

*Nadine Staben, Michael Feller, Susanne Grobe, Christoph Nolte,
Marina Neskovic, Andreas Hein, Wolf Merkel, Ronald Roepke*

Sichere Wasserversorgung im Klimawandel

Herausforderungen und Lösungsansätze

1 Einleitung

In der Wasserwirtschaft ist es aufgrund der Langlebigkeit der technischen Infrastrukturen üblich, bei der Auslegung Planungs- und Investitionszeiträume von 50 Jahren und länger zu berücksichtigen. Das bedingt notwendigerweise auch einen Umgang mit sich verändernden Rahmenbedingungen sowie daraus resultierenden Risiken.

Für die Wasserwirtschaft derzeit besonders relevante Wandelfaktoren sind der Klimawandel, die Veränderungen der Demografie sowie der Wirtschaftsstruktur im Versorgungsgebiet. Hieraus können veränderte Rohwasserverfügbarkeiten und -qualitäten, Trinkwasserbedarfe oder Qualitätsveränderungen des Trinkwassers innerhalb des Verteilungsnetzes resultieren. Aus diesen Gründen ist es erforderlich, diese Effekte möglichst gut abzuschätzen und in der Planung wasserwirtschaftlicher Anlagen zu berücksichtigen. Hier gibt es bereits Praxisbeispiele von Wasserversorgungsunternehmen, die Veränderungen in Demografie und Wirtschaftsentwicklung im Rahmen von Wasserbedarfsprognosen abschätzen, um ihre technischen und betriebswirtschaftlichen Strategien hierauf abzustellen. Mögliche Klimawandelfolgen werden bei diesen Prognosen und Langfristplanungen bislang weniger berücksichtigt. Gründe sind häufig der Mangel an detaillierten, regionalen Klimaprojektionen und die fehlende Erfahrung, die möglichen Auswirkungen auf die einzelnen Anlagen und Prozessstufen der Wasserversorgung einzuschätzen.

Die Wettbewerbsfähigkeit einer Region ergibt sich aus den Potenzialen der vorhandenen Wirtschaftsstruktur und dem Zusammenspiel von Standortfaktoren.

Viele dieser Faktoren werden direkt oder indirekt durch das Klima und dessen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt beeinflusst. Von diesen Auswirkungen kann die Wettbewerbsfähigkeit von wasserintensiven Industrieunternehmen betroffen sein. Daher sollten auch hier die möglichen Klimawandelfolgen bei der Planung, Auslegung und Umrüstung wasserwirtschaftlicher Anlagen berücksichtigt werden.

Dass der Klimawandel sowohl in der *dynaklim*-Projektregion als auch generell ein Thema ist, welches in Planung und Betrieb von Anlagen der Wasserversorgung nicht vernachlässigt werden sollte, zeigen folgende Praxisbeispiele:

- ◆ In der Nacht vom 18. zum 19. Januar 2007 zieht der Orkan Kyrill über weite Teile Westeuropas: In Ostwestfalen-Lippe fallen über 160 Millimeter Niederschlag, und die regionalen »Flüsschen« Werre und Else überfluten die Brunnen der Trinkwassergewinnung und des Wasserwerks der Energie- und Wasserversorgung Bünde GmbH. Das Wasserwerk und die Brunnen gehen für einen Monat außer Betrieb. Seit 1990 ist dies das dritte »100-jährige Hochwasser« in der Region.
- ◆ Wie in anderen Teilen von Mitteleuropa steigt die Trinkwassernachfrage im Frühsommer 2006 in Luxemburg infolge der mehrwöchigen Hitzewelle mit Tagesmaximaltemperaturen von oftmals weit über 30 °C so stark an, dass die Behörden den Wasserverbrauch pro Einwohner beschränken.
- ◆ Das Hochwasser vom November 2009 überflutet in Verbindung mit Starkniederschlagsereignissen die Brunnenfelder der Ruhrwasseraufbereitung Essen-Kettwig der Rheinisch-Westfälischen Wasserwerksgesellschaft (RWW). Damit bestand die Gefahr der Rekontamination des infiltrierten Trinkwassers durch Flusswasser. Das Wasserwerk wurde komplett außer Betrieb genommen, die Wasserversorgung war durch Verbundnetze sichergestellt.
- ◆ Nach einem Starkregenereignis im Januar 2011 muss ein Metall bearbeitendes Unternehmen im Sauerland, das Flusswasser zur Kühlung seiner Produktionsanlagen verwendet, zum wiederholten Mal seine Eigenwasserversorgung außer Betrieb nehmen und auf die Versorgung mit Trinkwasser aus der öffentlichen Wasserversorgung umstellen. Ursächlich hierfür ist eine Verstopfung der Grobsiebe der vorhandenen Filteranlage durch im Vorfluter mitgeführtes Schwemmgut (Gras, Äste usw.). Zur Reaktivierung der Leistungsfähigkeit muss

der Betrieb jedes Mal zeit- und kostenintensive Reinigungsmaßnahmen aufwenden. Für die Versorgung mit Wasser der öffentlichen Wasserversorgung fallen circa fünfmal höhere Kosten an.

Diese Beispiele sind nur eine Auswahl der im Rahmen von *dynaklim* recherchierten realen Probleme der Wasserversorgung (öffentlich oder industriell), die von extremen Witterungsbedingungen verursacht wurden. Ob Klimawandel oder normale Variabilität des Wetters – Tatsache ist, dass in den letzten zwei Jahrzehnten außergewöhnlich oft die langjährigen Planungswerte zu Niederschlagshöhen, zur Häufigkeit von Starkregenereignissen und Hochwässern oder zur Dauer von Trockenperioden überschritten wurden (z. B. DWD, 2012; WMO, 2013). Die Klimaprojektionen weisen generell eine Zunahme dieser Extremsituationen (mit regionalen Unterschieden) für Deutschland aus (z. B. UBA 2005; für *dynaklim*-Region: Quirnbach et al., 2012). Diese zu erwartenden Veränderungen sowie die Variabilität der von verschiedenen Klimamodellen projizierten Klimaänderungen führen zu starken Unsicherheiten bei Planung und Betrieb wasserwirtschaftlicher Anlagen. Besonders vor dem Hintergrund der teilweise sehr langen Nutzungsdauern ist im Bereich der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur eine Berücksichtigung zukünftiger Verhältnisse für einen wirtschaftlichen Mitteleinsatz von großer Relevanz.

Unter Berücksichtigung der Gebietsdaten für die Emscher-Lippe-Region wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens *dynaklim* die Herausforderungen des Klimawandels an die Trinkwasserversorgung auf der Grundlage von Erfahrungsberichten, Expertenmeinungen und Prognosen herausgearbeitet (Mälzer & Rohn, 2010). Auf dieser Grundlage wurden in verschiedenen Teilprojekten mögliche Anpassungsstrategien für die einzelnen Prozessstufen der öffentlichen Wasserversorgung sowie für die Wasserversorgung von wasserintensiven Industrien entwickelt.

Der vorliegende Beitrag stellt die entwickelten Methoden der Risiko- und Potenzialanalyse sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen zur Sicherung der Wasserversorgung unter sich verändernden Rahmenbedingungen vor. Diese wurden gemeinsam mit Praxispartnern aus der *dynaklim*-Region entwickelt und exemplarisch sowohl bei einem Wasserversorgungsunternehmen (RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH, Mülheim an der Ruhr) als auch einem regional ansässigen Industrieunternehmen mit eigener Wasserversorgung angewendet und umgesetzt (Ergebnisse s. Kapitel 3).

2 Identifikation von Risiken und Anpassungsbedarf

Der Klimawandel ist für die Wasserversorgung nur ein Wandelfaktor von mehreren. Die Sicherstellung der Wasserversorgung bei langen Trockenperioden, bei Qualitätsveränderungen des Rohwassers oder bei durchschnittlich sinkendem Wasserbedarf mit höherem Spitzenbedarf sollte im gesamten Wasserversorgungskontext analysiert werden.

Eine in Bezug auf Trinkwassermenge und Trinkwasserqualität verlässliche Wasserversorgung kann unter den oben beschriebenen Wandelbedingungen nur gesichert werden, wenn eine Auseinandersetzung mit den potenziellen Risiken und Möglichkeiten der Anpassung frühzeitig stattfindet, bevor die Versorgungssicherheit gefährdet ist. Hierbei hilft eine systematische Vorgehensweise, wie sie im Rahmen von *dynaklim* entwickelt wurde (siehe Abbildung 1). Sie beinhaltet eine Status- und Gefährdungsanalyse für jede Prozessstufe der Wasserversorgung: Wasserschutz, Gewinnung, Aufbereitung und Speicherung/Verteilung. Diese Methodik wurde im Rahmen von *dynaklim* für ausgewählte Anlagen des Projektpartners RWW angewendet, wobei wichtige Erkenntnisse über mögliche Klimawandelfolgen und Risikobereiche der Versorgung gewonnen werden konnten.

In einem ersten Schritt der *Informationssammlung und Sensibilisierung* sind die für das Wasserversorgungsunternehmen relevanten Wandelfaktoren zu erheben. Diese können zum Beispiel der Klimawandel, die Bevölkerungsentwicklung oder wirtschaftliche Veränderungen sein. Auf Basis dieser Wandelfaktoren sind Szenarien zur möglichen Entwicklung von Wasserbedarf, Rohwasserdargebot und Rohwasserqualität zu definieren.

Im Rahmen von *dynaklim* wurden beispielhaft regionale Klimawandelszenarien entwickelt (vgl. Quirnbach et al., 2012) und mit sozioökonomischen Szenarien, die die Bevölkerungsentwicklung sowie die wirtschaftliche Entwicklung berücksichtigen, kombiniert. Klimatisch ist mit einer Verschiebung von Niederschlagssummen von den Sommermonaten in die Wintermonate zu rechnen. Weiterhin werden voraussichtlich sommerliche Hitze- und Trockenperioden sowie die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen zunehmen (vgl. Quirnbach et al., 2012). In Kombination mit den oben genannten sozioökonomischen Veränderungen ergeben sich für die *dynaklim*-Region verschiedene Veränderungen der Wasserbedarfe. Es ist aufgrund der rückläufigen industriellen wasserintensiven Aktivität in der Region und der demografischen Veränderung mit einem Rückgang der jährlich aus der öffentlichen Versorgung bezogenen Wassermenge von bis zu 18 Prozent pro Jahr bis 2030 zu rechnen. In Kombination mit

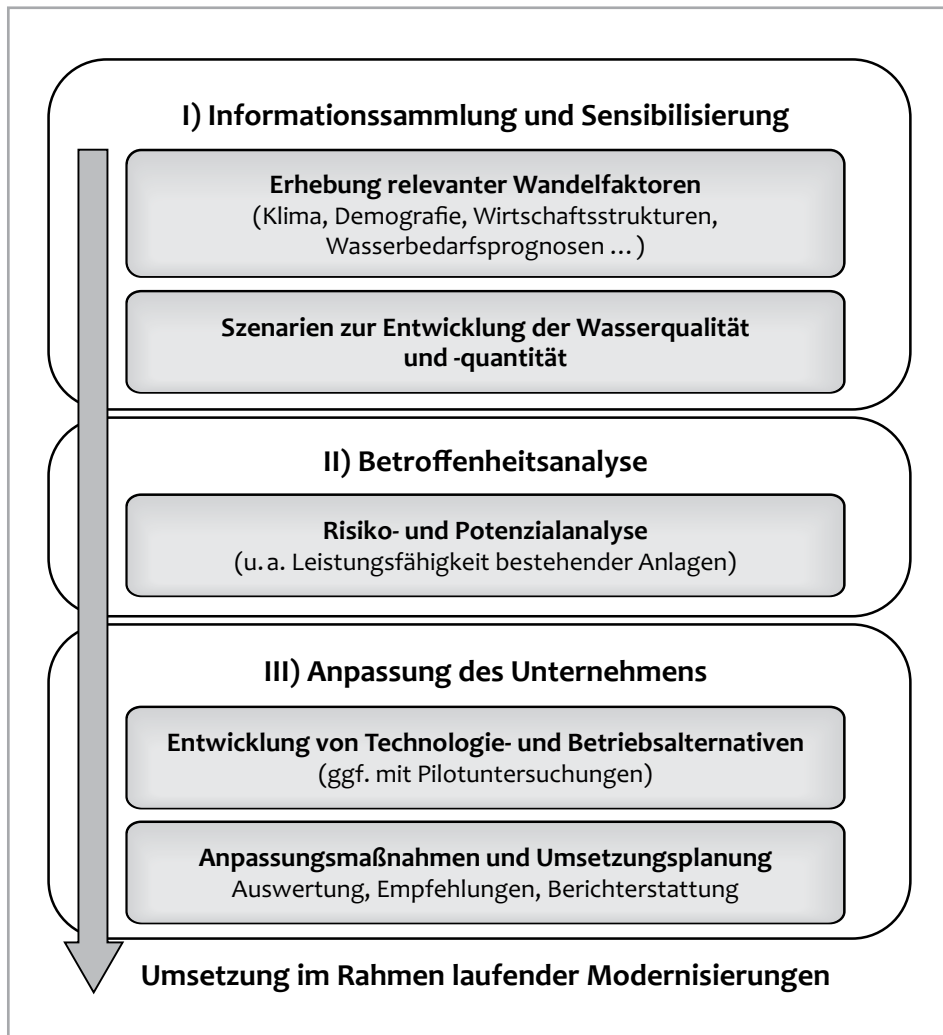


Abbildung 1: Systematische Vorgehensweise zur Anpassung eines Wasserversorgungsunternehmens für veränderliche Randbedingungen (Quelle: eigene Darstellung).

zunehmenden Hitze- und Trockenperioden ist hingegen davon auszugehen, dass die täglichen Spitzenbedarfe nahezu konstant auf dem heutigen Niveau verbleiben (Kersting & Werbeck, 2013).

Sind die zukünftig zu erwartenden Herausforderungen für das Wasserversorgungsunternehmen ermittelt und mögliche Szenarien zur Entwicklung der Rohwasserqualität und -quantität erarbeitet, ist in einem zweiten Schritt die *Betroffen-*

heit¹ des Unternehmens bzw. der einzelnen technischen Anlagen zu identifizieren (s. Abbildung 1). Zeichnen sich im ersten Schritt relevante Veränderungen in der Rohwasserqualität oder auch in den zur Verfügung stehenden Wassermengen ab, untersucht eine Risiko- und Potenzialanalyse der technischen Anlagen deren vorhandene Leistungsfähigkeit unter diesen variierenden, sich unter Umständen verschärfenden Randbedingungen und zeigt entstehende Gefährdungen auf. Hierbei sind sowohl die Leistung der Anlagen hinsichtlich der Einhaltung der Trinkwasserqualität als auch die Förder- und Speicherkapazitäten für eine entsprechende Wasservorhaltung unter Berücksichtigung von Spitzenbedarfen zu berücksichtigen.

Aus der Risiko- und Potenzialanalyse (s. Abbildung 1) ergeben sich gegebenenfalls in einem dritten Schritt erforderliche *Handlungs- und Anpassungsmaßnahmen*, um auch unter den zukünftigen Randbedingungen eine sichere Versorgung mit Trinkwasser zu gewährleisten. Diese können sowohl betrieblicher, organisatorischer oder technischer Natur sein, sodass die Entwicklung von Technologie- bzw. Betriebsalternativen für die betroffenen Prozessstufen erforderlich werden kann. Wenn beispielsweise Anpassungsbedarf an einer bestehenden Aufbereitungstechnik besteht oder mögliche Alternativen erwogen werden müssen, können praktische Untersuchungen im Labor- oder Pilotmaßstab wichtige Hinweise zur Auslegung oder Entscheidungsfindung liefern. Die abgeleiteten *Anpassungsmaßnahmen* können in einen *Maßnahmenplan* mit Priorisierung überführt werden. Ziel hierbei sollte immer eine Einbindung in geplante Modernisierungsmaßnahmen sein, um Synergieeffekte mit laufenden Modernisierungsmaßnahmen zu nutzen und somit die Anpassungskosten so gering wie möglich zu halten.

Im Rahmen von *dynaklim* wurden die Gewinnungsgebiete, Wasserwerke und das Rohrnetz der RWW einem »Klimawandel-Check« gemäß der oben beschriebenen Systematik unterzogen und konkrete Aussagen zu wichtigen Anpassungsbereichen im Ressourcenschutz, in der Technik und im Management des gesamten Versorgungssystems gegeben. Die Finanzierung der Klimawandelanpassung und die Zahlungsbereitschaft der Trinkwasserkunden für entsprechende Vorsorgemaßnahmen wurden in einer repräsentativen Befragung ermittelt. Die Befragten waren der Ansicht, dass allgemein (das heißt nicht auf die Trinkwasserversorgung beschränkt) zu wenig für die Anpassung an den Klimawandel getan wird.

¹ Direkte Betroffenheit: Gefährdung der Bausubstanz, Anlagen und Infrastruktur (Wasser, Energie, Verkehr und Logistik) durch Hitze, Sturm, Hagel, Starkregen und Hochwasser. Indirekte Betroffenheit: gesetzliche Vorgaben zum (globalen) Klimaschutz und marktspezifische Entwicklungen (gilt vornehmlich für Industrieunternehmen) sowie Veränderungen im Wasserbedarf.

Ein Drittel der Befragten war bereit, höhere Trinkwasserpreise zur Finanzierung der Anpassung an den Klimawandel zu bezahlen (Hein & Neskovic, 2012). Die Vorgehensweise, Hintergründe und Ergebnisse der Untersuchungen sind im *dynaklim*-Pilotprojekt »Sichere Wasserversorgung im Klimawandel – Wege zur Klimawandelanpassung der Trinkwasserversorgung im Ruhrgebiet« zusammengefasst und in einer Broschüre beschrieben (Merkel & Staben, 2013).

Im folgenden Kapitel werden anhand von Beispielen mögliche Anpassungsoptionen für die öffentliche Wasserversorgung und für wasserintensive Industrieunternehmen in Bezug auf den Klimawandel vorgestellt. Dabei wird auf die in diesem Zusammenhang besonders beeinflussbaren Prozessstufen der Wassergewinnung und -aufbereitung sowie der Wasserverteilung eingegangen. Ein weiteres Kapitel erläutert die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwassergefährdung wassertechnischer Anlagen und mögliche Anpassungsmaßnahmen. Abgerundet wird die Darstellung der möglichen Anpassungsoptionen durch ein Unterkapitel zur Betroffenheit von industriellen Wasserversorgungen.

3 Einflussfaktoren auf die Wasserversorgung und mögliche Anpassungsoptionen

3.1 Wassergewinnung und -aufbereitung

Die Bereiche der Wassergewinnung und -aufbereitung sind sowohl durch veränderte Rohwasserverfügbarkeiten und -qualitäten als auch von größeren Verbrauchsschwankungen mit Spitzen im Trinkwasserbedarf betroffen (s. Kapitel 2). Diese möglichen Veränderungen sind regional unterschiedlich und hängen maßgeblich von der Art der genutzten Rohwasserressource, den spezifischen Randbedingungen der Gewinnung und Aufbereitung sowie der Abnehmerstruktur ab. Für die Darstellung von möglichen Auswirkungen der einzelnen Klimawandelveränderungen auf verschiedene Rohwasserressourcen wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur, zum Beispiel DWA (2010), verwiesen.

Die im Rahmen von *dynaklim* exemplarisch untersuchten Ruhrwasserwerke der RWW arbeiten nach dem »Mülheimer Verfahren« (siehe Abbildung 2). In beiden Varianten des Mülheimer Verfahrens sorgt eine mehrtägige Bodenpassage für den mikrobiologischen Abbau unerwünschter Stoffe und puffert Temperaturerhöhung und Mengenschwankungen ab. In Kombination mit dem Einsatz von

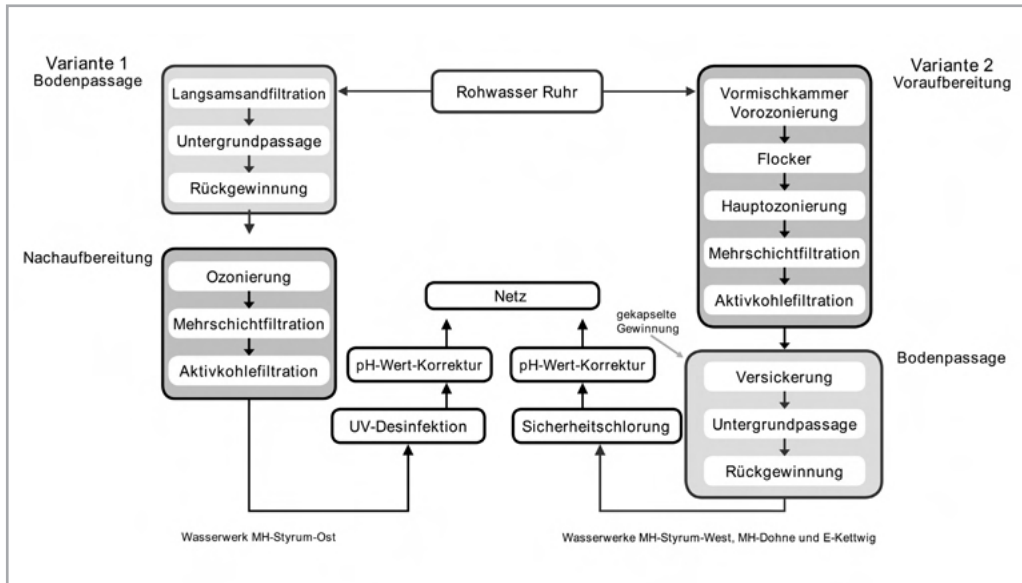


Abbildung 2: Aufbereitungsschemata der Ruhrwasserwerke der RWW

(Quelle: Donner & Schöpel 2014).

Ozon, Fällung-Flockung-Filtration sowie biologisch aktiven Aktivkohle-Festbettfiltern gewährleistet das Multi-Barrieren-Aufbereitungsschema eine gute Qualität des Trinkwassers.

Nach der Ermittlung der zu erwartenden Klimawandelauswirkungen auf die Ruhr wurden die Wasserwerke der RWW in Mülheim-Styrum und Essen-Kettwig einer umfassenden Risiko- und Potenzialanalyse (s. Kapitel 2) unterzogen. Diese hatte das Ziel, Anpassungserfordernisse und -potenziale zu ermitteln und gegebenenfalls erforderliche Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln.

Folgende wesentliche Ergebnisse lassen sich zusammenfassen:

Das System der *Grundwasseranreicherung und Uferfiltration* als eigenständiger Aufbereitungsschritt zeigte sich im Rahmen der Untersuchungen als sehr robust gegenüber Mengen- und Qualitätsschwankungen. Es kann generell als ein sicheres Verfahren im Klimawandel auch für die Trinkwasseraufbereitung von Oberflächenwasser anderer Regionen empfohlen werden.

Für die weiteren Aufbereitungsschritte ergaben sich verschiedene Herausforderungen je nach Klimaszenario. So steigt beispielsweise die Rohwassertrübung bei Starkregenereignissen stark an (siehe Abbildung 3), was bei den *Filtrations-*

stufen zu kürzeren Filterlaufzeiten mit häufigeren Rückspülungen führt. Vor diesem Hintergrund wurden Empfehlungen zur Verbesserung der Filterspülungen gegeben. Eine Optimierung der Filterspülungen zum Beispiel hinsichtlich deren Regelung und der verwendeten Spülgeschwindigkeiten würde eine Verbesserung hinsichtlich der Laufzeiten und der Wasserausbeute bedeuten. Hierdurch würde sich die Verfügbarkeit der Filterstufe erhöhen, der Spülwasserverbrauch sinken bzw. die Wasserausbeute erhöhen. Dies würde im Hinblick auf eine klimatisch bedingte Erhöhung von Spitzenwasserverbräuchen in den Sommermonaten zur Erhöhung der verfügbaren Wassermengen und Ausfallsicherheit der Wasserversorgung beitragen.

Generell ist die *Flockungsstufe* in den untersuchten RWW-Wasserwerken als wenig flexibel in Bezug auf veränderte Durchsätze und damit wenig robust gegenüber erwarteten Verbrauchsspitzen zum Beispiel in sommerlichen Hitzeperioden zu bewerten. Höhere Durchsätze verursachen relativ schnell eine erhöhte Ausgangstrübung, was die nachfolgenden Aufbereitungsstufen belastet. Es wurden verschiedene Optimierungsansätze erarbeitet und im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse bewertet. Die Vorschläge reichen von Verbesserung der Anlagen- und Messtechnik über den Einsatz anderer Flockungsmittel und -hilfsmittel bis

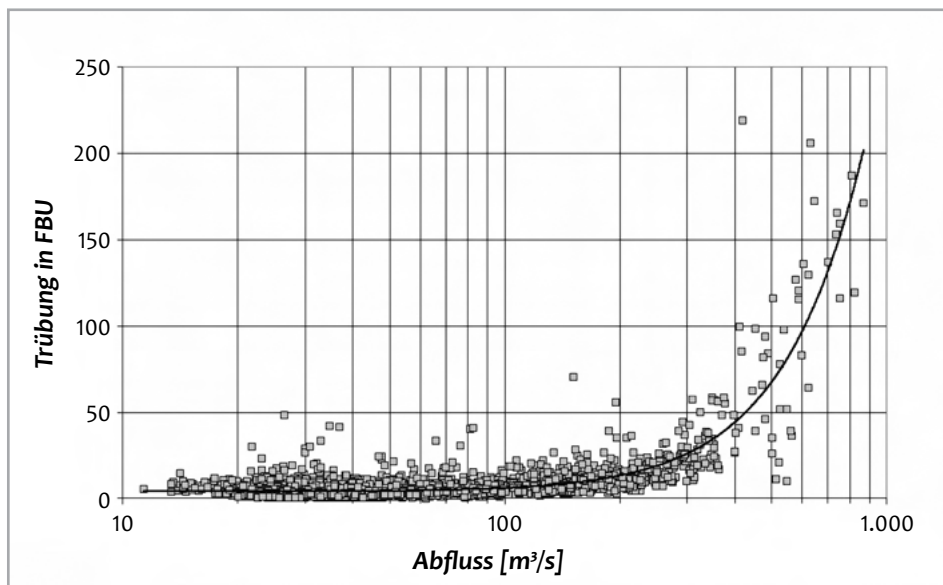


Abbildung 3: Trübung in Abhängigkeit des Ruhrabflusses in Mülheim an der Ruhr, Daten: 1995–2010 (Quelle: eigene Darstellung).

hin zu einem Ersatz der Flockungsstufe durch ein Membranverfahren. Die Anpassungsoptionen werden derzeit bei RWW hausintern geprüft und in die Planung einbezogen.

Die *Ozonung* ist besonders wichtig im Hinblick auf die Elimination von erhöhten Spurenstoffkonzentrationen, wie sie bei Niedrigwasserzeiten aufgrund der fehlenden Verdünnung in der Ruhr auftreten. Da zu erwarten ist, dass dieses Problem besonders im Hinblick auf die erwarteten Klimawandelfolgen auch zukünftig auftreten wird, wurde dieser Verfahrensschritt im Rahmen einer Pilotierung detailliert untersucht und Optimierungsansätze entwickelt. Ein besonderer Schwerpunkt lag hierbei auf einem flexiblen, auf die jeweilige Rohwasserqualität abgestimmten Ozoneinsatz (mithilfe einer innovativen Regelung nach der Ozonexposition) sowie der zeitweisen Zugabe von Wasserstoffperoxid (Peroxon-Prozess) zur Verbesserung der Spurenstoffelimination ohne Überschreitung des Bromatgrenzwertes der Trinkwasserverordnung. Neben einem jederzeit sicher eingehaltenen Oxidationsziel mit Kontrolle der Nebenproduktbildung lassen sich unnötig hohe Ozondosierungen in Zeiten geringer Rohwasserbelastung vermeiden.

3.2 Trinkwasserqualität im Verteilungsnetz

Eine klimabedingte Erwärmung des Trinkwasserverteilungsnetzes ist im Sommer während längerer Hitzeperioden in Kombination mit stark versiegelten Bereichen – wie sie in Großstädten häufig vorkommen – mit geringeren Durchflussmengen in den Leitungen zu erwarten. Den größten Einfluss üben dabei erwärmte obere Bodenschichten aus, wobei dieser Effekt durch höhere Rohwassertemperaturen, die zu einem Temperaturanstieg im Trinkwasser bereits am Wasserwerksausgang führen können, verstärkt wird. Trinkwassertemperaturen deutlich über 25 °C können unter solchen Bedingungen auftreten (Grobe & Wingender, 2011).

Das Trinkwasser enthält immer Mikroorganismen. Sie kommen frei im Trinkwasser und ihre überwiegende Mehrheit in Form von Biofilmen auf allen wasserbenetzten Oberflächen vor. Die routinemäßige mikrobiologische Kontrolle der Trinkwasserqualität nach dem Überwachungsprinzip der Trinkwasserverordnung und die Einhaltung der Grenzwerte gewährleisten in der Regel die Abgabe und Verteilung eines mikrobiologisch einwandfreien Trinkwassers. Trotzdem kann eine erhöhte Trinkwassertemperatur, wie sie zum Beispiel durch sommerliche Hitzeperioden und dadurch bedingte Bodenerwärmungen erwartet werden kann, in Kombination mit einem erhöhten Gehalt an Nährstoffen unter ungüns-

tigen Umständen einen Effekt auf die mikrobiologisch-hygienische Qualität des Trinkwassers ausüben. Dabei kann sowohl eine verstärkte Aufkeimung (Erhöhung der Koloniezahl) als auch eine erhöhte Nachweishäufigkeit hygienisch relevanter Mikroorganismen ein Problem darstellen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten folgende Kernaussagen getroffen werden (Tabelle 1):

- ◆ Untersuchungen an einem realen Trinkwassernetz zeigten eine deutliche Erwärmung des Trinkwassers im Verteilungsnetz um bis zu 10 °C auf 29 °C. Im Falle des vorliegenden Trinkwassers der RWW (nicht depotdesinfiziert und *nährstoffarm*) konnten die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung selbst unter Stagnation und deutlicher Temperaturerhöhung einwandfrei eingehalten werden.
- ◆ Eine temperaturabhängige Verschlechterung der mikrobiologischen Qualität des Trinkwassers war weder bezüglich einer Aufkeimung noch eines erhöhten Nachweises hygienisch relevanter Bakterien erkennbar, was auf ein *mikrobiologisch sehr stabiles Trinkwasser* hinweist.
- ◆ Hygienisch relevante Mikroorganismen traten durch die Temperaturerhöhung im Trinkwasser *nicht* auf.
- ◆ Ein Temperatureffekt zeigte sich bezüglich der Trinkwasserbiofilme. Die Biofilme prägten sich bei erhöhten Temperaturen und auf nährstoffabgebenden

Tabelle 1: Auswirkungen einer Temperaturerhöhung (bis zu 29 °C) auf die mikrobiologisch-hygienische Qualität des Trinkwassers bzw. des Trinkwasserbiofilms in einem Verteilungssystem (Quelle: eigene Darstellung).

Mikrobiologisch-hygienische Parameter	Auswirkung einer Temperaturerhöhung	
	Trinkwasser	Biofilm
Koloniezahl 20 °C nach TrinkwV	keine	geringfügig gegeben
Koloniezahl 36 °C nach TrinkwV	keine	geringfügig gegeben
Gesamtzellzahl	keine	geringfügig gegeben
<i>Escherichia coli</i>	keine	keine
Coliforme Bakterien	keine	geringfügig gegeben
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	keine	keine
<i>Legionella spec.</i>	keine	keine

Materialien verstärkt aus. Weichdichtendes Ethylen-Propylen-Dien-Monomer (EPDM) wurde deutlich stärker besiedelt als Polyethylen (PE) und Edelstahl.

- ◆ Hygienisch relevante Mikroorganismen waren in geringem Maße in realen Trinkwasserbiofilmen nachweisbar, ohne negative Beeinflussung der Trinkwasserqualität. Es zeigte sich nur für coliforme Bakterien eine leichte Zunahme der Befundhäufigkeit im Biofilm bei erhöhten Temperaturen (Sommer ▶ Herbst ▶ Winter).
- ◆ In Laborversuchen wurde nachgewiesen, dass die Einnistung von hygienisch relevanten Mikroorganismen wie *P. aeruginosa*, der im öffentlichen Trinkwassernetz zum Beispiel im Rahmen von Neuverlegungen, Reparaturarbeiten und/oder in Trinkwasserinstallationen von Gebäuden sporadisch nachgewiesen werden kann, temperatur- und nährstoffabhängig ist und dass die Persistenz insbesondere von *E. coli* und *K. pneumoniae* (coliformes Bakterium) unter nährstoffreichen Bedingungen im Trinkwasserbiofilm deutlich verlängert auftritt. Dies weist darauf hin, dass eine erhöhte Kontaminationswahrscheinlichkeit des Trinkwassers unter ungünstigen Bedingungen wie Stagnation und Temperaturerhöhung nicht vollständig auszuschließen wäre.

Ansteigende Temperaturen alleine führen demnach nicht zu einer Verschlechterung der mikrobiologisch-hygienischen Qualität des Trinkwassers. Zusätzliche Faktoren – hier insbesondere mikrobiologisch verwertbarer Kohlenstoff – müssen dazukommen, um eine temperaturabhängige Verschlechterung einer Trinkwasserqualität zu befördern.

Um einem möglichen klimabedingten negativen Einfluss auf die Trinkwasserqualität bei ungünstigen Nährstoffverhältnissen entgegenzuwirken, sind deshalb auf verschiedenen Ebenen Anpassungsstrategien denkbar. Sie umfassen dabei sowohl die Aufbereitung im Wasserwerk (beispielsweise optimierte Fällung/Flokkung, Schnellfiltration, Aktivkohlefiltration, Langsamsandfiltration), die Planung und das Management der Trinkwasserverteilungsnetze sowie das mikrobiologisch-hygienische Monitoring des Trinkwassers und der wasserbenetzten Oberflächen. Dabei kann die Verbesserung der mikrobiologischen Stabilität des Trinkwassers eine effektive Anpassungsstrategie darstellen, die eine Aufkeimung bzw. ein verstärktes Auftreten hygienisch relevanter Mikroorganismen minimiert.

Die Vorgehensweise, um klimabedingte Auswirkungen auf die hygienisch-mikrobiologische Qualität des Trinkwassers zu verhindern bzw. zu vermindern, ist stark abhängig von den spezifischen Vorgaben der Wasserqualität und des

Wasserverteilungsnetzes. Daher sollte der Wasserversorger die Planung seiner zu treffenden Maßnahmen mit den bekannten Forschungsergebnissen und eigenen Feldstudien kombiniert abstimmen, um sicherzustellen, dass die Wahl der Maßnahmen dauerhaft den gewünschten Effekt einer Verbesserung der Wasserqualität bewirkt.

3.3 Hochwassergefährdung der Wasserversorgung

Außerordentliche Hochwässer sind Naturereignisse mit seltenen Wiederkehrintervallen, die wichtige Infrastrukturen wie beispielsweise die Wasserversorgung in ihrer Funktionstüchtigkeit beeinträchtigen oder sogar gänzlich ausfallen lassen können. Da Wassergewinnungsanlagen an Oberflächengewässern vielfach im natürlichen Überflutungsbereich liegen, sind sie potenziell hochwassergefährdet. Diese Konstellation findet sich unter anderem auch an der Ruhr (z. B. an der Wassergewinnung Essen-Kettwig/RWW sowie an zahlreichen weiteren Anlagen im Oberstrom). Betroffen sind insbesondere die Brunnenstandorte, da technische Einrichtungen wie Wasserwerke in der Regel in einer höheren Lage betrieben werden und damit besser geschützt sind (Nolte et al., 2009). Die Ertüchtigung der jeweiligen Gewinnungsanlagen an klimawandelinduzierte Hochwasserrisiken kann mit hohen Kosten verbunden sein. Im Rahmen des *dynaklim*-Projektes wurde versucht, neben einer Einschätzung zur hydrologischen und hydraulischen Situation insbesondere das bestehende Hochwassermanagement zu verbessern, um so für mögliche klimawandelbedingte Veränderungen besser gerüstet zu sein (z. B. Benennung von Warnwerten aussagekräftiger Pegel im Oberstrom). Potenzielle monetäre Schäden sollen so abgewendet und ein maximal mögliches Maß an Versorgungssicherheit erreicht werden.

Einen ersten Hinweis der jeweiligen Betroffenheit (vgl. Abbildung 1) liefert ein Vergleich des zu bewertenden Standortes mit flächendeckend vorliegenden Informationen der naturräumlichen Ausstattung (Verbreitungsgebiet von Auenböden, ausgewiesene Überflutungsgebiete bestimmter Jährlichkeiten etc.).

Eine ebenfalls bereits realisierbare Anpassungsmaßnahme ist die Benennung von Warnwerten für aussagekräftige Pegel im Oberstrom. Hierzu wurden im Rahmen von *dynaklim* die Abfluss- und Wasserstandsdaten der hydrologischen Jahre 1961 bis 2010 aller Pegel im Ruhreinzugsgebiet ausgewertet und in Bezug auf deren Größenordnung und Entwicklung am Pegel Werden bzw. Hattingen gesetzt. Der Pegel Werden liegt circa sieben Kilometer oberhalb der Gewinnungsanlage Essen-Kettwig, der Pegel Hattingen circa 34 Kilometer oberhalb. Alle

Daten zeigen untereinander eine sehr gute Übereinstimmung. Zudem ist ersichtlich, dass der Abfluss am Pegel Hattingen nicht nur sehr zeitnah (<2 Tage) auf den Abfluss an allen anderen Pegeln im Ruhreinzugsgebiet reagiert, sondern auch maßgeblich vom (Witterungs-)Geschehen in weit entfernten Teileinzugsgebieten bestimmt wird (insbesondere Stationen Eslohe und Lennestadt, circa 120 Kilometer entfernt). Als bedeutende Größen wurden neben Niederschlagsereignissen >20 Millimeter das Auftreten und Anhalten von (Bodenwasser-)Sickerung identifiziert. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß der Regression dieser beiden in Eslohe und Lennestadt ermittelten und für Phasen mit Abflüssen >400 Kubikmeter pro Sekunde (gemessen am Pegel Hattingen, 1961 bis 2010) aus Tageswerten aufsummierten Größen beträgt $R^2=0,5$ (s. Abbildung 4). Aus diesem Erklärungsgehalt kann gefolgert werden, dass der Abfluss am Pegel Hattingen durch den Wasserhaushalt an den Stationen Eslohe und Lennestadt immerhin teilweise bestimmt wird (50 Prozent). Die dort gemessenen bzw. berechneten Größen können somit als Indikatoren eines Frühwarnsystems für den Hochwasserschutz von Anlagen der Trinkwasserversorgung herangezogen werden.

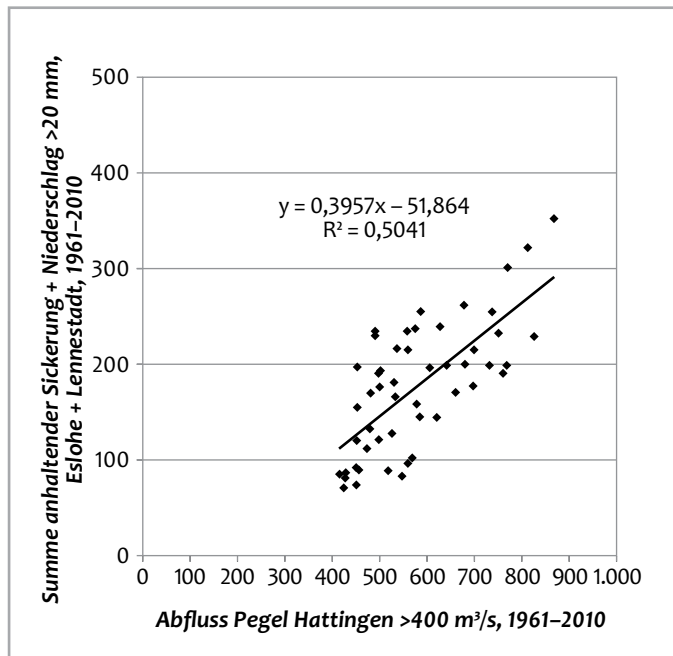


Abbildung 4: Zusammenhang Abfluss Pegel Hattingen zur Sickerung und Niederschlag der Stationen Eslohe und Lennestadt, Daten 1961–2010 (Quelle: eigene Darstellung).

Ergänzend zu den noch in Bearbeitung befindlichen Analysen können technische Anpassungen die Betroffenheit mindern. Zu nennen sind neben einem modifizierten Brunnenbetrieb zum Beispiel temporäre Erhöhungen von Türschwelen oder Brunnenstuben. Die aus einer veränderten, klimawandelbedingten Betriebssituation resultierenden Kosten (z. B. bei Produktionsausfällen in Stillstandzeiten, Versorgung über Notverbünde) sind den genannten Anpassungsmaßnahmen gegenüberzustellen.

3.4 Betroffenheit wasserintensiver Industrieunternehmen und Anpassungsoptionen

Die nachhaltige Versorgung eines Industrieunternehmens mit Wasser (z. B. Trinkwasser, Prozesswasser, Kühlwasser) ist eine wesentliche Voraussetzung für einen erfolgreichen und zukunftsfähigen Produktionsstandort. Es ist vor allem die Dynamik von aktuellen und zukünftigen klimatischen Veränderungen, die neben den in Kapitel 1 genannten sozioökonomische Faktoren neue operative und strategische Maßnahmen zur Anpassung der Eigen- und Fremdwasserversorgung sowie zur Wasserverwendung nach sich zieht.

Im Rahmen von *dynaklim* wurden in Kooperation mit den Projektpartnern RWW und Effizienzagentur NRW (EFA) wasserintensive Industrieunternehmen des verarbeitenden Gewerbes aus der Region systematisch analysiert und deren (direkte und indirekte) Betroffenheit sowie bereits wahrgenommene Anpassungsmaßnahmen ermittelt. Hier wurden vor allem die Zweige Chemie, Metallbe- und -verarbeitung, Nahrungsmittelproduktion und Papierherstellung berücksichtigt. Ergänzt durch vorhandene Erfahrungswerte von vergangenen Unternehmensanalysen der EFA, konnten folgende Ergebnisse zum Umgang oder zur Art der unternehmerischen Betroffenheit durch klimatische Einflüsse festgehalten werden:

- ◆ Ein Grundverständnis in Bezug auf Klimawandelfolgen bei den Unternehmen ist vorhanden.
- ◆ Unternehmen, bei denen in der Vergangenheit keine Beeinträchtigung der Produktion durch klimabedingte Ereignisse wie Hitze, Unwetter oder Überschwemmungen eingetreten ist, stufen für sich die (künftige) Bedeutung bzw. Betroffenheit des Klimawandels als »vernachlässigbar« ein – gegebenenfalls zu Unrecht!

- ◆ Unternehmen fühlen sich nicht ausreichend über die Folgen des Klimawandels für ihre Branche oder ihren Standort informiert.
- ◆ Eine Sensibilisierung für den Klimawandel liegt bereits bei betroffenen Unternehmen vor, die
 - ▷ bei Extremwetterereignissen wie Hochwasser oder Starkregenereignissen bereits einen finanziellen Schaden oder Beeinträchtigungen in den Produktions- oder Arbeitsabläufen oder der Logistik zu verzeichnen hatten,
 - ▷ ihren Standort durch seine exponierte Lage (an Flüssen oder in Senken) als gefährdet gegenüber Starkregen ansehen (Überschwemmungsgefahr) bzw. bereits von Überschwemmungen betroffen waren,
 - ▷ in der Vergangenheit während langer Hitzewellen einen deutlichen Produktionsanstieg zu verzeichnen hatten.
- ◆ Maßnahmen zur Einsparung von Energie, Wasser oder zur Senkung von Emissionen werden in erster Linie aus ökonomischen Gesichtspunkten durchgeführt, weniger unter Klimawandelaspekten.

Um daraus einen Beitrag zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit und des Produktionsstandorts von Industrien entwickeln zu können, wurde im Rahmen von *dynaklim* ein Leitfaden zur Unternehmensanpassung erstellt. Dieser bezieht aus unternehmensstrategischen Gründen neben klimatischen Wandelprozessen auch den Umwelt- und Ressourcenschutz für eine nachhaltige und effiziente Betriebsweise mit ein (u. a. für die Wasserversorgung, Produktion, Abwasser- und Abluftbehandlung).

Der Leitfaden ist vor dem Hintergrund einer Risiko- und Potenzialanalyse aufgliedert in die Schritte *Sensibilisierung* (insbesondere für die Auswirkungen klimatischer Veränderungen), *Betroffenheitsanalyse* und *Unternehmensanpassung*. Die Kernelemente darin bilden für jeden Arbeitsschritt spezielle, vor allem auf den Klimawandel und die (Eigen-)Wasserversorgung/Wasserverwendung zugeschnittene EDV-Programme (regionale Klimaanalyse und Risikobewertungskonzepte) und spezielle Maßnahmenkataloge. Aus wassertechnischer Sicht hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Maßnahmen selektiv in die folgenden Bereiche aufzuteilen:

- ◆ Anlagen- und Prozessoptimierung in der Produktion,
- ◆ Kreislaufführung und Abwasserrecycling,
- ◆ Reduzierung von Reinigungswasser,
- ◆ Rohwasseraufbereitung.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zu wasserintensiven Industrieunternehmen zeigten, dass es für eine erfolgreiche Zukunftsplanung unerlässlich ist, sich neben sozioökonomischen Faktoren auch mit lokalen und globalen klimatischen Veränderungen auseinanderzusetzen und hierbei die Betroffenheit zu analysieren und Anpassungsmaßnahmen in das Unternehmensmanagement zu integrieren (siehe Abbildung 5). Es wird jedoch empfohlen, vor der Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Ermittlung und Validierung des zukünftigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses durchzuführen. Ziel ist die Priorisierung derjenigen Maßnahmen, welche aus betriebswirtschaftlicher Sicht mit dem größtmöglichen Zusatznutzen gekoppelt werden können, zum Beispiel:

- ◆ Auswahl von Maßnahmen, die sowohl für Umwelt- und Ressourcenschutz als auch zur klimabezogenen Unternehmensanpassung angewendet werden können: zum Beispiel Brauchwasser aus Regenwasser, Abfall- und Abwasserrecycling,
- ◆ Auswahl von Maßnahmen mit geringem finanziellem Risiko bei der Umsetzung und ausgewiesenem Zusatznutzen: zum Beispiel Isolierung durch Wärmedämmung von Bürogebäuden mit dem Ziel Energieeinsparung und der Verbesserung des Raumklimas für die Mitarbeiter,

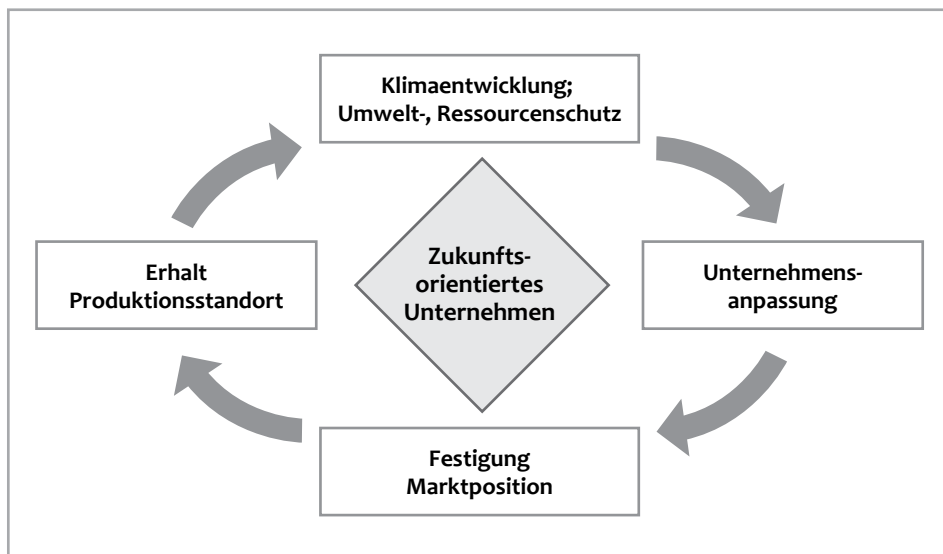


Abbildung 5: Leitthemen für ein zukunftsorientiertes Unternehmen (Quelle: eigene Darstellung).

- ◆ Auswahl von Maßnahmen, die mit externen Fördermitteln finanziert werden können (zum Beispiel Ausbau von erneuerbaren Energien auf dem Werksgelände),
- ◆ Auswahl von Maßnahmen, die hinsichtlich lokaler und globaler Veränderungen beliebig skalierbar sind (z. B. modulare Anlagen, Redundanzen und flexible Kostenmodelle – beispielsweise hinsichtlich des Fremdwasserbezugs).

4 Fazit und Empfehlung

Sich ändernde Rahmenbedingungen (klimatisch, demografisch und sozioökonomisch) sind eine Herausforderung der für lange Zeiträume ausgelegten Wasserinfrastruktur. Die *dynaklim*-Forschungsergebnisse zeigen deutlich, dass eine rechtzeitige Anpassung an sich ändernde Rahmenbedingungen wie den Klima- und Strukturwandel wirtschaftlich sinnvoll erscheint und Versorgungsengpässen oder Qualitätsbeeinträchtigungen entgegenwirken kann. Es besteht eine Bereitschaft der betroffenen Einwohner, sich finanziell an den Anpassungsmaßnahmen zu beteiligen. Eine systematische Überprüfung der eigenen Betroffenheit in Kombination mit einer Risiko- und Potenzialanalyse der technischen Anlagen ermöglicht eine vorausschauende, effiziente Planung und wirtschaftliche Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zum Beispiel im Rahmen laufender Modernisierungen.

Die in *dynaklim* erarbeitete Vorgehensweise und die Anpassungswege sind auf andere Regionen in Deutschland übertragbar und helfen, die Versorgung mit Trinkwasser auch im Klima- und Strukturwandel zu sichern. Eine Anleitung zur regionalen Anpassung wurde in der *dynaklim*-Roadmap mit einem eigenen Kapitel zur »Sicheren Wasserversorgung im Klimawandel« erarbeitet (Schultze et al., 2013).

Literatur

- Donner, C.; Schöpel, M. (2014): Das Mülheimer Verfahren. RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH (Hrsg.), Mülheim an der Ruhr [www.rww.de/fileadmin/pdf-Dateien/Mülheimer_Verfahren_final.pdf; Stand: Januar 2014].
- DWA (2010): Klimawandel – Herausforderungen und Lösungsansätze für die deutsche Wasserwirtschaft. DWA-Themen, 05/2010, DWA, Hennef.

- DWD (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Abschlussbericht. Offenbach am Main, Oktober 2012 [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2012/PK_30_10_12/Studie_20121030,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Studie_20121030.pdf; Stand: Januar 2014].
- Grobe, S.; Wingender, J. (2011): Mikrobiologische Trinkwasserqualität in der Wasserverteilung bei veränderten Temperaturen aufgrund des Klimawandels, dynaklim-Kompakt No. 7 [http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/index/wissensmanagement/publikationen/dynaklim_Kompakt.html; Stand: Januar 2014].
- Hein, A.; Neskovic, M. (2012): Qualitäts- und Preiswahrnehmung von Trinkwasser: Hat der Klimawandel Einfluss? dynaklim-Kompakt No. 10 [http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/index/wissensmanagement/publikationen/dynaklim_Kompakt.html; Stand: Januar 2014].
- Kersting, M.; Werbeck, N. (2013): Trinkwasser und Abwasser in Zeiten des Wandels – eine Szenarienbetrachtung für die dynaklim-Region. dynaklim-Publikation No. 39 [http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/index/wissensmanagement/publikationen/dynaklim_Publikationen-2013.html; Stand: Januar 2014].
- Mälzer, H.-J.; Rohn, A. (2010): Herausforderungen der Klimawandel-Auswirkungen für die Trinkwasserversorgung. dynaklim-Publikation No. 3, http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/index/wissensmanagement/publikationen/dynaklim_Publikationen-2010.html [Stand: Januar 2014].
- Merkel, W.; Staben, N. (2013): Sichere Wasserversorgung im Klimawandel. Wege zur Klimawandelanpassung der Trinkwasserversorgung im Ruhrgebiet, Broschüre [www.dynaklim.de; Stand: Januar 2014].
- Nolte, C.; Hein, A.; Kamphausen, S. (2009): Wenn Flüsse über die Ufer treten. Eine Gefährdungsanalyse am Beispiel der Stadtwerke Düsseldorf, ZfK 09. München/Köln: Sigillium-Verlag.
- Quirnbach, M.; Freistühler, E.; Papadakis, I. (2012): Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region. Analysen zu den Parametern Lufttemperatur und Niederschlag. dynaklim-Publikation No. 30, November 2012 [http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/index/wissensmanagement/publikationen/dynaklim_Publikationen-2012.html; Stand: Januar 2014].
- Schultze, J.; Kohlgrüber, M.; Hasse, J. (2013): Roadmap 2020 – Regionale Klimaanpassung in ausgewählten Themenfeldern. Vorabzug zum dynaklim-Symposium 2013 [<http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/dms/templating-kit/themes/dynaklim/pdf/Roadmap2013/dynaklim-roadmap2013-webedition.pdf>; Stand: Januar 2014].
- UBA – Umweltbundesamt (2005): Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Forschungsbericht 201 41 253, UBA-FB 000844 [<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/515/dokumente/2947.pdf>; Stand: Januar 2014].
- WMO – World Meteorological Organization (2013): The global climate 2001–2010 – a decade of climate extremes [http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1103_en.pdf; Stand: Januar 2014].

Zur weitergehenden Lektüre sei auf die ausführlichen Teilberichte aus dem Forschungsvorhaben *dynaklim* in den Aktivitäten A4.1.1, A4.1.2, A4.1.3 und A4.1.4 (Trinkwasserversorgung) sowie A4.2.5 (Industrieunternehmen) verwiesen (www.dynaklim.de). Die internationale Perspektive einer Anpassung an den Klimawandel verfolgt das EU-FP7 Projekt PREPARED (www.prepared-fp7.eu).