederverwendung in Athen: Membranbioreaktor zur Produktion von Bewässerungswasser für eine Baumschule

Prozesssteuerung des Membranbioreaktors, UV-Desinfektion & Speichertank

Membranbioreaktor

heitserreger müssen zuverlässig entfernt oder abgetötet werden, damit keine hygienischen Risiken bei der Nutzung entstehen. Durch Membranverfahren kann diese Sicherheit erreicht werden, in Athen auch in Kombination mit einer UV-Desinfektion. Die wissenschaftlich fundierte Einschätzung des möglichen Risikos aus der Wiederverwendung von gereinigtem Wasser ist hierbei von großer Bedeutung. Das KWB konnte hier mithilfe eines eigenen Tools zur Risikoabschätzung aufzeigen, dass die Vorgaben für den sicheren Betrieb in beiden Fällen erreicht werden können.

Nährstoffrecycling gegen Rohstoffverbrauch

In der Kläranlage Braunschweig werden seit 2019 in einem zweistufigen Prozess die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor aus dem hochkonzentrierten Abwasser der Schlammwässerung in Form von Düngemitteln zurückgewonnen. Es werden im Endausbauzustand sowohl Schlammwässer der Überschussschlamm-Faulung und der Mischschlamm-Faulung ganzjährig behandelt. Dies sind etwa 20 m³ Schlammwasser pro Stunde.

Als erstes wird durch eine Kohlendioxid-Stripung der pH-Wert der Schlammwässer erhöht, was die Ausfällung des Düngemittels Struvit (Ammoni-

ummagnesiumphosphat) begünstigt. Zusätzlich wird Magnesiumchlorid dosiert, um die Ausfällung zu steuern. Das Präzipitat wird in einem Sedimentationsreaktor abgetrennt. Anschließend wird der pH-Wert durch Zugabe von Natronlauge erhöht und das Schlammwasser auf 55° C erwärmt, wodurch das im Schlammwasser verbleibende Ammonium in Ammoniak umgewandelt wird. Dieses wird mithilfe von Luft aus dem Schlammwasser ausgestrippt und anschließend in einem Wäscher mit Schwefelsäure aufgefangen. Es bildet sich das Düngemittel Diammoniumsulfat.

Je nach Betriebsweise können jährlich etwa 150 bis 300 Tonnen Struvit und etwa 2.000 Tonnen Diammoniumsulfat-Lösung hergestellt werden. Dies entspricht insgesamt einer Jahresfracht von 18 bis 37 Tonnen Phosphor und 190 Tonnen Stickstoff. Bezogen auf die Kläranlagenzulaufkraft ergeben sich somit Rückgewinnungsraten von 8 bis 16 % für Phosphor und 13 % für Stickstoff. Beide Düngemittel sind sehr schwermetallarm und können in der Landwirtschaft Verwendung finden.

Als technisch schwierig erweist sich das Wachstum der Struvit-Kristalle. Diese benötigen eine gewisse Größe (und Masse), damit sie im Kristallisationsreaktor sedimentieren können. Daraufhin wurde die Dosierstrecke für Magnesiumchlorid angepasst und Analysen durchgeführt um heraus-

zufinden, welche Inhaltsstoffe aktuell das Kristallwachstum behindern.

Aus ökologischer Sicht ist insbesondere die verringerte Stickstoffbelastung der Kläranlage durch die gezielte Ausschleusung des Stickstoffs hervorzuheben. Dies führt zu geringeren Emissionen des stark klimaschädlichen Lachgases, und zudem zu besseren Ablaufwerten mit weniger Stickstoff im gereinigten Abwasser. Von der Energie- und Klimabilanz ist die Nährstoffrückgewinnung in etwa neutral, da neben den Einsparungen an Mineraldünger und Emissionen auch zusätzliche Chemikalien und Energie notwendig sind.

In Zukunft sollen die im Abwasserverband Braunschweig organisierten Landwirt:innen die Düngemittel der Kläranlage direkt verwenden. Gerade bei den aktuell hohen Düngemittelpreisen kann Nährstoffrecycling aus dem Abwasserpfad für diese attraktiv werden. Allerdings ist vor der Anwendung noch eine Weiterverarbeitung der rückgewonnenen Nährstoffe erforderlich, um sie in eine geeignete Form für den Einsatz in der Landwirtschaft zu bringen.

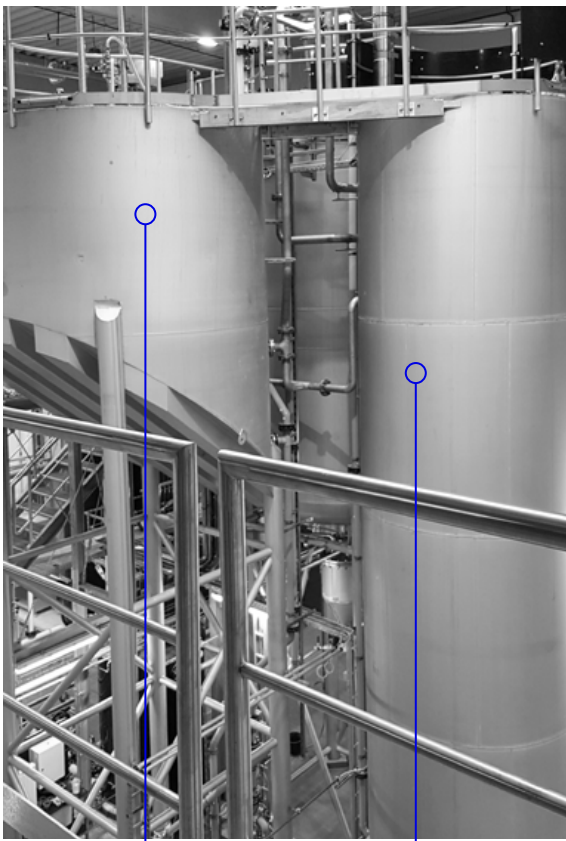
Energierückgewinnung für Klimaschutz

Die Rückgewinnung von Energie aus Abwasser und Klärschlamm stand im Zentrum der Fallstudien in Braunschweig, dem englischen Spenal und in Athen. Ein Weg zur Energienutzung ist dabei die Umwandlung von organischem Material in Biogas, ähnlich dem sauerstofffreien Prozess in einer Biogasanlage. In Braunschweig wurde dabei die vorhandene Faulung des Klärschlammes über eine

Vorbehandlung des Schlammes bei hoher Temperatur verbessert. Nach Injektion von Dampf herrschen hier Temperaturen von über 150° C, sodass der behandelte Schlamm anschließend besser zu Biogas umgesetzt werden kann. Das bedeutet mehr Energie aus dem lokalen Blockheizkraftwerk, aber auch einiges an Extraaufwand für den Dampf und weitere Behandlungsschritte. In der Gesamtbilanz zeigte sich, dass durch eine gute Integration des Systems der Klimafußabdruck um bis zu 650 Tonnen CO₂e pro Jahr gesenkt werden kann. Dazu gibt es Synergien für die Nährstoffrückgewinnung, da durch den verbesserten Abbau des Klärschlammes mehr Nährstoffe freigesetzt und zurückgewonnen werden können.

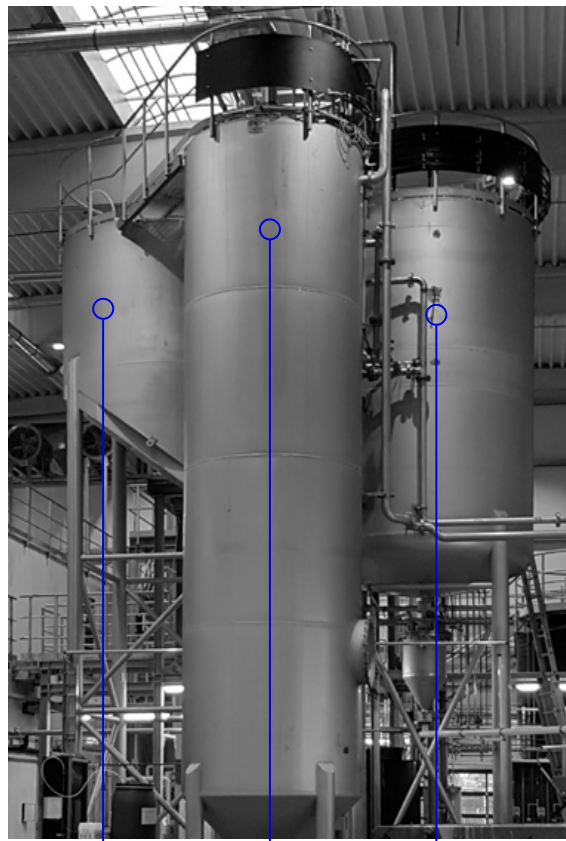
Im englischen Spenal wurde ein völlig neues Konzept für die Abwasserbehandlung demonstriert: Anstatt das Abwasser wie bisher mit reichlich Sauerstoffeintrag zu reinigen, wurde ein anaerobes, heißt sauerstofffreies Verfahren zur Abwasserreinigung eingesetzt. Dabei wird ein Großteil der organischen Substanz direkt zu Methan umgewandelt, das anschließend abgetrennt und genutzt werden kann. Die Abtrennung des noch im Wasser gelösten Methans stellte sich jedoch als Herausforderung dar: Das eingesetzte Membranverfahren verbrauchte mehr Energie, als durch das zusätzliche Biogas gewonnen wird. Besser ist es, nur das Biogas zu nutzen, das selbstständig aus dem Abwasser ausgast. Diese Konfiguration kann deutlich Energie einsparen und hat gegenüber einem normalen Klärwerksbetrieb einen um mehr als 50% reduzierten CO₂e-Fußabdruck. Auch hier gibt es Synergien mit der Nährstoffrückgewinnung: Stickstoff und Phosphor können nach einer Membranstufe über physikalische Verfahren entfernt und rückgewonnen werden. Das vermeidet auch klimaschädliche Lachgasemissionen der Kläranlage, die beim bisherigen Konzept der biologischen Stickstoffentfernung entstehen können. Ein weiterer Erfolg auf dem Weg zur Klimaneutralität.

In Athen wurde versucht, die im Abwasser enthaltene Abwärme im kleinen Maßstab vor Ort zu nutzen. Über eine Wärmepumpe kann dem gereinigten Wasser bis zu 5 K an Wärme entzogen werden, die dann für verschiedene Zwecke wie Heizung oder Warmwasser zur Verfügung steht. Wichtig ist hier die Verwendung von grünem Strom aus regenerativen Quellen für die Wärmepumpe: so werden in der Gesamtbilanz auch hier CO₂-Emissionen eingespart, wenn fossiles Erdgas zum Heizen durch Wärme aus Abwasser ersetzt werden kann. ►



Absetzreaktor für Struvitkristalle

CO₂-Strippung



Absetzreaktor für Struvitkristalle

CO₂-Strippung

Kristallisationsreaktor

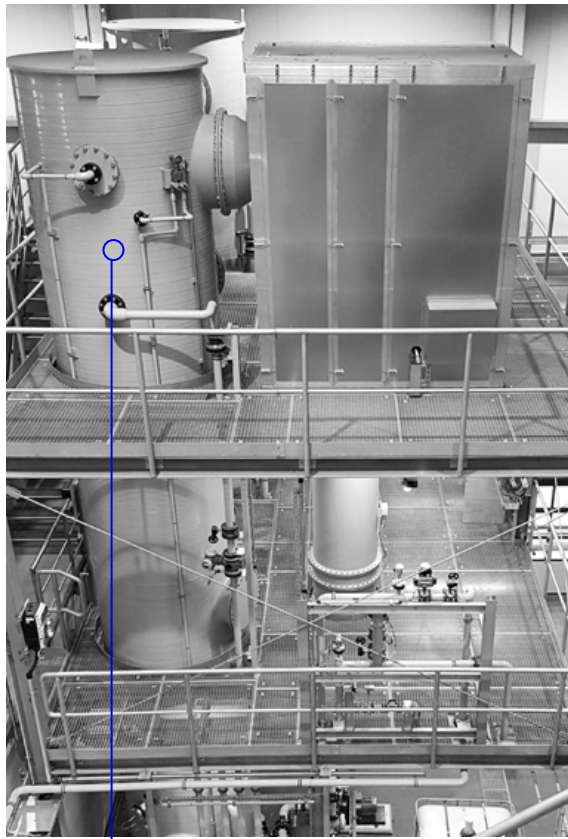
Anlage zur Phosphorrückgewinnung in Braunschweig: Struvitproduktion

Was haben wir aus NextGen gelernt?

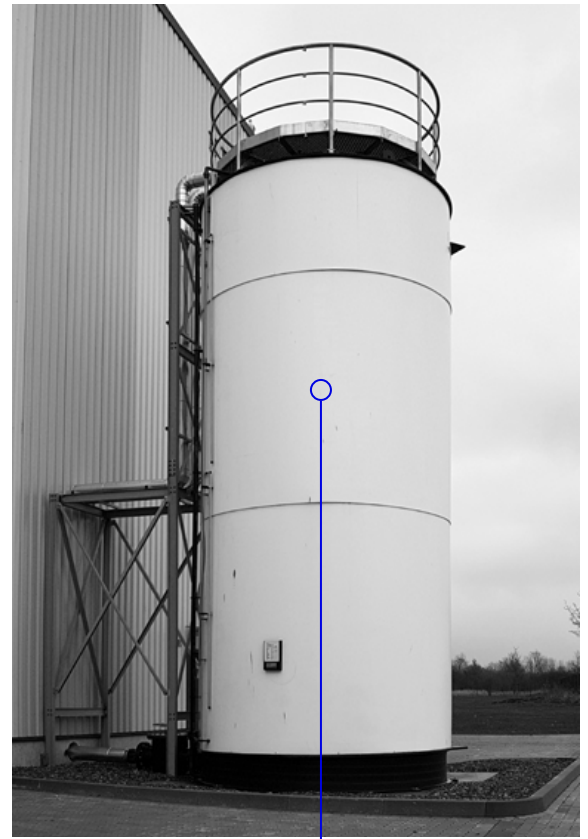
Die Risikobewertungen haben gezeigt, dass unsere kreislaufwirtschaftlichen Lösungsansätze geeignet sind, sowohl gesundheitlich unbedenkliches Wasser zur Bewässerung und zur Grundwasseranreicherung zu produzieren als auch qualitativ hochwertige Dünger herzustellen. Die NextGen-Technologien erlauben zudem eine immer effizientere Rückgewinnung von regenerativen Energien. Dennoch weist die Nachhaltigkeitsbewertung darauf hin, dass Konzepte der Kreislaufwirtschaft nicht automatisch besser für die Klima- und Umweltbilanz sind. Wichtig sind hierfür ein effizienter Betrieb der Technologien sowie eine gute Integration in ein Gesamtkonzept. Bei Wasserknappheit bietet die Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser einen sehr guten Lösungsansatz, der aber oft nur mit höherem Energieverbrauch zu

„Die Risikobewertungen haben gezeigt, dass unsere kreislaufwirtschaftlichen Lösungsansätze geeignet sind, sowohl gesundheitlich unbedenkliches Wasser zur Bewässerung und zur Grundwasseranreicherung zu produzieren als auch qualitativ hochwertige Dünger herzustellen.“

erreichen ist. Daher sollte für den Betrieb grüne Energie mit geringem CO₂e-Fußabdruck genutzt werden, um mögliche Nachteile für die Klimabilanz zu vermeiden. Darüber hinaus kann die Stickstoffrückgewinnung zur Vermeidung von Lachgasemissionen beitragen: das starke Treibhausgas (265-mal so schädlich wie CO₂) kann bei



NH₃-Strippung



Lagertank

Anlage zur Stickstoffrückgewinnung in Braunschweig:
 Ammoniakstrippung und Diammoniumsulfatproduktion (links)
 Lagertank für Diammoniumsulfat (rechts)

der biologischen Umsetzung von Stickstoff in Kläranlagen entstehen. Auch hierauf hat die Kreislaufwirtschaft also eine Antwort.

Es sollte jedoch beachtet werden, dass für Klärwerksbetreibende die Qualität des gereinigten Wassers Priorität hat und nicht die Vermarktung von Düngern für die Landwirtschaft. Hier gilt es, noch eine Lücke zwischen den Produzierenden und den Endverbrauchenden zu schließen. Klärwerksbetreibende stehen mit ihren meist dezentralen Lösungen und vergleichsweise kleinen Produktmengen einer großen Konkurrenz durch die Düngemittelindustrie gegenüber. Im Gegensatz zu dieser fehlen den Betreibenden die logistischen Möglichkeiten und das rechtliche Knowhow, um ihre Dünger zu vermarkten. Um in naher Zukunft die Lücke zwischen den Produzierenden und den Endverbrauchenden zu schließen, bedarf es z.B. eines:r Zwischenhändler:in, der:die seine:ihre Düngeprodukte mit den umweltfreundlichen Produkten aus der

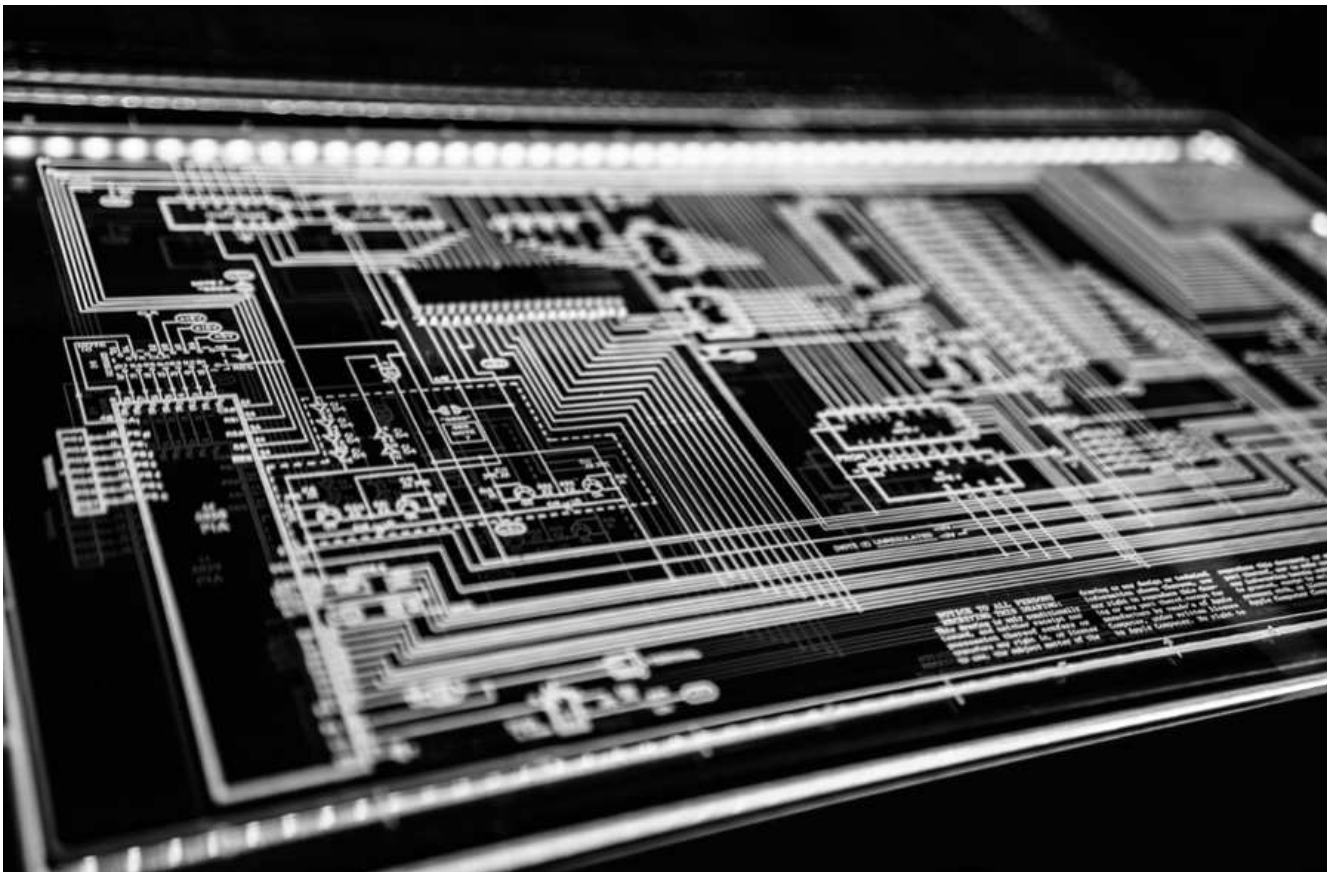
Kreislaufwirtschaft aufwerten könnte, um sie erfolgreich zu vermarkten.

Detaillierte Ergebnisse zu den technischen Lösungen und Fallstudien sowie zu deren ökobilanziellen und Risikobewertungen sind in folgenden Veröffentlichungen des KWB zu finden: Kleyböcker et al. (2022a), Remy et al. (2022) und Kleyböcker et al. (2022b). Die „Technology Evidence Base“ (Kleyböcker et al. 2022b) ist eine Art Wikipedia für Technologien aus der Kreislaufwirtschaft. Hier sind alle NextGen-Technologien im Detail erklärt und mit den Ergebnissen aus den Fallstudien verlinkt. Zudem stellen hier noch zwei weitere Projekte namens ULTIMATE (Horizon 2020) und B-WaterSmart (Horizon 2020) ihre Lösungsansätze vor. ●

Neue Herausforderungen

Cybersicherheit im Wassersektor

Nikolaus de Macedo Schäfer



Die Klimaveränderung und die wachsende und zunehmend urbanisierte Weltbevölkerung, aber auch die Alterung von Infrastrukturen und die Transformation des Arbeitsmarkts erfordern dringende Modernisierungen im Wasser- und Abwassersektor. Diese werden unter anderem anhand der Vernetzung und Automatisierung von Komponenten und Prozessen der Siedlungswasserwirtschaft erreicht.

Die Einführung vernetzter und integrierter digitaler Lösungen eröffnet zugleich neue Schwachstellen für böswillige Cyberaktivitäten. Die Anzahl an Cyberangriffen ist in den letzten Jahren drastisch gestiegen – ein prominentes Beispiel aus jüngerer Vergangenheit ist die US-amerikanische Stadt Oldsmar im Bundesstaat Florida, in der es Hackern gelungen ist, den Natronlaugengehalt des Trinkwassers, der sonst in kleinen Mengen zur Entsäuerung dient, aus der Ferne um ein Vielfaches zu erhöhen und somit die Gesundheit der Bevölkerung zu gefährden. Auch in Deutschland berichten Wasserbetriebe, dass in den letzten Jahren und besonders seit dem pandemiebedingten Anstieg des Homeoffice die digitalen Angriffsversuche stark zunahmen. Um weiterhin die Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit kritischer Infrastrukturen sichern zu können, wird die Cybersicherheit also zukünftig in der Unternehmensführung einen viel größeren Stellenwert einnehmen müssen.

„Auch in Deutschland berichten Wasserbetriebe, dass in den letzten Jahren die digitalen Angriffsversuche stark zunahmen. Um weiterhin die Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit kritischer Infrastrukturen sichern zu können, wird die Cybersicherheit also zukünftig in der Unternehmensführung einen viel größeren Stellenwert einnehmen müssen.“

Vor diesem Hintergrund führte das KWB im Auftrag der Berliner Wasserbetriebe eine umfassende Literaturrecherche sowie Expert:inneninterviews zu fünf Entwicklungsschwerpunkten der Modernisierung und Digitalisierung in der Siedlungswasserwirtschaft und ihrer Infrastrukturen

sowie insbesondere zu den einhergehenden Risiken durch. Die fünf Entwicklungsschwerpunkte waren:

1. Internet der Dinge bzw. Internet of Things (IoT) und Intelligente Sensoren
2. Künstliche Intelligenz (KI) für die Wasserwirtschaft
3. Cloud-Migration
4. Transformation der Infrastruktur
5. Smart Cities

Water 4.0: Chancen und Risiken

Die digitale Transformation des Wassersektors, als Analogon zum Konzept der Industrie 4.0 auch Wasser 4.0 genannt, führt zu einer klaren Erhöhung der Effizienz und Verbesserung der Nachhaltigkeit gegenüber der herkömmlichen Wasserinfrastruktur. Dies geschieht anhand von Prozessinnovationen, wie z.B. Fortschritte in der Datenerhebung und -verarbeitung, durch neue Anwendungen, beispielsweise zur Überwachung von Anlagen, oder durch die Nutzung von Synergieeffekten, z.B. mittels blau-grünen Infrastrukturen. Um jedoch ein optimal funktionierendes urbanes Wassermanagement zu gewährleisten, bedarf es eines drastischen Ausbaus der Cybersicherheit, sowohl in technischer als auch personeller Hinsicht.

Die Fortschritte im IoT ermöglichen es, durch ein automatisches System-Monitoring die Wasserversorgung zu sichern, die Wasserqualität zu verbessern und den Wasser- und Energieverbrauch zu reduzieren (Koo et al., 2015). IoT-Systeme können zudem aufgrund der niedrigen Kosten und Komplexität ihrer Komponenten relativ einfach hochskaliert werden und benötigen dank weitverbreiteter Kommunikationsprotokolle geringe Konfigurierung (Singh & Ahmed, 2021). Erste Realisierungsansätze findet man in automatisierten Wasserqualitätsmessstationen, die in Echtzeit Daten sammeln, auswerten und weitervermitteln (Chowdury et al., 2019) oder in intelligenten Bewässerungssystemen, die bis zu 70 % des Verbrauchs herkömmlicher Systeme einsparen können (Ismail et al., 2019). Auch Hochwasserüberwachungs- und -warnsysteme oder fernsteuerbare Trinkwassernetze, sogenannte Smart Water Grids, werden durch die Fortschritte im IoT ermöglicht. Gleichzeitig entstehen jedoch aufgrund der enormen Anzahl an Endpunkten (die Sensoren selbst) und der vermehrten Verknüpfungen zum Internet neue Vulnerabilitäten. Aufgrund der geringen Rechenleistung der Sensoren wird auch die Implementierung von ►



2022 erschienener Bericht zur Cybersicherheit im Wassersektor (abrufbar auf der [KWB-Webseite](#))

Sicherheits- und Schutzmaßnahmen erschwert. Dies erhöht die Anfälligkeit der zentralen Datensicherungsplattform und bedeutet, dass von einem Angriff alle persönlichen und betrieblichen Daten und somit auch der Betrieb des übergeordneten Netzes gefährdet werden (Koo et al., 2015).

Der Einsatz von KI im Wassersektor unterstützt besonders die Bereiche der Prognostik und Simulation, beispielsweise in der Voraussage des Wasserbedarfs und -verbrauchs, der Wartung von Infrastrukturen oder des Eintretens und der Auswirkungen von Störereignissen, wie Angriffe oder Naturkatastrophen. KI gilt ebenfalls als eine der zugrundeliegenden Kerntechnologien für digitale Zwillinge, also mit Echtzeit-Datenströmen verbundene Modellierungssysteme, die ein kontinuierlich aktualisiertes Bild der physischen Infrastruktur liefern und diese auch steuern können. Zusätzlich kann KI auch in der Cybersicherheit eingesetzt werden. Zum einen in der Angriffsprävention, indem Bedrohungen früher erkannt und effektiver verfolgt werden (Tufan et al., 2021), zum anderen in der Reaktion auf Angriffe, sodass diese selbstständig abgewehrt und Verteidigungsstrategien automatisch angepasst werden können. Neuere Formen von Cyberangriffen zielen jedoch nicht nur auf die Anlagen, sondern auch auf die KI selbst ab, um die Kontrolle über das System zu erlangen und dessen

Verhalten zu ändern. Aufgrund der natürlichen Funktionsweise der KI, deren Entscheidungsfindungsprozesse in einer Black-Box stattfinden und demzufolge fast oder gar nicht nachvollzogen werden können, sind Cyberangriffe auf KI (aktuell) sehr schwer festzustellen.

Cloud-Lösungen und die Integration von Informations- (IT) und operativen Technologien (OT) gelten als Schlüsseltechnologien, um die Speicherung oder Übertragung von rapide wachsenden Datenmengen zu bewältigen. Die in den IoT-Netzen erhobenen und verarbeiteten Daten können weitergeleitet und zur automatischen Steuerung von Anlagen eingesetzt werden. Somit steigt nicht nur die Effizienz, sondern auch die Geschwindigkeit und vor allem die Sicherheit des Betriebs, da bei eintretenden Störungen das System direkt reagieren kann und auch menschliche Akteur:innen aus der Ferne Zugriff haben. Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung von Cloud-Anwendungen besteht jedoch darin, dass Cloud-Systeme besonders anfällig für Sicherheitsverletzungen sind und somit Risiken zum Schutz der Integrität, Verfügbarkeit und Vertraulichkeit der Daten aufkommen. Zudem entstehen durch die Zusammenführung mit IT-Netzwerken neue Angriffsvektoren für die OT-Infrastruktur, sodass schon alltägliche Internetanwendungen im Büro Hackern Möglich-

keiten bieten, sich Kontrolle über die Wasser- und Abwasserinfrastrukturen zu verschaffen (Rasekh et al., 2016).

„Um auch in Zukunft die Sicherheit der digitalen Transformation der Siedlungswasserwirtschaft und deren lebenswichtigen gesellschaftlichen Funktionen zu unterstützen, formulierten wir in unserem Cybersicherheits-Bericht eine Reihe von Handlungsempfehlungen, die Anlagenbetreibern auf dem Weg hin zu sicheren und widerstandsfähigen cyberphysischen Infrastrukturen helfen sollen.“

Auch die analogen Infrastrukturen befinden sich im Wandel. Der technologische Fortschritt begünstigt die Entstehung neuer hybrider (bspw. blau-grüner) und dezentraler Systeme, wie die nachhaltige Regenwasserbewirtschaftung, die Wasserwiederverwendung, die Quellentrennung und die dezentrale Wasseraufbereitung (Rabaey et al. 2020). Innovationen in diesem Bereich ermöglichen erhebliche Reduktionen des Flächen- und Ressourcenverbrauchs (teils mittels der Wiederverwendung und Rückgewinnung von Ressourcen) sowie der Umweltbelastung der Infrastrukturen der Trinkwasseraufbereitung, Abwasserbeseitigung und selbst des Hochwasserschutzes. Allerdings gibt es immer noch Unklarheiten über den angemessenen Grad der Integration und Unsicherheiten bezüglich einer optimalen Planung, Konstruktion und Wartung von dezentralen und hybriden Infrastrukturen. Zusätzlich führt die Notwendigkeit der Kontrolle solcher Infrastrukturen nicht zuletzt auch aufgrund ihrer großen Heterogenität bezüglich Art und Funktion zu neuen Cyberrisiken.

Durch die vertikale und horizontale Integration städtischer Systeme, also sowohl die Vernetzung der unterschiedlichen Ebenen innerhalb eines Sektors als auch die sektorübergreifende Vernetzung, bietet die Smart City einen Rahmen, innerhalb dessen das Konzept von Wasser 4.0 optimal umgesetzt werden kann. Da Wasserbetriebe mit einer Vielzahl anderer Infrastrukturen verbunden sind, können Betreibende Synergieeffekte ausnutzen, um ihre eigenen operativen Fähigkeiten zu verbessern. Solch eine intersektorale Kooperation lässt sich in der Zusammenarbeit mit dem Energiesektor wiederfinden, durch die die Nachhaltigkeit der Wasserdienstleistungen verbessert werden kann, beispielsweise indem eine Senkung des Energieverbrauchs oder Maßnahmen zur Energieerzeugung oder Wärmespeicherung ermöglicht werden. Jedoch bringt der zunehmende Informationsaustausch in der Smart City zwangsläufig erhöhte Risiken und Bedenken in Bezug auf Datensicherheit und Datenschutz mit sich. Insbesondere die enorme Größe, Komplexität, Heterogenität und Dynamik der Datenökosysteme von Smart Cities machen die Durchführung von Risikobewertungen und die Entwicklung umfassender Cybersicherheitsstrategien äußerst schwierig.

Die nächsten Schritte

Um auch in Zukunft die Sicherheit der digitalen Transformation der Siedlungswasserwirtschaft und deren lebenswichtigen gesellschaftlichen Funktionen zu unterstützen, formulierten wir in unserem Cybersicherheits-Bericht eine Reihe von Handlungsempfehlungen, die Anlagenbetreibern auf dem Weg hin zu sicheren und widerstandsfähigen cybersicheren Infrastrukturen helfen sollen. Hierbei liegen die Schwerpunkte sowohl im Ausbau der technischen Anlagen und ihrer Cybersicherheitsprotokolle als auch in der Bildung und Zusammenarbeit von Akteur:innen des Sektors. ►

Zu ersterem gehören beispielsweise Fragestellungen bezüglich des Schutzes vernetzter Komponenten, wozu es der Entwicklung von allumfassenden Sicherheitsrahmen (wie SDN, FRESCO, OrchSec, IOT@Work) bedarf, die deren Heterogenität bewältigen können. Gleichzeitig müssen aber auch KI-Lösungen weiter verfeinert werden, nicht nur um ihr Potenzial zur Einbruchserkennung auszuschöpfen, sondern besonders, um ihre Reaktions- und Anpassungsfähigkeit zu stärken. Dies kann zum Beispiel durch die Erfassung des Verhaltens von Cybersecurity-Analyst:innen zur Gestaltung von Trainingsdatensätzen erreicht werden.

Weiterer Entwicklungsbedarf besteht in der Erforschung der neuen Anforderungen, die durch dezentrale und vernetzte Infrastrukturen entstehen, wie zum Beispiel einheitliche Datenstandards, die nicht nur die Interoperabilität, sondern auch die Sicherheit städtischer Daten fördern können. Ergänzend zu solchen präventiven Maßnahmen ist auch die Entwicklung von Tools zur Simulation von Kaskadeneffekten und deren Verbreitung durch die gesamte Anlage (wie sie bereits im SWaT-Testbed, im WADI-Testbed oder in der DHALSIM digital Twin Open-Source Plattform stattfindet) für die Planung von redundanten und widerstandsfähigen Systemen besonders vielversprechend.

Da das menschliche Versagen bei der Mehrheit der Cybersicherheitsvorfälle eine Schlüsselrolle spielt, wird es als einer der wichtigsten Faktoren für die Gefährdung der Cybersicherheit angesehen. Deswegen muss der Schaffung neuer Bildungsmöglichkeiten besondere Priorität eingeräumt werden. Praxisnahe, interaktive und in die tägliche Routine integrierte Aus- und Weiterbildungsprogramme haben sich als am wirksamsten für die Verbesserung der Cybersicherheitskompetenz erwiesen. Da jedoch die große Mehrheit der diesbezüglichen Forschung im Kontext des Energiesektors durchgeführt wurde, besteht ein erheblicher Bedarf an solchen Maßnahmen, die auf den Wasser- und Abwassersektor zugeschnitten sind. Im Kontext des Ausbaus von Cybersicherheitskompetenzen besteht zudem auch die Herausforderung des zunehmen-

den Fachkräftemangels, dem mittels einer Überarbeitung veralteter Ausbildungsformate und -inhalte sowie einer Anpassung der vergleichsweise niedrigen Gehälter entgegengewirkt werden muss.

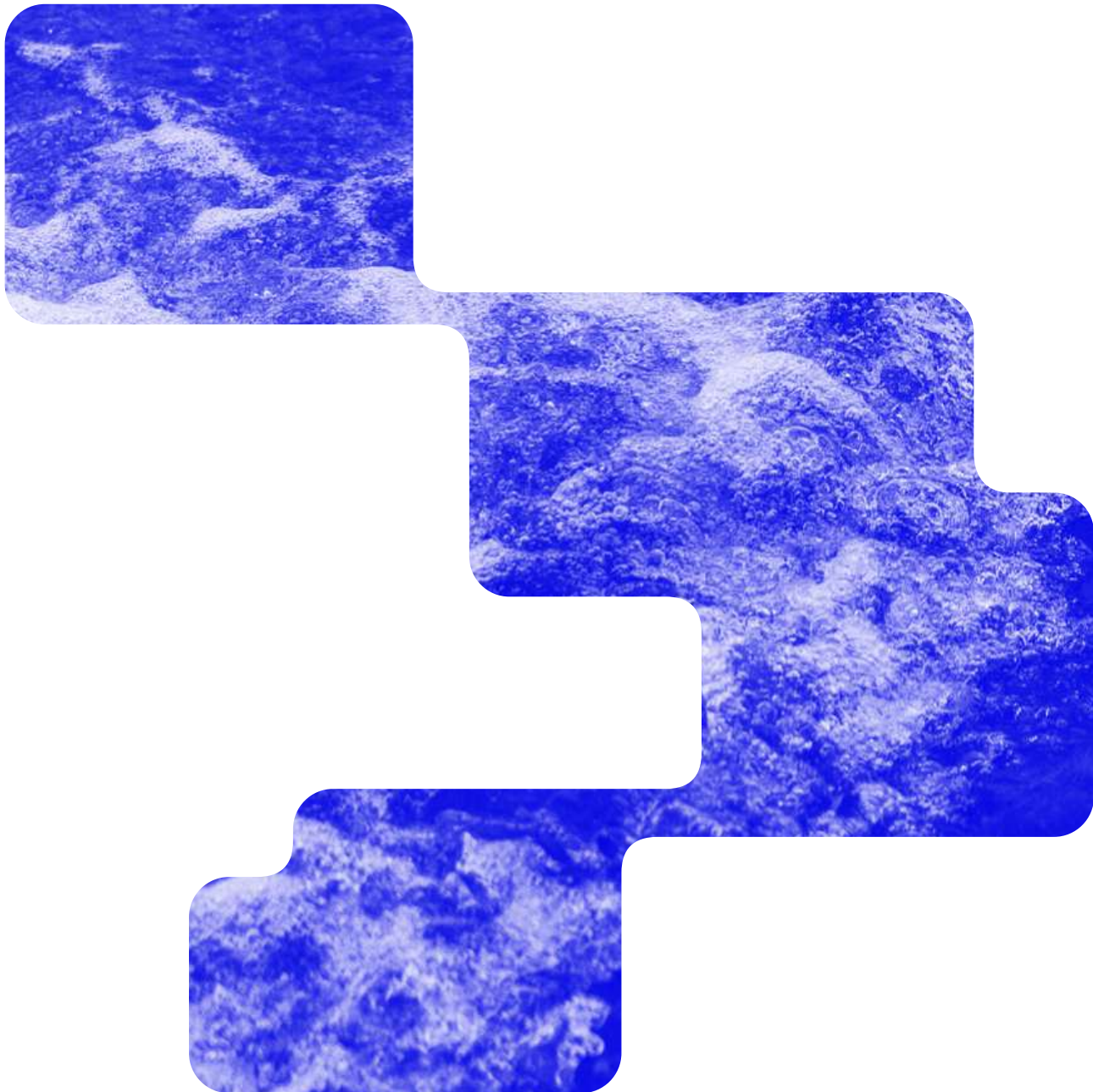
Eine der grundlegenden Problematiken des Wasser 4.0 besteht in der Unsicherheit der Konvergenz von IT und OT. Hierfür ist die Erfassung eines vollständigen Nutzen-Risiko-Verhältnisses erforderlich, wozu neue Risikoforschungen benötigt werden, die idealerweise in einer übergreifenden Arbeitsgruppe durchgeführt werden sollten. Solche Arbeitsgruppen entwickeln zudem auch konkrete Empfehlungen auf der Grundlage bestehender Standards (z.B. ISO, BSI) und sektorspezifischer Bedürfnisse. Der Ausbau von Kooperationsmodellen zur inter- und intrasektoralen Stärkung der Cybersicherheit ist für die organisatorische und bildungstechnische Entwicklung der Siedlungswasserwirtschaft essenziell. Durch eine Bündelung des Fachwissens in einer zentralen Einrichtung, die allen Betreibenden, insbesondere auch den kleinen und mittleren, Beratung und Fachwissen bieten kann, lässt sich auch das übergeordnete Ziel der Verringerung menschlichen Versagens schneller erreichen.

Die Bewältigung zahlreicher und heterogener Herausforderungen der Siedlungswasserwirtschaft, sowohl in klimatischen als auch sicherheitstechnischen Fragen, wird aufgrund von Faktoren wie fehlende Infrastrukturen und Ressourcen sowie insbesondere durch den Mangel an Kompetenzen und Fachkräften deutlich erschwert. Zur Lösung bedarf es eines drastischen Ausbaus von Cybersicherheitsschutzmaßnahmen sowohl in technischer als auch personeller Hinsicht. Nur so lässt sich auch zukünftig ein optimal funktionierendes urbanes Wassermanagement gewährleisten. Das KWB hat in seinem Cybersicherheitsbericht erste Handlungsempfehlungen formuliert, um Wasserbetriebe bei der zukünftigen Erfüllung ihrer kritischen Aufgaben zu unterstützen. Damit leisten wir einen wichtigen Beitrag zu einer sicheren und innovativen Zukunftslandschaft der Wasserwirtschaft. ●



Projektauswahl

- ▶ PROMISCES
- ▶ AMAREX
- ▶ CIRCULAR AGRONOMICS
- ▶ IMPETUS
- ▶ KTS
- ▶ SEMAPLUS
- ▶ DIGITAL-WATER.CITY



Projektvolumen

11.995.000 €, finanziert durch Horizon 2020
European Union Funding for Research &
Innovation

Partnerinstitutionen

Bureau de Recherches Géologiques et
Minières (coordination), Kompetenzzentrum
Wasser Berlin gGmbH, Institut national de
l'Environnement et des Risques, Institut de
Physique du Globe de Paris, QSAR Lab,
Umweltbundesamt, Berliner Wasserbetriebe,
BioDetection Systems b.v., Fundacio EURECAT,
COLAS Environnement, Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie e.V.,
Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu,
Agencia Estatal Consejo Superior de
Investigaciones Científicas, Stichting Deltares,
Technische Universität Wien, Bundesanstalt für
Gewässerkunde, Università Politecnica delle
Marche, Consorci Besòs Tordera, Hoogheem-
raadschap van Delfland, Esolve Consultoria e
Ingeniería Medioambiental SL, ACEA SPA, Sofia
University St. Kliment Ohridski, Simam SPA,
MicroLife Solutions b.v., ISB Water, Fovarosi
Vizmuvek Zartkoruen Mukodoreszvenytarsa-
sag, In Extenso Innovation Croissance

Kontakt

Dr. Ulf Miehe

Dr. Veronika Zhiteneva

► (I) Andere Gruppen von iPM(T)s umfassen
u.a. Chemikalien wie industrielle Zusatzstoffe,
Korrosionsinhibitoren und chlorierte Lösungs-
mittel. Zu den Softwarelösungen gehören
Modelle, die auf verschiedenen zeitlichen und
räumlichen Skalen arbeiten.

Gegen die industrielle Verschmutzung und für eine Kreislaufwirtschaft

Sollten Sie noch nichts von „Für-immer-Chemikalien“ (oder auch „forever chemicals“) gehört haben, ist es an der Zeit, sich mit dem Thema vertraut zu machen. Von Ihrem Kochgeschirr über Ihre Outdoor-Kleidung bis hin zu Ihren Boxen für die Lebensmittelaufbewahrung – per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind im Leben des 21. Jahrhunderts nahezu allgegenwärtig. Und sie haben es auch geschafft, in alles einzudringen - in den Boden, in Sedimente und ins Wasser. Sie zu entfernen, ist keine einfache Angelegenheit.

Doch genau das ist das Ziel von PROMISCES (das für Preventing Recalcitrant Organic Mobile Industrial Chemicals for Circular Economy in the Soil-sediment-water system steht). Das Projekt startete im November 2021 und wird mit der Expertise von 12 KWB-Mitarbeitenden realisiert. PROMISCES zielt darauf ab, die Kreislauffähigkeit von Ressourcen zu erhöhen, indem Barrieren überwunden werden, die sich aus dem Vorhandensein von sehr persistenten, sehr mobilen (kurz vPvM für very persistent, very mobile) und potenziell toxischen Stoffen (PM(T)) im Boden-Sediment-Wasser-System ergeben. PROMISCES leistet damit einen verbesserten Schutz der menschlichen Gesundheit, unterstützt die Null-Schadstoff-Aktionspländer Europäischen Union und erhöht die Akzeptanz und Nachhaltigkeit der Kreislaufwirtschaft.

Im Rahmen des Projekts wird die Beseitigung von industriellen PM(T)-Verbindungen (iPM(T)) in 7 Fallstudien in Spanien, Frankreich, Italien, Bulgarien, Deutschland und im Donaeinzugsgebiet oberhalb von Budapest in den folgenden 5 Kreislaufwirtschaftssystemen untersucht.

- Bodensanierung zur sicheren Wiederverwendung in städtischen Gebieten (z.B. Bauwesen, Freizeit)
- Halbgeschlossene Wassersysteme zur Trinkwasserversorgung
- Wiederverwendung von kommunalem Abwasser für die Pflanzenbewässerung
- Nährstoff- und Energierückgewinnung aus Klärschlamm und dessen Verwertung als Dünger in der Landwirtschaft
- Rückgewinnung von Materialien aus ausgebagerten Sedimenten und deren Verwertung für Ökomaterialien oder im Bauwesen

In den Fallstudien wird PROMISCES umfassende Analyse- und Modellierungsergebnisse liefern. Dabei werden auch zuverlässige quantitative Analysen für verschiedene chemische Gruppen, einschließlich PFAS und deren Umwandlungsprodukte, sowie für andere iPM(T)s ► (I) entwickelt. Die Modellierung des

► (2) Zu den Umweltkompartimenten gehören städtischer Abfluss, Uferfiltration, Grundwasser, Sedimente und Boden in Simulationen, in städtischen Gebieten und in großräumigen Einzugsgebieten.

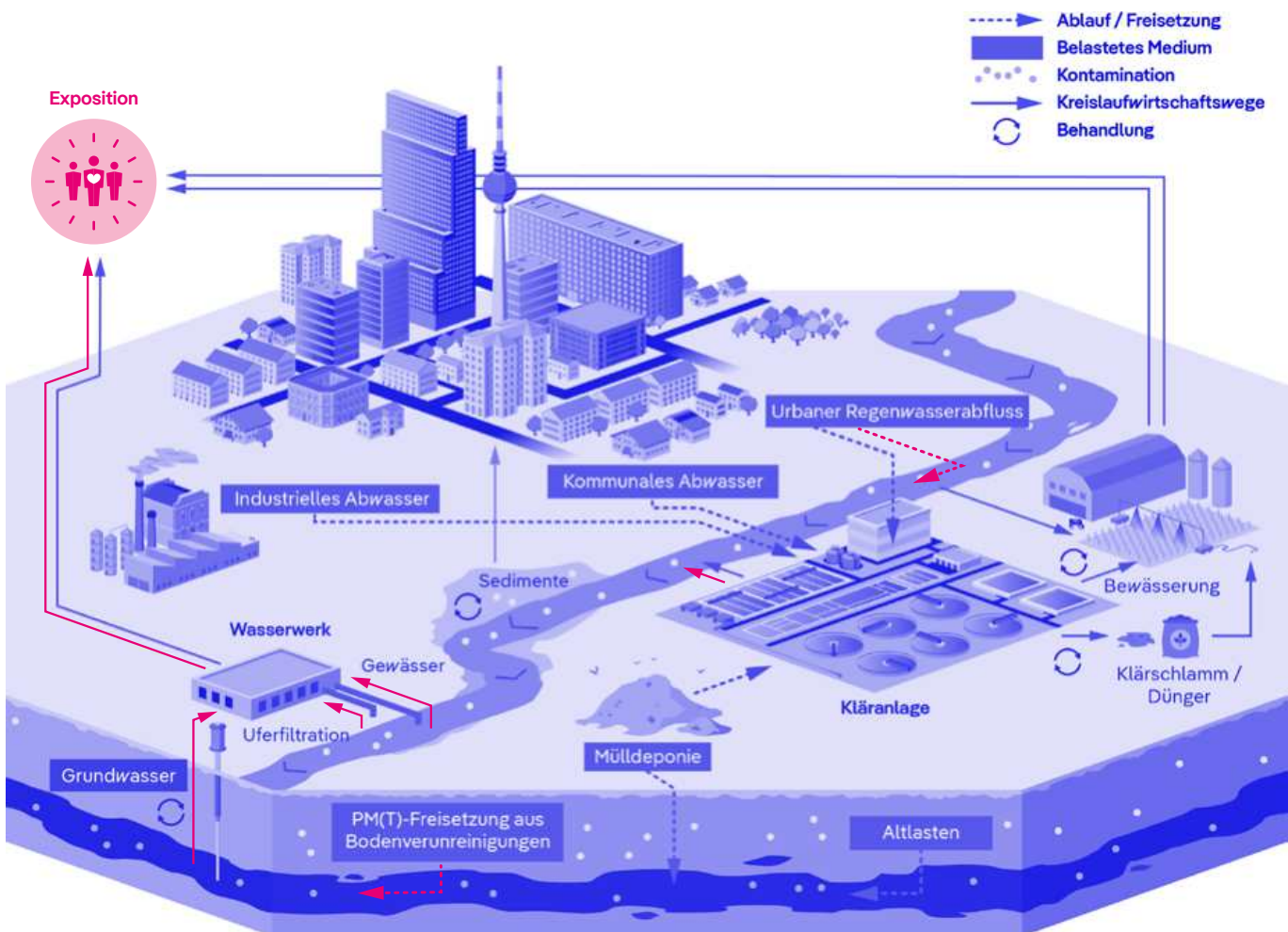
► (3) Für 4 der 5 im Rahmen von PROMISCES untersuchten Kreislaufwirtschafts-Routen werden probabilistische Risikobewertungen nach einem Bayes'schen Ansatz durchgeführt, um die Transparenz der Bewertung zu verbessern.

► (4) Zu den Umweltkompartimenten gehören hier Boden, Wasser, Abwasser, Sediment, Deponiesickerwasser und Klärschlamm.

► (5) Das DSF wird mehrere Arten von Daten (z.B. das NORMAN-Datenbanksystem (NDS), IPCHEM, die SPIN-Datenbank, das REACH-Portal, in PROMISCES generierte Daten und Literaturdaten) für seine drei Komponenten – Diagnose, Lösungen und Strategien – berücksichtigen, um eine möglichst umfassende Bewertung spezifischer PM-Verwendungs-Kombinationen zu ermöglichen.

Verbleibs und des Transports wird die Verfolgung von PFAS und iPM(T)s über mehrere Umweltkompartimente ► (2) hinweg ermöglichen, um die Interoperabilität von Softwarelösungen zu gewährleisten. Durch die Integration gemessener oder vorhergesagter chemischer und toxikologischer Daten in Risikobewertungsmodelle verringert sich die Unsicherheit bei der Risikobewertung für die menschliche Gesundheit innerhalb der untersuchten Kreislaufwirtschafts-Routen. ► (3) Um kosteneffizientere, nachhaltige und ökologische Behandlungstechnologien für Umweltkompartimente ► (4) bereitzustellen, werden (Bio-)Sanierungstechnologien zur Entfernung von PFAS/iPM(T) entwickelt und bewertet. Schließlich wird ein Entscheidungshilfesystem (Decision Support Framework, kurz DSF) Stakeholdern ermöglichen, Lösungen auszuwählen, die sowohl kurz- als auch langfristige Probleme der PM-Verschmutzung lösen können, und Strategien für eine saubere Umwelt und eine sichere Wiederverwendung von Ressourcen zu bewerten. ► (5)

Im Rahmen von PROMISCES wird das KWB zudem den Verbleib und den Transport von PFAS und iPM(T)s in Oberflächengewässern und im Grundwasser überwachen und modellieren, wobei der Schwerpunkt auf der Quantifizierung von Chemikalien im städtischen Abfluss und der Lokalisierung von indirekten Einleitungen (d.h. Verschmutzung aus anderen Quellen) der Schadstoffe liegt. Wir werden außerdem Risikobewertungen für die



Relevante Kreislaufwirtschafts- und Emissionspfade, die in PROMISCES untersucht werden (Berlins teilgeschlossener Wasserkreislauf ist in pink dargestellt)

menschliche Gesundheit für Trinkwasser und Grundwasser durchführen, um die Auswirkungen von Abhilfemaßnahmen zu bewerten und die Entscheidungsfindung und das Risikomanagement zu verbessern.

Im Hinblick auf die Klärschlammverwertung werden wir bei der Erstellung einer Datenbank mit Koeffizienten für den Transfer und die Umwandlung von PFAS während der Klärschlammbehandlung/-verwertung unter Verwendung aktueller und zukünftiger Kläranlagentechnologien helfen. Auf der Grundlage des Verbleibs von PFAS während verschiedener Klärschlammbehandlungen, bei denen (in)organische Düngemittel entstehen, wird eine Liste von Empfehlungen für die Bereitstellung PFAS-freier Düngemittel in Übereinstimmung mit der Klärschlammrichtlinie und der EU-Verordnung über Düngemittel für die Kreislaufwirtschaft erstellt werden.

Das KWB wird außerdem das Arbeitspaket leiten, das Lösungen für schadstofffreie Wasserkreisläufe aufzeigt, einschließlich sekundärer Abwässer aus kommunalen und industriellen Kläranlagen, Klärschlamm, Deponiesickerwasser und Trinkwasser. An der Berliner Fallstudie arbeitet eine eng vernetzte Expert:innen-gruppe, zu der die Berliner Wasserbetriebe, das Umweltbundesamt, die Bundesanstalt für Gewässerkunde und das KWB gehören. Diese Partnerinstitutionen werden das Vorkommen von PFAS und iPM(T)s im halbgeschlossenen städtischen Wasserkreislauf Berlins analysieren. Darüber hinaus wird die Leistung der Ozonierung und der Aktivkohlebehandlung bei der Entfernung von PFAS und iPM(T) in großtechnischen Kläranlagen untersucht, wobei die Ergebnisse in einen Leitfaden für die Planung und den Betrieb von Kläranlagen für Betreibende und Ingenieur:innenbüros einfließen werden.

Schließlich werden wir das DSF einer strengen Prüfung durch Projektpartnerinstitutionen und Endnutzende (d.h. Versorgungsunternehmen und Chemieunternehmen) unterziehen, um sicherzustellen, dass die im Rahmen des Projekts ermittelten Verbindungen, Wege und Lösungen sinnvolle Optionen zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft bieten. Als Innovationsmanager des Projekts ist das KWB auch für das technische Follow-up der Arbeit verantwortlich und wird die Projektkoordination bei der Überwachung der Fortschritte der Partnerinstitutionen unterstützen.

Projektvolumen

2,4 Mio. € Gesamtvolumen, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, WaX-Wasser-Extremereignisse, Forschung für Nachhaltigkeit

Partnerinstitutionen

TU Kaiserslautern, FG Siedlungswasserwirtschaft (Koordination); Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft; Berliner Wasserbetriebe; Ecologic Institut; Technologiestiftung Berlin; HELIX Pflanzensysteme GmbH; Stadtentwässerungsbetriebe Köln

Assoziierte Partnerinstitutionen:

Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz Berlin; Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen Berlin, Geoatlas; Stadt Köln, Amt für Landschaftspflege und Grünflächen

Kontakt

Dr. Andreas Matzinger
Lukas Guericke

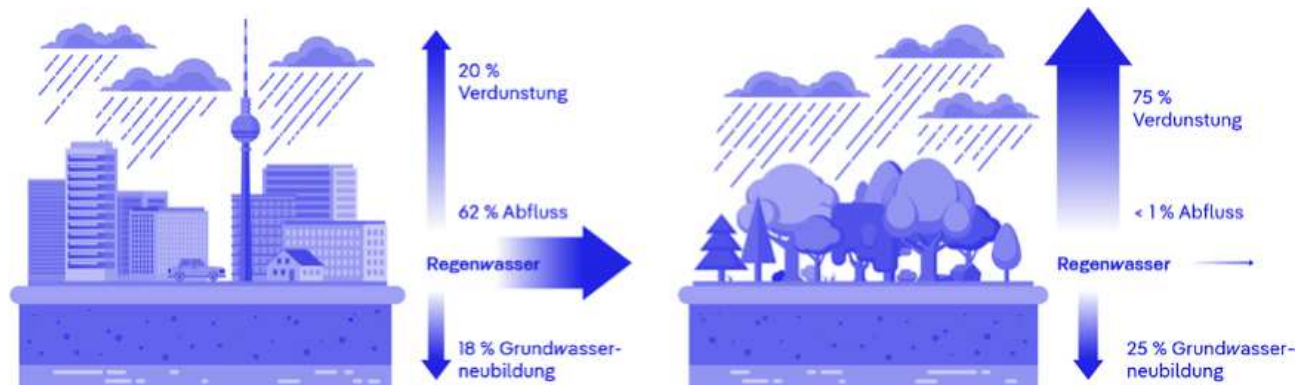
► (I) Modellierung Wasserhaushalt

Für die Modellierung des urbanen Wasserhaushalts wird das Wasserhaushaltsmodell Berlin ABIMO 3.2 als Grundlage verwendet. Dieses basiert auf einer Berechnung des Landschaftswasserhaushaltes der Bundesanstalt für Gewässerkunde und wurde für Berlin um urbane versiegelte Gebiete erweitert. Es nutzt räumlich hochaufgelöste Randbedingungen des Geoportals Berlin (z.B. Stadtstruktur, Versiegelung, Bodeneigenschaften) und wird vom Land Berlin verwendet, um die online verfügbaren Karten zum Wasserhaushalt zu erstellen. Im Rahmen dieses Projekts hat die Projektpartnerin Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen (Geoportal) das Modell über den online-basierten Versionsverwaltungsdienst für Softwareentwicklung GitHub als Open-Source-Variante zur Verfügung gestellt. Dadurch können alle Weiterentwicklungen im Projekt öffentlich zugänglich gemacht werden.

Die Stadt zum Wald machen

Klimaprojektionen weisen darauf hin, dass die Häufigkeit und Intensität von klimatischen Extremereignissen, wie Starkregen oder Dürre, zukünftig deutlich zunehmen werden. Die negativen Auswirkungen dieser Extreme sind besonders im urbanen Raum zu spüren. Städte zeigen im Vergleich zu einer naturnahen Wald- oder Wiesenfläche eine deutliche Erhöhung des Niederschlagsabflusses (in der Kanalisation) zulasten der Verdunstung und, in geringerem Maße, der Grundwasserneubildung. Bei immer häufiger und intensiver auftretenden Starkregenereignissen kann die schnelle Ableitung des Regenwassers in Oberflächengewässer zu einer ausgeprägten Gewässerbelastung und Überflutungen führen. Zudem verursacht die Ableitung von Regenwasser ein Defizit an urbanen grund- und oberflächennahen Wasserressourcen, die besonders für die Überbrückung von zunehmenden Trockenperioden relevant sind. Die reduzierte Verdunstung in Städten intensiviert zusätzlich bei steigenden Temperaturen urbane Hitzeinseln. Und nicht nur die Klimaveränderungen, auch die zunehmende Urbanisierung verschärft diese Probleme. Im Projekt AMAREX untersuchen wir gemeinsam mit unseren Projektpartnern Möglichkeiten zur Anpassung der bestehenden Regenwasserbewirtschaftung (RWB) an die bedingt durch Klimaveränderungen zunehmenden Extrembelastungen. Zusätzlich wird der lokale urbane Wasserhaushalt als Bewertungsindikator und potenziell einfache Planungsgröße für Klimafolgenanpassungen überprüft. Dadurch sollen wichtige Grundlagen geschaffen werden, Klimafolgenanpassungsmaßnahmen in der städtischen Planung auf einfache Weise zu implementieren.

Ziel des Projekts ist es, Potenziale der funktionalen Erweiterung bestehender RWB-Maßnahmen aufzuzeigen. Für die Erweiterung RWB+ werden zusätzliche Speicherräume zur Überflutungsvorsorge in Betracht gezogen, während die Kategorie RWB+N weitergehende Maßnahmen zur Nutzung/Bewässerung als Trockenheitsvorsorge miteinschließt. Dazu werden zunächst mögliche Ansätze dieser Erweiterung im Modell und im Feld optimiert. Anschließend werden Bewertungsmethoden für die Umsetzungs-



Verdunstung: Kann die Stadt zum Wald gemacht werden?

potenziale (Konkurrenzen, Synergien) und Wirkungsquantifizierung dieser Ansätze entwickelt und in ein webbasiertes Tool als Hilfsmittel für die kommunale Praxis überführt. Die Ansätze und Tools werden in enger Zusammenarbeit mit den Partnerstädten Köln und Berlin entwickelt.

Das KWB widmet sich in seiner Arbeit für das Projekt insbesondere der Abbildung des urbanen Wasserhaushaltes. ▶ (1)

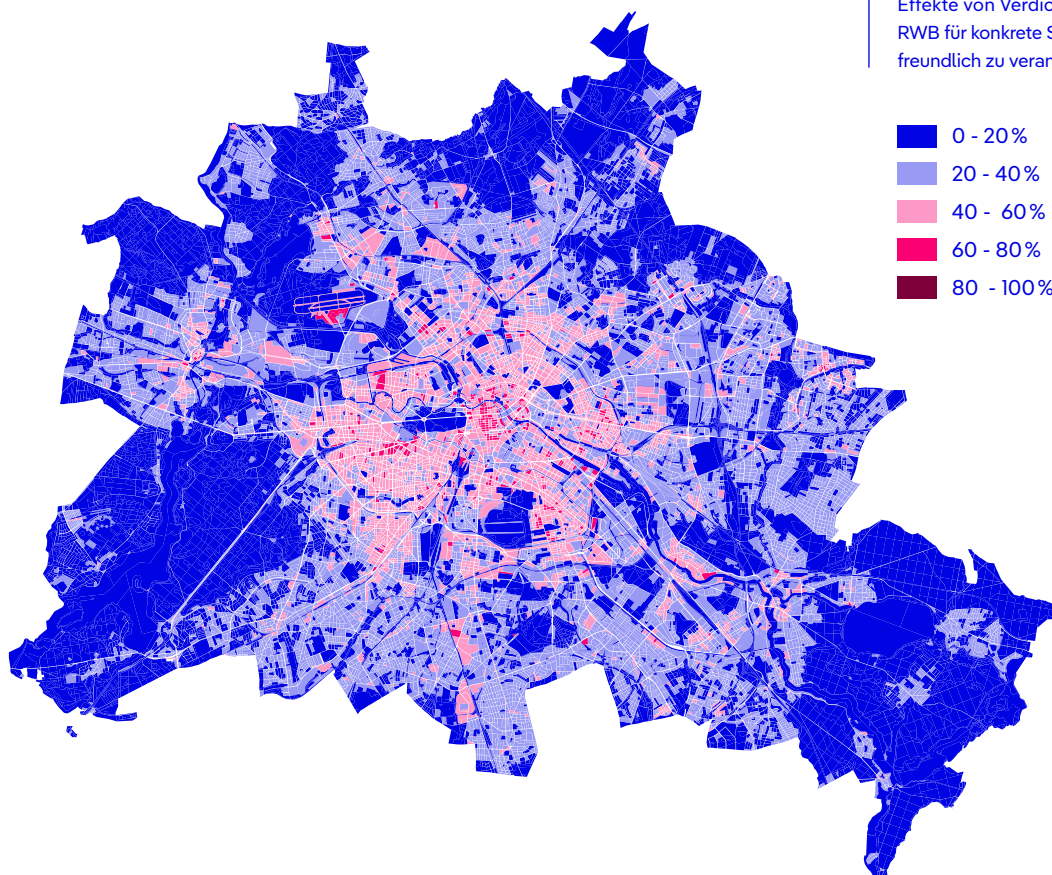
Die kumulierte jährliche Abweichung der oben erwähnten Komponenten – Abfluss, Verdunstung, Grundwasserneubildung – vom natürlichen Zustand, wurde im ersten Projekthalbjahr als Indikator des Wasserhaushalts vorgestellt und bereits für Berlin simuliert. Der Indikator soll zeigen, wie weit ein städtisches Gebiet aus Sicht des lokalen Wasserhaushaltes von Wald und Wiese, welcher als natürlicher Referenzzustand angenommen wird, entfernt ist. Die Abbildung unten zeigt, dass dieser Indikator im hochversiegelten Berliner Stadtzentrum hohe Werte von über 60 % annimmt, diese im suburbanen Bereich zunehmend geringer werden und in Stadtparks, Wäldern und Seen unter 20 % gehen. Gemeinsam mit den Projektpartnern wird in AMAREX als nächstes geprüft, inwiefern diese Abweichung des jährlichen Wasserhaushaltes von einem naturnahen Zustand als Planungsgröße geeignet ist, um die Folgen von klimatischen Extremereignissen durch gezielte Maßnahmen zu reduzieren.

Das KWB entwickelt das Modell im Projekt AMAREX in mehreren Schritten weiter. Der Sourcecode wurde in der aktuellen Version 3.3 so angepasst, dass das Modell über ein Set an Hilfstoos (als ein in der Programmiersprache R entwickeltes Paket) einfach mit unterschiedlichen Randbedingungen berechnet werden kann. Weitere geplante Schritte betreffen die Berücksichtigung von RWB, die verbesserte Abbildung von Straßen und die Anpassung der Anschlussgrade an Daten des Projektpartners Berliner Wasserbetriebe. Sowohl die jeweils neuste Version des Modells als auch das zugehörige R Paket sind über den KWB GitHub öffentlich verfügbar.

Im Rahmen der Wasserhaushaltsauswertung der Stadt Berlin wurde der Indikator „kumulierte Abweichung der jährlichen Wasserbilanz vom natürlichen Zustand“ eingeführt. Dieser orientiert sich an den Vorschlägen des DWA M102/4, fasst jedoch die Abweichungen der Einzelkomponenten zusammen.

Dafür werden die Beträge der Abweichungen in der Abfluss-, der Verdunstungs- und der Grundwasserneubildungskomponente (inkl. Interflow) einzeln berechnet und addiert. Je höher die in Prozent umgerechnete kumulierte Abweichung, desto deutlicher unterscheidet sich der lokale Wasserhaushalt von dem einer Wiesen- oder Waldfläche.

Das Wasserhaushaltsmodell soll nicht nur Forschenden zur Verfügung stehen, sondern auch in Zusammenarbeit mit der Technologiestiftung Berlin in einer Webapplikation umgesetzt werden. Vorgesehen sind dabei vor allem einfache Szenarien, um insbesondere die Effekte von Verdichtung und Umsetzung von RWB für konkrete Stadträume anwender:innenfreundlich zu veranschaulichen.



Prozentuale Abweichung vom natürlichen Wasserhaushalt

Projektvolumen

7.021.760 € Gesamtvolumen, finanziert durch EU Horizon 2020

Partnerinstitutionen

Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaris; Wageningen University; Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin; Technische Universität München; Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein; Centre de Recerca en Economia i Desenvolupament Agroalimentari-Upc-Irta; Teagasc - Agriculture and Food Development Authority; Fondazione Crpa Studi Ricerche; The Rural Investment Support for Europe Foundation; Sogesca S.r.l.; Pondus Verfahrenstechnik GmbH; Nutrients Recovery Systems; Eastern Africa Farmers' Federation Society; Asio Spol Sro; Soepenber Fertilizers; Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung

Kontakt

Fabian Kraus

► (I) Das KW/B hat in den vergangenen zwei Jahren eine Pilotanlage zur Unterdruckentgasung betrieben. Es wurden verschiedene Füllkörper und Lochbleche in den Kolonnen und Betriebsweisen getestet. Neben betrieblichen Schwierigkeiten mit Säulenflutungen zeigten unsere Ergebnisse diverse Potenziale zur Reduzierung der Chemikalien- und Wärmebedarfs des Prozesses. Dadurch können die damit verbundenen Umweltauswirkungen wie der CO₂-Fußabdruck und die wirtschaftlichen Kosten des Verfahrens reduziert werden.

Aufgrund unserer Erkenntnisse aus dem Projekt haben wir das Design des Prozesses optimiert und unsere Pilotanlage umgebaut. Wir haben eine größere Querschnittsfläche der Entgasungskolonne gewählt, um ein Überfluten der Säule und Probleme mit Schaumbildung zu vermeiden. Gleichzeitig wird der Druckverlust so gering wie möglich gehalten. Eine vorgeschaltete Kohlendioxid-Strippung vor der Ammoniak-Strippung reduziert den Natronlauge-Verbrauch um etwa 90 %. Eine vorgeschaltete Wärmerückgewinnung aus beim Prozess entstehenden Dampf wird den Wärmebedarf des Prozesses ebenfalls um rund 90 % reduzieren. Dies sind wesentliche Schritte, um das Verfahren ökologisch und wirtschaftlich tragfähig zu machen.

Die Anlage wurde kürzlich wieder in Betrieb genommen, um das optimierte Design zu testen. Darüber hinaus werden wir zukünftig mögliche Optimierungen der Wäschereinheit untersuchen, z.B. durch die Verwendung des „billigen“ Nebenprodukts Gips anstelle „teurer“ Schwefelsäure.

Lösungen gegen Nitrateinträge ins Grundwasser

Landwirtschaftliche Rückstände wie Gülle oder Gärreste aus der Biogasproduktion enthalten sehr viel Stickstoff, der bei der Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen ins Grundwasser gelangen kann. In vielen landwirtschaftlich geprägten Regionen Norddeutschlands ist der Grenzwert für Stickstoff in Form von Nitrat im Grundwasser (50 mg/L) bereits überschritten und führt zu Einschränkungen bzw. hohen Kosten bei der Trinkwassergewinnung.

Im EU-Projekt Circular Agronomics wird nach Lösungen gesucht, die Landwirtschaft nachhaltiger zu gestalten. Unter anderem werden technische Verfahren untersucht, die Stickstoffeinträge in die Böden bedarfsgerechter zu gestalten und Emissionen zu vermeiden. Im Rahmen des Projekts betreibt das KW/B am Standort Berge im Havelland (Brandenburg) eine Pilotanlage (Abb. A) zur Rückgewinnung von Ammoniumstickstoff aus landwirtschaftlichen Rückständen. ► (I) Kernstück ist eine Entgasungseinheit, mit der Ammoniumstickstoff in Form von Ammoniak und Kohlendioxid den Gärresten aus der Biogasproduktionen entzogen und anschließend in typischen Dünger umgewandelt wird. (Abb. B)

Mit dem Verfahren wird der Flüssiggärrest in zwei einzelne Fraktionen aufgetrennt, einen Kohlenstoffreichen Rückstand und einen Ammonium-Mineraldünger. Letzterer kann anschließend besser gelagert, weiterverarbeitet oder bedarfsgerecht auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht werden.

Bei starken Stickstoffüberschüssen in einer Region kann der konzentrierte Ammoniummineraldünger auch über weitere Distanzen in Regionen mit Nährstoffbedarf transportiert werden. Dies kann sich perspektivisch positiv auf die Grundwasserbelastung auswirken, da der Ammoniumstickstoff separat und gezielt im Vegetationszyklus von Nutzpflanzen eingesetzt werden kann, wenn deren Stickstoffbedarf am höchsten ist. Mit dem Verfahren

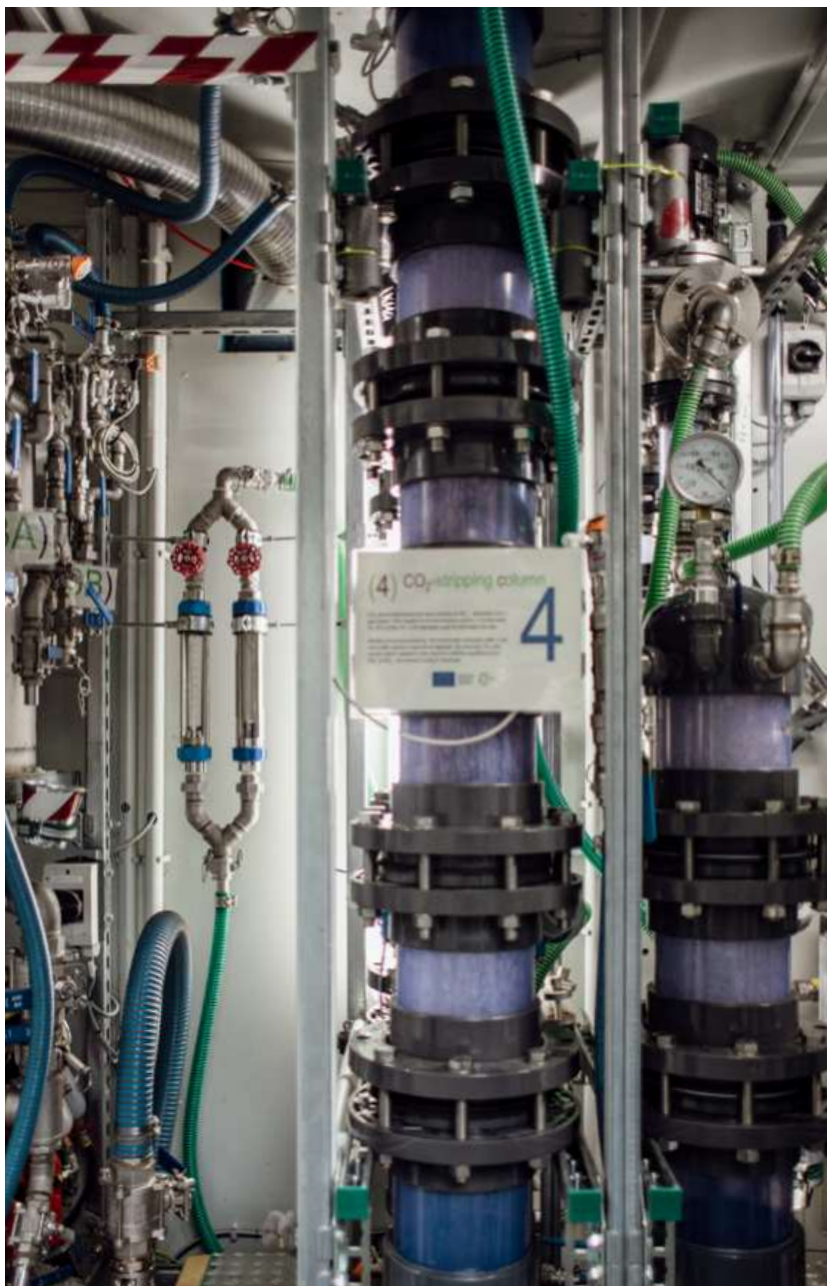


A

können Ammoniak-Emissionen in der Landwirtschaft reduziert und die Produktion von treibhausgasintensiven Stickstoffmineraldünger vermieden werden.

Gerade vor dem Hintergrund der aktuellen Energiekrise stellt die Kreislaufwirtschaft von Nährstoffen eine Chance dar, die Importabhängigkeit Europas von Drittstaaten zu reduzieren. Da die konventionelle Produktion von Stickstoffmineraldünger stark an die Erdgasverfügbarkeit gekoppelt ist, kam es im Jahr 2022 europaweit zu Produktionseinschränkungen, wodurch sich der Preis für Stickstoffmineraldünger gegenüber dem Vorjahr mehr als verdoppelt hat. Eine regionale Produktion (von Dünger) aus Rückständen wie Gülle, Gärresten oder auch Schlämmen aus der Abwasserbehandlung reduziert die Importabhängigkeit und trägt neben der Verringerung von Emissionen auch zur Resilienz des Agrarsektors bei.

B



Projektvolumen

16.224.769 €, finanziert durch Horizon 2020
European Union Funding for Research &
Innovation

Partnerinstitutionen

Fundacio Eurecat, Nelen & Schuurmans BV,
National Technical University of Athens,
Accademia Europea di Bolzano, Universitetet i
Tromsøe - Norges Arktiske Universitet, Baltijas
Vides Forums, Mediterranean Agronomic
Institute of Chania, Athens University of Econo-
mics and Business - Research Center, Etaireia
Ydreyses Kai Apochetefseos Proteyoysis
Anonimi Etaireia, Ministry of Environment and
Energy, Mantis Business Innovation Idiotikikefa-
laiouchiki Etaireia, Departament D'acció
Climàtica; Alimentació i Agenda Rural,
Universitat Rovira i Virgili, Universitat de
Girona, Lobelia Earth SL, Kwr Water B.v., Water
& Energy Intelligence BV, Senatsverwaltung für
Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Berliner
Wasserbetriebe, GCF - Global Climate Forum
EV, Mobygis srl, Universitaet Bern, Consorzio
dei Comuni Della Provincia di Trento Compresi
Nel Bacino Imbrifero Montano del Sarca - Min-
cio e Garda, Cantina Toblino Sca, Troms og
Finnmark Fylkeskommune, Zemgales
Planosanas Regions, Jelgavas Pasvaldibas
Operativas Informacijas Centrs, Thetis Spa,
Sdsn Association Paris, Union Internationale
Pour La Conservation de la Nature et de ses
Ressources, European Science Communica-
tion Institute gGmbH

Kontakt

Dr. Daniel Wicke
Michael Rustler

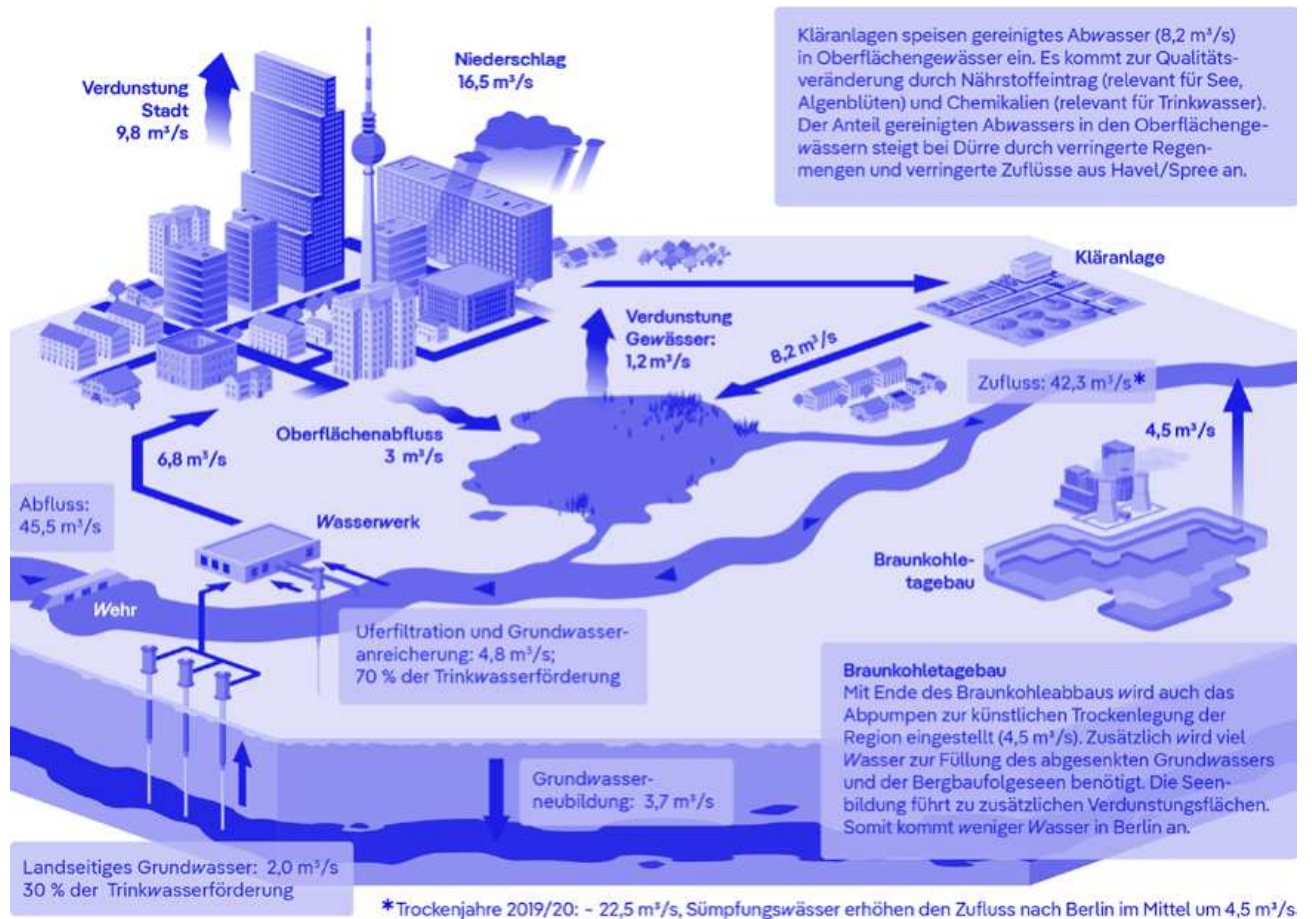
Sitzt Berlin bald auf dem Trockenen?

Die letzten Jahre waren in der Metropolregion Berlin-Brandenburg durch extreme Trockenheit und Hitze geprägt. So betrug die Niederschlagsmenge in Berlin von März bis Mai 2022 laut Deutschem Wetterdienst lediglich 55 l/m² und damit knapp 60 % weniger als im langjährigen Mittel. Damit war Berlin im Zeitraum März bis Mai zum wiederholten Male das trockenste Bundesland Deutschlands. Was dieser (klimatische) Wasserstress bereits jetzt für die Oberflächengewässer in der Metropolregion bedeutet, lässt sich in unzähligen Presseartikeln nachlesen: die Panke, die in diesem Jahr bereits im Frühjahr vor der Berliner Stadtgrenze komplett trockengefallen ist. Oder der Wasserstand des vor den Toren Berlins gelegenen Straussees, der inzwischen soweit gesunken ist, dass das Freibad schließen musste. Von solch dramatischen Wasserstandsänderungen sind die Berliner Oberflächengewässer – dank Stauhaltung und Klarwassereinleitungen der Kläranlagen – noch weitgehend verschont. Jedoch stellt sich die Frage, wie lange das noch so bleibt und welche Auswirkungen beispielweise sinkende Zuflüsse für Berlin haben.

Um die europäische Strategie zur Klimaanpassung zu beschleunigen und das Ziel zu erreichen, bis 2050 der erste klimaneutrale Kontinent zu werden, hat die Europäische Kommission ein Vorzeigeprojekt namens IMPETUS vergeben. Das Ziel: Klimaverpflichtungen in konkrete Maßnahmen zum Schutz von Gemeinschaften und der Umwelt umzusetzen. In der vom KWB geleiteten Case Study der Metropolregion Berlin-Brandenburg widmen



Ausgetrockneter Oberlauf der Berliner Panke im Sommer 2022



Partiell geschlossener Wasserkreislauf Berlins

wir uns dieser Thematik zusammen mit unseren Partnern von der Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz (SenUMVK), den Berliner Wasserbetrieben (BWB) sowie vom Global Climate Forum. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Frage, wie sich in der stetig wachsenden Metropolregion die Trinkwasserversorgung unter genannten Randbedingungen auch in Zukunft gewährleisten lässt. Da das Trinkwasser zu etwa 70 % aus in den Boden versickerndem Oberflächenwasser gewonnen wird (hauptsächlich durch Uferfiltration, aber auch künstliche Grundwasseranreicherung), beeinflussen Änderungen der Menge oder Qualität des Oberflächenwassers auch die Trinkwassergewinnung. Daher werden im Projekt mithilfe von Modellierungen ► (1) verschiedene Szenarien betrachtet, die durch Klimawandel und andere Einflüsse die Wasserressourcen Berlins in Zukunft beeinträchtigen können:

- geringerer Zufluss aus Brandenburg (durch Folgeerscheinungen nach Ende des Lausitzer Braunkohletagebaus) ► (2)
- veränderte Niederschlagsverteilung (Trockenheit in Folge des Klimawandels)
- höherer Wasserverbrauch und damit auch Abwassermenge (aufgrund von Trockenheit und Bevölkerungsentwicklung)
- mehr Verdunstung (Temperaturanstieg in Folge des Klimawandels)

► (1) Ein wichtiger Teil der Modellierungen ist die Kopplung von Grund- und Oberflächenwasser, da letzteres aktuell einen Anteil von ca. 70 % (60 % Uferfiltrat und 10 % künstliche Grundwasseranreicherung) im ausschließlich mittels Tiefbrunnen geförderten Berliner Trinkwasser aufweist. Randbedingungen für die Grundwassermodellierung sind einerseits prognostizierte Fördermengen der Wasserwerke und andererseits die Grundwasserneubildung sowie die Wasserstände und Qualität der Berliner Oberflächengewässer. Letztere werden im Rahmen des Projekts von Projektpartnern mit anderen Modellen ermittelt, die Szenarien unterschiedlicher Zuflussmengen und unterschiedlicher Anteile von gereinigtem Abwasser und Regenwasser berechnen. Eine Änderung von klimatischen Randbedingungen hat Auswirkungen auf die Grundwasserströmung. Beispielsweise führt eine Verringerung der Grundwasserneubildung bei gleichbleibenden Oberflächenständen zu höheren Uferfiltrationsanteilen, wodurch gerade im Sommer bei höheren Abwasseranteilen in den Berliner Oberflächengewässern die Rohwasserqualität negativ beeinflusst wird. Sollten die Oberflächenwasserzuflüsse von Spree, Dahme und Havel nach Berlin in Zukunft weiter abnehmen, verschärft sich dieser Trend weiter. Die Open-Source Grundwassermodellierungssoftware MODFLOW wird für die Berlin-weite Modellierung mit größerem Raster zum

Einsatz kommen. Zusätzlich wird im Rahmen von IMPETUS das bereits bei den BWB eingesetzte, räumlich höher aufgelöste Grundwassermodell FEFLOW genutzt, um für das mit MODFLOW ermittelte relevanteste Wasserwerkseinzugsgebiet Berlins noch genauere Vorhersagen zu treffen.

► (2) Für die Entwässerung der Lausitzer Tagebaue wurden in den letzten Jahrzehnten die sogenannten „Sümpfungswässer“ (abgepumptes Grundwasser) in die Spree geleitet. Diese künstliche Wasserquelle (aktuell ca. 4,5 m³/s im Jahresmittel) wird jedoch spätestens mit Beendigung der Braunkohleförderung im Lausitzer Revier in den nächsten Jahren nicht nur versiegen, sondern durch die zahlreichen neu entstehenden Bergbaufolgeseen wird eine riesige zusätzliche Verdunstungsfläche (3,6 m³/s im Jahresmittel) entstehen sowie

Basierend auf den Ergebnissen dieser Szenarien-Modellierungen sollen Kipppunkte identifiziert werden, ab denen eine nachhaltige Trinkwasserversorgung nicht mehr gewährleistet ist. Dies sind beispielsweise Mindestzuflüsse von Oberflächengewässern nach Berlin oder ein maximaler Wiedereinleitungsanteil von gereinigtem Abwasser im Gewässer. Die Ergebnisse der verschiedenen Modellberechnungen werden im Rahmen von Workshops mit relevanten Stakeholdern (z.B. mit der SenUMVK, den BWB, aber auch Verbraucher:innen aus der Industrie und der Bevölkerung) in einem interaktiven Format, sogenannte „Decision Theatre“, vorgestellt und diskutiert, um mögliche Nutzungskonflikte zu identifizieren, frühzeitig Lösungsansätze zu entwickeln und Entscheidungsfindungen zu unterstützen.



Matthias Schroeder

IMPETUS Projektleiter der SenUMVK,
Umweltwissenschaftler und Experte für Geoinformation im Referat
Wasserwirtschaft, Wasserrecht und Geologie der SenUMVK

Interview mit Matthias Schroeder von der SenUMVK

Wir sind stolz, dass wir die SenUMVK als aktive lokale Konsortialpartnerin für das EU-Green-Deal-Projekt IMPETUS gewinnen konnten. Wir haben Matthias Schroeder, IMPETUS-Projektleiter der SenUMVK, einige Fragen zur Zusammenarbeit und zur Wirkung des Projekts gestellt.

IMPETUS hat sich zum Ziel gesetzt, Klimaverpflichtungen in konkrete Maßnahmen zum Schutz von Gemeinschaften und der Umwelt umzusetzen. Welche Bedeutung hat dies für die Metropolregion Berlin-Brandenburg aus Sicht der Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verkehr und Klimaschutz?

Durch unsere Aktivitäten in IMPETUS werden digitale Werkzeuge und/oder Workflows erarbeitet, die geplante Maßnahmen zur Linderung der Auswirkungen der Klimakrise umsetzen können. Diese(s) digitale(n) Tool(s) werden speziell anhand und für die Demonstrator Site Berlin entwickelt und können idealerweise im Nachgang auch auf ähnliche Regionen in der EU adaptiert werden. Die Bedeutung für die Metropolregion Berlin-Brandenburg ist immens. Durch vielfältige Pläne und Maßnahmen wie Masterplan Wasser, Stadtgrün Berlin etc. warten sehr viele Ideen darauf, umgesetzt zu werden und wir nehmen an, dass eine fortschreitende Digitalisierung ein Baustein bei der Bewältigung der Klimakrise sein wird und somit direkt die Lebensqualität der Metropolregion steigern kann.

Neben der Fallstudie Berlin leiten wir das größte Arbeitspaket zur Demonstration innovativer Lösungen zur Anpassung an den Klimawandel an den sechs weiteren Projektstandorten in Spanien, Griechenland, Italien, den Niederlanden, Lettland und Norwegen. Das Zusammenführen von Daten, die Anwendung neuer digitaler Ansätze sowie der Test innovativer technischer und regulatorischer Maßnahmen werden genauso wie die enge Zusammenarbeit aller Projektpartner mit lokalen politischen Entscheidungsträgern, Unternehmen und Gemeinden zum Erfolg von IMPETUS beitragen.

große Wassermengen zur initialen Flutung benötigt. Damit ist von weiter sinkenden Zuflüssen nach Berlin in Spree und Dahme auszugehen. Schon jetzt bringen beide Fließgewässer im Hochsommer kaum noch nennenswert Wasser in die Stadt.

Dass kommunale Verwaltungen in große EU-Forschungsprojekte eingebunden sind, ist bisher eine Seltenheit. Welche Rolle hat das KWB als Leiter der Fallstudie in Berlin bei Ihrer Projektbeteiligung gespielt und wie gestaltet sich die Zusammenarbeit?

Als deutsches Bundesland einerseits – in diesem Falle als Stadtstaat – und als Bundeshauptstadt andererseits, sehen wir uns verpflichtet, auch auf der Ebene der Europäischen Union Forschungsprojekte zu begleiten. Dies kann als Partner in einem Forschungsverbund oder auch durch eigene Initiativen erfolgen, um drängende Fragen im größten zusammenhängenden urbanen Lebensraum Deutschlands zu untersuchen. Das KWB hat im aktuellen Projekt IMPETUS die Initiative für eine regionale Fallstudie in der Region Berlin-Brandenburg übernommen und füllt diese als Leiter der einzelnen Work Packages auch gut aus. Die Zusammenarbeit zwischen KWB und SenUMVK hat sich über die Jahre bewährt und gestaltet sich auch dieses Mal gewohnt professionell.

Was sind die nächsten Schritte in Ihrer Projektarbeit? Und wie werden aus den Projektergebnissen konkrete Maßnahmen für Berlin abgeleitet?

Die nächsten Schritte in der Projektarbeit sind die Detailplanung der einzelnen Arbeitsschritte bei der SenUMVK und das Festlegen der einzelnen Arbeiten in der Regionalpartnerschaft aus SenUMVK, KWB, Berliner Wasserbetrieben und Global Climate Forum. Die Herausforderungen sind überaus komplex und bedürfen einer genauen Planungsphase. Die Ergebnisse unserer aller Arbeit werden Eingang finden in einen Szenario-Generator, der „Decision Theatre“ genannt wird. Mittels dieses Entscheidungstheaters können dann zum Beispiel einzelne Maßnahmen angewendet und eine neue Situation simuliert werden.

Finanzierung

Im Auftrag des Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen

Partnerinstitutionen

Becker Büttner Held; Creative Cimate Cities;
Deutsches Institut für Urbanistik, DLR
Projektträger; DLR Institut für Verkehrssystem-
technik; Institut für qualifizierende Innovations-
forschung und -beratung GmbH;
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation; Fraunhofer-Institut für
Experimentelles Software Engineering;
ICLEI - Local Governments for Sustainability;
Progos AG; Urban Catalyst

Kontakt

Jochen Rabe

Dr. Nicolas Caradot

Franziska Sahr

► (1) Die Stadt Berlin ist eine von den 73 Modellkommunen der Smart City Förderung des BMWSB. Das KWB ist daher nicht nur in der Koordinierungs- und Transferstelle (KTS) tätig, sondern auch an zwei Berliner Projekten direkt beteiligt, die noch in diesem Jahr an den Start gehen:

- **Data Governance & Datengetriebene Verwaltung:** Zusammen mit dem Alexander von Humboldt Institut für Internet und Gesellschaft (HIIG) und der Siemens AG Data-Governance entwickeln wir exemplarisch Konzepte für Pilotareale, die kommunale und privatwirtschaftliche Interessen und Prozesse so integrieren, dass diese gemeinwohlorientiert ausbalanciert werden.
- **Smart Water – Modellierung und Governance:** Die Auswirkungen extremer Wetterereignisse sind offenkundig, ihre Ursachen aber für Entscheidungsträger:innen und die Öffentlichkeit schwer nachzuvollziehen. Die Maßnahme modelliert die Auswirkungen räumlicher Heterogenität und Homogenität auf den Wasserkreislauf und entwickelt ein partizipatives digitales Wandpaneel.

► (2) Ein solches Tool zur vorausschauenden Planung ist beispielsweise das von KWB und BWB entwickelte Kanalalterungsprognose-Tool SEMAplus (S. 42).

Smart Cities als Chance für die Transformation in Richtung einer nachhaltigen Zukunft

Die Digitalisierung stellt deutsche Kommunen vor neue Herausforderungen, sie birgt vor allem aber auch große Chancen für die zukünftige Entwicklung von „smarten“ Städten. Die Mission des KWB ist es, sowohl Wasserthemen eine ihrer Relevanz entsprechende, prominentere Position in der Smart-City-Debatte zu verschaffen als auch generell die Potenziale der Digitalisierung für eine nachhaltige Stadtentwicklung aufzuzeigen und eine Umsetzung voranzutreiben.

Seit 2019 fördert das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) inzwischen 73 „Modellprojekte Smart Cities“ (MPSC), die sich mit den Herausforderungen und Möglichkeiten der Digitalisierung im urbanen Raum beschäftigen und dabei einen integrierten Ansatz für die Stadtentwicklung verfolgen. Um den Wissenstransfer in die Breite der kommunalen Landschaft zu ermöglichen, hat das BMWSB die Koordinierungs- und Transferstelle Modellprojekte Smart Cities (KTS) ins Leben gerufen und ein Konsortium aus renommierten Institutionen beauftragt, mit denen das KWB zusammenarbeitet. Im Rahmen des Auftrags übernehmen wir u. a. die wissenschaftliche Begleitung und den Wissenstransfer. Ziel ist es, bedarfsgerechte digitale Lösungen für die breite kommunale Praxis zu entwickeln, sodass ein Mehrwert für alle Kommunen in Deutschland geschaffen wird ► (1).

Wissenschaftliche Begleituntersuchungen im Rahmen der Koordinierungs- und Transferstelle Smart Cities

Vor dem Hintergrund deutlich zunehmender Extremwetterereignisse und der nötigen Transformation hin zu einer nachhaltigen Stadtentwicklung interessieren wir uns besonders für das Thema Resilienz und welchen Beitrag die Smart City in diesem Zusammenhang leisten kann. Zusammen mit dem Deutschen Institut für Urbanistik (Difu) haben wir einen Bericht verfasst, der einerseits ein „Resilienzdenken“ in den Kommunen verankern sowie gezielt die Potenziale der Digitalisierung zur Stärkung der städtischen Resilienz vermitteln soll. Die vier als wesentlich identifizierten Merkmale der Resilienz – Feedback-Loops, Modularität, Diversität und Redundanz – werden anhand praxisnaher Beispiele erläutert und sollen den Kommunen dabei helfen, das Konzept Resilienz greifbarer zu machen. Besonderes Augenmerk gilt dem Zusammenspiel von Resilienz und Digitalisierung, denn es eröffnet neue Möglichkeiten, die Digitalisierung für die Resilienz von Kommunen zu nutzen und sie damit zu stärken. Zum Beispiel ermöglichen umfassende Datengrundlagen präzisere Prognosen, mit denen nicht nur eine Überwachung des Ist-Zustands, sondern auch eine Steuerung in Richtung einer nachhaltigen und resilienten Entwicklung eingeleitet werden kann ► (2).

Ein weiteres Thema, das eng mit der Zukunftsbefähigung von Kommunen verbunden ist, ist Foresight. In dieser Begleituntersuchung arbeiten das KWB, das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation und das Difu an einem Foresight-Radar mit dem Ziel, relevante Zukunftstrends für die integrierte Stadtentwicklung von Smart Cities aufzuzeigen. Hierfür hat das Projektteam soziale, technologische, ökonomische, ökologische und politische Smart-City-Trends identifiziert und wird diese im Zuge der Untersuchung mit Fachexpert:innen anhand zentraler Kriterien und Leitfragen diskutieren und qualifizieren. In Form eines Kartensets werden die Trend-Steckbriefe den Kommunen bereitgestellt, sodass jede Kommune eine ihren lokalen Gegebenheiten und Herausforderungen angepasste Debatte zum Umgang mit den bevorstehenden Smart-City-Trends anstoßen und sich proaktiv mit den relevanten Trends befassen kann.

Fachliche Beratung und Wissenstransfer

Wir beraten mit unserer Expertise rund um den Smart-City-Diskurs das BMWStB zu dessen Stufenplan Smart City. Dazu gehört auch der regelmäßige Austausch im Zuge der Nationalen Dialogplattform Smart Cities 3.0, an dem unser Geschäftsführer Jochen Rabe aktiv beteiligt ist.

Das Wissen zu Themen der Smart City soll natürlich auch in die breite kommunale Landschaft getragen werden. Im Dezember dieses Jahres leitet das KWB einen Workshop zum Thema Klimaresilienz in der Smart City. Der Workshop beschäftigt sich insbesondere mit der Frage, wie (Umwelt-)Daten dazu beitragen können, die Stadtentwicklung klimagerecht zu gestalten. Als Kick-off-Veranstaltung für eine anschließende Arbeits- und Entwicklungsgemeinschaft richtet sich der Workshop insbesondere an die Modellprojekte Smart Cities, um bereits entwickelte Lösungen vorzustellen und die Kommunen miteinander zu vernetzen.



Eine hydroinformatische Coming-of-Age-Story

Die meisten Städte stehen heute vor einem ähnlichen Problem: Ihre Wasserinfrastrukturen sind in die Jahre gekommen und müssen umfassend saniert werden, wären da nur nicht die knappen Haushaltsmittel. Investitionsverzögerungen haben jedoch reale Folgen: Die Verschlechterung der Wasser- und Abwasserversorgung erhöht das Überflutungsrisiko und führt zu gravierenden Umweltauswirkungen. In Deutschland beispielsweise hat eine kürzlich durchgeführte nationale Studie ergeben, dass 20% des Kanalisationsnetzes schwerwiegende Mängel aufweisen, die kurz- oder mittelfristig repariert werden müssen, was die Betreiber mehr als 7 Mrd. € kosten würde.

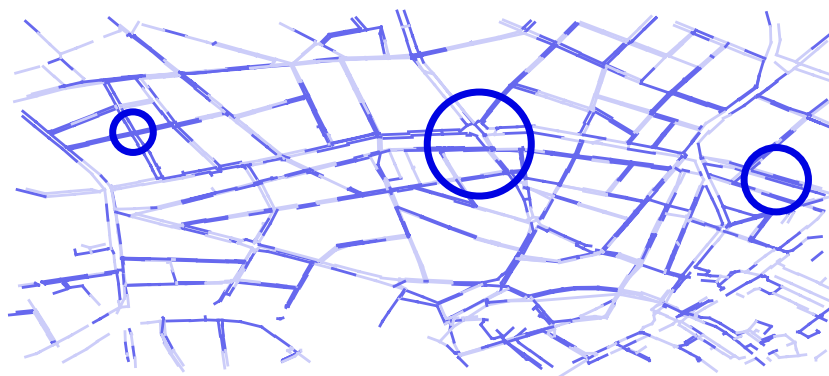
Glücklicherweise verfügen die meisten Versorgungsunternehmen über wertvolle Informationen, die ihnen helfen könnten, ihre Sanierungskosten zu senken – nämlich eine enorme Anzahl bereits gesammelter Daten. Zu diesen Daten gehören Informationen über das Alter und die Eigenschaften der Kanäle, über den Zustand der Rohre, der durch Videoüberwachungs-Inspektionen ermittelt wurde, sowie Daten über Schäden und Reparaturen. Die Hydroinformatik kann bei der Entwicklung von Methoden helfen, die diese Daten nutzen, um die bestmögliche Sanierungsstrategie unter engen finanziellen Vorgaben zu ermitteln. Vor fast zehn Jahren und lange vor der Gründung einer KWB-Hydroinformatik-Gruppe begannen wir zusammen mit den Berliner Wasserbetrieben mit der Entwicklung einer solchen Methode, die heute als SEMAplus bekannt ist. SEMAplus ist ein innovatives, nachhaltiges und kostensparendes Softwarepaket zur Steuerung kurzfristiger Sanierungserfordernisse und langfristiger strategischer Investitionen auf der Grundlage fortschrittlicher statistischer Analysen und maschinellen Lernens. Es besteht aus zwei Paketen. Der SEMAplus Haltungssimulator ([Abb. A](#)) ermittelt den aktuellen Zustand der Kanäle und hilft, dringenden Sanierungsbedarf zu lokalisieren. Der SEMAplus-Strategiesimulator ([Abb. B](#)) prognostiziert den langfristigen strukturellen Zustand des Kanalnetzes über mehrere Jahrzehnte, wobei alle vorbeugenden Maßnahmen berücksichtigt werden, und kann so den künftigen Sanierungsbedarf und die damit verbundenen Kosten berechnen. Obwohl SEMAplus als Werkzeug für Entwässerungsnetze begann, wird es bald auch für Wasserverteilungssysteme verfügbar sein.

Der ausgezeichnete Ruf von SEMAplus hat zu einer erhöhten Nachfrage geführt, weshalb wir uns entschlossen haben, die SEMAplus-Community aufzubauen. Mit deren Wachstum steht die Hydroinformatik-Gruppe am KWB vor einer neuen Herausforderung: Die Softwarelösung muss ebenfalls wachsen, um mit der zunehmenden Größe und den komplexen Bedürfnissen dieser Community Schritt zu halten. Was als eigenständiges R-Paket begann, das manuell auf den Computern unserer Kund:innen installiert wurde, muss zu einem Software-as-a-

Service-Produkt (SaaS) werden. Als SaaS wird SEMAplus in der Cloud leben, und die Benutzer können über einen Webbrowser darauf zugreifen. Dies hat den Vorteil, dass mehrere Programmierende an demselben Quellcode arbeiten können, auf den die Nutzenden automatisch zugreifen können, ohne SEMAplus immer wieder herunterladen und installieren zu müssen, wenn kleinere Fehlerbehebungen auftreten. Außerdem steht durch eine SaaS-Version jedem Community-Mitglied immer die aktuellste Version zur Verfügung, sodass wir garantieren können, dass jede:r Kund:in Zugriff auf die beste Produktversion von SEMAplus erhält.

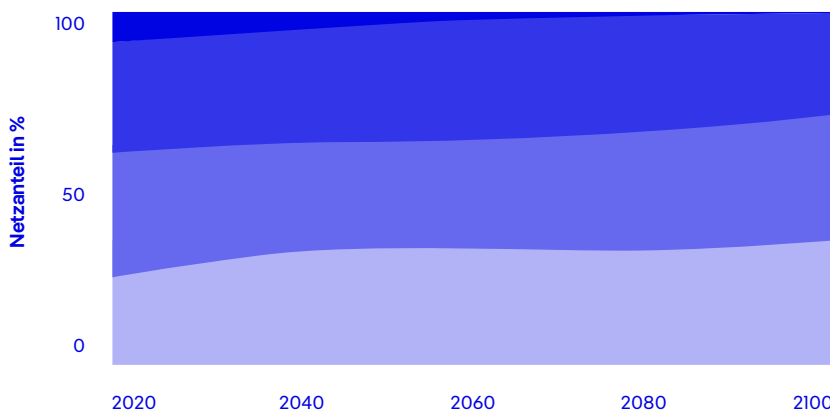
Die Entwicklung von SEMAplus ist damit aber noch nicht abgeschlossen. In Zukunft wird die SaaS-Entwicklung garantieren, dass die SEMAplus-Gemeinschaft über die neuesten Algorithmen und Methoden verfügt, um das Beste aus ihren Investitionen herauszuholen, die Alterung ihrer städtischen Wassersysteme zu stoppen und sie für immer jung zu halten. So planen wir beispielsweise, in neuen SEMAplus-Versionen mit neuen Ansätzen des maschinellen Lernens zu experimentieren, wie z.B. dem geometrischen Deep Learning (siehe Seite 54). Mit dem Aufstieg der Cloud gilt auch für SEMAplus: Only the sky is the limit.

Inspektionsschwerpunkte auf Grundlage prognostizierter Sanierungsbedürftigkeit



A SEMAplus Haltungssimulator

Netzentwicklung (Zustand/Substanz)



B SEMAplus Strategiesimulator

Projektvolumen

5.900.000 €, finanziert durch Horizon 2020
European Union Funding for Research &
Innovation

Partnerinstitutionen

Berliner Wasserbetriebe, DHI, Syndicat
Interdepartmental Pour L'assainissement De
L'agglomeration Parisienne (Siaap), Biofos As,
Kando Environmental Services Ltd, Sofiyska
Voda Ad, Universita Politecnica Delle Marche,
Cap Holding Spa, Arctik Sprl, Ecologic Institut
Gemeinnützige Gmbh, Fundacio Institut Catala
De Recerca De L'aigua, Vragments Gmbh, Ipek
International Gmbh, Universita Degli Studi Di
Milano, Istituto Superiore Di Sanita, Sorbonne
Universite, Strane Innovation Sas, Fluidion,
Adc Infraestructuras Y Sistemas Sl, Sintef As,
Institut National De Recherche En Sciences Et
Technologies Pour L'environnement Et L'agri-
culture, Partners4urbanwater, I-Catalist Sl

Kontakt

Dr. Nicolas Caradot

► (I) SWIM:AI wurde mit Blick auf die Interoperabilität entwickelt: Die Architektur des Systems ist mit FIWARE, der Referenz für Smart Cities, kompatibel. FIWARE bietet die Bausteine für eine einfache künftige Implementierung mit einem standardisierten Datenformat und Austauschprotokollen. Das System könnte ebenso leicht auf einen neuen Badeort in der Region Paris wie auf eine neue Stadt übertragen werden.

Datenströme nutzbar machen

Das EU-Horizon-2020-Projekt digital-water.city (DWC) neigt sich dem Ende zu, und seit seinem Start im Jahr 2019 ist viel erreicht worden. Das Ziel von DWC war es, neue digitale Technologien für die städtische Wasserwirtschaft zu entwickeln und das Potenzial der Digitalisierung anhand konkreter und greifbarer Beispiele in ganz Europa aufzuzeigen. Wir haben eng mit fünf EU-Städten zusammengearbeitet – Berlin, Paris, Kopenhagen, Sofia und Mailand – mit jeweils spezifischen Herausforderungen und unterschiedlichem Stand in Sachen Digitalisierung. Theoretisch haben digitale Lösungen wie künstliche Intelligenz, maschinelles Lernen, Echtzeitsensoren oder Augmented Reality das Potenzial, das Management von Wasserinfrastrukturen drastisch zu verbessern. Doch was ist in der Praxis erreicht worden? Wie profitieren die Betreibenden von der digitalen Transformation?

Neue Unterwassersensoren in Kombination mit SWIM:AI – einem Tool zur datengetriebenen Vorhersage der Wasserqualität an Badestellen – ist eine der Lösungen, die in DWC entwickelt wurden. Badegewässer sind ein sehr vielversprechender Anwendungsbereich für digitale Lösungen. Die Städte werden immer umweltfreundlicher und es werden beträchtliche Anstrengungen unternommen, um negative Umweltauswirkungen zu verringern und die Wasserqualität zu verbessern. Städtische Flüsse und Seen werden als große Chance zur Verbesserung der urbanen Lebensqualität gesehen. Paris zum Beispiel hat die Messlatte sehr hoch gelegt und sich zum Ziel gesetzt, die Flüsse Seine und Marne bis 2024 für die Olympischen und Paralympischen Spiele für Schwimmwettbewerbe nutzbar zu machen. Nach den Spielen sollen an den Flüssen Marne und Seine dauerhaft Badestellen eingerichtet werden.

Eine große Herausforderung für die Bewirtschaftung städtischer Badegewässer ist die Gewährleistung der Sicherheit der Badegäste. Die Badegewässerqualität kann im Laufe der Zeit stark schwanken, da Einleitungen aus überlaufenden Abwasserkanälen bei Starkregen hohe Mengen an Fäkalbakterien und Krankheitserregern enthalten und so ein sicheres Baden zeitweise unmöglich machen. Um die Qualität des Wassers beurteilen zu können, entnimmt man traditionellerweise regelmäßig Wasserproben, die zur Analyse an ein Labor geschickt werden. Die Ergebnisse liegen oft erst zwei Tage später vor, was jedoch zu spät ist, um rechtzeitig über die Wasserqualität zu berichten und Badende vor einer Verschmutzung warnen zu können. In DWC haben wir deswegen eine neue Generation schwimmfähiger Sensoren installiert, die von der Firma FLUIDION entwickelt wurden, um die Bakterienkonzentration im Fluss um ein Vielfaches schneller zu überwachen. Das Warten auf Laborergebnisse gehört damit der Vergangenheit an und die Dynamik der Wasserqualität kann deutlich schneller erfasst und Badende informiert werden. Die gewonnenen Daten können zum Nutzen



ALERT System von FLUIDION

der Allgemeinheit verwendet werden, z.B. indem die Menschen darüber informiert werden, wo das Wasser zum Schwimmen sicher ist. Der Sensor kann mit einer einzigen Batterieladung bis zu sieben Messungen durchführen. Da er an Ort und Stelle installiert wird, ermöglicht er eine rasche Quantifizierung der Bakterienkonzentration und gibt automatisch Warnmeldungen aus. In Berlin und Paris haben wir die Ergebnisse des Geräts mit herkömmlichen Labormessungen verglichen. Die Ergebnisse des Sensors zeigten ein hohes Maß an Übereinstimmung mit zertifizierten Labormessungen, was die Relevanz und Praktikabilität solcher Online-Überwachungsgeräte für die kontinuierliche Überwachung der Badegewässerqualität unterstreicht.

Sensoren können die Behörden also bei der Überwachung der Badegewässerqualität unterstützen. Um noch einen Schritt weiter zu gehen, hat das KWB die Open-Source-Software SWIM:AI entwickelt, ein Tool, das die Entwicklung und Umsetzung von Frühwarnsystemen erleichtert, die Vorhersagen für die Qualität von Badegewässern liefern. SWIM:AI nutzt maschinelles Lernen, um die Konzentrationen von Fäkalindikatorbakterien an Flussabschnitten in Abhängigkeit von einer Reihe lokaler Daten wie Niederschlag, Durchfluss, Temperatur oder Kanalisationsüberläufe vorherzusagen. ► (1) Die Gesundheitsbehörden sind so in der Lage, die hygienische Qualität der Badegewässer täglich zu dokumentieren, auch am Wochenende. Die Informationen können die Behörden bei der Entscheidung über potenziell notwendige Badeverbote auf der Grundlage des aktuellen Verschmutzungsrisikos unterstützen und die Kommunikation über die Qualität der Badegewässer in der Öffentlichkeit verbessern. SWIM:AI wird derzeit in Paris eingesetzt und unterstützt die lokalen Behörden bei der Ausweisung neuer Badestellen entlang der Seine und Marne.

Schon früh im Projektverlauf von DWC hat die regionale Pariser Abwasserbehörde SIAAP eine Community of Practice (CoP) ins Leben gerufen, um Institutionen, die sich mit der Verbesserung der Qualität von Badegewässern beschäftigen, und Städte, die

die Eröffnung von Badestellen anstreben, zusammenzubringen. Die gemeinsame Herausforderung bestand darin, dauerhafte und sichere Badeeinrichtungen entlang der Seine als Vermächtnis der Olympischen und Paralympischen Spiele 2024 in Paris zu schaffen und das städtische Schwimmen an mehreren Standorten ab 2025 zu fördern. Die Gruppe ist gewachsen und umfasst nun mehr als 20 Institutionen und wichtige Interessengruppen wie die Stadt Paris, die lokalen Gesundheits- und Umweltbehörden, regionale Behörden und alle Städte, die Interesse an der Eröffnung weiterer Badestellen bekundet haben. Das Ziel der CoP bestand darin, die Bürger:innen und die künftigen Betreibern von Badestellen von Beginn an in die Entwicklung digitaler Lösungen miteinzubeziehen. Alle Interessengruppen trugen zur Entwicklung zweier lokaler Anwendungen bei: eine „Expert“-Anwendung für die Betreibenden von Badestellen, in der alle Informationen zusammengefasst sind, die für die Entscheidung über die Genehmigung oder das Verbot des Badens benötigt werden, und eine „öffentliche“ Anwendung, die die Bürger:innen über den Status und praktische Informationen zu der von ihnen gewählten Badestelle informiert. Zum Abschluss von DWC hoffen wir, dass die etablierte CoP und die vielversprechenden digitalen Lösungen, die in Paris getestet wurden, einen soliden Beitrag zu dem ehrgeizigen politischen Ziel des Schwimmens im Herzen unserer Städte leisten!

Um weitere digitale Lösungen entlang des Wasserkreislaufs zu erkunden und zu erfahren, wie Betreibende die Leistung ihrer Wasser- und Abwasserinfrastruktur durch die Nutzung des Potenzials von Daten verbessern, besuchen Sie bitte die DWC-Website: www.digital-water.city

Interface der SWIM:AI





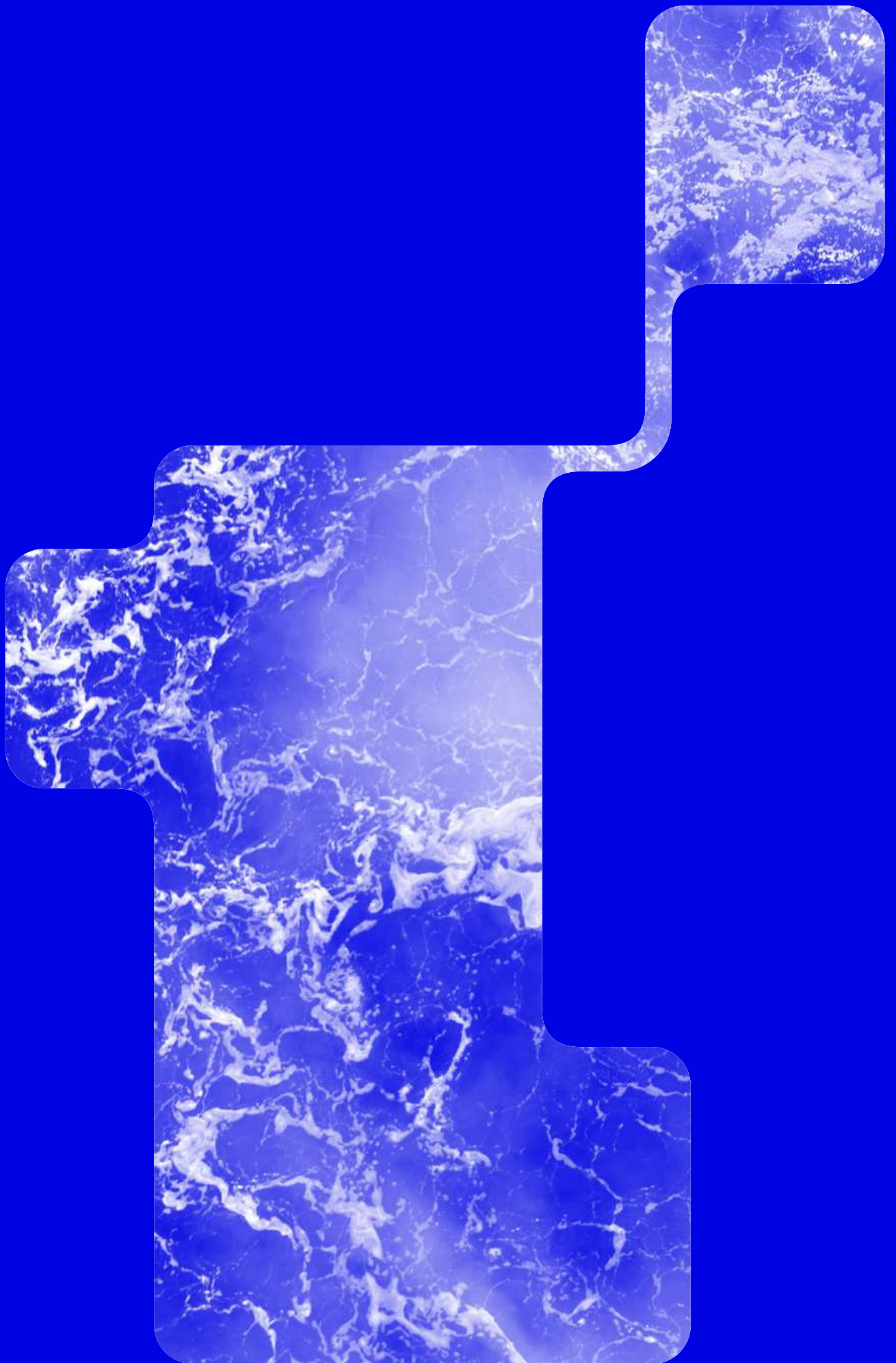
Raus- schwimmen

Wir schwimmen mit Ihnen raus und wagen einen Blick in die Zukunft. Erfahren Sie mehr darüber, wie Augmented Reality Grundwasser sichtbar macht, was es mit Geometric Deep Learning auf sich hat und wie wir die Zukunft der Wasserwiederverwendung mitgestalten.

Folgende Artikel bringen

Sie in die Zukunft:

- ▶ Grundwasser sichtbar machen
- ▶ Geometric Deep Learning
- ▶ Wasserwiederverwendung



Grundwasser sichtbar machen durch Augmented Reality

Dr. Christoph Sprenger

Die Wasserinfrastruktur unserer Städte ist mit bloßem Auge oft nicht zu erkennen. Abwasserkanäle, Trinkwasserrohre und Brunnen befinden sich unter der Erdoberfläche und entziehen sich einer direkten Beobachtung. Neben der technischen Infrastruktur hält sich auch eine wichtige natürliche Wasserressource unter der Erdoberfläche verborgen: Das Grundwasser.

Grundwasser ist für die Trinkwasserversorgung bestens geeignet. Als Teil des globalen Wasserkreislaufs kann sich Grundwasser durch Niederschläge und Uferfiltration natürlich erneuern. Dabei fließt es durch Bodenschichten, gelangt in tiefere Gesteinsschichten und wird auf natürliche Weise gereinigt und mit wertvollen Mineralien angereichert.

Grundwasserprozesse wie Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit oder der Rückhalt von Schadstoffen im Grundwasserleiter werden üblicherweise mit schematischen Visualisierungen, physikalischen Sandkastenmodellen oder numerischen Modellen simuliert und dargestellt. Im durch das KWB geleiteten EU-Projekt digital-water.city (DWC) wurde ein neuartiges System entwickelt, das es Nutzer:innen erlaubt, mit geologischen und hydrogeologischen Daten zu interagieren und diese mit Augmented Reality (AR) zu visualisieren. Es wurde ein App-Prototyp erstellt, der auf AR-fähigen Smartphones oder Tablets installiert werden kann: „Grundwasser sichtbar machen“. Diese digitale Lösung erweitert die traditionellen Visualisierungen zu räumlichen, interaktiven Ansichten für ein breites Publikum. Die App steht in einer Beta-Version im iOS App Store zum kostenfreien Download zur Verfügung.

Was ist Augmented Reality?

AR und Virtual Reality (VR) sind allgemein verwendete Begriffe, um zu beschreiben, wie Technologien Realität erzeugen oder verändern. VR bedeutet, dass die virtuellen Objekte an einen Ort im virtuellen 3D-Raum gebunden sind. Im Gegensatz dazu sind die Objekte in AR in der physischen Welt dargestellt. Rauschnabel et al. (2022) beschreibt AR-Erfahrungen als eine Art Kontinuum, das, basierend auf dem Maß der lokalen Präsenz der digitalen Objekte, von „assistierter Realität“ („assisted reality“) bis zur „gemischten Realität“ („mixed reality“) reicht. In der „assistierten Realität“, wird der digitale Inhalt als eindeutig künstlich überlagert und somit als nicht physisch vorhanden wahrgenommen. Bei der „gemischten Realität“ hingegen wirken die digitalen Objekte als wären sie tatsächlich in ihrer physischen Umgebung vorhanden, z.B. die Projektion eines Gemäldes auf eine physische Wand im Raum. Der Zweck bei Anwendungen der „assistierten Realität“ besteht darin, ein besseres Verständnis der physischen Umgebung zu erlangen und nicht die Verschmelzung digitaler Objekte mit der physischen Welt. Dieser Definition folgend ist die App „Grundwasser sichtbar machen“ in der Mitte zu verorten, in der es weder um eine bessere Wahrnehmung der physischen Umgebung noch um ein Verschmelzen der digitalen Objekte mit der physischen Welt geht. Die AR-Visualisierung dient dazu, eine Hybridwelt aus digitalen Objekten in einem physischen Umfeld zu erfahren. Hier bietet die Augmented Reality, im Vergleich zu Virtual Reality, eine attraktive und intuitive Lernumgebung.

Augmented Reality in den Geowissenschaften

Immersive Visualisierungen ermöglichen es Geowissenschaftler:innen, untereinander und mit anderen Gruppen aus verschiedenen Disziplinen zu kommunizieren und komplexe Sachverhalte besser verstehen zu können. Geowissenschaftliche Anwendungen, die auf AR oder VR basieren, existieren viele. Auf der einen Seite gibt es Anwendungen, die der Vermittlung von geowissenschaftlichen Inhalten dienen und sich an ein Fachpublikum wenden. Dazu gehört beispielsweise die App GeoXplorer, mit der Modelle von Geländeoberflächen und geologische Strukturen mithilfe von AR visualisiert werden können. Auf der anderen Seite gibt es Anwendungen, die einen erzählerischen Ansatz verfolgen und sich an ein Laienpublikum wenden. Dazu gehört die App WWF Free Rivers. Diese App zeigt in Form einer interaktiven AR-Erzählweise wie die natürlichen Ressourcen einer Landschaft zur Energiegewinnung nachhaltig genutzt werden können. Die App „Grundwasser sichtbar machen“ ist eine Mischung aus beiden

Ansätzen. Es werden Daten aus aktuellen Modellen genutzt, um damit in einem interaktiven, erzählerischen Format Lerninhalte für ein Laienpublikum zu vermitteln.

AR-Anwendungen in den Geowissenschaften können als örtliche Präsenz- oder Telepräsenz-Anwendungen umgesetzt werden. Bei örtlichen Präsenz-Anwendungen kann z.B. am Standort eines Brunnens die tatsächlich vor Ort anstehende Geologie auf einem Smartphone oder Tablet angezeigt werden (Abb. A). Bei der Telepräsenz werden die digitalen Objekte am jeweiligen Standort des Betrachters visualisiert. Dabei geht es weniger um die Übermittlung von Information, als vielmehr um die Wahrnehmungsnähe, die der Betrachter durch den digitalen Inhalt in der physischen Welt erfährt (Abb. B).

Örtliche Präsenz-Anwendungen müssen eine Reihe von technischen Hürden überwinden, z.B. Zielerkennung, Schätzung der Kameraposition, Skalierbarkeit und Bewegungsverfolgung. Aufgrund der technischen Hürden wurde von einer Entwicklung der örtlichen Präsenz-Anwendung im Projekt abgesehen. ▶

Abb. A: AR-Anwendungen örtliche Präsenz (on-site)



Abb. B: AR-Anwendungen Telepräsenz (off-site)





Abb. C: Screenshot Berliner 3D-Geologie

Hier geht's zur App im App Store

Mit Augmented Reality ins Grundwasser abtauchen

Die „Grundwasser sichtbar machen“ App kombiniert ein geologisches 3D-Modell von Berlin mit Grundwassersimulationen eines numerischen Strömungsmodells. Entwickelt wurde die App unter Leitung der Berliner Wasserbetriebe (BWB) zusammen mit dem KWB, dem Unternehmen Vragments und dem Ecologic Institute. Das KWB hat Daten zur Geologie, der Grundwassersimulation zur Verfügung gestellt und die fachliche Entwicklung vorangetrieben. Vragments war für die Integration der hydrogeologischen Daten sowie die AR-Softwareentwicklung verantwortlich. Das Ecologic Institut beschäftigte sich mit Fragen zu Governance, Marktrecherche und der iterativen Entwicklung durch Tests mit Nutzer:innengruppen.

Die App möchte die interessierte Öffentlichkeit auf ansprechende und informative Weise über die wichtige Funktion des Grundwassers informieren. Von Anfang an wurden Mitarbeitende der BWB, die Führungen in den Wasserwerken anbieten, als potenzielle Nutzer:innengruppe in die Entwicklung der App eingebunden. Die wichtigste Zielgruppe der App sind Jugendliche und Erwachsene der allgemeinen Öffentlichkeit. In Workshops mit Vertreter:innen aus den Ziel- und Nutzer:innengruppen wurden Fragen gesammelt, wie z.B.: Woher kommt das Berliner Trinkwasser? Wie gelangt das Wasser in den Brunnen? Was ist ein Grundwasserleiter? Wie entsteht eine Grundwasserströmung? Was ist ein Absenktrichter? Welche Gesteinsschichten gibt es im Untergrund und wie beeinflussen diese den Transport des Wassers? Wie wird das Wasser während des Transports

gereinigt? Anhand dieser Fragen wurden dann die Kommunikationsziele definiert. Ein solches war eine anschauliche Darstellung des geologischen Untergrunds von Berlin. Die App startet in einer berlinweiten Ansicht und zeigt den geologischen Untergrund in Form von Schichten (Abb. C).

Im AR-Modus wird das gesamte Süßwasserstockwerk (also das für die Trinkwasserversorgung nutzbare Wasserdargebot) von der Geländeoberfläche bis in maximal 300 Meter unter Gelände dargestellt. Die Nutzer:innen interagieren mit der App über ein einfaches Menüsystem, mit dem sich die gewünschten Inhalte auswählen lassen. In dieser Ansicht sind die geologischen Schichten als geowissenschaftliche Zeiteinheiten dargestellt. „Grundwasser sichtbar machen“ erlaubt das „Eintauchen“ in den geologischen Untergrund, in dem einzelne Schichten an- oder ausgeschaltet werden. Das zugrundeliegende Modell wurde aus dem „Geologischen Landesmodell für das Quartär und Tertiär“ der Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz erstellt. Es beruht auf den Auswertungen eines umfangreichen Bohrarchivs und stellt die aktuell gültige Darstellung der Berliner Geologie dar (SenUMVK, n.d.). Zusätzlich zur Geologie bietet die App kurze Informationstexte zu den Wasserwerken in Berlin.

Ein weiteres wichtiges Ziel von „Grundwasser sichtbar machen“ ist die Darstellung der Strömung des Grundwassers im Untergrund und die Funktionsweise eines Brunnens. Dazu kann der:die Benutzer:in in eine detaillierte Darstellung eines Wasserwerkes wechseln. Hier ist das

Menüdesign so umgesetzt, dass man sich in Form einer interaktiven Erzählung durch nacheinander erscheinende Szenen bewegt. Die einzelnen Szenen behandeln Themen wie z.B. grundwasserleitende und grundwasserhemmende Schichten, das Prinzip der Uferfiltration zur Trinkwassergewinnung, den Aufbau und die Wirkungsweise eines Brunnens und das Strömungsverhalten des Grundwassers.

„Neue Ansätze zur Visualisierung und Darstellung komplexer Informationen werden für die Vermittlung geowissenschaftlicher Konzepte und für die Reproduzierbarkeit von Forschungsergebnissen von entscheidender Bedeutung sein.“

Die für die Darstellung der Grundwasserströmung erforderlichen Daten werden aus numerischen Simulationen mit dem Modellierungssoftware MODFLOW durchgeführt. MODFLOW ist ein sehr weit verbreitetes open-source Werkzeug, das für vielfältige Aufgaben im Bereich der Grundwasserströmungsmodellierung eingesetzt wird. Sowohl die Modellerstellung als auch die Aufbereitung der Simulationsergebnisse aus MODFLOW erfolgen mit dem Programmiercode FloPy. Die Vorteile dieser Vorgehensweise sind die flexible Erstellung von Strömungsmodellen, das schnelle Auslesen von Simulationsergebnissen und vor allem die Möglichkeit zur Berechnung von Daten-

sätzen, die nicht direkt von MODFLOW zur Verfügung gestellt werden. Diese Datensätze werden dann zur Erzeugung der AR-Erfahrung von Vragments in UNITY integriert. UNITY ist eine Laufzeit- und Entwicklungsumgebung für Spiele. Die Rendering-Phase ist die letzte Phase der Erzeugung des Augmented-Effekts und ist die Phase, in der das sichtbare Modell erzeugt wird (Abb. D).

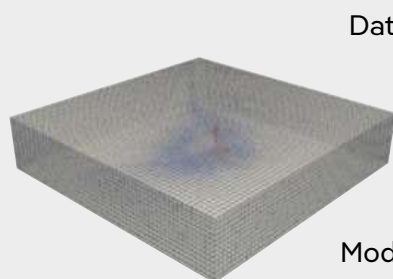
Obwohl die Entwicklung der Arbeitsabläufe auf der UNITY-Engine basiert, wurde Wert auf einen modularen Ansatz mit generischen Funktionalitäten gelegt, sodass auch andere AR-Engines in Zukunft unterstützt werden können.

Die Zukunft von Augmented Reality in den Geowissenschaften

Neue Ansätze zur Visualisierung und Darstellung komplexer Informationen werden für die Vermittlung geowissenschaftlicher Konzepte und für die Reproduzierbarkeit von Forschungsergebnissen von entscheidender Bedeutung sein. Angesichts zunehmender Komplexität von Modellen – z.B. große unstrukturierte Gitter und dynamische Randbedingungen in Raum und Zeit – ist abzusehen, dass auch die Visualisierung der Modelldaten und -ergebnisse immer komplexer wird. AR wird in diesem Zusammenhang neue Ansätze bieten, indem es komplexen numerischen Modellen eine neue quasi-physische Dimension verleiht. Modellsysteme können dank AR zur Visualisierung von geowissenschaftlichen Daten für Expert:innen und Laien in immersiver Art dargestellt werden. Das KWB wird an dieser Entwicklung auch in Zukunft mitwirken. ●

Grundwasser-Modell

Programm: MODFLOW 2005

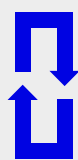


Dreidimensionales Finite-Differenzen Grundwassermodell

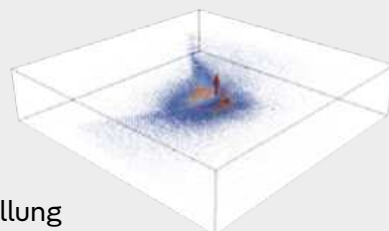
Vor- und Nachbearbeitung

Programm: FloPy

Daten auslesen



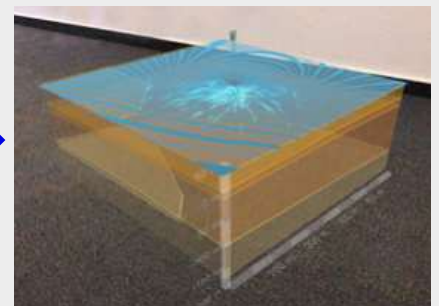
Modellerstellung



Python Paket um MODFLOW Modelle zu erstellen, auszuführen und auszulesen

Erweiterte Realität

Programm: UNITY



Entwicklungsumgebung für Computerspiele und 3D-Grafik für Windows und macOS

Abb. D: Schema der Datenverarbeitung

Geometric Deep Learning

Ein Paradigmenwechsel in der künstlichen Intelligenz revolutioniert die *Wasser*forschung

Dr. David Steffelbauer



Daten – das Öl des 21. Jahrhunderts, Treibstoff für digitale Zwillinge

Die digitale Revolution versorgt den Wassersektor mit riesigen Datenmengen, die durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien, wie das Internet der Dinge bzw. Internet of Things (IoT), erzeugt werden. Dieses Phänomen liegt in der Konvergenz dreier Faktoren begründet: erschwinglichere Sensoren, günstigere Speicherlösungen und äußerst energieeffiziente Kommunikationsgeräte. Die neuen Datenquellen liefern ständig neue Erkenntnisse über unsere Wasser- und Abwassersysteme, die es uns ermöglichen, diese Systeme effizienter und zu geringeren Kosten zu verwalten. Die digitale Revolution spielt in allen Forschungsdisziplinen des KWB eine große Rolle, da jede Gruppe mit einer beträchtlich wachsenden Menge an Daten arbeitet und digitale Werkzeuge und Fähigkeiten im Umgang mit Daten in unserem Forschungsalltag immer wichtiger werden.

„Neben Convolutional Neural Networks hat sich gewissermaßen ein ganzer ‚Zoo‘ von Deep-Learning-Architekturen entwickelt, die jeweils in der Nische, für die sie erfunden wurden, enorm erfolgreich sind.“

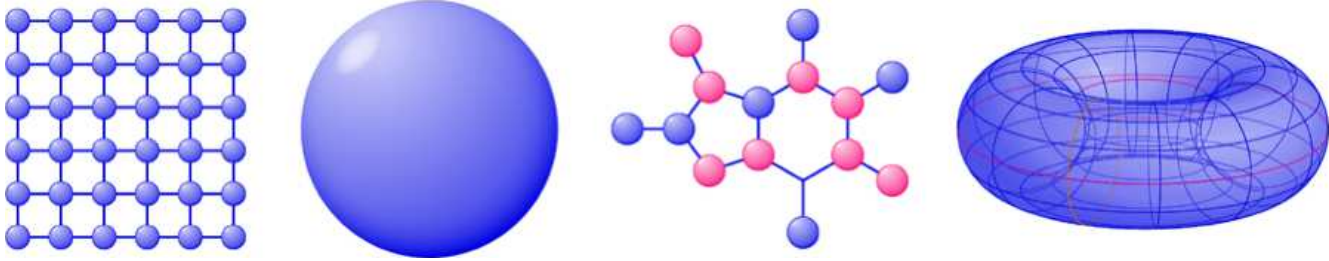
Das IoT ist erst der Anfang der digitalen Revolution; es ermöglicht, dass neue Technologien aufgrund der noch nie dagewesenen Menge an verfügbaren Daten schnell auf den Markt kommen. Digitale Zwillinge sind ein herausragendes Beispiel für neuartige modellbasierte Ansätze, die durch das IoT ermöglicht werden: Es handelt sich um Simulationsmodelle, die die Realität durch eine Schnittstelle zur physischen Welt über eine kontinuierliche Kalibrierung anhand von Messungen nachahmen. Auf diese Weise kann ein konstanter Datenstrom statischen hydraulischen Simulationsmodellen Leben einhauchen. Digitale Zwillinge werden in der Wasserwirtschaft zahlreiche Anwendungen finden, zum Beispiel für die Erkennung von Anomalien: Wenn das Verhalten des digitalen Zwillings von seinem physischen Gegenstück abweicht, muss etwas Unerwartetes im System passiert sein, und der Zwilling kann daher zur Identifizierung und Lokalisierung möglicher Fehler verwendet werden.

Darüber hinaus können die Daten genutzt werden, um Wassersysteme zu simulieren, ohne überhaupt ein hydraulisches Modell zu verwenden – durch sogenannte datenbasierte Modellierungsansätze. Anstatt unsere hydraulischen Modelle einfach mit Daten zu füttern, umgehen Wissenschaftler:innen des maschinellen Lernens erfolgreich die komplexe Hydraulik und erstellen stattdessen digitale Zwillinge, die rein auf Messdaten basieren und konsequenterweise keine hydraulischen Modelle verwenden. In den meisten Fällen basieren diese datenbasierten digitalen Zwillinge auf Deep-Learning-Algorithmen, bei denen zumeist Unmengen von Daten in künstliche neuronale Netze (englisch artificial neural networks ANN) geschaufelt werden.

Die Revolution des Deep Learning

ANN sind das Herzstück des Deep Learning. Es gibt sie schon seit den 1940er Jahren, aber erst in jüngster Zeit sind sie durch die erhöhten Datenmengen und moderne Computerhardware mächtiger geworden. Ihr Name und ihre Struktur sind vom menschlichen Gehirn inspiriert und ahmen nach, wie biologische Neuronen miteinander kommunizieren. Ein komplexes Netzwerk – aufgebaut aus einer Verbindung von Schichten relativ einfacher Neuronen – kann theoretisch jede beliebige mathematische Funktion berechnen (das so genannte universelle Approximationstheorem). Somit kann jedes physikalische Objekt simuliert oder rechnerisch komplexe Probleme gelöst werden, etwa das Erkennen von Bildern oder das Führen von Gesprächen – Fähigkeiten, die intelligentem Verhalten zugeschrieben werden. Aus diesem Grund ist Deep Learning, und insbesondere ANN, zu einem Synonym für künstliche Intelligenz (KI) geworden.

ANN haben jedoch viele Nachteile: (1) Sie sind sehr datenhungrig; (2) sie benötigen viel Computerleistung, um betrieben zu werden und (3) sie agieren als Black Boxes, was die Interpretation der Ergebnisse fast unmöglich macht, und wiederum das Vertrauen in die von neuronalen Netzen vorgeschlagenen Entscheidungen beeinträchtigt. Folglich können rein datengesteuerte Techniken ohne angemessene Fachkenntnisse in sicherheitskritischen Bereichen wie der städtischen Wasserversorgung katastrophale Folgen haben. Jüngste grundlegende Entdeckungen in der KI werden dies jedoch ändern. ►



Die 4Gs des geometrischen Deep Learning -
 (1) Gitter (z.B. Bilder), (2) Gruppen (z.B. Kugeln),
 (3) Graphen (z.B. Knoten und ihre Verbindungen),
 (4) Geodäten (z.B. 3D-Netze)

Auf dem Rücken mathematischer Symmetrien – Das Feld des Geometric Deep Learning

In den letzten Jahren wurden erhebliche Fortschritte im Bereich des Deep Learning erzielt, indem neue Modellarchitekturen entwickelt wurden, die auf Grundlage verfügbarer Daten auf bestimmte Anwendungsfälle zugeschnitten sind. Diese Modellarchitekturen kodieren induktives Vorwissen, die inhärente Symmetrien der Daten oder des Problembereichs selbst nutzen, um dem Modell zu helfen. „Faltende“ neuronale Netze (im Englischen Convolutional Neural Networks, kurz CNN) weisen beispielsweise Symmetrien auf, die als Translationsäquivalenz bezeichnet werden, die zu hohen Erfolgsquoten bei der Bild- oder Videoverarbeitung führen. Im Wasserbereich werden CNN eingesetzt, um neue Messmethoden zu entwickeln, indem beispielsweise Webcams als erschwingliche Alternative zu herkömmlichen Durchflussmessgeräten in Abwasserkanälen verwendet werden können (Meier et al., 2022).

Neben CNNs hat sich gewissermaßen ein ganzer „Zoo“ von Deep-Learning-Architekturen entwickelt, die jeweils in der Nische, für die sie erfunden wurden, enorm erfolgreich sind: Rekurrente neuronale Netze (RNN); Gated Recurrent Unit (GRU) und Long-Short Term Memory (LSTMs) Netze für die Zeitreihenanalyse; Auto-Encoder (AE), Variational Auto-Encoder (VAE); Deep Belief Networks (DBNs) und Generative Adversarische Netze (GAN) für die Erkennung von Anomalien oder die Vervollständigung fehlender Daten; Transformatoren für die Verarbeitung natürlicher Sprache und maschinelles Sehen; oder Deep Sets für permutationsinvariantes Meta-Lernen.

Michael Bronstein et al. (2021) hat kürzlich das Feld des geometrischen Deep Learning eingeführt, um alle zuvor genannten Deep-Learning-Architekturen in einem auf mathematischen Symmetrien

basierenden Rahmen zu vereinen. Er nannte dieses Bestreben das "Erlangen Programme of ML" (ML steht für Machine Learning) – zu Ehren von Felix Kleins ursprünglichem Erlanger Programm von 1872, das die verschiedenen Bereiche der Geometrie vereinheitlichte, die Ende des 19. Jahrhunderts aufkamen (z.B. euklidische vs. nicht-euklidische Geometrien wie die Riemannsche Geometrie). Obwohl sich das alte Erlanger Programm nur mit grundlegenden mathematischen Problemen befasste, waren seine Auswirkungen in anderen Bereichen immens. Vor allem in der Physik ermöglichten Symmetrieuntersuchungen die Ableitung von Erhaltungsgesetzen aus ersten Prinzipien, was schließlich zu Durchbrüchen in der Quantenphysik und der Entdeckung neuer Elementarteilchen oder auch der Relativitätstheorie führte. Ähnliche Durchbrüche werden in der Informatik von Bronsteins neuem Erlanger Projekt erwartet (und zeigen sich bereits).

Bronstein teilt Deep Learning in vier verschiedene grundlegende Kategorien ein – die 4Gs des geometrischen Deep Learning – (1) Gitter (etwa Bilder), (2) Gruppen (z.B. Kugeln), (3) Graphen (z.B. Knoten und ihre Verbindungen), (4) Geodäten (bspw. 3D-Netze). Die Verallgemeinerung von 4G hat bereits zu neuen Entwicklungen in der Informatik und zu einem raschen Fortschritt in einem bestimmten Bereich geführt: der Entwicklung von graphenbasierten neuronalen Netzen (GNN) – Deep-Learning-Architekturen, die auf das Lernen aus Daten spezialisiert sind, die als mathematische Graphen strukturiert sind. Da sich soziale Netzwerke und das Internet am besten als Graphen darstellen lassen, waren Big-Tech-Unternehmen aus dem Silicon Valley wie Meta und Google besonders daran interessiert, diesen Bereich weiterzuentwickeln. In den letzten fünf Jahren wurden hier enorme Fortschritte erzielt, sodass GNN inzwischen einer der erfolgreichsten Bereiche des maschinellen Lernens ist, der zufällig auch für den Wassersektor von größter Bedeutung ist.

Graphenbasierte neuronale Netze für den Wassersektor

Alle Wassernetze (Trinkwasser, Abwasser und Stadtentwässerung) lassen sich mathematisch als Graphen beschreiben, die aus Knoten (z. B. Sensoren, Tanks, Verbraucher:innen, Schächten) und Verbindungen (z. B. Rohren oder Abwasserkanälen) bestehen. Die jüngsten Fortschritte bei GNN bieten eine Lösung für die Nachteile bei der Anwendung von ANN (d.h. den Datenhunger, die Rechenkosten und das Black-Box-Problem). Durch die Kombination von Sensordaten mit topologischen Informationen in Form von mathematischen Graphen (z.B. aus GIS) legen GNN den Grundstein für anspruchsvollere, interpretierbare und flexible Schlussfolgerungen im maschinellen Lernen.

„In den letzten Jahren wurden für Wassersysteme zahlreiche Anwendungen von graphenbasierten neuronalen Netzen veröffentlicht, die von der Erkennung von Anomalien und Lecks über die Platzierung von Sensoren und die Zustandseinschätzung bis hin zum Transfer-Lernen reichen.“

GNN können für Wassernetze verwendet werden, die zwei Hauptvorteile gegenüber traditionellen ANN haben: (1) die topologischen Randbedingungen verbessern die Konvergenz der Algorithmen enorm, was sie schneller und datenschonender macht und (2) gelernte GNN-Merkmale sind von Natur aus mit physischen Objekten in den Graphen verbunden (Rohre, Sensoren, Schächte, Verbraucher:innen etc.), was ihre Interpretierbarkeit immens erhöht. Zu den direkten Anwendungsgebieten von GNN im Wassersektor gehören: (1) die Entwicklung von rechnerisch effizienten Ersatzmodellen (auch bekannt als datenbasierte digitale Zwillinge) durch Vereinfachung des Netzes, indem spärliche latente GNN-Darstellungen durchgesetzt werden; (2) die

Erhöhung der Widerstandsfähigkeit des Netzes, indem die anfälligsten Teile identifiziert und automatisch strukturelle Alternativen vorgeschlagen werden und (3) das Ermöglichen tieferer Einblicke in die komplexe Mathematik der Netzanalyse.

In den letzten Jahren wurden für Wassersysteme zahlreiche Anwendungen von GNN veröffentlicht, die von der Erkennung von Anomalien (Deng & Hooi, 2021) und Lecks (Zanfei et al., 2022) über die Platzierung von Sensoren (Peng et al., 2022) und die Zustandseinschätzung (Xing & Sela, 2022) bis hin zum Transfer-Lernen (Bentivoglio et al., 2022) reichen – für die Etablierung von Modellen in Netzen mit vielen Daten und deren Anwendung zur Lösung von Problemen in Systemen, für die keine Daten vorliegen.

All diese Anwendungsbereiche sind nicht auf eine verschworene Forschungsgemeinschaft beschränkt: Die Anwendung von GNN beim KWB birgt erhebliches Potenzial. Als erstes seien hier die Herausforderungen genannt, mit denen wir uns in unserer Abteilung Urbane Systeme im Bereich der Infrastrukturnetze (d.h. Trink- und Abwassernetze) beschäftigen. So können GNN im Rahmen unseres Alterungsprognosetools für Abwasserkanäle SEMAplus äußerst nützlich sein, z.B. für die Übertragbarkeit, das Auffüllen fehlender Daten oder die Entwicklung neuer Algorithmen für die Zustandsprognose (mehr zu SEMAplus auf Seite 42). GNN können aber auch in anderen Abteilungen und Gruppen des KWB eingesetzt werden, wie z.B. in unserer Abteilung Prozessinnovation, wo chemische Reaktionen und Prozesse als mathematische Graphen modelliert werden können. Deshalb sind GNN ein wichtiges zukünftiges Forschungsthema für unsere Querschnittsgruppe Hydroinformatik. Wir werden mit allen Abteilungen und Gruppen des KWB zusammenarbeiten, um dringende Probleme im Zusammenhang mit Wasser zu lösen, indem wir die neuesten Algorithmen und Werkzeuge nutzen, die auf dem schnell voranschreitenden Gebiet des geometrischen Deep Learning entwickelt werden. Freuen Sie sich also bereits auf den kommenden Jahresbericht, in dem wir über unsere nächsten Schritte berichten werden. ●

Wasser- wiederverwendung

Ein Modell für Zukunft

Dr. Ulf Miehe

Dr. Veronika Zhiteneva

Sandra Banusch

Elisa Rose



Großflächenregner auf dem Feld

Mit dem Jahr 2022 geht erneut ein Dürrejahr zu Ende, das dem Thema Wasserknappheit in Deutschland neue Brisanz verliehen hat, sowohl bei den vielfältigen Akteur:innen im Wassersektor als auch bei der Bevölkerung. Die Europäische Dürreberatungsstelle (European Drought Observatory) berichtete für August 2022, dass auf 47 % der Fläche Europas vor Dürre gewarnt wird. 17 % der Fläche befindet sich bereits in einem alarmierenden Zustand (Toreti et al., 2022). Neben Ernteeinbußen in der Landwirtschaft führt diese Situation auch zu einer Bedrohung von Ökosystemen, wie Feuchtgebieten und Wäldern. Zu den Folgen einer akuten Dürrephase kommt ein systemisches Wasserdefizit hinzu. Bereits in den letzten 20 Jahren hat Deutschland Wasser im Umfang des Bodensees verloren (Roth, 2022). Durch eine erhöhte Verdunstung aufgrund steigender Temperaturen und dadurch sinkenden Gewässerpegeln wird vermehrt auf Grundwasser als Wasserressource zurückgegriffen, das nur noch begrenzt neugebildet wird.

„Um bestehenden und künftigen Engpässen aufgrund des sich ändernden Klimas entgegenzuwirken, kann die Wasserwiederverwendung einen wertvollen Beitrag leisten.“

Gerade in Berlin-Brandenburg – gewässerreich, aber wasserarm – sind diese Trends der sich reduzierenden Wasserressourcen deutlich erkennbar. Um bestehenden und künftigen Engpässen aufgrund des sich ändernden Klimas entgegenzuwirken, kann die Wasserwiederverwendung einen wertvollen Beitrag leisten.

Wasserwiederverwendung als Anpassungsstrategie

Generell wird bei der Wasserwiederverwendung bereits gereinigtes Abwasser zusätzlich aufbereitet. Als Technologien kommen beispielsweise Filter und Desinfektionsmittel zum Einsatz. Das finale Produkt wird dann als „wiedergewonnenes Wasser“ („reclaimed water“), „Nutzwasser“ oder „Brauchwasser“ bezeichnet. Verwendet wird dieses Wasser meist für die landwirtschaftliche Bewässerung, aber auch städtische oder industrielle Nutzungen (z.B. Beregnung von Parks oder als Kühlwasser) nehmen zu. Ebenso kann dieses Wasser für die Trinkwasserversorgung genutzt werden. Letzteres erfordert jedoch höchste Ansprüche an die Aufbereitungskette sowie ein stringentes Risikomanagement, um eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit auszuschließen. Hierbei wird zudem zwischen der direkten (direct potable reuse, DPR) bzw. der indirekten (indirect potable reuse, IPR) Wasserwiederverwendung unterschieden. Bei der indirekten Nutzung wird das zusätzlich aufbereitete Wasser in Gewässer oder Reservoirs eingeleitet und unterliegt natürlichen Umwandlungsprozessen, bevor es wieder in die Wasserwerke gelangt. Bei der DPR wird das aufbereitete Wasser hingegen ohne einen „Umweltpuffer“ direkt in das Trinkwasserwerk oder -verteilnetz eingeleitet (siehe Abb. A auf S. 63).

International ist die Wasserwiederverwendung ein etablierter Bestandteil der integrierten Wasserbewirtschaftung sowie ein wichtiger Baustein lokaler und nationaler Anpassungsstrategien. So wird bereits seit 1962 in Montebello Forebay (USA) Oberflächenwasser und aufbereitetes Abwasser versickert, um die Grundwasserneubildung zu unterstützen. In Windhoek (Namibia) wurde 1968 die weltweit erste Anlage zur Wasserwiederverwendung als Trinkwasser in Betrieb genommen. In Europa wird die Wasserwiederverwendung v.a. in der Landwirtschaft seit mehr als 30 Jahren praktiziert und ist in Ländern wie Spanien, Zypern oder Griechenland durch entsprechende Gesetzgebungen rechtlich verankert. In Zypern (Fluence, 2021) sowie in einzelnen Regionen von Spanien wird fast 90 % des kommunalen Abwassers wiederverwendet.

Aufgrund fehlender gesetzlicher Grundlagen ist die gezielte Wasserwiederverwendung in Deutschland bisher nur an einzelnen Standorten mit historischen Sondergenehmigungen (z.B. Braunschweig) möglich. Dies könnte sich jedoch in naher Zukunft durch die neue EU-Verordnung ändern. ►

Neue EU-Verordnung ändert die Spielregeln

Im Jahr 2020 wurden mit der EU Verordnung 2020/741 erstmals EU-weit minimale Qualitätsanforderungen für die Wiederverwendung von kommunalen Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung festgelegt. Die Verordnung wird am 26. Juni 2023 in Kraft treten. Die notwendigen Aufbereitungsziele (Klassen A - D) orientieren sich dabei an der Art der Kulturpflanzen bzw. deren Einsatzzwecken (z.B. Pflanzen für Rohverzehr, Futtermittel oder Industrie- und Energiepflanzen) sowie den Bewässerungsmethoden. Die Verordnung schreibt zudem auch die Erstellung eines detaillierten Risikomanagementplans für den Wiederverwendungsprozess vor.

Aktuell wird in sämtlichen Behörden mit Hochdruck an den nationalen Rahmenbedingungen der EU-Verordnung gearbeitet. Dabei ergeben sich eine Reihe von Herausforderungen: 1) die Festlegung der Verantwortlichkeiten für die Genehmigung der Wasserwiederverwendung, 2) Maßnahmen zum Grundwasser- und Bodenschutz vor potentiell im Wasser vorhandenen unerwünschten Substanzen (z.B. Schwermetalle oder organische Spurenstoffe) und 3) die Erstellung eines geeigneten Risikomanagements für eine sichere Wasserwiederverwendung. Als Hilfestellung wurden dazu im August 2022 Leitlinien zur Anwendung der EU-Verordnung für die Mitgliedsstaaten veröffentlicht (European Commission Directorate-General ENV, 2022). Zu den technischen Aspekten der Wasserwiederverwendung wird derzeit eine Merkblattreihe (M1200 1 - 3) durch eine Arbeitsgruppe der DWA erarbeitet.

Eine weitere entscheidende Rolle spielt die öffentliche Akzeptanz, die eine umfangreiche Vorplanung und eine kontinuierliche Einbeziehung aller Beteiligten in den Prozess erfordert. Dies kann nur durch eine klare, ehrliche Kommunikation sowohl zu den Vorteilen (u.a. Klimaresilienz, (Land-)Wirtschaft, Wasserversorgung) als auch zu den Risiken (z.B. Transfer von Spurenstoffen in die Umwelt, reduzierte Abflüsse in Flüssen, Risiken für die menschliche Gesundheit) erreicht werden.

Wasserwiederverwendung zur Trinkwasserversorgung: Verpasst die EU eine Chance?

Die anspruchsvollste Option einer Wasserwiederverwendung ist die Nutzung des aufbereiteten Wassers als Trinkwasser. Diese Nutzungsart wird insbesondere in den USA sowohl in der Forschung als auch in der großtechnischen Umsetzung an zahlreichen Standorten intensiv verfolgt. Standorte zur Untersuchung und Umsetzungen von IPR-Anwendungen wurden bereits in den 1960ern gestartet (z.B. Orange County Water District) und konsequent durch eine langjährige Zusammenarbeit von Betreibern, Behörden und Forschungseinrichtungen weiterentwickelt. Zu den geplanten oder in Betrieb genommenen DPR-Projekten gehören z.B. Big Springs in Texas oder Cloudcroft in New Mexico.

Seitens der EU gibt es bisher keine Regularien für die Qualität von Wasser zur Wiederverwendung als Trinkwasser. In manchen Ländern wie z.B. Spanien sind DPR-Konzepte gesetzlich sogar ausgeschlossen. Die einzige DPR-Anlage in Europa wurde 2019 auf Öland (Schweden) in Betrieb genommen. Dagegen wird de-facto IPR über die Nutzung der Uferfiltration für die Trinkwasseraufbereitung in vielen mitteleuropäischen Städten praktiziert, vor allem entlang der Donau (Wien, Budapest, Belgrad) und auch in Berlin.

„Aufgrund der großen Relevanz von Wasserwiederverwendung, sei es in der Landwirtschaft oder möglicherweise auch für unser Trinkwasser, erarbeitet das KWB in verschiedensten Forschungsprojekten eine breite Palette innovativer Lösungsansätze.“

Die einzige europäische Anlage für ein gezieltes IPR wird seit 2002 in Torreele (Belgien) betrieben. Dies zeigt einerseits, dass solche Anlagen durchaus in der EU genehmigungsfähig sind, aber durch den fehlenden europäischen Rechtsrahmen hängt die Umsetzung primär von einzelnen lokalen Behörden ab.



Die sichtbaren Veränderungen der Wasserqualität durch die verschiedenen Behandlungsstufen im Rahmen des DeWaResT-Projekts.

KWB aktiv für die Wasserwiederverwendung

Aufgrund der großen Relevanz von Wasserwiederverwendung, sei es in der Landwirtschaft oder möglicherweise auch für unser Trinkwasser, erarbeitet das KWB in verschiedensten Forschungsprojekten eine breite Palette innovativer Lösungsansätze. Aktuell arbeiten wir unter anderem in diesen Projekten:

FlexTreat: *Flexible und zuverlässige Konzepte für eine nachhaltige Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft*

Die Nationale Spurenstoffstrategie des Bundes zielt auf die Einführung von Verfahrensstufen zur Spurenstoffentfernung ab. Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)-geförderten Projekt FlexTreat greifen wir diese Strategie auf, da Verfahrensketten für die Spurenstoffentfernung ein hohes Synergiepotential mit einer möglichen Wasserwiederverwendung bieten. Im Fokus der Aufbereitung sind insbesondere mikrobielle Indikatoren (z.B. *Escherichia coli*), die nur noch in sehr geringen Mengen im Wasser für die für die landwirtschaftliche Nutzung vorliegen dürfen. Zur benötigten Verringerung der *E.-Coli*-Konzentrationen um 99,99 - 99,999% kommen meist mehrstufige Verfahren zum Einsatz, die im Projekt praxisnah getestet werden.

DeWaResT: *Dezentrale Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung für Regionen mit saisonalem Trockenstress*

Im ebenfalls BMBF-geförderten Projekt wird eine neuartige Pflanzenkläranlage auf einem Naturcampingplatz entwickelt und erprobt. Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer kompakten Anlage in vertikaler Mehrschichtbauweise, die eine dezentrale Wasserwiederverwendung zur Bewässerung von Bäumen erlaubt. Im Naturschutzgebiet gelten bei minimalem Flächenbedarf sehr hohe Ansprüche an das gereinigte Abwasser. Die angestrebte Bewässerung stärkt die Resilienz der durch Dürre gefährdeten Naturdenkmäler, der lokalen Baumbestände und erfolgt dabei mit sehr geringem Energieaufwand.

ULTIMATE: *Entwicklung von Synergien zwischen Industrie- und Wassersektor*

Im Rahmen des Horizon 2020 EU-Projekts ULTIMATE werden Möglichkeiten der Wasserwiederverwendung von kommunalem Abwasser in der Industrie untersucht. Hierfür wird konventionell gereinigtes Abwasser in einer Membran-Pilotanlage behandelt (Ultrafiltration mit anschließender Umkehrosmose). Durch den hohen Anteil an nicht abbaubaren organischen Substanzen und die hohen Konzentrationen an Calcium, Hydrogencarbonat und Sulfat stellt das Abwasser eine große Herausforderung für Membrananlagen dar. Das mit der ►

Membrananlage aufbereitete Abwasser soll den Anforderungen für die Wiederverwendung als Kühlwasser und/oder für die Dampferzeugung entsprechen, sodass der Frischwasserbedarf der Industrie insgesamt sinkt.

QRMA Online-Tool:

Zur Erleichterung von Planung und Bewertung von Aufbereitungsketten für die Wasserwiederverwendung hat das KWB ein frei verfügbares Online-Tool zur quantitativen mikrobiellen Risikobewertung (QMRA) entwickelt. Es erlaubt die Abschätzung des Infektionsrisikos für drei Referenzerreger (Rotavirus, *Campylobacter jejuni* und *Cryptosporidium parvum*) für verschiedene Wasserressourcen und Behandlungsszenarien. Verschiedene Aufbereitungsketten können dabei direkt miteinander verglichen werden.

Unsere Projekte verfolgen nutzungsübergreifende technischen Ansätze in Kombination mit integrierten Risikobewertungskonzepten und tragen dazu bei, die Weiterentwicklung und Implementierung der Wasserwiederverwendung sowohl in Deutschland als auch in Europa voranzutreiben. Das KWB arbeitet somit an einer wichtigen Säule der nationalen und europäischen Klimaanpassungsstrategien und -maßnahmen und unterstützt sowohl die Landwirtschaft als auch die kommunale Wasserwirtschaft auf dem Weg in eine klimaresiliente Zukunft.

Die Zukunft der Wasserwiederverwendung in Deutschland

Aus unserer Sicht sind drei wesentliche Säulen notwendig, um die Umsetzung der Wasserwiederverwendung in Deutschland zu beschleunigen:

1) In Deutschland mangelt es an Erfahrung mit der Planung, der Genehmigung und dem Betrieb von Standorten der Wasserwiederverwendung. Halb- bis großtechnische Demonstrationsvorhaben sollten von Betreibenden, Behörden und Forschung gemeinsam mithilfe öffentlicher Fördermittel etabliert werden, wie z.B. in der aktuellen BMBF-Fördermaßnahme WavE. Sie können als Plattformen für ein besseres Verständnis dienen und v.a. auch für Vertrauen in neue Ansätze des Wassermanagements sorgen sowie als Blaupausen hinsichtlich der Kostenverteilung zwischen verschiedenen Wassernutzungen dienen.

2) Trotz der hohen Reife und Verbreitung der Wasserwiederverwendung in zahlreichen Ländern gibt es eine Reihe von Forschungsfragen, die noch

zu klären sind. Dazu gehören insbesondere die konkrete Umsetzung von chemischen Risikoanalysen sowohl für den Menschen als auch für die Umwelt, z.B. hinsichtlich des Transfers von Spurenstoffen über den Boden in das Grundwasser. Auch für den Bereich der mikrobiellen Risikoanalyse bestehen Wissenslücken, insbesondere hinsichtlich des Umgangs mit antibiotikaresistenten Bakterien, die in heutigen Ansätzen der quantitativen Risikoanalyse nicht berücksichtigt werden.

„Das KWB agiert selbstbewusst als Vorreiter auf dem Gebiet der Wasserwiederverwendung. Nach beinahe 10 Jahren Arbeit auf europäischer Ebene freuen wir uns, das Thema nun auch in Deutschland voranzubringen.“

3) Für eine erfolgreiche Durchführung von Projekten zur Wasserwiederverwendung ist neben der Lösung technischer Fragen vor allem die **öffentliche und behördliche Akzeptanz** erforderlich. Zu den wichtigsten Zutaten für ein erfolgreiches Wiederverwendungsprojekt gehören daher die Zusammenarbeit mit allen relevanten Akteur:innen, hohe technische Kompetenz, gezieltes öffentliches Engagement und Vertrauensaufbau. Planungssicherheit ist zusätzlich durch einen rechtlichen Rahmen zu gewinnen, der bisher in der EU und in Deutschland nur im Bereich der Landwirtschaft besteht.

Das KWB agiert selbstbewusst als Vorreiter auf dem Gebiet der Wasserwiederverwendung. Nach beinahe 10 Jahren Arbeit auf europäischer Ebene freuen wir uns, das Thema nun auch in Deutschland voranzubringen. ●

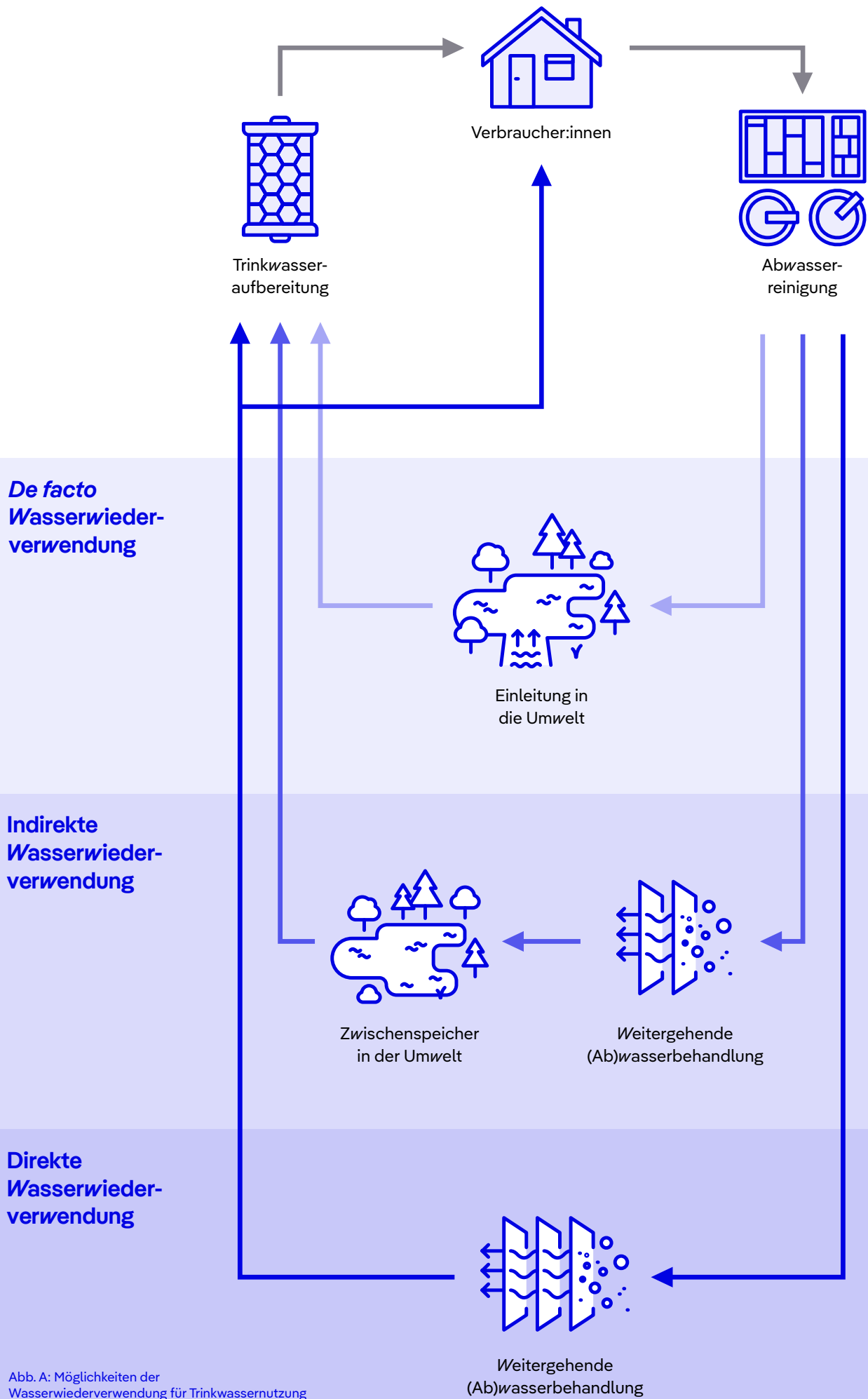


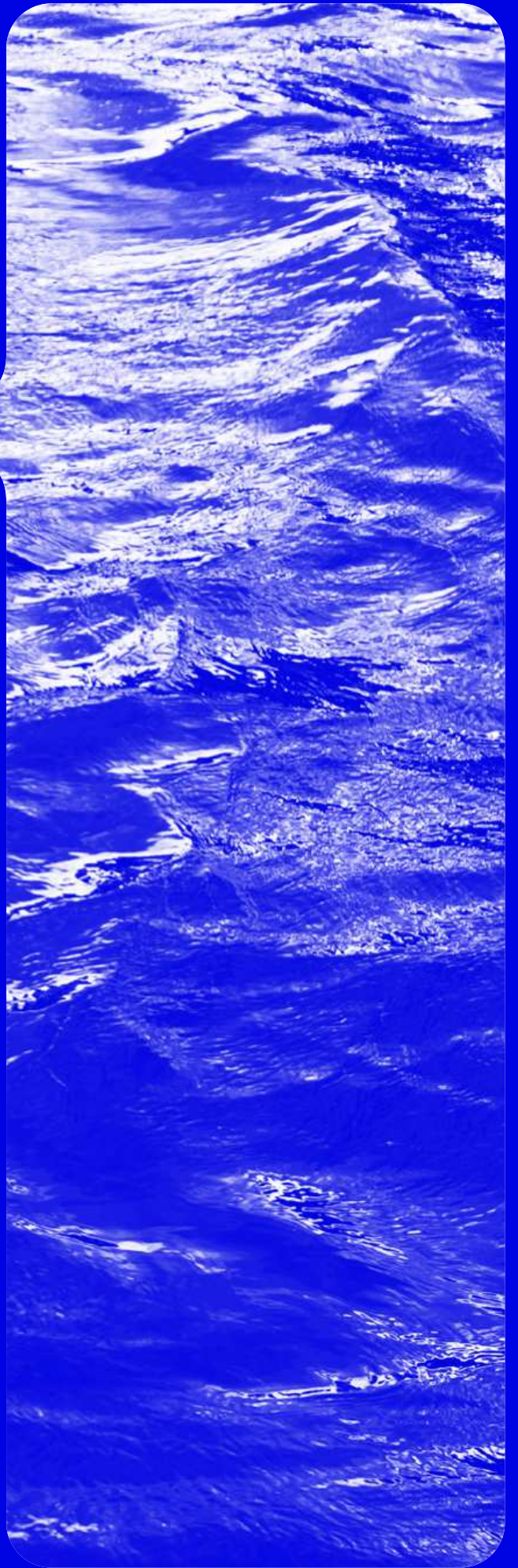
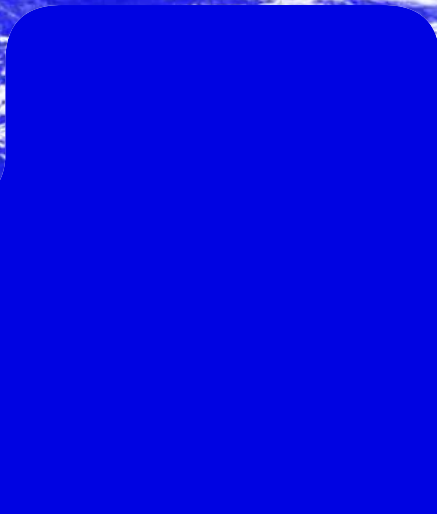
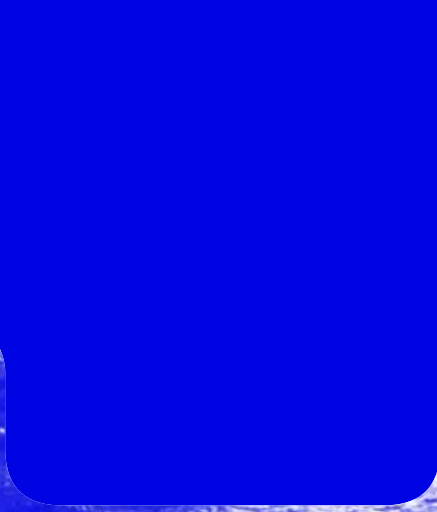
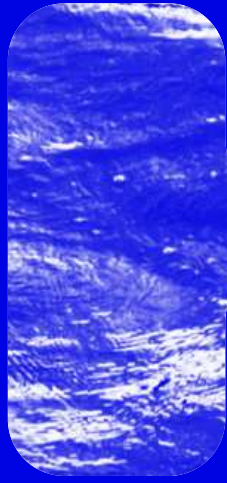
Abb. A: Möglichkeiten der Wasserwiederverwendung für Trinkwassernutzung

Anlegen

Wir gelangen wieder in ruhigere Gewässer und legen an. Auf den folgenden Seiten können Sie nicht nur unsere neuen Teamfotos betrachten, sondern uns auch bei der angewandten Forschung und auf unserem Betriebsausflug begleiten. Außerdem erhalten Sie einen Überblick über laufende Projekte und unsere Publikationen.

Sie mögen Übersichten?
Hier bekommen Sie welche:

- ▶ Team
- ▶ Forschen und Spielen
- ▶ Projektübersicht
- ▶ Publikationen



Team



Dwight Baldwin
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Grundwasser



Sandra Banusch
Wissenschaftl. Mitarbeiterin
Administration



Dr. Nicolas Caradot
Gruppenleiter
Smart City & Infrastruktur



Lea Conzelmann
Wissenschaftl. Mitarbeiterin
Energie & Ressourcen



Tobias Evel
Gruppenleiter
Administration



Lukas Guericke
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Hydroinformatik



Julian Guerlin
F&J
Administration



Jonas Hunsicker
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Aufbereitungsverfahren



Jeannette Jährig
Wissenschaftl. Mitarbeiterin
Aufbereitungsverfahren



Dr. Anne Kleyböcker
Wissenschaftl. Mitarbeiterin
Energie & Ressourcen



Lina Knaub
Duale Studentin
Administration



Franziska Knoche
Wissenschaftl. Mitarbeiterin
Regenwasser & Gewässer



Johannes Koslowski
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Energie & Ressourcen



Fabian Kraus
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Energie & Ressourcen



Moritz Lembke-Özer
Gruppenleiter
Kommunikation



Dr. Andreas Matzinger
Gruppenleiter
Regenwasser & Gewässer



Dr. Ulf Miehe
Abteilungsleiter Prozess-
innovation & Gruppenleiter
Aufbereitungsverfahren



Kristine Oppermann
Projektcontrollerin
Administration



Jochen Rabe
Geschäftsführer
Smart City & Infrastruktur



Dr. Christian Remy
Gruppenleiter
Energie & Ressourcen



Elisa Rose
Wissenschaftl. Mitarbeiterin
Energie & Ressourcen



Michael Rustler
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Grundwasser



Franziska Sahr
Wissenschaftl. Mitarbeiterin
Smart City & Infrastruktur



Rabea-Luisa Schubert
Wissenschaftl. Mitarbeiterin
Aufbereitungsverfahren



Nikolaus de Macedo Schäfer
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Smart City & Infrastruktur



Jan Schütz
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Aufbereitungsverfahren



Paul Schütz
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Smart City & Infrastruktur



Wolfgang Seis
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Hydroinformatik



Hauke Sonnenberg
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Hydroinformatik



Dr. Christoph Sprenger
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Grundwasser



Michael Stapf
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Aufbereitungsverfahren



Dr. David Steffelbauer
Gruppenleiter
Hydroinformatik



Sonja Sterling
Grafikdesignerin
Kommunikation



Dr. Daniel Wicke
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Regenwasser & Gewässer



Malte Zamzow
Wissenschaftl. Mitarbeiter
Regenwasser & Gewässer



Dr. Veronika Zhiteneva
Wissenschaftl. Mitarbeiterin
Aufbereitungsverfahren

Trainees

Das KWB wird durch viele Nachwuchstalente unterschiedlichster Fachrichtungen unterstützt. Wir sind nicht nur stolz, diese fördern zu können (etwa durch die Betreuung zahlreicher Abschlussarbeiten), sondern auch von ihren zukunftsweisenden Ideen zu profitieren.

Aishwarya Kulkarni

Technische Universität Berlin,
Water Engineering

Angelé Bienassis

Technische Universität
Compiègne, Industrial
Process Engineering

Anna Melina Meng

Technische Universität Berlin,
Technischer Umweltschutz

Annika Dankmeyer

Universität Duisburg Essen,
Management and Technology
of Water and Waste Water

Benedikt Ephraim Schwehn

Technische Universität Berlin,
Technischer Umweltschutz

Deira Julia Linke

Hochschule für nachhaltige
Entwicklung Eberswalde,
Global Change Management

Elina Henning

Berliner Hochschule für Tech-
nik, Wirtschaftsingenieur/in
Umwelt und Nachhaltigkeit

Felix Gerhardt

Technische Universität Berlin,
Technischer Umweltschutz

Iryna Dazhura

Praktikum

Julia Hecker

Technische Universität Berlin,
Technischer Umweltschutz

Konrad Johannes Billian

Freie Universität Berlin,
Geologische Wissenschaften

Laila-Mauren Peter

Technische Universität Berlin,
Technischer Umweltschutz

Lea Alexandra Wantzen

HAW Hamburg,
Umwelttechnik

Max Banko

Universität Duisburg Essen
Management and Technology
of Water and Waste Water

Qiuyue Liu

Technische Universität Berlin,
Bauingenieurwesen

Serena Radini

Praktikum

Sylvia Greulich

Technische Universität Berlin,
Technischer Umweltschutz

Thomas Exner

Technische Universität Berlin,
Technischer Umweltschutz

Tobias Felsch

Leibniz Universität Hannover,
Wasser und Umwelt

Tony Rösner

Berliner Hochschule für
Technik, Verfahrenstechnik

Forschen und Spielen



Für einige Zeit hat uns in diesem Jahr die Fotografin Iryna Dazhura aus der Ukraine begleitet und uns mit besonderem Gespür und Blick fürs Detail abgelichtet. Davon zeugen nicht nur die neuen Teamfotos, sondern auch jene, die uns bei der angewandten Forschung zeigen und beim Betriebsausflug zum Beach-Volleyball. Hier ein kleiner Auszug.



Projektübersicht

Übersicht Projekte 2022

Titel	Thema	Mittelgebende	Laufzeit	Projektleitung	Arbeitsbereich
Abluft-2/2.1	Bewertung der Mitbehandlung in der Belebung (Optimierung der Abluftbehandlung und Belebungsstufe)	BWB	Nov. 18 - Jul. 23	Anne Kleyböcker	Prozessinnovation
AD4GD	All Data 4 Green Deal – Ein integrierter, FAIR-Ansatz für den gemeinsamen europäischen Datenraum	EU Horizon Europe	Sep. 22 - Aug. 25	Malte Zamzow	Urbane Systeme
AMAREX	Anpassung des Managements von Regenwasser an Extremereignisse	BMBF	Feb. 22 - Jan. 25	Andreas Matzinger	Urbane Systeme
BluePlanet 22_23	Veranstaltungsreihe "BLUE PLANET Berlin Water Dialogues"	BMUV, SenWEB	Jan. 22 - Dez. 23	Moritz Lembke-Özer	Kommunikation
CircAgro	Schließung von Nährstoffkreisläufen in der europäischen Landwirtschaft und der Nahrungsmittelindustrie	EU H2020	Sep. 18 - Feb. 23	Fabian Kraus	Prozessinnovation
Cyber-security	Analyse der zukünftigen Entwicklung der Wasser- und Abwasserinfrastruktur und der damit verbundenen Cyberrisiken	BWB	Jun. 21 - Mär. 22	Nicolas Caradot	Urbane Systeme
Data Governance	Data & Smart City Governance am Beispiel von Luftgütemanagement	Land Berlin	Jun. 22 - Mai 25	Nicolas Caradot	Urbane Systeme
DeWaResT	Dezentrale Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung für Regionen mit saisonalem Trockenstress	BMBF	Aug. 21 - Jan. 24	Jeannette Jährgig	Prozessinnovation
DWC	digital-water.city: Urbanes Wassermanagement auf dem Weg in eine digitale Zukunft	EU H2020	Jun. 19 - Jan. 23	Nicolas Caradot, Hella Schwarzmüller	Urbane Systeme, Grundwasser
FlexTreat	Flexible und zuverlässige Konzepte für eine nachhaltige Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft	BMBF	Feb. 21 - Jan. 24	Michael Stapf	Prozessinnovation
GeoSalz	Dynamik des Salzwasseraufstiegs zur Früherkennung gefährdeter Brunnen und Quantifizierung des Hydraulischen Entlastungspotenzials	BWB	Aug. 21 - Jul. 24	Hella Schwarzmüller, Christoph Sprenger	Grundwasser
GrünesGas	Grünes Gas – Biomethan und Wasserstoff für Sektorenkopplung und Klimaschutz	BENE, BWB	Jun. 20 - Feb. 22	Christian Remy	Prozessinnovation

Titel	Thema	Mittelgebende	Laufzeit	Projektleitung	Arbeitsbereich
iBathWater	Bewirtschaftung von städtischen Abwassersystemen zur Gewährleistung der Qualität von Badegewässern	EU LIFE	Sep. 18 - Sep. 22	Pascale Rouault, Wolfgang Seis	Urbane Systeme
IMPETUS	Dynamisches Informationsmanagement für die Umsetzung klimaresilienter Anpassungspakete in europäischen Regionen	EU H2020	Sep. 21 - Mär. 25	Daniel Wicke, Andreas Matzinger	Grundwasser, Urbane Systeme
KEYS	Vorreitertechnologien für eine nachhaltige Bewirtschaftung städtischer Wassereinzugsgebiete als Schlüsselfaktor zur erfolgreichen Umsetzung des „Schwammstadt“-Konzeptes	BMBF	Aug. 18 - Jan. 22	Kuangxin Zhou	Prozessinnovation
LASSO	Entwicklung eines Messkonzepts zur Erfassung von Lachgasemissionen aus Belebungsbecken von Klärwerken	BWB	Nov. 21 - Jul. 23	Anne Kleyböcker	Prozessinnovation
LIWE	Abwasserbehandlung und Phosphorrückgewinnung im Großmaßstab in Lidköping (Schweden)	EU LIFE	Jul. 18 - Jun. 23	Fabian Kraus	Prozessinnovation
LoopSee	Thermische Nutzung von Gewässern am Beispiel einer Regenwasserbehandlungsanlage	BWB	Apr. 21 - Dez. 21	Franziska Knoche	Urbane Systeme
MBR4.0	Entwicklung digitaler Lösungen zur Optimierung von Membranbelebungsreaktoren	BMBF	Aug. 19 - Dez. 22	Kuangxin Zhou	Prozessinnovation
MISA4	Mischwasser(Einzugsgebiets)Sanierung – Strategische Planung von blau-grünen Infrastrukturen zur Verringerung der Gewässerbelastung durch Mischwasserüberläufe	SenUMVK	Jan. 22 - Dez. 22	Franziska Knoche	Urbane Systeme
NetWORKS 4+	Gestaltung der klimagerechten Stadt – netWORKS4 (Transferphase)	EU H2020	Jul. 20 - Mär. 22	Pascale Rouault, Andreas Matzinger	Urbane Systeme
NextGen	Energie- und Ressourcen-Rückgewinnung + Water Reuse	EU H2020	Jul. 18 - Nov. 22	Anne Kleyböcker	Prozessinnovation
PROMISCES	Vermeidung von persistenten organischen mobilen Industriechemikalien für eine Kreislaufwirtschaft im Boden-Sediment-Wasser-System	EU H2020	Okt. 21 - Mär. 25	Veronika Zhiteneva	Prozessinnovation
R2Q	Ressourcenplan im Quartier	BMBF	Mär. 19 - Feb. 22	Andreas Matzinger	Urbane Systeme
R-Rhenania	Modifiziertes Rhenania Phosphat aus Klärschlammasche für Bayern	BMBF	Jul. 20 - Jun. 23	Fabian Kraus	Prozessinnovation
safe Crew	Klimaresilientes Management für sichere desinfizierte und nicht desinfizierte Wasserversorgungssysteme	EU Horizon Europe	Nov. 22 - Apr. 26	Christoph Sprenger	Grundwasser

Titel	Thema	Mittel-gebende	Laufzeit	Projektleitung	Arbeitsbereich
SCOPE3M	Erfassung und Bilanzierung von unternehmensweiten Emissionen an Treibhausgasen (THG) in vor- und nachgelagerten Prozessen	BWB	Okt. 22 - Dez. 23	Christian Remy	Prozess-innovation
Sema-Berlin 2/2.1	Auswahl und Test eines Modellansatzes für die Unterstützung der Planung von Kanalinspektionsstrategien	BWB	Mai 18 - Feb. 22	Mathias Riechel, Pascale Rouault, Nicolas Caradot	Urbane Systeme
Smart-Control	Neue Verfahren zur Überwachung und Kontrolle von Prozessen der Grundwasseranreicherung	BMBF	Feb. 19 - Jan. 22	Christoph Sprenger	Grundwasser
SmartWater	Agile Planung von Regenwasserbewirtschaftung mit Fokus auf städtisches Grün und Blau	Land Berlin	Nov. 22 - Sep. 26	Andreas Matzinger	Urbane Systeme
Suleman	Aufbereitung von Grundwässern mit erhöhtem Sulfatgehalt	BMWK, BWB	Jun. 18 - Feb. 22	Jeannette Jährg	Prozess-innovation
ULTIMATE	Symbiose von Industrie und Wasser für eine intelligenter Wassergesellschaft	EU H2020	Jun. 20 - Mai 24	Anne Kleyböcker	Prozess-innovation

Legende:

- BENE Berliner Programm für Nachhaltige Entwicklung (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung und Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz)
- BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung
- BMUV Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
- BMWK Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- BWB Sponsoring der Berliner Wasserbetriebe
- EU H2020 EU Horizon 2020
- SenWEB Berliner Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe
- SenUMVK Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher und Klimaschutz

Publikationen

Projektberichte:

Caradot, N. (2022). IPR and innovation management. Deliverable H2020 project digital-water.city.

Grassauer, F., Herndl, M., Iten, L., Stüssi, M., Harder, R., Gaillard, G., Kraus, F. (2022). D5.2: Environmental profile of agro-ecosystems and of the food value chain. Hoehere Bundeslehr- und Forschungsanstalt fuer Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein: 125.

Kleyböcker, A., Bruni, C., Fatone, F., Naves Arnaldos, A., van der Broeke, Jo., Guleria, T., Touloupi, M., Iossifidis, D., Gimenez Lorang, A. Sabbah, I. Farah, K., Pidou, M., Reguer, A. Vredenburg, L., Thisgaard, P., Miehe, U. (2022). Operational demo cases. D1.2 Ultimate (Grant Agreement No. 869318): 161.

Kleyböcker, A., Bruni, C., Naves Arnaldos, A. (2022). Lessons learned from synergy workshops. D1.8 Ultimate (Grant Agreement No. 869318): 798.

Kleyböcker, A., Kenyeres, I., Poór-Pócsi, E., Nättorp, A., Loreggian, L., Schaub, M., Egli, C., Grozavescu, M., Murariu, M., Radu, B., Scheer, P., Lindeboom, R., Plata Rios, C., Suters, R., Heinze, J., Soares, A., Vale, P., Kim, J., Lanham, A., Hofman, J. (2022). New approaches and best practices for closing the materials cycle in the water sector. D1.5 NextGen (Grant Agreement No 776541).

Kleyböcker, A., Naves Arnaldos, A., Bruni, C., Fatone, F. (2021). D1.6: Technology Evidence Base concept and integration (Grant Agreement No. 869318). Berlin, Germany, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH: 24.

Kleyböcker, A., Heinze, J., Kraus, F. (2022). Enhancing biogas production via a thermal pressure hydrolysis in Kim et al. (2022). New approaches and best practices for closing the energy cycle in the water sector, D1.4 NextGen (Grant Agreement No 776541).

Kleyböcker, A., Plana Puig, Q., Kim, J. Hofman, J. (2022). Technology Evidence Base final version. D1.7 NextGen (Grant Agreement No 776541).

Kraus, F., Conzelmann, L. (2021). Schließen globaler Nährstoffkreisläufe durch Weiterentwicklung der Recyclingdünger AshDec und Struvit zu Düngern der nächsten Generation (CLOOP) - Schlussbericht. Berlin, Germany, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH: 38.

Kraus, F., et al. (2022). D6.8 Concept Studies on commercial exploitation, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH: 40.

Martínez, M. B., Goicolea, E., Wehbel, M., Gnrß, R., Housni, S., Tabuchi, J.-P., Greenhill, B., Thining, C., Bernardi, M., Dimova, V., Stein, U., Caradot, N. (2022). Communities of Practice Report #2 - Documentation of Events and Achievements. D5.2: Deliverable H2020 project digital-water.city.

Muskolus, A., Domingo, Francesc, Camps, F., Terler, G., van Groeningen, J. W., Soler, J., Clemens, J., Holba, M., Terré, M., Garcia, E., Fernández, B., Mantovi, P., Moerman, W., Kraus, F., Rose, E., Koslowski, J., Porta, À., Biel, C., Kallas, Z., McCarthy, S., Serebrennikov, D., Dünnebeil, A., Vidal, A., Ostovan, Y., Guige, J., Riau, V. (2021). D6.11: Compilation of EIP-Agri practice abstracts developed No 2. Barcelona, Spain, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries: 15.

netWORKS4 Forschungsverbund (2022). Handlungsempfehlungen für die klimarechte Planung von sozialen Infrastrukturen. Handreichungen netWORKS4. Frankfurt und Berlin: 4.

netWORKS4 Forschungsverbund (2022). Kernbotschaften für die integrierte Planung und Umsetzung von Wasser- und Grüninfrastrukturen. Handreichungen netWORKS4. Frankfurt und Berlin: 4.

netWORKS4 Forschungsverbund (2022). Planungsprozess für die vernetzte Planung von blau-grün-grauen Infrastrukturen. Handreichungen netWORKS4. Frankfurt und Berlin: 4.

Remy, C., Habibi, M., Greulich, S. (2022). Wissenschaftlicher Abschlussbericht zum Projekt „Grünes Gas – Biomethan und Wasserstoff für Sektorenkopplung und Klimaschutz“. Berlin, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH: 67.

Remy, C., Kraus, F., Conzelmann, L., Seis, W., Zamzow, M. (2022). Environmental Life Cycle Assessment and risk analysis of NextGen demo case solutions. D2.1 NextGen (Grant Agreement No 776541).

Remy, C., Sanjuan, D. (2022). D3.2: Environmental, economic and socio-economic assessment of the case study of Berlin. Berlin, Germany, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH.

Rustler, M., Caradot, N. (2021). DWC - Data Management Plan - M30 update. D7.2: Deliverable H2020 project digital-water.city.

Schramm, E., Winker, M., Rohrbach, M., Zimmermann, M., Remy, C. (2022). Abschätzung theoretischer Trinkwassersubstitutionspotenziale in Frankfurt am Main - Optionen der Betriebswassernutzung und deren ökonomische und ökologische Auswirkungen im Betrachtungshorizont bis 2050. Frankfurt am Main. ISOE - Institut für sozial-ökologische Forschung.

Schwarz Müller, H. (2022). D4.1: Assessment of baseline conditions of each demo site - Implementation planning and KPI. Berlin, Germany, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH: 113.

Sprenger, C., Rustler, M., Schlick, R., Jung-hanns, R., Glass, J. (2021). D4.3: Web-based risk assessment tools Development and implementation of a web-based tool for QMRA, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH; Technische Universität Dresden: 16.

Stapf, M., Zhiteneva, V. (2021). WWTP fitness check for API removal technology – summary report. CWPharma 2 project report for GoA2.1: Fitness check for API removal technology. Berlin, Germany, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH: 27.

Wicke, D., Matzinger, A., Rouault, P., Burkhardt, M., Rohr, M., Patrick, M., Töws, R., Steinweg, F., Leusmann, J., Gerwing, T. (2022). Neue Maßnahmen zur Reduzierung der Gewässerbelastung durch Spurenstoffe aus urbanem Regenwasserabfluss - Abschlussbericht SpuR. Berlin, Germany, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH: 39.

Williams, A., Nadeu, E., Koslowski, J., Rose, E., Serebrennikov, D., Thorne, F., McCarthy, S., Muchiri, S., Tuyishime, N. (2022). D4.4: Effects by international trade in relation to EU agriculture. East African Farmer Association; RISE Foundation; TEAGASC Agriculture and Food Development Authority; Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH: 26.

Winker, M., Trapp, J.H., Rouault, P., Gnrß, R., Gunkel, M., Matzinger, A., Schramm, E., Schütz, P. (2022). Verbundabschlussbericht "Resilient networks: Beiträge von städtischen Versorgungssystemen zur Klimagerechtigkeit (netWORKS 4)" - Teilprojekte "Soziale Ökologie", "Stadtentwicklung", "Naturwissenschaftlich-technische Bewertung", "Kommunale/städtische Wasserinfrastruktur". Frankfurt und Berlin.

Konferenzbeiträge:

Bentivoglio, R., Kerimov, B., Garzón, A., Isufi, E., Tscheikner-Gratl, F., Steffelbauer, D. B., Taormina, R. (2022). Assessing the performance and transferability of graph neural networks metamodels for water distribution systems. In the Proceedings of the 2nd International Joint Conference on Water Distribution Systems Analysis & Computing and Control in the Water Industry, 22 July 2022, Valencia, Spain.

Ernst, M., Benne, P., Claasen, L.M., Conzelmann, L., Gnirß, R., Jährig, J., Mergel, D., Remy, C., Sperlich, A., Stumme, J., Wendler, B. (2022). Effiziente Trinkwasseraufbereitung bei steigenden Sulfatbelastungen. 55. Essener Tagung für Wasserwirtschaft. 9.-11. März 2022, Essen, Deutschland.

Funke, F., Matzinger, A., Kleidorfer, M. (2021). Sensitivity of Sustainable Urban Drainage Systems to precipitation events and malfunctions based on 60-year long-term modelling. 15th International Conference on Urban Drainage, 25-28 October 2021, ICUD, Melbourne, Australia. Online Conference.

Glass, J., Schlick, R., Junghanns, R., Sprenger, C., Stefan, C. (2022). Advancement of the INOWAS groundwater modelling platform: web-based tools for real-time monitoring and assessment of risks at managed aquifer recharge sites. Groundwater, key to the sustainable developments goals, 18-20 May 2022, Paris, France.

Jährig, J., Benne, P., Conzelmann, L., Sperlich, A., Miehe, U. (2021). Pilotierung von Verfahrensoptionen für die Sulfatentfernung bei der Trinkwasseraufbereitung: Niederdruckumkehrosiose mit Wickel- bzw. Hohlfasermodule und Ionenaustausch. 14. Aachener Tagung Wassertechnologie, 2.-3. November 2021, Aachen, Deutschland.

Kerimov, B Tscheikner-Gratl, F., Steffelbauer, D. B. (2022). Transferable surrogate models based on inductive biases of graph neural networks for water distribution systems. EGU General Assembly, 23-27 May 2022, Vienna, Austria.

Kerimov, B., Tscheikner-Gratl, F., Taormina, R., Steffelbauer, D. B. (2022). The shape of water distribution systems – describing local structures of water networks via graphlet analysis. In the Proceedings of the 2nd International Joint Conference on Water Distribution Systems Analysis & Computing and Control in the Water Industry, 22 July 2022, Valencia, Spain.

Knoche, F., Seis, W., Angelescu, D. & Hausot, A. (2022). Portable and in-situ instruments for rapid quantification of Escherichia coli in surface waters – Operation and validation of the Fluidion ALERT Technologies. Analytica conference 2022, 21.-23.06.2022 Munich, Germany.

Koslowski, J., Kraus, F. (2022). Vacuum degasification/acidic-neutral absorption for nitrogen recovery from agricultural digestate. In New Technologies for Nutrient Recovery session at 5th Phosphorus in Europe Research Meeting (ESPC4/PERM5), 22 June 2022. Vienna, Austria.

Kraus, F. (2022). Aktueller Stand beim Phosphorrecycling. Karlsruhe, Tagungsband der 33. Karlsruher Flockungstage 2022, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft. 7.-8. November, Karlsruhe, Deutschland.

Lions, J., Togola, A., Groot, H., Bakker, M., van Hullebusch, E.D., Miehe, U., Zhiteneva, V., Dullio, V., Zijp, M., Heine, N., Track, T., Sperlich, A., Zessner-Spitzenberg, M., Bosch, C., Fatone, F., Colombano, S., Fernandez-Rojo, L., Negrel, P. (2022). Establishing a zero-pollution circular economy: an overview of the H2020 project PROMISCES. EGU General Assembly, 23-27 May 2022, Vienna, Austria.

Mohan Doss, P., Steffelbauer, D. B., Piller, O., Rokstad, M. M., & Tscheikner-Gratl, F. (2022). A hybrid leak detection framework using variational autoencoder surrogates. IWA WaterLoss2022 Conference, 19.-22 June 2022 Prague, Czech Republic.

Mohan Doss, P., Steffelbauer, D. B., Rokstad, M. M., Tscheikner-Gratl, F. (2022). A tale of two methods: Uncertainties in data-driven versus model-based leakage detection and localization methods in water distribution systems. EGU General Assembly, 23-27 May 2022, Vienna, Austria.

Mutzner, L., Furrer, V., Castebrunet, H., Dittmer, U., Fuchs, S., Gernjak, W., Gromaire, M.-C., Matzinger, A., Mikkelsen, P. S., Selbig, W. R., Vezzaro, L. (2021). A data-driven analysis of trace contaminants in wet-weather discharges. 15th International Conference on Urban Drainage, 25-28 October 2021, ICUD, Melbourne, Australia. Online conference.

Remy, C., Toutian, V., Loderer, C. (2022). Thermal or thermo-alkaline hydrolysis for waste activated sludge? Comparison of pros and cons for a Berlin WWTP. IWA Water and Resource Recovery Conference, 10-13 April 2022, Poznan, Poland, International Water Association Publishing.

Riechel, M., Sonnenberg, H., Ringe, A., Lenge-mann, N., Eckert, E., Caradot, N., Rouault, P. (2022). Uncertainties in sewer deterioration and rehabilitation modelling. Proceedings LESAM Conference 2022, 11-13 May 2022, Bordeaux, France.

Ringe, A., Riechel, M., Caradot, N., Lenge-mann, N., Eckert, E., Sonnenberg, H., Rouault, P. (2022). The operational benefit of condition forecasts on pipe-level in Berlin, Germany. Proceedings LESAM Conference 2022, 11-13 May 2022, Bordeaux, France.

Riva, R. E. M., Steffelbauer, D. B., Timmermans, J., Kwakkel, J., Bakker, M. (2022). Evidence of acceleration in sea-level rise for the North Sea. EGU General Assembly, 23-27 May 2022, Vienna, Austria.

Sperlich, A., Conzelmann, L., Remy, C., Benne, P., Jährig, J., Gnirß, R. (2021). Vergleich von Verfahrensoptionen für die Sulfatentfernung bei der Trinkwasseraufbereitung. 14. Aachener Tagung Wassertechnologie, 2.-3. November 2021, Aachen, Deutschland.

Sperlich, A., Conzelmann, L., Remy, C., Benne, P., Jährig, J., Schulz, M., Gnirß, R. (2021). Vergleich von Verfahrensoptionen für die Sulfatentfernung bei der Trinkwasseraufbereitung. 25. Trinkwasserkolloquium Hamburg, 23. September 2021, Hamburg, Deutschland.

Steffelbauer, D. B., Deuerlein, J., Gilbert, D., Abraham, E., Piller, O. (2022). Real-world application of the dual model for model-based leak localization. Proceedings of the IWA WaterLoss2022 Conference, 19-22 June 2022, Prague, Czech Republic.

Steffelbauer, D. B., Hillebrand, B., Blokker, E.J.M. (2022). pySIMDEUM – An open-source stochastic water demand end-use model in Python. In the Proceedings of the 2nd International Joint Conference on Water Distribution Systems Analysis & Computing and Control in the Water Industry, 18.-22. July 2022, Valencia, Spain.

Steffelbauer, D. B., Piller, O., Chambon, C., Abraham, E. (2022). Towards a novel multi-purpose simulation software of water distribution systems in Python. Proceedings of the 14th International Conference on Hydroinformatics, 4-8 July 2022, Bucharest, Rumania.

Tscheikner-Gratl, F., Caradot, N., Cherqui, F. et al. (2022). Urban drainage asset management – now and future. Proceedings LESAM Conference 2022, 11-13 May 2022, Bordeaux, France.

Zamzow, M., Kerres, K., Caradot, N., Gredigk-Hoffmann, S., Rouault, P. (2022). Impact of inspection data quality on structural substance assessment of sewers. Proceedings LESAM Conference 2022, 11-13 May 2022, Bordeaux, France.

Zhiteneva, V., Wicke, D., Knoche, F., Rouault, P., Miehe, U., Gnirß, R., Sperlich, A. (2022). Urbane Gebiete als Quelle von PFAS und anderen Industriechemikalien: Das Horizon 2020 Projekt PROMISCES. 4. Kongress Spurenstoffe in der Aquatischen Umwelt. 04.-05. Mai 2022, Stuttgart-Bad Cannstatt, Deutschland.

Artikel in Fachzeitschriften:

Hernandez, N., Caradot, N., Sonnenberg, H., Rouault, P., Torres, A. (2021). Is it possible developing reliable prediction models considering only the pipe's age for decision-making in sewer asset management? Journal of Modelling in Management, 16(4), 1166-1184.

Meier, R., Tscheikner-Gratl, F., Steffelbauer, D. B., Makropoulos, C. (2022). Flow Measurements Derived from Camera Footage Using an Open-Source Ecosystem. Water 14: 424.

Mutzner, L., Furrer, V., Castebrunet, H., Dittmer, U., Fuchs, S., Gernjak, W., Gromaire, M.-C., Matzinger, A., Mikkelsen, P.S., Selbig, W. R., Vezzaro, L. (2022). A decade of monitoring micropollutants in urban wet-weather flows: What did we learn? Water Research 223. doi:10.1016/j.watres.2022.118968

Panagiotou, C. F., Stefan, C., Papanastasiou, P., Sprenger, C. (2022). Quantitative microbial risk assessment (QMRA) for setting health-based performance targets during soil aquifer treatment. Environmental Science and Pollution Research: S24 September 2022. Doi: 10.1007/s11356-022-22729-y

Remy, C., Greulich, S., Günsch, R. (2022). Klimaschutz aus dem Klärwerk. *wwt* 2022(6): 3.

Seis, W., Rouault, P., Mieke, U., ten Veldhuis, M.-C., Medema, G. (2022). Bayesian estimation of seasonal and between year variability of norovirus infection risks for workers in agricultural water reuse using epidemiological data. *Water Research* 224. doi: 10.1016/j.watres.2022.119079

Steffelbauer, D. B., Deuerlein, J., Gilbert, D., Abraham, E., Piller, O. (2022). Pressure-Leak Duality for Leak Detection and Localization in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 148(3): doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001515

Steffelbauer, D. B., Riva, R.E.M., Timmermans, J. S., Kwakkel, J. H., Bakker, M. (2022). Evidence of regional sea-level rise acceleration for the North Sea. *Environmental Research Letters* 17(7). doi: 10.1088/1748-9326/ac753a

Wicke, D., Tatis-Muvdi, R., Rouault, P., Zerbball-van Baar, P., Dünnbier, U., Rohr, M., Burkhardt, M. (2022). Emissions from Building Materials - A Threat to the Environment? *Water* 14(3). Doi: 10.3390/w14030303

Zhiteneva, V., Mieke, U., Heine, N. (2022). Auf dem Weg zu einer schadstofffreien Kreislaufwirtschaft. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 69(7): 2.

Buchkapitel:

Kabbe, C., F. Kraus (2022). Phosphor – Von der Rückgewinnung zum Recycling p. 809-833 in Peter Kurth, Anno Oexle and Martin Faulstich: *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft 2.*, überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden, Springer.

Makropoulos, C., Casas Garriga, S., Kleyböcker, A., Sockeel, C., Plata Rios, C., Smith, H., Frijns, J. (2022). A water-sensitive circular economy and the nexus concept p. 448 in S. R. S. Floor Brouwer: *Handbook on the Water-Energy-Food Nexus.* Wageningen Research, Netherlands.

Abschlussarbeiten:

Felsch, T. (2022). Ableitung von Empfehlungen aus Strömungs- und Strukturmodellen für den Bau und Betrieb von salzwasserbeeinflussten Brunnen am Beispiel der Brunngalerie K des Wasserwerks Berlin-Friedrichshagen. Master Thesis. Fernstudium Wasser und Umwelt. Leibniz Universität Hannover.

Greulich, S. (2022). Vergleich von Verfahren zur Produktion von Biomethan und grünem Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen auf dem Klärwerk Schönerlinde. Master Thesis. Fachgebiet Umweltverfahrenstechnik. Berlin, Technische Universität Berlin.

Koslowski, J. (2021). Inbetriebnahme einer Versuchsanlage zur Rückgewinnung von Ammoniak aus landwirtschaftlichen Gärresten. Master Thesis. Institut für Technischen Umweltschutz, Technische Universität Berlin.

Kulkarni, A. (2022). Modelling of a municipal wastewater treatment plant treating a high fraction of industrial wastewater in order to develop an enhanced and a predictive control system. Master Thesis. Bauingenieurwesen. Berlin, Technische Universität Berlin.

Meng, M. (2022). Thermisch-alkalisch unterstützte Ammoniakentgasung – Auswirkungen auf das Biomethanpotential von Gärresten. Bachelor Thesis. Fachgebiet Umweltverfahrenstechnik, Technische Universität Berlin.

Peter, L.-M. (2022). Performance of different condensing setups and operating parameters in ammonia recovery pilot plant with biogas digestate. Master Thesis. Umweltverfahrenstechnik, Technische Universität Berlin.

Rösner, T. (2022). Inbetriebnahme und Optimierungsoptionen eines Ammoniakwäschers bei der Unterdruckentgasung landwirtschaftlicher Gärreste. Master Thesis. Verfahrenstechnik, Berliner Hochschule für Technik.

Schütz, P. (2022). Assessing the effectiveness and resilience off Low Impact Development (LID) in a large urban area in Berlin. Master Thesis. Bauingenieurwesen. Berlin, Technische Universität Berlin.

Schwatke, B. (2022). Optimierung einer Vakuumentgasungsanlage zur Stickstoffrückgewinnung aus Gärresten. Master Thesis. Verfahrenstechnik, Beuth Hochschule für Technik Berlin.

Datasets:

Wicke, D., Tatis-Muvdi, R., Rouault, P., Zerbball-van Baar, P., Dünnbier, U., Rohr, M., Burkhardt, M. (2021). Emissions from building materials - concentration of micropollutants and heavy metals in stormwater runoff of two new development areas in Berlin (Germany). Berlin, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH.

Weitere:

Burkhardt, M., Wicke, D., Matzinger, A. (2021). Drei Merkblätter zur Gestaltung von Fassaden sowie Planung und Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung der Belastung in Regenwasserabflüssen. Ostschweizer Fachhochschule und Kompetenzzentrum Wasser Berlin.

Wicke, D., Matzinger, A., Burkhardt, M. (2022). Sauberes Regenwasser in Städten – ein Leitfaden zur Maßnahmenplanung. Kompetenzzentrum Wasser Berlin und Ostschweizer Fachhochschule.

Winker, M., Matzinger, A., Anterola, J., Frick-Trzebitzky, F., Pillen, J., Schramm, E. (2022). Infokarten für die Planung blau-grüner Infrastrukturen. Forschungsverbund netWORKS, Frankfurt am Main, Deutschland.

Herausgeber
Kompetenzzentrum Wasser
Berlin gGmbH
Cicerostrasse 24
10709 Berlin

Geschäftsführer
Jochen Rabe
Redaktionsschluss
01.11.2022

Redaktion
Moritz Lembke-Özer,
Sandra Banusch,
Veronika Zhiteneva,
Julian Guerlin
(Publikationsliste)

Umsetzung
Sonja Sterling

Druck
Burger Druck GmbH

 www.kompetenz-wasser.de

 [Kompetenzzentrum Wasser Berlin](https://www.linkedin.com/company/kompetenzzentrum-wasser-berlin)

 [@kompetenzwasser](https://twitter.com/kompetenzwasser)

Literaturnachweise

S. 16-21: Wie nachhaltig ist die Kreislaufwirtschaft? – Innovative Technologien aus unserem Projekt NextGen

Remy, C., Kraus, F., Conzelmann, L., Seis, W., Zamzow, M. (2022). *Environmental life cycle assessment and risk analysis of NextGen demo case solutions* (NextGen Deliverable 2.1, EU Horizon 2020, Grant Agreement No. 776541). Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH.

Kleyböcker, A., Kenyeres, I., Poór-pocsi, E., Nätörp, A. Loreggian, L., Schaub, M., Egli, C., Groza-vescu, M., Murariu, M., Radu, B., Scheer, P., Lindeboom, R., Plata Rios, C., Suters, R., Heinze, J., Soares, A., Vale, P., Kim, J., Lanham, A., Hofman, J. (2022a). *New approaches and best practices for closing the materials cycle in the water sector* (NextGen Deliverable 1.5, EU Horizon 2020, Grant Agreement No. 776541). Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH.

Kleyböcker, A., Plana Puig, Q., Kim, J., Hofman, J. (2022b). *Technology Evidence Base final version*. (NextGen Deliverable 1.7, EU Horizon 2020, Grant Agreement No. 776541). Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH.

S. 22-26: Neue Herausforderungen – Cybersecurity im Wassersektor

Chowdry, M. S. U., Emran, T. B., Ghosh, S., Pathak, A., Alam, M. M., Absar, N., ... & Hossain, M. S. (2019). IoT based real-time river water quality monitoring system. *Procedia Computer Science*, 155, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.025>

Ismail, N., Rajendran, S., Tak, W. C., Xin, T. K., Anuar, N. S. S., Zakaria, F. A., ... & Rahim, H. A. (2019). Smart irrigation system based on internet of things (IoT). *Journal of Physics: Conference Series*, 1339(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1339/1/012012>

Koo, D., Piratla, K., & Matthews, C. J. (2015). Towards sustainable water supply: schematic development of big data collection using internet of things (IoT). *Procedia engineering*, 118, 489-497. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.465>

Rabaey, K., Vandekerckhove, T., Van de Walle, A., & Sedlak, D. L. (2020). The third route: Using extreme decentralization to create resilient urban water systems. *Water Research*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116276>

Rasekh, A., Hassanzadeh, A., Mulchandani, S., Modi, S., & Banks, M. K. (2016). Smart water networks and cyber security. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000646](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000646)

Singh, M., & Ahmed, S. (2021). IoT based smart water management systems: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5211-5218. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.588>

Tufan, E., Tezcan, C., & Acartürk, C. (2021). Anomaly-based intrusion detection by machine learning: A case study on probing attacks to an institutional network. *IEEE Access*, 9, 50078-50092. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068961>

S. 50-53: Grundwasser sichtbar machen durch Augmented Reality

Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J., & Fienen, M. N. (2016). Scripting MODFLOW Model Development Using Python and FloPy. *Groundwater*, 54(5), 733-739. <https://doi.org/10.1111/gwat.12413>

Rauschnabel, P. A., Felix, R., Hirsch, C., Shahab, H., & Alt, F. (2022). What is XR? Towards a framework for augmented and virtual reality. *Computers in Human Behavior*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107289>

SenUMVK (n.d.). *Geologisches Landesmodell für das Quartär und Tertiär*. Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz. Abgerufen 11. November 2020, unter <http://berlin.geo-3d.de/berlin3d/portal/>

Bildnachweis

S. 2: Frank Bruckmann, © Berliner Wasserbetriebe / Marcus Zumbansen; Nicolas Zimmer, © S. Wieland

S. 4: © Christian Kielmann

S. 7: © Jochen Rabe

S. 9: Cort Landt via Pexels

S. 10: © KWB: Sonja Sterling, Dr. Daniel Wicke, Dr. Andreas Matzinger

S. 15: © Iryna Dazhura für KWB

S. 16: © KWB: Dr. Anne Kleyböcker, Sonja Sterling

S. 18: © Klio Monokrousou für NTUA

S. 20-21: © Dr. Anne Kleyböcker für KWB

S. 22: © Adi Goldstein via Unsplash

S. 24: © KWB: Bianca Cramer

S. 27: © Julian Guerlin für KWB

S. 28: © Michael Burrows via Pexels

S. 30: © KWB: Sonja Sterling, Dr. Veronika Zhiteneva, Dr. Ulf Mieke

S. 32: © KWB: Sonja Sterling, Dr. Andreas Matzinger

S. 33: © KWB: Lukas Guericke, Sonja Sterling, KWB

S. 34-35: © Iryna Dazhura für KWB

S. 36: © Raphael Knop für rbb

S. 54-57: Geometric Deep Learning: Ein Paradigmenwechsel in der künstlichen Intelligenz revolutioniert die Wasserforschung

Bentivoglio, R., Kerimov, B., Garzon Diaz, J.A., Isufi, E., Tscheikner-Gratl, F., Steffelbauer, D.B., & Taormina, R. (2022). Assessing the Performances and Transferability of Graph Neural Networks Metamodels for Water Distribution Systems. *Proceedings of the 2nd International Joint Conference on Water Distribution System Analysis (WDSA) & Computing and Control in the Water Industry (CCWI) Conference*. <https://drive.google.com/file/d/1PfmwJiXQ3TUUU4t6AK-bMsvpRDLXfcRlu/view>

Bronstein, M. M., Bruna, J., Cohen, T., & Velicković, P. (2021). Geometric deep learning: Grids, groups, graphs, geodesics, and gauges. *ArXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.13478>

Deng, A., & Hooi, B. (2021). Graph neural network-based anomaly detection in multivariate time series. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 35(5), 4027-4035.

Meier, R., Tscheikner-Gratl, F., Steffelbauer, D.B., Makropoulos, C. (2022). Flow Measurements Derived from Camera Footage Using an Open-Source Ecosystem. *Water*, 14(3), 424. <https://doi.org/10.3390/w14030424>

Peng, S., Cheng, J., Wu, X., Fang, X., & Wu, Q. (2022). Pressure Sensor Placement in Water Supply Network Based on Graph Neural Network Clustering Method. *Water*, 14(2), 150. <https://doi.org/10.3390/w14020150>

Xing, L., & Sela, L. (2022). Graph Neural Networks for State Estimation in Water Distribution Systems: Application of Supervised and Semisupervised Learning. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001550](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001550)

Zanfei, A., Menapace, A., Brentan, B. M., Righetti, M., & Herrera, M. (2022). Novel approach for burst detection in water distribution systems based on graph neural networks. *Sustainable Cities and Society*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104090>

S. 58-63: Wasserwiederverwendung – Ein Modell für Zukunft

European Commission Directorate-General for Environment. (2022). *Commission Notice Guidelines to support the application of Regulation 2020/741 on minimum requirements for water reuse* (Official Journal of the European Union C 298/1, Vol. 65, p. 1-55). [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TX/HTML/?uri=CELEX:52022XC0805\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TX/HTML/?uri=CELEX:52022XC0805(01)&from=EN)

Fluence (2021, 18. August). The Global State of Water Reuse. *Fluence Corporation*. <https://www.fluencecorp.com/global-state-of-water-reuse/>

Roth, D. (2022, 23. März). Hydrogeologen warnen: Deutschland trocken aus. *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.de/umwelt/2022/03/hydrologen-warnen-deutschland-trocken-aus>

Toreti, A., Bavera, D., Acosta Navarro, J., Cammalleri, C., de Jager, A., Di Ciollo, C., Hraat Essenfelder, A., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Niemeyer, S., Spinoni, J. (2022). *Drought in Europe August 2022* (Publications Office of the European Union, doi:10.2760/264241, JRC130493). https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/news/GDO-EDODroughtNews202208_Europe.pdf

KWVB

Kompetenzzentrum Wasser Berlin
gemeinnützige GmbH