



THEMENHEFT FORSCHUNG · N° 8 · 2012



WASSER UND UMWELT



Universität Stuttgart

Editorial

Liebe Leserinnen und Leser!

Wasser. Im Juli 2010 haben die Vereinten Nationen das Recht auf sauberes Wasser zum Menschenrecht erklärt. Einklagbar ist dieses Recht allerdings nicht. Doch der ungehinderte Zugang zu Trinkwasser und eine geregelte Abwasserentsorgung sind im globalen Maßstab vermutlich die wesentlichen Voraussetzungen, um mittelfristig Konflikte um die ungleich verteilte Ressource Wasser zu vermeiden. Wasser ist zwar überall und an vielen Orten sogar in gefährlichem Überfluss vorhanden, doch ist lediglich ein Prozent des Wassers auf der Erde für den Menschen nutzbar. Bis 2025, so ist zu hören, könnte mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung über keine verlässliche Wasserversorgung verfügen.

Die Erforschung von Wasser und Umwelt zählt seit vielen Jahren zu den Schwerpunkten der Universität Stuttgart und wird daher in der achten Ausgabe unseres **THEMENHEFTs FORSCHUNG** vorgestellt. Dabei war klar, dass angesichts der zahlreichen wissenschaftlichen Zuflüsse in die Wasserforschung hier nur eine begrenzte Auswahl angesprochen werden

konnte. So wird mancher etwa die Behandlung der Wasserkraft vermissen, doch diese wurde bereits im **THEMENHEFT FORSCHUNG No 6** „Erneuerbare Energien“ vorgestellt.

Neben ingenieurwissenschaftlich ausgerichteten Beiträgen zu sauberen Gewässern oder der Behandlung von Abwasser als Rohstoff und gestalterischen Fragen zur Planung von Wasserlandschaften im urbanen Raum wird auch der sozialwissenschaftliche Aspekt der erforderlichen Bürgerbeteiligung in Fragen der Wasserversorgung betont. Wasserforschung ist eben interfakultativ und die Übergänge sind selbstverständlich fließend. •

Viel Spaß beim Lesen wünscht



Ulrich Engler

Impressum

Das **THEMENHEFT FORSCHUNG** wird herausgegeben im Auftrag des Rektorats der Universität Stuttgart.

Konzeption und Koordination Themenheft Forschung: Ulrich Engler, Tel. 0711/685-8 2205, E-Mail: ulrich.engler@verwaltung.uni-stuttgart.de

Wissenschaftlicher Koordinator „Wasser und Umwelt“: Rainer Helmig

Autoren „Wasser und Umwelt“: András Bárdossy, Ferdinand Beck, Kathrin Brauer, Jürgen Braun, Holger Class, Melanie Darcis, Anozie Ebigbo, Rainer Enzenhöfer, Bernd Flemisch, Andreas Geiges, Sabine U. Gerbersdorf, Rainer Helmig, Felix Herma, Alexander Kissinger, Jonas Koch, Hans-Peter Koschitzky, Philipp Leube, Markus Noack, Wolfgang Nowak, Sergey Oladyshkin, Thomas Pfaff, Ortwin Renn, Jochen Seidel, Heidrun Steinmetz, Antje Stokman, Oliver Trötschler, Lena Walter, Silke Wieprecht.

Titelseite und Grundlayout Themenheft Forschung: Zimmermann Visuelle Kommunikation, Haußmannstraße 103 B, 70188 Stuttgart

Druck und Anzeigenverwaltung: Alpha Informationsgesellschaft mbH, Finkenstraße 10, 68623 Lampertheim, Tel. 06206/939-0, Fax 06206/939-232, Internet: <http://www.alphapublic.de>, E-Mail: info@alphapublic.de, Verkaufsleitung: Peter Asel

© Universität Stuttgart 2012
ISSN 1861-0269

Das **THEMENHEFT FORSCHUNG** wird gedruckt auf Recycling-Papier weiß matt oberflächengeleimt, aus 100% Altpapier, lebensmittelunbedenklich und alterungsbeständig.

Geleitwort des Rektors

Die stetig wachsende Weltbevölkerung bewirkt auch einen steigenden Wasserbedarf, welcher die natürlichen Wasserressourcen in vielerlei Hinsicht belastet. Für einen verantwortungsvollen Umgang mit diesen Ressourcen ist die Ausbildung von qualifizierten Wasserwirtschaftsingenieuren ebenso bedeutsam wie eine wissenschaftliche Zusammenarbeit. An der Universität Stuttgart hat das Forschungsgebiet Wasser eine lange Tradition und zählt heute zu den ausgewiesenen Kompetenzgebieten in Forschung und Lehre. Seit Anfang des 20. Jahrhunderts stehen Namen wie Rothmund, Marquardt, Pöpel, Röhnisch, Petrikat, Giesecke und Kobus sowie Hanisch, Hunken und Tabasaran und natürlich die aktuellen Lehrstuhlinhaber für Innovation, Kontinuität und Nachhaltigkeit in der Erforschung unserer wichtigsten Ressource.

Vor allem in den Bau- und Umweltingenieurwissenschaften sind die zentralen Einrichtungen der Wasserforschung angesiedelt. Doch auch in Architektur- und Stadtplanung sowie in den anderen Ingenieurwissenschaften werden Forschungen zur Nutzung und Sicherung des Wassers vorangetrieben. Zahlreiche Versuchsanlagen wie das Lehr- und Forschungsklärwerk in Büsnau, die Versuchsanstalt für Wasserbau und die Versuchseinrichtung für Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS erlauben in vivo Experimente in großem Maßstab. Diese ermöglichen es auch den Studierenden, Zusammenhänge und Technologie nicht nur in der Theorie, sondern auch in der praktischen Anwendung zu erfassen.

Die Wasserforschung umspannt zahlreiche Kompetenzbereiche wie numerische oder experimentelle Modelluntersuchungen für die wasserbauliche Praxis, Simulationen zur Beschreibung von Ein- und Mehrphasen-Strömungs- und Transportprozessen, Down-Scaling-Methoden bei Klimaszenarien für die Niederschlags-Abflussmodellierung, Extremwertprognosen für Hochwasser, Methoden der Trinkwasserversorgung, Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft und deren Anpassung an die

jeweiligen Randbedingungen in Industrie- und sich wirtschaftlich entwickelnden Ländern, Analytik und das Monitoring umweltrelevanter organischer und anorganischer Schadstoffe sowie auch die Erforschung mikrobieller Abbauvorgänge.

Seit 2007 werden Wissen und Kompetenz auf dem Gebiet Wasser in Stuttgart im Wasserforschungszentrum (wFZ) gebündelt, in dessen Rahmen Hydrosysteme von der Molekularebene bis zum erdumspannenden (Klima)Modell interdisziplinär erforscht werden. Die Arbeiten untergliedern sich in die drei Themenschwerpunkte Lehre und Ausbildung, Forschung und Entwicklung sowie Technologietransfer. Gerade die Hochschulen können mit Einrichtungen wie dem wFZ einen wesentlichen Beitrag zur Lösung der weltweiten Wasserprobleme leisten, indem sie angepasste wissenschaftliche und technische Lösungen entwickeln und internationale Fachleute in Deutschland ausbilden. Die Stuttgarter Einrichtungen ziehen jedes Jahr eine große Zahl internationaler Studierender und Dozenten nach Baden-Württemberg.

In diesem Themenheft kann nur ein kleiner Ausschnitt der Forschungen vorgestellt werden. Sie zeigen unter anderem auch, dass die modernen Simulationsmethoden ihren Siegeszug auch auf diesem Gebiet fortgesetzt haben. Ein nicht unwesentlicher Teil der Forschungen findet im Rahmen des Exzellenzclusters „Simulation Technology“ und im Internationalen Graduiertenkolleg „NUPUS“ statt.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei dem wissenschaftlichen Koordinator, Rainer Helmig, und bei den Autorinnen und Autoren für ihren zusätzlichen Einsatz für das public understanding of science in unserem THEMENHEFT FÜR SICHUNG bedanken. Die aktuelle Ausgabe belegt aufs Neue, dass die Forschungsschwerpunkte an der Universität Stuttgart sich am Puls der Zeit bewegen und von der Grundlagenforschung bis in die Anwendung an Problemlösungen interessiert sind.



Prof.-Dr.-Ing. Wolfram Ressel, Rektor

Wasser – ein wichtiger Rohstoff

Ein Überblick



© Stephan Koscheck / Fotolia.com

Seit Beginn der Menschheitsgeschichte ist die Verfügbarkeit von ausreichenden und sauberen Wasservorkommen von großer Bedeutung. Die Wasserverfügbarkeit und die Art der Nutzung werden für die weitere Entwicklung vieler Länder entscheidend sein. Vorrangiger Grund ist das prognostizierte Bevölkerungswachstum von derzeit circa sieben Milliarden auf rund neun Milliarden Menschen im Jahr 2050. Damit steigt der Wasserbedarf der Weltbevölkerung für die Nahrungsmittelproduktion, gleichzeitig wird auch für die fortschreitende Industrialisierung und einen steigenden Lebensstandard zusätzliches Wasser benötigt. Die Prognosen zu den Auswirkungen des Klimawandels lassen in vielen Regionen eine zusätzliche Wasserverknappung erwarten, u.a. im mediterranen Raum, in China, Indien und auf dem afrikanischen Kontinent. Weiterhin wird prognostiziert, dass Extremereignisse wie Hochwasser und Hitzeperioden generell häufiger auftreten. Die Wasserverfügbarkeit ist zum einen eine lebensnotwendige Voraussetzung für Mensch, Tier und Pflanze, und zum anderen dient Wasser als wichtigstes Transportmittel für Wärme und Energie, für Wasserinhaltsstoffe, Schadstoffe und Organismen.

Der Kreislauf von Wasser ist mengenmäßig der weitaus größte Stoffkreislauf in unserer Umwelt und er ist von essenzieller Bedeutung für ihre Funktion. So ist Wasser zum Beispiel das zentrale Medium unserer „Klimamaschine“. Wasser ist nicht nur die globale Voraussetzung für Leben, es schafft auch die lokalen Lebensräume und formt sie über Prozesse wie Erosion und Sedimentation. Als Trinkwasser ist Wasser auch für den Menschen das wichtigste aller Lebensmittel. Zudem wird es intensiv zur Nahrungsmittelproduktion genutzt und stellt in vielen Bereichen die Grundlage für die industrielle Produktion oder Energieerzeugung dar.

1. Wasser – ein Konfliktpotential im 21. Jahrhundert

Die stetig steigenden Ansprüche an die endliche Ressource Wasser, gekoppelt mit der doppelten Zielsetzung, die Menschen mit Wasser zu versorgen und gleichzeitig die natürlichen Wasservorräte in ihrer Funktion und Bedeutung als Klimafaktor und für die Ökosysteme zu erhalten, führt unweigerlich zu Konflikten. Die Notwendigkeit zur Kooperation in Fragen der Aufteilung von Wasservorkommen ist auf lokaler Ebene seit Jahrhunderten erkannt. Aber im gleichen Maße, in dem die Lebensweisen der Gesellschaften einen immer weiter steigenden Bedarf erzeugen und auf immer entlegene Vorräte zugreifen, spitzen sich diese Probleme auf nationaler und multinationaler Ebene zu. Zum Glück ist bisher noch nicht eingetreten, was der damalige Außenminister Ägyptens und spätere UN-Generalsekretär Boutros Boutros-Ghali im Jahr 1986 prophezeit hatte, dass nämlich die Kriege des 21. Jahrhunderts nicht um Öl, sondern um Wasser geführt werden würden.

2. Herausforderungen in der Wasserforschung

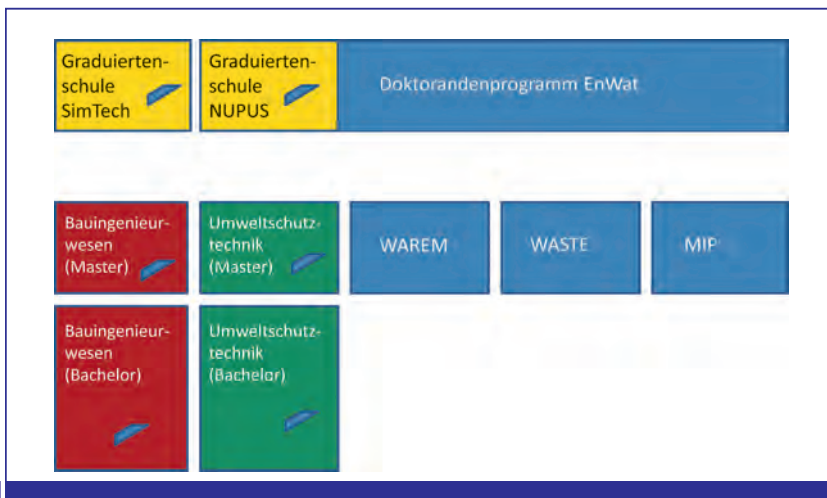
Die Entwicklung in der Wasserforschung ist in allen Bereichen auf das Problem der zunehmend unterschiedlichen Skalen der Betrachtungsebenen gestoßen. Einerseits dringt die Ursachenforschung auf der Suche nach kausalen Zusammenhängen in immer kleinere Dimensionen bei der Isolation von wichtigen Einzelprozessen vor. Andererseits müssen auf der Ebene der Wirkungsforschung mit großskaligen



01

Labor-/Feldmessungen und hydrologischen Beobachtungen integrierte Betrachtungen angestellt werden, die bis zu globalen Effekten wie Klimaveränderungen und ihre Auswirkungen auf den Wasserkreislauf reichen. Die zukünftige Wasserforschung muss sich daher der Herausforderung stellen, integrative Systemansätze zu entwickeln, die unterschiedliche Anforderungen an die Ressource Wasser ganzheitlich betrachtet. Angesichts der Bedeutung von Wasser und der Problematik ihrer Nutzung und dem Erhalt der begrenzten Wasserressourcen ist das Ziel der interdisziplinär aufgestellten Wasserforschung an der Universität Stuttgart, grundlegende Methoden, neue Technologien und Lösungsansätze für ein optimales Management dieser essenziellen Ressource zu schaffen. Dies erfordert neben einer guten Infrastruktur für die Forschung auch eine im internationalen Umfeld etablierte Ausbildungsstruktur, die alle Aspekte – von grundlegenden methodischen Ansätzen bis zur praktischen Umsetzung – beinhaltet. Nachfolgend sind kurz die unterschiedlichen Ausbildungselemente und die wesentlichen experimentellen Einrichtungen beschrieben, die eine exzellente Basis für eine umfassende, ganzheitliche Prozessforschung über die Fakultätsgrenzen hinweg zum Thema Wasser an der Universität Stuttgart erlauben.

Aufbau eines großskaligen Experiments in der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS.



02

Ausbildungsstrukturen im Themenbereich Wasser an der Universität Stuttgart.



03

Technologietransfer vom VEGAS-Labor ins Feld; Grundwassersanierung mit Hilfe technischer In-Situ-Sanierung in Zeitz.



04

Versuchshalle des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung mit Versuchseinrichtung VEGAS (im Hintergrund).

3. Forschungs- und Ausbildungsstrukturen an der Universität Stuttgart

Dem Themenfeld „Wasser“ können im Wesentlichen zwei Bereiche zugeordnet werden, die in verschiedenen Studienprogrammen und Lehrveranstaltungen an der Universität Stuttgart angeboten werden. Zum einen ist dies der Bereich „Wasser und Umwelt“, in dem natürliche Hydrossysteme und technische Nutzungen wie zum Beispiel die Wasserkraft behandelt werden, zum anderen der Bereich „Siedlungswasserbau“, der die Nutzung des Wassers als Trinkwasser und Lebensmittel in den Vordergrund stellt. Die Einbindung wasserbezogener Lehrveranstaltungen erfolgt dabei in verschiedenen Studiengängen. Im Bauingenieurwesen und in der Umweltschutztechnik sind die Grundlagen der Strömungsmechanik im Rahmen der Veranstaltung „Fluidmechanik“ für alle Studierenden zum Erreichen des Bachelors verpflichtend. In den jeweiligen Master-Programmen bestehen Wahlmöglichkeiten, um unterschiedliche Schwerpunkte im Themenfeld „Wasser“ zu setzen, wobei der Kern der wasserbezogenen Lehrveranstaltungen von den am Stuttgarter Wasserforschungszentrum (wzf) beteiligten Instituten gebildet wird. Neben den bereits genannten Studiengängen besteht an der Universität Stuttgart für deutsche wie auch für internationale Studierende zudem die Möglichkeit englischsprachige bzw. zweisprachige Master-Programme mit sehr viel stärkerem Bezug zum Thema „Wasser“ zu wählen, z.B. WAREM (Water Resources Engineering and Management), WASTE (Air Quality Control, Solid Waste and Waste Water Process Engineering) oder auch MIP (Master's Program Infrastructure Planning). Des Weiteren gibt es verschiedene Graduiertenprogramme, von denen vor allem EnWat (International Doctoral Program Environment Water) intensiv die Forschung an Themen mit Wasserbezug fördert. Aber auch im Rahmen der Doktorandenprogramme des internationalen Graduiertenkollegs NUPUS (Non-Linearities and Upscaling in Porous Media) und SimTech (Simulation Technology) arbeiten Nachwuchswissenschaftler an verschiedenen Fragestellungen im Themenfeld „Wasser“.

Das Wasserforschungszentrum der Universität Stuttgart verfügt in den beteiligten Instituten über eine hochwertige experimentelle Ausstattung. Zwei Einrichtungen sollten besonders erwähnt werden, da sie eine Besonderheit nicht nur auf der nationalen, sondern auch auf der internationalen Ebene darstellen. Zum einen das Lehr- und Forschungsklärwerk in Stuttgart-Büsnau, wo im technischen Maßstab Versuche zur Abwasserreinigung gefahren werden können, und zum anderen die Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS), die es unter anderem ermöglicht, ein-, zwei- und dreidimensionale Versuche auf verschiedenen Skalen zu In-Situ-Sanierungstechnologien unter naturnahen Verhältnissen für alle altlastenrelevanten Schadstoffe durchzuführen. VEGAS stellt damit eine wichtige Brücke zur praktischen Feldanwendung dar und erlaubt die grundlegende Konzeption der Technologien im Labor unter kontrollierten Bedingungen und ohne Gefahr für Mensch und Umwelt.

• Rainer Helmig

DER AUTOR

PROF. DR.-ING. RAINER HELMIG

ist gebürtiger Westfale. Er studierte und promovierte in Bauingenieurwesen an der Universität Hannover. Nach der Habilitation in Stuttgart leitete er bis 2000 das Institut für Computer Anwendungen im Bauwesen an der TU Braunschweig. Anschließend übernahm er den Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung an der Universität Stuttgart, wo er heute noch tätig ist.



Kontakt

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung,
Universität Stuttgart
Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung
Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart
Tel. 0711/685-64749
Fax 0711/685-60430
E-Mail: Rainer.Helmig@iws.uni-stuttgart.de

Forschung im Fluss

Von Einweg zurück zum Mehrweg



01

Naturnahes Fließgewässer mit verzweigtem Gerinne. (Foto: Jörg Franke)

Natürliche Fließgewässer, wie sie vor einigen hundert Jahren auch in Europa noch zu finden waren, stehen in einem ständigen Austausch mit ihrer Umgebung. Aktiv formen sie das Relief und die Gestalt des Umlandes und werden gleichzeitig durch das Umland entscheidend in ihrer Erscheinungsform geprägt. Sie sind hochdynamische Systeme die nach jeder größeren Änderung im Abflussverhalten (Hochwasser,

längere Niedrigwasserperioden) ein völlig neues Erscheinungsbild aufweisen können (01). Dieser stetige Wechsel an morphologischen Strukturen und hydrologischem Geschehen ist dafür verantwortlich, dass im Laufe der Zeit Lebensräume verschiedener Organismen verschwinden und dafür andere wieder neu entstehen. Nur durch diese Dynamik zwischen „Zerstörung“ und „Wiederaufbau“ kann ein ökologisches Gleichgewicht erhalten bleiben und verhindert werden, dass sich fluviale Monokulturen ausbilden, die anderen Arten keinen Lebensraum lassen und diese auf Dauer verdrängen.

1. Von der Historie zur Gegenwart oder: Die Renaissance der Vielfalt

1.1 Forscher damals – Forscher heute

Das Verstehen und die Erforschung solcher komplexer Systeme hat in früherer Zeit Forscher hervorgebracht, die den Gesamtblick aus den verschiedenen Fachsparten mitbrachten. So hat sich der Rheinforcher Robert Lauterborn (1869 bis 1952) mit der Hydrobiologie, Zoologie, Botanik, Geographie sowie mit der Wissenschaftshistorie und philosophischen Fragestellungen beschäftigt, um dem Gesamtsystem Fluss als „Mehrwegsystem“ näherzukommen.

Je tiefer man jedoch in die Einzeldisziplinen wissenschaftlich eintaucht, umso mehr sind Spezialisten gefragt. Das rasant wachsende Wissen in den einzelnen Fachsparten der letzten Jahrzehnte bedingte das Experimentum, wie wir es heute kennen, und bei welchem durch die geforderte Intensität der Beschäftigung mit einem Thema manches Mal der Überblick für das Gesamtsystem verloren geht. Erst in den letzten Jahren wird der Ruf nach der Notwendigkeit von interdisziplinärem Arbeiten in der Wasserforschung wieder lauter: weg von Einweg-Forschung wieder hin zu vernetzten Ansätzen. Am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung in Stuttgart forschen und arbeiten daher heute Ingenieure, Geoökologen, Mathematiker, Umweltschutztechniker und Biologen an gemeinsamen Fragestellungen.

1.2 Fließgewässer damals – Fließgewässer heute

Am Ende des 19. Jahrhunderts und zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden viele unserer Flüsse begradigt und eingeeignet. Der Fluss wurde zur Wasserstraße oder zum Abwasserkanal degradiert und die Auen als nutzlose Brutstätten von Krankheitserregern trockengelegt. Noch Ende des 19. Jahrhunderts war beispielsweise am Oberrhein die Malaria durchaus verbreitet. Der Fluss, der natürlicherweise seinen Lauf oft änderte, wurde fixiert und den anthropogenen Nutzungen untergeordnet. Entlang der neu entstandenen Uferlinien wurden dann Dämme errichtet und damit das neu gewonnene Land vor Überflutung geschützt. Viele damit vom Gewäs-

SUMMARY

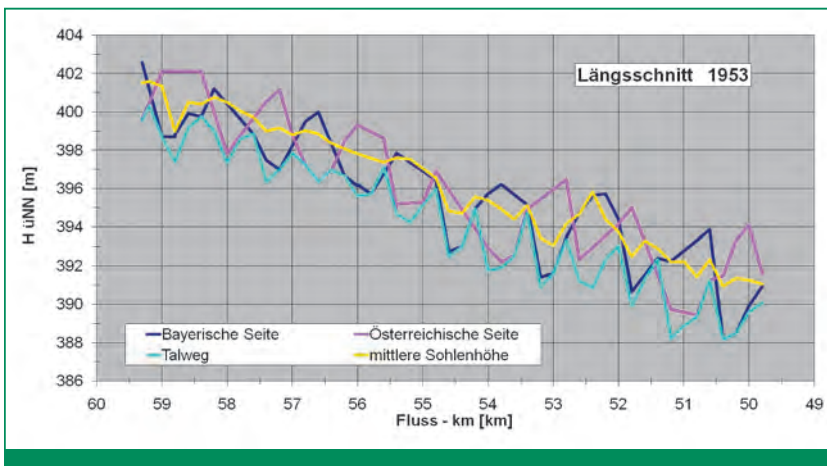
The dynamic features and varieties of river systems are vital for the aquatic life and beyond; still, the rivers and their adjacent areas have been tamed for the sake of shipping, floodwater protection, wastewater disposal, and energy generation. Parallel to the hydro-engineering measures and the pauperization of the aquatic habitats in the last decades, the overall view of early scientists on the important interactions between the environment and life has been lost to make place for specialists. There is now a consensus that we need to reverse and regain diversity in both, the river ecosystem and our scientific understanding of natural processes, for cultural, economical, ecological, and finally human health reasons. Within the department of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, researchers from different disciplines (engineers, biologists, geologists) work closely together to better understand essential interactions of hydraulic forces, river morphology, sedimentology, and biology. With the help of this multidisciplinary view, we want to elucidate the important parameters to be implemented in state-of-the-art models, which we apply to predict reliable habitat suitability for fish and sediment dynamics in riverine systems.



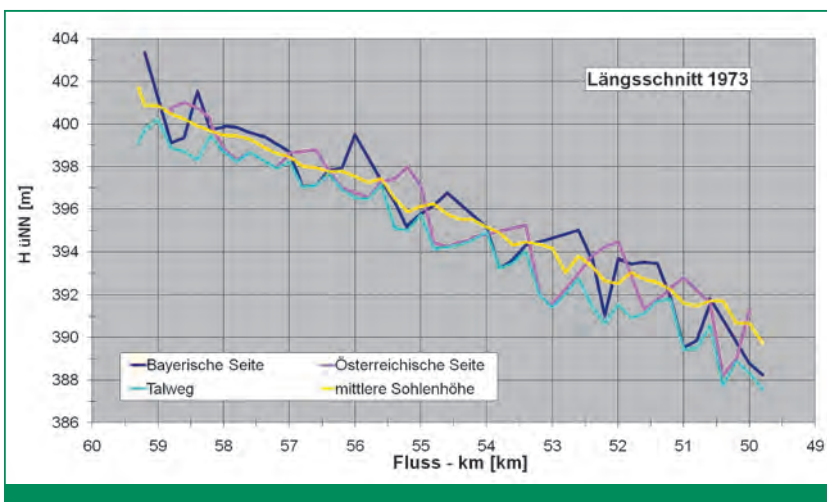
02

Eingeeignetes, begradigtes Fließgewässer mit Uferverbau.

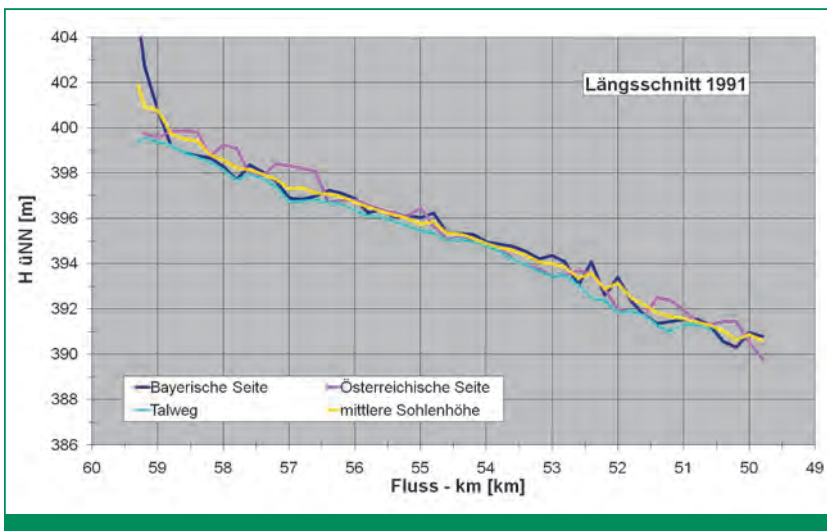
ser abgeschnittene Auen wurden mit Drainagen versehen und so die Bedingungen für die landwirtschaftliche Nutzung verbessert. Die Vorländer werden seitdem oft nur noch bei extremen Ereignissen überflutet und stehen deshalb zur hydraulischen Entlastung des Hauptgerinnes bei erhöhten Abflüssen nicht mehr zur Verfügung. Aus breiten, verzweigten Flüssen wurden schmale, gerade Kanäle mit hohen Dämmen, die heute unsere Landschaft prägen (02). Diese Flussläufe entsprachen dem damaligen Zeitgeist und Wertvorstel-



03



04



05

Entwicklung der Gewässersohle der Salzach von 1951 bis 1991.

lungen, nach denen ein geordneter, geometrischer Fluss als „schön“ und ein verzweigter Fluss als „verwildert“ bezeichnet wurde.

Mit zunehmender Industrialisierung stieg auch der Bedarf an Energie und Trans-

portmöglichkeiten, und die Fließgewässer wurden aufgestaut, um eine Nutzung durch Wasserkraft oder Schifffahrt zu ermöglichen, wie z.B. an Rhein, Neckar oder Donau. Die dadurch entstandene meist monotone Gewässerstruktur und die Vereinheitlichung der Strömungsbedingungen haben dazu geführt, dass das morphologische Regime und der Geschiebehaushalt aus dem Gleichgewicht geraten sind.

Mit der Einengung verändert sich auch die Morphologie. Die Sohle ebnet sich ein und der Strukturreichtum der Sohle verschwindet. Manchmal entstehen alternierende Bänke, die noch ein Minimum an morphologischer Diversität gewährleisten. Durch Erosion geht jedoch auch dieser letzte Rest an Strukturvielfalt verloren, wie das Beispiel der Salzach zeigt. Ehemals vorhandene Kiesbänke werden aufgrund des Geschiebemangels und der damit verbundenen Erosion abgetragen. Diese Strukturen sind jedoch insbesondere für kieslaichende Fischarten oder Bewohner des Interstitials ein wichtiger Lebensraum. In (03) bis (05) sind Längsschnitte der linken (bayerischen) und der rechten (österreichischen) Flussseite der Salzach dargestellt, auf denen der Verlust der morphologischen Strukturen im Verlauf von ca. vierzig Jahren deutlich zu erkennen ist. Waren 1953 noch alternierende Bänke mit einer durchschnittlichen Höhe von ca. vier Metern vorhanden, so haben sich die mittleren Höhen bis zum Jahr 1973 schon auf ca. 2,5 Meter reduziert. Im Jahre 1991 ist von den Strukturen fast nichts mehr zu erkennen.

Die reduzierte Strukturvielfalt in einem begradigten und eingengten Fließgewässerabschnitt führt zum Verlust typischer Gewässermerkmale, die die Habitate für verschiedene wassergebundene Arten darstellen. Durch Einengungen gehen Hinterwasser, Naturufer, Schotterbänke, Riffle und Totwasser, die sich durch unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten, Wassertiefen und Substratverhältnisse unterscheiden, verloren. Diese Vielfalt an Habitaten ist jedoch erforderlich, um die Reproduktion sowohl von strömungsliebenden (z.B. Bachforelle, Äsche), strömungsindifferenten (z.B. Wels, Karpfen, Rotaugen, Hecht) als auch strömungsmeidenden Fischarten (z.B. Rotfeder, Schleie, Bitterling) zu ermöglichen. Zum anderen

brauchen die einzelnen Fischarten sehr unterschiedliche Nahrungs- und Rückzugshabitate in ihren jeweiligen Lebensstadien. Hier setzen u.a. die Arbeiten am Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft an: in Habitatmodellen werden die Ansprüche einzelner Fischarten beschrieben und zur Gewässergütebewertung den tatsächlichen Gegebenheiten am Standort gegenübergestellt (Wieprecht et al. 2006).

Durch die wasserbaulichen Maßnahmen veränderte sich auch die Dynamik der Feinsedimente stark. Schnellere Fließgeschwindigkeiten führen zu einem höheren „Durchsatz“ und die Sedimente lagern sich nun nicht mehr in Seitenarmen ab, sondern auch in den Wasserstraßen und Hafenbecken, wo ihre Ausbaggerung jährlich Millionen Euro verschlingt. Zudem sind gerade an die feinen hochreaktiven Sedimente wie Ton und Schluff ($< 63 \mu\text{m}$) Schadstoffe gebunden, was die Sedimentverklappung zusätzlich erschwert. Kommt es zur (starken) Erosion der Flusssohle, können vormals im Sediment immobilisierte Schadstoffe freigesetzt und bioverfügbar werden. So hatte man beispielsweise beim Hochwasser 2002 nicht nur mit großen Sedimentfrachten zu kämpfen sondern auch mit hohen toxischen Belastungen, die weit über den aquatischen Lebensraum hinaus auch direkte Konsequenzen für den Menschen hatten (z.B. dioxinverseuchte Milch der in den Auen grasenden Kühe, polyzyklische Kohlenwasserstoffe auf den Außenflächen von Kindergärten).

Inzwischen jedoch setzt sich eine neue Denkweise durch, welche Sedimente nicht nur als unerwünschte Fracht ansieht, sondern auch als einen wichtigen benthischen Lebensraum, der eine Vielzahl Kleinstlebewesen beherbergt, die für höhere trophische Ebenen bis hin zu den Fischen wichtig sind. Die Erhaltung der Sedimente vor Ort ist das neue Ziel, aber die Risiken ihrer Dynamik und der assoziierten Schadstoffe müssen kalkulierbar sein. Doch genau das ist es bislang nicht, denn feine Sedimente werden auch bevorzugt von Mikroorganismen besiedelt und diese verkleben mit ihren langkettigen Ausscheidungen das Sediment und erhöhen so deren Widerstand gegen erodierende Kräfte. Der Einfluss der Biologie auf die Sedimentstabilität ist aber in Modellen schwer vorhersagbar, da die zugrundeliegenden Prozesse hoch-

dynamisch sind und dabei täglichen bis saisonalen Schwankungen unterliegen. Am Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft beschäftigen wir uns daher auch mit grundlegenden Fragen zur Biostabilisierung von Feinsedimenten durch mikrobielle Biofilme mit dem langfristigen Ziel der Implementierung dieser Prozesse und Interaktionen zwischen Biologie und Sedimentologie in Sediment-Transportmodellen (Gerbersdorf et al. 2008, 2009, 2011).

Die Bedeutung der Feinsedimente als wichtiges Habitat sowie Schadstoffsенke und -quelle im aquatischen Lebensraum wird zunehmend in der Wissenschaft anerkannt und auch in der Öffentlichkeit wahrgenommen. Das zeigt sich auch in der, wenn auch etwas späten, Verankerung der Sedimente in der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Mit der Einführung der WRRL im Jahr 2000 wurde die Erkenntnis, dass funktionierende Ökosysteme wie z.B. Fließgewässer eine wesentliche Lebensgrundlage für viele Organismen darstellen, auch auf Ebene der Politik erkannt und schließlich in der Gesetzgebung verankert. In der WRRL ist das Ziel definiert, dass bis zum Jahr 2015 alle Gewässer in Europa in einen guten ökologischen Zustand überführt sein sollen. Dabei stand zunächst die Wassersäule alleine im Fokus bis man erkannt hat, dass auch die Sedimente entscheidend die Ökologie prägen. Als Gradmesser werden zum einen physikalische und chemische Größen definiert, deren Grenzwerte einzuhalten sind, um eine entsprechende Wasserqualität zu gewährleisten. Zusätzlich geben biologische Parameter wie z.B. die Artenzusammensetzung und -vielfalt Auskunft über die Qualität des Lebensraumes. Dabei werden morphologische Parameter wie die Beschreibung von Strukturen als Zustandsgrößen für die Charakterisierung der Gewässerqualität angewendet. Die Wasserrahmenrichtlinie bringt nach dem langen Weg der eindimensionalen Betrachtungsweise des Gewässers aus dem jeweils schmalen Blickwinkel der Einzeldisziplinen wieder einen ganzheitlichen Ansatz ins Spiel, welcher nötig ist um komplexe Naturprozesse zu verstehen. Aufgrund des hohen Detailwissens und der Spezialisierung in den Einzeldisziplinen kann aber nicht mehr nur ein Fachmann/-frau alle Fragen beantworten.

Der Weg zurück zu einer ganzheitlichen Betrachtung wird nur durch einen multi-disziplinären Ansatz erreicht werden können.

2. Ein Blick in das System: Was bedingt Gewässergüte und wie weist man sie nach?

Die mit Abstand wichtigste treibende Kraft zur Initiierung fluvialer dynamischer Prozesse ist der Abfluss, welcher natürlicherweise je nach Flussregion unterschiedliche saisonale Charakteristiken aufweist. Insgesamt werden fünf Kernfak-

torien von Flüssen zu gewährleisten. Die Morphologie des Flussbettes (Uferbefestigung sowie Tiefen- und Breitenvariabilität) bedingt in Wechselwirkung mit den zeitlich und räumlich variierenden Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten strukturelle Gewässereigenschaften (wie Pflanzenbewuchs und Sedimenteigenschaften), welche von großer Bedeutung für das Ökosystem sind.

Weiterhin spielt die laterale Gewässerdurchgängigkeit eine große Rolle hinsichtlich der Bewertung des Lebensraums für aquatische Organismen. Durch anthropogene Maßnahmen, insbesondere Querbauwerke und Stauhaltungen, wurde diese Durchgängigkeit in der Vergangenheit völlig unterbunden, mit gravierenden Folgen (Beispiel Lachsrückgang und Aussterben des Lachses im Rhein). Zudem halten die Querbauwerke natürliche Hochwasserwellen zurück bzw. geben sie gedämpft weiter, um die Überflutung zu regeln und die Sicherheit urbaner Gebiete zu gewährleisten. Dadurch wird auch der Geschiebetransport sowie Sedimenthaushalt massiv gestört und die fehlende regelmäßige Umlagerung und Neustrukturierung der Gewässersohle begünstigt die „Verschlammung“ am Flussgrund vor z.B. Stauhaltungen. Direkt hinter Wasserkraftwerken lassen extreme Schwall- und Sunk-Ereignisse keinen Raum für eine nachhaltige Besiedlung durch Organismen. (06) gibt einen Überblick über wichtige abiotische Umweltfaktoren zur Beschreibung von aquatischen Lebensräumen in Flüssen.

Die Güte eines Lebensraumes für den einzelnen Organismus bestimmt sich gerade über jene vielfältigen Strukturen, welche unter den wasserbaulichen Maßnahmen stark beeinträchtigt wurden. Je nach Lebensstadium braucht es die unterschiedlichsten Habitate, selbst für dieselbe Art, um erfolgreiches Laichen zu ermöglichen, Verstecke für Juvenile (Heranwachsende) oder Jagd/Weidemöglichkeiten für Adulte (Ausgewachsene) zu bieten sowie die für das Wanderverhalten erforderliche Durchgängigkeit. Die sich daraus ergebende Gewässergüte lässt sich in ihrer vielfältigen Gesamtheit am besten an der Artenvielfalt und Artenzusammensetzung der jeweiligen Lebensgemeinschaft ablesen.

Im Gegensatz dazu sind andere Untersuchungen zwar wichtig, spiegeln aber dennoch nur einen kleinen Ausschnitt aus



Abiotische Faktoren zur Beschreibung von Lebensräumen in Flüssen.

toren zur Beschreibung dieser hydrologischen Variabilität verwendet: Maximalabfluss, Häufigkeit, Dauer und Zeitpunkt von Extremereignissen sowie die maximale Veränderungsrate des Abflusses. Werden diese Komponenten aufgrund von anthropogenen Maßnahmen verändert, wirkt sich dies unmittelbar auf weitere abiotische Größen wie Sediment- und Temperaturhaushalt, Wasserqualität oder Gewässerstrukturgüte aus, die sowohl die Habitatvielfalt als auch die Lebensraumqualität erheblich beeinflussen.

Die physikalisch-chemische Wasserqualität von Flüssen hat sich in den letzten Jahrzehnten aufgrund des Fortschritts in der Abwasserbehandlung und dem Bau neuer Kläranlagen erheblich verbessert. Aber die Wasserqualität alleine reicht nicht aus um die ökologische Funktionsfähig-

dem Gesamtsystem wieder. Beispielsweise bestimmen chemische Wasseruntersuchungen reine „Jetzt“-Konzentrationen an Nährstoffen und Schadstoffen im Wasserkörper, aber über die Konzentrationen von gestern und vorgestern lassen sich keine Aussagen treffen, noch sind diese Werte geeignet, die Gesamtqualität des Lebensraumes zu bewerten.

Ganz anders dagegen die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft: sie ist das „Gedächtnis“ der Ereignisse der letzten Wochen, Monate oder Jahre in einem Flussabschnitt und versammelt die Interaktionen mit der Umgebung (Struktur, Abflussregime, Temperatur, Nährstoffe, Licht, Schadstoffe) sowie biotische und trophische Interaktionen (Konkurrenz, Abweidung). Doch gibt es auch hier Opportunisten, die unter einer weiten Bandbreite an Gegebenheiten existieren können. Daher gilt es, geeignete „Bioindikatoren“ zu finden, die sowohl einen sehr engen Toleranzbereich haben, als auch eine hohe Eignung für die jeweils zu bewertende Gewässerklasse.

Beispielsweise sind Protozoen (Einzeller), hier besonders die Ciliaten (Wimpertierchen), ideal, um in nährstoffbelastenden Gewässern Aussagen über den „Verschmutzungsgrad“ von polysaprob (stark belastet) bis zu mesosaprob (mittelmäßig belastet) (jeweils mit den Sub-Leveln α und β) zu treffen. Jeder exakt definierten Belastungsstufe kann eine typische Lebensgemeinschaft zugeordnet werden, die den Namen der jeweilig bedeutendsten Art trägt: z.B. das *Carchesietosum polypinae* in der alpha-mesosaprob Selbstreinigungsstufe oder das *Pleuronemetum coronatae* in der beta-mesosaprob Selbstreinigungsstufe. Bislang konnten aber keine Ciliaten-Gesellschaften bestimmt werden, welche eindeutig oligosaprobe (nicht belastete) Gewässer anzeigen können.

Zudem erfordert die Bestimmung dieser Lebensgemeinschaften Expertenwissen, das nicht überall verfügbar ist. Ähnliches gilt für Kieselalgen (Diatomeen)-Gesellschaften, einzellige Algen welche ganzjährig in Fließgewässern vorkommen, und welche mittlerweile obligatorisch zum Monitoring gemäß der Europäischen Wasser-Rahmenrichtlinie (WRRL) gehören. Der Vorteil des Kieselalgen-Monitoring liegt darin, dass eine ein- bis zweimalige Probe pro Jahr ausreichende Informationen gibt.

ZUSAMMENFASSUNG

Die dynamischen Eigenschaften und das vielseitige Erscheinungsbild von Flusssystemen sind für die aquatische Flora and Fauna eine essentielle Lebensgrundlage. Die ökologische Funktionsfähigkeit der Gewässer konkurriert jedoch mit weiteren Nutzungszielen wie Schifffahrt, Hochwasserschutz, Abwassermanagement oder Erzeugung regenerativer Energie wodurch das heutige Erscheinungsbild aufgrund flussbaulicher Maßnahmen die ursprüngliche Vielfalt verloren hat. Parallel zur dieser Homogenisierung der Flüsse ist auch das multidisziplinäre Mehrwegverständnis früherer Forscher durch die „Einwegbetrachtung“ einzelner Fachspezialisten ersetzt worden. Heutzutage herrscht wieder ein Konsens, hin zu mehr Diversität zu kommen, sowohl die Welt der aquatischen Ökosysteme betreffend als auch das wissenschaftliche Verständnis der natürlichen Prozesse. Das gebieten in beiden Fällen sowohl kulturelle als auch wirtschaftliche, ökologische und nicht zuletzt auch human-gesundheitliche Aspekte.

Am Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft arbeiten Wissenschaftler aus verschiedenen Fachbereichen (Ingenieurwesen, Biologie, Geologie) interdisziplinär zusammen, um das Wissen bedeutender Interaktionen zwischen Hydraulik, Flussmorphologie, Sedimentologie und Biologie zu erweitern. Basierend auf dieser Mehrweg-Betrachtung werden aktuelle Modelle verwendet und weiterentwickelt, um Prognosen über die hydromorphologische Entwicklung der Fließgewässer, deren Sedimentdynamik und die Auswirkungen auf die Qualität aquatischer Lebensräume zu treffen.

Weitaus wichtiger ist jedoch ihr ubiquitäres (= universelles) Vorkommen weltweit, was die Etablierung global vergleichbarer Methoden möglich macht. Die Bestimmung des Makrozoobenthos (Larven von Insekten, Egel, Strudelwürmer, Schnecken, Muscheln, Krebse, Schwämme) ist bis zu einem gewissen Niveau relativ leicht erlernbar und kommt ebenfalls mit einer niedrigen Probenrate (zweimal im Jahr) aus. Diese Bioindikatoren eignen sich bestens um oligotrophe bis mesotrophe Gewässertypen abzugrenzen, die feinen Unterschiede im stark belasteten Bereich können sie hingegen nicht abbilden.

Am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung sind u.a. Biofilme Gegenstand der aktuellen Forschung. Biofilme sind Gemeinschaften aus Bakterien, Mikroalgen und Pilzen, welche eingehüllt in einer selbstproduzierten Schleimmatrix leben, mit der sie gleichzeitig die Sedimentkörner verkitten und so den Widerstand des Sedimentes gegen erosive Kräfte erhöhen. Biofilme stehen am Beginn der Nahrungskette, und die Effekte schlechter Gewässerqualität auf diese Gemeinschaften wirken sich um ein Vielfaches potenziert auf höhere Nahrungslevels aus. Zudem erfüllen Biofilme wichtige Funktionen für den aquatischen Lebensraum und auch darüber hinaus (Aue, Meer), indem sie der Motor zur Selbstreinigung sind, biogeochemische Stoffflüsse bedeut-

sam beeinflussen, und in die Dynamik von Feinsedimenten nebst assoziierten Schadstoffen eingreifen. Biofilme mit ihrem großen Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen, ihrem schnellen Stoffwechsel und hohen Anpassungsgrad sind unmittelbare und sehr sensitive Indikatoren für die Gewässergüte.

Mittels neuerer molekulargenetischer Techniken ist es mittlerweile auch bei Bakterien möglich, Veränderungen im Artenspektrum bis hin zur Artenverarmung und Ausprägung hochspezialisierter Arten unter Extrembedingungen zu dokumentieren. Doch es wird kontrovers diskutiert, ob diese Artenveränderungen wirklich eine Veränderung der so wichtigen Funktionen der Biofilme für das Ökosystem nach sich ziehen oder ob diese von einem Wechsel in Diversität und Artenzusammensetzung unberührt bleiben (Gerbersdorf et al. 2011). Wir befassen uns daher mit einer wichtigen „Ecosystem Function“ der Biofilme, der Biostabilisierung, und untersuchen wie sich diese beispielsweise unter der Exposition der im Fließgewässer zunehmend relevanten „Personal Care Products“ verändert (Lubarsky et al. 2011). Gegenüber Biofilmen, welche unmittelbare Effekte zeigen können, stehen Fische am Ende der aquatischen Nahrungskette, dafür aber zeigen sie uns kumulative Effekte, das heißt, sie geben Information darüber wie sich langjährige, vielfältige Belastungen auswirken, noch dazu auf Wirbeltiere, von deren Beeinflussung wir auch auf mögliche Effekte für den Menschen und seine Gesundheit schließen können.

Durch die bereits oben beschriebenen anthropogenen Habitatveränderungen im Fließgewässer, gibt es kaum mehr die ehemals beschriebenen typischen Fischgebiete mit ihren Leitarten (z.B. Forellenregion, Äschenregion, Brachsenregion, Bleiregion) die uns etwas über die Gewässergüte vermitteln könnten. Daher fokussieren aus ökotoxikologischer Sicht die Untersuchungen auf Zell- und Organschädigungen sowie Mutationspotential. Da Fische ein sehr sichtbares Zeichen einer intakten Umwelt sind und auch aus wirtschaftlichen und kulturellen Überlegungen die Ansiedelung bzw. Wiederansiedelung erwünscht ist, ist die Habitatmodellierung von Fischen geeignet, den ökologischen Zustand darzustellen.

3. Die Reproduktion kieslaichender Fischarten – ein integrativer Indikator für die Gewässerdynamik

Habitatmodelle können nur in dem Maße gut sein, wie grundlegende ökologische Prinzipien und Theorien verstanden und entsprechend darin implementiert werden. Um die langfristig erfolgreiche Etablierung einer Population anhand eines geeigneten Lebensraumes vorherzusagen, kann man sich nicht nur auf Abundanz beziehen, da laut ökologischen Gesetzen die Individuenanzahl nicht per se entscheidend ist für die Population, wohl aber ihre „vital rates“ d. h. Zuwachs, Tod und Abwanderung. Dafür ist es unerlässlich, die verschiedenen Lebensstadien einzubeziehen und sich nicht auf eine zu beschränken. Gerade die Reproduktion ist eines der wichtigsten Stadien, welches, weit über den gegenwärtigen Ist-Zustand, Aussagen zum langfristigen Bestand einer Population zuläßt (Noack & Wieprecht 2010).

In Flüssen mit kiesiger Gewässersohle gelten kieslaichende Fischarten, wie die Bachforelle, der Lachs oder die Äsche als Zeigerfischarten für die Qualität des Sedimentkörpers eines Gewässers. Die Reproduktion der Kieslaicher unterteilt sich hierbei in unterschiedliche Entwicklungsphasen, die vereinfacht als Laichphase, Inkubationsphase und Emergenzphase bezeichnet werden können. In der Laichphase schlägt der Fisch in das Gewässerbett eine Grube, in die befruchtete Fischeier gelegt und anschließend wieder mit Sediment bedeckt werden. Die Entwicklung während der Inkubationsphase (Zeitraum in der Gewässersohle) dauert mehrere Monate und beinhaltet die embryonale Phase, den Schlupf aus dem Ei sowie die larvale Phase. Die hierbei stattfindenden Stoffwechselprozesse werden hauptsächlich durch die Temperatur im Sedimentkörper gesteuert. Die letzte Phase – die Emergenz – beschreibt den Aufstieg aus dem Sedimentkörper in das Oberflächen-gewässer, womit die Reproduktion abgeschlossen ist.

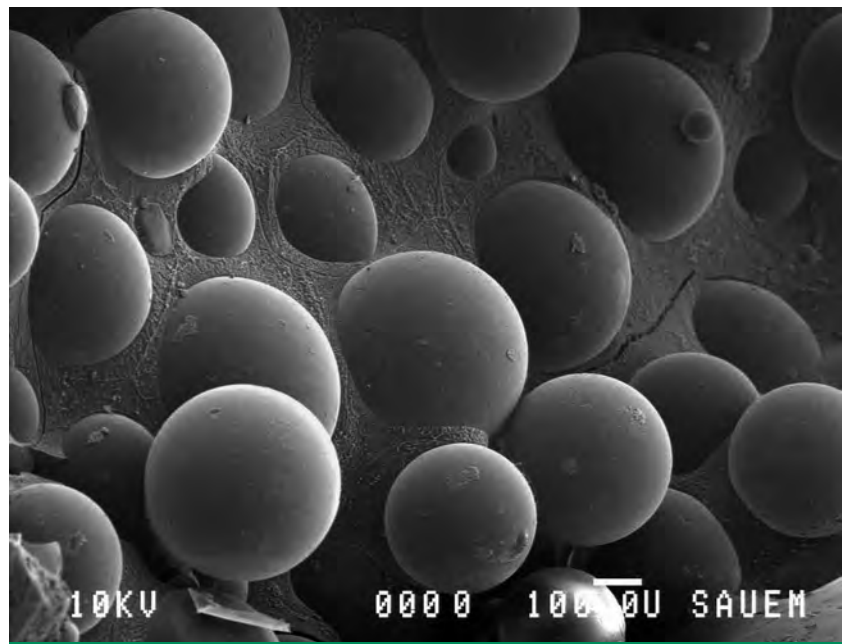
Der integrative Indikatorwert der Reproduktion ergibt sich aus den unterschiedlichen Ansprüchen während der Entwicklungsphasen. So benötigen die Fische während der Laichphase bestimmte Wassertiefen

und Fließgeschwindigkeiten sowie eine lockere Gewässersohle mit geeignetem Laichsubstrat in einem bestimmten Korngrößenbereich. Dies kann nur bei ausreichender Sedimentdynamik gewährleistet werden, d. h. der Sedimentkörper muss regelmäßig umgelagert werden damit eine mögliche „Verstopfung“ durch Feinsedimente gelöst wird und diese ausgewaschen werden (Noack et al. 2008).

Die Entwicklung in der Inkubationsphase ist hauptsächlich von dem Gehalt an gelösten Sauerstoff sowie der Temperatur im Sedimentkörper abhängig. Das natürliche Kiesbett wird idealerweise stets mit Oberflächenwasser durchströmt, um Eier und Larven mit ausreichend Sauerstoff zu versorgen sowie ihre Stoffwechselprodukte abzutransportieren. Dies ist nur möglich, wenn der Sedimentkörper in der Inkubationsphase stabil ist und die Eier und Larven nicht ausgespült werden, der Sedimentkörper über eine ausreichende Permeabilität verfügt und die sauerstoffzehrenden Prozesse in der hyporheischen Zone den Sauerstoffgehalt nicht limitieren.

Schließlich wird während der Emergenz eine ausreichende Lückigkeit zwischen den Sedimenten benötigt, um aus dem Sedimentkörper in die freie Wasseroberfläche aufzusteigen. Infiltrieren während der Inkubation zu viele Feinsedimente können die Poren verstopft sein und die Jungfische bleiben im Sedimentkörper gefangen.

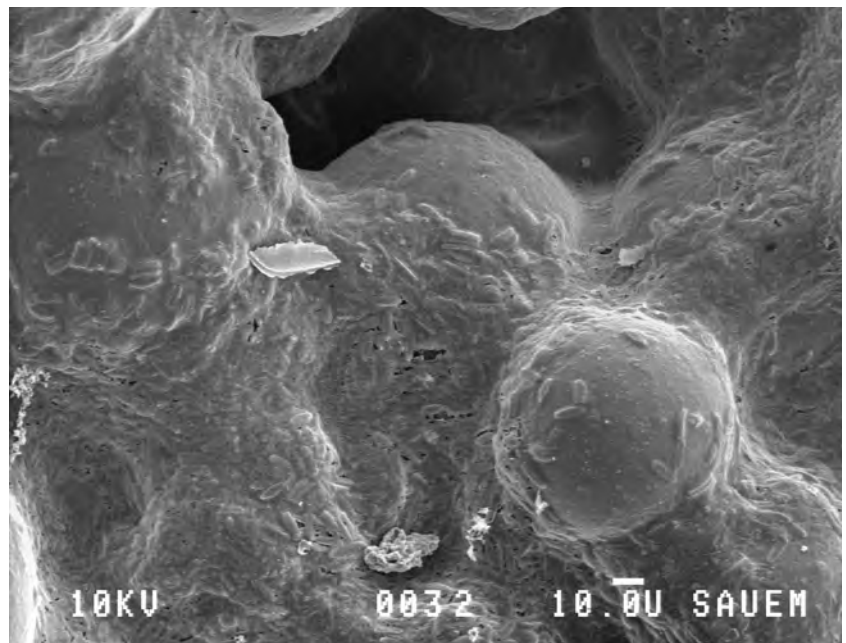
Durch die veränderte Morphologie und Struktur im Fließgewässer haben wir heute an vielen Stellen deutlich höhere Schwebstofffrachten als früher, wodurch es zusammen mit der fehlenden Umschichtung grober Sedimente zu einer zunehmenden Sedimentation feiner organischer Bestandteile über größerem Sediment kommen kann. Wenn Feinsedimente die grobe Sedimentmatrix vollständig bedecken, bzw. sogar in diese infiltrieren, spricht man von äußerer bzw. innerer Kolmation. Die Entwicklung von Kolmationsschichten kann nicht nur vorübergehend die Porenräume verstopfen, sondern auch längerfristig zu einer unnatürlichen Verfestigung des Gewässerbetts führen. An Feinsedimenten siedeln bevorzugt Mikroorganismen und diese bilden Biofilme mittels extrazellulärer Substanzen, mit welchen sie zusätzlich die Porenräume verkitten und die Stabilität erhöhen können (07).



07a

Kontrolle – Glasperlen frei von Bewuchs eingebettet in einer Schicht Wasser.

Letztlich wird der Austausch zwischen Grundwasserkörper und Oberflächenwasser massiv behindert. Des Weiteren können die organischen Bestandteile von Bakterien verstoffwechselt werden, wobei Sauerstoff verbraucht wird und es lokal zu stark reduzierten Milieubedingungen im Übergangsbereich zwischen Grund- und

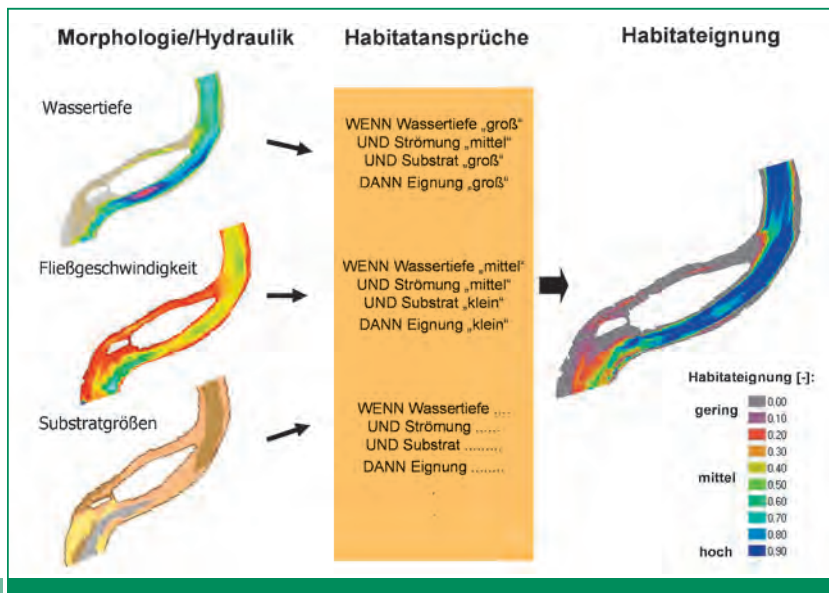


07b

Biofilm – Glasperlen überwachsen und verbunden durch Biofilm: Bakterien und Kieselalgen, einzelne zu sehen, bilden die sog. EPS Matrix (Lubarsky et al. 2010).

Oberflächenwasser kommen kann. Dieser Übergangsbereich – auch hyporheisches Interstitial genannt – findet in den letzten Jahren zunehmende Beachtung in der

Bewertung des ökologischen Zustandes, da er eine Verknüpfung zwischen aquatischen und terrestrischen Ökosystemen darstellt und als ein wichtiger Bioreaktor in Sachen Stoffumsatzprozesse fungiert.



08

Funktionsweise des Habitatmodells CASiMiR am Beispiel des Laichhabitats der Bachforelle.

Dennoch ist die Kolmation bislang kaum untersucht und stellt daher ein wichtiges Forschungsinteresse am Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft dar, das durch die enge, interdisziplinäre Arbeit von Ingenieuren und Biologen hier einzigartig angegangen werden kann.

Für Revitalisierungsmaßnahmen und Schaffung von Reproduktionsarealen sind Simulationswerkzeuge als Planungsinstrumente zur Prognose von Lebensräumen und deren Quantität und Qualität notwendig, die sowohl die Ansprüche der Indikatorarten als auch die abiotischen Umweltfaktoren berücksichtigen. Dabei werden mit Hilfe mehrdimensionaler hydro- und morphodynamischer Modelle die Veränderung der abiotischen Kenngrößen wie Wassertiefen- und Fließgeschwindigkeitsverteilungen, Sohlhöhenänderungen oder Verteilung und Sortierung von Korngrößen in höher räumlicher und zeitlicher Auflösung simuliert, um Input-Daten für das am Lehrstuhl entwickelte Habitatmodell CASiMiR (Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements) zu generieren. CASiMiR verknüpft die abiotischen Daten mit Ansprüchen von Zeigerarten mittels eines multivariaten fuzzy-logischen Ansatzes, der die kombinierte Wirkung mehrere Eingangsdaten auf den Lebensraum einer Zei-

gerart berücksichtigt. Die Eingangsdaten beschreiben hierbei die abiotische Charakteristik eines Lebensraums. (08) zeigt die prinzipielle Funktionsweise von CASiMiR am Beispiel der Simulation von Laichhabitaten der Bachforelle unter Berücksichtigung der zeitlich variablen Eingangsdaten Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit und Substratgröße.

Das Ergebnis der Modellierung ist eine Prognose über die Eignung des Habitats mit einem Wert zwischen 0 (ungeeignet) und 1 (optimal geeignet), entsprechend dem Zusammenspiel der abiotischen Eingangsgrößen und deren Wirkungen auf die Lebensraumqualität, die in Form von WENN-DANN-Regeln formuliert werden. In (08) zeigt der Seitenarm ungeeignete Habitats an, da hier sowohl die hydraulischen Kenngrößen, als auch der Korngrößenbereich außerhalb der Werte liegen, welche die Bachforelle zum Laichen benötigt.

4. Fazit und Ausblick

Die Berücksichtigung dieser Parameter in CASiMiR kann nur ein Anfang sein, um bestmöglich die idealen Habitats zum Laichen zu identifizieren. Wie oben beschrieben, müssen weitere so genannte Schlüsselfaktoren für die Qualität eines Reproduktionshabitats erfasst werden, welche sich auch gerade unter der fortschreitenden Kolmation deutlich ändern können, wie z.B. Permeabilität, Wassertemperatur, Bioaktivität, hyporheischer Austausch oder Sauerstoffverfügbarkeit. Die aktuelle Forschung beschäftigt sich daher mit der Quantifizierung dieser zeitlich und räumlich stark heterogenen Prozesse, um möglichst alle relevanten Umweltfaktoren zu berücksichtigen und in der Habitatmodellierung zu implementieren. Von signifikanter Bedeutung in Habitatmodellen ist die Definition der abiotisch-biotischen Kopplungen, die nur durch Verknüpfung mehrerer Kompetenzbereiche aus verschiedenen Disziplinen (Beispiel Reproduktion: Hydromorphologie, Biologie, Hydrogeologie) adäquat formuliert werden kann und dieses Grundverständnis ist eine Voraussetzung für revitalisierende Maßnahmen.

Ähnliches gilt für Sedimenttransportmodelle, denn auch hier ist bislang die Vorhersagekraft für kohäsives Material eingeschränkt, da weder die Biologie als

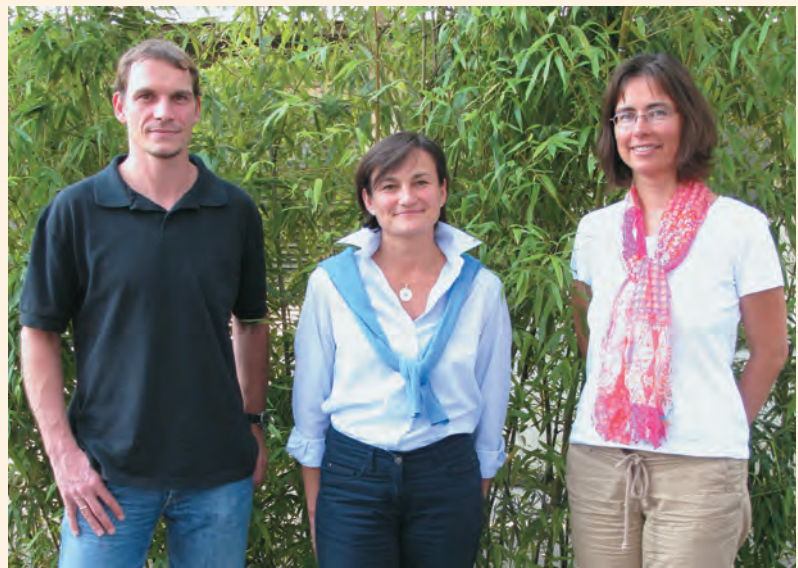
solche noch deren Interaktionen zu den physikalisch-chemischen Randbedingungen implementiert ist. Dabei beeinflusst das mikrobielle Wachstum und die Ausscheidung klebriger polymerer Substanzen entscheidend die Stabilität der Feinsedimente gegenüber erosiven Kräften sowie die Flockencharakteristik (Form, Größe, Dichte, Verbundstärke) des aufgewirbelten Sedimentes mit Konsequenzen für dessen weiteres Transport- und Depositionsverhalten. Nur mittels einer „Mehrweg“-Betrachtung durch die Vernetzung interdisziplinärer Kompetenzen ist ein Verständnis der komplexen Zusammenhänge zwischen Ökologie, Chemie, Sedimentologie und Hydromorphologie in Sedimenten möglich, welches eine wichtige Bedingung für entsprechende Bewirtschaftungsmaßnahmen ist. •

Silke Wieprecht,
Markus Noack, Sabine U. Gerbersdorf

Literatur

- Gerbersdorf, S.U., Hollert, H., Brinkmann, M., Wieprecht, S., Schuettrumpf, H. and W. Manz (2011): Anthropogenic pollutants affect ecosystem services of freshwater sediments: the need for a „triad plus x“ approach. *Journal of Soils & Sediments* (2011). DOI 10.1007/s11368-011-0373-0 Online FirstTM, 11 May 2011
- Lubarsky, H.V./Gerbersdorf, S.U., Hubas, C., Behrens, S., Ricciardi, F., Paterson, D.M. (2011): Impairment of the bacterial biofilm stability by triclosan. *PLoS ONE*, under review
- Lubarsky, H., Hubas, C., Chocholek, M., Larson, F., Manz, W., Paterson, D.M., and Gerbersdorf, S.U. (2010): The stabilisation potential of individual and mixed assemblages of natural bacteria and microalgae. *PLoS ONE*. <http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0013794>
- Gerbersdorf, S.U., Westrich, B., and Paterson, D.M. (2009): Microbial Extracellular Polymeric Substances (EPS) in fresh water sediments. *Microbial Ecology* 58, 334–349.
- Gerbersdorf, S.U., Manz, W., and Paterson, D.M. (2008): The engineering potential of natural benthic bacterial assemblages in terms of the erosion resistance of sediments. *FEMS Microbiology Ecology* 66, 282–294.
- Noack, M. und S. Wieprecht (2010): An approach to simulate interstitial processes in river beds to meet biological requirements, *River Flow 2010, Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Volume 2*, 1495–1502.
- Noack, M., Eisner, A., Wieprecht, S. und M. Schneider (2008): Auswirkungen von Stauraumspü-

DIE AUTOREN



Die interdisziplinäre Betrachtung von Fließgewässern ist ein Forschungsschwerpunkt des Lehrstuhls Wasserbau und Wassermengenwirtschaft am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung. Dabei

werden unter anderen hauptsächlich zwei Ziele verfolgt: die Einbindung fluvialer dynamischer Prozesse basierend auf numerischen Simulationsmodellen in Habitatsimulationsmodellen sowie der biologische Einfluss auf die Sedimentstabilität. Unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht entwickelte sich der Lehrstuhl zu einem interdisziplinären Mitarbeiterfeld zu dem sowohl Ingenieure als auch Biologen gehören, um den komplexen Anforderungen der Fließgewässerökologie gerecht zu werden.

PROF. DR.-ING. SILKE WIEPRECHT

studierte an der TU München Bauingenieurwesen mit den Vertiefungen konstruktiver Wasserbau und Statik und promovierte an der Universität der Bundeswehr München im Bereich des Sediment-Transport. Vor ihrer Berufung war sie mehrere Jahre an der Bundesanstalt für Gewässerkunde tätig.

Kontakt

Universität Stuttgart
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft
Pfaffenwaldring 61
70569 Stuttgart (-Vaihingen)
Tel. 0711/685-64752
Fax 0711/685-64746
E-Mail: lww@iws.uni-stuttgart.de
Internet: www.iws.uni-stuttgart.de/

- lungen auf die Fließgewässerökologie, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2008, Nr. 6, 320–325.
- Wieprecht, S., Eisner, A. and M. Noack (2006): Modelling Approach to Simulate Habitat Dynamics, *River Flow 2006, Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Volume 2*, 2055–2063.

Multifunktionale Wasserlandschaften

Wie kann Wasserinfrastruktur als Landschaft gestaltet werden?

Mit ihren Gewässern als Teil eines eindrucksvoll gestalteten Stadt- und Landschaftsraumes zeigen die Städte ihr ökonomisches Potential, ihre Schönheit und ihren Reichtum. Räume am Wasser sind heute die beliebtesten Standorte zum Leben, Erholen und Arbeiten sowie als touristische Anziehungspunkte und ein entscheidender Faktor der Stadtentwicklung weltweit. In seiner gestalteten Form wird das Wasser zum Prestigeobjekt und Gegenstand exklusiven privaten und öffentlichen Gebrauchs, zur teuren Wasserkulisse, Blau als Superlativ des Grüns.



1. Einleitung

Die Städte und ihre Menschen wollen möglichst nah ans Wasser – jedoch ist dieses auch unberechenbar und gefährlich. Wasser ist kein statisches Element, sondern geprägt durch eine Dynamik von wechselnden Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten. Diese Dynamik verschärft sich im urbanen Bereich durch den zunehmenden Anteil versiegelter Flächen: Während in der freien Landschaft rund 70 Prozent des Wassers verdunsten und nur

zwei Prozent oberflächlich abfließen, vergrößert sich der Anteil des direkt abfließenden Wassers im urbanen Raum bis auf rund 70 Prozent in den verdichteten Innenstädten. Viel Geld wird in unterirdische Kanalisation investiert, die das Wasser möglichst schnell in die Gewässer abführt, wodurch ihre Hochwasserspitzen bei Starkregenereignissen dramatisch zunehmen. Die Errichtung von immer höheren Schutzdeichen gegen die stärkeren Hochwasserereignisse engt die Gewässer immer weiter ein, was wiederum die Hochwasserereignisse noch weiter verstärkt. Gleichzeitig gibt es auch Probleme mit der Wasserqualität – viele Menschen auf engem Raum verursachen eine starke Belastung des Wassers.

So erfordert das Bedürfnis nach Nähe und Gestaltung mit dem Wasser in der Stadt- und Landschaftsplanung einen sorgfältigen Umgang mit seinen gefährlichen Eigenschaften. Das Bedürfnis nach Schutz und Sicherheit vor dem Wasser manifestiert sich in wasserbaulichen Schutz- und Infrastrukturmaßnahmen wie befestigten Ufern, Deichen, Dämmen, Kanalsystemen, Kläranlagen. Die technischen Machbarkei-

ten erscheinen schier unbegrenzt: das Wasser wird umgeleitet, abgepumpt wo notwendig, wieder hinzugepumpt wo erwünscht. Durch den Einsatz großer Mengen von Energie zur Bewegung und Aufbereitung von Wasser wird der natürliche Wasserhaushalt des Naturraums durch ein spezifisch urbanes Wassersystem komplett überformt. Dabei stellt die Wasserinfrastruktur die Befähigungsplattform dar, durch die sich die Gestalt von urbanen Landschaften immer weiter aus ihrer natürlichen Umwelt herauslöst: künstliche Wasserlandschaften und Parks, aufwändig bewässert bzw. aufwändig trockengelegt und abgeschirmt von der bedrohlichen Realität. Das Ideal einer weitgehend unsichtbaren, durch spezialisierte Ingenieursdisziplinen geplanten Infrastruktur, aus der sich Architekten, Stadtplaner und Landschaftsarchitekten weitgehend zurückgezogen haben, beherrschte das 20. Jahrhundert. Die auf dieser Basis geplanten Stadtlandschaften sind gekennzeichnet durch hohen Energieverbrauch und Wasserdurchsatz, Verlust der Erfahrbarkeit regionaler Wassersysteme, starke Heterogenität unterschiedlicher Gestaltungsstile und stärker werdender Ortlosigkeit von Orten bezogen auf ihren naturräumlichen Kontext.

Das 21. Jahrhundert stellt das Verhältnis von Stadtentwicklung und Wasserinfrastruktursystemen vor völlig neue Herausforderungen. Wir befinden uns in einer Zeit des Übergangs von der Industriegesellschaft hin zu einer durch Energieknappheit, urbane Lebensweisen und Anpassungen an die Auswirkungen des Klimawandels geprägten Gesellschaft im post-fossilen Zeitalter. Die Notwendigkeit der verstärkten Nutzung regenerativer Energieformen bei gleichzeitiger Energieeinsparung angesichts zunehmender Gefährdung durch Trinkwassermangel und Hochwasserereignisse erzeugt völlig neue Herausforderungen für die Ingenieursdisziplinen, Stadtplanung und Architektur.

Die ursprünglich auf steigenden Wasserverbrauch und zunehmendes Siedlungswachstum ausgelegten Großsysteme der Wasserinfrastruktur stoßen in den entwickelten Ländern angesichts abnehmender Bevölkerungszahlen und Konsumraten sowie der durch Suburbanisierungs- und Schrumpfungsprozesse abnehmenden urbanen Dichte an ihre funktionalen Grenzen. Gleichzeitig können andere

SUMMARY

Thinking of water in urban landscapes most people imagine urban waterfronts along clean rivers, lakeside parks and water features. The requirements for flood protection, for the supply of freshwater and disposal of waste and rain water are usually not included in our ideas about the design of urban landscapes because the provision of water infrastructure systems is understood to be solved by engineers in a technical and preferably invisible way. The Institute for Landscape Planning and Ecology develops new concepts of „waterscape urbanism“, forming a new basis for the cooperation between civil engineers, architects, urban designers, ecologists and landscape planners. The need to rethink and invest into less expensive and more flexible forms of urban water infrastructure systems is considered a strategic chance to generate new ideas about built and managed systems of blue and green infrastructure that provide multiple economic, ecological and cultural functions in support of urban sustainability.

Regionen der Welt, insbesondere die Entwicklungsländer, den Aufbau einer kostenintensiven, zentralen Infrastruktur nicht mit ihrem rasanten Wachstum synchronisieren.

Das Institut für Landschaftsplanung und Ökologie an der Fakultät für Architektur und Stadtplanung verfolgt einen querschnittsorientierten, die verschiedenen Disziplinen integrierenden Ansatz zur Entwicklung und Gestaltung multifunktionaler Wasserlandschaften der Zukunft. Dabei stellt die oben beschriebene Notwendigkeit der Entwicklung von integrierten Lösungsansätzen für die Stadtentwicklung mit dem Wasser eine strategische Chance dar, Wassersysteme als eine grundlegende Komponente urbaner und regionaler Form neu zu denken. In seiner Forschung entwickelt und erprobt das Institut Methoden des ökosystemaren Entwerfens sowie der Landschaftsanalyse und -modellierung, basierend auf einem Verständnis von Landschaft als komplexes Zusammenspiel ökosystemarer Prozesse und multifunktionaler Nutzungsanforderungen. Dabei werden die Bezüge zwischen Landschaftsplanung und Ökologie einerseits sowie Stadtplanung, Gesellschaftswissenschaften, Bauingenieurwesen und Landwirtschaft andererseits als maßgebend verstanden.

Was sind zukunftsweisende Entwurfsansätze für den landschaftsplanerischen und stadtgestalterischen Umgang mit Wasser im urbanen Raum? Wie können wir hydrologische Infrastrukturen als urbane Landschaften gestalten? Die im folgenden beschriebenen Ansätze und Forschungsprojekte für neue Gewässer-, Abwasser- und Regenwasserlandschaften zeigen, wie integrierte Strategien des Wassermanage-



01 *Wasserproblemlandschaften in Sao Paulo, die aktuelle Herausforderungen der Megacities aufzeigen.*

ments zu neue Formen von multifunktionalen und attraktiven Wasserlandschaften führen können.

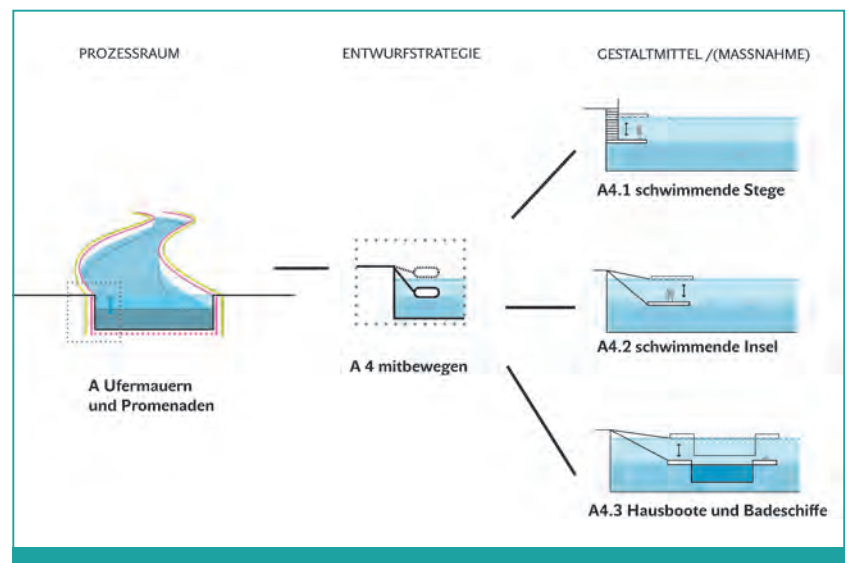
2. Urbane Gewässerlandschaften gestalten

Unzählige Kommunen in Deutschland und Europa stehen durch die aktuelle EU-Wasserrahmenrichtlinie und die EU-Hochwasserrichtlinie vor der Herausforderung, ihre Fließgewässer hin zu mehr Naturnähe zu entwickeln und dabei gleichzeitig erhöhten Anforderungen an den Hochwasserschutz Rechnung zu tragen. Diese Ansprüche dürfen aber nicht isoliert betrachtet werden, denn zugleich haben die Flüsse und ihre Uferbereiche bedeutende Funktionen als urbane Freiräume und sind für die Lebensqualität der sich immer weiter verstädternden Gesellschaften von hohem Wert. Ein integrativer Ansatz ist notwendig – allerdings arbeiten derzeit Wasserbau, Naturschutz, Landschaftsarchitektur und Stadtplanung nicht ausreichend zusammen, um die komplexen, dynamischen Wasserprozesse in die Gestaltung urbaner Wasserräume einzubeziehen. Ursache für diesen Mangel systemischen und interdisziplinären Arbeitens ist auf Seiten der Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung die Konzentration auf zumeist statische Idealbilder. Die räumlich entwerfenden Disziplinen arbeiten meist formstark prozessorientiert und schaffen es selten, neben einer architektonisch-gestalterischen Idee die komplexe, dynamische Prozesshaftigkeit von Gewässern produk-

tiv einzubeziehen. Bedingt durch wechselnde Wasserstände, Jahreszeiten und Erosions- sowie Sedimentierungsprozesse, ist der Flussraum kein statisches Gebilde, sondern einem steten Wandel unterworfen. Die Sichtweise, dass gewässernahe urbane Räume nur optimal nutzbar sind, wenn sie vor Überflutungen geschützt und den dynamischen Flussprozessen nicht unterworfen sind, ist in der Praxis weit verbreitet. Aufgrund der Schwierigkeiten, die eigendynamischen Prozesse von Fließgewässern zu verstehen und zu prognostizieren, wird häufig versucht, sie durch bauliche Maßnahmen und intensive Unterhaltungsstrategien zu minimieren. In der Vergangenheit lag der Fokus stark auf der Kontrolle der dynamischen Wasserläufe. Als Paradebeispiele seien nur die Tulla'schen Rheinbegradigungen genannt oder die Betonkastenprofile in Los Angeles, durch die Arnold Schwarzenegger als Terminator braust. In den letzten Jahren sind dagegen große Fortschritte bei der Wiederherstellung der ökologisch-hydrologischen Funktionen von Flüssen nach dem Leitbild eines möglichst naturnahen Zustands erzielt worden – allerdings vorwiegend im ländlichen Raum. Flüsse im städtischen Raum müssen wegen vielfältiger Nutzungsansprüche robuster sein und gängige naturnahe Leitbilder scheinen unpassend. Die Erkenntnisse und Zusammenhänge, die bei Renaturierungen gewonnen wurden, lassen sich daher nur zum Teil auf urbane Räume übertragen. Gerade in der Stadt offenbaren Flussräume ihren hybriden Charakter. Sie sind künst-

lich und natürlich zugleich. Sie sind räumlich stark begrenzte, kunstvoll gesteuerte wasserwirtschaftliche Infrastrukturen. Zugleich stellen sie aber ein natürliches und dynamisches Element in der Stadt dar, welches als eigenständiges Ökosystem die umgebende Landschaft mit der Stadt vernetzt. Die Frage beim aktuellen Umbau von Flusssystemen in der Stadt ist nun, ob sich die strikten funktionalen Anforderungen an die Gewässer mit ihrer natürlichen Eigendynamik kombinieren lassen? Bisher unterdrückte eigendynamische Prozesse zuzulassen würde folgende Vorteile bedeuten: Durch Energieverteilung können eine größere Stabilität und ein ausgeglichener Geschiebehalt erreicht werden, und für Flora und Fauna ist eine höhere Vielfalt von Strukturen und somit neuen Lebensräumen möglich, und zuletzt kann durch die erforderliche Gestaltung neuer Retentionsräume ein Beitrag zum nachhaltigen Hochwasserschutz geleistet werden.

Ziel der Forschung zu urbanen Gewässerlandschaften am Institut für Landschaftsplanung und Ökologie ist es, in enger Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen beteiligten Fachdisziplinen zukunftsweisende Methoden zu entwickeln und anzuwenden, die das Entwerfen von urbanen Gewässerlandschaften nicht nur als formale Komposition, sondern auch als komplexes Zusammenspiel von Naturprozessen, Nutzungsanforderungen sowie Stadt- und Freiraumgestaltung auffassen. In einem mehrjährigen DFG-Forschungsprojekt, dessen Ergebnisse dieses Jahr als Buch mit dem Titel „Fluss. Raum. Entwerfen.“ veröffentlicht werden, unterzog ein interdisziplinäres Team aus Landschaftsarchitekten und Wasserbauern über 50 Projekte aus dem westeuropäischen Raum einer vergleichenden Analyse. Diese Auswahl gebauter Projekte umfasste sowohl kleine innerstädtische Renaturierungs- und Revitalisierungsprojekte als auch Umbauten an großen Strömen. Gemeinsam ist allen Projekten eine bewusste gestalterische Auseinandersetzung mit der Dynamik des bearbeiteten Gewässersystems. Ziel der vergleichenden Analyse war das Herausarbeiten übertragbarer Entwurfstrategien, die zukünftige Planungen unterstützen können. Hier stellte sich der planerische Umgang mit Grenzen als wichtigster Parameter zur Gestaltung mit



02

den dynamischen Gewässerprozessen dar: Linien, Objekte oder Räume, z. B. in Form von Uferbefestigungen oder Deichen, bestimmen die Art der stattfindenden Gewässerprozesse innerhalb von bewusst gesetzten Grenzen. Ausgehend von der unterschiedlichen Gestaltung des Verhältnisses zwischen der Grenzlinie für Wasserschwankungen und der Grenzlinie für morphodynamische Prozesse wurden fünf übertragbare Entwurfstrategien identifiziert und anhand von fünf unterschiedlichen Prozessräumen A bis E dargestellt (02). Sie sollen die grundsätzlichen Möglichkeiten einer prozessorientierten Gestaltung urbaner Fließgewässerräume für verschiedene räumliche Situationen aufzeigen und die ihnen zugeordneten Gestaltungselemente bezogen auf verschiedene planerische Rahmenbedingungen anwendbar machen.

Das Ergebnis des Forschungsprojektes ist ein so genannter „topologischer Atlas“. Mit dem Verweis auf die Topologie als die systematische Beschreibung räumlicher und zeitlicher Beziehungen soll der Atlas die Verknüpfungsmöglichkeiten an verschiedenen Stellen des Entwurfsprozesses aufzeigen und als Entscheidungs- und Bewertungshilfe dienen. Das Nebeneinanderstellen der verschiedenen Strategien erleichtert das Auffinden geeigneter Maßnahmenpakete und Beispiele zur Unterstützung konkreter Projekte. Die Möglichkeiten und Chancen jeder Strategie werden in den angegliederten Entwurfselementen und Projektbeispielen sichtbar. Das Buch besteht aus zwei miteinander

In einem DFG-Forschungsprojekt wurde ein topologischer Atlas als Entscheidungs- und Bewertungshilfe für den Entwurfsprozess entwickelt.



Gute Beispiele für erfolgreiche Projekte der Revitalisierung urbaner Flussufer: Die Isar in München, die Rhône in Lyon und der Soestbach in Soest.

verbundenen Katalogteilen, die das parallele Betrachten von Gestaltungskatalog und Beispielkatalog erlauben. Dabei geben die übersichtliche Navigation und ein ausführliches Glossar Orientierung. Die im Rahmen der Grundlagenforschung untersuchten vielfältigen Beispielprojekte von Flussrevitalisierungen in Europa zeigen, wie erfolgreich eine gute Zusammenarbeit zwischen Wasserwirtschaft, Landschaftsarchitektur, Ökologie und Stadtentwicklung sein kann. Entsprechende Methoden und Strategien der Verbindung zwischen wasserbaulichen und entwurflichen Aspekten sollen in stärker anwendungsbezogenen Forschungsprojekten im Rahmen der interdisziplinären Zusammenarbeit im Wasserforschungszentrum der Universität Stuttgart weiterentwickelt werden. Dafür bietet sich die Entwicklung des Neckars als wichtige Lebens-, Wirtschafts- und Erlebnisachse der Region Stuttgart an. Auch hier muss das Ziel sein, neben den verschiedenen Nutzungsansprüchen und möglichen baulichen Entwicklungen das bewusste Gestalten mit der natürlichen Fließgewässerdynamik und mit dem Hochwasser zu thematisieren. Der zukunftsweisende Umgang mit dem Zusammenspiel zwischen landschaftlichen und kultu-

rellen Besonderheiten des Neckars stellt ein spannendes regionales Handlungsfeld für eine Kooperation zwischen Forschung und Praxis in diesem Themenfeld dar.

3. Urbane Abwasserlandschaften gestalten

Der saubere Urbanismus als modernes städtebauliches Ideal beruht auf weitestgehend unsichtbaren Wasserinfrastrukturen, die Trinkwasser und das aus seinem

Verbrauch resultierende Abwasser unterirdisch über Hunderte von Kilometern an- und abtransportieren. Architekten, Landschaftsarchitekten und Stadtplaner gehen bei ihren Entwürfen für die Gestaltung urbaner Landschaften selbstverständlich von der Annahme aus, dass sauberes Wasser in jedem Fall verfügbar ist und Schmutzwasser entsorgt werden kann, ohne dass man sich Gedanken über das Woher und Wohin zu machen braucht.

Allerdings erfordert die zunehmend extremere Tendenz zum Leben in den Städten, in denen mittlerweile mehr als die Hälfte der Menschheit zu Hause ist, ein Umdenken. Die weltweiten Rahmenbedingungen des Klimawandels bei gleichzeitiger Verknappung der Energie- und Wasserressourcen, führen zu völlig neuen Herausforderungen der Raumentwicklung. Die ursprünglich auf steigenden Wasserverbrauch und zunehmendes Siedlungswachstum ausgelegten Großsysteme der Wasserver- und Entsorgung stoßen in den entwickelten Ländern angesichts der in vielen Städten und Regionen abnehmenden Bevölkerungszahlen und Konsumraten sowie der durch Suburbanisierungs- und Schrumpfungsprozesse abnehmenden urbanen Dichte an ihre funktionalen Grenzen: Vor dem Hintergrund sinkender Wirtschaftskraft und wachsender Energiepreise sind schon jetzt viele Kommunen den daraus resultierenden Problemen der starken Zunahme von Fixkosten, der Beseitigung von Verkeimungserscheinungen und Geruchsproblemen in den Leitungen sowie den Betriebsproblemen überdimensionierter Kläranlagen kaum noch gewachsen. Gleichzeitig können andere Regionen der Welt, insbesondere die Megacities der Schwellen- und Entwicklungsländer, den Aufbau einer kostenintensiven, zentralen Infrastruktur nicht mit ihrem rasanten Wachstum synchronisieren – das sich zudem vor allem ungeplant und am stärksten im Bereich informeller Ansiedlungen der ärmsten Bevölkerungsschichten vollzieht. Trotzdem wird viel Geld in eine aufwändige Stadtbegrünung als Zeichen des Fortschritts investiert – was eine intensive Bewässerung, oft mit Trinkwasser, nach sich zieht und den Wasserhaushalt zusätzlich stark belastet. Ziel der Forschung zu urbanen Abwasserlandschaften am Institut für Landschaftsplanung und Ökologie ist es neue Konzep-

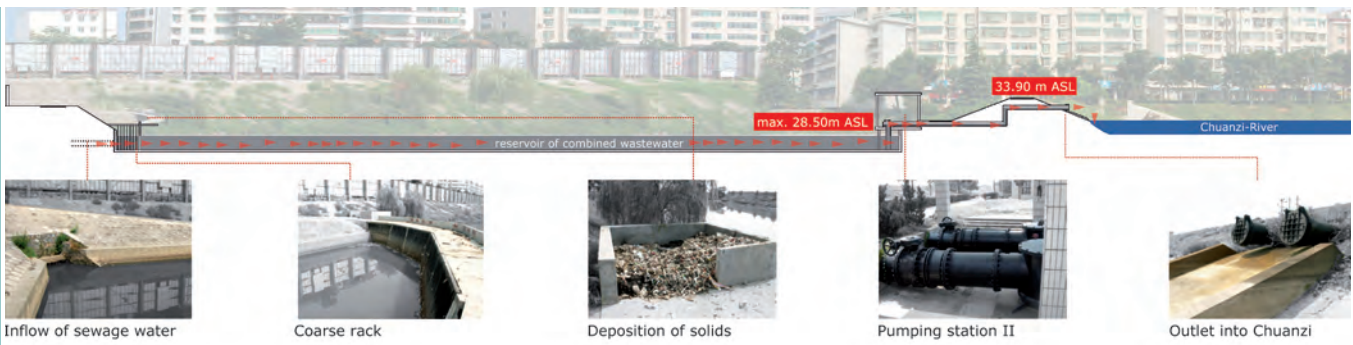
te zur Integration der Abwasserableitung, -reinigung und Nutzung der im Abwasser enthaltenen Nährstoffe zu entwickeln, auf deren Grundlage Wasserbauingenieure, Architekten, Stadtplaner und Landschaftsarchitekten sowie Agraringenieure und Umweltfachleute zusammenarbeiten können. Die Notwendigkeit, preisgünstigere und flexiblere großstädtische Wasserleitungsnetze, Abwasserkanäle und Kläranlagen zu schaffen, kann als strategische Chance aufgefasst werden, neue Ideen für „blaue und grüne“ Infrastruktursysteme und deren Bau und Betrieb als integrierte Bestandteile urbaner Landschaften zu entwickeln, die vielfältige ökonomische, ökologische und sozio-kulturelle Funktionen erfüllen und so die Lebensfähigkeit der Städte nachhaltig fördern. Ein historisches Vorbild in diesem Zusammenhang ist der Berliner „Hobrecht-Plan“ von 1862, in dem der Ingenieur James Hobrecht den ersten perspektivischen Bebauungsplan für Berlin auf der Grundlage eines an der Topographie orientierten Stadtentwässerungssystems und der Abwasserreinigung in Rieselfeldern entwarf. Abwasserlandschaften zu entwerfen bedeutet, dass Architekten, Stadtplaner und Landschaftsarchitekten sich nicht nur mit Trinkwasser als Gestaltungselement, sondern auch mit den technischen Aspekten der Ableitung, Reinigung und Nutzung des Abwassers vertraut machen sollten - und dass Wasserbauingenieure nicht nur das effiziente Funktionieren technischer Systeme im Blick haben, sondern diese auch in ihrem kulturellen, sozialen, ästhetischen und ökologischen Kontext betrachten sollten.

In einem abgeschlossenen EU-Asia-Pro Eco Forschungsprojekt in China wurden in Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Vereins „Wasser Hannover“, einem Zusammenschluss der Stadtentwässerung, verschiedener Ingenieurbüros sowie Universitäten, zukunftsweisende Ansätze der Verbindung von Wassermanagement und Stadtplanung entwickelt. Die Stadt Changde ist eine blühende mittelgroße, typisch chinesische Stadt im Süden Chinas an den Ufern des mächtigen, hier 500 Meter breiten Yuan-Flusses. Der hier in den Yuan-Fluss mündende Nebenfluss Chuanzi soll zum „Goldenen Gürtel“ der expandierenden Stadt entwickelt werden, für den Stadtplaner, Architekten und Landschaftsarchitekten im Vorfeld des Projekts

einen Uferpark mit angrenzenden Wohnsiedlungen und Einkaufszentren entworfen hatten. Allerdings ist der Chuanzi stark belastet, weil stark verschmutztes Wasser aus 17 offenen Mischwasserrückhaltebecken entlang des Flusses häufig in ihn überfließt, wenn die vorhandenen Pumpstationen den starken Monsunregen nicht mehr bewältigen und die Becken die Wassermassen nicht mehr zurückhalten können. Hinzu kommt, dass die offenen Betonbecken neben öffentlichen und privaten Freiflächen liegen und nicht nur buchstäblich zum Himmel stinken, sondern auch eine Gefahr für die Bewohner darstellen. In die vorliegenden Planungen für das neue Stadtgebiet am Chuanzi wurden diese Becken jedoch nicht mit einbezogen, und auch die beteiligten Ingenieure taten nichts, um die Becken zu sanieren, sondern planten zentrale High-Tech-Systeme, deren Umsetzung aufgrund der hohen Kosten jedoch fraglich war.

Anstatt mit gewaltigen Investitionen verbundene Lösungen für ein zentrales Wasserver- und Entsorgungssystem und eine aufwendige Parkgestaltung vorzuschlagen, entwickelte das interdisziplinäre Team im Rahmen des Forschungsprojekts die Grundlagen für einen neuartigen Rahmenplan mit konkreten Gestaltungsvorschlägen für eine urbane Flussuferlandschaft. Dieser hatte zum Ziel, die offensichtlichen Synergien zwischen erschwinglichen ingenieurtechnischen Bauten, ökologisch wertvollen Grünflächen und attraktiven öffentlichen Räumen zu nutzen. Hierfür wurden verschiedene integrierte Typologien von begrünten Filtersystemen entwickelt, die aus hydrologischen Abwasserinfrastrukturen Landschaft machen und zum Teil der Parkgestaltung werden. Durch die Einbeziehung dynamischer, natürlicher und sich selbst regulierender ökologischer Prozesse können die vorgeschlagenen Retentions- und Reinigungslandschaften als „technische Biotope“ fungieren, die Wasser speichern und klären, weniger Wartung und technische Inspektionen als konventionelle Anlagen erfordern und zugleich den Bewohnern Erholung im Grünen bieten.

Der gerade in der Umsetzung befindliche Sanierungs- und Umbauplan für das Klärbecken „Boziyuan“ zeigt, wie sich ohne großen Kosten- und Arbeitsaufwand die



Inflow of sewage water



Coarse rack



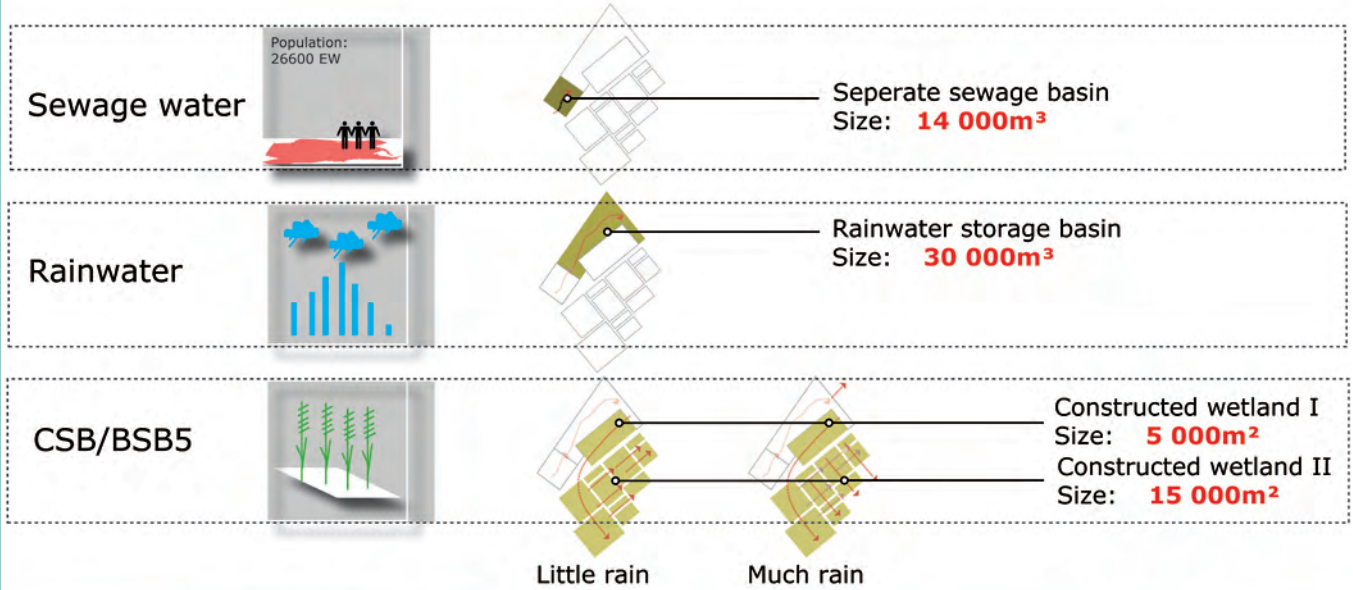
Deposition of solids



Pumping station II



Outlet into Chuanzi



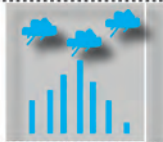
Sewage water



Population:
26600 EW

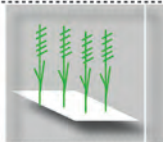
Seperate sewage basin
Size: **14 000m³**

Rainwater



Rainwater storage basin
Size: **30 000m³**

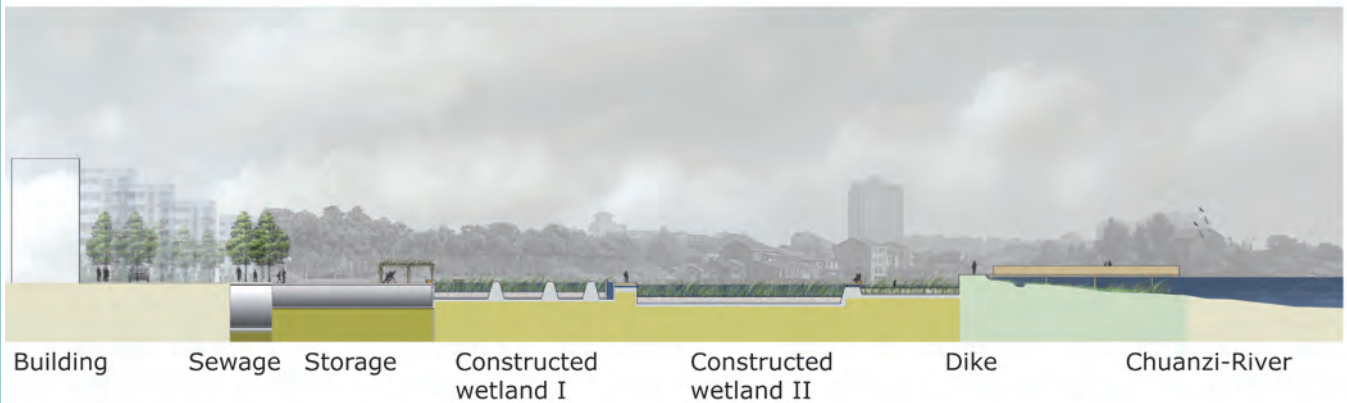
CSB/BSB5



Constructed wetland I
Size: **5 000m²**
Constructed wetland II
Size: **15 000m²**

Little rain

Much rain



Building

Sewage

Storage

Constructed wetland I

Constructed wetland II

Dike

Chuanzi-River

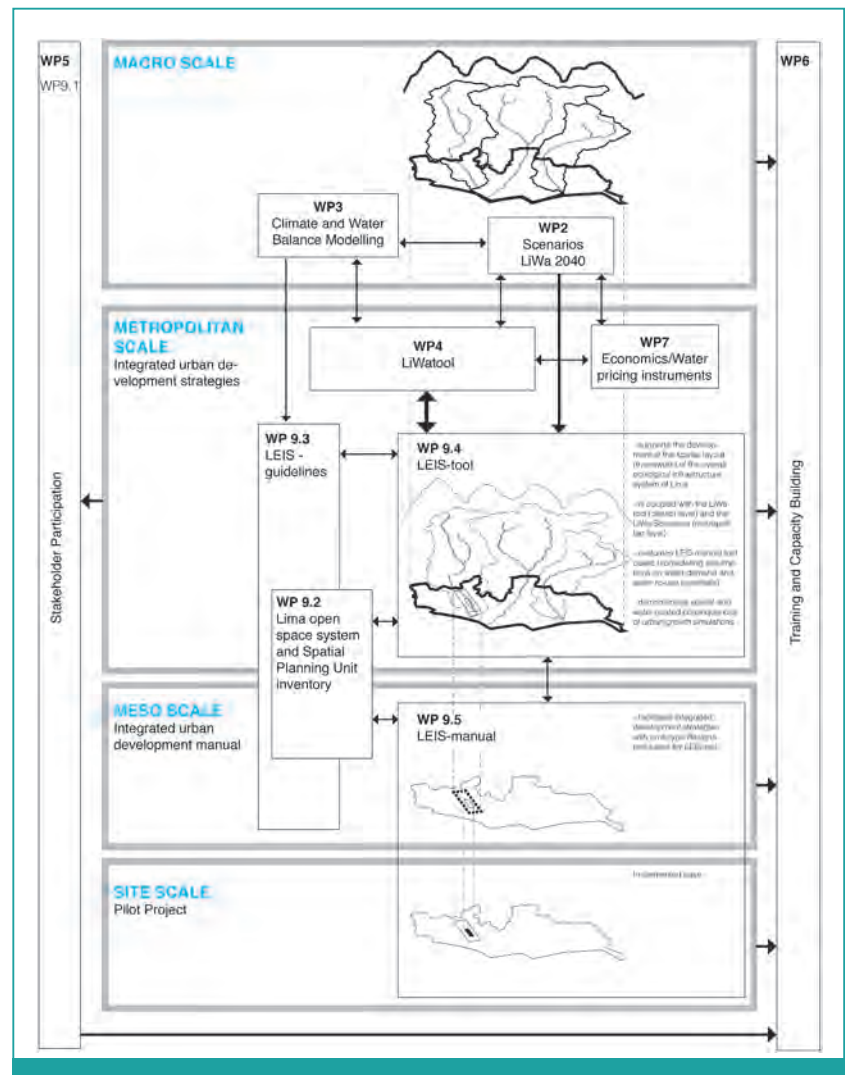


technische Effizienz der Anlage verbessern und gleichzeitig die Zugänglichkeit und ökologische Qualität des Uferparks am Chuanzi aufwerten lässt. Der Rahmenplan sieht vor, das vorhandene Becken in mehrere Bereiche zu unterteilen, die unterschiedliche Funktionen im Sinne von Speicherung, Überlauf und Reinigung beinhalten. Auf seinem Weg durch die hintereinander geschalteten Retentionsbodenfilter wird das Wasser immer sauberer und in guter Qualität in den Chuanzi Fluss eingeleitet. Während das stark verschmutzte Wasser unterirdisch gespeichert und zur Kläranlage geleitet wird, stellen die mit Schilf und anderen Sumpfpflanzen gestalteten Pflanzenkläranlagen attraktive Elemente des geplanten Uferparks dar.

Angewendet und weiterentwickelt werden die aus diesem Projekt resultierenden Erkenntnisse in dem laufenden BMBF-Mega-city-Projekt „Nachhaltiges Management von Wasser und Abwasser in urbanen Wachstumszentren unter Bewältigung des Klimawandels - Konzepte für Lima Metropolitana (Perú)“. Ziel des Teilprojekts am Institut für Landschaftsplanung und Ökologie ist die Entwicklung von stadt- und landschaftsplanerischen Strategien in Zusammenarbeit mit einer Vielzahl von Projektpartnern in Deutschland und Perú, um angesichts der durch den Klimawandel immer knapper werdenden natürlichen Wasserressourcen den Wasserverbrauch zu reduzieren und eine optimierte Verteilung, Nutzung und Wiederverwendung der Ressource Wasser zu erzielen. Gleichzeitig geht es darum im Rahmen eines Pilotprojektes für einen ökologischen Uferpark innovative Lösungsansätze zu demonstrieren, die die Reinigung von Abwasser mit einer integrierten Stadtentwicklung und Freiraumgestaltung verbinden.

4. Urbane Regenwasserlandschaften gestalten

Traditionell ist die Gestaltung des urbanen Raumes darauf ausgelegt, möglichst immer trockene Oberflächen von Straßen, Plätzen oder Rasenflächen zu schaffen: Das Regenwasser wird so schnell wie möglich von den versiegelten Flächen durch ein engmaschiges System von Einläufen in die unterirdische Regen- oder Mischwasserkanalisation mit einer maximalen Abflussleistung geleitet und dann direkt



über die entsprechenden Einleitungsstellen oder indirekt über die Klärwerke den Gewässern zugeführt.

Doch schon seit Jahren hat ein Paradigmenwechsel von einer zentralen Regenwasserableitung hin zu einer dezentralen Regenwasserbewirtschaftung eingesetzt. Dieser ist bedingt durch wasserwirtschaftliche Erwägungen in Bezug auf Strategien zur Vermeidung von Hochwasser und Reduzierung der hydraulischen Belastungen der Fließgewässer und Grundwasserabsenkungen sowie die Senkung von Kosten für die notwendige Vergrößerung von Abflussquerschnitten der Kanalisation. Auch vor dem Hintergrund des Klimawandels und der damit einhergehenden steigenden Gefahr durch Starkregenereignisse und Überschwemmungen wird die Integration des Regenwassermanagements in die Stadtentwicklung zunehmend wichtiger.

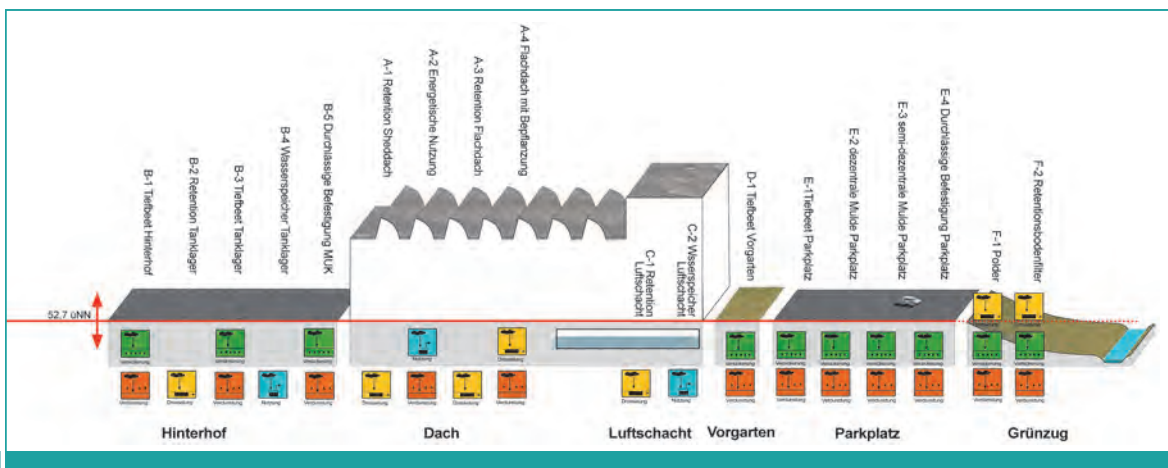
Das Konzept der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung besteht aus einer Ver-

Nachhaltiges Management von Wasser und Abwasser in urbanen Wachstumszentren unter Bewältigung des Klimawandels – Konzepte für Lima Metropolitana (Perú).

Zukunftsweisende Ansätze der Verbindung von Wassermanagement und Stadtplanung wurden für die chinesische Stadt Changde entwickelt.

knüpfung unterschiedlicher Verfahren, den Regenabfluss ingenieurtechnisch zu beeinflussen: der Versickerung bzw. Nutzung von Regenwasser vor Ort, der Zwischenspeicherung und -rückhaltung sowie der gedrosselten Ableitung und verzögerten Übergabe in die Gewässer. Aus stadt- und freiraumplanerischer Sicht bieten entsprechende Strategien die Möglichkeit, die notwendigen Investitionen in die Regenwasserableitungs-, Sammel- und Reinigungsinfrastruktur als wichtigen und attraktiven Bestandteil der räumlichen Gestaltung nutzbar zu machen. Das bedeutet auch, dass Wasserwirtschaftler und Stadt- bzw. Freiraumplaner bereits von Anfang an in der konzeptionellen Ideenfindungsphase zusammenarbeiten müssen

handene Strategien und Technologien der „wassersensitiven Stadtentwicklung“ weiter zu entwickeln, um sie bezogen auf unterschiedliche ökologische, technische und stadträumliche Voraussetzungen und in verschiedenen Planungsmaßstäben anwendbar zu machen. Weltweit existieren mittlerweile verschiedenste Forschungsvorhaben und realisierte Projekte die zeigen, wie durch eine fachübergreifende Zusammenarbeit von Planern, Architekten und Ingenieuren die Lebensqualität der Städte verbessert und die Wettbewerbsfähigkeit gesteigert werden kann. Jedoch existieren immer noch viele Hürden um die Regenwasserbewirtschaftung als übergeordnete, gesamtstädtische und großräumige Strategie und integrierter Be-



bestandteil einer daran angepassten städtebaulichen und freiraumplanerischen Struktur zu verankern. In einem abgeschlossenen Kooperationsprojekt mit der Firma Volkswagen-

Nutzfahrzeuge (VWN) in Hannover entwickelte ein interdisziplinäres Forscherteam aus den Bereichen Landschaftsarchitektur, Wasserwirtschaft und Stadtplanung in Zusammenarbeit mit der Abteilung Umweltschutz bei VWN neue Ansätze zur Regenwasserbewirtschaftung für das 130 Hektar große Bearbeitungsgebiet. Dieses umfasst das Werksgelände von VWN und einen Teil des angrenzenden öffentlichen Grünzuges am Stöckener Bach. Ziel des Forschungsprojektes war es, die Wechselwirkungen zwischen dem Werksgelände von Volkswagen-Nutzfahrzeuge in Hannover, seinem Entwässerungssystem sowie den angrenzenden Gewässern und Freiräumen zu analysieren und die Abflussprozesse des Regenwassers unter ökonomischen, ökologischen und planerischen Aspekten zu optimieren. Dabei ging es darum aufzuzeigen, dass Ressourcenschonung, Wirtschaftlichkeit und gesellschaftliche Verantwortung Hand in Hand gehen können.

Maßnahmenbausteine und Entwurfstrategien im Kooperationsprojekt mit der Firma Volkswagen-Nutzfahrzeuge (VWN) in Hannover.

– denn das Wassermanagement und die Raumstruktur müssen aufeinander bezogen konzipiert werden. Wenn die Erfordernisse und gestalterische Einbindung des Wassersystems nicht von vornherein bei der Festlegung der Erschließungs- und Bauungsstruktur berücksichtigt werden, führt die Zusammenarbeit häufig zu Konflikten und unbefriedigenden Lösungen. Oft kommt es erst im Nachgang zu einer additiven Ergänzung von Ableitungs- und Versickerungsflächen, die weder funktional noch gestalterisch in das Gesamtkonzept eingebunden sind bzw. sich aufgrund stadtplanerischer Vorgaben schwer einbinden lassen. Während es viele Beispiele für das Regenwassermanagement auf Einzelgrundstücken und auch einige auf der Ebene neuer Stadtteile gibt, wurde bisher noch kein flächendeckendes, gesamtstädtisches Konzept umgesetzt. Ziel der Forschung zu urbanen Regenwasserlandschaften am Institut für Landschaftsplanung und Ökologie ist es, vor-

Die wesentliche Herausforderung bestand darin eine große Bandbreite an unterschiedlichen Maßnahmenoptionen aufzuzeigen, die sich in das bestehende Entwässerungssystem im Projektgebiet integrieren und dem hohen Nutzungsdruck innerhalb der Produktionsstätte gerecht werden. Insgesamt wurden 18 mögliche Einzelmaßnahmen ausgearbeitet und bezüglich ihrer Amortisation durch Einsparung von Regenwassergebühren, die Reduzierung der Umweltauswirkungen sowie auf Synergieeffekte im Hinblick auf die multifunktionale Nutzung und Gestaltung von Freiräumen bewertet. Ein „springendes Verfahren“ ermöglichte die Kombination intuitiv-entwurflicher Strategien mit rational-analytischen Berechnungen und Simulationen. Auf der Basis der Betrachtung des Zusammenspiels der verschiedenen möglichen Einzelmaßnahmen wurden Langzeitsimulationen zur Regenwasserbewirtschaftung für die unterschiedlichen Maßnahmenkombinationen durchgeführt. Aus den Ergebnissen der hydrologischen Modelle wird ersichtlich, welche Maßnahmenkombinationen sich besonders gut für das Regenwassermanagement bei VW Nutzfahrzeuge eignen: Sie variieren von einer Gesamtreduktion des Regenwasserabflusses um 18,4 Prozent bei der Minimalvariante bis hin zu 82,3 Prozent bei der Maximalvariante. Die aus dem Zusammenspiel zwischen entwurflichen Methoden und analytischen Modellierungsverfahren gewonnenen Erkenntnisse wurden in iterativen Entscheidungsketten zu einem Ergebnis in Form einer Reihe empfehlenswerter Maßnahmenkombinationen geführt. Für die zukünftige Regenwasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Haupteinleitungsstelle Stöckener Bach wird eine stufenweise Umsetzung und Kopplung verschiedener Einzelmaßnahmen empfohlen. Dabei flossen sowohl Erkenntnisse aus Gesprächen mit Vertretern der verschiedenen Abteilungen des Unternehmens VWN, der Stadtentwässerung und des Fachbereichs Umwelt und Stadtgrün der Stadt Hannover wie auch aus mehreren Nachbarschaftsdialogen ein.

Weiterer Bestandteil des Projektes war die landschaftsarchitektonische Ausarbeitung konkreter Einzelmaßnahmen im Sinne von Testentwürfen, die zeigen wie die technisch funktionalen Lösungsansätze der Regenwasserbewirtschaftung mit Prinzipien der Freiraumgestaltung in Einklang

ZUSAMMENFASSUNG

Unter urbanen Wasserlandschaften stellen sich die meisten Menschen wunderschöne Promenaden entlang sauberer Flüsse, Parkanlagen an Seeufern und Brunnen mit Wasserspielen vor. Was aber alles nötig ist, um den Hochwasserschutz, die Frischwasserversorgung und die Ableitung und Reinigung des Abwassers und Regenwassers einer Stadt zu gewährleisten, gehört normalerweise nicht in unsere Vorstellung von urbanen Wasserlandschaften. Wir halten die Wasserversorgungs- und Entwässerungssysteme für eine technische Angelegenheit der Ingenieure, die vorzugsweise unsichtbar funktionieren sollte.

Das Institut für Landschaftsplanung und Ökologie der Universität Stuttgart entwickelt neue Konzepte der wassersensitiven Stadtentwicklung, die eine neue Grundlage für die Zusammenarbeit zwischen Wasserbauingenieuren, Architekten, Stadtplanern, Landschaftsarchitekten und Ökologen darstellt. Die Notwendigkeit, preisgünstigere und flexiblere großstädtische Wasserinfrastruktursysteme zu schaffen, wird als strategische Chance aufgefasst, um neue Ideen für „blaue und grüne“ Infrastruktursysteme als integrierte Bestandteile urbaner Landschaften zu entwickeln, die vielfältige ökonomische, ökologische und soziokulturelle Funktionen erfüllen und so die Nachhaltigkeit der Stadtentwicklung befördern.

zu bringen sind. Ziel ist es, neuartige multifunktionale Außenräume zu gestalten, die zu einer Reduktion der Regenwassergebühren beitragen, das Arbeitsklima verbessern und einen Imagegewinn für den Industriestandort VWN bedeuten. So ermöglicht beispielsweise eine Kombination aus Tiefbeet und Pausenecke eine hohe Versickerungsleistung bei geringem Flächenbedarf und schafft gleichzeitig reizvolle Außenräume, welche die VWN-Mitarbeiter/innen während der Pausen nutzen können (06).

Insgesamt zeigt sich, dass nicht nur in Wohngebieten, sondern auch in Industrie- und Gewerbegebieten mit hohen Versiegelungsgraden eine große Zahl möglicher Maßnahmen besteht und diese in ihrer Kombination zu einer gravierenden Reduzierung der Regenwassereinleitung und damit auch der anfallenden Gebühren führen können. Es ist zu hoffen, dass VWN zumindest einen Teil der Vorschläge weiterverfolgt und damit auch am Praxisfall ermittelte Werte gesammelt, ausgewertet und weitergegeben werden können, die das Werk von VWN in Hannover zu einem Vorbild für andere Industriebetriebe werden lassen. Gleichzeitig eröffnet eine Werksentwicklung mit dem Regenwasser eine Möglichkeit für Landschaftsarchitekten, auch auf der ökonomischen Ebene Argumente für die Freiraumgestaltung einzubringen, die als grüne Infrastruktur langfristig Kosten senken und zur Außendarstellung beitragen.



06b

Testentwürfe zeigen, wie technisch-funktionale Prinzipien der Regenwasserbewirtschaftung mit Mitteln der Freiraumgestaltung zu verbinden sind.

DIE AUTORIN



PROF. DIPL.-ING. ANTJE STOKMAN

studierte Landschaftsarchitektur an der Leibniz Universität Hannover und dem Edinburgh College of Art. Von 2000 bis 2004 war sie als Landschaftsarchitektin in verschiedenen Planungsbüros und Universitäten in Deutschland und China tätig. Für ihre Leistungen im Rahmen der Juniorprofessur für „Gestaltung und Bewirtschaftung von Fließgewässereinzugsgebieten“ an der Leibniz Universität Hannover von 2005 bis 2010 wurde sie mit dem Wissenschaftspreis des Landes Niedersachsen im Jahr 2009 ausgezeichnet. Seit 2010 ist sie Leiterin des Instituts für Landschaftsplanung und Ökologie an der Universität Stuttgart und Büropartnerin des Planungsbüros osp urbane landschaften in Hamburg. 2011 wurde sie mit dem TOPOS Landscape Award ausgezeichnet. Sie ist Mitglied der Fakultät Architektur und Stadtplanung sowie der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, der Architektenkammer Hamburg, des Bund Deutscher Landschaftsarchitekten Baden-Württemberg, des STUDIO URBANE LANDSCHAFTEN Hannover und des Beirats für Raumentwicklung Berlin.

Kontakt

Universität Stuttgart,
Institut für Landschafts-
planung und Ökologie,
Fakultät für Architektur
und Stadtplanung
Keplerstr. 11
D-70174 Stuttgart
Tel. 0711/685-83380, -60113
Fax 0711/685-83381, -60430
E-Mail: antje.stokman@
ilpoe.uni-stuttgart.de
Internet: [http://www.
ilpoe.uni-stuttgart.de](http://www.ilpoe.uni-stuttgart.de)

5. Fazit und Ausblick

Die hier vorgestellten Forschungsansätze des Instituts für Landschaftsplanung und Ökologie zeigen, dass ein neuer Umgang mit dem Wassermanagement den Ausgangspunkt eines die Wasserinfrastruktur integrierenden Systems öffentlicher urbaner Freiräume darstellen kann. Kreative Entwurfsansätze zur Steigerung der Leistungs- und Anpassungsfähigkeit der Wasserinfrastruktur durch eine gezielte Nutzung selbstorganisierter Naturprozesse in Verbindung mit einer attraktiven, nutzungsorientierten Gestaltung bieten kostengünstige Lösungen mit niedrigen Unterhaltungskosten. Die für den Bau neuer Städte und neuer Infrastrukturnetze in rasch wachsenden städtischen Ballungsräumen in aller Welt erforderlichen Investitionen bieten im Rahmen integrierter infrastruktureller Stadtplanungen die Chance, radikal neue räumliche Konfigurationen zu entwickeln und damit neue Formen der Zusammenarbeit zwischen Bauingenieuren, Umweltfachleuten, Stadtplanern, Architekten und Landschaftsarchitekten zu ermöglichen. Dazu bedarf es der Entwicklung von querschnittsorientierten Methoden der Zusammenarbeit, die dazu beiträgt natürliche, infrastrukturelle und gestalterische Anforderungen in räumliche Konzepte der Stadt- und Infrastrukturentwicklung zu integrieren.

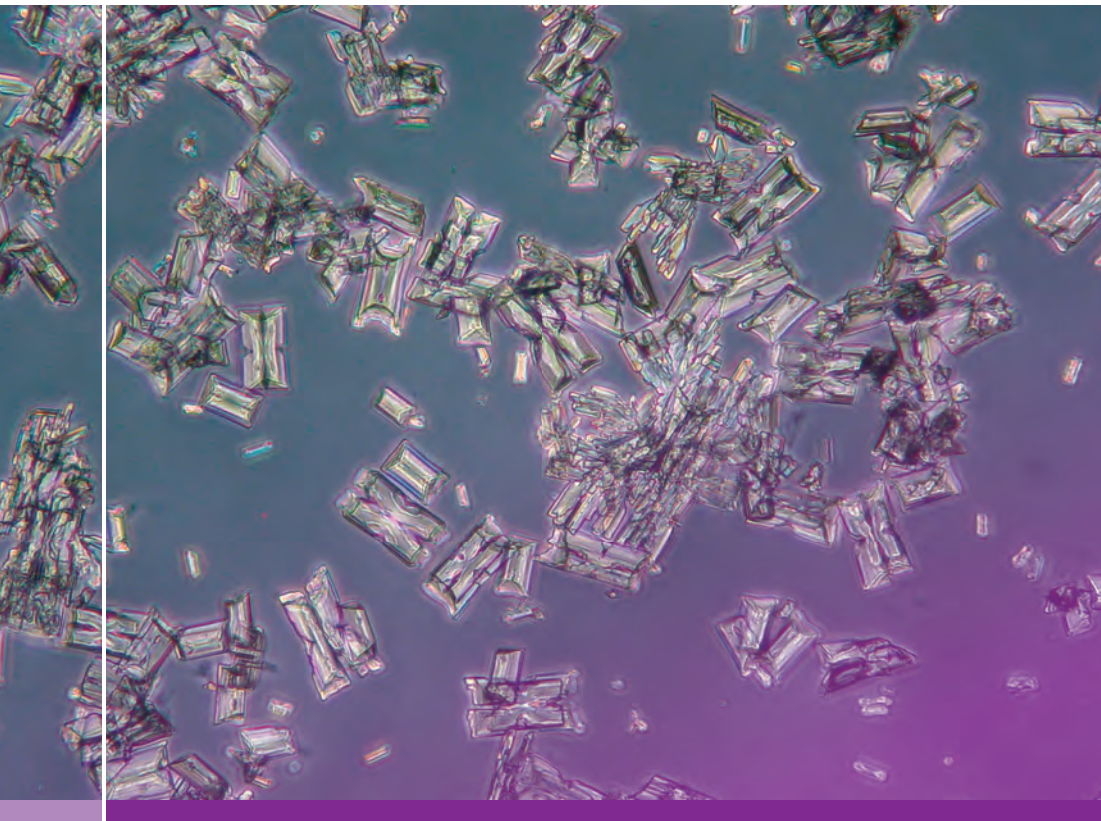
Die Verbindung von gewässerökologischen, siedlungswasserwirtschaftlichen, landschafts- und stadtplanerischen Anforderungen bietet die Chance, hydrologische Infrastrukturen als multifunktionale Wasserlandschaften zu gestalten.

Antje Stokman

Literatur

- Prominski, M.; Stokman, A., Zeller, S., Stimberg, D., Voermanek, H. 2011: Fluss. Räume. Entwerfen. / River. Space. Design. Birkhäuser, Basel.
- Stokman, A.; Wust, C. 2011: Optimierung des Regenwassermanagements. In: Stadt + Grün 4/2011, S. 22–27
- Stokman, A.: Dirty Design – Engaging water infrastructure systems as urban landscapes. In: IBA Hamburg (Hrsg.) 2010: Metropole: Metrozonen. Band 4 der IBA-Schriftenreihe. JOVIS, Berlin, S. 302–309
- Stokman, A. 2011: Begrenzter Rhein – entgrenzter Rhein? Zukunftsstrategien zur Flusslandschaftsgestaltung. In: Regionale (Hrsg.): :zukunft rhein. Dokumentation der Internationalen Rheinkonferenz 2010. S. 24–27
- Stokman, A. 2010: Flusslandschaften der Zukunft attraktiv gestalten / Attractive riverscape designs for the future. In: rheinkolleg (Hrsg.): Das Wasser bedenken| Living with floods. Edition Rheinkolleg, Karlsruhe. S. 126–127
- Stokman, A., Rabe, S., Köhler, B. 2010: Zukunftsbild klimasicheres Wattenmeer. In: Garten + Landschaft 11/2010, S. 32–35
- Stokman, A.; Rabe, S.; von Seggern, H. 2009: Designing Tidal Landscapes. In: TOPOS 68/2009, S. 88–93
- Stokman, A.; Rabe, S.; Langner, S. 2009: Entwurfsstrategien für die Elb-Landschaft bei Hamburg. In: Garten + Landschaft 03/2009, S. 34–37
- Stokman, A. 2008: Water Purificative Landscapes: Constructed Ecologies and Contemporary Urbanism. In: Kuitert, Wybe (Ed.): Transforming with water. Proceedings of the 45th World Congress of the International Federation of Landscape Architects IFLA 2008, Blauwdruk/ Techne Press, Wageningen, S. 51–61
- Stokman, A. 2008: Reinventing Waterscape Urbanism in modern China. In: Shannon, K. et al. (Hrsg.): Water Urbanisms. Amsterdam: SUN Publishers, S. 36–45

Abwasser — Rohstoff statt Reststoff



Magnesium-Ammonium-Phosphat
Kristalle (MAP).

Bis heute wird Abwasser meist noch als „Abfallprodukt“ gesehen, für dessen Entsorgung Energie und Hilfsstoffe eingesetzt werden müssen und bei dessen Abbau Reststoffe wie Klärschlamm entstehen. Erst langsam setzt sich, insbesondere aufgrund zunehmend globaler Anforderungen z.B. bezüglich Klimaschutz und nachhaltigem Umgang mit Ressourcen, die Erkenntnis durch, dass Abwasser als „Rohstoff“ einiges zu bieten hat. Das Bild zeigt aus Klärschlamm gewonnene Magnesium-Ammonium-Phosphat Kristalle (MAP).

1. Einführung

Leben ist ohne Wasser nicht denkbar. Flora und Fauna sind ebenso wie die Menschen auf Wasser in ausreichender Menge und

Qualität angewiesen. Da jedoch beim Gebrauch von Wasser auch Abwasser entsteht, ist die Geschichte der Abwasserentsorgung fast so alt wie die Geschichte der Menschheit selbst. So wurden mit dem

Zusammenschluss von Menschen zu größeren Wohnverbänden und Städten Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsanlagen zwingend erforderlich. Bereits mit der Entwicklung der ersten Dörfer wurden Erdgräben und gepflasterte Rinnen, später auch Versickerungsschächte angelegt, um das anfallende Abwasser schnell und fast vollständig abzuführen. Schon um ca. 960 v.Chr. wurden in Jerusalem Regen- und Schmutzwasser gemeinsam abgeleitet und in Teichanlagen behandelt; der Bodensatz der Teiche wurde als Dünger verwendet, was bereits ein Recycling von Nährstoffen darstellte.

Im Mittelalter ging das Wissen der Antike um Abwasserentsorgung weitgehend verloren, was zu katastrophalen hygienischen Verhältnissen führte und zur Ausbreitung verheerender Seuchen. Erst im 19. Jahrhundert wurde die Abwasserentsorgung wiederentdeckt. Seitdem haben sich unsere Systeme sukzessive bis zum heutigen Stand entwickelt. Zunächst stand die Anforderung im Vordergrund, das Abwasser einschließlich Niederschlagswasser möglichst schnell vom Verbraucher wegzutransportieren und zu entsorgen, um damit durch Abwasser verursachte Krankheiten und Überflutungen zu vermeiden. Später kam der Bedarf hinzu, die Kohlenstoffverbindungen sowie die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor durch biologische und physikalisch-chemische Reinigungsprozesse weitgehend von den Gewässern fernzuhalten. Heute, bei einer hohen Besiedlungsdichte und hoch entwickelter Industrie, ist die öffentliche Abwasserbehandlung ein wichtiger Baustein für ein geordnetes Zusammenleben und eine intakte Umwelt.

Obwohl die Aufgabe der Abwasserentsorgung somit in erster Linie die Ableitung und Reinigung von unerwünschten Reststoffen darstellt, gibt und gab es immer schon einzelne Ansätze, Abwasserinhaltsstoffe auch zu nutzen, z.B. durch die Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft oder etwa die in China praktizierte Bewässerung von Feldern mit Abwasser oder die Sammlung von Fäkalien und der Verkauf als Dünger.

Dennoch sind die heutigen technischen Verfahren nicht in erster Linie auf eine Nutzung der Inhaltsstoffe ausgerichtet, sondern auf die Entsorgung. Weiterhin ist die Nutzung von Abwasser bzw. Fäkalien und Klärschlamm aufgrund der hygienischen

SUMMARY

Water supply and urban drainage are basic duties of the services for the public. The challenge is to guarantee the security of supply (amount, quality), the security of disposal (hygiene and protection against flooding of urban areas), the security of water uses (for potable water, bathing water...) and the water- and groundwater protection against the background of a rising world population with an increasing water demand.

Until today wastewater sewage is still often seen as a „waste-product“, which has to be disposed with energy and additives and by its degradation solid waste such as sewage sludge develops. Due to increasing global demands, such as climate protection and sustainable use of resources, the awareness, that wastewater sewage is a „resource“ which has much to offer, slowly achieves acceptance. The potential for substitution of potable water by wastewater recycling is evident. In addition, the energy content, for example in form of energy-rich organic compounds or thermal energy can be used well-directed and more efficiently than so far. The nutrients contained in the wastewater could replace mineral fertilizers to a substantial portion and provide a contribution to the closing of nutrient cycles.

For this however a reorientation is necessary. Appropriate technologies must be developed and successively integrated in existing plants, to tap the full resource potential of the wastewater optimally. Furthermore, it requires in addition to innovation for conventional systems the development of new resource oriented sanitation systems, which can complement the conventional systems in a meaningful way.



Fäkaliensammlung in Shanghai, 2010.

Belastung und des Schadstoffgehaltes mit erheblichen Risiken verbunden.

Mit der Ableitung und Reinigung von Abwasser werden Ressourcen verbraucht, obwohl das Abwasser selbst eine Ressource darstellt. Zunächst ist, gerade vor dem Hintergrund eines weltweit steigenden

Wasserbedarfs und eines erheblichen Wassermangels in ariden und semiariden Gebieten die Ressource Wasser zu nennen, die durch Wiederverwertung genutzt werden kann.

Kommunales Abwasser enthält darüber hinaus hohe Frachten an Nährstoffen, insbesondere Stickstoff und Phosphor, sowie Energie in Form von energiereichen organischen Verbindungen, Wärme oder hydrostatischer Energie. Somit stellt Abwasser einen vielfältigen Rohstoff dar, dessen Potenzial es zu erschließen gilt.

Im Folgenden soll aufgezeigt werden, wie die Potenziale im Abwasser besser als bisher und zielgerichtet genutzt werden können und welchen Beitrag die Forschung hierzu leisten kann.

2. Das bisherige System – Abwasser als Reststoff

Bisherige „konventionelle“ Systeme basieren auf End-of-Pipe Verfahren. Abwasserteilströme mit unterschiedlicher Abwassercharakteristik werden bereits auf Haushaltsebene vermischt und im Kanalnetz gemeinsam mit ggf. vorbehandeltem Abwasser aus Gewerbe und Industrie und oftmals dem Niederschlagswasser einer zentralen Kläranlage zugeführt. Im Zuge der Abwasserreinigung werden mittels verschiedener mechanischer, chemisch-physikalischer und vor allem biologischer Verfahren die im Abwasser enthaltenen Stoffe möglichst weitgehend entfernt und das so gereinigte Abwasser dem Gewässer zugeführt.

Das System erfüllt die Ziele, das Abwasser möglichst schnell vom Verbraucher wegzutransportieren und zu reinigen, in der Regel zufrieden stellend. Jedoch werden hierzu Ressourcen in Form von Energie und Hilfsstoffen in nicht unerheblichem Maß benötigt. Und trotz aller Reinigungsbemühungen gelangen noch so viele Nährstoffe in das Gewässer, dass dies in sensiblen und stehenden Gewässern zur Eutrophierung führen kann.

Betrachtet man das Gesamtsystem der Wasserver- und Abwasserentsorgung, so weist es vor dem Hintergrund der aktuellen und zukünftigen Herausforderungen systemimmanente Defizite auf, zu deren Behebung es der Entwicklung neuer Konzepte und Technologien bedarf.

Im Folgenden sind einige Probleme unserer bisher etablierten Entsorgungsstrategien aufgelistet:

- Vermischung und Verdünnung von (Ab-)Wässern unterschiedlicher Qualität;
- Verlust von hochwertigen Nährstoffen (Stickstoff, Phosphat, Kalium);
- Schaffung einer Reststoffproblematik: mit Schwermetallen und organischen Schadstoffen belasteter Klärschlamm;
- hoher Verbrauch von hochwertigem Trinkwasser zu Transportzwecken;
- hohe Anfälligkeit der zentralen Systeme gegenüber Katastrophen (z.B. Erdbeben, Überschwemmungen);
- aufwändige Infrastruktur mit hoher Materialintensität (hoher Fixkostenanteil) und geringer Flexibilität;
- geringe Tauglichkeit in anderen Klimazonen, insbesondere ariden und semiariden Gebieten.

Dies ist Anlass genug, um zum Einen unsere bestehenden Systeme mit der Zielsetzung einer nachhaltigen Entwicklung weiter zu verbessern, zum Anderen aber auch neue Technologien und Konzepte insbesondere für Regionen, in denen noch keine über Jahrzehnte gewachsenen Abwasserinfrastrukturen bestehen, zu entwickeln.

3. Abwasser als Rohstoff

3.1 Wasser

Bundesweit haben im Jahr 2004 über 5.000 Wasserversorgungsunternehmen mit eigenen Gewinnungsanlagen knapp 5,4 Milliarden Kubikmeter Wasser gefördert, davon wurden ca. 3,75 Milliarden Kubikmeter an Haushalte und Kleingewerbe abgegeben und knapp eine Milliarde Kubikmeter an gewerbliche und sonstige Abnehmer [1]. Das abgegebene Wasser weist als Trinkwasser eine sehr hohe Qualität auf. Im gleichen Zeitraum wurden der öffentlichen Kanalisation ca. 5,27 Milliarden Kubikmeter Schmutzwasser [1] zugeführt, d.h. dass nach Nutzung erheblich verschmutztes „Trinkwasser“ der Kanalisation zugeleitet wird.

Der Hauptanteil des über die öffentliche Wasserversorgung abgegebenen Trinkwassers gelangt in die Haushalte. (02) zeigt, dass dort jedoch nur ein extrem geringer Prozentsatz tatsächlich für Trinkwasserzwecke eingesetzt wird (ca. vier Prozent), während über ein Viertel des qualitativ hochwertigen Wassers lediglich zum Abtransport von Fäkalien genutzt wird. Der größte Anteil des Trinkwassers wird für Zwecke benötigt, die eine Qualität benöti-

gen würden, die zwischen den sehr hohen Ansprüchen an Trinkwasser und den relativ geringen an Toilettenspülwasser liegt. Allein aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass rein rechnerisch ein erheblicher Teil des Trinkwassers durch Wasser minderer Qualität substituiert werden könnte.

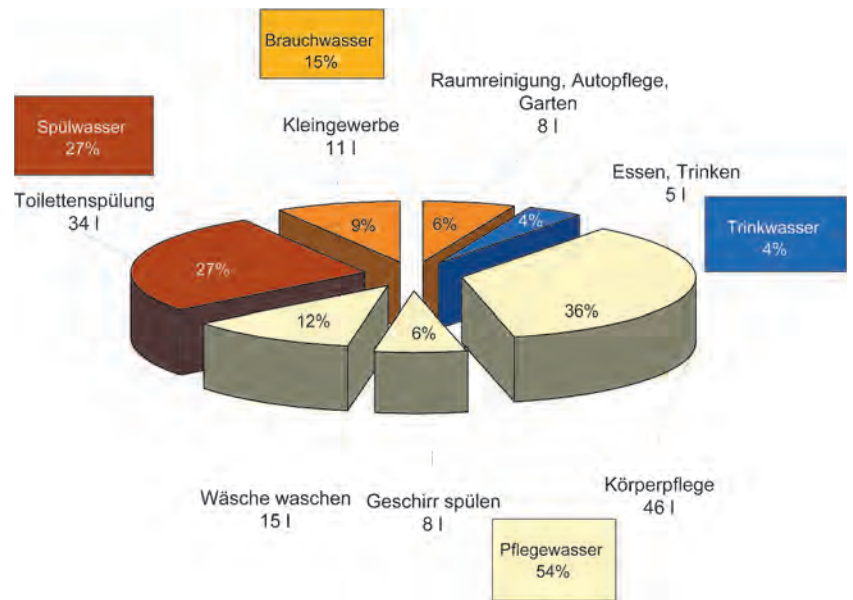
Aufgrund der immer noch steigenden Weltbevölkerung wird auch der Bedarf an Wasser für Industrie und Haushalte ebenso steigen wie der für Bewässerungswasser. Gleichzeitig kann der Klimawandel in zahlreichen Regionen zu einer deutlichen Verringerung des Wasserangebotes führen. Dem Wasserrecycling wird damit zukünftig eine wesentliche Bedeutung zukommen.

Eine grundlegende und in vielen Ländern übliche Form der Wasserwiederverwendung ist die Nutzung von Abwasser für Bewässerungszwecke. Häufig wird jedoch nahezu unbehandeltes Abwasser genutzt (Beispiel China), was zu hygienischen Belastungen des Ernteguts, zu einem hohen Infektionsrisiko für die Bevölkerung und zu einer erheblichen Belastung der Umwelt führt. Daher gilt es, das Abwasser soweit zu reinigen, dass es die Anforderungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) an Bewässerungswasser und ggf. vorhandene länderspezifische Grenzwerte einhält.

Ein hoher Bedarf an Bewässerungswasser besteht auch in Tourismusgebieten, z.B. für die Bewässerung von Golfplätzen oder Grünanlagen. Dieser ist meistens während der Sommermonate mit minimaler Ressourcenerneuerung (wenig Niederschläge) am größten, wodurch die Auswirkungen auf die Umwelt erheblich sein können. Die Wiederverwendung des Abwassers für Bewässerung bietet eine Möglichkeit diese Auswirkungen zu mildern. Die großen Hotels bzw. Ferienanlagen liegen meistens weit entfernt von zentralen Infrastrukturen, so dass dezentrale Verfahren auch aus Kostengründen bedeutsam sind.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes wurde in einer türkischen Hotelanlage u.a. untersucht, welcher Anteil an Trinkwasser und Grundwasser durch gereinigtes Abwasser ersetzt werden kann. Neben den theoretischen Betrachtungen auf Basis der Wasserverbrauchszahlen wurde eine halbtechnische Versuchsanlage betrieben, um Abwasser so zu reinigen, dass es für die Bewässerung der Grünanlagen optimal geeignet ist.

Es hat sich gezeigt, dass insbesondere in Zeiten der Spitzenbelegung ca. 50 Prozent des eingesetzten Trinkwassers als Abwasser anfallen und so ein wesentlicher Anteil des erforderlichen Bewässerungswassers durch mittels Membrantechnologie gerei-



ntes Abwasser substituiert werden kann. Die WHO Standards bezüglich der hygienischen Qualität wurden sicher eingehalten. Verglichen mit der Frischwasserbewässerung (Trinkwasser, Grundwasser) sind die Pflanzenerträge bei Bewässerung mit behandeltem Abwasser höher, da auch Pflanzennährstoffe, im speziellen Stickstoff und Phosphor für die Grünanlagen genutzt werden konnten.

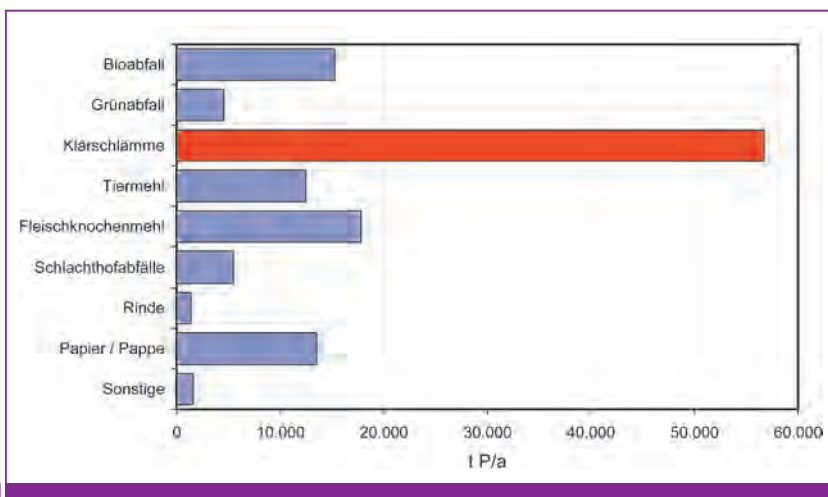
Eine Umfrage unter den Hotelgästen ergab, dass eine hohe Akzeptanz für die Wiederverwendung des gereinigten Abwassers vorhanden ist [6].

3.2 Nährstoffe

Die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor werden derzeit aus Gewässerschutzgründen gezielt in Kläranlagen eliminiert; dies geschieht aber zum Teil, etwa bei der Nitrifikation, mit hohem Energieaufwand. Andererseits wird z.B. Luftstickstoff ebenfalls unter hohem Energieaufwand bei der Düngemittelherstellung in pflanzenverfügbare Form überführt.

Der Bedarf an Phosphor, der vor allem in Dünge- (ca. 80 Prozent) und in Waschmitteln (ca. 12 Prozent) benötigt wird, stammt derzeit fast ausschließlich aus geo-

Durchschnittlicher Wasserverbrauch pro Einwohner und Tag nach Qualitätsstufen.



03

(03) Phosphorpotential der organischen Siedlungsabfälle in Deutschland [2].

(04) Halbtechnische Versuchsanlage zur Phosphorrückgewinnung; MAP-Fällungsreaktor (im Vordergrund) und Sedimentationsbehälter (im Hintergrund) [4].

genen Lagerstätten. Dies führt zu einer Reduzierung der abbauwürdigen Vorkommen und widerspricht auch aufgrund der großen anfallenden Abraumengen dem Gebot der Nachhaltigkeit.

In der Landwirtschaft wird seit langem neben Kunstdüngern auch Klärschlamm verwendet. Aufgrund der Diskussionen um die Schadstoffbelastung von kommunalen Klärschlämmen zeichnet sich ab, dass aus Vorsorgegründen Klärschlamm nach einer Übergangszeit nur noch in geringen Mengen landwirtschaftlich verwertet wird. In Baden-Württemberg werden bereits heute über 90 Prozent der Klärschlämme thermisch entsorgt und somit der Nährstoffkreislauf unterbrochen. Im Sinne einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung sollte daher der im Abwasser bzw. Klärschlamm enthaltene Phosphor gezielt wiedergewonnen und in eine pflanzenverfügbare, aber schadstoffarme Form überführt und in der Landwirtschaft genutzt werden. So können Nährstoffkreisläufe wieder geschlossen und von Schadstoffkreisläufen entkoppelt werden.

Abwasser birgt ein erhebliches Rohstoffpotenzial für Phosphor. Berechnungen von Fricke und Bidlingmaier [2] zeigen, dass Klärschlämme das größte Phosphorpotenzial der betrachteten Reststoffe aufweisen **(03)**. Über ein Drittel der in Deutschland verwendeten Phosphatdünger könnten theoretisch durch Phosphor aus Klärschlamm ersetzt werden.

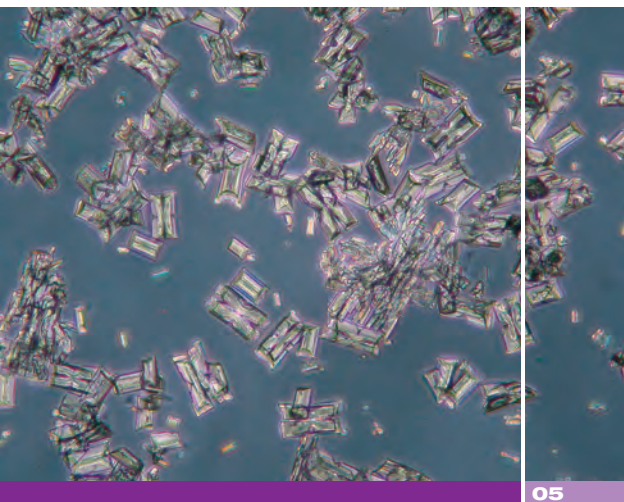
Am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) der Universität Stuttgart wird seit Jahren an Verfahren zur Phosphorrückgewinnung geforscht. Dazu wurde bereits in den Jahren 2003 und 2004 das sog. „Stuttgarter



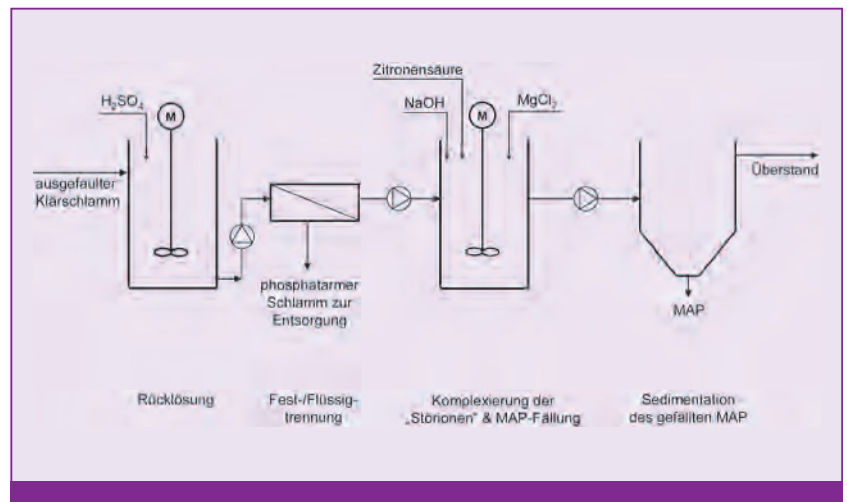
04

Verfahren“ zur Phosphorrückgewinnung aus ausgefauten Schlämmen als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) entwickelt und im Labormaßstab erprobt [3]. Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde anschließend eine halbtechnische Versuchsanlage betrieben, um Abhängigkeiten der Prozesse vom Maßstab zu erfassen (upscaling), die Verfahrensschritte bezüglich Phosphorausbeute und Chemikalienverbrauch zu optimieren und Erkenntnisse über die Prozessstabilität und betriebliche Aspekte zu gewinnen. Weiterhin war die Produktion größerer MAP-Mengen zur Beurteilung des gewonnenen Endproduktes ein wesentlicher Aspekt der halbtechnischen Versuche.

Magnesium-Ammonium-Phosphat ist eine kristalline Substanz, die nach Trocknung gut zur Lagerung und einer Ausbringung auf Feldern geeignet ist. Versuche der Universitäten Göttingen und Bonn haben gezeigt, dass sich das aus dem Stuttgarter Verfahren produzierte MAP hinsichtlich seiner Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung wie wasserlösliches Triplesuperphosphat (Mineraldünger) verhält [4]. Das Stuttgarter Verfahren beruht darauf, den im Klärschlamm enthaltenen Phosphor zunächst durch Zugabe von Schwefelsäure wieder in Lösung zu bringen und so von den Feststoffen abzutrennen. Um das Endprodukt MAP zu erhalten, muss anschließend der pH-Wert angehoben und Magnesium zudosiert werden; Stickstoff ist bereits in ausreichender Menge im Überstand des Klärschlammes vorhanden und kann so ebenfalls anteilig recycelt werden. Damit tatsächlich überwiegend MAP und nicht wieder schlecht pflanzenverfügbares Eisenphosphat ausfällt, wird



05



06

der Lösung vor Anhebung des pH-Wertes Zitronensäure zugegeben, welche die Eisenionen in Lösung hält. Dieser Prozessschritt stellt eine Besonderheit des Stuttgarter Verfahrens dar und ermöglicht eine vergleichsweise hohe Ausbeute an MAP. Umfassende Untersuchungen im halbtechnischen Maßstab [4] haben belegt, dass mit dem Stuttgarter Verfahren bislang im Mittel ca. 50 Prozent des im Klärschlamm gebundenen Phosphors in die Düngersubstanz MAP überführt werden können. Einzelversuche haben ein noch höheres Recyclingpotenzial ergeben, so dass von einem erheblichen Optimierungspotenzial ausgegangen werden kann. Dies wird derzeit in weiteren Versuchen näher untersucht. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Gehalte an Schadstoffen (Schwermetallen) weit unter den Werten im Klärschlamm liegen. Sie bleiben dabei unter den Werten der Düngemittelverordnung und entsprechen in der Größenordnung dem konventionellen Mineraldünger.

Nach Abschluss der erfolgreichen Versuche im halbtechnischen Maßstab wird das Stuttgarter Verfahren zur Phosphorrückgewinnung derzeit unter wissenschaftlicher Betreuung des Lehrstuhls und mit finanzieller Unterstützung des Umweltministeriums Baden-Württemberg in der Großtechnik auf der Kläranlage Offenburg umgesetzt. Hier gilt es neben einer weiteren verfahrenstechnischen Optimierung und einem upscaling weitere Fragen z.B. zur Einbindung des Schrittes Phosphorrückgewinnung in den gesamten Abwasserreinigungsprozess zu klären.

3.3 Energie

Die Forschungsarbeiten und praktischen Fragestellungen in der Siedlungswasserwirtschaft haben sich lange Zeit überwiegend auf die Verbesserung der Reinigungsleistung von Kläranlagen konzentriert, so dass heute in Deutschland diesbezüglich ein hoher Standard erreicht ist. Hierzu ist jedoch ein erheblicher Bedarf an Energie in Form von Strom und Wärme erforderlich.

Die Kläranlagen in Deutschland verbrauchen immerhin ca. 4.400 Gigawattstunden (GWh), was der Stromerzeugung eines modernen Kohlekraftwerkes entspricht. Auch wenn damit der Energieverbrauch kommunaler Kläranlagen nur bei weniger als einem Prozent des Stromverbrauchs in Deutschland liegt, gehören Kläranlagen mit zu den größten kommunalen Stromverbrauchern, so dass eine Reduzierung des Energieverbrauchs, aber auch eine ver-

(05) Mit dem „Stuttgarter Verfahren“ können aus Klärschlamm Magnesium-Ammonium-Phosphat Kristalle (MAP) gewonnen werden.

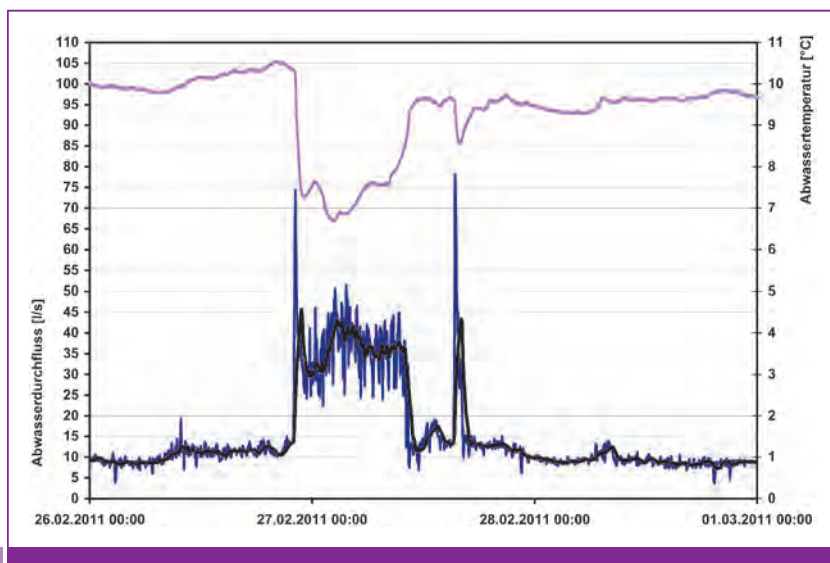
(06) Verfahrensschema des Stuttgarter Verfahrens [4].

(T.01) Vergleich der Schwermetallgehalte im MAP [4] mit mineralischen Düngern [5] und Düngemittelverordnung.

| | Pb | Cd | Cr _{ges} | Cu | Ni | Hg | Zn |
|-----------------------------------|----------|----------------|-------------------|------|-----|------|------|
| | mg/kg TS | | | | | | |
| MAP aus P-Rückgewinnung | 12 | 0,8 | 15 | 68 | 2,2 | 0,05 | 260 |
| Grenzwerte DüMV | 150 | - ¹ | - ² | 70 | 80 | 1,0 | 1000 |
| Durchschn. N/P-Dünger 20/20/0 [5] | 5,5 | 9,2 | 91,4 | 21,5 | 18 | 0,02 | 151 |

¹ 50 mg/kg P₂O₅
² kein Grenzwert, Kennzeichnung ab 300 mg/kg TS

T.01



07

Einfluss eines Regenereignisses auf die Abwassertemperatur im Kanalnetz.

besserte Nutzung der im Abwassersystem vorhandenen Energiepotenziale bei der Abwasserentsorgung den kommunalen CO₂-Ausstoß wirksam verringern kann.

Die Wärme des Abwasser wird jedoch bislang noch kaum genutzt. Um Abwärme kosteneffizient nutzen zu können, muss ein ausreichender Trockenwetterabfluss, also an Abwässern ohne Regenwasser, gegeben sein und ein Abnehmer mit hohem Leistungsbedarf für statische Wärmeabgabe (z.B. Heizungen) nahe des Abwasserkanals liegen. Da Kläranlagen oft außerhalb dicht bebauter Bereiche liegen, ist eine Abwärmenutzung bereits im Kanalnetz mit Nähe zum Wärmeverbraucher meist vorteilhaft.

Inzwischen gibt es insbesondere in der Schweiz einige realisierte Projekte zur Nutzung der Abwärme aus dem Abwasser. Auch existiert hierzu eine von der ETH Zürich entwickelte Software (TEMPEST), für die bislang jedoch keine ausreichende Datenbasis zur Kalibrierung vorliegt. Offene Fragen bestehen insbesondere bezüglich des Temperaturverhaltens im Kanalnetz auf dem Fließweg zur Kläranlage. So ist bislang kaum bekannt, ob der regelmäßig erfasste jährliche Temperaturverlauf im Zulauf der Kläranlage auf das gesamte Kanalnetz übertragbar ist. Messungen im Kanalnetz sind sehr aufwändig und können daher nicht in jedem einzelnen Planungsfall durchgeführt werden. Andererseits ist die Kenntnis über Temperaturentwicklung und Schwankungen im Kanalnetz bedeutsam, um Anlagen wirtschaftlich auszulegen. Daher wird derzeit am Lehrstuhl im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg ein Forschungsprojekt durchgeführt, um über Messungen an ausgewählten und möglichst repräsentativen Kanalabschnitten die räumliche und zeitliche Varianz der Temperatur zu ermitteln und hieraus grundlegende Zusammenhänge zwischen der Temperatur und verschiedenen Einflussfaktoren abzuleiten. Insbesondere gilt es, den Einfluss von Siedlungsdichte- und Struktur, der Außenlufttemperatur, der Bodentemperatur, langer Fließstrecken durch freies Gelände und den Einfluss von industriellen Einleitungen, Fremdwasser und Niederschlagsereignissen auf die Abwassertemperatur zu erfassen.

(07) zeigt exemplarisch die Bedeutung von Niederschlagsereignissen in der Mischkanalisation. Insbesondere im Winter kann die Temperatur auch in größeren Sammlersystemen innerhalb sehr kurzer Zeit um mehrere Grad Celsius absinken. Da nach einem starken Regenereignis die Re-



08

Brennstoffzelle auf der Kläranlage Stuttgart-Möhringen.

Kläranlagen sind nicht nur Energieverbraucher, sondern können, insbesondere durch die Nutzung des Energiegehaltes aus den organischen Abwasserinhaltsstoffen, auch Energie liefern. Betrachtet man das gesamte System der Abwasserentsorgung, so kommen die Potenziale der Abwasserwärme und der hydrostatischen Energie hinzu. Je nach Randbedingungen kann durch Nutzung dieser Energien ein erheblicher Teil des Energiebedarfs in einer Kläranlage, bis hin zur Energieautarkie, abdeckt werden.

genüberlaufbecken über ein bis zwei Tage entleert werden, kann das niedrige Temperaturniveau entsprechend lange anhalten. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die Effizienz des Wärmetauschers und damit auf die erzielbare Energieausbeute und sollte bereits im Planungsprozess berücksichtigt werden.

Während die Abwärmenutzung im Kanalnetz eine recht neue Entwicklung ist, wird das Energiepotenzial aus Klärschlamm bereits seit Jahrzehnten auf größeren Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung genutzt. Das energiereiche Faulgas liefert einen wesentlichen Beitrag sowohl zur Deckung des Wärmebedarfs als auch des Strombedarfs einer Kläranlage. Dennoch gibt es hier wesentliche Ansatzpunkte zur Erhöhung der Eigenproduktion durch die Steigerung der Faulgasproduktion mittels betrieblicher Optimierungsmaßnahmen und einer Verbesserung der Energieeffizienz bei der Verwertung des Faulgases.

Neben der Erhöhung der Faulgasmenge kann die Faulgasverwertung durch Kraft/Wärmekopplungsanlagen noch erheblich gesteigert werden. Ein weiterer Ansatzpunkt zur Energieoptimierung ist die Erhöhung des Wirkungsgrades bei der Verstromung von Faulgas. Neben einer Verbesserung der Blockheizkraftwerkstechnik (BHKW) bietet sich hierbei der Einsatz von neuen Techniken der Energieumwandlung an, z.B. mittels Brennstoffzellen. Brennstoffzellen wandeln die im Gas enthaltene chemische Energie direkt in Strom und Wärme um und können z.T. deutlich höhere elektrische Wirkungsgrade erreichen als BHKWs. Potenzialabschätzungen von Keicher et al. [6] für Baden-Württemberg zeigen, dass durch den Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen theoretisch ein Gesamtpotenzial von ca. 250 Gigawattstunden elektrischer Energie (GWhel) erzielbar ist, was einer Verdoppelung der derzeitig produzierten ca. 127 GWhel bedeutet. Um dies in der Praxis zu überprüfen wurde auf der Kläranlage Stuttgart-Möhringen eine Hochtemperaturbrennstoffzelle implementiert.

Betriebsergebnisse zeigen, dass ein elektrischer Wirkungsgrad von deutlich über 40 Prozent selbst im Teillastbereich erreicht werden kann.

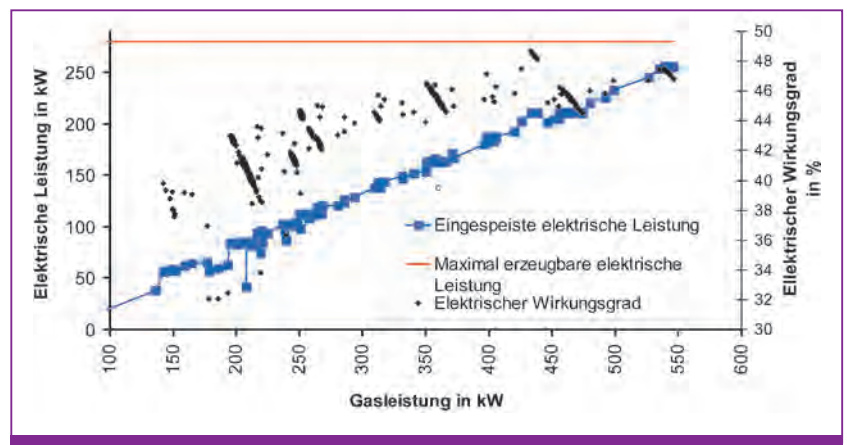
Zu berücksichtigen ist jedoch, dass Strom für den Betrieb der Brennstoffzelle, der Lüftung und der Gasaufbereitung erforder-

ZUSAMMENFASSUNG

Wasserversorgung und Siedlungsentwässerung sind wesentliche Aufgaben der Daseinsvorsorge. Dabei gilt es vor dem Hintergrund einer steigenden Weltbevölkerung mit zunehmendem Wasserbedarf die Versorgungssicherheit (Menge, Qualität), die Entsorgungssicherheit (Hygiene und Überflutungsschutz in Siedlungen) und die Nutzungssicherung der Gewässer (Trinkwasser, Baden ...) sowie den Schutz der Gewässer und des Grundwassers zu gewährleisten.

Das Potenzial zur Substitution von Trinkwasser durch Abwasserrecycling ist offensichtlich. Aber auch der Energiegehalt, z.B. in Form energiereicher organischer Verbindungen oder Wärme kann gezielt und effizienter als bisher genutzt werden. Die im Abwasser enthaltenen Nährstoffe könnten Mineraldünger zu einem wesentlichen Anteil ersetzen und damit einen Beitrag zur Schließung von Nährstoffkreisläufen liefern.

Hierzu ist jedoch ein Umdenken erforderlich. Entsprechende Technologien müssen entwickelt und sukzessive in bestehende Anlagen integriert werden, um das Rohstoffpotenzial des Abwassers optimal zu nutzen. Darüber hinaus bedarf es neben den Innovationen für konventionelle Systeme auch der Entwicklung neuartiger Sanitärsysteme, die die bestehenden Systeme in sinnvoller Weise ergänzen können.



Elektrische Leistung und Wirkungsgrad der Brennstoffzelle auf der Kläranlage Stuttgart-Möhringen.

lich ist (interner Verbrauch), so dass der Netto-Energiegewinn geringer ist. Hier bedarf es weiterer Ansätze um diesen internen Verbrauch zu minimieren.

Die Betriebserfahrungen mit der Brennstoffzelle in Möhringen haben aber auch gezeigt, dass die derzeitigen Hochtemperaturbrennstoffzellensysteme noch nicht in der Lage sind, mit Biogas dauerhaft sicher betrieben zu werden. Eine entsprechende Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie oder der Einsatz anderer Brennstoffzellentypen, z.B. mit Wasserstoff als Inputgas, ist notwendig.

Daher werden derzeit am Lehrstuhl grundlagenorientierte Untersuchungen durchgeführt, welche Abwasserströme unter welchen Randbedingungen für eine Produktion von Biowasserstoff geeignet sind, um auch hier die im Abwasser enthaltenen Ressourcen zielgerichtet zu nutzen. Kläranlagen stellen für die anaerobe Fermentation von Wasserstoff aus Biomasse

einen idealen Standort hierfür dar, da sie zum Großteil schon über die erforderliche Anlagentechnik verfügen und die für den Prozess erforderliche Biomasse (Klärschlamm) das ganze Jahr über in relativ konstanten Mengen anfällt. Durch Veränderung der Prozessbedingungen gegenüber einer Faulung mit dem Endprodukt Methan kann Wasserstoff produziert werden, um diesen in Brennstoffzellen, zum Betanken von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen etc. zu nutzen. Damit könnte Energie aus Eigenproduktion auch für den Fuhrpark eines Abwasserentorgers zur Verfügung gestellt werden und somit einen Beitrag zur Eigenversorgung der erforderlichen „Mobilitätsenergie“ liefern, der in den meisten energetischen Betrachtungen unserer heutigen Systeme bislang nicht berücksichtigt wird.

4. Was sind neuartige Sanitärsysteme?

Die bisher genannten Ansätze für eine ressourceneffiziente Abwasserwirtschaft basieren auf der Integration energetischer Aspekte und weiterer Aufbereitungsschritte zur Wasserwiederverwendung bzw.

Nährstoffrückgewinnung in konventionelle bestehende Abwasserentsorgungsinfrastrukturen. In vielen Ländern existieren diese Infrastrukturen jedoch nicht, so dass über völlig neue Ansätze zur Nutzung von Abwasser als Rohstoff nachgedacht werden kann.

Fast alle im kommunalen Abwasser enthaltenen Nährstoffe (Stickstoff und Phosphor) sind im so genannten Schwarzwasser (Sanitärabwasser aus Toiletten und Urinalen) zu finden, Stickstoff zu fast 90 Prozent im Urin. Im Schwarzwasser ist auch über die Hälfte der organischen Kohlenstoffverbindungen enthalten; das Konzentrationsniveau ist dabei im Vergleich zum Schmutzwasser hoch.

Eine Trennung der Stoffströme z.B. Urin, Fäkalien, Grauwasser (z.B. aus Duschen, Waschmaschinenabläufen) würde es ermöglichen, die hochkonzentrierten Teilströme zur Energiegewinnung und für ein Nährstoffrecycling deutlich effizienter als bisher zu nutzen und das stofflich deutlich geringer belastete Grauwasser zur Wasserwiederverwendung aufzubereiten. Eine solchermaßen enge Verzahnung von Wasserversorgung und Abwasserentsorgung auf Haushaltsebene kann den kommunalen

len Wasserbedarf erheblich senken und ist besonders in sehr trockenen, ariden Gebieten von großer Bedeutung.

Es ist daher zu überlegen, an welchen Stellen eine frühzeitige Trennung und ggf. getrennte Behandlung bzw. Nutzung von Abwasserteilströmen sinnvoll ist und wie diese ggf. in bestehende Infrastrukturen integriert werden kann.

5. Fazit und Ausblick

Unter Beachtung der weltweiten Situation müssen verstärkt die Ressourcen im Abwasser genutzt und nachhaltige Systeme zur Schließung von Wasser- und Stoffkreisläufen entwickelt und erprobt werden. Bei bestehenden Infrastrukturen ist eine schrittweise Entwicklung und Integration neuer Technologien sinnvoll, wobei frühzeitig die Auswirkungen auf die bestehenden Systeme der Ver- und Entsorgung beachtet und untersucht werden sollten.

Um die globalen Herausforderungen anzugehen, sollten die Erfahrungen und das bestehende Know-how in Deutschland genutzt werden, um interdisziplinär und über Fachbereichsgrenzen hinweg die Entwicklung neuartiger Sanitärsysteme entscheidend mit voran zu treiben.

Um nachhaltige und ressourcenorientierte Ansätze zur Bewältigung der Herausforderungen deutschland- und weltweit zu entwickeln, ist neben entsprechenden interdisziplinären Forschungsaktivitäten insbesondere der Wille, über die bestehenden Systeme hinaus zu denken, erforderlich, sowie die Vermittlung der komplexen Zusammenhänge in Lehre und Weiterbildung.

• Heidrun Steinmetz

Literatur

- 1 Statistisches Bundesamt (2006): *Fachserie 19 Reihe 2.1*
- 2 Fricke und Bidlingmaier (2003): *Phosphorpotentiale qualitativ hochwertiger organischer Siedlungsabfälle und deren Nutzung, Tagungsband zur Phosphortagung des UBA und des ISA am 06./07.02.2003 in Berlin, S. 9/1–9/15, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft Aachen, 2003*
- 3 Weideler, A., Maier, W., Krampe, J. (2007): *Phosphorrückgewinnung als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) mittels saurer Rücklösung aus Faulschlamm, GWF Wasser/Abwasser 148 (2007) Nr. 4, S. 269–272*
- 4 (Weideler, A. 2010): *Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm als Magnesium-*

DIE AUTORIN

PROF. DR.-ING. HEIDRUN STEINMETZ

hat nach dem Studium der Biologie an der Universität Kaiserslautern sechs Jahre als Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft an der Universität Kaiserslautern gearbeitet und dort 1996 zum Dr.-Ing. promoviert. Nach sechsjähriger Berufspraxis in leitenden Positionen im Anlagenbau (Frankenthal) und in einem Ingenieurbüro (Saarbrücken) kehrte sie als Geschäftsführerin des Zentrums für Innovative Abwassertechnologien an die Universität Kaiserslautern zurück. Seit 2007 leitet Sie den Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Wasserrecycling an der Universität Stuttgart.



Kontakt

Universität Stuttgart,
Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft
Lehrstuhl Siedlungswasserwirtschaft und Wasserrecycling
Bandtäle 2
70569 Stuttgart
Tel. 0711/685-63723
Fax 0711/685-63729
E-Mail: heidrun.steinmetz@iswa.uni-stuttgart.de
Internet: www.iswa.uni-stuttgart.de

Ammonium-Phosphat (MAP). Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Band 202, Kommissionsverlag Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München. ISBN 978-3-8356-3206-6

- 5 UBA (2001): *Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden, UBA-Texte 59/01, ISSN 0722-186X, Berlin*
- 6 Keicher, K., Krampe, J., Rott, U., Ohl, M., Blesl, M., Fahl, U. (2004): *Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen – Potenzialabschätzung für Baden-Württemberg. <http://www.bwplus.fzk.de/berichte/SBer/BW122006Sber.pdf>*

Sicherheitsforschung für Hydrosysteme

Wie sichern wir uns ausreichend sauberes Trinkwasser?



01

Trinkwasserschutz und andere Landnutzungsarten (Landwirtschaft, Verkehr, Industrie, etc.) konkurrieren oft miteinander.

Im Schnitt verbraucht jeder Bundesbürger ca. 122 Liter Leitungswasser pro Tag. 80 Prozent davon werden aus Grundwasser gewonnen. Mit zunehmender Industrialisierung, zunehmendem Verkehr und immer mehr neuen Pestiziden, Medikamentenrückständen sowie Alltagschemikalien stellt sich die Frage nach der Sauberkeit und Sicherheit unserer Trinkwasserversorgung. Vor diesem Hintergrund stellte die WHO (World Health Organization) im Jahre 2004 weltweit erhebliche Gesundheitsrisiken auf Grund mangelhafter Wasserqualität fest – sowohl in Entwicklungs- als auch in Industrieländern. Sie empfiehlt daher, gesetzlich bindende Sicherheitskonzepte für Trinkwasser in nationale Gesetzgebungen aufzunehmen. Konkret bedeutet dies zum Beispiel, dass Wasserversorger alle Gefahren im Schutzgebiet kennen, diese beherrschen und kontrollieren müssen. Am 28. Juli 2010 verabschiedete die Generalversammlung der Vereinten Nationen sogar eine neue Resolution, in welcher sie sicheres und sauberes Trinkwasser zum Menschenrecht proklamiert: Der Zugang zu sauberem Wasser sei „für den umfassenden Genuss des Lebens und aller anderen Menschenrechte zwingend notwendig“.

Im Schnitt verbraucht jeder Bundesbürger ca. 122 Liter Leitungswasser pro Tag. 80 Prozent davon werden aus Grundwasser gewonnen. Mit zunehmender Industrialisierung, zunehmendem Verkehr und immer mehr neuen Pestiziden, Medikamentenrückständen sowie Alltagschemikalien stellt sich die Frage nach der Sauberkeit und Sicherheit unserer Trinkwasserversorgung. Vor diesem Hintergrund stellte die WHO (World Health Organization) im Jahre 2004 weltweit erhebliche Gesundheitsrisiken auf Grund mangelhafter Wasserqualität fest – sowohl in Entwicklungs- als auch in Industrieländern. Sie empfiehlt daher, gesetzlich bindende Sicherheitskonzepte für Trinkwasser in nationale Gesetzgebungen aufzunehmen. Konkret bedeutet dies zum Beispiel, dass Wasserversorger alle Gefahren im Schutzgebiet kennen, diese beherrschen und kontrollieren müssen. Am 28. Juli 2010 verabschiedete die Generalversammlung der Vereinten Nationen sogar eine neue Resolution, in welcher sie sicheres und sauberes Trinkwasser zum Menschenrecht proklamiert: Der Zugang zu sauberem Wasser sei „für den umfassenden Genuss des Lebens und aller anderen Menschenrechte zwingend notwendig“.

1. Einleitung

Diese Situation ist in (02) am Beispiel Baden-Württembergs veranschaulicht. Mit allein 2.124 Altlasten und 14.472 altlastenverdächtigen Flächen gleicht die Karte eher einer Kraterlandschaft als einer idyllisch anmutenden Naturlandschaft. Dabei sind diffuse Quellen aus der Landwirtschaft oder permanente Gefahrenpotentiale wie Gefahrguttransporte in dieser Karte noch nicht enthalten.

Nicht nur bei der Wasserversorgung, sondern in vielen Bereichen wird unsere Gesellschaft in Zukunft zunehmend auf Simulationssysteme zurückgreifen müssen. Sie tut dies im Bestreben, ihre Einflüsse auf die Umwelt besser vorherzusagen und sie, darauf aufbauend, so gering wie möglich zu halten. Im Vordergrund stehen dabei das Vorsorgeprinzip und stärkere Nachhaltigkeitsbegriffe, die mehr als je zuvor Extremereignisse und Vorhersageunsicherheiten in der Umwelt berücksichtigen. Umweltsysteme sind jedoch ein komplexes und dynamisches Zusammenspiel zwischen vielen physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen und menschlichen Eingriffen. Materialeigenschaften von Umweltsystemen ändern sich von Punkt zu Punkt. Umweltdaten sind, besonders im Untergrund, schwer zugänglich und teuer zu erheben. Daher sind Umweltsimulationen unsicher und nur mit besonderer Vorsicht in transparenten und abgesicherten Entscheidungsverfahren verwendbar.

Die treibende Vision der Jungwissenschaftlergruppe „stochastische Modellierung von Hydrosystemen“ an der Universität Stuttgart ist, die Kluft zu überbrücken zwischen schwer quantifizierbaren Unsicherheiten einerseits und andererseits den Bedürfnissen nach robuster Optimierung und Regelung, für ein aktives Risikomanagement und zur Unterstützung von Entscheidungsfindungen unter Unsicherheit. Mit ihrer Forschung arbeitet sie darauf hin, Risiken bestehender oder geplanter anthropogener Einwirkungen auf die Umwelt probabilistisch abgesichert zu quantifizieren. Dies ermöglicht neue, rationale Strategien zum Umgang mit Risiken und zur Entscheidungsfindung. Dabei spielen entscheidungstheoretische Ansätze eine grundlegende Rolle, ebenso wie der offene Umgang mit Modellunsicherheiten, und die Bewältigung von enormen

SUMMARY

In 2010, the UN declared supply with clean and safe drinking water to be a new human right. The World Health organization (WHO) finds that poor water quality continues to pose severe risks for human health, both in developing and industrialized countries. They recommend including drinking water safety plans into national legislation. Adequate safety concepts have to unite many competing aspects, including economical demands and competing land use versus sustainable management, robustness against climatic and societal change and active risk management.

The independent young research group „stochastic modelling of hydrosystems“ at the Institute for Modelling Hydraulic and Environmental Systems advances tools to simulate terrestrial hydrosystems, with a specific focus on the uncertainty of model predictions. They develop methods for optimal monitoring, for optimization, robust design and control under uncertainty and for risk assessment, along with decision-theoretical approaches to achieve optimal risk management. Research activities range from fundamental, method-oriented research up to applied projects, collaborating with local water suppliers. The most outstanding feature is to consider all possible sources of uncertainty, from unknown pattern types within soils, uncertain geological boundaries, uncertain model forcing and measurement errors, up to model-structural uncertainties due to ambiguous conceptualization of natural processes. Model reduction techniques help to keep the resulting computational costs at acceptable levels.

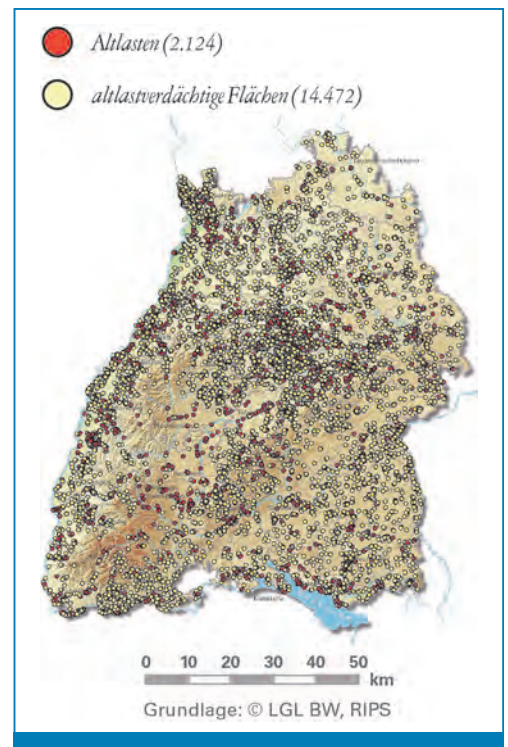
In total, their research output aims at predicting the environment within reliable error bounds, and transparent handling of uncertainty in all subsequent application tasks, ranging from simple optimization and control up to active risk management strategies.

Rechenzeiten, wenn Unsicherheitsbetrachtungen auf Optimierungsaufgaben stoßen.

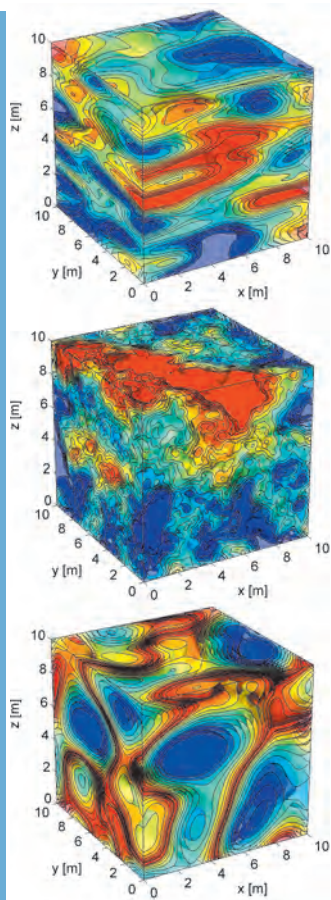
2. Belastbare Ergebnisse trotz unsicherer Modelle

Da Modelle die Realität eines Umweltsystems nur unvollständig abbilden können, müssen die Unsicherheiten ihrer Vorhersagen offen zugegeben, beziffert und in Folge berücksichtigt werden. Unsicherheiten werden vor allem durch vereinfachte konzeptionelle Modellvorstellungen, durch numerische Approximationen, durch Unkenntnis über die geologischen Schichtungen und Fließwege, und nicht zuletzt durch räumliche Variabilität mit unbekanntem Strukturmuster verursacht (03).

Daten, häufig aus aufwendigen und teuren Messverfahren stammend, sind ein hohes aber auch knappes Gut. Erstens hemmen die hohen Kosten hydrogeologischer Er-



Bekannte Altlasten und verdächtige Flächen in Baden-Württemberg, Stand 2010.



Die so genannte Bayes'sche Geostatistik vereint Unsicherheit in Strukturtypen mit Unsicherheit der tatsächlichen Anordnung von Werten im Raum. Die Abbildung zeigt entsprechende Zufallsfelder, welche die Unsicherheit in beiden Aspekten widerspiegeln.

kundungen die Größe verfügbarer Datensätze. Zweitens schränkt die natürliche Variation von Materialeigenschaften des Untergrundes die flächige Gültigkeit von typischerweise punkttartigen Messungen stark ein.

In unseren Forschungsprojekten berücksichtigen wir diese Modell- und Parameterunsicherheit explizit, und quantifizieren die entstehende Vorhersageunsicherheit. Dadurch erhalten involvierte Entscheidungsträger verlässlichere Informationen über ihr System und verfügen über rationale und reflektierte Entscheidungsgrundlagen bezüglich resultierender Risiken. Meist geschieht dies mit Hilfe der Monte-Carlo Simulationsmethode. In dieser Methode werden deterministische Modelle in einer Schleife wiederholt und mit variierenden Parameterwerten und Randbedingungen ausgeführt. In einfachen Worten ausgedrückt benötigt die Simulation vieler wahrscheinlicher Möglichkeiten auch vielfach wiederholte Simulation. Diese Vorgehensweise ermöglicht, sowohl Modellunsicherheit als auch die räumliche Variabilität von Materialeigenschaften zu berücksichtigen.

Als Beispiel zur Verdeutlichung soll hier die modellbasierte Ausweisung von Wasserschutzgebieten dienen. Wasserversorger weisen solche Schutzgebiete um Ihre Brunnenanlagen herum aus, typischerweise mehrere Quadratkilometer groß, um eine sichere Versorgung der Bevölkerung zu gewährleisten. Die zurzeit wichtigste und gesetzlich vorgeschriebene Schutzgebietsgrenze ist die sogenannte 50-Tage-Linie, welche meistens modellbasiert ermittelt wird. (04) zeigt eine Wasserschutzgebietszone für ein beispielhaftes Brunneneinzugsgebiet eines deutschen Wasserversorgers. Schadstoffe, welche außerhalb dieser Zone in den Bodenkörper eindringen, benötigen nach dem Modell länger als 50 Tage Fließzeit, um zum Brunnen zu gelangen. Dahinter steht der Gedanke, dass viele Arten von Verschmutzungen innerhalb von 50 Tagen biologisch oder chemisch im Grundwasser abgebaut werden können.

Wegen der oben erwähnten unvermeidbaren Unsicherheit in Umweltsimulationen lässt sich die Lage der 50-Tage-Linie nicht mit Sicherheit ermitteln. Stattdessen verwenden wir Monte-Carlo Simulationen. Diese ergeben Bereiche, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit Bestandteil einer Wasserschutzzone sein sollten, und andere Berei-

che, von denen nur unwahrscheinlich eine Gefährdung für das Trinkwasser ausgeht. In Abhängigkeit der Risikoakzeptanz des Versorgungsunternehmens können dann unterschiedliche Konfidenzbereiche ausgewiesen werden. (04) vergleicht die klassische 50-Tage-Schutzzone mit der benötigten Fläche, um mit nur 10-prozentigem Risiko zu verhindern, dass ein Schadstoff innerhalb von 50 Tagen am Brunnen ankommen kann (10 Prozent Isoperzentillinie, markiert mit „0.1“). Die existierende Zone 2 erfüllt im Erwartungswert und auf 50-Prozent-Level die gesetzlichen Anforderungen bei weitem. Unsere Simulationen zeigen jedoch, dass eine gleich große Fläche mit anderem Umriss das Restrisiko einer früheren Ankunft im Brunnen sogar unter zehn Prozent senken könnte.

Eine derartige Herangehensweise wird als probabilistische Risikoanalyse (PRA) bezeichnet. PRA hat zum Ziel, Sicherheitsansprüche zu validieren und schließbare Lücken zur weiteren Absicherung aufzuzeigen. Der gesamte Entscheidungsprozess wird durch die Unsicherheitsbetrachtung transparenter und liefert somit wertvolle Informationen, welche eine risikobasierte Entscheidung unterstützen.

3. Modellkalibrierung mit unzulänglichen Daten

Die Unsicherheit von Simulationsmodellen lässt sich im Allgemeinen durch Kalibrierung auf beobachtete Daten des realen Systems verringern. In (05) ist beispielhaft dargestellt, wie punktuelle Messungen die Variabilität von Parameterfeldern (z.B. der Durchlässigkeit des Bodens für die Grundwasserströmung) einschnüren können, und somit die Unsicherheit eines darauf aufsetzenden Modells verringern. An den jeweiligen Stellen einer Messung sind die Parameter bis auf einen unvermeidbaren Messfehler bekannt. Je weiter jedoch ein Parameterwert von einer Messstelle entfernt ist, desto größer wird sein mögliches Wertespektrum. Dies ist durch die starke räumliche Variabilität vieler physikalischer Eigenschaften aus geologischen Entstehungsprozessen bedingt.

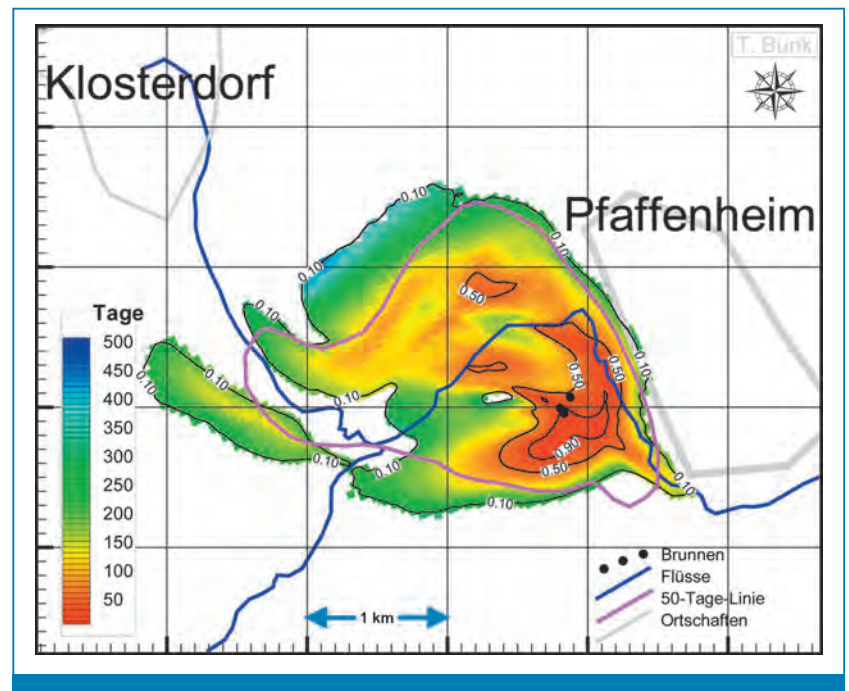
In der stochastischen Simulation bedeutet dies, dass aus wenigen Messwerten viele und vergleichsweise große Parameterfelder generiert werden müssen. Direkte Kenntnis von Parameterwerten an einzelnen Punkten wird mit Hilfe geostatistischer

Interpolationsverfahren (zum Beispiel Kriging) berücksichtigt. Weil zwischen den bekannten Punkten keine eindeutige Lösung existiert, werden viele Möglichkeiten zufällig generiert und an Simulationsmodelle weitergeleitet. Ist die Zahl der Messpunkte groß genug, können zusätzlich Annahmen über die Grundstruktur des Parameterfeldes abgeleitet werden – vergleiche (03). Insgesamt kann somit das riesige Spektrum der möglichen Parameterfelder eingeschränkt werden.

Um diesen Raum der Möglichkeiten weiter einzuschränken, werden auch indirekte Daten verwendet, also beobachtete Reaktionen des Umweltsystems, mit denen Simulationen übereinstimmen sollen. Dies erfordert, in einfachen Worten ausgedrückt, eine stochastische Variante von Modellkalibrierung. Stochastische Kalibrierung ist eine aufwändige, nicht-lineare und hochdimensionale Optimierungsaufgabe, die zwangsweise auf das gesamte Spektrum möglicher Parameterfelder angewandt werden muss. Dies erzeugt einen erheblichen Mehraufwand an Rechenzeiten im Vergleich zu herkömmlichen (deterministisch denkenden) Kalibrierungsvorgängen.

Die intelligente Verflechtung von Kalibrierung mit stochastischer Simulation ist eine Kernherausforderung in unserer Arbeitsgruppe. Wir arbeiten an stochastisch-inversen Methoden zur Modellkalibrierung, welche Heterogenität, unklare Vorstellungen von räumlichen Strukturtypen, Mess- sowie Modellfehler berücksichtigen. Bayes'sche Statistik und Bayes'sche Geostatistik – vergleiche (03) – sind Grundregeln für die Unsicherheitsanalyse, Datenverwendung und Verschmelzung unsicherer Informationen. Diese Verfahren stehen bei uns stark im Vordergrund. Weitere sehr oft nützliche Werkzeuge sind adjungierte Sensitivitätsanalysen. Sie invertieren alle Kausalitäten und die Richtung der Zeitachse in Simulationsmodellen. Dieser konzeptionell sehr abstrakt anmutende Schritt ermöglicht, in beeindruckender Geschwindigkeit die Sensitivität von entscheidenden Modellvorhersagen bezüglich beliebig großer Parameterzahlen, oft mehrerer Millionen Parameter, zu bestimmen.

Ein eindrückliches Beispiel hierfür liefert ein aktuelles Projekt, in dem wir die Architektur von Schadensherden im Untergrund untersuchen. Viele gefährliche Schadstoffe lösen sich extrem langsam im Grundwas-

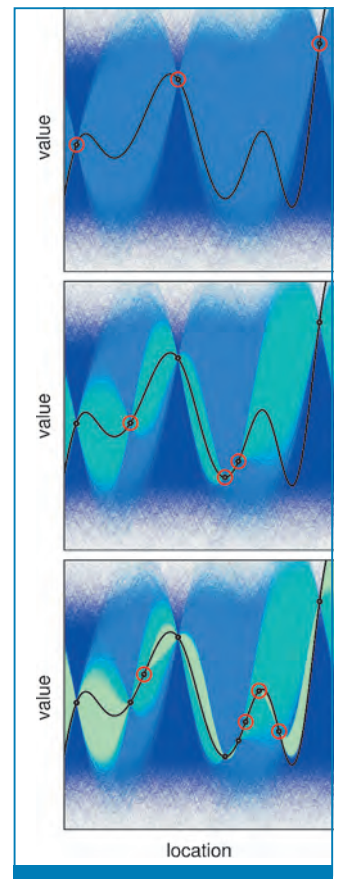


Ausgewiesene 50-Tage-Linie („Zone 2“) und modellbasierte Isoperzentilen (0,1; 0,5; 0,9) der 50-Tage-Linie für ein Brunnenschutzgebiet. Der farbige Hintergrund zeigt den Erwartungswert der Ankunftszeit.

ser und bleiben über Jahre im Boden verankert. Sie stellen daher ein immerwährendes Risiko für die Umwelt und unsere Trinkwasserversorgung dar. Um diese Risiken bestimmen zu können und den Sanierungsbedarf verschiedener Altlasten zu priorisieren, muss die Lösung des Schadstoffes ins Grundwasser und die anschließende Ausbreitung des kontaminierten Grundwassers simuliert werden.

Wie viel Schadstoff das Grundwasser abtransportiert (Massenfluss des Schadstoffes) und wie lange der Schadensherd ein Reservoir für anhaltende Kontamination bleibt, hängt stark von der Form des Schadstoffherdes im Untergrund ab. Eine breite Klasse an Schadstoffen ist prinzipiell nicht mit Wasser mischbar und befindet sich daher als getrennte Flüssigkeitsphase mit abstrakten und bizarren Umrissen im Boden (06). Der Lösungsvorgang ins Grundwasser hängt dabei von der spezifischen Oberfläche des bizarren Umrisses ab, also von der Kontaktfläche des Schadstoffes zum Grundwasser.

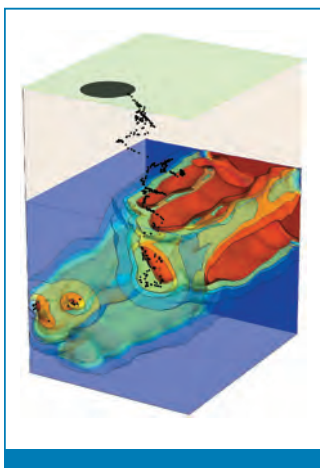
Die Heterogenität des Untergrundes spielt sowohl in der Ausprägung dieser bizarren Formen und in der Anströmung des Schadensherdes, als auch für den Abtransport und die relevanten Verdünnungs- und Abbauprozesse weiter unterstrom eine entscheidende Rolle. Um dennoch verläss-



Punktuale Messwerte in heterogenen Systemen schränken die Unsicherheit nur in einem begrenzten Radius ein. Dazwischen besteht eine unendliche Anzahl von möglichen Verläufen. Nur mit unrealistisch vielen, eng gesetzten Messungen würde die Unsicherheit global eliminiert.

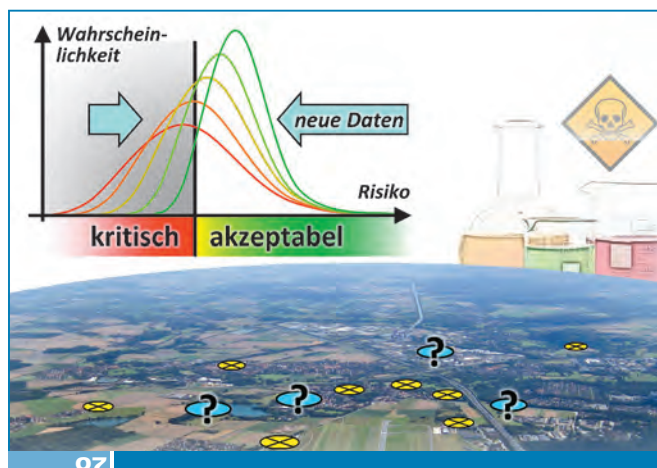
04

05



06

Bizarrer Umriss einer nicht wasserlöslichen Bodenverseuchung (angedeutet durch schwarze Punktwolke) und resultierende Belastung des durchfließenden Grundwassers (dargestellt durch farbige Isoflächen der Schadstoffkonzentration im Wasser). Heterogenität des Bodens (hier nicht dargestellt) wirkt sich signifikant auf den Lösungsvorgang und auf Verdünnungsprozesse im durchströmenden Grundwasser aus.



07

liche Aussagen treffen zu können, müssen Bayes'sche Geostatistik, inverse Modellierung und adjungierte Zustände kombiniert werden. Dies ermöglicht uns, Vorhersageunsicherheit, unbekannte bizarre Form des Schadensherdes, Heterogenität des Bodens bei unbekanntem Strukturtyp, diverse Messdaten sowie physikalische Prozessbeschreibungen zu einer belastbaren Risikoaussage zu verschmelzen. Bei diesem Vorgang lernen wir auch mehr über den Umriss des Schadensherdes, über resultierende Massenflüsse und über Verweilzeiten des Schadensherdes.

4. Optimales Monitoring: Viel Information für wenig Geld

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, verringern Messdaten und geeignete Kalibriermethoden die Vorhersageunsicherheit von Modellen. Oft ist die verbleibende Unsicherheit jedoch noch zu groß für verlässliche Aussagen. Dann müssen zusätzliche Daten erhoben werden. Daten im Untergrund zu erheben ist jedoch extrem kostspielig. Somit liegt es auf der Hand, Erkundungen auf größtmöglichen Nutzen hin zu optimieren. Eine optimale Messkampagne (Art des Experiments, Datentyp, Beprobungsmuster und Zeitintervalle) verspricht bei gleichem Budget den höchsten Nutzen, also die geringste Modellunsicherheit oder die beste Entscheidungsgrundlage – siehe (07). Bei Bohrkosten von über tausend Euro pro Meter in festem Gestein wird der Nutzen optimierter Designs schnell offensichtlich, selbst wenn sie nur eine einzige Bohrstelle einsparen. Die erhebliche Rechenleistung, welche für die Optimierung notwendig ist, wird dagegen immer günstiger: dank „Cloud

Daten aus Messnetzen verringern Modellunsicherheiten und erlauben somit präzisere Abschätzungen von Risiken und verlässlichere Entscheidungen. Um Restrisiken noch besser abschätzen zu können, werden bestehende Messnetze optimal um wenige weitere Punkte ergänzt. So werden die Kosten von Messkampagnen möglichst gering gehalten.

Computing“ können auch kleine Dienstleistungsunternehmen größere Rechenleistung für wenige Cent pro Stunde anmieten.

Der reale Nutzen einer Messkampagne ist vom Ergebnis der Messkampagne selbst abhängig, also von Messwerten, die während der Planungsphase noch unbekannt sind. Daher muss man sich einer aufwändigen Prozess- und Modellanalyse bedienen, um den erwarteten Nutzen von Daten zu bestimmen. Dabei mittelt man für ein vorgeschlagenes Design die Nutzwerte aus allen möglichen Messwerten, die man mit Hilfe eines geeigneten Modells und statistischer Konzepte hypothetisch generieren kann.

Danach schließt sich ein klassisches Optimierungsproblem an, um diejenige Messkampagne mit dem maximalen erwarteten Nutzwert zu finden. Dabei treten zwei Probleme auf. Zum einen ist bei großen Systemen, wie z.B. bei kompletten Wasserschutzgebieten, eine nahezu unendliche Anzahl von möglichen Beprobungsstrategien denkbar. Daher muss ihre Anzahl möglichst intelligent begrenzt und dann geschickt durchsucht werden. Zum anderen ist die Berechnung des Nutzwertes für komplexe Systeme extrem aufwändig, da der Nutzwert selbst eines einzelnen Designs wiederholt für verschiedene mögliche Messergebnisse ausgewertet werden muss. Insgesamt werden während der Optimierung Nutzwerte millionenfach berechnet. Schnelle Implementierungen oder effiziente, schnelle Schätzungen werden extrem wichtig.

Aus diesen Gründen befasst sich ein Projekt der Arbeitsgruppe mit der effizienten Auswertung und Implementierung für Nutzwerte von Designs. Mit Hilfe der Informa-

tionstheorie, welche sonst hauptsächlich in der Elektrotechnik oder Informatik Anwendung findet, kann der Informationsgehalt von Messungen auf verschiedene Weisen abgeschätzt werden. Wir verwenden die sogenannte Transinformation, um den erwarteten Informationsgehalt zu berechnen. Eine bestimmte Symmetrieeigenschaft und Umkehrbarkeit der Transinformation ermöglicht drastische Beschleunigungen: Anstatt die Auswirkungen hypothetischen Wissens seitens möglicher Messergebnisse zu evaluieren, wird hypothetisches Wissen bezüglich der Modellvorhersage angenommen. Anschließend wird ausgewertet, wie viel neues Wissen dies über mögliche und noch unbekannt Daten erzielt. Diejenigen Messdaten, die bei hypothetisch bekanntem Simulationsergebnis nur noch am wenigsten Überraschungen bieten können, werden im Umkehrschluss auch für die Kalibrierung des Simulationsmodells die aussagekräftigsten sein. Der Berechnungsaufwand verringert sich bei dieser Umkehr drastisch. Zukünftig bietet sich damit die Gelegenheit, Messkampagnen für größere und komplexere Systeme zu optimieren.

5. Wirtschaftliches und robustes Risikomanagement

Als Risikomanagement bezeichnet man allgemein den Gesamtprozess, wie auf ein Risiko eingegangen wird. Dabei bedient man sich des PDCA-Zyklus (Plan, Do, Check, Act), in welchem zu Beginn das zu schützende Objekt bzw. Schutzziel definiert wird. Neben der Gefahrenidentifikation, der Risikoabschätzung sowie der Risikobeurteilung und -bewältigung besteht ein kontinuierlicher Beobachtungs- und Kommunikationsprozess, welcher gewährleistet, dass die definierten Sicherheitsziele eingehalten werden.

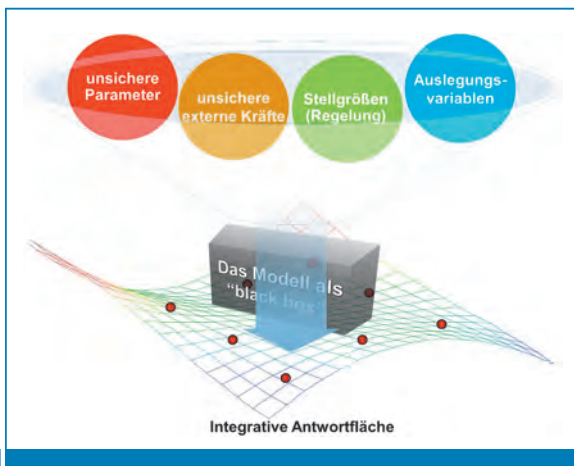
Von einem robusten Risikomanagement sprechen wir, wenn wir für ein Modell und seine Datengrundlage die entsprechenden Modell-, Parameter- und Datenunsicherheiten berücksichtigen. Durch das Eingeständnis von Unsicherheiten werden die von Simulationsergebnissen abgeleiteten Maßnahmen zur Risikoverringerung gegenüber falschen Vorstellungen über Wirkungsgefüge und Eigenschaften des gefährdeten Systems abgesichert. Generell werden dabei die Modellparameter

in zwei Klassen unterteilt. Zum einen sind dies Steuerungsvariablen, die vom Systembetreiber im Rahmen des Risikomanagements selbst gewählt werden können. Zum anderen sind dies unsichere Parameter, welche unser unvollständiges Wissen über die Systemeigenschaften widerspiegeln. Beide Parametergruppen beeinflussen letztlich das Systemverhalten und die Fehlerwahrscheinlichkeit, so dass der Entscheidungsprozess sowohl von den Steuerungsvariablen, der Systemunsicherheit und Fehlerwahrscheinlichkeit, dem gewünschten Sicherheitsniveau und dem erwarteten Nutzwert der möglichen Maßnahmen abhängt.

In einem Projekt der Arbeitsgruppe werden die Simulationsergebnisse, auf welchen Entscheidungsprozesse aufgebaut werden, in Abhängigkeit beider Parametergruppen zugleich ausgedrückt. Die nicht-lineare Änderung von Simulationen bei sich ändernden Werten in beiden Parametergruppen wird als Antwortfläche interpretiert und durch einen Satz geschickter gewählter Polynome angenähert – siehe (08). Die Antwortfläche ist ein elegant gewähltes Polynom aus beiden Parametergruppen, welches über die sogenannte polynomiale Chaos Expansion konstruiert wird. Nach anfänglichem Rechenaufwand zur Erstellung des Polynoms lassen sich beliebig schwierige Aufgaben in nur wenigen Sekunden erledigen. Dazu zählen Modellkalibrierung, Optimierung, Risikoanalyse, Optimierung von Monitoring-Strategien und vieles mehr. Insbesondere die simulationsbasierte Optimierung von Risikomanagement kann in nur geringer Rechenzeit gegen Unsicherheiten in der Systembeschreibung robust gestaltet werden.

Eine eindruckliche Illustration für dieses Konzept bietet sich für die Risikobeherrschung bei der Injektion und Speicherung von Kohlenstoffdioxid im Untergrund. Unter www.simtech.uni-stuttgart.de/forschung/visionen/iee.htm befindet sich ein interaktiver web-basierter Demonstrator zu diesem Thema, der im Rahmen des Exzellenzclusters Simulationstechnik der Universität Stuttgart erstellt wurde. Der Besucher kann hier in Echtzeit Simulationsparameter und Stellgrößen verändern, oder sich die resultierende Unsicherheit bei frei gelassenen Parameterwerten berechnen lassen.

In einem weiteren Projekt soll das Gesamt-



08

Ein intelligent zusammengesetztes Polynom trägt die gesamte Information eines komplexen Modells in kompakter Form als Antwortfläche. Sie beschreibt die Abhängigkeit der Simulationsergebnisse von unsicheren Parametern, Stellgrößen in der Regelungstechnik und Auslegungsvariablen für optimale Auslegungen.

risiko für die Versorgung mit sauberem Trinkwasser analysiert und kostenoptimal minimiert werden. Dafür entwickeln wir einen ganzheitlichen Simulationsansatz von der Gefahrenquelle im Wassereinzugsgebiet bis hin zum Wasserhahn in der Wohnung. Alle Unsicherheiten im Gesamtsystem werden

dadurch quantifiziert und priorisiert. So werden Risikolücken im Versorgungssystem aufgedeckt. Maßnahmen gegen Risiken auf hohem Sicherheitsniveau können teuer sein. Die zentrale Frage für jedes Wasserversorgungsunternehmen ist, welche Investitionsmaßnahme sich am besten eignet, um das Risiko zu steuern und zu minimieren. Zur Auswahl stehen alternative und teurere Wasserbezugsquellen

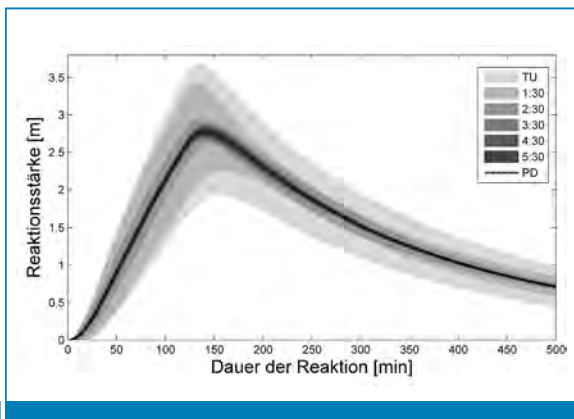
oder größere Wasserschutzgebiete, bessere Überwachungssysteme, genauere Vorhersagemodelle oder eine intensivere und vorsorgliche Wasseraufbereitung. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Handlungsoptionen können während der Planungsphase simulationsbasiert prognostiziert werden. Mit

Hilfe entscheidungstheoretischer Ansätze und der Nutzwerttheorie können Entscheidungsträger diese Alternativen miteinander vergleichen und optimal kombinieren. Daraus resultieren rationale, transparente und risikobewusste Entscheidungen, die bei gleichem Budget zu geringeren Gesamtrisiken führen.

kapazitäten durch technischen Fortschritt stellen die benötigten Rechenzeiten weiterhin eine immerwährende Herausforderung dar. Diese Entwicklung wird vor allem dadurch angefeuert, dass die aktuell von Wissenschaftlern untersuchten Probleme immer komplexere Zusammenhänge auf immer größeren Simulationsgebieten abdecken. Während es vor zehn Jahren noch oft akzeptabel schien, Systeme im Stillstand anzunähern, sind heute dynamische Simulationen gefragt. Besonders die Berücksichtigung von Unsicherheiten führt zu einer weiteren Explosion von Rechenzeiten. Die weitaus größten Rechenzeiten entstehen, wenn Unsicherheit auf Modellkalibrierung, Risikoanalyse oder Optimierungsaufgaben stößt.

Der einzige Ausweg ist dann oft die so genannte Modellreduktion, seit jeher ein Schwerpunkt vieler Forschungsbemühungen weltweit. Modellreduktion reduziert Rechenzeiten oder kann bei gleichbleibendem Rechenaufwand mehr Komplexität oder akkuratere raum/zeitliche Auflösungen größerer Modellgebiete erlauben. Allen Reduktionsmethoden ist gemein, dass sie das Verhalten eines Modells in irgendeiner Hinsicht mathematisch mit geschickten Ansätzen abstrahieren. Man wählt dabei eine Abstraktion, welche Besonderheiten des Systems erkennt und diese möglichst akkurat und effizient abbildet. Manche Reduktionsmethoden verändern das Vorhersagemodell grundlegend. Statt der ursprünglichen Phänomene werden abstrahierte Ersatzwerte berechnet, die anschließend in die gewünschte Vorhersage umgewandelt werden müssen. So erhält man so genannte Modellsurrogate, also vereinfachte Ersatzmodelle für die ursprünglich zu aufwendigen Simulationen, ohne allzu großen Verlust von Genauigkeit. Mit dem Surrogat kann man anschließend Modellvorhersagen generieren, Systeme optimieren, Statistiken durch wiederholte Auswertung berechnen, oder Risiken auswerten.

Beispielsweise wird in einem aktuellen Forschungsprojekt die zeitliche Dynamik des Schadstofftransportes im Grundwasser durch sogenannte zeitliche Charakteristiken abstrahiert. Dies ermöglicht, über 95 Prozent der gewünschten Informationen in weniger als fünf Prozent der Rechenzeit zu erhalten – siehe (09). Ähnliche Ansätze sind aus der Statistik bekannt, wo Mit-



09

Simulation einer Systemreaktion (hier: Grundwasserleiter reagiert auf einen Druckstoß) mittels reduzierter Modelle. Gestrichelte Linie (PD): präzise Dynamik; Grau schattierte Flächen: Reduktionsfehler bei gegebener Zeiterparnis (x:y). Die größte Fläche (TU) illustriert den Fehler bei totaler Unkenntnis des Modells.

6. Die immerwährende Herausforderung: Rechenzeiten

Die Umweltforschung erfährt in den letzten Jahren einen drastischen Anstieg beim Rechenbedarf für Simulationsmodelle. Trotz der Vervielfachung von Rechen-

telwerte, Standardabweichungen, Schiefe und Wölbung verwendet werden, um Verteilungsfunktionen zu beschreiben. Ist das tatsächliche dynamische Systemverhalten gefragt, müssen die gewünschten Zeitkurven aus den Charakteristiken rekonstruiert werden, wofür sich Ansätze wie minimale relative Entropie anbieten. Eine parallele Anstrengung in dieser Forschungsrichtung ist die oben erläuterte polynomiale Chaos-Expansion.

Es ist offensichtlich, dass jede Modellreduktion als Kehrseite der Medaille auch Fehler mit sich bringt. Daher wird bei der Modellreduktion immer auch der Reduktionsfehler quantifiziert. Eine weitere aktuelle Anstrengung zielt darauf ab, zwischen verschiedenen Abstraktionsgraden bei Kombination mehrerer Reduktionstechniken einen derartigen Kompromiss zu finden, dass insgesamt ein Optimum zwischen Genauigkeit und Rechenzeit erreicht wird.

7. Fazit und Ausblick

Die zu Beginn erwähnte Vision für unsere Forschung, mit stochastischen Simulationen transparentes, probabilistisches Risikomanagement und komplexe Optimierungen für Umweltsysteme trotz Unsicherheit durchzuführen, galt weltweit bis vor kurzem als reine Wunschvorstellung. Die Forschungsergebnisse der Jungwissenschaftlergruppe und ihrer Kooperationspartner weltweit leisten jedoch auf dem Weg dorthin bereits einen erheblichen Beitrag.

Dank des grundlagenorientierten Charakters der Forschungsaktivitäten sind die resultierenden Methoden nicht nur für Umweltsysteme, sondern auch auf völlig unterschiedliche technische Systeme anwendbar. So lässt sich zum Beispiel das geringe Risiko, dass Lithium-Akkumulatoren in Elektroautos bei mechanischer Zerstörung Feuer auslösen, mit exakt den gleichen Methoden quantifizieren, regeln und weiter minimieren.

Voraussichtlich wird es in absehbarer Zukunft möglich sein, sogar so komplexe Systeme wie die Umwelt wesentlich umfassender zu beschreiben, und dabei verlässliche Unsicherheitsschranken angeben zu können. Diese ermöglichen den Einsatz von nachvollziehbaren, rationalen Strategien für das Risikomanagement und für die Optimierung komplexer dynamischer

ZUSAMMENFASSUNG

Laut einer UN-Resolution aus dem Jahr 2010 ist der sichere Zugang zu sauberem Trinkwasser ein neues Menschenrecht. Die WHO stellt jedoch nach wie vor weltweit erhebliche Gesundheitsrisiken durch mangelhafte Wasserqualität fest und empfiehlt gesetzlich bindende Sicherheitskonzepte für Trinkwasser. Angebrachte Sicherheitskonzepte müssen viele teils konkurrierende Aspekte vereinen. Dazu zählen neben wirtschaftlichen Interessen und konkurrierenden Landnutzungsarten die nachhaltige Bewirtschaftung und Robustheit gegenüber klimatischem und gesellschaftlichem Wandel. Die Jungforschergruppe "Stochastische Modellierung von Hydrosystemen" am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart entwickelt Werkzeuge zur Simulation von terrestrischen Hydrosystemen mit besonderem Augenmerk auf der Unsicherheit von Modellvorhersagen. Darauf aufbauend entwickelt sie Methoden für optimales Monitoring, Optimierung unter Unsicherheit und für Risikoanalysen, sowie entscheidungstheoretische Ansätze für optimales Risikomanagement.

Systeme unter Unsicherheit. So helfen sie der zukünftigen Gesellschaft, ihre Umweltauswirkungen besser vorhersagen und minimieren zu können. Dadurch können die von der WHO geforderten Sicherheitskonzepte für Trinkwasser, zumindest seitens der Wissenschaft und Simulationstechnik, erfüllt und sogar übertroffen werden.

Wolfgang Nowak,
Rainer Enzenhöfer,
Andreas Geiges,
Jonas Koch,
Philipp Leube,
Sergey Oladyshkin

Literatur

- P. Leube, A. Geiges, and W. Nowak. Bayesian assessment of the expected data impact on prediction confidence in optimal sampling design. *Water Resour. Res.*, 2011 (submitted).
- R. Enzenhöfer, W. Nowak, and R. Helmig: Probabilistic exposure risk assessment with advective-dispersive well vulnerability criteria. *Adv. Water Res.*, doi:10.1016/j.adwatres.2011.04.018, 2011 (in press).
- S. Oladyshkin, H. Class, R. Helmig, and W. Nowak: An integrative approach to robust design and probabilistic risk assessment for CO₂ storage in geological formations. *Comput. Geosc.* 15(3), 565–577, doi:10.1007/s10596-011-9224-8, 2011.
- W. Nowak, F. P. J. de Barros and Y. Rubin. Bayesian Geostatistical Design: Task-driven optimal site investigation when the geostatistical model is uncertain. *Water Resour. Res.* 46(W03535), doi:10.1029/2009WR008312, 2010.
- M. Troldborg, W. Nowak, N. Tuxen, P. L. Bjerg, R. Helmig, and P. Binning. Uncertainty evaluation of mass discharge estimates from a contaminated site using a fully Bayesian framework. *Water Resour. Res.* 46(W12552), 2010.

DIE AUTOREN



1



2



3



4



5



6

1 JUN.-PROF. DR.-ING. WOLFGANG NOWAK, M.Sc.

studierte an der Universität Stuttgart Umweltschutztechnik und Water Resources Engineering und Management und promovierte dort im Jahre 2004. Im Rahmen seines Studiums und seiner Promotion besuchte er ein Jahr die University of Waterloo (Kanada), vier Monate die Stanford University und zwei Jahre die University of California at Berkeley (beide USA). Seit 2008 leitet er als Juniorprofessor im Rahmen des Exzellenzclusters Simulation Technology die Jungforschergruppe „Stochastische Modellierung von Hydrosystemen“.

2 DIPL.-ING. RAINER ENZENHÖFER

studierte bis 2006 an der University of Waterloo (Kanada) und der Universität Stuttgart Umweltschutztechnik. Es folgten an der Universität Stuttgart die Koordination des internationalen Doktorandenprogrammes Environment Water (EnWat) und die Leitung des wissenschaftlichen Sekretariates der DFG-Senatskommission für Wasserforschung bis Mitte 2011. Seit 2008 promoviert er in der Jungforschergruppe „Stochastische Modellierung von Hydrosystemen“ an der Quantifizierung und am Management von Risiken in Wasserversorgungssystemen.

3 DIPL.-ING. ANDREAS GEIGES

studierte an der Universität Stuttgart Umweltschutztechnik und promoviert seit 2009 in der Jungforschergruppe „Stochastische Modellierung von Hydrosystemen“ über Effiziente Strategien für optimales Design von Messkampagnen und von Monitoring-Netzwerken.

4 DIPL.-ING. JONAS KOCH

studierte an der Universität Stuttgart Umweltschutztechnik und promoviert dort seit 2010 in der Jungforschergruppe „Stochastische Modellierung von Hydrosystemen“ über die Architektur von Schadensherden im Untergrund.

5 DIPL.-ING. PHILIPP LEUBE

studierte an der Universität Stuttgart Umweltschutztechnik und promoviert seit 2009 in der Jungforschergruppe „Stochastische Modellierung von Hydrosystemen“ über die zeitliche Reduktion von unsicheren Modellen.

6 DR.-ING. SERGEY OLADYSHKIN

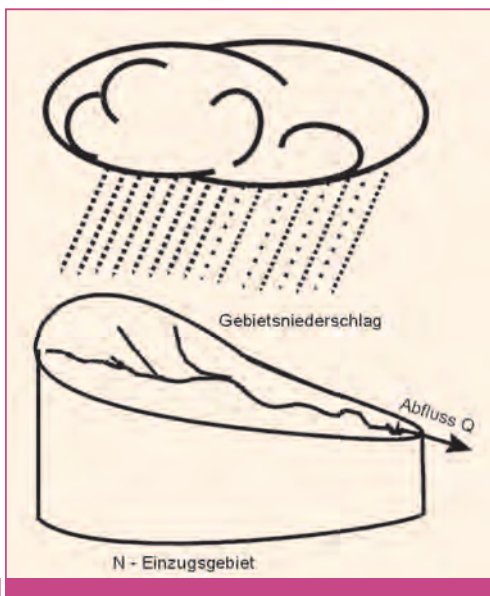
schloss 2002 mit Auszeichnung sein Studium in Angewandter Mathematik an der technischen Staatsuniversität Nizhny Novgorod (Russland) ab. 2006 promovierte er am Institut National Polytechnique de Lorraine und arbeitete im Anschluss bis 2008 an der Französischen Akademie der Wissenschaften in Nancy (Frankreich). Seit 2009 arbeitet er als PostDoc am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart im Rahmen des Exzellenzclusters „Simulationstechnik“.

Kontakt

Universität Stuttgart
 Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
 Jungforschergruppe Stochastische Modellierung von Hydrosystemen
 Pfaffenwaldring 5a, 70569 Stuttgart
 Tel. 0711/685-60113
 Fax 0711/685-60430
 E-Mail: wolfgang.nowak@iws.uni-stuttgart.de
 Internet: <http://www.hydrosys.uni-stuttgart.de>

Regen-Vorhersagen

Niederschlagsmessung und Klimaveränderung



Die optimale Bewirtschaftung der Ressource Wasser wird vor dem Hintergrund der zu erwartenden Klimaänderungen immer wichtiger werden. Es bedarf detaillierter hydrologischer Messungen und Modellierungen, um geeignete Werkzeuge des Wasserressourcen Managements zu entwickeln. In diesem Beitrag werden die Niederschlagsmessung mit Wetterradar, die stochastische Genierung von Niederschlagsdaten sowie Aspekte der hydrologischen Modellierung vorgestellt.

verfügbar. Diese liefern zwar allgemein gute Ergebnisse, aber gerade die quantitative Vorhersage des Niederschlags ist weiterhin sehr ungenau. Zudem ist die zeitliche Reichweite dieser Modelle begrenzt. Für längere Zeiträume (Monate oder Jahreszeiten) können nur sehr ungenaue Angaben gemacht werden. Für die Planung wasserwirtschaftlicher Anlagen ist jedoch die Kenntnis der Wetterverhältnisse über mehrere Jahre notwendig. Da deterministische Methoden solche Prognosen nicht leisten können, wird zumeist mit der Annahme gearbeitet, dass sich die Zukunft – statistisch betrachtet – wie die Vergangenheit verhält. Nur unter dieser Annahme können die vergangenen Beobachtungen direkt als Abschätzung der Zukunft verwendet werden.

Durch das sich offensichtlich ändernde Klima wird diese Annahme heute in Frage gestellt. Es ist nicht klar, in wieweit die bisherige Bemessungspraxis geändert werden muss. Eine sinnvolle Kombination von Messungen und Klimavorhersagen muss gefunden werden, um zukünftige Risiken zu vermeiden.

Der gesamte Wasserkreislauf wird von einer Vielzahl von Prozessen beeinflusst, die erfasst und verstanden werden müssen. Daher werden die Prozesse zu Modellen zu-

1. Einleitung

Regen und Oberflächengewässer (Bäche, Flüsse und Seen) sind die wichtigsten Wasserressourcen für das menschliche Leben. In den meisten Teilen der Erde hat sich die Bevölkerung an die Verteilung des zumeist durch Niederschlag verfügbaren Wassers angepasst. Um häufige Schwankungen der Niederschlagsmengen und die daraus folgenden Hochwasser und Dürren überwinden zu können, ist die Bewirtschaftung der Wasserressourcen notwendig. Dieses kann nur bei guter Kenntnis der natürlichen Schwankungen geleistet werden.

Hydrologische Planung und die Bewirtschaftung von natürlichen Ressourcen ist immer mit hohen Unsicherheiten behaftet. Um optimale Entscheidungen treffen zu können, wäre eine ausreichende Kenntnis der zukünftigen Niederschläge und Abflüsse notwendig. Für kurze Zeiträume sind Vorhersagemodelle der Meteorologie

sammengefasst und dabei vereinfacht. Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen physikalisch-deterministischen und stochastischen (d.h. indeterministischen) Modellen. Beide sind auf beobachtete oder gemessene Daten als Eingangsgrößen angewiesen.

Der Lehrstuhl für Hydrologie und Geo-hydrologie befasst sich mit allen Aspekten dieser Modellierung, von den Niederschlagsdaten als Modellinput bis zu den simulierten Abflüssen. Im Folgenden stellen wir drei der Arbeitsgebiete vor.

2. Niederschlagsmessungen mittels Radar

Als wichtigster Eingangsgröße für die hydrologische Modellierung kommt der möglichst akkuraten Messung des Niederschlags eine besondere Bedeutung zu. Niederschlagsmessgeräte, die zur Standardausstattung einer meteorologischen Messstation gehören, registrieren den Niederschlag in einem Auffanggefäß mit einer genormten Fläche von 200 Quadratzentimetern. Üblicherweise wird in einem Intervall von einer bis zu fünf Minuten die Gewichtsveränderung des Auffanggefäßes gemessen, was direkt der gefallen Niederschlagsmenge an diesem Ort entspricht. Dies wird bis heute noch als das quantitativ genaueste Verfahren betrachtet, auch wenn Forschungen zeigen, dass sich die gemessenen Niederschlagsmengen an Geräten, die nur wenige Meter voneinander entfernt sind, deutlich unterscheiden können.

Aufgrund der hohen Vorraussetzungen und des damit verbundenen Aufwands, eine meteorologische Messstation zu betreiben, ist die Stationsdichte in den meisten Ländern begrenzt. In Deutschland, das ein relativ dichtes Messnetz betreibt, beträgt die Stationsdichte ca. eine Station pro 150 bis 300 Quadratkilometern. Dies ist ausreichend, um das großräumige Niederschlagsgeschehen zu erfassen. Um aber effektiv vor Überflutungen durch Starkregenereignisse zu warnen, reicht diese Stationsdichte nicht aus, da solche Ereignisse eine meist viel geringere Ausdehnung haben und somit die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Ereignis von einer Niederschlagsstation aufgezeichnet wird, gering ist.

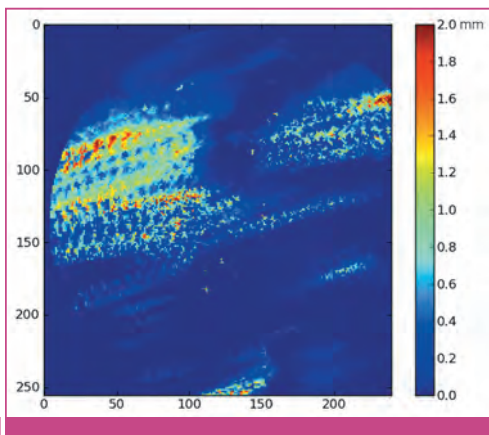
Als während des zweiten Weltkriegs entdeckt wurde, dass auf den damals nur zur

Luftraumüberwachung eingesetzten Radaren auch Niederschlagsfelder zu sehen waren, begannen sofort Forschungen, sich diesen Effekt auch direkt zur Niederschlagsmessung zu Nutze zu machen. Heute sind in vielen Ländern teils flächendeckende Wetterradarnetzwerke in Betrieb. Wetterradar nutzt die Rückstreuung hochfrequenter (2 – 24 GHz) elektromagnetischer Wellen an den Wasser- und Eisteilchen von Regen und Schnee, um deren Ort und Menge zu detektieren. Mittels einer rotierenden Antenne, deren Winkel gegen die Horizontale sich ebenfalls verändern lässt, kann so innerhalb von fünf bis fünfzehn Minuten ein dreidimensionales Bild des Niederschlagsgeschehens in einem Umkreis von 130 Kilometern mit einer durchschnittlichen Auflösung von einem Quadratkilometer erzeugt werden. Durch das indirekte Messverfahren und die hohe Reichweite enthalten Niederschlagsdaten auf Radarbasis allerdings eine Reihe von Fehlern, die sich quantitativ teils drastisch auswirken können. Zu den augenfälligsten Fehlern gehören Echos von nichtmeteorologischen Zielen, wie z.B. Flugzeugen, Schiffen, Vogel- und Insektenschwärmen, vor allem aber von Gebäuden in der Nähe des Radars oder von Geländeerhebungen. Diese reflektieren die Radarstrahlung in nicht unerheblichem Maß und erscheinen bei direkter Umrechnung als Gebiete mit konstant hohem Niederschlag. Dieser Niederschlag darf natürlich nicht an die hydrologische Modellkette weitergereicht werden, so dass effektive Filter für diese Fehlerart gefunden werden müssen, mit denen sicher zwischen nicht-meteorologischen und meteorologischen Echos unterschieden werden kann.

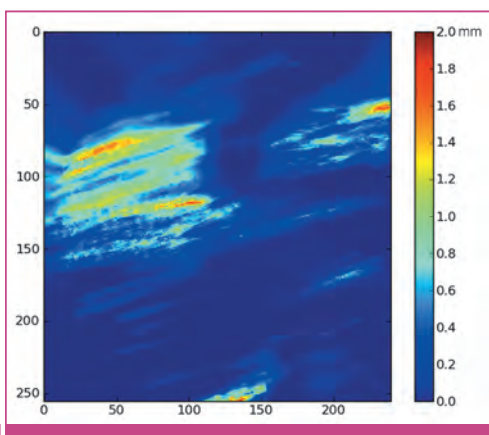
Ein weiterer Fehler wird erst bei der Summation mehrerer Einzelbilder ersichtlich. In dem Zeitraum zwischen der Aufnahme zweier Radarbilder bewegen sich die Niederschlagsfelder mit dem Wind weiter. Bei hohen Windgeschwindigkeiten und räumlich begrenzten Ereignissen (z.B. Gewittern) kommt es vor, dass in der Summe die gleiche Niederschlagszelle als mehrere Einzelzellen erscheint (01) und das Gelände unter der Bahn des Ereignisses nicht kontinuierlich überregnet erscheint. Durch die Berechnung des Verlagerungsfeldes aus aufeinanderfolgenden Einzelbildern kann der Ort der Niederschlagszelle an verschieden fein wählbaren Zeitpunk-

SUMMARY

The current discussion about climate change has also raised questions about the future management of water resources. Therefore, there's a need for detailed hydrological measurements and models in order to develop appropriate tools for water resources management. In this chapter, we discuss the advantages and problems of precipitation measurement using weather radar and the stochastic generation of precipitation time series. Furthermore, we also present some general aspects of hydrological modelling.



01



02

ten zwischen zwei Aufnahmen abgeschätzt und ein realistischeres Niederschlagsbild erzeugt werden (02). Eine weitere Fehlerquelle, die die Hochwasservorwarnung stark negativ beeinflusst, ist die Dämpfung des Radarsignals durch Niederschlag. Ähnlich der Verringerung der Sichtweite bei Nebel, erzeugt die starke Streuung des Radarstrahls in starken Niederschlagsfeldern eine überproportionale Abnahme des Signals mit der Entfernung. Obwohl es im Prinzip möglich ist, diesen Effekt über Beziehungen zwischen der gemessenen Rückstreuung und der daraus resultierenden Dämpfung theoretisch zu berechnen, führen selbst kleine Fehler in den Grundannahmen zu unrealistischen Korrekturen. Dies kann durch Dämpfungsreferenzen vermieden werden. Aktuelle Forschungen nutzen hierzu

die Information von Mikrowellenrichtfunkverbindungen. Diese werden auch von Mobilfunkbetreibern verwendet, weshalb diesen Ansätzen großes Potenzial zugeschrieben wird; allerdings unter der Einschränkung, dass sich die meisten kommerziellen Richtfunkverbindungen in Ballungsräumen befinden. In ländlichen Gebieten wäre eine Korrektur auf andere Referenzen angewiesen.

Auch nachdem das Radarbild vollständig korrigiert ist, zeigen sich immer noch Diskrepanzen zu Stationsmessungen. Dies hängt auch damit zusammen, dass Niederschlagsstation und Radar an unterschiedlichen Orten messen – der Radar in größerer Höhe, die Messstation am Boden. Außerdem werden bei der Umrechnung der zurückgestreuten Radarstrahlung in Niederschlagsintensitäten Annahmen über die Größenverteilung der Regentropfen bzw. der Schnee- und Eispartikel gemacht, die räumlich wie zeitlich hochvariabel sind.

Moderne Radarsysteme bieten mit zusätzlichen Polarisationsinformationen die Möglichkeit, genauer auf die Größenverteilung der Niederschlagspartikel zu

schließen und auch genauer auf die Dämpfung eingehen zu können. Bis diese Daten aber flächendeckend verfügbar und für alle davor liegenden Zeiträume ermittelt sind, werden die korrigierten Daten auf statistischem Wege noch an die Werte der Niederschlagsstationen angepasst. Hierzu wurde am Lehrstuhl das Konzept des Conditional Mergings entwickelt, das auf der geostatistischen Methode des Kriging beruht, also der Interpolation von Werten für Orte, von denen keine Messwerte vorliegen. Hierbei werden die Radarwerte zunächst auch nur an den Stationsorten betrachtet und ähnlich wie diese mittels Kriging interpoliert. Die Abweichung zwischen dem interpolierten Stations- und dem interpolierten Radarfeld wird danach auf das ursprüngliche Radarfeld aufgeprägt. Somit bleibt die Variabilität des Radarbilds erhalten, die Werte werden aber auf das Niveau der Stationsdaten korrigiert. Dieses Konzept wird aktuell dahingehend weiterentwickelt, andere Interpolationsmethoden zu finden, die die statistischen Eigenschaften des Niederschlags besser berücksichtigen können, als dies Kriging tut.

3. Simulierte Niederschlagsdaten

Wasserbauliche Strukturen sind sehr langfristige und in der Regel sehr kapitalintensive Investitionen. Beim Bau von Staudämmen, Rückhaltebecken, Hochwasserdämmen oder Kanalnetzen wird nicht selten ein Planungshorizont von 50 bis 100 Jahren und mehr betrachtet. Die richtige Dimensionierung solcher Bauwerke ist darum im Hinblick auf die zu erwartenden hydraulischen Anforderungen, die Gefahrenabwehr (z.B. dem Risiko, dass ein Damm überspült werden könnte) und den effizienten Einsatz der finanziellen Mittel besonders wichtig.

Für die unterschiedlichen Arten hydraulischer Strukturen sind dabei ganz unterschiedliche Belastungen maßgebend. Für ein großes Staubaupwerk beispielsweise ist das Niederschlagsvolumen im gesamten Einzugsbereich oberhalb der Talsperre ausschlaggebend. Eine Gefahr besteht hier, wenn großräumig und über einen längeren Zeitraum extrem viel Niederschlag fällt. Ganz anders die Situation in der Stadtentwässerung: Ein Kanalnetz reagiert innerhalb von wenigen Minuten auf ein Niederschlagsereignis. Für die Fra-

ge, ob ein Kanalnetz einer Belastung standhält oder ob es zu Rückstau und Überflutungen kommt, ist somit viel weniger das gesamte Volumen eines Niederschlagsereignisses entscheidend, als vielmehr die maximal auftretende Intensität. Die statistischen Eigenschaften von Niederschlag hängen stark davon ab, welche räumliche und zeitliche Skala man betrachtet. Die höchsten Niederschlagsintensitäten entstehen in Mitteleuropa typischerweise bei Gewittern. Diese sind relativ kurzlebig (bis zu wenigen Stunden) und eher kleinräumig in ihrer Ausdehnung (bis zu einigen Quadratkilometern). Sie können aber vor allem in gebirgigen Einzugsgebieten zu verheerenden Hochwasserereignissen führen (sog. „Flash-Floods“), während wenige Kilometer entfernt die Sonne scheint. Sie treten meist in den Sommermonaten auf. Über ein großes Gebiet gemittelt, wie zum Beispiel dem Einzugsgebiet eines großen Flusses, sind diese Ereignisse meist nicht mehr als Extreme wahrnehmbar. Für Hochwasser an den großen Flüssen, wie z.B. dem Elbe-Hochwasser von 2002, sind die großräumigen Strömungsverhältnisse über Europa, dem Mittelmeer und dem Nordatlantik verantwortlich. Hier kommt es zu Überflutungen, wenn die Großwetterlage über mehrere Tage für einen stetigen Feuchtetransport und Dauerregen sorgt. So hohe Intensitäten wie bei Gewittern werden dabei jedoch meist nicht erreicht. In der Regel werden Computermodelle eingesetzt, mit denen die zu erwartenden hydraulischen Belastungen eines geplanten Bauwerks durchgerechnet werden können. Dabei genügt es in vielen Fällen nicht, ein besonders schweres Regenereignis zu simulieren. Bei einem Kanalnetz beispielsweise hängt das Versagensrisiko nicht nur vom aktuellen Niederschlag ab, sondern auch von der Vorgeschichte: Sind die Kanäle noch von einem vorherigen Ereignis gefüllt, kann es viel schneller zu Rückstau und Überflutungen kommen. Es werden deshalb Langzeitsimulationen durchgeführt (Zeitreihen von mehreren Jahrzehnten) und die relativen Häufigkeiten bestimmter Gefahrensituationen (z.B. „einmal in zehn Jahren“) als Abschätzung für deren Risiko verwendet. Diese Simulationen stützen sich auf Niederschlagszeitreihen als Eingangsdaten, die je nach Modell und Problemstellung auf ganz unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen



Rückstau im Kanalnetz.

Skalen erhoben werden müssen. Nicht immer kann sich die Simulation dabei auf geeignete Messwerte stützen.

Die räumliche und zeitliche Variabilität von Niederschlag hängt stark von der betrachteten räumlichen und zeitlichen Skala ab. Zwei benachbarte Niederschlagsmessstationen werden fast die gleiche monatliche oder jährliche Regensumme aufzeichnen. Die Tagessummen hingegen können beträchtlich voneinander abweichen und die 5-Minuten-Werte oft sogar total verschieden sein.

Um Kanalnetze richtig simulieren zu können, sind hochaufgelöste Niederschlagsmessreihen (1-Stunden-Werte oder sogar 5-Minuten-Werte) notwendig. Betrachtet man Niederschlag auf solch kurzen Dauerstufen, so zeigt sich eine sehr starke räumliche Variabilität. Schon wenige Kilometer von einer Messstation entfernt, kann das Niederschlagsverhalten ganz anders aussehen, je nach dem, ob man sich z.B. auf der Luv- oder der Lee-Seite eines Höhenzuges befindet. Um ein Gebiet flächendeckend mit geeigneten Niederschlagszeitreihen abzudecken, müsste also ein sehr dichtes Messnetz betrieben werden. Die 295 in Baden-Württemberg verfügbaren Messstationen für den Momentanniederschlag sind dafür bei weitem nicht ausreichend.

Eine räumliche Interpolation von Niederschlagszeitreihen aus den Werten der umliegenden Stationen ist auf einer so hohen zeitlichen Auflösung nicht ohne weiteres möglich. Bei der Interpolation geht ein großer Teil der Variabilität der Werte verloren. Dadurch werden die Extremwerte stark abgemindert, auch viele statistische Charakteristika des Niederschlags, wie z.B. die Autokorrelation, also das Gedächtnis der Zeitreihen, werden stark verändert. Interpolierte Zeitreihen unterscheiden sich also deutlich von gemessenen und können

nicht zur Simulation herangezogen werden.

Mit NiedSim wurde am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie der Universität Stuttgart (LHG) deshalb ein System entwickelt, mit dem an jeder beliebigen Stelle in Baden-Württemberg eine Zeitreihe erzeugt werden kann, die in ihren statistischen Eigenschaften mit gemessenen Reihen übereinstimmt.

Das Grundprinzip von NiedSim ist folgendes: Anstatt die Niederschlagswerte direkt zu interpolieren, werden nur die statistischen Eigenschaften der Zeitreihen interpoliert und als Vorgabewerte für eine stochastische Generierung verwendet. Auf diese Weise kann der Varianzverlust durch die Interpolation verhindert werden.

Der Ablauf von NiedSim im Einzelnen:

1. Zuerst werden die statistischen Eigenschaften (wie z.B. die Verteilung der Werte, die Autokorrelation oder die Skalierung der Niederschlagssummen verschiedener Dauerstufen) aller verfügbaren Niederschlagsstationen berechnet.
2. Mit geeigneten Interpolationsverfahren werden die Werte auf ein gleichmäßiges 1-Kilometer-Raster interpoliert.

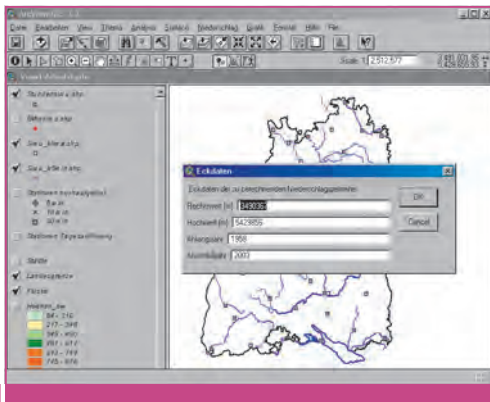
3. Für die Generierung einer Zeitreihe werden diese statistischen Zielwerte vom nächstgelegenen Rasterpunkt ausgelesen.
4. Es wird eine zufällige Zeitreihe mit der richtigen Werteverteilung erzeugt.
5. Diese Initialreihe wird nun durch Tauschen von Werten optimiert. Die Erfüllung der statistischen Zielvorgaben aus 3. wird dabei mit einem Punktesystem bewertet. Ist die Punktzahl minimal, ist die Optimierung fertig.

Die Zeitreihengenerierung von NiedSim ist reziprok, d.h. sie stützt sich neben der geographischen Information auf die statistischen Charakteristika der umliegenden Niederschlagsstationen, die aus meteorologischen Beobachtungen der Vergangenheit gewonnen werden. Implizit wird damit die Bedingung stationärer klimatischer Verhältnisse gestellt. Auch wenn man beobachtete Zeitreihen zur hydraulischen Dimensionierung heranzieht, trifft man damit implizit die Annahme, dass die zukünftigen Niederschlagsereignisse mit den

vergangenen vergleichbar sind. Aktuelle Trendfortschreibungen zeigen jedoch, dass sich das Niederschlagsregime in Süddeutschland in den letzten Jahren verändert hat. Und nach Stand der Klimaforschung wird sich diese Änderung fortsetzen. In der Dimensionierung von Wasserbauwerken muss dies berücksichtigt werden. Das ist gerade in Hinsicht auf die lange Lebensdauer solcher Strukturen wichtig. Nur so ist gewährleistet, dass zum Beispiel ein Hochwasserrückhaltebecken in 50 Jahren noch genauso wirksam ist wie heute.

Zukünftige klimatische Veränderungen können mit sog. „Global Circulation Modells“ – kurz GCM abgeschätzt werden. (In der Regel sind GCM gemeint, wenn in den Medien von Klimamodellen gesprochen wird). In diesen Modellen werden die physikalischen Prozesse in der Atmosphäre und den Ozeanen nachgebildet und dann in die Zukunft gerechnet. GCM sind sehr rechenintensiv und deshalb in ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung begrenzt, räumlich auf 1° bis 2° geographischer Breite und Länge, zeitlich auf bestenfalls sechs Stunden. Für die Generierung von Niederschlagszeitreihen ist diese Auflösung nicht ausreichend. Außerdem ist bekannt, dass GCM die mittleren Niederschlagsverhältnisse viel besser abbilden können als die Extrema. Diese sind aber in der hydraulischen Dimensionierung besonders wichtig. Da die statistischen Eigenschaften des Niederschlags stark von der betrachteten Skala abhängen, ist zu erwarten, dass sich klimatische Veränderungen auf unterschiedlichen Skalen ganz unterschiedlich auswirken, und dass sich die Extrema ganz anders entwickeln als die mittleren Verhältnisse. Trendanalysen aus beobachteten Niederschlagszeitreihen zeigen, dass die jährliche Niederschlagssumme in Süddeutschland in den letzten Jahrzehnten signifikant zugenommen hat. Gleichzeitig gab es Verschiebungen im Jahresgang. Die Winter wurden feuchter und die Sommer tendenziell trockener.

Anhand von überregionalen Luftdruckfeldern wurde eine Wetterlagenklassifikation mit zwölf Wetterlagen („circulation patterns“ – CPs) erstellt. Mit dieser Einteilung konnte gezeigt werden, dass sich die Wetterlageabfolge in diesem Zeitraum deutlich verändert hat. In den Sommermonaten nahmen trockene Hochdruckwetterlagen zu. Gleichzeitig zeigt sich,



Die graphische Oberfläche für das Niederschlagsgenerierungssystem NiedSim. NiedSim wird von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) operationell eingesetzt.

dass die Wetterlagen auf die Atmosphären-temperatur reagieren. Bei höheren Temperaturen sinkt zwar die Niederschlags-wahrscheinlichkeit, wenn es aber regnet, zeigen sich häufiger sehr hohe 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten. Dies lässt darauf schließen, dass in Zukunft mit einer höheren Durchschnittstemperatur bei gleichzeitig höheren Extremen in den Kurzzeitniederschlägen zu rechnen ist. Erklären lässt sich dies damit, dass bei höheren Temperaturen die Verdunstung steigt, die Atmosphäre mehr Wasser aufnehmen kann und konvektive Aufwinde verstärkt werden. Es kann also mehr Wasser länger gehalten werden. Regnet es dann, dann umso plötzlicher.

Das Risiko von Flash-Floods könnte also ansteigen, selbst wenn die Sommer generell trockener würden. Dieser Trend zu mehr Kurzzeitextremen kann schon jetzt beobachtet werden. Dies zeigen (07) und (08). Setzt man die 1-Stunden-Werte des Niederschlags zu den Tagessummen ins Verhältnis, zeigt sich folgendes: Der Anteil am Tagesmaximum, der in fünf Minuten oder einer Stunde fallen kann, hat sich in den letzten Jahren an fast allen Messstationen Baden-Württembergs stetig erhöht.

Für (07) und (08) wurden 30 Niederschlagsstationen ausgewertet, die von 1991 bis 2004 alle in einer sehr hohen Datengüte zur Verfügung stehen. Die zeitliche Auflösung des Datensatzes beträgt 30 Minuten. Aus den Daten wurden die beobachteten Extrema isoliert und deren Skalierungseigenschaften untersucht. Dafür wurden von jeder Station und auf unterschiedlichen Dauerstufen zwischen 30 Minuten und 24 Stunden jeweils die fünf höchsten gemessenen Intensitäten pro Jahr ermittelt. Für alle Dauerstufen wurden diese Werte über zwei Zeiträume, einmal 1988 bis 1995 und 1996 bis 2004 gemittelt. Aus den gemittelten Werten aller Stationen kann dann die in (07) gezeigte Skalierungskurve erstellt werden.

Auf den ersten Blick sehen die Kurven für die beiden Zeiträume recht ähnlich aus. Um die Unterschiede zu verdeutlichen, wurden in (08) die Werte für die beiden Zeiträume in Verhältnis zueinander gesetzt. So erkennt man, dass sich die Skalierungseigenschaften grundlegend geändert haben. In den kurzen Dauerstufen bis zwei Stunden kann im späteren Zeitraum ein um sieben Prozent größerer Anteil des 24-Stunden-Maximum

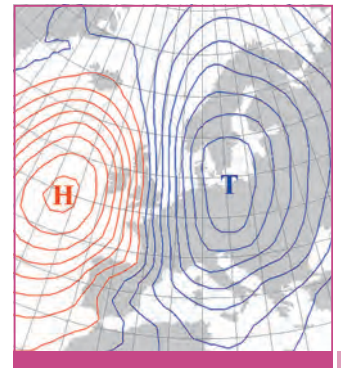
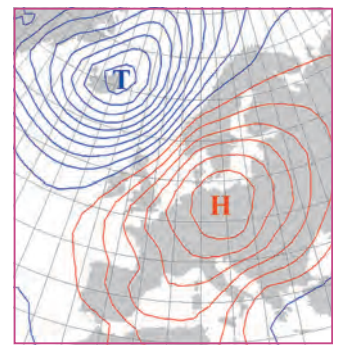
fallen als im Zeitraum von 1988 bis 1995. Die relativen Intensitäten mittlerer Dauer von vier Stunden bis unter 24 Stunden nehmen hingegen ab. In Anbetracht des kurzen Erhebungszeitraums sind diese Ergebnisse recht auffällig.

Aktuell wird untersucht, wie die unterschiedlichen Klimawandelsignale aus den verschiedenen Quellen in die Generierung von Zeitreihen implementiert werden können. Dafür wurde das Programmsystem NiedSim-Klima entwickelt, das sich im Moment in der Testphase befindet. Die zukünftige Wetterlagenabfolge wird dabei aus den GCM abgeschätzt. Aus den Beobachtungen der Vergangenheit wurde der Zusammenhang zwischen jeder Wetterlage, bei unterschiedlichen Temperaturniveaus und der Verteilung der 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten bestimmt. Nimmt man diesen Zusammenhang als konstant an, kann man aus der Wetterlagenabfolge und den Temperaturprognosen des GCM eine Abschätzung der zukünftigen Verteilung der 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten gewinnen. Das zukünftige Skalierungsverhalten zwischen Niederschlägen unterschiedlicher Dauerstufen kann über eine Trendfortschreibung in die Zukunft extrapoliert werden.

4. Hydrologische Modellierungen

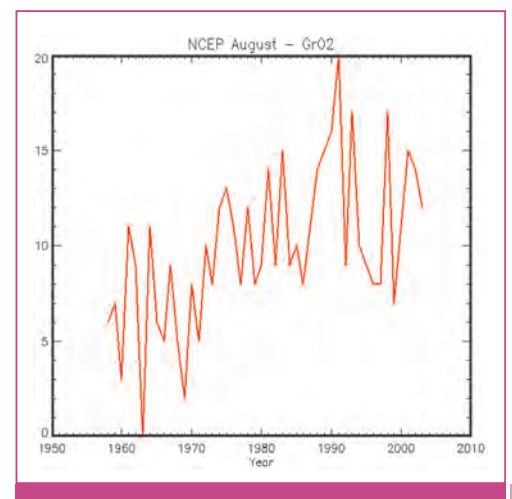
In der Wasserwirtschaft ist die hydrologische Modellierung ein wichtiges Hilfsmittel geworden. Die so genannten Niederschlags-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) können sowohl für kurz- und mittelfristige Problemstellungen (z.B. Hochwasservorhersage), als auch für langfristige Planungszwecke (z.B. Bau von Hochwasserschutzmaßnahmen) eingesetzt werden (09).

Allerdings sind hydrologische Modelle nach wie vor nicht uneingeschränkt einsetzbar, da es oft an ausreichenden Eingangsdaten mangelt oder Parameter, die gewisse Modellprozesse beschreiben, nur sehr schwer abzuschätzen sind. Um ein hydrologisches Modell kalibrieren zu können, sind verlässliche Daten, wie gemessene Abflüsse, Niederschlag oder Temperatur notwendig. Spe-



Mittlere Luftdruckverhältnisse an zwei typischen Wetterlagen (circulation patterns, CP). CP3 (links) – Hochdruckwetterlage, wenig Niederschlag, seltene Extremwerte. CP11 (rechts) generell eher nass, häufig extreme 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten.

05



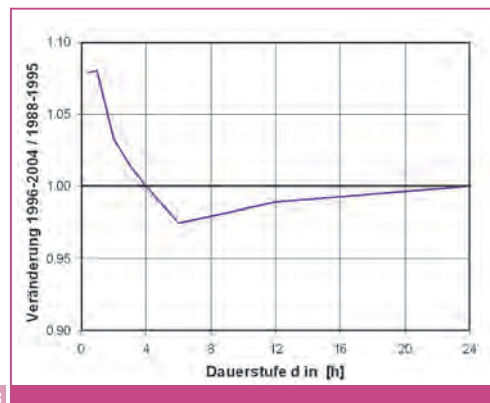
Häufigkeit von CPs der Gruppe 2 (Hochdruckwetterlagen) im August von 1958 bis 2004.

06



07

Skalierung von Extremwerten unterschiedlicher Dauerstufe zwischen den Zeiträumen bis 1995 und ab 1996. Die Skalierung erfolgt nicht in absoluten Werten, sondern es werden alle Werte aller Dauerstufen kleiner 24-Stunden auf das mittlere Extrem der 24-Stunden-Summe der jeweiligen Station bezogen. So erhält man normierte Extrema zwischen 0 und 1. Ein Wert von 0,73 beispielsweise für die Dauerstufe von vier Stunden bedeutet, dass im Durchschnitt der fünf größten gemessenen 4-Stunden-Intensitäten 73 Prozent des Niederschlags gefallen sind, der im Schnitt über die fünf maximalen 24-Stunden-Ereignisse auftrat.



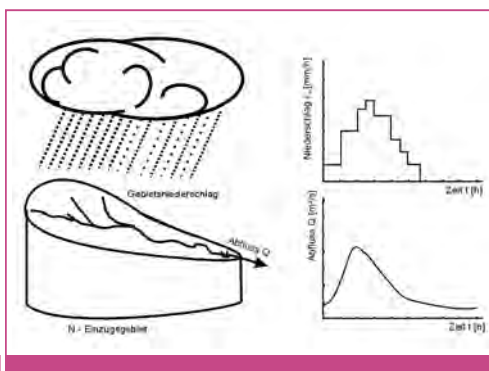
08

Zu- und Abnahme der Extrema verschiedener Dauerstufen zwischen den Zeiträumen 1988 bis 1995 und 1996 bis 2004.

ziell lange beobachtete Abflusszeitreihen liegen meist nur für größere Flussläufe vor, weshalb gerade die hydrologische Modellierung von kleinen unbeobachteten Einzugsgebieten (EZG) nach wie vor eine große Herausforderung darstellt. Aber auch die meteorologischen Eingangsdaten unterliegen einer großen zeitlichen und räumlichen Variabilität, die vom eingesetzten Modell erfasst werden müssen. Andere beeinflussende Faktoren, wie z.B. Landnutzung oder Bodeneigenschaften in den EZG, die das Abflussverhalten wesentlich beeinflussen können, werden in vielen hydrologischen Modellen gar nicht berücksichtigt. Dadurch sind physikalische Modelle für viele praktische Anwendungen nicht verwendbar. Deshalb bedient man sich Modellen, die versuchen, die Variabilität der Eingangsgrößen herauszufiltern. Oft werden dabei Parameter eingesetzt, die nicht direkt mit physikalisch messbaren Größen zusammenhängen und mit Hilfe von Kalibrierungsmethoden abgeschätzt werden.

Die Abschätzung dieser hydrologischen Modellparameter ist eine große Herausforderung, die mit Hilfe zunehmender Rechnerkapazitäten und der Entwicklung komplexer Optimierungsalgorithmen in den letzten Jahren immer besser gemeistert werden konnte. Allerdings hängen die Parameter dieser angepassten hydrologischen Modelle nach wie vor von den Eingangsdaten der Modelle ab, deren Qualität aufgrund von Messfehlern nicht gewährleistet werden kann.

Ein Niederschlags-Abfluss-Modell ist das hydrologische Transportmodell HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), das häufig für hydrologische Fragestellungen angewendet wird. Es wurde am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie der Universität Stuttgart kontinuierlich weiterentwickelt und steht heute in verschiedenen Versionen zur Verfügung, die für unterschiedliche Zielsetzungen angewendet werden können. Die Unterschiede der einzelnen Versionen liegen u.a. in der Art und Weise, wie die Eingangsdaten (z.B. Niederschlag und Temperatur) im Modell verarbeitet werden. In einer Version werden Niederschlags- und Temperaturdaten gleich verteilt über ein gesamtes Teileinzugsgebiet (TEZG) angenommen, in einer weiteren können diese Eingangsdaten rasterzellengenau berücksichtigt werden. In dieser räumlich unterteilten Version werden somit unterschiedliche Niederschlags- und Temperaturdaten in einem TEZG verwendet. Dadurch wird die Topographie eines TEZG und die damit unterschiedlichen Niederschlags- und Temperaturverteilungen als Zusatzinformation in das Modell aufgenommen.



09

In der Wasserwirtschaft ist die hydrologische Modellierung ein wichtiges Hilfsmittel geworden. Die so genannten Niederschlags-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) können sowohl für kurz- und mittelfristige Problemstellungen (z.B. Hochwasservorhersage), als auch für langfristige Planungszwecke (z.B. Bau von Hochwasserschutzmaßnahmen) eingesetzt werden.

Eine weitere Modifikation des HBV-Modells betrifft die Menge an berücksichtigten Eingangsdaten. Dadurch können Größen, wie z.B. Landnutzung, Bodeneigenschaften, Globalstrahlung, etc. in das Modell mit einfließen, die die Optimierungsalgorithmen bei der Parameterschätzung verbessern. Die Zielsetzungen bei der hydrologischen Modellierung sind, wie bereits erwähnt, sehr verschieden, so dass man jeweils unterschiedliche Zielfunktionen und Optimierungsalgorithmen bei der Modellkalibrierung anwenden muss. Eine einzelne Zielfunktion kann nie alle Teile einer Abflussganglinie beschreiben.

5. Ausblick

Zu Beginn der Forschungen im Bereich der hydrologischen Modellierung bestand die Hoffnung, dass es mit der stetig wachsenden Rechenleistung von Computersystemen irgendwann möglich sein wird, die angewendeten Modelle so weit zu verfeinern, dass die Realität fast fehlerfrei abgebildet wird. Leider hat sich diese Hoffnung nicht erfüllt. Je komplexer ein Modell ist, desto höher ist auch sein Bedarf an Eingangs- und Kalibrierungsdaten. Dieser Bedarf wird von Beobachtungen und Messungen schon heute bei weitem nicht mehr gedeckt.

Aus diesem Grund verschiebt sich der Fokus hydrologischer Forschung zusehends. Anstatt die Modelle an sich immer weiter zu verbessern, wird die Analyse der Modellfehler immer wichtiger: Wie robust ist das Modell gegen Fehler in den Eingangsdaten? Reagiert es in der gesamten Bandbreite immer gleich? Wie kann ich es auf ein Gebiet mit schlechter Datenlage kalibrieren? Gibt es eine statistische räumliche oder zeitliche Struktur in den Modellfehlern oder ist es ein „weißes Rauschen“? Dies ist vor allem in der Radarforschung von großer Bedeutung.

Bei diesen Analysen kommen neue statistische Verfahren zum Einsatz, vor allem um auch nicht-lineare Zusammenhänge abzubilden. In der Hydrologie sind Extremwerte (Dürren oder Überflutungen) von großer Bedeutung und die führen verglichen mit den mittleren Verhältnissen oft ein Eigenleben. Mit gängigen Methoden wie der Korrelation werden sie zum Teil gefährlich unterschätzt. • *András Bárdossy*

*Jochen Seidel, Thomas Pfaff
Ferdinand Beck, Felix Herma*

DIE AUTOREN

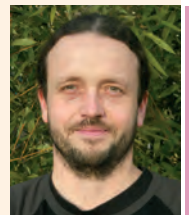
PROF. DR. ANDRÁS BÁRDOSSY

studierte Mathematik an der ELTE Universität in Budapest und promovierte dort im Jahr 1981. Nach diversen Forschungsaufenthalten an internationalen Institutionen, unter anderem als Associate Professor an der Waterloo Universität in Kanada, erfolgte 1994 eine zweite Promotion an der Universität Karlsruhe. Seit 1994 ist er Professor am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart und seit 2003 Leiter des Lehrstuhls für Hydrologie und Geohydrologie mit Forschungsschwerpunkten im Bereich der Hydrologischen Modellierung und Hydroklimatologie.



DR. JOCHEN SEIDEL

studierte Geographie an der Universität Freiburg und promovierte dort im Jahr 2004. Von 2005 bis 2007 war er in einem Forschungsprojekt zur Rekonstruktion und Analyse von historischen Hochwasserereignissen tätig. Seit 2008 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart.



DIPL.-ING. THOMAS PFAFF, M.ENG.

studierte Umweltschutztechnik an der Universität Stuttgart und schloss sein Studium mit einer Masterarbeit über die Bestimmung von Schneefallintensität und Wolkenwassergehalt mittels passiver Mikrowellenradiometrie an der Universität Tokyo (Japan) ab. Seit 2006 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie, wo er sich in seiner Forschungsarbeit mit den Möglichkeiten der quantitativen Verbesserung von Wetterradar-daten und deren Nutzung für die Hochwasservorhersage beschäftigt.



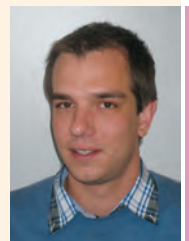
DIPL.-ING. FERDINAND BECK, M.SC.

studierte Umweltschutztechnik und Water Resources Engineering and Management an der Universität Stuttgart und der ENTPE Lyon. Seit 2005 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie und beschäftigt sich dort hauptsächlich mit Statistik und Stochastik im Bereich des Klimas. Bisherige Forschungsprojekte umfassten die synthetische Generierung von Niederschlagszeitreihen, sowie die Auswertung und Korrektur von Klimamodelldaten.



DIPL.-ING. FELIX HERMA

ist seit 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Abteilung Hydrologie und Geohydrologie. Er studierte Umweltschutztechnik an der Universität Stuttgart. Derzeit arbeitet er an dem Verbundforschungsprojekt Eva-Sim – Gekoppelte Verkehrs- und Hydrauliksimulation zur Steuerung von Verkehr bei Evakuierungsmaßnahmen. Hier liegt der Fokus auf der Generierung von räumlichen und zeitlichen Verläufen von hydro-meteorologischen Extremereignissen (z.B. Gewitter mit Starkregen).

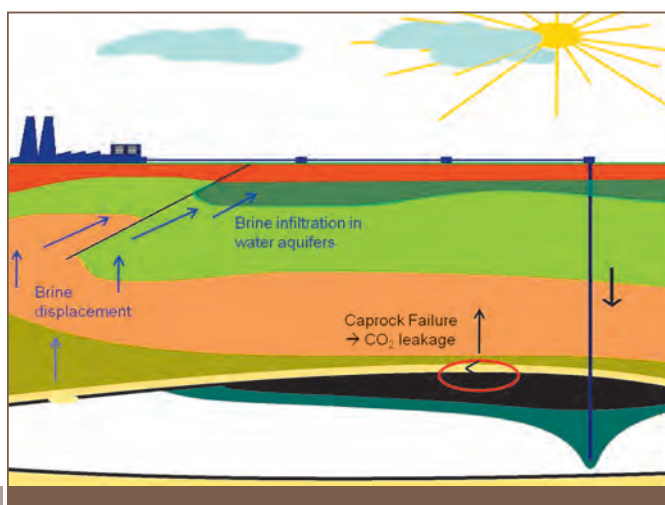


Kontakt

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart
Tel. 0711/685-64679, Fax 0711/685-64681
Internet: <http://www.iws.uni-stuttgart.de>

Wie Grundwasser durch Speicherung von Gasen im Untergrund beeinträchtigt wird

Eine Bestandsaufnahme



Prinzipielle Gefährdungsszenarien, ausgelöst durch Injektion von Kohlendioxid in tiefe geologische Formationen: Deckschichtversagen und Entweichen des Gases in weniger tiefe Schichten, Salzwasserdrängung und Migration in trinkwasserrelevante Aquifere.

Der natürliche Untergrund wird im Industriezeitalter intensiv genutzt. Neben der Gewinnung von Rohstoffen wie Gas, Kohle, Öl, Metallen oder Trinkwasser, um nur ein paar prominente Vertreter zu nennen, gewinnt die Speicherung und Deponierung von Stoffen im Untergrund zunehmende Bedeutung. Damit geht oftmals ein Risiko für das Grundwasser einher, welches ein wichtiges Schutzgut für die Trinkwasserversorgung darstellt. In diesem Beitrag soll die Grundwassergefährdung durch Speicherung von Gasen im Untergrund beleuchtet werden, insbesondere als Folge der derzeit intensiv diskutierten CCS (Carbon Capture and Storage) Technologie. Das Wissen darüber ist aufgrund der Komplexität der Prozesse noch sehr begrenzt, und großer Forschungsbedarf ist vorhanden.

1. Einleitung

Die Speicherung von Gasen im Untergrund wird derzeit sehr intensiv im Rahmen einer nachhaltigen Energieversorgung diskutiert. Die Abkehr vom Atomstrom in Deutschland stellt die Nutzung anderer Energieträger wieder verstärkt in den Vor-

dergrund. In jedem Fall müssen die Kapazitäten regenerativer Energie sehr massiv ausgebaut werden. Dennoch ist zu erwarten, dass konventionelle Kraftwerkstechnologien zur Verfeuerung von Kohle oder Erdgas (Methan) noch sehr lange benötigt werden. Kohlekraftwerke sind für ihren hohen Ausstoß an klimaschädlichem Koh-

lendioxid stark in die Kritik geraten, dennoch muss davon ausgegangen werden, dass gerade diese Art der Energieerzeugung aufgrund der weltweit großen Kohlevorkommen noch sehr lange genutzt wird. Ein einseitiger Verzicht auf Kohleverbrennung in Staaten wie Deutschland wäre für das globale Klimaproblem nur ein Tropfen auf den heißen Stein, solange in anderen Ländern wie zum Beispiel China oder Indien nach wie vor eine Vielzahl neuer Kohlekraftwerke in Betrieb gehen. Als eine Möglichkeit, die Kohleverbrennung klimafreundlicher zu gestalten, wird deshalb derzeit intensiv an der so genannten CCS-Technologie geforscht. CCS steht für *Carbon Capture and Storage* und umfasst die Abtrennung des bei der Verbrennung entstehenden Kohlendioxids (CO_2) sowie dessen Speicherung in tiefen geologischen Gesteinsformationen, vor allem in salinen Aquiferen, d.h. Salzwasser führenden Grundwasserleitern. Während für diese Technologie noch eine ganze Reihe von Risiko- und Machbarkeitsuntersuchungen durchzuführen sind, ist ein wichtiges Thema die mögliche Gefährdung von Grundwasserressourcen durch diese Art der Nutzung des natürlichen Untergrunds.

Durch die Injektion großer Mengen an Kohlendioxid wird aus den entsprechenden geologischen Formationen ursprünglich vorhandenes Salzwasser verdrängt. Die Injektion erfordert je nach Permeabilität (Durchlässigkeit) des Reservoirs hohe Drücke. Dementsprechend kann ein Teil des benötigten Porenraums für das CO_2 durch Kompression von Gestein und Fluiden erzeugt werden, der andere Teil muss durch Verdrängung von Salzwasser gewonnen werden. Es hängt sehr stark von den großräumigen hydrogeologischen Gegebenheiten ab, wohin dieses Salzwasser migriert, und ob es möglicherweise trinkwasserrelevante Schichten in geringerer Tiefe erreicht. Des Weiteren sind im *Worst-Case* einer CO_2 -Leckage mögliche Einflüsse der geochemischen Milieuveränderungen zu befürchten, was beispielsweise zur Freisetzung von Schwermetallen führen könnte. Das Wissen über derartige Vorgänge ist noch sehr begrenzt. Die Absicht dieses Beitrags ist daher, einen Überblick über bisherige Arbeiten auf diesem Gebiet zusammen zu fassen und sie in einen Zusammenhang zur aktuellen Forschung der *Arbeitsgruppe CO₂-Speicherung* am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystem-

SUMMARY

Gas storage in the subsurface has become an important technology for power/energy supply. Natural gas, pumped through pipelines from countries like Russia, is stored in caverns but in particular in the pore space of permeable subsurface layers in order to buffer potential times of power and energy deficiencies. The storage of carbon dioxide (CO_2) has a different purpose: the CO_2 is captured from fossil-fueled power plants and injected into deep geologic formations in order to reduce the concentration of this greenhouse gas in the atmosphere. Due to the still abundant availability of coal it is very probable that this source of energy will be used also for the century ahead. Thus, capturing and storing CO_2 (CCS) is a technology that might be necessary to be implemented on large scales to mitigate global warming. CCS requires injection of large amounts of CO_2 into the subsurface, and results in a high-pressure displacement of resident brine. There are two principal risks for groundwater (drinking water resources) associated with CCS; 1) the intrusion of displaced brine in shallow drinking water aquifers, 2) the intrusion of CO_2 into such aquifers. In both cases, complex hydraulic and geochemical processes need to be understood in order to assess these risks.

modellierung zu stellen. Hier wird bereits seit gut zehn Jahren an Modellkonzepten gearbeitet, die eine numerische Simulation von Prozessen bei der Injektion von CO_2 in geologische Formationen ermöglichen.

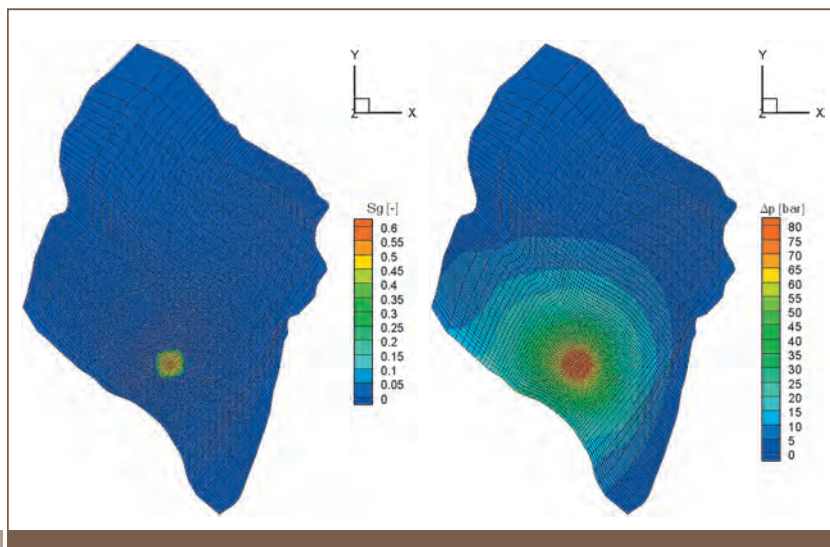
Der Untergrund ist jedoch nicht nur für mögliche CO_2 -Speicherprojekte von Interesse, sondern auch durch konkurrierende Nutzung für die Speicherung von Erdgas, die Geothermie, die Endlagerung nuklearer Abfälle etc. Insbesondere Erdgasspeicherung in Porenspeichern im Untergrund kann im Zuge der Energiewende eine verstärkte Bedeutung erhalten. Während diese Technologie von den großen Energieversorgern bereits seit geraumer Zeit zum Aufbau von kurzfristig verfügbaren Gasreserven eingesetzt wird, kann sie in der Zukunft genutzt werden, um Überkapazitäten von erneuerbaren Energiequellen (Windkraft, Solarstrom, etc.) in stofflich speicherbare Energie in Form von Methan umzuwandeln und im Untergrund zu speichern. Auch in diesem Fall werden, ähnlich wie bei der CO_2 -Speicherung, große Porenvolumina benötigt, und es ist zu untersuchen, welche Auswirkungen dies auf das Grundwasser haben kann.

2. Druckerhöhung und Salzwasserverdrängung

2.1 Druckerhöhung und Druckausbreitung

Während der Injektion von überkritischem CO_2 in den Untergrund, typischerweise in Tiefen von mehr als 700 bis 1000 Metern, erhöht sich der Druck im Speichergestein

zuerst lokal rund um die Injektionsstelle. Im weiteren Verlauf breitet sich die Druckerhöhung dann radial von der Bohrstelle in die Speicherschicht aus und die Zone des Überdrucks wandert zu den Randgebieten der Speicherformation. Durch die Verteilung und Ausbreitung der Überdrücke im Gebiet wird die Druckanomalie nach Abschalten der Injektion allmählich wieder abgebaut [1]. Je nach Injektionsrate und Injektivität sind Druckerhöhungen in einer Größenordnung von 10 bis 100 bar zu erwarten.



Ausbreitung des Kohlendioxids als Phase (links, dargestellt ist die Phase-sättigung des Porenraums) und Ausbreitung der Druckerhöhung in Folge der Injektion (rechts). Die laterale Ausdehnung des Gebiets beträgt etwa 40 km x 40 km. Es wird deutlich, dass Druckerhöhungen eher auf regionaler Skala stattfinden, während sich das Gas selbst wesentlich weniger weit ausbreitet [2].

Echte Messdaten und praktische Erfahrungen zur Druckausbreitung sind derzeit noch nicht vorhanden, da Projekte in der entsprechenden Größenordnung erst einzeln im Entstehen sind, weshalb sämtliche Erkenntnisse vorerst noch auf mathematisch-numerischen Simulationen beruhen. Hierzu gibt es aber bereits eine Reihe von Arbeiten, unter anderem auch aus der Arbeitsgruppe am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung. Die Beobachtung von Druckerhöhungen in lateraler Richtung in Simulationen ist bis zu einer Entfernung von 200 Kilometern von der Injektionsstelle möglich [3]. Nach Ende der Einspeisung beginnt sich der Überdruck um die Injektionsstelle herum relativ schnell zu moderaten Werten hin abzubauen, während sich die Ausmaße des von der Druckerhöhung beeinflussten Gebiets noch weiterhin vergrößern [3], [2]. Weiterhin wird beobachtet, dass sich der restliche Drucküberschuss sehr persistent hält und sich daher die endgültige Relativierung der Druck-

anomalie zurück zu den ursprünglichen Bedingungen zeitlich lange hinauszögert. So baut sich zum Beispiel der Großteil des Drucküberschusses nach etwa nochmals der gleichen Zeit, die die Injektion andauerte, ab, wohingegen die endgültige Rückkehr zu Anfangsbedingungen einige Jahrhunderte dauert [1].

Die Druckausbreitung in vertikaler Richtung bzw. in über der Speicherschicht liegende Aquifere verhält sich stark abhängig von den Permeabilitäten der darüber liegenden Deckschichten. So wird in Modellierungen beobachtet, dass eine sehr niedrige Deckschichtdurchlässigkeit von etwa 10^{-20} m² keine vertikale Druckmigration durch diese Schicht zulässt und sich der Überdruck infolge dessen nur über eine seitliche Ausbreitung relativieren kann. Dies bedeutet, dass sich das Einflussgebiet des Drucküberschusses in der Speicherschicht vergrößert, aber sich in höher liegenden wasserführenden Schichten praktisch keine Druckerhöhung bemerkbar macht. Im Gegenzug lässt sich bei Permeabilitäten von 10^{-17} m² und größer eine stärkere Druckausbreitung in vertikaler Richtung verzeichnen. In diesem Fall sind die seitlichen Ausmaße des von der Druckerhöhung beeinflussten Gebiets aber wesentlich geringer [4]. Auch [5] beschreiben stark variierende Druckausbreitungen infolge verschiedener Deckschicht- und Speicherschicht-Permeabilitäten. Beispielsweise wurde in einem System mit zwei Deckschichten, eine mit höherer Permeabilität unmittelbar über der Speichereinheit und eine zweite weiter oben liegende mit geringerer Durchlässigkeit, das Druckabbauverhalten simuliert. Dabei kann beobachtet werden, dass die direkt darüber liegende Deckschicht einen Druckabbau in der Speicherschicht zulassen würde, es aber weiter oben in einem flachen Aquifer, unterhalb der zweiten Deckschicht mit der geringeren Durchlässigkeit, zu einem vermehrten Druckaufbau kommt, und sich dort der Grundwasserspiegel erheblich anheben könnte [5].

Infolge vertikaler Druckausbreitung werden Druckhöhenanstiege in darüber liegenden Schichten von bis zu 25 Metern beobachtet [1]. Auch in flachen, gespannten Aquifere kann ein erheblicher Druckzuwachs von einigen bar in einem Gebiet von großer Ausdehnung verzeichnet werden [5].

2.2 Salzwasserverdrängung

Wie schon erwähnt, kann der für das injizierte CO₂ benötigte Porenraum durch Kompression von Gestein und Fluiden sowie durch Verdrängung von Salzwasser frei werden. In der frühen Phase der Injektion dominiert die Kompressibilität; das langsame Abklingen der Druckspitzen wird dann von der Salzwasserverdrängung begleitet. Für den Salzwasserfluss durch die Deckschicht (*Caprock*) hindurch ist deren Permeabilität von entscheidender Bedeutung. Bereits ein kleiner Fluss durch die Deckschicht kann den Drucküberschuss in der Speicherformation abmildern. Dennoch besitzen solche Deckschichten, die einen geringen Wasserfluss zulassen, immer noch ein volles Rückhaltevermögen bezüglich des Kohlendioxids. Die totalen Durchflussmengen durch die Deckschicht können für sich betrachtet zwar signifikant sein, jedoch finden sie verteilt über das ganze Reservoir, d.h. über sehr große Flächen statt, und es kommt so zu keiner größeren Wasserverdrängung in flache Aquifere hinein [3], [6]. Auch innerhalb der Speicherschicht sind die lateralen Fließgeschwindigkeiten und Transportdistanzen überschaubar im Bereich von wenigen Hundert Metern innerhalb von 100 Jahren. Da dies verglichen mit der regionalen Grundwasserströmung keine großen Geschwindigkeiten bzw. Distanzen sind, wird dies als vernachlässigbar eingeschätzt [4]. Zu beachten wäre hier im Einzelfall vielmehr, ob sich durch den Druckanstieg innerhalb der Speicherformation eine Veränderung oder Umkehrung der ursprünglichen Grundwasserfließrichtung einstellt, und ob sich dadurch Veränderungen auf hydrogeologische Gegebenheiten einstellen, wie z.B. Änderung des Basisabflusses zu Oberflächengewässern oder Änderung der Grundwasserneubildung.

Zu erwähnen ist, dass die bisher zitierten Autoren sowohl in der Speicherformation als auch in den darüber liegenden Aquiferen nur sehr geringfügige Änderungen des Salzgehalts beschreiben [4], [1], [3]. Am ehesten besteht eine lokal begrenzte Gefahr der Verunreinigung von Frischwasser, wenn Salzwasser aus der Speicherformation durch hochleitende Klüfte und Verwerfungen oder durch schlecht abgedichtete Bohrungen in höher gelegene Schichten gepresst wird [3], [7]. Dies muss

durch sorgfältige Untersuchung und Auswahl der Projektstandorte vermieden werden.

3. CO₂ im Grundwasser

Im Rahmen von Risikostudien zur CCS Technologie ist auch die Möglichkeit des Aufstiegs von Kohlendioxid aus der Speicherschicht in flachere (oberflächennahe) Aquifere in Betracht zu ziehen. Prinzipiell sind drei Wege des Aufstiegs von Kohlendioxid in höher liegende Wasser führende Schichten geben; 1) entlang alter oder stillgelegter Brunnen/Bohrungen und deren Gehäuse, 2) entlang geologischer Verwerfungen und Gesteinsspalten, oder 3) durch die darüber liegende Deckschicht hindurch, wobei letzteres als unwahrscheinlich gilt [8]. Grundsätzlich gilt hier, dass die Leckage von CO₂ ins Grundwasser eigentlich als so genanntes Restrisiko bezeichnet werden müsste. Dem Austritt entlang von stillgelegten Brunnen kann durch gewissenhafte Ingenieursarbeit entgegengewirkt werden; der Aufstieg entlang von Störungen und durch die Deckschicht lässt sich durch sorgfältige Standortauswahl vermeiden. Dies bedeutet, dass die nachfolgenden Untersuchungen vom schlechtmöglichsten Szenario (*Worst-Case*) ausgehen.

Der Eintritt des CO₂ in höher liegende Grundwasserleiter und die damit einhergehende Lösung des Gases in der Wasserphase kann zu erheblichen Veränderungen der Geochemie des Aquifers führen. Dies beinhaltet eine Versauerung des Grundwassers, welches durch einen gesunkenen pH-Wert angezeigt wird; dadurch resultierend eine teilweise Auflösung von Mineralien aus dem Umgebungsgestein, das wiederum die Freisetzung von hohen Konzentrationen an Spurenelementen bewirkt. Dies könnte eine Kontaminierung des Grundwassers auslösen und somit auch eine Gefährdung des Trinkwassers darstellen [9].

Ein Entweichen des Fluids entlang von Bohrlöchern kann durch Korrosion der Brunnengehäuse oder durch Schädigung des Zementverschlusses geschehen. Beide Vorgänge könnten durch eine Veränderung des Umgebungswassers durch gelöstes CO₂ oder salzhaltiges Grundwasser an sich hervorgerufen werden [9]. Das Versagen eines Brunnens wird für die Ermög-

lichung eines CO_2 -Aufstiegs als größte Gefahr genannt [10], wobei es in salinen Aquiferen weniger stillgelegte Bohrungen gibt als beispielsweise in Kohle-, Öl- oder Gasfeldern [9]. Mechanismen, die eine Reaktivierung von geologischen Verwerfungen oder Gesteinsspalten bewirken können, die sich so zu bevorzugten Fließpfaden ausbilden, hängen von der individuellen geomechanischen Situation ab. Um eine genauere Abschätzung des Risikos zu betreiben, müssen die eventuellen Leckageraten entlang der Bruchlinien quantifiziert werden [11].

Die Löslichkeit von CO_2 in Wasser ist stark abhängig von der Temperatur, dem herrschenden Druck und dem Salzgehalt des Wassers. CO_2 ist in Frischwasser besser löslich als in salinem Grundwasser [12]. In Simulationen, in denen Kohlendioxid direkt in einen flachen Aquifer eingeleitet wurde, löste sich das Gas nach dem Kontakt mit Grundwasser unmittelbar und vollständig darin auf [13].

Bei der Hydrolyse von CO_2 entsteht zuerst Kohlensäure, welche dann zum größten Teil zu Wasserstoff-Ionen (H^+) und Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3^-) dissoziiert. Dies bedeutet, dass bei der Lösung der Säure in Wasser Wasserstoff-Ionen freigesetzt werden, wodurch ein Überschuss dieser Ionen entsteht. Dieses vermehrte Vorhandensein von H^+ -Ionen spiegelt sich im pH-Wert des Grundwassers wieder, da dieser ein Maß für die H^+ -Ionenkonzentration ist. In allen Versuchen und Simulationen des CO_2 -Eindringens in Grundwasser wurde ein sofortiger Abfall des pH-Werts nachgewiesen [12], [13], [14]. Die Abnahme des pH-Werts ist in jedem Fall stark abhängig vom Partialdruck (auch stellvertretend für die Menge) des CO_2 , mit dem dieses in den Aquifer eintritt [13], [14]. Daraus können sich Minderungen des pH-Werts um bis zu drei Einheiten [15], [16] ergeben.

Zusätzlich entstehen bei der Lösung von CO_2 in Wasser erhöhte Konzentrationen von Hydrogencarbonat-Ionen, welche zusammen mit dem gelösten CO_2 ($\text{CO}_{2(\text{aq})}$), der Kohlensäure (H_2CO_3) und dem Carbonat-Ion (CO_3^{2-}) zu den gesamten anorganisch gebundenen Kohlenstoffen zählen [13].

4. Geochemie: pH-Wert und Mineralogie

Nachfolgend wird eine Übersicht der Literatur über geochemische Aspekte, die sich aus pH-Wert Änderungen resultieren, gegeben. Für die Autoren ist dieses Fachgebiet noch ein NEUES, es zeigt sich jedoch, dass eine Verknüpfung geochemischer Prozesse mit Strömungs- und Transportprozessen (Transport der reaktiven Komponenten) notwendig ist.

4.1 Grundprinzipien des Carbonat-Puffers

Die Beeinträchtigung des chemischen Gleichgewichts im Grundwasser, welches durch den Überschuss an H^+ -Ionen, also einer Versauerung, entstanden ist, versucht das System durch vermehrte Auflösung von vorrangig kalkhaltigem Gestein auszugleichen. Diese Vorgänge nennt man Neutralisation oder auch den Puffer-Mechanismus des aquatischen Systems. Das Kalzit, die häufigste Form des Calciumcarbonats (CaCO_3), spielt dabei eine wichtige Rolle, da es gut löslich ist und es deshalb schnell zu einer Bindung der Wasserstoff-Ionen kommt, die zur Neutralisation des Grundwassers führen. Bei der Reaktion von Kalzit mit Wasserstoff-Ionen entstehen als Produkte die Kationen Ca^{2+} und abermals Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3^-), welche die Alkalinität des Grundwassers erhöhen. Die Alkalinität ist das Säurebindungsvermögen einer Lösung, also die Fähigkeit Wasserstoff-Ionen zu binden. Durch die Lösung der Carbonat-Mineralien, also des Kalzits, aber auch die langsamere Lösung des Dolomits, erhält das System eine Rückfederung zum chemischen Gleichgewicht und der pH-Wert steigt wieder [14], [16]. Die dabei entstehenden, hohen Konzentrationen an Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+}) und an gesamtem anorganisch gebundenem Kohlenstoff sind ein guter Indikator für den Ablauf dieser Puffer-Reaktion [17].

Der relativ raschen Auflösung von Karbonaten steht eine sehr viel langsamere Zersetzung von Silikaten, wie zum Beispiel Feldspate und Schichtsilikate gegenüber [12]. Ein Aquifer, dessen Gestein Carbonat-Mineralien enthält, weist eine hohe Alkalinität und dadurch ein hohes Potenzial zur Pufferung von pH-Wertänderungen

auf [13], wohingegen ein Aquifer mit Mangel an Carbonaten diese Kapazität nicht besitzt [18]. Dadurch hält sich in einem schlecht gepufferten System über längere Zeit ein niedriger pH-Wert und das angesäuerte Wasser löst weit mehr Mineralien aus dem Umgebungsgestein auf [12]. Dieser Mechanismus kann zu hohen Konzentrationen von Spurenelementen im Grundwasser führen. Demnach sind die Schlüsselvariablen zur Prognose der Reaktion des Aquifers auf CO₂-Eintritt die Zusammensetzung des Gesteins und die darin enthaltenen Mineralien, beispielsweise Karbonate, Silikate, Oxide und Schichtsilikate [12].

4.2 Erhöhte Lösung von Mineralien und Freisetzung von Spurenelementen

Mit Hilfe von drei verschiedenen Methoden und Herangehensweisen wird versucht, die möglichen Auswirkungen der CO₂-Lösung in für Trinkwassergewinnung genutzten Grundwasserleitern zu definieren und Parameter zur Risikobewertung und frühzeitigen Entdeckung von CO₂-Intrusion zu bestimmen; 1) mit Simulationen des Stofftransports und der geochemischen Reaktionen, 2) in Laborversuchen und 3) in Feldversuchen mit gezielter CO₂-Einspeisung in Aquifere.

In Modellierungen der Reaktionspfade und der geochemischen Transporte wurden die Puffer-Kapazitäten verschiedener Grundwasserleiter anhand ihrer Mineralienzusammensetzung bestimmt. Im Detail beschreiben [12] die Reaktionen von diversen Aquifergesteinen auf CO₂-Lösung in Wasser. Dabei wurde bei rein quarzhaltigem Aquifergestein ein hoher Abfall des pH-Werts, aber keine Änderung der Bicarbonat-Konzentration beobachtet. Ein Grundwasserleiter aus Quarzgestein in Verbindung mit Kalzit verzeichnete dagegen eine sehr kleine, kaum messbare Reduzierung des pH-Werts, aber einen Anstieg der Bicarbonat-Konzentration; während Quarz in Kombination mit Albit deutlich langsamere Reaktionen sowie Ausfällung von Kaolinit und die Mobilisierung von Natrium-Ionen und Bicarbonat hervorrief [12]. Ähnliches wird auch schon von [13] berichtet, die Simulationen der Puffer-Kapazitäten von Galenit in Kombination mit Quarz oder Kalzit beschreiben. Dabei stellte sich bei dem Aquifer aus

Galenit- und Quarzmineralien, aufgrund der schlechten Pufferung des Systems, eine starker Abfall des pH-Werts und eine erhöhte Mobilisierung von Blei (in Galenit enthalten) ein. Dies resultierte in einer 100fach erhöhten Konzentration im Vergleich zu Ausgangswerten. Hingegen erfuhr das mit Kalzit angereicherte System nur einen kurzen pH-Wert Rückgang und baldige Abfederung durch Carbonatlösung, woraus sich eine geringere totale Masse an gelöstem Blei (60fach erhöht) ergab. Nach einer achtjährigen CO₂-Intrusion wurde das *Action Level* der US EPA von 0,015 mg/l für Blei überschritten, allerdings nur innerhalb eines kleinen Gebiets [13].

Auch in anderen Studien wurden die Reaktionen von Galenit (als Quelle von Blei), aber auch von Pyrit, als Quelle von mobilisiertem Arsen, auf CO₂-Lösung in verschieden zusammengesetzten Aquiferen und darauf folgend die Minderung des pH-Werts simuliert. Diese Autoren stellen eine vermehrte Lösung von Pyrit fest und eine daraus resultierende Erhöhung der Konzentration von freiem Arsen, das nach einem konstanten Einstrom des CO₂ über 100 Jahre das *Maximum Contaminant Level* der US EPA von 0,01 mg/l überstieg [19]. Für Blei wurde der Grenzwert in dieser Simulation nicht überschritten, es lagen aber deutlich erhöhte Werte vor [18]. Weiterhin wurde bei sehr großen Zugabemengen an CO₂ beobachtet, dass gesteigerte Konzentrationen von Barium und Zink auftreten können [19]. In Laborversuchen, in denen verschiedenste, flache Aquifergesteine mit CO₂ versetzt wurden, konnten zwei verschiedene Vorgänge von Kationenmobilität beobachtet werden: 1) Eine Freisetzung von Kationen, die einen starken Anstieg und eine spätere Stabilisierung der Konzentration während der Zugabe von CO₂ bewirken. Dazu gehören Calcium, Magnesium, Strontium, Mangan und Barium, deren Werte in den Studien teilweise um das 200fache erhöht waren. 2) Ein Freiwerden von Kationen, deren Konzentration durch Lösungsprozesse erst ansteigt, dann aber, noch während der CO₂-Injektion, zu niedrigeren Werten als der ursprünglichen Konzentration zurückkehrt, was daher eine geringere Gefahr darstellen würde. Diese als Typ II bezeichneten Elemente sind unter anderem Eisen, Aluminium, Molybdän, Uran, Vanadium, Arsen,

Chrom, Cäsium, Rubidium, Nickel und Kupfer [20].

Allerdings unterscheiden sich diese Ergebnisse von denen von [15], die unter oxidierenden Bedingungen für Eisen, Aluminium, Uran und andere deutlich höhere Konzentrationen verzeichnen. Zudem wurden starke Schwankungen der Konzentration einiger Erdalkalimetalle und auch starke, späte Anstiege (nach mehr als 300 Tagen) der Konzentrationen von anderen Elementen beobachtet, die die Notwendigkeit von langzeitigen Versuchen deutlich machen [15].

Auch in Feldversuchen wurden die simulierten und bisher beobachteten Mechanismen, wie der Abfall des pH-Werts und eine erhöhte Löslichkeit von Mineralien, bestätigt. Bei der direkten Einleitung von CO₂ in einen trinkwasserrelevanten Grundwasserleiter wurde eine rasche Zunahme der Konzentration von freien Calcium- und Magnesium-Kationen durch eine vermehrte Lösung der Mineralien Kalzit und Dolomit, sowie eine höhere Konzentration an gelöstem Mangan und Eisen festgestellt, jedoch in allen Fällen unterhalb des *Maximum Contaminant Level* [21]. In einem anderen Feldversuch zur Speicherung von CO₂ in tiefen, salinen Aquiferen mit Beobachtung des darüber liegenden trinkwasserrelevanten Grundwasserleiters wurde in diesem ebenfalls von leicht erhöhten Konzentrationswerten der Elemente Mangan und Eisen berichtet. Dies und das zusätzliche Vorhandensein eines Indikators zeugten von einem Aufstieg des CO₂ aus der tieferen Speicherschicht in den Grundwasserleiter. Dieser Vorgang wurde einer anfänglichen Leckage entlang eines Brunnens zugeschrieben, die nach einigen Monaten zurückging [14].

Des Weiteren wurde eine detaillierte Analyse von Wasserproben eines Grundwasserleiters durchgeführt, welcher sich oberhalb eines, seit mehreren Jahrzehnten mit der Technik der erweiterten Ölförderung (*Enhanced Oil Recovery*) genutzten und daher mit großen Mengen an CO₂ angereicherten Ölfelds befindet. Vergleiche von Wasserproben des Aquifers innerhalb und außerhalb des Ölfelds zeigten keinen wesentlichen Unterschied des pH-Werts oder einen Anstieg der Kationenkonzentration. Eindringen von gasförmigem CO₂ in den Grundwasserleiter ließ sich dadurch nicht nachweisen [16].

Es darf hier nicht unerwähnt bleiben, dass in die hier zitierten Simulationsstudien auch

Faktoren teils erheblicher Unsicherheit eingeflossen sind. Dabei anzuführen wäre zum Beispiel die Schwierigkeit der exakten Bestimmung von Reaktionskinetiken, die letztlich die Konzentrationen der mobilisierten Spurenelemente im Grundwasser bestimmen. Diese sind in der vorhandenen Literatur teilweise mit großer Varianz beziffert oder beziehen sich auf im Labor gemessene Werte, die unter natürlichen Bedingungen sehr unterschiedlich sein können [13]. Zudem zu nennen sind die numerische Diffusion und Dispersion bei der Transportmodellierung, die eine Ungenauigkeit der Lösung hervorrufen und als weiterer Unsicherheitsfaktor wirken. Des Weiteren können die Ergebnisse aus einigen Laborexperimenten eher als ein *Worst-Case-Szenario* gesehen werden, da relativ hohe Mengen an CO₂ auf kleine Gesteinsvolumina trafen, welches in einem realen Leckage-Ereignis unrealistisch wäre [20]. Diese Faktoren führen zu der Erkenntnis, dass weitere, längerfristige Experimente, im Besonderen Feldversuche notwendig sind, um eine größere Datenbasis zu generieren [11].

4.3 Änderung der Desorptions- und Adsorptionsprozesse von Spurenelementen

Adsorption beschreibt die Anreicherung von Molekülen und Ionen an der Oberfläche eines Feststoffs, in diesem Fall an der Oberfläche von Mineralien. Diese hängt stark von der elektrischen Ladung der Oberfläche ab, welche wiederum vom pH-Wert des aquatischen Systems bestimmt wird. Im Gegenzug dazu beschreibt die Desorption die Loslösung der Ionen von der Mineralienoberfläche.

In einigen, hier bereits zitierten Studien wurden zusätzlich die Prozesse der Adsorption und Desorption untersucht. Diese könnten vielleicht sogar größere Auswirkungen auf die langfristige Mobilisierung von hohen Mengen an Elementen haben als die Auflösung von Mineralien [20], [18]. So wird beispielsweise bei dem Schwermetall Blei und dem Halbmetall Arsen eine erhöhte Loslösung von der Oberfläche von Tonmineralien beobachtet, welche erheblich deren Konzentrationen im aquatischen System beeinflussen [18]. Beide Elemente zeigen primär eine erhöhte Desorption, aber in unterschiedlicher Größenordnung. In Bezug auf Blei ist

diese so stark, dass sich in einer Simulation eine Übersättigung des Grundwassers einstellte. Dies führt dazu, dass sich trotz weiterem Abfall des pH-Werts das Mineral Galenit (als Donator von Blei) nicht weiter auflösen kann und es daraus resultierend zu einer Ausfällung von weiterem Galenit kommt, welches die Konzentration an gelöstem Blei wiederum reduziert. Bei Arsen findet die Desorption nicht in so hohem Maße statt, so dass daraus keine Übersättigung resultiert und es weiterhin zu einer Lösung von Arsenopyrit mit gleichzeitig stattfindender Desorption von Arsen kommt [22]. Dies verursacht deutlich höhere Konzentrationen von freiem Arsen, die zu einer langfristigen Kontamination führen könnten. Allerdings kommt es nach einem Wiederanstieg des pH-Werts durch das Mineralien-Puffersystem wieder zu einer erneuten Adsorption der vorher mobilisierten Kationen. Auch stromabwärts des Intrusionsorts von CO₂ unterstützt die Adsorption die Verringerung der Konzentration von freien Kationen und wirkt sich somit stabilisierend auf die Konzentration aus [18], [19]. Dies wird beispielsweise auch bei den Metallen Eisen und Aluminium beobachtet, wodurch sich möglicherweise eine Relativierung der Kationen-Freisetzung ergibt [20]. Insgesamt wird eine komplexe Interaktion aller Prozesse (Desorption/Adsorption, Lösung/Ausfällung) beobachtet, welche sehr stark von der Gesteinszusammensetzung des Aquifers abhängt [22].

5. Aktuelle Forschung der Autoren zu diesem Thema

Wie schon eingangs erwähnt, befindet sich die Forschung zu Auswirkungen der unterirdischen Gasspeichertechnologien auf das Grundwasser noch ziemlich am Anfang. Die vorherigen Abschnitte dieses Beitrags zeigen, dass es bereits einige relevante Studien gibt. Sie zeigen aber vor allem, dass noch viel Forschungsbedarf besteht und detaillierte Vorhersagen selbst im Einzelfall aufgrund der enormen Komplexität der Prozesse äußerst schwierig sind. Es kommt hinzu, dass Daten (oder Modellparameter), sowohl hydraulische als auch geochemische, erfahrungsgemäß nur begrenzt verfügbar sind.

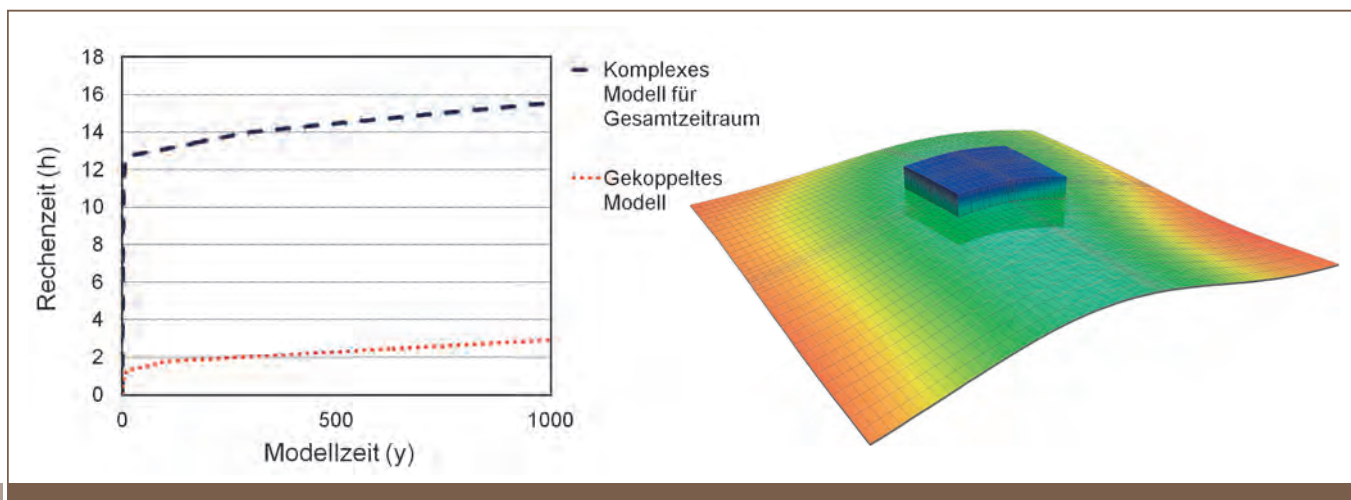
Der Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung arbeitet bereits seit mehr als zehn Jahren an der Entwick-

lung von Modellkonzepten und Simulationswerkzeugen, um die Prozesse bei der Speicherung von Gasen im Untergrund bzw. allgemein deren Migration durch den Untergrund zu beschreiben. Dabei liegt der spezielle Fokus auf der Modellierung von Mehrphasenströmungen durch poröse Medien. Aktuelle Arbeiten umfassen dabei einerseits eine Verbesserung der Prozessgenauigkeit und die Anwendung der Modelle auf großer Skala, andererseits die Einbeziehung von Unsicherheiten auf verschiedenen Ebenen.

5.1 Modellkopplung als effiziente Methode zur Simulation auf großen Zeit- und Raumskalen

Die Beschreibung der Auswirkungen von CO₂ Speichervorhaben auf das großskalige Fließgeschehen im Salzwasseraquifer und in angrenzenden Schichten erfordert die Simulation sehr großer Gebiete (bis zu 100 km in lateraler Ausdehnung). Für die Beschreibung des Langzeitverhaltens des injizierten CO₂ ist häufig eine Simulation von Zeiträumen bis zu 1000 Jahren erforderlich. Im Zusammenhang mit der Komplexität der physikalischen Prozesse führt dies zu einem großen rechnerischen Aufwand, so dass in der Regel mit vereinfachten Modellen gearbeitet werden muss.

Eine Möglichkeit, diese Einschränkungen teilweise zu umgehen und auch auf großen Skalen alle relevanten Prozesse zu beschreiben, stellt die Modellkopplung dar [23]. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass sich die dominierenden physikalischen Prozesse über die Zeit und im Raum ändern. Dadurch können Teilgebiete bzw. zeitliche Perioden mit unterschiedlichen Modellen beschrieben werden. Für die Gesamtsimulation kann dann anstelle eines Modells, das die gesamte Komplexität abdeckt, eine Kombination aus miteinander gekoppelten Modellen verwendet werden. Auf diese Weise können zum Beispiel die Auswirkungen geomechanischer und hydraulischer Prozesse im Nahfeld des Injektionsbrunnens auf das großräumige Fließgeschehen im Fernfeld effizient ohne Vernachlässigung relevanter Prozesse simuliert werden.



Das linke Bild zeigt einen Rechenzeitvergleich zwischen einem zeitlich sequentiell gekoppelten Modellansatz mit jeweils an die variierenden Erfordernisse adaptierter Modellkomplexität und einem Referenzmodell, das die volle Komplexität über die gesamte Berechnungsdauer beschreibt. Der Rechenzeitgewinn ist offensichtlich. Das rechte Bild zeigt ein Gitter für ein räumlich gekoppeltes Modell. Im Nahfeld der Injektion werden dabei mehrere Schichten des vertikalen geologischen Aufbaus berücksichtigt, um geomechanische Prozesse zu beschreiben, während im Fernfeld nur der Speicherhorizont selber modelliert wird.

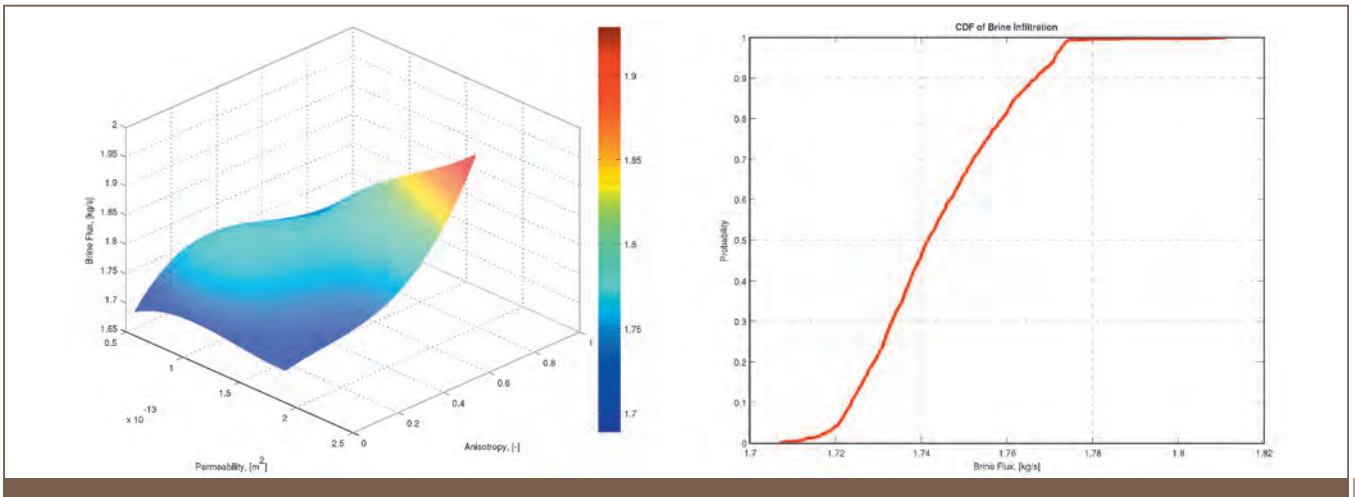
5.2 Konzepte zur Risikoabschätzung für Systeme mit Unsicherheiten auf unterschiedlichen Ebenen

Die Abschätzung der bereits beschriebenen Risiken wie CO₂-Leckage [24] und Lösung von CO₂ im Grundwasser oder Salzwasser-Verdrängung und -infiltration in Grundwasserleiter und deren Auswirkungen auf das Grundwasser ist ein wichtiger Bereich der Forschungsarbeiten für die CO₂-Speicherung. Fehlende Daten im geologischen Aufbau, aber auch Vereinfachungen in den Modellen führen zu Unsicherheiten, die für die Risikobetrachtung berücksichtigt werden müssen. Die unterschiedlichen Ebenen von Unsicherheiten (zum Beispiel statistische Unsicherheiten oder Unsicherheiten durch die Auswahl der Modellszenarien [25]) müssen identifiziert, eingeordnet und schließlich untersucht werden. Es werden ganzheitliche Methoden entwickelt, um die Risiken auf den verschiedenen Ebenen abzuschätzen. Dabei wird einerseits der am Lehrstuhl entwickelte numerische Simulator Dumux (www.dumux.org) verwendet, dessen Leistungsfähigkeit für Strömungs- und Transportprozesse bei der Gasspeicherung bereits in einer internationalen Vergleichsstudie nachgewiesen wurde [26]; andererseits werden statistische Methoden wie die Integrative Probabilistic Collocation Method [27] eingesetzt. Zusätzlich werden analytische Abschätzungen angewendet, um zum Beispiel Vorgänge wie das Einströmen von Salzwasser in grundwasserführende Schichten aufgrund Druckabsenkungen durch Trinkwasserförderung zu untersuchen.

5.3 Modellierung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts als Grundlage für pH-Wert abhängige Prozesse

Wie in den Kapiteln zuvor bereits ausführlich erläutert, führt die Injektion von CO₂ in den Untergrund zur Entstehung von Kohlensäure in der wässrigen Phase und in der Folge zu einem Abfall des pH-Werts. Dies kann weitreichende Folgen für die lokale Geochemie haben, da die chemischen Prozesse eine starke Abhängigkeit zum pH-Wert aufweisen. Die Stärke des pH-Abfalls wird maßgeblich vom Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht beeinflusst. Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ist das dominante Puffersystem im Untergrund. Wird CO₂ als Phase injiziert, sind die Konzentrationen von CO₂ und HCO₃⁻ in der angrenzenden wässrigen Phase stark erhöht. Mineralien die Karbonate enthalten, wie z.B. Calcit oder Dolomit lösen sich auf und verhindern somit ein starkes Abfallen des pH-Werts, man spricht von einem gepufferten System. Ein erniedrigter pH-Wert macht die wässrige Phase stark korrosiv, was sich nachteilig auf die Brunnenkonstruktion (Zement, Stahlrohr) auswirken kann. Durch das veränderte Milieu können auch schwermetallhaltige Mineralien aufgelöst oder adsorbierte Schwermetalle desorbiert werden. Die Schwermetalle sind somit mobil und können sich im Grundwasser ausbreiten.

Während die geochemischen Prozesse im Allgemeinen nahezu beliebige Komplexität erreichen können und die exakte lokale Zusammensetzung der Geochemie üblicherweise nur unzulänglich bekannt ist, ist die Modellierung des pH-Werts doch



O4

eine wichtige Voraussetzung, um Milieueränderungen und deren Folgen zumindest qualitativ besser einzuschätzen. Es soll deshalb ein einfaches geochemisches Modell in den Simulator Dumux [28] integriert werden, das in der Lage ist, die hydraulischen Prozesse und die für das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht relevanten Prozesse gemeinsam zu beschreiben. Dies kann dann die Grundlage sein, um nachfolgend detailliertere Untersuchungen für pH-Wert abhängige Problemstellungen durchzuführen.

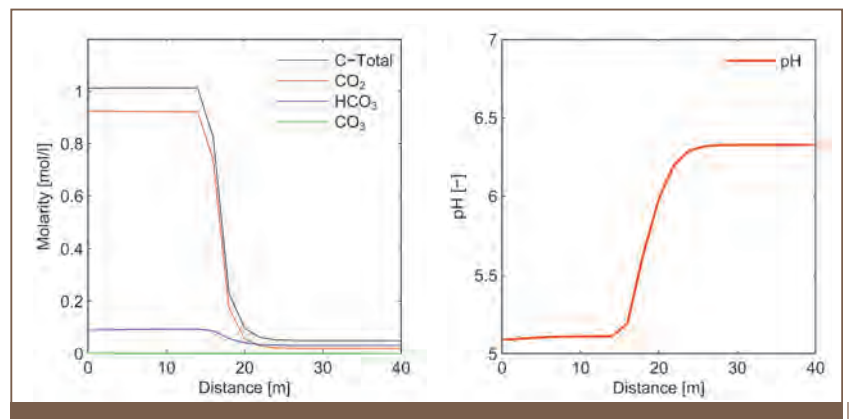
6. Fazit und Ausblick

Eine klimarelevante Einführung der CCS-Technologie müsste in einem sehr großen Stil erfolgen. Weltweit wäre eine große Zahl von Speicherprojekten erforderlich. Die Erfahrungen, vor allem in Deutschland, zeigen aber, dass es zunehmend schwierig wird, in der Gesellschaft Großprojekte und neue Technologien durchzusetzen. In diesem Beitrag wurde der Stand des Wissens sowie aktuelle Forschung vor allem aus technischer Sicht wiedergegeben, d.h. aus der Sicht von Ingenieuren und Wissenschaftlern, die sich intensiv mit der Materie befassen und Expertenwissen besitzen. Um einen gesellschaftlichen Konsens zu erreichen, müssen aber vor allem soziologische Aspekte mit berücksichtigt werden. Dies beinhaltet insbesondere die Kommunikation komplexer Sachverhalte und Erkenntnisse mit Entscheidungsträgern und nichtstaatlichen Organisationen (z.B. Umweltverbänden). Die Arbeitsgruppe CO₂-Speicherung arbeitet inzwischen im Rahmen des Exzellenz-Clusters Simulation Technology auf dem

Gebiet der CO₂-Speicherung mit der Gruppe des Stuttgarter Sozialwissenschaftlers und Risikoforschers Prof. Ortwin Renn zusammen. Diese Kooperation wurde weiterentwickelt in ein gemeinsames Projekt, in dem auch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover eingebunden ist, und das voraussichtlich im Frühjahr 2012 beginnt. Darin sollen die Auswirkungen von Salzwassermigration, Gefährdung von Trinkwasservorkommen und gesellschaftliche Akzeptanz in einem technischen und sozialwissenschaftlichen Ansatz erforscht werden.

Während der Schwerpunkt dieses Beitrags sich mit Folgen der CO₂-Injektion in geologische Formationen beschäftigt, sind die zu Grunde liegenden physikalischen/

Auswertung von Risiken mit Hilfe der Integrative Probabilistic Collocation Method (Oladyshkin et al., 2011). Das linke Bild zeigt exemplarisch den „Schaden“ (hier den Salzwasserzufluss in einen Trinkwasseraquifer) in Abhängigkeit von den Parametern Permeabilität (Durchlässigkeit) und Anisotropie des Gesteins. Das rechte Bild stellt dar, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Salzwasserzufluss unter- bzw. überschritten wird.



O5

geochemischen Prozesse, und damit auch die Modellierungsansätze, bei anderen Nutzungen des Untergrunds sehr ähnlich, zum Beispiel bei der Erdgasspeicherung, der Geothermie oder auch der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Es scheint daher geboten, konkurrierende Nutzungsarten

Die Diagramme zeigen die Ausbreitung von in Wasser gelöstem CO₂ (Injektion bei 0m) und den daraus resultierenden pH-Wert Abfall (rechts) in einem gepufferten System. C-Total besteht hierbei aus der Summe aller gelösten C-Spezies (CO₂, HCO₃⁻ und CO₃²⁻).

im Untergrund aufeinander abzustimmen. Dazu müssen Einflussradien und Ausschlusskriterien entwickelt werden. Auch auf diesen Aspekten wird ein Schwerpunkt künftiger Forschungstätigkeit der Arbeitsgruppe liegen.

• Holger Class
Kathrin Brauer, Alexander Kissinger
Lena Walter, Melanie Darcis
Bernd Flemisch, Anozie Ebigbo

Literatur

- NICOT, J. P. Evaluation of large-scale CO₂ storage on fresh-water sections of aquifers: An example from the Texas Gulf Coast Basin. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2, Oktober 2008, Bd. 4, S. 582–593.
- SCHÄFER, F., et al., et al. The regional pressure impact of CO₂ storage: a showcase study from the North German Basin. *Environmental Earth Sciences*. 2011. In Press.
- BIRKHOLZER, Jens T. und ZHOU, Quanlin. Basin-scale hydrogeologic impacts of CO₂ storage: Capacity and regulatory implications. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 3, Dezember 2009, Bd. 6, S. 745–756.
- BIRKHOLZER, Jens T., ZHOU, Quanlin und TSANG, Chin-Fu. Large-scale impact of CO₂ storage in deep saline aquifers: A sensitivity study on pressure response in stratified systems. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 3, März 2009, Bd. 2, S. 181–194.
- YAMAMOTO, Hajime, et al., et al. Numerical investigation concerning the impact of CO₂ geologic storage on regional groundwater flow. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 3, September 2009, Bd. 5, S. 586–599.
- PERSON, M., et al., et al. Assessment of basin-scale hydrologic impacts of CO₂ sequestration, Illinois basin. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 4, 2010, Vol. 5, pp. 840–854.
- ZHOU, Q., et al., et al. Modeling basin- and plume-scale processes of CO₂ storage for full-scale deployment. *Ground Water*. 48, 2010, Vol. 4, pp. 494–514.
- GAUS, Irima. Role and impact of CO₂-rock interactions during CO₂ storage in sedimentary rocks. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 4, Januar 2010, Bd. 1, S. 73–89.
- DAMEN, K., FAAIJ, A. und TURKENBURG, W. Health, safety and environmental risks of underground CO₂ storage – Overview of mechanisms and current knowledge. *Climatic Change*. 74, Januar 2006, Bde. 1–3, S. 289–318.
- NEWMARK, R. L., FRIEDMANN, S. J. und CARROL, S. A. Water Challenges for Geologic Carbon Capture and Sequestration. *Environmental Management*. 45, April 2010, Bd. 4, S. 651–661.
- MICHAEL, K., et al., et al. CO₂ storage in saline aquifers I-Current state of scientific knowledge. *Energy Procedia*. 1, Februar 2009, Bd. 1, S. 3197–3204.
- WILKIN, R. T. und DIGIULIO, D. C. Geochemical Impacts to Groundwater from Geologic Carbon Sequestration: Controls on pH and Inorganic Carbon Concentrations from Reaction Path and Kinetic Modeling. *Environmental Science & Technology*. 44, Juni 2010, Bd. 12, S. 4821–4827.
- WANG, Sookyun und JAFFE, Peter R. Dissolution of a mineral phase in potable aquifers due to CO₂ releases from deep formations: effect of dissolution kinetics. *Energy Conversion and Management*. 45, November 2004, Bde. 18–19, S. 2833–2848.
- KHARAKA, Y. K., et al., et al. Potential environmental issues of CO₂ storage in deep saline aquifers: Geochemical results from the Frio-I Brine Pilot test, Texas, USA. *Applied Geochemistry*. 24, Juni 2009, Bd. 6, S. 1106–1112.
- LITTLE, Mark G. und JACKSON, Robert B. Potential Impacts of Leakage from Deep CO₂ Geosequestration on Overlying Freshwater Aquifers. *Environmental Science & Technology*. Oktober 2010.
- SMYTH, Rebecca C., et al., et al. Assessing risk to fresh water resources from long term CO₂ injection-laboratory and field studies. *Energy Procedia*. 1, Februar 2009, Bd. 1, S. 1957–1964.
- ASSAYAG, N., et al., et al. Water-rock interactions during a CO₂ injection field-test: Implications on host rock dissolution and alteration effects. *Chemical Geology*. 265, Juli 2009, Bde. 1-2, S. 227–235.
- ZHENG, L. G., et al., et al. On mobilization of lead and arsenic in groundwater in response to CO₂ leakage from deep geological storage. *Chemical Geology*. 268, November 2009, Bde. 3-4, S. 281–297.
- APPS, John A., et al., et al. Identification of thermodynamic controls defining the concentrations of hazardous elements in potable ground waters and the potential impact of increasing carbon dioxide partial pressure. *Energy Procedia*. 1, Februar 2009, Bd. 1, S. 1917–1924.
- LU, J. M., et al., et al. Potential risks to freshwater resources as a result of leakage from CO₂ geological storage: a batch-reaction experiment. *Environmental Earth Sciences*. 60, März 2010, Bd. 2, S. 335–348.
- KHARAKA, Y. K., et al., et al. Changes in the chemistry of shallow groundwater related to the 2008 injection of CO₂ at the ZERT field site, Bozeman, Montana. *Environmental Earth Science*. 60, März 2010, Bd. 2, S. 273–284.
- Zheng, L, et al., et al. Reactive transport simulations to study groundwater quality changes in response to CO₂ leakage from deep geologic storage. *Energy Procedia*. 1, 2009, Vol. 1, pp. 1887–1894.
- DARCIS, M., et al., et al. Sequential model coupling for feasibility studies of CO₂ storage in deep saline aquifers. *Oil & Gas Science and Technology –*

DIE AUTOREN

DIE AUTOREN hinten v.l.: Alexander Kissinger, Holger Class, Melanie Darcis, Bernd Flemisch; vorne v.l.: Lena Walter, Kathrin Brauer

**Kontakt**

Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung
Pfaffenwaldring 61, D-70569 Stuttgart
Tel. 0711/685-64749
Fax 0711/685-60430
E-Mail: holger.class@iws.uni-stuttgart.de
Internet: <http://www.hydrosys.uni-stuttgart.de>

Rev. IFP Energies nouvelles. 66, 2011, Vol. 1, pp. 93–103.

24. KOPP, A., et al., et al. A contribution to risk analysis for leakage through abandoned wells in geological CO₂ storage. *Advances in Water Resources*. 33, 2010, Vol. 8, pp. 867–879.
25. WALKER, W., et al., et al. Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated Assessment*. 4, 2003, pp. 5–17.
26. CLASS, H., et al., et al. A benchmark study on problems related to CO₂ storage in geological formations. *Computational Geosciences*. 13, 2009, pp. 409–434.
27. OLADYSHKIN, S., et al., et al. An integrative approach to robust design and probabilistic risk assessment for CO₂ storage in geological formations. *Computational Geosciences*. 15, 2011, Vol. 3, pp. 565–577.
28. FLEMISCH, B., et al., et al. DuMux: DUNE for multi- $\{$ phase, component, scale, physics, ... $\}$ flow and transport in porous media. *Advances in Water Resources*. 2011. In Press, Corrected Proof, Online verfügbar 9 April 2011.

DR.-ING. HOLGER CLASS studierte von 1992 bis 1997 an der Universität Stuttgart Bauingenieurwesen, promovierte dann an der Technischen Universität Braunschweig im Jahr 2000. Seitdem arbeitet er wieder an der Universität Stuttgart und habilitierte sich dort im Jahr 2008. Er ist verantwortlich für die Arbeitsgruppe CO₂-Speicherung innerhalb des Lehrstuhls für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung.

CAND.-ING. KATHRIN BRAUER studiert seit 2006 an der Universität Stuttgart Bauingenieurwesen und absolvierte 2009 im Rahmen des Austauschprogramms zwischen dem Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung und dem Department of Earth Sciences der University of Waterloo, Kanada einen Studienaufenthalt. Seit November 2010 arbeitet sie als studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung.

DIPL.-ING. ALEXANDER KISSINGER studierte von 2005 bis 2011 an der Universität Stuttgart Umweltschutztechnik. Seit September 2011 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung.

DIPL.-ING. LENA WALTER studierte von 2003 bis 2008 an der Universität Stuttgart Umweltschutztechnik und arbeitet seitdem am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung als wissenschaftliche Mitarbeiterin.

DIPL.-ING. MELANIE DARCIS studierte von 2001 bis 2007 an der Universität Stuttgart Umweltschutztechnik. Seitdem ist sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung angestellt.

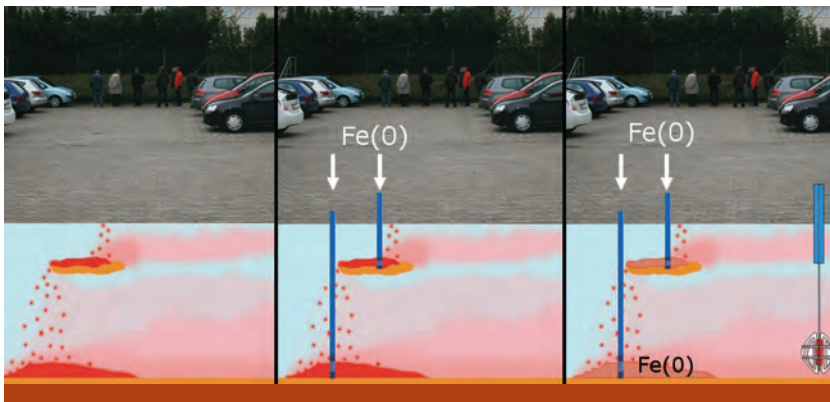
DR. RER. NAT. BERND FLEMISCH studierte Mathematik von 1997 bis 2001 an der Universität Augsburg und der Iowa State University. Zwischen 2001 und 2006 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart und promovierte dort Ende 2006 im Bereich Angewandte Mathematik. Seit 2007 ist er am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung tätig und leitet dort die Entwicklung der lehrstuhleigenen Open-Source-Simulationssoftware Dumux (www.dumux.org).

DR.-ING. ANOZIE EBIGBO (nicht auf dem Bild) studierte Bauingenieurwesen an der Universität Stuttgart und promovierte hier im Jahr 2009.

Sauberes Grundwasser

Nachhaltige Sanierung mit innovativen Technologien

Trinkwasser, unser wichtigstes Nahrungsmittel, wird in Deutschland zu 65 Prozent aus dem Grundwasser gewonnen. Diese Trinkwasserressource ist daher zwingend für nachfolgende Generationen zu schützen bzw. wenn notwendig zu sanieren. Die European Environment Agency (EEA) [12] identifizierte im August 2007 in Europa beinahe drei Millionen Standorte mit Aktivitäten, die potentiell zu einer Grundwasserverunreinigung führen können. In der Bundesrepublik stellen die derzeit ca. 14.200 erfassten Altlasten und die mehr als 300.000 Altlastenverdachtsflächen ein erhebliches Gefährdungspotenzial für das Grundwasser dar [13]. Die Entwicklung innovativer In-situ-Sanierungstechnologien und insbesondere auch deren Implementierung stellt eine große Herausforderung dar.



Injektion von Nano-Eisen zur Erzeugung einer reaktiven Zone unter einem Gebäude.

1. Einleitung

Derzeit werden in der Bundesrepublik täglich ca. 110 Hektar Fläche für die Ansiedlung von Industrieanlagen, für Wohnsiedlungen, Straßen etc. „verbraucht“. Eine effiziente Sanierung von Altlastenstandorten ermöglicht eine erfolgreiche Wiedernutzbarmachung von (Industrie-)Brachen und vermindert somit den Flächenverbrauch.

In Baden-Württemberg befinden sich Altlasten oft auf ehemaligen Industrie- und Gewerbeanlagen. Insbesondere chemische Reinigungen (Anteil Schadensfälle sechs PHrozent), Tankstellen und KFZ-Werk-

stätten (31 Prozent) sowie metallverarbeitende Betriebe (18 Prozent) liegen oft in zentralen Lagen. Eine Sanierung ist somit sowohl aus gesundheitspolitischer als auch aus städteplanerischer Sicht unumgänglich.

Grundvoraussetzung einer erfolgreichen Sanierung ist eine umfassende Erkundung des Standorts. Diese muss neben den hydrogeologischen Verhältnissen (Tiefe des Grundwasserleiters, Fließgeschwindigkeit des Grundwassers, Durchlässigkeit des Bodens etc.) auch die Art der Schadstoffe (leicht-/schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe, Lösungsmittel, Treibstoffe, Pestizide etc.), die Menge, das Alter und die räumliche Verteilung umfassen.

Schadensfälle können klassifiziert werden nach:

- Schadstoffverteilung im Untergrund: Wurde der Schadstoff in der ungesättigten Bodenzone zurückgehalten und emittiert bei Niederschlag ins Grundwasser oder ist er bereits ins Grundwasser gelangt?
- Vorliegen der Schadstoffe: Als Quelle oder Herd werden Bereiche bezeichnet, in denen der Schadstoff als separates Fluid vorkommt. Dieser Schadstoff löst sich im vorbeiströmenden Grundwasser und es bilden sich oft Kilometer lange Schadstofffahnen aus. Oft dauert es Jahrzehnte bis Jahrhun-

derte, bis eine Quelle vollständig in Lösung übergegangen ist und als Fahne abtransportiert wurde.

- Dichte des Schadstoffs: Organische Schadstoffe deren Dichte geringer als die von Wasser ist (z.B. Heizöl oder Treibstoff), werden als LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid) bezeichnet. Diese schwimmen auf dem Grundwasser auf, dringen also nicht tief in wasserführende Schichten ein. Organische Schadstoffe deren Dichte größer als die von Wasser ist, werden als DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid) bezeichnet. Hierzu zählen z.B. chlorierte Kohlenwasserstoffe. Sie sinken auf Grund ihrer hohen Dichte schnell in tiefe Lagen ab und können damit auch tiefe Grundwasserleiter kontaminieren (01).

In Abhängigkeit der hydrogeologischen Standortsituation, der Art und Verteilung der Schadstoffe und den Vorgaben der Behörden ist zu prüfen, ob eine Sanierung in situ, on site oder ex situ durchgeführt werden kann und welche Sanierungsziele erreicht werden können.

Bei On-site-Sanierungen wird der Schadensbereich ausgekoffert, vor Ort gereinigt und teilweise wieder eingebaut. Bei Ex-situ-Sanierungen wird der ausgekofferte Boden je nach Schadstoffart und -gehalt zu einer Bodenreinigungsanlage, einer Sonderabfalldeponie oder einer Verbrennungsanlage verbracht. Sowohl On-site- als auch Ex-situ-Sanierungen sind meist sehr energieaufwendig, haben eine schlechte Öko-Bilanz (z.B. durch lange Transportwege, hohe CO₂-Emissionen) und erfordern eine Räumung des Standorts.

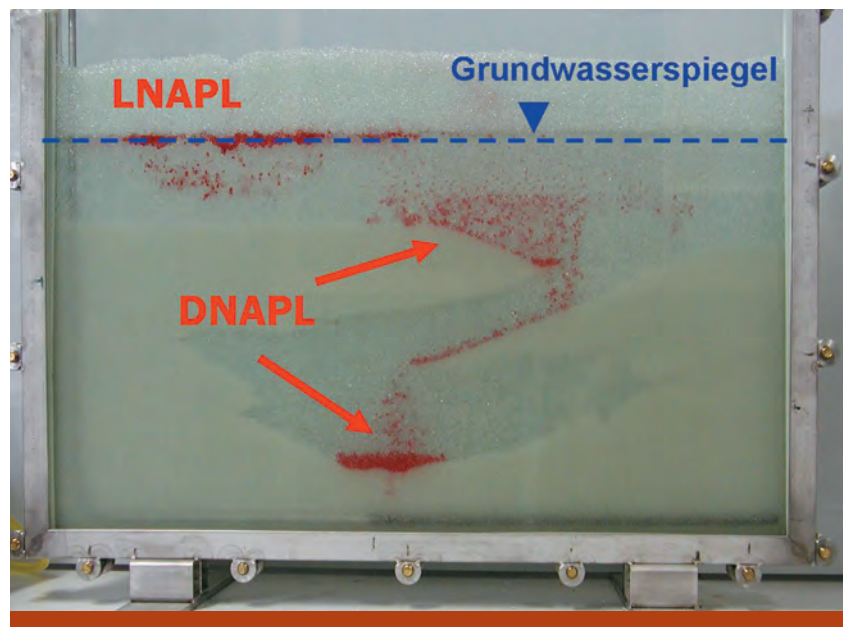
In-situ-Sanierungen erlauben hingegen die Beseitigung von Schadstoffen aus dem Boden und Grundwasser auch unter Gebäuden und laufenden Anlagen, sie haben eine relativ gute Öko-Bilanz (wenige Straßentransporte). Nachteilig bei diesen Sanierungen sind die zum Teil langen Laufzeiten und die manchmal weniger genau voraussagbare Erreichung von Sanierungszielen. Der „Klassiker“ unter den In-situ-Ansätzen ist die so genannte Pump-and-Treat-Technologie (P&T). Hierbei wird kontaminiertes Grundwasser abgepumpt, gereinigt und reinjiziert.

In den letzten Jahren werden zunehmend „innovative“ In-situ-Sanierungsverfahren angeboten, um insbesondere bereits lang laufende und nicht erfolgreiche Sanierun-

SUMMARY

Drinking water, our most important nutrient, is in Germany supplied to 65% from groundwater. Hence, this important drinking water source is to be protected, or if contaminated, to be remediated for coming generations. In August 2007, the European Environment Agency (EEA) identified throughout Europe nearly three million locations with activities which might potentially yield groundwater contamination [12]. In Germany, currently 14.200 recorded and 200.000 potentially contaminated sites pose a substantial risk to the groundwater [13]. The development of innovative in-situ remediation technologies and especially their implementation is a major challenge to be faced at the moment.

gen, die kostenaufwendig mit konventionellen Verfahren durchgeführt wurden, erfolgreich zu beenden [8]. Diese Verfahren machen sich komplexe physikalische, chemische und biologische Vorgänge zu Nutze und stellen hohe Ansprüche an Pla-



Demonstrationsrinne zur Sichtbarmachung der Verteilung von LNAPL und DNAPL im Untergrund.

ner und Genehmigungsbehörden. Doch auch sie bieten keine Patentlösungen, vielmehr müssen die Auswahl und der Einsatz in jedem Einzelfall sorgfältig abgewogen werden [8].

2. Innovative Technologien zur Quellensanierung

Forscher an der Universität Stuttgart sind maßgeblich daran beteiligt, Sanierungstechnologien zu entwickeln, zu optimieren und ihre Einsatzmöglichkeiten und -grenzen zu erweitern.

In-situ-Sanierungsverfahren können zur Sanierung in der ungesättigten Bodenzone, im Grundwasserschwankungsbereich und

in der gesättigten Bodenzone (Aquifer) eingesetzt werden. Es handelt sich zum einen um Methoden zur Leistungssteigerung klassischer Verfahren, zum anderen aber auch um weitgehend eigenständige Verfahren zur Schadensherdsanierung oder zur Abstomsicherung. Die nachstehend diskutierten innovativen Technologien zur Quellensanierung fokussieren entweder auf einer Erhöhung des Schadstoffaustrags oder auf einer chemischen Umsetzung der Schadstoffe im Boden.

2.1 Innovative (aktive Verfahren) zur Erhöhung des Schadstoffaustrags

2.1.1 Thermische Verfahren

Zwei unterschiedliche thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TIS) zur effizienten Schadensherdsanierung wurden an der Universität Stuttgart weiter entwickelt und über Pilotanwendungen sowie durch die wissenschaftliche Begleitung von Sanierungen erfolgreich in die Praxis überführt: Dampf-Luft-Injektion (TUBA- oder DLI-Verfahren) und der Einsatz fester Wärmequellen (Theris-Verfahren) [6]. Der Fokus der beiden TIS liegt auf der Beseitigung von Schadensherden sowohl aus der ungesättigten Bodenzone, aber vor allem auch aus dem Grundwasser. Durch die Untergrunderwärmung bis zum Erreichen der schadstoffspezifischen Gemischsiedetemperatur werden die flüssigen Schadstoffe gasförmig (Wasserdampfdestillation). Das Gasgemisch wird dann aus dem Untergrund durch eine Bodenluftabsaugung entfernt. Sanierbar sind sowohl Schadstoffe mit einer Stoffdichte kleiner als auch größer als Wasser (LNAPL, DNAPL). Schadensherde mit organischen Schadstoffen, wie beispielsweise chlorierte oder halogenierte Kohlenwasserstoffe (CKW, LHKW), Benzol, Ethylbenzol, Xylol und Toluol (BTEX) oder Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) bis zu einem Siedepunkt von etwa 200°C lassen sich mittels TIS sanieren.

Zum Aufheizen des Untergrunds wird vorzugsweise ein Dampf-Luft-Gemisch in die ungesättigte oder gesättigte Bodenzone injiziert (02). In der ungesättigten Bodenzone bei Lockergesteinen und feinklüftigen Festgesteinen mit guter bis mäßiger Durchlässigkeit kondensiert der injizierte

Dampf an der kalten Bodenmatrix und gibt seine Energie an diese ab. Durch den fortlaufenden Kondensationsprozess – bis der Boden die Dampftemperatur erreicht hat – kann Dampf von der Injektionsstelle an die Dampffront strömen. Es bildet sich entsprechend der injizierten Dampfmenge eine Wärmefront aus, die sich von der Injektionsstelle aus im Idealfall horizontal und radialsymmetrisch ausbreitet. Im erwärmten Bereich werden die flüssigen, leicht- bis mittelflüchtigen organischen Schadstoffe verdampft und abgesaugt [6].

Bei schlecht durchlässigen Böden können feste Wärmequellen in Form elektrisch betriebener Heizlanzen (03) mit Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius zur Beseitigung von Schadensherden eingesetzt werden. Die Erwärmung des Bodens erfolgt primär konduktiv über Wärmeleitung. Der Wärmeeintrag ist im Gegensatz zur Dampf-injektion nicht auf ein Wärmeträgermedium angewiesen. Die Heterogenität des Untergrundes ist für seine konduktive Aufheizung von untergeordneter Rolle, da die Wärmeleitung unterschiedlicher Bodenschichten nur mäßig variiert [10]. Wie bei der Dampf-injektion ist es unerlässlich, die verdampften Schadstoffe über eine Bodenluftabsaugung abzuführen. Das Verfahren wird zwischenzeitlich an zahlreichen Standorten in Europa eingesetzt.

2.1.2 Alkoholspülung

DNAPL-Schadensherde im Grundwasser können durch Injektion einer Mischung aus Wasser und je einem hydrophilen und lipophilen Alkohol (Alkoholcocktail) entfernt werden. Beide Alkohole setzen die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Schadstoff herab und mobilisieren ihn. Der hydrophile (nicht schwellende) Alkohol ist notwendig damit der lipophile (schwellende) Alkohol wasserlöslich und der Alkoholcocktail hydraulisch kontrollierbar ist. Der lipophile (schwellende) Alkohol dringt dabei in die Schadstoffphase ein und verringert deren Dichte, wodurch der Schadstoff leichter als Wasser wird. Es entsteht ein Einphasengemisch aus Alkoholen, Schadstoff und Wasser, das kontrolliert abgepumpt werden kann. Durch die Dichteänderung wird die Gefahr eines unkontrollierten Absinkens der Schadstoffe vermieden.

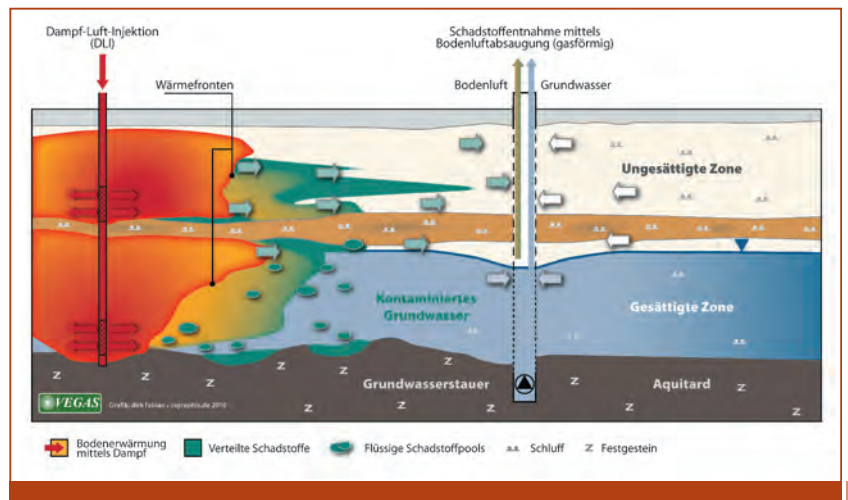
Zur weiteren Sicherung ist bei der Sanierung von DNAPL-Schadensfällen eine aufwärtsgerichtete Strömung notwendig (O4). Ziel einer wirtschaftlichen Sanierung ist der schnelle und kontrollierte Austrag von Schadstoffen entweder in gelöster Form oder als freie Phase. In Abhängigkeit der Schadstoffeigenschaften werden unterschiedliche Alkohole zur Sanierung eingesetzt. Kontaminierte Bereiche werden durchspült und das Alkohol-Schadstoff-Wasser-Gemisch wird abgepumpt. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen wird ein Großteil des Alkohols aus dem „Abwasser“ zurück gewonnen und kann für weitere Alkoholspülungen eingesetzt werden.

2.1.3 Tenside

Durch die Injektion von Tensiden ins Grundwasser werden die Grenzflächen-spannungen zwischen Schadstoffphase und Wasser verringert. Dadurch wird einerseits die Löslichkeit der Schadstoffe im Wasser erhöht und andererseits können kapillar zurückgehaltene Schadstoffe wieder mobilisiert, d.h. fließfähig gemacht und abgepumpt werden. Während die Anwendung von Tensiden bei Schadstoffen die leichter sind als Wasser relativ unkritisch ist, ist bei schwereren Fluiden (z.B. CKW) mit äußerster Vorsicht vorzugehen. Bei diesen Schadstoffen sind die Tenside so auszuwählen, dass sie lediglich als Lösungsvermittler fungieren, da eine mobilisierte Schadstoffphase hydraulisch kaum kontrollierbar wäre und somit eine große Gefahr für tieferliegende Grundwasservorkommen darstellen würde.

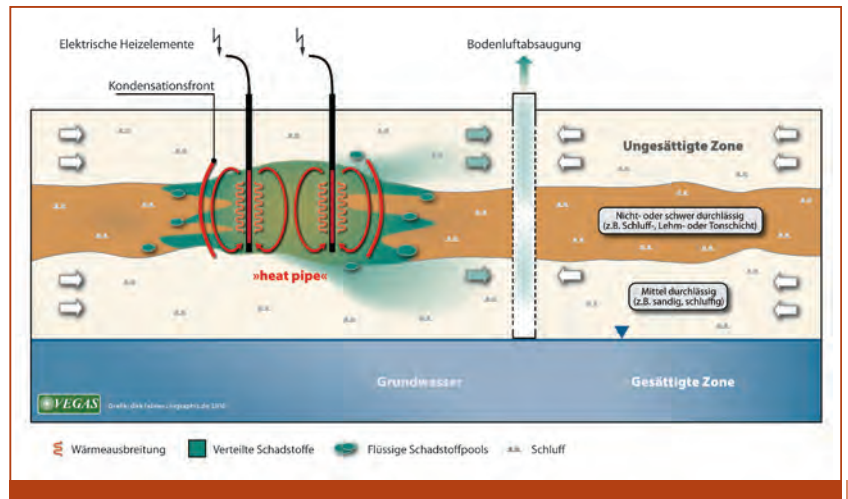
2.2 Innovative (aktive Verfahren) zur Erhöhung des Schadstoffabbaus

Während die oben beschriebenen Technologien den Schadstoff aus dem Boden entnehmen und für die Dauer ihres Einsatzes eine entsprechende Infrastruktur (Verdichter, Kondensatoren, Filter) benötigen, wandeln die nachfolgend genannten Verfahren den Schadstoff im Boden in unschädliche Produkte um. So werden bei der In-situ-chemischen-Oxidation (ISCO) Schadstoffe im Untergrund durch Einleitung eines chemischen Oxidationsmittels (Kalium- und Natriumpermanganat, Fen-



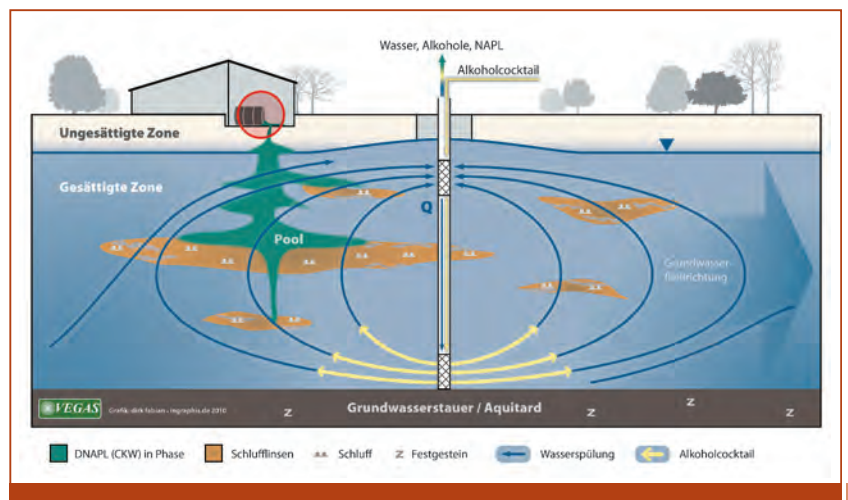
Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte und gesättigte Zone.

O2



Einsatz Fester Wärmequellen (THE-RIS) zur Beseitigung von Schadenherden in der ungesättigten Zone.

O3



Alkoholspülung mit Grundwasserzirkulationsbrunnen.

O4

tons Reagenz, Ozon, Persulfat) nach dem Prinzip einer „kalten Verbrennung“ abiotisch zerstört, wobei eine vollständige Umsetzung zu umweltneutralen Stoffen wie Kohlendioxid und Wasser sowie – bei chlorierten Verbindungen – zu Chlorid angestrebt wird [8].

Prinzipiell können alle organischen Schadstoffe durch Oxidationsmittel zerstört werden. Jedoch sind nicht alle technisch geeigneten und handhabbaren Oxidationsmittel gleichermaßen für alle altlastentypischen organischen Schadstoffe geeignet, so dass der Erfolg einer Maßnahme unter anderem von der Auswahl des am besten geeigneten Oxidationsmittels oder einer Kombination von Oxidationsmitteln abhängt. Die Oxidations-Reaktion selbst erfolgt im Grundwasserleiter sehr schnell sobald ein wirksamer Kontakt zwischen dem Oxidationsmittel und der organischen Verbindung hergestellt ist. Die Geschwindigkeit und Effektivität des Oxidationsprozesses im Grundwasserleiter wird daher maßgeblich vom Transport des Oxidationsmittels zum Schadstoff und der möglichen Kontaktfläche zwischen Oxidationsmittel und Schadstoff limitiert.

Anhand von Labor- und Technikumsversuchen in der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) konnte gezeigt werden, dass die Oxidation des Schadstoffs durch Peranganat sogar vollständig zum Erliegen kommen kann, wenn der Kontakt an der Phasengrenze durch Mangandioxid-Ausfällungen (Braunsteinbildung) unterbunden wird.

Neben dem Schadstoff werden aber auch der oxidierbare Anteil der Grundwasserleitermatrix und die oxidierbaren Grundwasserinhaltsstoffe weitgehend umgesetzt. Aus diesem Grund muss das Oxidationsmittel stets in erheblichem Überschuss eingesetzt werden. Da die Praxis zeigt, dass der Matrixbedarf auch in Böden mit relativ geringen Gehalten an organischem Kohlenstoff sehr erheblich ist, ist der Einsatz von ISCO in der Regel nur für die Sanierung begrenzter Schadstoffherde wirtschaftlich durchzuführen.

Die In-situ-chemische Reduktion erfolgt in der Regel mit Eisen. Dazu werden quer zur Strömung des kontaminierten Grundwassers Reinigungswände (PRB Permeable Reactive Barriers) aus granularem, elementarem Eisen im Aquifer eingebaut [11]. Während der Durchströmung der Wand

findet eine chemische In-situ-Reduktion von beispielsweise chlorierten Kohlenwasserstoffen statt. Diese Bauwerke sind teuer und können auch unter bestehenden Gebäuden nicht errichtet werden. PRB müssen viele Jahrzehnte (bzw. auf Dauer) im Boden verbleiben. Sie benötigen zwar kaum Wartung, können jedoch nur bereits in Lösung befindliche Schadstoffe aus dem Grundwasser entfernen, während die Schadstoffquelle weiterhin Schadstoffe emittiert. PRB werden daher heute als Sicherungsverfahren betrachtet.

Als alternative innovative In-Situ-Sanierungstechnologie steht seit Ende der 1990er Jahre die Injektion von nullwertigen Eisenpartikeln im Nano- und Mikrometerbereich zur Verfügung [1]. Das Fe(0)-Material kann vom Grundsatz her direkt als wässrige Suspension zur Sanierung in einen kontaminierten Aquifer injiziert werden. Zur Injektion ist lediglich ein „Brunnen“ notwendig, wodurch Baukosten drastisch reduziert und auch Einsätze unter Gebäuden und in größeren Tiefen ermöglicht werden. Weiterhin kann diese Technologie, wenn sie direkt in der Quelle angewandt wird, die Lebensdauer einer Schadstoffquelle erheblich reduzieren.

Die gegenüber granularem Eisen viel kleinere Teilchengröße (mikro/nano) verleiht dem Eisen aufgrund der deutlich größeren spezifischen Oberfläche eine hohe Reaktivität. So sollen Nano-Eisen-Partikel um den Faktor 10 bis 1.000 reaktiver sein als konventionelle Eisenpartikel. Die geringe Partikelgröße ermöglicht potentiell den Transport der Nano-Eisen-Partikel als kolloidale Partikelsuspension in den Bodenporen. Diese Möglichkeiten und die Eigenschaften der Eisen-Partikel lassen den Einsatz für eine In-Situ-Sanierung besonders geeignet erscheinen.

Nano-Eisen ist ein moderates, wirksames Reduktionsmittel, das zu Fe(II) oxidiert [2] und sowohl für organische als auch für anorganische Kontaminanten, wie beispielsweise Chrom und Arsen, geeignet ist. Das nullwertige Eisen reagiert im Grundwasser zuerst mit Sauerstoff. Sobald der vorhandene Sauerstoff aufgebraucht ist, wird Wasserstoff erzeugt. Dadurch werden anaerobe Verhältnisse geschaffen, unter denen das Nano-Eisen mit dem Schadstoff reagieren kann.

Reaktivität und Langzeitstabilität der Nano-Eisen-Partikel in porösem Medium sind maßgeblich für eine effiziente und auch

ökonomisch durchführbare In-Situ-Sanierung. Reaktivität und Langzeitstabilität sind jedoch nicht nur von den Nano-Teilchen selbst, sondern in großem Maße auch vom System Boden-Wasser-Schadstoff abhängig. Zu Fragen der Reaktivität, der Langzeitstabilität und auch zur Optimierung der Nano- bzw. Mikro-Eisenteilchen werden derzeit noch Entwicklungsarbeiten durchgeführt.

3. Thermische Verfahren in der Praxis

3.1 Die Situation

In der historischen Altstadt von Karlsruhe-Durlach befindet sich das alte Schlachthaus von Durlach, ein 1547 erbautes, historische und unter Denkmalschutz stehendes Gebäude. Die Lage ist begrenzt von der alten Stadtmauer auf der einen und einem Kinderspielplatz auf der anderen Seite. Im Erdgeschoss wurde bis 1973 eine chemische Reinigung betrieben, heute wird es gewerblich als Kunsthandlung genutzt, das Obergeschoss ist bewohnt. Unterhalb des Gebäudes befand sich das Schadenszentrum eines CKW-Schadens, der sich über die ungesättigte bis in die gesättigte Zone erstreckte und im Grundwasser zu einer mehrere hundert Meter langen Schadstofffahne führte. Die daraus resultierte Gefährdung für Mensch und Umwelt sollte durch geeignete Sanierungsmaßnahmen im Boden und Grundwasser beseitigt werden.

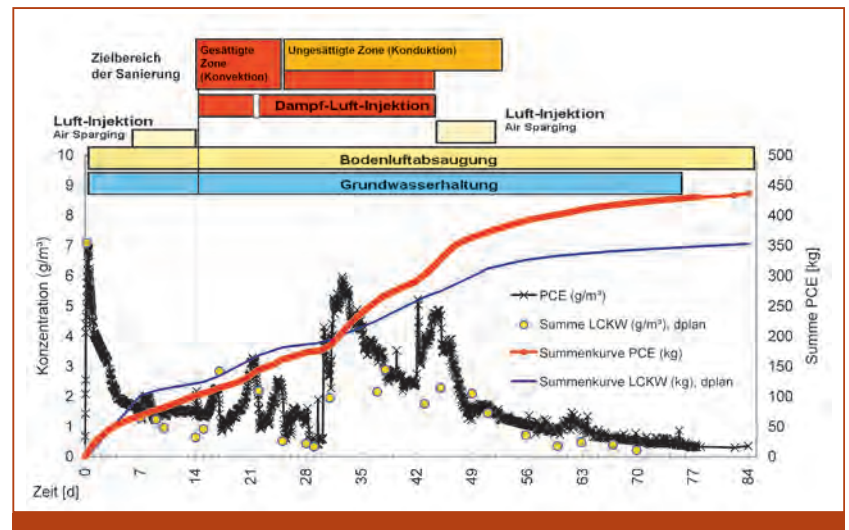
Der Standort befindet sich im Grabenbruchsystems des Oberrheingrabens, welcher mit mächtigen Lockergesteinsserien verfüllt wurde und zum Teil ergiebige Grundwasservorkommen enthält. Im Bereich der Altstadt von Durlach befinden sich grundwasserführende Quartärsedimente, darunter folgen tertiäre Mergel, welche einen Grundwasserstauer in 13 Meter Tiefe darstellen.

Der Bodenaufbau besteht aus anthropogenen Auffüllungen. Diese sind mit Kies und Sandanteilen sowie Bauschutt und einigen Abfallbestandteilen durchsetzt. Der Grundwasserspiegel liegt zwischen 3,5 und vier Metern unter dem Gelände. Die Grundwasserfließrichtung schwankt saisonal zwischen westlicher und südwestlicher Richtung. Die im Rahmen der Erkundung in Bodenproben angetroffenen hohen Konzentrationen an chlorierten

Kohlenwasserstoffen (vorwiegend PCE) aus der ungesättigten Bodenzone, dem Grundwasserwechselbereich und dem oberen Bereich des Grundwasserleiters ließen auf eine vertikale Verteilung der Schadstoffe bis zu einer Tiefe von circa sechs Metern schließen.

3.2 Ziel und Herangehensweise

Auf Veranlassung der Stadt Karlsruhe wurde auf einem Teilbereich des Standorts im Jahre 2005 eine Pilotierung mit dem thermischen In-situ-Sanierungsverfahren der Dampf-Luft-Injektion zur Entfernung der CKW-Schadensquelle durchgeführt. Ziel der Pilotierung war die Bestimmung der Dampfausbreitung in der gesättigten Bodenzone, sowie der Nachweis der Anwendbarkeit und Effizienz des thermischen In-situ-Sanierungsverfahrens am Standort. VEGAS führte die Pilotierung im Zeitraum zwischen Juli und September 2005 durch. Dem Ingenieurbüro dplan, Karlsruhe oblag die Bauleitung und die Überwachung. Der Ort der Pilotinjektion war eine circa 80 Quadratmeter große Fläche an der südwestlichen Hausecke. Das Pilotfeld wurde



Schadstofffastrag über die Bodenluft-Absaugung im Verlauf der Pilotierung.

über einen Dampf-Luft-Injektionsbrunnen, zwei Kombibrunnen zur Förderung von Grundwasser und Bodenluft, sowie einen Bodenluftbrunnen erschlossen. Die Überwachung der Dampf-, bzw. Wärmeausbreitung im Untergrund erfolgte mittels circa 120 Temperaturfühlern. Die Sanierungsanlage zur Erzeugung der injizierten Dampf-Luft-Mischung, der Behandlung und Reinigung der extrahierten, heißen Bodenluft und des entnommenen

Grundwassers war in zwei schallgedämmten Anlagencontainern installiert. Die Pilotanlage erlaubte eine Online-Überwachung aller kritischen Anlagenparameter. Die Reichweiten der Messungen erlangten einen Radius bis zu drei Metern und wurden in einem Zeitraum von vier Wochen durchgeführt. Der Schadstoffaustrag von annähernd 450 Kilogramm PCE bestätigte die Effizienz der Dampf-Luft-Injektion am Pilotstandort [5].

Basierend auf der erfolgreichen Pilotsanierung wurde für die Gesamtsanierung des Geländes ein Konzept erstellt. Dabei sollten die Installationen zum großen Teil über Schrägbohrungen unter das Gebäude geführt werden [6]. Insgesamt wurden elf Extraktionsbrunnen sowie ein Horizontalbrunnen unter dem Gebäude geplant. Das Gebäude sollte während der Sanierung ohne Einschränkung genutzt werden, was besondere Anforderungen an Lärm- und Emissionsschutz stellte.

Mit der anlagentechnischen Ausführung der Sanierung wurde eine Sanierungsfirma beauftragt, die wissenschaftliche Begleitung,

das sanierungsbegleitende Temperatur- und Schadstoffmonitoring und die Anlagesteuerung oblag VEGAS. Die verantwortliche Sanierungsbegleitung erfolgte durch ein Ingenieurbüro. Ziel der thermischen In-situ-Sanierung war die Erwärmung des Untergrunds in einer

Tiefe von circa fünf bis sechs Metern auf Temperaturen bis über 92 °C und die möglichst vollständige Entfernung der Schadstoffe.

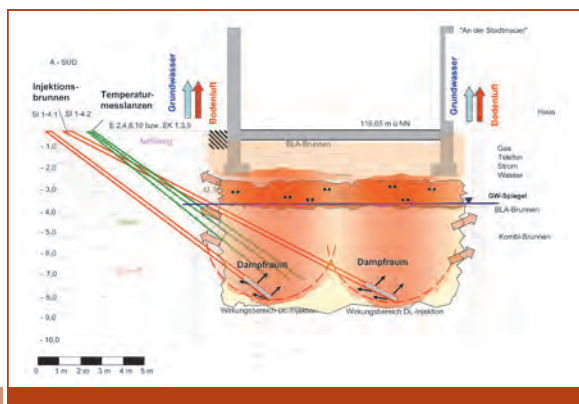
Die Sanierung startete Ende April 2010 mit der Bodenluftabsaugung, der Grundwasserhaltung und der Injektion von Luft in den Grundwasserleiter (Air-Sparging). Mitte Mai 2010 begann die thermische Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone. Die thermische Erschließung des Grundwassers, des Grundwasserschwankungsbereichs und der ungesättigten Zone verlief entsprechend den Pilotarbeiten aus dem Jahr 2005. Die Dampfreaktionen konnten mit dem Erreichen der geforderten Sanierungsziele bereits Ende November 2010 abgeschlossen werden [7, 9].

3.3 Umweltbetrachtungen und abschließende Bewertung

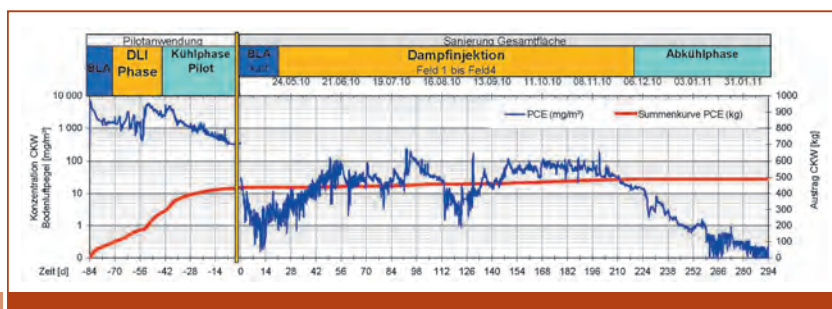
Für thermische Verfahren ist der spezifische Energiebedarf bezogen auf das behandelte Bodenvolumen verfahrenstypisch besonders relevant; die Schadstoffmasse ist dagegen von sekundärer Bedeutung. Der spezifische Energiebedarf lag hier bei rund 470 Kilowattstunden pro Kubikmeter Boden (Summe thermische und elektrische Energie).

Ein Maß für den Umwelteinfluss ist der Energieverbrauch bzw. die spezifische CO₂-Emission. Die spezifische CO₂-Emission ergibt sich aus dem Verbrauch von insgesamt 780 Megawattstunden an thermischer Energie (226,2 t CO₂) und 153 Megawattstunden (91,8 t CO₂) an elektrischer Energie. Der CO₂-Gesamtausstoß der thermischen Sanierung erreicht damit statistisch den jährlichen CO₂-pro-Kopfausstoß von 42 Bürgern (Deutschland, Statistisches Bundesamt, 12/2010, 7,5 Tonnen pro Einwohner).

Die Anwendung innovativer Verfahren gelingt nur mit einem hohen Maß an Einsatzbereitschaft aller Beteiligten. Die im Rahmen der Pilotierung durch VEGAS nachgewiesene Eignung des thermischen In-situ-Sanierungsverfahrens unter den schwierigen baulichen Randbedingungen (Schadstoff unter bewohntem Gebäude, Altstadtlage, enge Wohnbebauung, Denkmalschutz) sowie die damit möglichen zeitlichen und finanziellen Vorteile waren für die Stadt Karlsruhe als Grundstückseigentümerin die Voraussetzung für den Einsatz des thermischen In-situ-Sanierungsverfahrens DLI. Eine Nachkontrolle im Grundwasser zuletzt im Herbst 2011 bestätigte die Nachhaltigkeit der Sanierung.



Installationen unter dem Gebäude durch Schrägbohrungen und einen Horizontalbrunnen zur Boden-Luft-Absaugung.



CKW-Austrag über die Bodenluftabsaugung während der thermischen Standortsanierung.

4. Fazit und Ausblick

Der oben beschriebenen erfolgreichen Sanierung gingen mehrere Jahre intensiver Forschung und mehrere Pilotanwendungen voraus. Bereits im Jahr 1998 wurde in Plauen die ungesättigte Zone unter einer ehemaligen Benzol-Verladestation erfolgreich gereinigt. Einsätze unter einer Sondermülldeponie (Mühlacker, 1998–2000), einem metallverarbeitenden Betrieb (Albstatt, 2004), einer chemischen Reinigung (Durlach, 2005), einer Verladestation (Zeitz, 2008) und einer ehemaligen Verbrennungsanlage (Biswurm, 2011) folgten. An diesen Pilotstandorten wurde die Einsatzfähigkeit der Technologie unter verschiedensten Standortbedingungen (gesättigter/ ungesättigter/geklüfteter Untergrund) sowie für verschiedenste Schadstoffe nachgewiesen. Trotz dieser Erfolgsbilanz ist die letztendliche Implementierung bei der Industrie recht schwierig. Dies liegt vor allem am „third user principle“: jeder möchte der dritte Anwender sein: Der erste Anwender muss die technische Machbarkeit nachweisen, der zweite den ökonomischen Nachweis erbringen. Der dritte Anwender hat den vollen Nutzen. Mit den genannten Pilotanwendungen und dem Feldfall in Durlach wurden die ersten beiden Anwendungen erfolgreich abgeschlossen. Entsprechend groß ist derzeit die Nachfrage von Sanierungsfirmen nach thermisch unterstützten Sanierungstechnologien.

Auch weiterhin sind die Forscher an der Universität Stuttgart auf der Suche nach neuen Pilotstandorten und vor allem Partnern bei Behörden und Industrie, mit denen auch für die anderen Technologien der fachliche und ökonomische Nachweis erbracht werden kann. Parallel dazu werden vermehrt Kombinationen der verschiedenen Technologien betrachtet.

Ein relativ neuer Aspekt ist die Untersuchung der Nutzbarmachung anderer Umwelteinflüsse. So führt zum Beispiel die vermehrte Nutzung der Geothermie zu teilweise erheblichen Erhöhungen der Grundwassertemperatur. Die gezielte Nutzung dieser Temperaturerhöhung könnte vielleicht nicht nur eine ökologische, sondern auch eine ökonomische Grundwassersanierungstechnologie mit sich bringen.

• Jürgen Braun
Hans-Peter Koschitzky
Oliver Trötschler

DIE AUTOREN

JÜRGEN BRAUN, PHD

ist seit 2005 wissenschaftlicher Leiter der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS). Er studierte an der FHT Stuttgart Bauingenieurwesen. Nach Tätigkeiten als Bauleiter ging er im Rahmen eines Fulbright-Stipendiums an die Colorado State University. Dort erhielt er 1991 den Master of Science und promovierte 1995 über viskositätskontrollierte Aquifersanierung. Derzeitige Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung von Grundwassersanierungstechnologien, vorbeugender Grundwasserschutz und Geothermie.



DR.-ING.

HANS-PETER KOSCHITZKY

promovierte nach dem Bauingenieurstudium an der Universität Stuttgart und Bearbeitung zahlreicher wasserbaulicher Modellversuche 1987 am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart (IWS). Seit 1989 ist er auf dem Gebiet der Grundwasser- und Altlastensanierung tätig, hat VEGAS mit konzipiert und gebaut, ist seit 1993 Technischer Leiter von VEGAS und Projektleiter mehrerer Projekte mit Schwerpunkt innovative In-situ-Sanierungsverfahren und Grundwasserschutz. Seit 2002 ist er zusätzlich Geschäftsführer des IWS. Er ist in zahlreichen nationalen und internationalen Gremien (ITVA, af-BW, NICOLE, ÖVA) tätig.



DIPL.-ING. (FH)

OLIVER TRÖTSCHLER

studierte nach mehrjähriger Tätigkeit als Landwirt an der FH Offenburg Verfahrens- und Umwelttechnik. Seit 1995 ist er als Betriebsingenieur in VEGAS tätig. Seit 2003 beschäftigt er sich mit der Entwicklung und Anwendung von In-situ-Sanierungsverfahren, dabei schwerpunktmäßig mit thermischen Verfahren und deren Einsatz im Rahmen von Pilotanwendungen.



Kontakt

Universität Stuttgart
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung – IWS
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)
Pfaffenwaldring 61
D-70569 Stuttgart
Tel. 0711/685-64717
Fax 0711/685-67020
E-Mail: Imke.Kaminski@iws.uni-stuttgart.de
Internet: <http://www.iws.uni-stuttgart.de/>

5. Literatur

- **1** Zhang W. (2003): *Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview*. J. Nanopart. Res. 5: 323–332.
- **2** Mueller N. C., Braun J., Bruns J., Cernik M., Rissing P., Rickerby D. and Nowack B. (2011): *Application of nanoscale zero valent iron (NZVI) for groundwater remediation in Europe*. Environmental Science and Pollution Research.
- **3** Trötschler O., Haslwimmer T., Koschitzky H.-P., Ochs S. (2006): *Pilotversuch Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone als Grundlage zur Auslegung der thermischen In-situ-Sanierung des CKW-Schadensfalls ehemalige chemische Reinigung Roth in Karlsruhe Durlach, (Obj. Nr. 00465) – Abschlussbericht, Technischer Bericht Nr. 2006/4 (VEG 19)*, Stuttgart: Institut für Wasserbau.
- **4** Trötschler O., Koschitzky H.-P., Ochs S., Denzel S., Stöckl K. (2006): *Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone: Pilotanwendung zur Sanierungsplanung an einem innerstädtischen Standort im Rheintal, VEGAS-Statuskolloquium 2006, pp. 60–70*, Eds. Braun, Koschitzky, Stuhmann, Mitteilungen Heft 150, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart 2006, ISBN 3-933761-53-0.
- **5** Ochs, S.O. (2006): *Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations*, Mitteilungen Heft 159, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-63-8.
- **6** Koschitzky, H.-P., Trötschler, O. (2008): *Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung*, Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement, 55. Aktualisierung, 3. Aufl., Mai 2008, Franzius, Altenbockum, Gerhold (Hrsg.), C. F. Müller Verlagsgesellschaft, München, 5716, pp. 1–47, Grundwerk ISBN 978-3-8114-9700-9.
- **7** Trötschler O., Koschitzky H.-P. (2011): *Thermische In-situ-Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion des CKW-Schadensfalls ehemalige chemische Reinigung Roth in Karlsruhe Durlach – Abschlussbericht, Technischer Bericht Nr. 2011/08 (VEG 47)*, Stuttgart: Institut für Wasserbau.
- **8** ITVA-Arbeitshilfe H1–13 (2010): *„Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“*. Erarbeitet vom Arbeitskreis „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“ im Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“. Herausgeber: Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Berlin, Juni 2010.
- **9** ÖVA-Sanierungsreport SR001 (2011): *CKW-Boden- und Grundwassersanierung unter einem historischen, bewohnten Gebäude mittels Dampf-Luft-Injektion ins Grundwasser, Oktober 2011*. Österreichischer Verein für Altlastenmanagement, Wien.
- **10** Hiester, Uwe (2009): *Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen*. Promotionschrift, Institut für Wasserbau, Eigenverlag (Publ.), Mitteilungsheft des Instituts für Wasserbau, 9.2009 (178) Universität Stuttgart, ISBN: 978-3-933761-82-8.
- **11** RUBIN Handbuch (2006): *Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten, BMBF-Vorhaben-Nummer 0271241*. Universität Lüneburg, Fakultät III (Umwelt und Technik), Campus Suderburg (Hrsg.), Lüneburg. <http://www.rubin-on-line.de>.
- **12** European Environment Agency (2007): *Progress in management of contaminated sites (CSI 015) – Assessment published on line August 2007*.
- **13** UBA 2011: http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/altlast/web1/deutsch/1_3.htm.

Kommunikation und Beteiligung

im Bereich Gewässermanagement und Hochwasserschutz

Eines der wesentlichen Ziele der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie ist die Einbindung von Interessengruppen und der betroffenen Bevölkerung in das Risiko-Management und die Bewertung von Maßnahmen zur Bewältigung von Hochwasserereignissen und Erdbeben. Zu diesem Zweck ist es notwendig, die Verhaltensweisen, Interessen und Werte der beteiligten Akteure zu

kennen und sie in die Planung konstruktiv einzubinden. Ohne die Einstellungen und Verhaltensmuster der betroffenen Gruppen und Individuen zu berücksichtigen, lässt sich keine wirksame Planung von Gewässerschutzmaßnahmen erzielen. Bislang waren solche kommunikativen Aufgaben immer am Ende des Planungsprozesses angesiedelt; notwendig wäre es aber, diese an den Anfang des Planungsprozesses zu setzen.



01

© André Wagenzik

Einleitung

In demokratischen Gesellschaften erwarten die Bürger und Bürgerinnen, dass Entscheidungen, die ihr Wohlergehen und die Qualität ihrer Umgebung betreffen, öffentlich legitimiert werden. Dies geht nicht ohne wechselseitige Kommunikation. Aufgrund der Komplexität der Gewässerbewertung reicht eine Anhörung der Öffentlichkeit nicht aus. Im Konzert der sich widersprechenden Experten, der sensationshungrigen Medien und der oft widersprüchlichen Politik und angesichts der Schwierigkeit ökologische Zusammenhänge verständlich zu machen, sind reine Informationskampagnen nicht ausreichend. Aus diesem Grunde empfehlen vie-

le sozialwissenschaftliche Experten, über den Unverbindlichkeitsgrad von Anhörungen hinauszugehen und die entsprechenden sozialen Gruppen aktiv in den Prozess der Planerstellung einzubeziehen, selbst wenn diese Ausweitung in den gesetzlichen Vorschriften nicht ausdrücklich gefordert wird (Oppermann & Renn 2000; Gabriel & Völkl 2004).

Die Einführung und Umsetzung von Mitwirkungsangeboten bei der Verbesserung der Wasserqualität von Oberflächengewässern stößt auf eine Reihe von Herausforderungen. Darunter sind vor allem zu nennen (Wilderer 2011):

- Die Gewässer werden von unterschiedlichen Gruppen für unterschiedliche Zwecke genutzt: kommerzieller Bootsverkehr,

Tourismus und Erholung, Trinkwasser, Bewässerung, Fischfang, Kühlwasser- und Brauchwassernutzung, Abfallaufnahme (Nutzung der Senkenkapazität des Wassers), u.a.m.

- Die Gewässer erfüllen im Rahmen des Natur- und Landschaftsschutzes wichtige Funktionen (Regenerierung, Mikroklima, Artenvielfalt, Landschaftsbild).
- Die kulturelle und symbolische Bedeutung von Gewässern wird innerhalb der gesellschaftlichen Gruppen unterschiedlich gesehen. Damit verbunden sind unterschiedliche Sichtweisen über die Legitimität und Sinnhaftigkeit von menschlichen Interventionen in den Wasserkreislauf.

Jeder Lösungsversuch für eine Einigung zur gemeinsamen Nutzung der Wasserressourcen und zum Schutz gegen Hochwasser muss sich daran messen lassen, in welchem Maße er eine überzeugende Antwort oder eine tragfähige Lösung im Rahmen der oben genannten Nutzungskonflikte zu bieten hat. Das Ganze wird durch die Unsicherheit, die mit dem Klimawandel verbunden ist, noch erschwert.

Die folgenden Kapitel erörtern die Anforderungen an einen kompetenten und fairen Kommunikations- und Partizipationsprozess im Bereich der Gewässerplanung. Im Mittelpunkt steht das Konzept des analytisch-deliberativen Verfahrens, das ursprünglich von der US-Academy of Sciences entwickelt wurde und inzwischen weltweit bei wissenschaftsgesteuerten Planungsprozessen eingesetzt wird.

2. Anforderungen an ein Kommunikations- und Beteiligungskonzept

Die Zeiten, in denen Planungs- und Gestaltungsaufgaben in Wassereinzugsgebieten im „stillen Kämmerlein“ entwickelt und dann der staunenden Öffentlichkeit vorgestellt wurden, sind vorbei. Gerade bei Vorhaben, die in hohem Maße die Interessen und Werte der Bürgerinnen und Bürger betreffen, erwarten die Akteure, dass sie angemessen informiert und an den Planungen beteiligt werden (Kulinski & Oppermann 2010). Dies kommt auch beiden Seiten zugute: Die Planer erhalten wertvolle Informationen über die Präferenzen und Wünsche der Bürgerinnen und Bürger; die Vertreter der Bürgerschaft erfahren mehr über die Hintergründe der

SUMMARY

One of the major objectives of the European Water Framework Directive is to provide improved and new anticipation capabilities for decision-makers. Especially in context of the simulation of floods and landslides it is important to understand the behavioural patterns, interests, perceptions and attitudes of the actors which will constitute decisive factors for the development of realistic scenarios. Efficient management strategies, such as time flood warning as well as clean-up actions after floods, have to take into account the demands and attitudes of the affected population and users of water-related resources. Many of the previously realised projects in this field, however, placed communicative activities at the end of the process. However, they should be integrated as a central element from the beginning of the planning process.

The paper will explain a new concept in water basin management that is based on an analytic-deliberative process integrating different users, such as scientists, engineers, decision makers on different levels and citizens. The main objective is to guarantee risk management strategies, which are transparent for all actors, and to meet the basic demands of these actors. These demands need to be modelled as a basis to define the scope of actions designed to cope with the hazards of floods and to prepare precautionary measures. Analytic-deliberative procedures help to avoid bottlenecks or overcome obstacles for the realisation of effective protection.



02

Planungen und können sich dort auch konstruktiv einbringen. Dennoch enden viele Vorhaben zur Einbeziehung von Gruppen und Individuen in Frustrationen (Papadopoulos & Warin 2007). Das liegt zum größten Teil daran, dass die Erwartungen der Akteure nicht übereinstimmen, die Chancen und Grenzen der Mitwirkung oft unklar bleiben und die Teilnehmer es nicht gelernt haben, mit Konflikten konstruktiv umzu-

Gewässer werden von unterschiedlichen Gruppen für zahlreiche Zwecke genutzt. © Dieter Schütz | pixelio.de

gehen. Konstruktive Beteiligung der Bürger an öffentlichen Planungen setzt nämlich dreierlei voraus (Webler 1995): eine Legitimation durch angemessene Verfahren, eine faire und kompetente Repräsentanz der wichtigen Interessen und Werte in dem Beteiligungsverfahren und schließlich eine professionelle Betreuung und Steuerung der dort ablaufenden kommunikativen Prozesse. Im ersteren Fall geht es um einen transparenten und nachvollziehbaren Prozess der öffentlichen Entscheidungsfindung, in dem alle Interessen und Werte berücksichtigt werden; im zweiten Falle um eine angemessene und faire Beteiligung der Menschen, die direkt oder indirekt von den Konsequenzen dieser Entscheidung betroffen sind; im dritten Fall um eine kompetente, effiziente und zielgerichtete Moderation des Prozesses. Ein offener Dialog darf sich nicht auf die Einbahnstraße der Information der Betroffenen beschränken, sondern muss auch aktive Mitwirkungsrechte der Betroffenen an der Entscheidungsfindung einschließen. Ohne eine solche Rückkopplung wird jeder Dialog letztendlich im Sande verlaufen.

Gleichzeitig können Beteiligungsprozesse aber auch keine Spielwiese für alle möglichen und unmöglichen Forderungen aus der Bürgerschaft darstellen; sie brauchen einen festgefühten Rahmen, der Chancen und Grenzen der Mitwirkung verdeutlicht und die Handlungsspielräume identifiziert, die noch offen für die Gestaltungswünsche der Bürgerinnen und Bürger sind.

Innerhalb der Bandbreite der kommunikativen Instrumente unterscheidet man drei unterschiedliche Grundtypen (Carius et al. 1997):

- **Informationsbasierte Instrumente:**

Darunter sind alle Kommunikationsformen zu verstehen, die auf eine Unterrichtung der Zielgruppe(n) durch den Kommunikator abzielen. Eine Rückkopplung oder eine Zwei-Weg-Kommunikation ist dabei nicht vorgesehen. Diese Art der Kommunikation ist dann zu wählen, wenn die Zielgruppe sehr groß ist und die Absicht der Kommunikation durch reine Informationsübertragung gewährleistet werden kann. Häufig sind informationsbasierte Instrumente auch als Vor- oder Nachbereitung von dialog- oder beteiligungs-basierten Instrumenten geeignet. Zu den informationsbasierten Instrumenten gehören:

- Broschüren und andere schriftliche Materialien,
 - Flugblätter,
 - Zeitungen,
 - klassische Öffentlichkeitsarbeit (Pressemitteilungen, Radio-Interviews, Talk-Show-Teilnahme u.a.m.),
 - Internet-Webseiten,
 - Events (Wasserspiele, Theaterveranstaltungen, Konzerte, etc.).
 - Die **dialogbasierten Instrumente** schließen eine zweiseitige Kommunikation mit den Adressaten der Kommunikation mit ein, ohne diesen Adressaten aber die Gelegenheit zu geben, selbst an der Gestaltung, Bewertung oder Umsetzung von Entscheidungen und Maßnahmen Anteil zu nehmen. Der Dialog beschränkt sich daher auf Fragen und Antworten, Erläuterungen und Nachfragen, Abfragen von Meinungen und Urteilen sowie gegenseitige Unterrichtung. Zu den dialogbasierten Instrumenten gehören:
 - Broschüren mit Rückantwortmöglichkeit,
 - Aufrufe zum Einsenden von Meinungen,
 - Vorträge, Podiumsdiskussionen, Gesprächsrunden,
 - Tag der Offenen Tür (Tag des Wassers),
 - Internet-Foren mit Rückkopplungen,
 - Chat Rooms im Internet,
 - Dialogbestimmte Events (z.B. Angler im Gespräch mit Spaziergängern).
 - Die **beteiligungs-basierten Instrumente** lassen sich weiter in Orientierungs-, Selbstverpflichtungs- und Entscheidungsdiskurse unterscheiden. Bei den *Orientierungsdiskursen* (häufig auch Reflektionsdiskurse genannt) geht es um die Orientierung der Entscheidungsträger durch betroffene Gruppen, ohne dass diese direkten Einfluss auf die Entscheidungsfindung haben. Der Sinn der Orientierung besteht darin, dass die Entscheidungsträger die Anliegen der Gruppen kennen und verstehen lernen. Einige Instrumente zielen darüber hinaus darauf ab, mit den Vertretern der Gruppen gemeinsame Optionen zu diskutieren und die Vor- und Nachteile jeder Option gemeinsam zu reflektieren. Zu den Instrumenten der Orientierungsdiskurse gehören:
 - Anhörungen,
 - Unverbindliche Runde Tische,
 - Bürgerversammlungen,
 - Open Space Konferenzen,
 - Fokusgruppen.
- Bei den *Selbstverpflichtungsdiskursen* geht es um die Koordination von Handlungen, die

von den beteiligten Akteuren selbst ausgeführt und umgesetzt werden. Die politischen Entscheidungsträger können dabei Impulse geben oder eine organisatorische Plattform für diesen Diskurs zur Verfügung stellen. Beispielsweise könnten sich die Angler und die Wandervereine auf eine gemeinsame Wegeordnung einigen, die den Interessen der beiden Gruppen entgegenkommt. Zu den Instrumenten des Selbstverpflichtungsdiskurses gehören:

- Arbeitsgemeinschaften,
- Zukunftswerkstatt,
- Open-Space Konferenz (ist auch für Orientierungsdiskurs einsetzbar),
- Akteursbezogene Runde Tische.

Bei den *Entscheidungsdiskursen* (auch Gestaltungsdiskurse genannt) steht die Vorbereitung einer politischen (d.h. kollektiv verbindlichen) Entscheidung im Form von Handlungsempfehlungen oder die Entscheidung selbst an. Solche Diskurse sind dann angebracht, wenn bestimmte Gruppen oder Vertreter der Öffentlichkeit direkt an der Entscheidungsfindung beteiligt werden sollen. Zum Teil sind solche Beteiligungen rechtlich vorgeschrieben (etwa beim Scoping Verfahren) oder werden bewusst von den politischen Entscheidungsträgern eingesetzt, um die Anliegen der Betroffenen von Entscheidungen hinreichend berücksichtigen zu können und bei diesen Betroffenen eine positive Akzeptanz für die dann getroffenen Entscheidungen zu erzeugen. Zu den Instrumenten der Entscheidungsdiskurse gehören:

- Entscheidungsrelevante Runde Tische,
- Kooperative Planungsrunden,
- Bürgerforen,
- Konsensus-Konferenzen,
- Mediation (bei Konflikten).

Alle hier aufgeführten Instrumente haben ihre besonderen Vor- und Nachteile. Welches Instrument zum Zuge kommen soll, richtet sich zum einen nach dem Zweck der Kommunikation (Information, Dialog oder Beteiligung in den drei Ausprägungen), zum anderen nach dem Kontext des Themas. Aus diesem Grunde macht es wenig Sinn, eine Kommunikationsstrategie zu entwickeln, bevor nicht die Zielsetzung(en) der Kommunikatoren sowie der Kontext, in dem die Kommunikation stattfinden soll, geklärt sind.

3. Analytisch-deliberative Verfahren

Auch wenn es auf den jeweiligen Einzelfall ankommt, wie das passende Kommunikations- und Beteiligungskonzept zu wählen ist, so lässt sich bei Fragen des Wassermanagements dennoch eine grundsätzliche Forderung anbringen: die Notwendigkeit der Kombination von best-möglichem Wissen mit fairer und überzeugender Argumentation.

Die US-Nationale Akademie der Wissenschaften hat speziell für diese Anforderung im Jahre 1996 einen Vorschlag erarbeitet, der unter dem Namen „analytisch-deliberative process“ in die Literatur eingegangen ist (Stern & Fineberg 1996). Kernpunkt dieses Ansatzes ist die Kombination von wissenschaftlich und technisch ausgerichteten Analyseverfahren mit argumentativ ausgerichteten Diskursverfahren zur Abwägung von Vor- und Nachteilen einer jeden Option zur Erfüllung erwünschter Ziele (03).

Formate des analytisch-deliberativen Verfahrens

Nicht-organisierte Bürger(innen):
Bürger-Konferenzen, Planungszellen, Bürgerforum, Deliberative Polling

Organisierte Gruppen: Runde Tische, Foren, Mediation (bei Konflikten)

Gruppendelphi, Wertbaumverfahren

Workshops, Konsensuskonferenz

Anhörung, Planspiele

Gutachten

Deliberation

Analyse

Inspiriert ist der analytisch-deliberative Ansatz von der Erkenntnis, dass politische Entscheidungen über komplexe Umweltregulierungen kollektive Einigungen über eine ethisch gerechtfertigte und wünschenswerte Zukunft darstellen. Sie umfassen immer zwei grundsätzliche Elemente: Wissen über Zweck-Mittel Beziehungen und Präferenzen in Bezug auf Mittel und Ziele. Das erste Element, Wissen

um Ursache-Wirkungsketten, ist eine Frage der Expertise oder der Sachkenntnis. Damit verbindet man eine Person, eine Personengruppe oder Institution, die den für die Entscheidung relevanten Wissensschatz beherrscht. Relevantes Wissen muss nicht unbedingt auf systematischen und theoriegeleiteten Erkenntnissen beruhen. Für bestimmte Fragen sind auch anekdotisches Wissen und die berühmte Spürnase erfahrener Politiker bedeutsam. Aber für Entscheidungen mit erheblichem Risikopotential und der Möglichkeit weitreichender Nebenfolgen ist es geradezu lebenswichtig, die besten Expertisen zur Verfügung zu haben (Renn 2008: 304ff.). Vor allem benötigt man im Bereich der Wasser- und Hochwasserregulierung Modelle und Simulationen, die Informationen über mögliche Abläufe von Hochwasserereignissen und den Erfolgsaussichten von vorbeugenden und nachsorgenden Maßnahmen vermitteln. Das zweite Element von Entscheidungen, Präferenzen über Mittel und Ziele, ist dagegen nicht auf Wissen bezogen, sondern auf moralische Normen und soziale Werten, d.h. auf (i) Beurteilungen der ethischen Begründbarkeit von Handlungen (Normen) und (ii) der

sozialen Wünschbarkeit dieser Handlungen oder Konsequenzen in einer werthepluralistischen Gesellschaft (Webler 1995). Was ethisch gerechtfertigt ist, lässt sich in der Regel nur im diskursiven Wettstreit aller Mitglieder eines Sozialsystems auf der Basis begründbarer Argumentation über das kollektiv verbindliche „gute“ Leben festhalten. Was sozial wünschenswert ist oder nicht, ist dagegen eine Frage individu-

ellen Ermessens; bei kollektiven Entscheidungen müssen die verschiedenen Werte und Präferenzen für erwartete Handlungsfolgen miteinander abgestimmt werden. Anders als bei Sachwissen, wo es zumindest ansatzweise gelingen kann, mit Hilfe von methodologischen Regeln falsche von richtigen Aussagen intersubjektiv gültig zu trennen, sind zur Beurteilung der Wünschbarkeit von Maßnahmen oder Entscheidungsalternativen allgemeingültige Regeln wesentlich schwieriger zu erstellen. Konkurrierende allgemeinverbindli-

che Maßstäbe bedeuten aber nicht Willkür: Ordnungsregeln der Konsistenz, der Kohärenz und der Verallgemeinerungsfähigkeit behalten auch bei normativen und wertbezogenen (evaluativen) Aussagen ihre Gültigkeit. Zudem binden Normen in Form von gesetzlichen Vorschriften individuelles und kollektives Handeln.

Sofern die ethische Berechtigung und die soziale Wünschbarkeit von Handlungsoptionen durch verbindliche Wertentscheide der Vergangenheit determiniert sind, können Entscheidungen aufgrund von Sachwissen und juristischer Expertise getroffen werden. Dieser Fall ist jedoch selten, da Gesetze in der Regel allgemeine und vor allem im Bereich des Hochwasserschutzes auslegbare (etwa durch unbestimmte Rechtsbegriffe) Vorschriften umfassen. Insofern muss normative und evaluative Bewertung von Optionen durch Rekurs auf die jeweils begründbaren Regeln und herrschenden Präferenzen beurteilt werden. Die Frage ist: Wer kann diese Beurteilung am besten durchführen?

4. Grenzen der repräsentativen Demokratie

Immer wieder wird bei der Beantwortung dieser Frage auf das Mehrheitsprinzip hingewiesen. Sind es nicht die gewählten Volksvertreter, die in ihrer Mehrheit beschließen, welche Werte zur Beurteilung der Wünschbarkeit von Optionen zur Anwendung kommen sollen? Würde Betroffenheitsdemokratie nicht zu einer Aufweichung der repräsentativen Demokratie führen? (Feindt 2011).

Die beiden Grundprinzipien der liberaldemokratischen Grundordnung sind die Souveränität des Individuums, im Rahmen der politischen Ordnung seine eigenen Präferenzen ausleben zu können und die Gleichstellung aller Individuen bei der Bestimmung kollektiv verbindlichen Handelns auf der Basis konsensfähiger Normen und aushandelbarer kollektiver Präferenzen bzw. Interessen. Sofern Handlungen von Individuen keine Auswirkungen auf andere Individuen haben oder diese direkt den Handlungen zustimmen (etwa durch einen Vertrag oder Tausch), ist es allein die Aufgabe kollektiver Institutionen, die Spielregeln von Vertrag und Tausch zu überwachen und die Chancengleichheit der am Tausch beteiligten Personen sicherzustellen. Weder die Mehrheit des



Die moderne Gesellschaft braucht keinen Ersatz für ihre repräsentativen Gremien, sondern sie benötigt vielmehr eine Funktionsbereicherung durch diskursive Formen, die den repräsentativen Gremien wiederum in ihrem eigenen Streben nach Legitimation zugute kommen. © Siegfried Baier | pixelio.de

Parlaments noch die Mehrheit des Volkes hat das Recht, der Minderheit Optionen aufzuzwingen, die von den Vertretern dieser Minderheit nicht gewollt werden. Würde man an diesem Prinzip rütteln, gäbe es keine Privatautonomie, Gemeindeautonomie, keinen Föderalismus und keinen Minderheitenschutz mehr.

Anders sieht es bei Handlungen von Individuen oder Gruppen aus, die Auswirkungen auf andere haben. In diesem Falle muss sichergestellt werden, dass die von den Auswirkungen betroffenen Gruppen in ihren eigenen Rechten und Präferenzen nicht eingeschränkt werden. Im Idealfall geschieht dies durch explizite Zustimmung. Häufig ist aber der Kreis der Betroffenen nicht eindeutig bestimmbar oder es klafft eine Schere zwischen dem Kreis der Nutznießer und der Risikoträger. Je diffuser die Betroffenheit, desto bedeutsamer sind repräsentative Entscheidungsformen, die quasi als Ersatz für die fehlende Bestimmbarkeit der Betroffenen die Wünschbarkeit beurteilen. Schließlich existieren kollektive Güter, wie Sicherheit und saubere Umwelt, die alle Bürger gleichzeitig betreffen und die von daher kollektiv geregelt werden müssen.

Die Wünschbarkeit von politischen Entscheidungsoptionen mit Hilfe repräsentativer Gremien zu bestimmen, bedeutet also nicht die Erfüllung demokratischer Grundsätze, sondern stellt, angesichts unübersichtlicher Betroffenheitsverhältnisse, zeitlicher und örtlicher Grenzen, direkter Mitwirkung und konkurrierender Aufgaben, die Mitglieder einer Sozialgemeinschaft zu erfüllen haben eine pragmatische Lösung dar. Dennoch ist gerade in Situationen, in denen Entscheidungen weitreichende Folgen für die Gestaltung der eigenen Lebenswelt in abgrenzbaren Regionen haben, das Repräsentationssystem oft überfordert. Die von den Entscheidungen betroffenen Menschen sehen weder ihre eigenen Interessen in den Entscheidungsgremien widerspiegelt noch erkennen oder anerkennen sie die Gründe, die zu der Wahl der getroffenen Entscheidungsoption geführt haben.

Die vielfach beschworene Politikverdrossenheit ist dabei zweifach motiviert: Zum einen durch den fehlenden Nachvollzug der Begründungen für die einmal getroffene Wahl aus dem Kranz der möglichen Optionen; zum anderen durch die wahrgenommene Distanz zwischen den Polen

Expertentum und Politik auf der einen, sowie dem *eigenen Wissen und dem vorherrschenden Wertgefühl* auf der anderen Seite. Die Verdrossenheit drückt sich vor allem bei planerischen Entscheidungen in Protestbewegungen gegen repräsentativ getroffene Beschlüsse aus. Warum gerade ein besonders attraktives Wohngebiet aus Gründen des Hochwasserschutzes nicht bebaut werden darf und warum wertvolle Flächen als Überflutungsgebiete ausgewiesen werden sollen, ist den meisten Menschen in dem jeweiligen Ort schwer plausibel zu machen und gibt Anlass für mancherlei ad hoc Erklärungen, die meist in Verschwörungstheorien enden.



05

5. Was kann der analytisch-deliberative Prozess leisten?

Analytisch-deliberative Verfahren bieten vor diesem Hintergrund einen möglichen Lösungsweg an, wenn sie mit einer umfassenden Bürgerbeteiligung gekoppelt werden (Renn & Schweizer 2009). Als Bürgerbeteiligungsverfahren sind hier kommunikative Prozesse gemeint, in denen Personen, die qua Amt oder Mandat keinen Anspruch auf Mitwirkung an kollektiven Entscheidungen haben, die Möglichkeit erhalten, durch die Eingabe von Wissen, Präferenzen, Bewertungen und Empfehlungen auf die kollektiv wirksame Entscheidungsfindung direkten oder indi-

Warum wertvolle Flächen als Überflutungsgebiete ausgewiesen werden sollen, ist den meisten Menschen in dem jeweiligen Ort nur schwer plausibel zu machen. © Luise | pixelio.de

rekten Einfluss zu nehmen. Dabei wird der Fokus weg von der eigentlichen Entscheidung und hin zu dem Weg, auf dem die Entscheidung getroffen wird, verlagert. Es gibt fünf Gründe, die bei der Umsetzung von Gewässer- und Hochwasserschutz für eine stärkere Einbindung der Bürgerinnen und Bürger in die Entscheidungsfindung sprechen (Newig 2007; Stirling 2008):

- Durch Einbezug von örtlich betroffenen Bevölkerungsteilen kann zum ersten die Wissensbasis erweitert werden. Neben dem systematischen Wissen der Experten und dem Prozesswissen der Entscheidungsträger kann für viele Entscheidungsprobleme auch das Erfahrungswissen der betroffenen Bevölkerung von besonderer Bedeutung sein. Dieses Erfahrungswissen kann je nach Problemtyp eine wichtige Bereicherung und gelegentlich auch eine Korrektur des Expertenwissens darstellen, vor allem dann, wenn die Ursache-Wirkungszusammenhänge in der Realität stark streuen oder die Wirkungen von den Entscheidungen der betroffenen Bevölkerung mit abhängen.
- Zum zweiten kann der analytisch-deliberative Prozess den jeweiligen Entscheidungsträgern wichtige Informationen über die möglichen Folgen der verfügbaren Handlungsoptionen (analytischer Teil) und über die Verteilung der Präferenzen und Werte der betroffenen Bevölkerungsteile (deliberative Teil) vermitteln. Da Entscheidungen auf Folgewissen und Urteile über die Wünschbarkeit der zu erwartenden Folgen beruhen, ist es für Entscheidungsträger häufig unverzichtbar, die Wahrnehmung der Wünschbarkeit der Folgen explizit zu erheben und (mit) als Grundlage für die eigene Entscheidung aufzugreifen. Es gibt viele Formen, Präferenzen zu erkunden und in die Entscheidungsfindung einzubinden. Das reicht von den eher passiven Instrumenten der Befragung und der Fokusgruppen bis zu den eher gestaltenden Formen von Konsensuskonferenzen, Bürgerforen, Planungszellen u.a.m. (s.o.)
- Zum dritten kann vor allem der deliberative Teil des Prozesses als Instrument zu einem fairen Aushandeln von Ressourcen dienen. Die Literatur zu Spieltheorie, Mediation, Schlichtung und Aushandlungsprozessen ist ein beredtes Zeugnis für diese konfliktvermittelnde Funktion von Bürgerbeteiligung. Dahinter steht die Auffassung, dass diejenigen, die in Konkurrenz mit anderen Anspruch auf eine Ressource erheben, am besten in einem „fairen“ Verfahren (procedural equity) eine eigene Lösung für eine faire Verteilung finden sollen. Oft müssen beim Hochwasserschutz Belastungen auf viele Schultern verteilt werden (Landwirte, Forstwirte, Tourismusbranche, Anwohner, etc.). Proteste sind dann vorprogrammiert, wenn bei den Betroffenen der Eindruck herrscht, dass einige stärker belastet werden als andere, obwohl es dafür keine sachlichen Gründe gibt.
- Zum vierten kann Deliberation als ein Wettstreit der Argumente angesehen werden, mit dem Ziel, auf der Basis von Begründungen kollektive Entscheidungen auf eine normativ abgesicherte Grundlage zu stellen. Ziel eines solchen deliberativen Aushandlungsverfahrens ist die diskursive Austragung von begründeten Standpunkten unter den Rahmenbedingungen einer strikt auf Logik und konsistenter Ableitung (Geltungsanspruch und Geltungsnachweis) beruhenden Prüfung der jeweils vorgebrachten Argumente. Dabei geht es vor allem um die Frage der Zumutbarkeit von normativen Setzungen für alle Betroffenen (über den Kreis derer hinaus, die an dem Diskurs teilnehmen).
- Zum fünften kann der analytisch-deliberative Prozess als ein Element der Gestaltung der eigenen Lebenswelt angesehen werden. In dieser Funktion wird den betroffenen Menschen die Möglichkeit gegeben, in Form von Selbstverpflichtungen oder von Verantwortungszuschreibungen Veränderungen in ihrer eigenen Lebenswelt herbeizuführen.

Der Einsatz von analytisch-deliberativen Verfahren an öffentlichen Planungen im Gewässerbereich und Hochwasserschutz setzt einen offenen Dialog voraus. Dieser Dialog muss nach beiden Seiten hin offen sein, d.h. er darf sich nicht auf die Einbahnstraße der Information der Betroffenen beschränken, sondern sollte auch Mitwirkungsrechte der Betroffenen an der Entscheidungsfindung einschließen. Ohne eine solche Rückkopplung wird jeder Dialog letztendlich im Sande der Frustration scheitern (Renn 2004). Mitwirkung ist also eine notwendige Bedingung für einen erfolgreichen Dialog.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Moderne Gesellschaften brauchen mehr denn je analytisch-deliberative Verfahren der Entscheidungsfindung, in denen betroffene Bürgerinnen und Bürger die Gelegenheit erhalten, in einem Klima gegenseitiger Gleichberechtigung, der Anerkennung von Sachwissen und normativen Vorgaben sowie des Respekts vor der Legitimität unterschiedlicher Wertesysteme und Präferenzen Handlungsoptionen zu diskutieren, die damit verbundenen Folgen und Implikationen zu bewerten und auf dieser Basis Empfehlungen für repräsentative Gremien und/ oder für ihre Mitbürger und Mitbürgerinnen zu formulieren. Die moderne Gesellschaft braucht demnach keinen Ersatz für ihre repräsentativen Gremien, sondern sie benötigt vielmehr eine Funktionsbereicherung durch diskursive Formen, die den repräsentativen Gremien wiederum in ihrem eigenen Streben nach Legitimation zugute kommen.

Analytisch-deliberative Verfahren der Beteiligung von Experten, Interessengruppen und betroffenen Bürgerinnen und Bürgern werden aber nur dann zu einer befriedigenden, d.h. sachlich kompetenten, fairen, effizienten und legitimierten Lösung führen, wenn alle Beteiligten gewillt sind, sich in einem diskursiven Prozess über die möglichen Lösungswege argumentativ zu verständigen. Verständigungsorientierte, auf Argumentation aufbauende Dialogführung ist dabei an die Bedingung geknüpft, dass die am Diskurs beteiligten Personen und Gruppen gleichberechtigt und ohne äußeren Zwang ihre Interessen und Werte offenlegen und durch Austausch von Argumenten eine gemeinsame Lösung anstreben.

Die entscheidende Voraussetzung für den Erfolg von analytisch-deliberativen Verfahren ist aber die Bereitschaft der Politiker und der Verwaltungsfachleute, die Formen der Beteiligung nicht als lästige Pflichtübung, sondern als Hilfestellung ihrer Arbeit und als Bereicherung der repräsentativen Demokratie anzusehen. In einem 2008 herausgegebenen Gutachten der US-amerikanischen Akademie der Wissenschaften zu Beteiligungsverfahren in Umwelt- und Gesundheitsfragen (National Research Council 2008) wurde auf der Basis von Metaanalysen der vorliegenden

ZUSAMMENFASSUNG

Der Beitrag stellt ein neues Beteiligungs- und Kommunikationskonzept vor, das auf dem Modell des analytisch-deliberativen Verfahrens beruht. Dieses Verfahren sorgt zunächst für mehr Transparenz, erhöht die analytische Qualität der wissenschaftlichen Eingaben und stellt den Argumentationsaustausch unter die Bedingungen von Kompetenz, Fairness und Effizienz. Mit diesem Verfahren können Maßnahmen zum Hochwassermanagement identifiziert und bewertet werden, um einen effektiven Schutz für Mensch und Umwelt zu gewährleisten.

Evaluationen die zentrale Erkenntnis gewonnen, dass der Erfolg von Beteiligung am stärksten davon abhängt, welche Erwartungen die Initiatoren damit verbinden. Waren diese positiv und ergebnisoffen, kam es meist zu einem erfolgreichen Abschluss der Beteiligungsmaßnahmen. Waren die Initiatoren jedoch skeptisch oder sogar negativ eingestellt, wirkte sich dies direkt auf die Motivation und Kompromissbereitschaft der mitwirkenden Personen aus. In zwei Dritteln der untersuchten Fälle führte dies zum Abbruch oder einem wenig zufriedenstellenden Ergebnis. Es ist also nicht sinnvoll, analytisch-deliberative Verfahren von oben zu verordnen, sondern es gilt vielmehr, alle Beteiligte davon zu überzeugen, dass in einer komplexen und pluralen Welt diese Form der Entscheidungshilfe die politisch verfasste Ordnung und Kultur beleben und bereichern kann.

Ortwin Renn

Literatur

- Carius, R.; Köberle, S.; Oppermann, B.; Renn, O.; Schneider, E. & Schrimpf, M. 1997: *Bürger gestalten ihre Region – am Beispiel der Bürgerbeteiligung an der Abfallplanung für die Region Nordschwarzwald*. In: M. Birzer, P.H. Feindt und E. Spindler (Hrsg.): *Nachhaltige Stadtentwicklung*. Bonn: *Economica Verlag*, S. 73–84
- Feindt, P. 2011: *Regierung durch Diskussion? Diskurs- und Verhandlungsverfahren im Kontext von Demokratietheorie und Steuerungsdiskussion*. Frankfurt am Main: *Peter Lang Verlag*.
- Gabriel, O. & Völkl, K. 2004: *Politische und soziale Partizipation*. In: O. Gabriel und E. Holtmann (Hrsg.): *Handbuch Politisches System der Bundesrepublik Deutschland*. München und Wien: *Oldenbourg*, S. 523–573.
- Kuklinski, O. & Oppermann, B. 2010: *Partizipation und räumliche Planung*. In: D. Scholich, und P. Müller (Hrsg.): *Planungen für den Raum zwischen Integration und Fragmentierung*. Frankfurt: *Internationaler Verlag der Wissenschaften*, S. 165–171.

DER AUTOR


**PROF. DR. DR. H.C.
ORTWIN RENN**

ist Ordinarius für Technik- und Umweltsoziologie an der Universität Stuttgart und Direktor des zur Universität gehörigen Interdisziplinären Forschungsschwerpunkts Risiko und Nachhaltige Technikentwicklung am Internationalen Zentrum für Kultur- und Technikforschung (ZIRN). Neben seinem Engagement an der Universität Stuttgart gründete Renn die DIALOGIK gGmbH, ein gemeinnütziges Forschungsinstitut, dessen Hauptanliegen in

der Erforschung und Erprobung innovativer Kommunikations- und Partizipationsstrategien in Planungs- und Konfliktlösungsfragen liegt. Nach seiner Ausbildung in Volkswirtschaftslehre, Soziologie und Sozialpsychologie und anschließender Promotion an der Universität Köln arbeitete Renn als Wissenschaftler und Hochschullehrer in Deutschland, den USA und der Schweiz. Seine berufliche Laufbahn führte ihn über das Forschungszentrum Jülich, eine Professur an der Clark University in Worcester/Massachusetts (USA) und eine Gastprofessur an der ETH Zürich nach Stuttgart. Von 1998 bis 2003 leitete er die Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg. Ortwin Renn verfügt über mehr als dreißigjährige Erfahrung auf dem Feld der Risikoforschung, der Technikfolgenabschätzung sowie der Einbindung von Interessengruppen und der allgemeinen Öffentlichkeit bei der Lösung konfliktgeladener Themen. Ortwin Renn hat zahlreiche Preise und Auszeichnungen erhalten. Darunter sind vor allem die Ehrenprofessur an der Technischen Universität München (Prof. ing. eh.), die Ehrendoktorwürde der ETH Zürich (Dr. sc. h.c.) und der „Distinguished Achievement Award“ der Internationalen Gesellschaft für Risikoanalyse (SRA) zu nennen. Er ist Mitglied nationaler und internationaler Akademien der Wissenschaft und gehört zahlreichen wissenschaftlichen Beiräten, Kuratorien und Kommissionen an. Seit 2005 leitet er den Nachhaltigkeitsbeirat des Landes Baden-Württemberg. Zu den Publikationen von Ortwin Renn gehören über 30 Monografien und editierte Sammelbände sowie mehr als 250 wissenschaftliche Publikationen. Besonders hervorzuheben ist sein 2008 erschienenes Werk: *Risk Governance* (Earthscan: London).

Kontakt

Institut für Sozialwissenschaften
Universität Stuttgart
Seidenstraße 36
70174 Stuttgart
Tel. 0711/6858-4970
Fax 0711/6858-4295
E-Mail: ortwin.renn@sowi.uni-stuttgart.de
Internet: www.zirn-info.de

- Newig, J. 2007: Does Public Participation in Environmental Decisions Lead to Improved Environmental Quality? Towards an Analytical Framework. *International Journal of Sustainability Communication, Special Volume on Communication, Cooperation, Participation*, 1 (1): 51–71.
- Papadopoulos Y. & Warin P. 2007: Are Innovative, Participatory and Deliberative Procedures in Policy Making Democratic and Effective? *European Journal of Political Research*, 46 (4): 445–472.
- Renn, O. 2004: The Challenge of Integrating Deliberation and Expertise: Participation and Discourse in Risk Management. In: T. McDaniels and M. J. Small (Hrsg.): *Risk Analysis and Society: An Interdisciplinary Characterization of the Field*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Renn, O. 2008: *Risk Governance. Coping with Uncertainty in a Complex World*. London: Earthscan.
- Renn, O. & Oppermann, B. 2000: Bürgerbeteiligung in der Raumplanung. In: H. Bott, C. Hubig, F. Pesch und G. Schröder (Hrsg.): *Stadt und Kommunikation im digitalen Zeitalter*. Frankfurt am Main und New York: Campus, S. 243–274.
- Renn, O. & Schweizer, P. 2009: *Inclusive Risk Governance: Concepts and Application to Environmental Policy Making*. *Environmental Policy and Governance*, 19 (2): 174–185.
- Stern, P.C & Fineberg, V. 1996: *Understanding Risk: Informing Decisions in a Democratic Society*. National Research Council. Washington, D.C.: The National Academies Press.
- Stirling, A. 2008: „Opening Up“ and „Closing Down“: Power, Participation, and Pluralism in the Social Appraisal of Technology. *Science, Technology and Human Values*, 33 (2): 262–294.
- US-National Research Council of the National Academies 2008: *Public Participation in Environmental Assessment and Decision Making*. Washington, D.C.: The National Academies Press.
- Webler, T. 1995: „Right“ Discourse in Citizen Participation: An Evaluative Yardstick. In: O. Renn; T. Webler and P. Wiedemann (Hrsg.): *Fairness and Competence in Citizen Participation. Evaluating Models for Environmental Discourse*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer, S. 35–86.
- Wilderer, P. (Hrsg.) 2011: *Treatise on Water Science. Vol. 1*, Oxford: Academic Press