



# Anpassungsstrategien der öffentlichen Trinkwasserversorgung an Extremereignisse

Lösungsoptionen für die Praxis

# Anpassung der öffentlichen Wasserversorgung an Extremereignisse

Lösungsoptionen für die Praxis

erstellt von



und unter Förderung von



GEFÖRDERT VOM



Schlussbericht zu dem BMBF-Forschungsvorhaben „TrinkXtrem“  
Förderkennzeichen 02WEE1625 A-J

Karlsruhe, 07. Februar 2025

### **Redaktion und Gestaltung**

TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser  
Karlsruher Str. 84  
76139 Karlsruhe  
<https://www.tzw.de>

### **Zitierempfehlung**

Autorenkollektiv: Anpassung der öffentlichen Wasserversorgung an Extremereignisse. Schlussbericht zu den BMBF-Forschungsvorhaben 02WEE1625 A-J. Eigenverlag TZW Karlsruhe (2025)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Verbundvorhaben wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb der Fördermaßnahme „Wasser-Extremereignisse (WaX)“ gefördert. Die Fördermaßnahme WaX ist im Bundesprogramm „Wasser: N“ angesiedelt, das Teil der BMBF-Strategie „Forschung für Nachhaltigkeit (FONA)“ ist. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## **Projektpartner**

Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen, Erlangen  
Harzwasserwerke GmbH, Hildesheim  
Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, Leinenfelden-Echterding  
IWW Wasserforschung gGmbH, Mülheim an der Ruhr  
MOcons GmbH & Co. KG, Mülheim an der Ruhr  
Technische Universität Clausthal  
TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe  
Universität Stuttgart  
Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH, Bodenheim  
Zweckverband Landeswasserversorgung, Stuttgart

## **Assoziierte Partner**

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn  
Fernwasserversorgung Elbaue-Ostharz GmbH, Torgau  
Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Pirna  
Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz  
Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH, Mülheim an der Ruhr

## **Arbeitspaketleitung**

Dr. Tim aus der Beek<sup>1</sup>, Dipl.-Geoökol. Friederike Brauer<sup>2</sup>, M.Sc. Christoph Czichy<sup>3</sup>, Dr. Beate Hambsch<sup>2</sup>, M.Sc. Tim Jupe<sup>4</sup>, Dr. Ulrich Lang<sup>5</sup>, Dr. Andreas Lange<sup>6</sup>, Dr. Wolfram Seitz<sup>7</sup>, M.Sc. Natalie Wick und Dr. Jörg Bork<sup>8</sup>

## **Projektbearbeitung**

Dr. Tim aus der Beek<sup>1</sup>, Dr. Axel Bergmann<sup>9</sup>, Dr. Jörg Bork<sup>8</sup>, M.Sc. Pascal Bürkle<sup>7</sup>, Dr. Robert Burlacu<sup>10</sup>, Dipl.-Geoökol. Friederike Brauer<sup>2</sup>, M.Sc. Büşra Çakır<sup>7</sup>, M.Sc. Christoph Czichy<sup>3</sup>, M.Sc. Sascha Flaig<sup>5</sup>, Dr. Beate Hambsch<sup>2</sup>, M.Sc. Tim Jupe<sup>4</sup>, Dr. Ulrich Lang<sup>5</sup>, Dr. Andreas Lange<sup>6</sup>, Prof. Dr. Holger Class<sup>4</sup>, Dr.-Ing. Martin Emmert<sup>7</sup>, Dipl.-Ing. Jutta Justiz<sup>5</sup>, Dr. Alexander Kissinger<sup>5</sup>, M.Sc. Tobias Martin<sup>2</sup>, Dr. Arndt Mehling<sup>6</sup>, M.Sc. Rabea Muhrez<sup>2</sup>, Prof. Dr. Mark Oelmann<sup>3</sup>, Prof. Dr. Andreas Rausch<sup>11</sup>, M.Sc. Tibor Ridavits<sup>1</sup>, Dr. Thomas Riedel<sup>1</sup>, M.Sc. Sven Schirrmeister<sup>12</sup>, M.Sc. Nathalie Sängler<sup>8</sup>, Dr. Wolfram Seitz<sup>7</sup>, M.Sc. Michael Stilling<sup>8</sup>, M.Sc. Sascha Stumpe<sup>3</sup>, Dr. Benjamin Trummer<sup>10</sup>, M. A. Dagmar Uhl<sup>2</sup>, M.Sc. Clarisse Umugwaneza<sup>8</sup>, Dr. Martin Wagner<sup>2</sup>, M.Sc. Natalie Wick<sup>8</sup>, Dr. Stefan Wittek<sup>11</sup>

## **Koordination**

Dr. Uwe Müller<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IWW, <sup>2</sup> TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, <sup>3</sup> MOcons GmbH & Co. KG, <sup>4</sup> Universität Stuttgart, <sup>5</sup> Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, <sup>6</sup> Harzwasserwerke GmbH, <sup>7</sup> Zweckverband Landeswasserversorgung, <sup>8</sup> Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH, <sup>9</sup> Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH, <sup>10</sup> Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen, <sup>11</sup> Technische Universität Clausthal, <sup>12</sup> Fernwasserversorgung Elbaue-Ostharz GmbH



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>Schwerpunktthemen.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2</b>	<b>Wasserressourcen: Qualität + Quantität .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3</b>	<b>Anlagenbetrieb .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4</b>	<b>Trinkwasser: Bedarf + Preise .....</b>	<b>13</b>
<b>1.5</b>	<b>Risiko + Vorsorge .....</b>	<b>14</b>
<b>1.6</b>	<b>Videodokumentation .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>MOTIVATION.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Verwendete Klima-Szenarien .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>Risiken durch Extremereignisse.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>Videoserie zum Projekt .....</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>WASSERVERSORGUNGSUNTERNEHMEN IM TRINKXTREM-PROJEKT .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Fernwasserversorgung Elbaue Ostharz GmbH.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Harzwasserwerke GmbH .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4</b>	<b>Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH (RWW) .....</b>	<b>25</b>
<b>3.5</b>	<b>Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH .....</b>	<b>26</b>
<b>3.6</b>	<b>Zweckverband Landeswasserversorgung (LW) .....</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>WASSERRESSOURCEN - QUANTITÄT.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Modellierung extremer Trockenjahre in Folge .....</b>	<b>29</b>
4.1.1	Einführung.....	29
4.1.2	Verwendung von historischen Grundwasserneubildungsdaten .....	29
4.1.3	Verwendung von Klimaprognosen vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung .....	32
4.1.4	Ergebnisse .....	33

<b>4.2</b>	<b>Verbesserung der Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen .....</b>	<b>36</b>
4.2.1	Einführung.....	36
4.2.2	Methodik zur Verbesserung der Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen .....	36
4.2.3	Ergebnisse der globalen Sensitivitätsanalyse und Modellkalibrierung.....	38
4.2.4	Diskussion der Ergebnisse.....	40
<b>5</b>	<b>WASSERRESSOURCEN - QUALITÄT .....</b>	<b>42</b>
<b>5.1</b>	<b>Rohwasserbeschaffheitsprognose.....</b>	<b>42</b>
<b>5.2</b>	<b>Auswirkungen von Extremereignissen auf die ökotoxikologischen Eigenschaften von Rohwässern .....</b>	<b>46</b>
5.2.1	Einführung.....	46
5.2.2	Standorte und Probenahme .....	46
5.2.3	Wirkungsbezogene Analytik.....	47
5.2.4	Biotestbatterie .....	47
5.2.5	Phytotoxizität als neuer Endpunkt .....	49
5.2.6	Vergleich der Rohwasserqualität .....	50
5.2.7	Bewertung der Wasseraufbereitung (Stresstest) .....	54
5.2.8	Folgerungen für Extremwetterereignisse .....	57
<b>5.3</b>	<b>Auswirkungen von Extremereignissen auf die mikrobiologische Rohwasserbeschaffenheit .....</b>	<b>59</b>
5.3.1	Einführung.....	59
5.3.2	<i>Planung und Durchführung der Untersuchungen .....</i>	<i>60</i>
5.3.3	Ergebnisse des Messprogramms.....	61
5.3.4	Aufbereitungswirksamkeit.....	63
5.3.5	Berechnung der quantitativen mikrobiellen Risikobewertung (QMRA) .....	65
5.3.6	Hinweise zur praktischen Durchführung der QMRA .....	66
<b>6</b>	<b>ANLAGENBETRIEB .....</b>	<b>68</b>
<b>6.1</b>	<b>Managementtool zur Rohwasserbewirtschaftung bei Extremereignissen .....</b>	<b>68</b>
6.1.1	Einführung.....	68
6.1.2	Neuronales Netz zur Realtime-Prognose der Grundwasserstände.....	70
6.1.3	Struktur und Features des Tools Rohwasserbewirtschaftung .....	73
<b>6.2</b>	<b>Uferfiltration zur Erweiterung der Rohwasserressourcen .....</b>	<b>78</b>
6.2.1	Vorteile der Uferfiltration .....	78
6.2.2	Wissenschaftlich-technische Entscheidungshilfen zur Erweiterung Uferfiltration .....	79
6.2.3	Neues Bewirtschaftungskonzept: „Nordgalerie“ .....	87
<b>6.3</b>	<b>Stärkung der Resilienz des Trinkwasser-Verteilnetzes .....</b>	<b>93</b>
6.3.1	Optimierungsmodell zur Behebung der Vulnerabilitäten im Wasserversorgungssystem .....	93
6.3.2	Methodik.....	93
6.3.3	Vulnerabilitätsanalyse .....	96
6.3.4	Optimierungsmodelle .....	97
6.3.5	Ergebnisse .....	98
6.3.6	Empfehlungen zu Netzanpassungsmaßnahmen .....	103

<b>7</b>	<b>TRINKWASSERBEDARF</b> .....	<b>105</b>
<b>7.1</b>	<b>Plausibilität von Smart-Meter Daten</b> .....	<b>105</b>
<b>7.2</b>	<b>Identifikation von Kundengruppen</b> .....	<b>108</b>
<b>7.3</b>	<b>Praxiserfahrungen zu Auswirkungen von Extremereignissen</b> .....	<b>110</b>
7.3.1	Starkregen Mai/Juni 2024 beim ZV Landeswasserversorgung .....	110
7.3.2	Spitzenbedarf im Juni 2021 bei den Harzwasserwerken .....	111
<b>7.4</b>	<b>Webservice für kundengruppenspezifische Wasserbedarfsprognosen</b> .....	<b>112</b>
<b>7.5</b>	<b>App zur Anomalie-Detektion</b> .....	<b>116</b>
<b>8</b>	<b>PREISMANAGEMENT VON SPITZENBEDARFEN</b> .....	<b>119</b>
<b>8.1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>119</b>
<b>8.2</b>	<b>Arbeitsschritte zu einem zeitlich variierenden Preis-/Anreizmodell</b> .....	<b>120</b>
8.2.1	Schritt 1: Aufbereitung und Aggregation von Verbrauchsdaten .....	120
8.2.2	Schritt 2: Durchführung einer Angebotsanalyse .....	121
8.2.3	Schritt 3: Durchführung einer Nachfrageanalyse.....	125
8.2.4	Schritt 4: Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse.....	128
8.2.5	Schritt 5: Durchführung einer Modellfindung.....	132
<b>9</b>	<b>RISIKO UND VORSORGE</b> .....	<b>137</b>
<b>9.1</b>	<b>Update der Vorsorgekonzepte</b> .....	<b>137</b>
9.1.1	Einführung.....	137
9.1.2	Anpassungsbedarf Risikoanalyse (Phase 2) .....	138
9.1.3	Anpassungsbedarf vorbeugende Maßnahmen (Phase 3) .....	140
<b>9.2</b>	<b>Update des Risikomanagements in Trinkwassereinzugsgebieten</b> .....	<b>143</b>
9.2.1	Einführung.....	143
9.2.2	Projektgebiet Talsperrensystem Klingenberg/Lehnmühle .....	143
9.2.3	Methodik für das Risikomanagement .....	144
9.2.4	Anpassung der Risikobewertung an Extremereignisse .....	145
<b>10</b>	<b>GEPLANTE WEITERE VERWERTUNG DER ERGEBNISSE</b> .....	<b>148</b>
<b>10.1</b>	<b>Software</b> .....	<b>148</b>
10.1.1	Managementtool zur Rohwasserbewirtschaftung .....	148
10.1.2	Rohwasserbeschafftheitsprognose und Web-Service Trinkwasserbedarfsprognose .....	148
10.1.3	Softwaretool zur Detektion von Anomalien bei Smart-Meter Daten .....	149
<b>10.2</b>	<b>Methoden + Konzepte</b> .....	<b>149</b>
10.2.1	Wirkungsbezogene Analytik zur Erfassung des Einflusses von Extremereignissen .....	149
10.2.2	Quantitative mikrobielle Risikobewertung .....	149
10.2.3	Verbesserung der Prädiktivität von Grundwassermodellen .....	150
10.2.4	Uferfiltration zu Ressourcenerweiterung.....	150
10.2.5	Resilienz Verteilungsnetz .....	150
10.2.6	Dynamische Preismodellkomponenten .....	151
10.2.7	Anpassung Risikomanagement und Vorsorgekonzepte an Extremereignisse .....	151

<b>11</b>	<b>ANSPRECHPERSONEN.....</b>	<b>152</b>
<b>11.1</b>	<b>Softwaretools.....</b>	<b>152</b>
<b>11.2</b>	<b>Modelle &amp; Konzepte.....</b>	<b>152</b>
<b>12</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>154</b>
<b>13</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>160</b>
<b>13.1</b>	<b>Wasserressourcen – Quantität .....</b>	<b>160</b>
13.1.1	Verbesserung der Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen .....	160
<b>13.2</b>	<b>Wasserressourcen – Qualität.....</b>	<b>165</b>
13.2.1	Auswirkungen auf die ökotoxikologischen Eigenschaften von Rohwässern .....	165
13.2.2	Auswirkungen auf die mikrobiologische Rohwasserbeschaffenheit.....	167
<b>13.3</b>	<b>Anlagenbetrieb.....</b>	<b>171</b>
13.3.1	Managementtool .....	171
<b>13.4</b>	<b>Trinkwasserbedarf.....</b>	<b>183</b>
13.4.1	Trinkwasserbedarfsprognose .....	183
13.4.2	Webservice Trinkwasserbedarfsprognose .....	183
13.4.3	App zur Anomalie-Detektion.....	187
<b>13.5</b>	<b>Preismanagement .....</b>	<b>190</b>
<b>13.6</b>	<b>Vorsorgekonzepte - Risikoanalyse .....</b>	<b>195</b>
13.6.1	1. Schritt: Beschreibung der Wasserversorgung .....	195
13.6.2	2. Schritt: Durchführung einer Gefahrenanalyse .....	195
13.6.3	3. Schritt: Identifikation relevanter Szenarien .....	196
13.6.4	4. Schritt: Durchführung einer Vulnerabilitätsanalyse .....	198
13.6.5	5. Schritt: Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß .....	203
13.6.6	6. Schritt: Risikovergleich und Risikobewertung .....	206
<b>13.7</b>	<b>Risikomanagement im Einzugsgebiet .....</b>	<b>208</b>
13.7.1	Klimasteckbrief Talsperre Klingenberg (Beispiel).....	208
13.7.2	Risikosteckbrief (Beispiel) .....	211

# 1 Zusammenfassung

## 1.1 *Schwerpunktthemen*

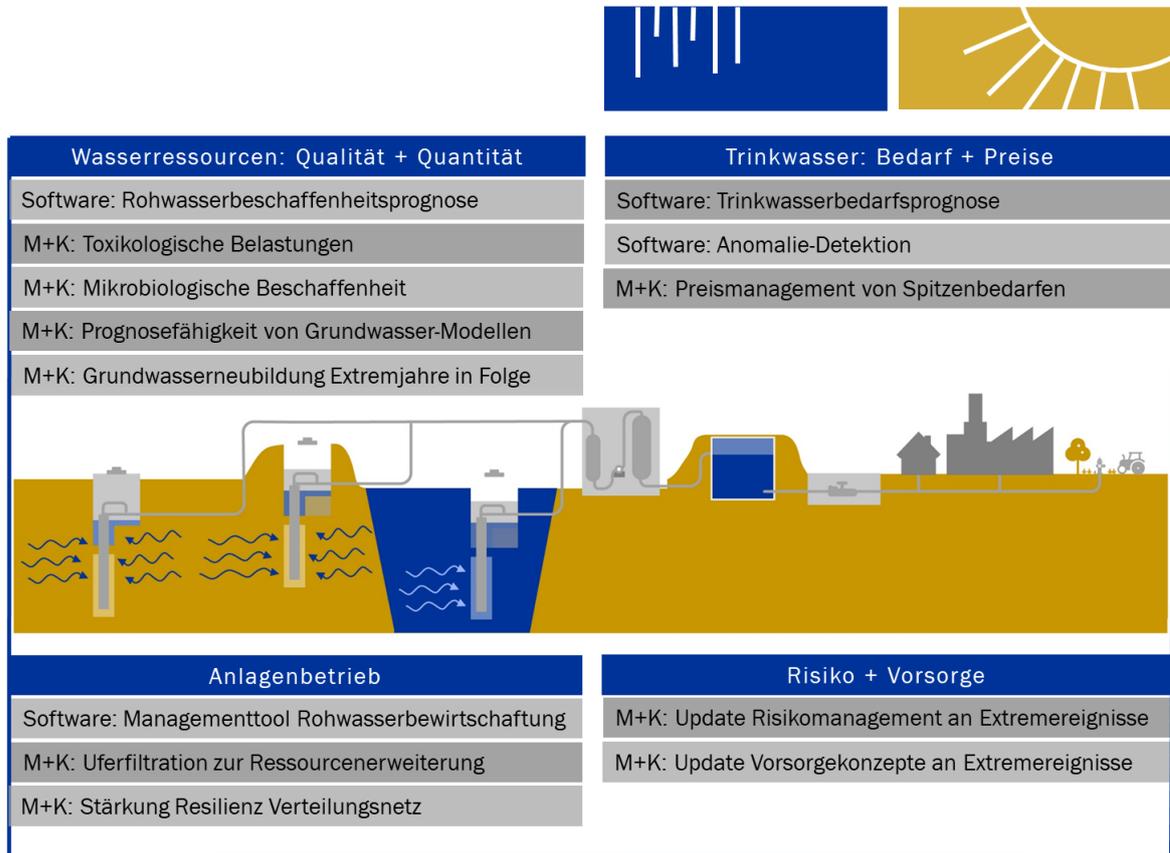
Deutschland ist ein wasserreiches Land. Dennoch stellen meteorologische Extremereignisse wie langanhaltende Trockenperioden die öffentliche Wasserversorgung vor Herausforderungen. Extremereignisse wirken über die gesamte Prozesskette der Wasserversorgung. Beispielsweise kann die Menge der zur Wasseraufbereitung verfügbaren Wasserressourcen in Trockenperioden abnehmen während gleichzeitig der Trinkwasserbedarf durch die Kunden ansteigt. In Trockenperioden verschlechtert sich typischerweise die Qualität von Flusswässern, da der Abwasseranteil zunimmt. Selbst oberflächennahe Grundwässer können qualitativ beeinträchtigt werden, sofern sich während Trockenperioden Bodenrisse bilden, über die bei Starkniederschlagsereignissen Oberflächenwasser eintritt. Rohrbrüche können nach Trockenperioden durch die abnehmende Stabilität des Untergrunds vermehrt auftreten. Durch die lokale Prägung der Wasserversorgung sind die Auswirkungen von Extremereignissen auf die einzelnen Wasserversorgungsunternehmen zudem höchst unterschiedlich. Beispielsweise bestehen Unterschiede bei der Herkunft der Wasserressourcen (u.a. Grund-, Talsperren- oder Flusswasser), der Versorgungsstruktur (u.a. Fernwasserversorger, Flächenwasserversorger) oder der Kundenstruktur (u.a. Kommunen, Haushalte, Gewerbe).

Das Forschungsprojekt TrinkXtrem hat sich das Ziel gesetzt, die vielfältigen Auswirkungen von Extremereignissen auf die öffentliche Wasserversorgung ganzheitlich zu betrachten. Dafür wurden vier Themenfelder identifiziert:

- Wasserressourcen: Qualität + Quantität
- Anlagenbetrieb
- Trinkwasser: Bedarf + Preise sowie
- Risiko + Vorsorge.

Im Projekt TrinkXtrem wurden neun Methoden und Konzepte (M+K) für die Wasserversorgung unter Extrembedingungen entwickelt und bei Projektpartnern beispielhaft angewandt. Diese stehen auch für andere Wasserversorgungsunternehmen als Lösungsoptionen zur Verfügung. Zudem entstanden vier Softwarelösungen in den Ausbaustufen Technology Readiness Level (TRL) 5 (d.h. Versuchsaufbau in Einsatzumgebung) bis 6 (d.h. Prototyp in Einsatzumgebung) für die Anlagensteuerung unter Extrembedingungen wie Rohwassermangement, Rohwasserbeschaffensprognose, Trinkwasserbedarfsprognose sowie Anomaliedetektion. Die Softwarelösungen können nach Adaption an die jeweiligen konkre-

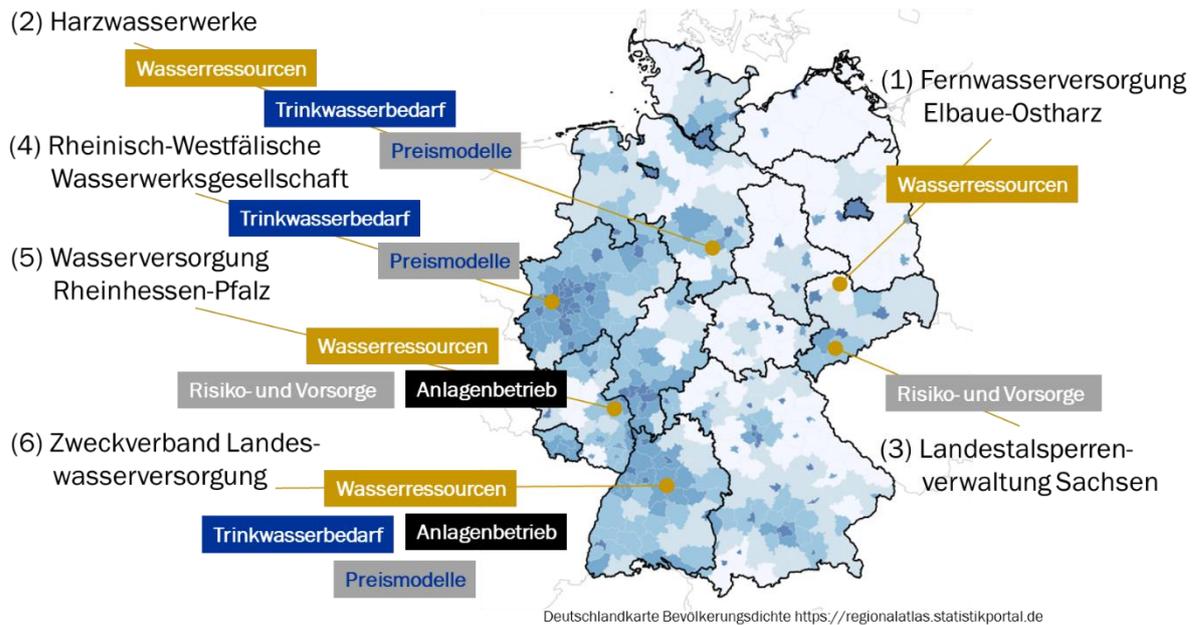
ten Bedingungen auch durch andere Wasserversorgungsunternehmen genutzt bzw. ausgebaut werden. Die Methoden und Konzepte sowie die Softwarelösungen leisten einen Beitrag zum Ausbau der Resilienz der öffentlichen Trinkwasserversorgung in Deutschland gegenüber klimatischen Extremereignissen (Bild 1.1).



**Bild 1.1: Übersicht in TrinkXtrem entstandener Softwarelösungen sowie Methoden und Konzepte (M + K) mit prinzipieller Übertragbarkeit auf andere Wasserversorger**

Um einen hohen Praxisbezug zu gewährleisten, wurden die Untersuchungen im Rahmen von TrinkXtrem zu einem erheblichen Teil an den großtechnischen Anlagen der Projektpartner durchgeführt. Im engen Zusammenwirken von Wasserversorgung, KMU und Wissenschaft wurden die Ergebnisse (Bild 1.2) bereits im Verlauf des Projekts wenigstens konzeptionell umgesetzt, in Einzelfällen sogar großtechnisch. Dies erleichtert die Weiterentwicklung sowie die Übertragbarkeit auf die jeweiligen lokalen Gegebenheiten anderer Wasserversorgungsunternehmen.

Im Folgenden werden Ergebnisse des TrinkXtrem-Projektes zusammengefasst.



**Bild 1.2: Umsetzung der Ergebnisse des TrinkXtrem-Projekts an Best Practice Standorten**

## 1.2 Wasserressourcen: Qualität + Quantität

Bei der Gewinnung, Aufbereitung und Verteilung von Trinkwasser liefert die Betriebsüberwachung durch die Wasserversorgungsunternehmen typischerweise einen umfangreichen Datenpool. Die Wasserqualitätsdaten können u.a. dazu genutzt werden, durch Data Mining die Auswirkungen von Extremereignissen zu erfassen und zu beschreiben. Am Beispiel von Betriebsdaten der Landeswasserversorgung zur Beschaffenheit der Donau wurden charakteristische Muster in den Datensätzen erkannt. In Verbindung mit langjährigen Daten des Deutschen Wetterdienstes entstand daraus u.a. ein **Prognosetool zur Wasserqualität**, welches für den Zeitraum von Tagen die Härte im Donauwasser vorhersagen kann. Diese Angabe fließt in die Entscheidungskriterien zur Steuerung des Wasseraufbereitungsprozesses ein.

Mit der **wirkungsbezogenen Analytik (WBA)** können Wasserversorgungsunternehmen die Rohwasserqualität sowie die Wirkung einzelner Aufbereitungsverfahren aus toxikologischer Sicht einschätzen. Stichprobenuntersuchungen mittels WBA an verschiedenen Rohwässern zeigten, dass Extremwetterereignisse bei Flusswasser und Uferfiltraten keinen erheblichen Einfluss auf die toxikologische Belastung ausüben, wobei unter extremeren Bedingungen oder an anderen Standorten Einflüsse nicht auszuschließen sind. Bei Talsperrenwasser

scheinen Veränderungen insbesondere bei östrogenen Wirkungen als Folge der jahreszeitlich bedingten Umwälzung aufzutreten. Mit einem neu etablierten Biotest können künftig Wasserproben auch unter dem Aspekt Phytotoxizität betrachtet werden.

Zur Bestimmung der mikrobiologischen Qualität werden Rohwässer in der Wasseraufbereitung üblicherweise auf bakterielle Indikatorparameter untersucht, nicht jedoch auf virale Indikatoren und Krankheitserreger. Mit Hilfe der **quantitativen mikrobiellen Risikobewertung (QMRA)** können Wasserversorgungsunternehmen zusätzlich theoretische Vorhersagen zum Infektionsrisiko durch Krankheitserreger treffen. In TrinkXtrem wurden bei Fluss- und Talsperrenwässern sowie Uferfiltraten zu Zeitpunkten mit und ohne Extremereignisse Untersuchungen zum Vorkommen von Krankheitserregern durchgeführt. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass Extremereignisse die statistischen Ergebnisse einer QMRA nicht signifikant ändern.

Zum quantitativen Management ihrer Rohwasserressourcen verfügen verschiedene Wasserversorgungsunternehmen über Grundwassermodelle. Mit der in TrinkXtrem angewendeten Methodik der globalen **Sensitivitätsanalyse** und **Modellkalibrierung** wurde die Prädiktivität eines bestehenden Grundwassermodells weiter verbessert. Dadurch werden die Auswirkungen von Extremereignissen zuverlässiger prognostiziert.

Wasserwerken ist aus ihren Praxiserfahrungen bekannt, welche Rohwassermengen verfügbar sind wenn sich wie bislang Trockenjahre und niederschlagsreiche Jahre abwechseln. Im Projekt TrinkXtrem wurden Modellrechnungen durchgeführt, wie sich die Rohwasserneubildung ändert, sofern **mehrere Trockenjahre in Folge** auftreten. Die entwickelte Methodik basiert auf historischen Grundwasserneubildungsdaten und nicht auf prognostizierten Grundwasserneubildungsjahren und liefert daher dem Wasserversorger eine zuverlässigere Planungsgrundlage.

### **1.3 Anlagenbetrieb**

Künftig werden häufigere meteorologische Extremsituationen erwartet, bei denen auch mehrere Jahre hintereinander die Erneuerung des Rohwasserdargebots in Trinkwassergewinnungsgebieten durch Grundwasserneubildung ausbleibt. Mit dem in TrinkXtrem entwickelten **Managementtool** steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem die zur Trinkwassergewinnung genutzten Ressourcen optimal genutzt werden können. Steuerungsparameter sind Versorgungssicherheit, Trinkwasserqualität sowie Kosten. Das Managementtool wurde an den Wasserressourcen vom Zweckverband Landeswasserversorgung getestet.

Die **Uferfiltratgewinnung** weist prinzipiell eine bessere Resilienz gegenüber hydrologischen Extremereignissen auf als herkömmliche Grundwassergewinnungen, da sie sowohl auf Grundwasser als auch auf Oberflächenwasser als Ressource zugreifen kann. Sinkende Grundwasserstände waren für die Wasserversorgung Rheinhausen-Pfalz GmbH Anlass, mit Partnern aus der Wissenschaft eine Erweiterung der Uferfiltration modellhaft zu betrachten. Daraus wurden neue Bewirtschaftungskonzepte wie z.B. eine infiltrationsgestützte Uferfiltratgewinnung abgeleitet.

In TrinkXtrem wurde eine auf **Sensitivitätsanalyse und mathematischer Optimierung** basierende Methodik entwickelt, um Vulnerabilitäten im Verteilnetz zu identifizieren und zu beheben. Die mathematische Optimierung stellt verschiedene Versorgungssituationen im Netz dar und erkennt Lösungsmöglichkeiten. Dies betrifft z.B. Erweiterungen von Rohrverbindungen und Druckregelungen zwischen bestehenden Zonen oder die Ermittlung der optimalen Kapazität und Lage von Behältern. Das Vorgehen wurde bei der Wasserversorgung Rheinhausen-Pfalz GmbH beispielhaft getestet.

#### **1.4 Trinkwasser: Bedarf + Preise**

Insbesondere unter extremen klimatischen Bedingungen erfordert der Wasserwerksbetrieb eine Vorhersage des Trinkwasserbedarfs. Im Projekt TrinkXtrem entstand ein **Webservice**, über den Wasserversorger auf ein entsprechendes Prognosemodell zugreifen können. Für die Vorhersage des mittleren Wasserbedarfs und des Spitzenbedarfs wurden Modelle auf Basis des maschinellen Lernens entwickelt. Die Modelle basieren auf einem vorausgegangenem Training mit Betriebsdaten des Wasserversorgers aus der Vergangenheit zum Trinkwasserbedarf (Daten von smart meter) sowie weiteren Daten wie beispielsweise Temperatur, Niederschlag, Wochen- und Feiertage oder Ferienperioden. Im Rahmen des Projektes wurde u.a. die praktische Anwendbarkeit beim Zweckverband Landeswasserversorgung im großtechnischen Maßstab zur Prognose des Trinkwasserbedarfs für die jeweils nächsten Stunden und Tage getestet. Es zeigte sich eine hohe Prognosegüte mit Abweichungen im Bereich von 3 bis 5 %.

Zudem entstand in TrinkXtrem eine Softwarelösung basierend auf einem neuronalen Netz, um **anormale Datensätze** aus einem Pool von Trinkwasserverbrauchsdaten zu identifizieren.

Spitzenbedarfe für Trinkwasser seitens der Kunden stellen Wasserversorger vor Herausforderungen. In TrinkXtrem wurde eine Methodik entwickelt, mit der Wasserversorger **dyna-**

**mische Preismodell-Komponenten** entwickeln können. Damit werden ökonomische Anreize für Kunden geschaffen, ihren Wasserverbrauch von lastintensiven in lastärmere Zeiten zu verlagern. Dadurch gelingt eine bessere Auslastung der vorhandenen Infrastruktur, eine Erhöhung der Versorgungssicherheit, eine Verminderung der Spitzenlasten und Einsparungen bei Betriebs- und Investitionskosten. Die Methodik bezieht Erfahrungen aus der Zusammenarbeit mit den Harzwasserwerken GmbH, der Landeswasserversorgung sowie der Rheinisch-Westfälischen Wasserwerksgesellschaft ein.

## 1.5 Risiko + Vorsorge

Das Risikomanagement in der Wasserversorgung adressiert vorrangig die Zielfunktionen Versorgungssicherheit und Trinkwasserqualität. Dabei wird in der Regel der Ist-Zustand im jeweiligen Versorgungssystem betrachtet. Die mit Extremereignissen verbundenen Gefährdungseignisse werden bislang jedoch häufig nur am Rande berücksichtigt und bezüglich des Handlungsbedarfs als nachrangig priorisiert. Das Projekt TrinkXtrem schlägt eine Methodik vor, um bestehende, **GIS-gestützte Risikomanagementsysteme für Einzugsgebiete auf Extremereignisse zu erweitern**. Dazu wird die vorhandene Systembeschreibung durch mehrere Komponenten ergänzt. Dazu zählen u.a. Klimasteckbrief, Ableitung von Extremereignissen, Anpassung der Bewertung des Ausgangsrisikos und die Bewertung der Vulnerabilität.

Weiterhin wurde ein übertragbares Vorgehen zur Erstellung von **Vorsorgekonzepten** so optimiert, dass es die Wirksamkeit und Effektivität von Risikomanagementmaßnahmen bei hydrologischen Extremereignissen steigert. Dazu wurden bestehende Vorsorgekonzepte methodisch weiterentwickelt.

## 1.6 Videodokumentation

Projektergebnisse sind in fünf Videos zusammengefasst, die über youtube verfügbar sind. Die Videos verwenden Animationen, um die Arbeit und die Erkenntnisse des Projektverbundes plakativ, zeitgemäß und gut verständlich zu transportieren.

## 2 Motivation

### 2.1 Einführung

Hydrologische Extremereignisse können auch die öffentliche Trinkwasserversorgung in einzelnen Gebieten in Deutschland vor Herausforderungen stellen. Durch häufiger auftretende Extremereignisse bei fortschreitendem Klimawandel werden die Grenzen zwischen dem Management im Normalbetrieb, dem Spitzenlastmanagement und dem Krisenmanagement der Wasserwerke zunehmend aufgelöst. Die Auswirkungen auf die Wasserversorgung sind vielfältig. Dazu gehören u.a. eine abnehmende Verfügbarkeit an Rohwasserressourcen wie Grund-, Quell- oder Oberflächenwasser, eine Verschlechterung der Rohwasserqualität sowie ein Anstieg des Trinkwasserbedarfes. Bisher stand der deutschen Wasserversorgung ein ausreichendes Wasserdargebot zur Verfügung, so dass die Praxis von einem gleichbleibenden, kontinuierlichen Betrieb der Anlagen geprägt war. Auf Grund der regionalen Prägung der deutschen Wasserbranche weisen Extremereignisse bei den einzelnen Wasserversorgungsunternehmen unterschiedliche Auswirkungen auf. Dies ist bedingt durch unterschiedliche Rohwasserressourcen aber auch durch die standortspezifischen Versorgungsgebietsstrukturen wie kommunale, regionale oder Fern- bzw. Flächenwasserversorger.

Ziel des Forschungsprojektes ist es, die Resilienz der Trinkwasserversorgung gegenüber klimatischen Extremereignissen zu stärken. Entwickelt für die Wasserversorgungsunternehmen werden Methoden und Konzepte sowie praxisnahe Werkzeuge zum Management von Extremereignisse. Hierbei werden maßgebliche Teilgebiete der Wasserversorgung von der Wassergewinnung, -aufbereitung über den Betrieb bis zum Wassergebrauch ebenso adressiert wie die unterschiedlichen Rohwassertypen Grund-, Quell- und Oberflächenwasser.

Im Projekt arbeiteten Wasserversorgung, KMU und Wissenschaft eng zusammen. Als besonders Merkmal zeigt sich der hohe Praxisbezug aus. Die Untersuchungen erfolgten zum Großteil unter Einbeziehung des Betriebsdatenpools der beteiligten Wasserwerke. Bereits während des Projektverlaufes begann die Konzeption für eine großtechnische Implementierung der Projektergebnisse. Dies erlaubt weiteren Wasserversorgungsunternehmen Projektergebnisse an ihre jeweiligen verschiedenen lokalen Anforderungen praxisnah zu adaptieren.

## 2.2 *Verwendete Klima-Szenarien*

Die Prognosen zur zukünftigen Entwicklung des Klimas in Deutschland basieren auf unterschiedlichen Annahmen zur Entwicklung des globalen Wandels. Dabei handelt es sich in der Regel um Szenarien, die eine mögliche Entwicklung der Welt und der damit verbundenen Emissionen von klimarelevanten Gasen darstellen.

Für die Klimaprojektionen des 5. Assessment Reports des IPCC wurden Emissionsszenarien entwickelt, die ausschließlich auf der Projektion von verschiedenen Emissionen und den daraus entstehenden Strahlungsantrieben bis in das Jahr 2100 basierten (van Vuuren et al., 2011). Die vier Emissionsszenarien (als ‚representative concentration pathways‘, kurz RCP, bezeichnet) reflektieren im Wesentlichen den durch klimarelevante Gase und weitere Faktoren (z. B. Aerosolkonzentrationen in der Atmosphäre) resultierenden Strahlungsantrieb an der Erdoberfläche.

Für das Projekt „TrinkXtrem“ wurden vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) Daten und Szenarien zu Auswirkungen auf die hydrologischen Verhältnisse in Deutschland bereitgestellt (Boeing et al., 2023). Im Wesentlichen wurde in TrinkXtrem das Klimaszenario RCP 8.5 untersucht, welches die höchsten Emissionen aller RCP-Szenarien annimmt. Dafür wurden die Ergebnisse der Klimaprojektionen speziell unter dem Gesichtspunkt der Jahre mit Extremen ausgewertet. Damit werden die Daten aus dem Klimamodell-Ensemble nicht wie üblich auf 30-jährige Mittelwerte hin untersucht, sondern zugunsten einer speziellen Betrachtung der extremen Jahre angepasst. Das ist eine Abweichung zu der sonst in den Klimawissenschaften häufig betrachteten statistischen Spannweite aller Modellergebnisse, welche häufig auf langjährige Mittelwerte abzielt.

Ein Problem der Klimamodelle bleibt jedoch bestehen. Die Trockenjahre 2018 und 2019 bzw. die trockene Periode seit Beginn der 2000er Jahre, in der in vielen Teilen Deutschlands hohe sommerliche Wasserbedarfsspitzen sowie sinkende Grundwasserstände beobachtet wurden, werden nicht gut in den Ergebnissen der Klimaprognosen abgebildet. Grund dafür ist, dass die komplexen Prozesse bei der Entstehung von Extremereignissen noch nicht vollständig in Klimamodellen integriert werden können; einerseits durch die fehlende kleinräumige Skalierung der Prozesse (z. B. Starkregenereignisse) bedingt, andererseits durch weiteren Forschungsbedarf. Deshalb bilden Projektionen der Klimamodelle diese Wetterphänomene noch nicht ausreichend präzise ab. Analysen von Zeitreihen des Deutschen Wetterdiensts deuten auf eine vermehrte Häufigkeit von mit persistenten Hochdruckgebieten assoziierten Hitzewellen in den vergangenen sechs Jahrzehnten hin (Tomczyk et al., 2019). Die Ursache von sommerlichen Niederschlags- und Temperaturextremen in Mitteleuropa liegt vermehrt in der Kombination von atmosphärischen Strömungsanomalien im

Sommer und Niederschlagsdefiziten im Frühjahr. Ob die spezifischen Wetterlagen, die für Dürre und Niedrigwasser in der jüngeren Vergangenheit in Deutschland verantwortlich waren, in Zukunft häufiger auftreten werden, ist deshalb noch nicht abschließend zu klären.

Für die verschiedenen TrinkXtrem-Fallstudien wurden daher unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt, beispielsweise künstlich generierte und tatsächlich beobachtete Wetterdaten aus den Extremjahren 2018 und 2019 fortgeschrieben. Der Vorteil der gemessenen Wetterdaten ist also die größere Nähe zu den realen Wetterextremen.

Die betrachteten Szenarien wurden zudem um Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit erweitert.

## 2.3 Risiken durch Extremereignisse

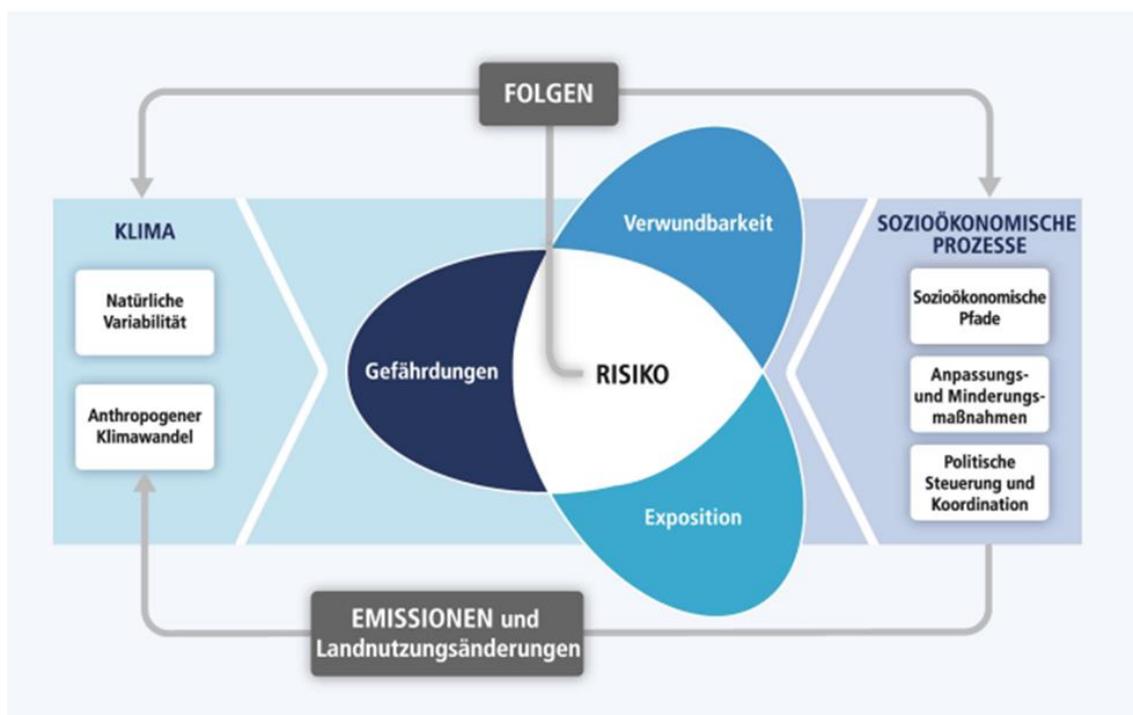
Hydrologische Extremereignisse mit Auswirkungen auf die Wasserressourcen stellen auch in Deutschland ein zunehmendes Risiko für die öffentliche Trinkwasserversorgung dar. Der fortschreitende Klimawandel verschärft die Situation, wie z.B. durch steigende Schadenausmaße und Eintrittswahrscheinlichkeiten. Beispiele aus der jüngeren Vergangenheit wie die Trockenperioden der Jahre 2015, 2018 und 2019 oder die Hochwässer des Rheins 1993 und 2013 führten zu erheblichen quantitativen und qualitativen Beeinträchtigungen von Rohwässern. Bisher herrschten in Deutschland noch keine flächendeckenden negativen Auswirkungen auf das Wasserdargebot (Umweltbundesamt, 2023). Allerdings zeigen Klimaprojektionen bis 2100, dass hydrologische Extremereignisse zunehmend häufiger und intensiver auftreten werden (Seneviratne et al., 2021). Dies könnte zukünftig zu einem flächendeckenden Mangel des Wasserdargebots auch in Deutschland führen (DVGW, 2022). Daher besteht ein dringender gesellschaftspolitischer und wirtschaftlicher Handlungsbedarf, die Trinkwasserversorgung in Deutschland an die wachsenden Herausforderungen durch hydrologische Extremereignisse anzupassen.

Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) definiert Extremereignisse als seltene Vorkommnisse, abhängig von Ort und Zeit. Die Definition von "selten" variiert je nach Anwendungsbereich, einige Studien klassifizieren ein Ereignis als extrem, wenn es noch nie zuvor aufgetreten ist, während andere Studien Ereignisse, die mehrmals im Jahr vorkommen, als moderate Extremereignisse betrachten. Der Klimawandel verändert die Häufigkeit und Intensität solcher Ereignisse, wodurch bisher beispiellose Bedingungen häufiger auftreten können (Seneviratne et al., 2021).

Hydrologische Extremereignisse sind solche mit entweder „zu viel“ (Hochwasser) oder „zu wenig“ Wasser (Niedrigwasser bzw. Dürre), die eine Veränderung bzw. Abweichung des bisherigen Normalzustandes darstellen. Niedrigwasser und Dürren sind langsam entstehende und langanhaltende Extremereignisse, die mehrere Monate bis Jahre andauern können. Hochwasser hingegen sind im Vergleich zu Niedrigwasser und Dürren räumlich und zeitlich begrenzter, zählen aber in Deutschland zu den Extremereignissen mit den höchsten wirtschaftlichen Schäden (Thober et al., 2018).

Ein in der Wissenschaft weitverbreitetes Verständnis von Risiko basiert auf dem IPCC. Dieser sogenannte „Weltklimarat“ definiert Risiko als „das Potenzial für nachteilige Folgen für menschliche oder ökologische Systeme [...]“ (IPCC, 2023). Hierbei setzt sich das Risiko aus drei Komponenten zusammen: Gefährdung, Exposition und Verwundbarkeit. Damit geht dieses Verständnis über die reine Betrachtung des Extremereignisses bzw. der Gefährdung hinaus und berücksichtigt zudem die Exposition und die Verwundbarkeit von Systemen und

dessen Bestandteilen wie Menschen, Ökosystemen, Ressourcen und Infrastrukturen. Das Risiko ergibt sich also aus dem Zusammenspiel der drei genannten Komponenten (Bild 2.1).



**Bild 2.1:** Konzeptionelle Darstellung des Risikos nach IPCC (ICPP 2013/14).

Im Kontext der deutschen Wasserversorgung definiert der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) das Risiko als eine Kombination aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Schadensausmaß einer Gefährdung im Versorgungssystem (WHO, 2022; DIN EN 15975-2; DVGW W 1001, 2008; DVGW, 2020). Diesem Risikoverständnis ähnelt sich dem des IPCC dahingehend, dass die zuvor genannten Risikokomponenten Exposition und Verwundbarkeit bei der Bewertung des Schadensausmaßes berücksichtigt werden. Für das wirksame Management von Risiken in der öffentlichen Trinkwasserversorgung durch hydrologische Extremereignisse sollten alle Risikokomponenten betrachtet werden. Um die negativen Auswirkungen dieser Risiken auf Menschen, Ökosysteme, Ressourcen und Infrastrukturen zu minimieren oder zu verhindern, sind umfassende Anpassungsstrategien erforderlich. Diese Strategien wurden im Rahmen des TrinkXtrem-Projekts speziell für den deutschen Kontext entwickelt.

## 2.4 Videoserie zum Projekt

Die TrinkXtrem-Videoserie ist der spezielle Kern der Öffentlichkeitsarbeit für das Projekt TrinkXtrem. Dabei wurden zunächst das inhaltliche Ziel, die technische und grafische Umsetzung der Videoserie mit insgesamt fünf Videos definiert. Damit soll vor allem eine breite Öffentlichkeit angesprochen werden. Durch eine einfache und verständliche Sprache sowie die Reduzierung komplexer Inhalte in Text, Bild und Grafik wurde diese Zielgruppe angesprochen. Eine Besonderheit ist die grafisch animierte Moderatorin, die durch die Serie führt, sowie weitere grafische Animationen. Die Videoserie wird im Sinne des TrinkXtrem-Projektverbundes gestaltet und steht den Projektpartnern für die Öffentlichkeitsarbeit der beteiligten Versorgungsunternehmen zur Verfügung. Die Videoserie umfasst fünf Videos (Tabelle 2.1). Die Videos sind auf youtube und auf der Website [www.trinkxtrem.de](http://www.trinkxtrem.de) verfügbar. Die Veröffentlichung der Videos wurde durch Öffentlichkeitsarbeit in der Fachpresse und auf Social Media begleitet.

**Tabelle 2.1: Zusammenstellung aller Videos zum TrinkXtrem-Projekt**

Videotitel	Videothema	Quelle
Trinkwasser und Extremereignisse: Menge und Qualität verändern sich – aber wie?	Wasserressourcen	
Trinkwasser und Extremereignisse: Wie Wasserwerke ihre Bewirtschaftung optimieren	Anlagenbetrieb	
Prognosen und Preise: Wie der Wasserbedarf mit Data Mining und KI gesteuert werden kann	Trinkwasserbedarf und Preismodelle	
Risikomanagement und Vorsorgekonzepte für Extremwetterereignisse	Risiko und Vorsorge	
Das Projekt TrinkXtrem – Lösungsoptionen für die Praxis	Projektfazit	

### 3 Wasserversorgungsunternehmen im TrinkXtrem-Projekt

#### 3.1 Einführung

Ergebnisse des TrinkXtrem-Projektes wurden bei den beteiligten Wasserversorgungsunternehmen auf Basis von großtechnischen Daten entwickelt und erprobt. Dies vereinfacht den Transfer in die Praxis, womit auch andere Wasserversorger die in TrinkXtrem gewonnenen Erkenntnissen einfacher übertragen können. Die Wasserversorgung in Deutschland ist regional geprägt. Die in TrinkXtrem beteiligten Wasserversorgungsunternehmen stellen einige unterschiedliche Konfigurationen dar, beispielsweise bezüglich Rohwasserherkunft, Aufbereitung sowie Versorgungsgebiets- bzw. Kundenstruktur. Diese Wasserversorgungsunternehmen haben darüber hinaus einen erheblichen Anteil an der gesamten Trinkwasserversorgung Deutschlands (Tabelle 3.1).

**Tabelle 3.1: Jährliche Trinkwasserabgabe und Anzahl versorgter Einwohner der in TrinkXtrem beteiligten Wasserversorgungsunternehmen**

Wasserversorgungsunternehmen	Trinkwasserabgabe in Mio. m <sup>3</sup> /a	Versorgte Einwohner in Mio.
Fernwasserversorgung Elbaue Ostharz GmbH (FEO)	81	2,5
Harzwasserwerke GmbH (HWW)	100	2,0
Rheinisch-Westfälische Wasserwerksges. mbH (RWW)	70	0,9
Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH (wvr)	15	0,2
Zweckverband Landeswasserversorgung (LW)	100	3,0
<b>Summe TrinkXtrem-Unternehmen</b>	<b>366</b>	<b>8,6</b>
Zum Vergleich: Wasserversorgung in Deutschland	4.700	84,7
Anteil TrinkXtrem-Unternehmen an Wasserversorgung in D	7,8%	10,2%

Technische Merkmale der einzelnen Unternehmen werden nachfolgend beschrieben, wobei der Fokus auf Unternehmensbereichen liegt, die in Verbindung mit den Untersuchungen im TrinkXtrem-Projekt stehen. Weitere unternehmensspezifische Informationen sind zudem bei der Ergebnisdiskussion in den Fachkapiteln angegeben.

### 3.2 Fernwasserversorgung Elbaue Osthartz GmbH

Die Fernwasserversorgung Elbaue-Ostharz GmbH (FEO) versorgt etwa 2,5 Millionen Menschen in den Bundesländern Sachsen, Sachsen - Anhalt und Nordthüringen mit Trinkwasser. Dazu werden ein Talsperren- und zwei Uferfiltrat-Wasserwerke mit einer Jahresproduktion von insgesamt ca. 81 Mio. m<sup>3</sup> sowie ein Fernleitungssystem betrieben. Das Wasserwerk Wienrode bereitet ca. 45 Mio. m<sup>3</sup>/a Trinkwasser für den sachsen-anhaltinischen Raum aus der Rappbodetalsperre auf. In Sachsen wird Trinkwasser aus Uferfiltrat der Elbe sowie Grundwasser der Elbaue bei Torgau gewonnen. Zur Fassung stehen insgesamt 97 Vertikalfilterbrunnen mit bis zu 50 Metern Tiefe entlang der Elbe zur Verfügung. Das dabei gewonnene Rohwasser bereiten zwei Wasserwerke mehrstufig auf, aus denen die verbleibenden ca. 35 Mio. m<sup>3</sup>/a Trinkwasser abgegeben werden.



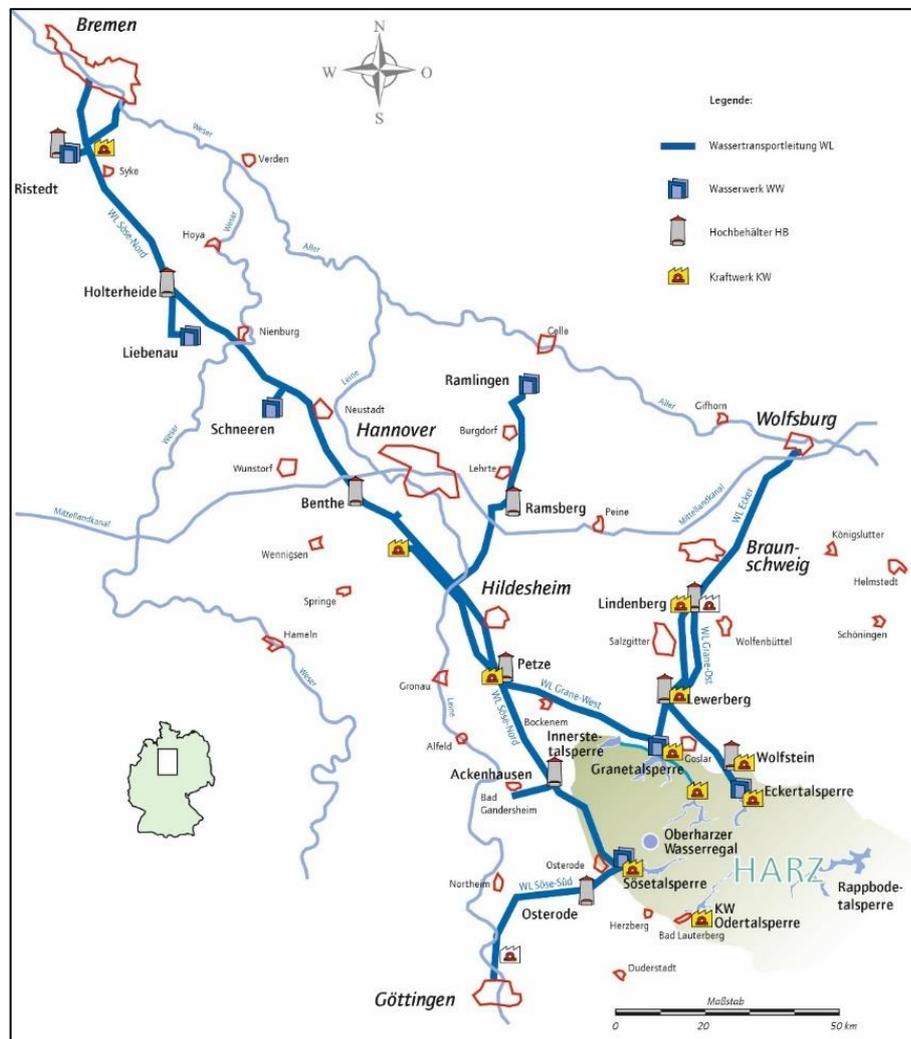
**Bild 3.1: Fernleitungssystem der FEO**

Die Trinkwässer werden über ein etwa 800 km langes Fernleitungssystem verteilt, das sich von den Höhenzügen des Harzes im Westen bis hin zur Elbe bei Torgau im Osten erstreckt. Die Nord-Süd-Ausdehnung reicht von Halberstadt bis in das nördliche Thüringen bei Altenburg. Das Fernleitungssystem verfügt über mehrere Behälter mit ca. 221.000 m<sup>3</sup> Speichervolumen und 149 Abgabestationen.

### 3.3 Harzwasserwerke GmbH

Mit drei Talsperren- und vier Grundwasserwerken versorgen die Harzwasserwerke weite Teile Niedersachsens und Bremen mit Trinkwasser. Mit einer Trinkwasserabgabe von ca. 100 Mio. m<sup>3</sup>/a gehören die Harzwasserwerke als Fernwasserversorger zu den zehn größten Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland. Die Harzwasserwerke betreiben drei Talsperren- und vier Grundwasserwerken, die zusammen maximal 450.000 m<sup>3</sup>/Tag liefern können.

Das in Bild 3.2 dargestellte Wassertransportsystem hat eine Länge von insgesamt 520 km und befindet sich im geographischen Dreieck Göttingen-Wolfsburg-Bremen.



**Bild 3.2: Fernleitungssystem der Harzwasserwerke**

Als Trinkwasservorlieferant beliefern die Harzwasserwerke insgesamt 70 Städte, Kommunen, Verbände und Industrieunternehmen innerhalb ihres Versorgungsgebietes. Auf dem Weg zu den Kunden wird das Trinkwasser an zehn Hochbehälterstandorten zwischengespeichert. Die Hochbehälter unterteilen die Trinkwassertransportleitungen in einzelne

Druckabschnitte und dienen darüber hinaus zum Ausgleich von Bedarfsspitzen und der Überbrückung von Ausfallzeiten. Insgesamt steht für diese Zwecke im Trinkwasserverbundsystem der Harzwasserwerke eine Speicherkapazität von rund 190.000 m<sup>3</sup> zur Verfügung.

Aufgrund des Höhenunterschiedes zwischen Harz und Harzvorland gelangt das Trinkwasser von den Talsperrenwasserwerken überwiegend im freien Gefälle zu den Verbrauchern. In Teilabschnitten des Transportleitungsnetzes sind Druckerhöhungsanlagen angeordnet, die für den erforderlichen Versorgungsdruck sorgen. Bei Ausfall einzelner Systemkomponenten ermöglichen einzelne Druckerhöhungsanlagen eine Rückwärtsversorgung – z. B. aus dem Grundwasser- in den Harzwasserbereich – und stellen auf diese Weise die Versorgung sicher.

Den Grundstein des Transportsystems bilden die in den 1930er Jahren gebaute Wassertransportleitung Söse-Nord vom Wasserwerk Sösetalsperre bis nach Bremen und die in den 1940er Jahren erstellte Wassertransportleitung Ecker vom Wasserwerk Eckertalsperre über Braunschweig bis nach Wolfsburg. Eine wesentliche Erweiterung des Systems erfolgte in den 1970er Jahren nach Inbetriebnahme des Wasserwerks Grane mit den Transportleitungen Grane-Ost und Grane-West. Durch den Bau der Transportleitung Söse-Süd im Jahr 1979 wurde das Trinkwasserverbundsystem komplementiert.

Die Transportleitungen wurden überwiegend als Stahlleitungen mit der Dimension DN 400 bis DN 1000 verlegt. Vereinzelt wurden in den 1960er Jahren AZ-Leitungen verbaut. Die Stahlleitungen sind mit einem passiven inneren (ZM-Auskleidung) und äußeren Korrosionsschutz (Bitumen/PE-Umhüllung) und mit einem aktiven kathodischen Korrosionsschutz (KKS) versehen.

### 3.4 Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH (RWW)

Die RWW wurde 1912 mit Sitz in Mülheim gegründet und zählt heute zu den größten Wasserdienstleistern Deutschlands. Das rund 850 km<sup>2</sup> große Versorgungsgebiet umfasst 15 Kommunen und Kreise von der niederländischen Grenze im Norden bis ins Bergische Land im Süden. Mit sechs Wasserwerken für die Trinkwasseraufbereitung, einem Betriebswasserwerk und 14 Wasserspeichern mit einer Speicherkapazität von 168.000 m<sup>3</sup> versorgt RWW rund 900.000 Menschen, Industrie und Gewerbe mit jährlich 70,1 Mio. m<sup>3</sup> Trink- und Brauchwasser (Stand: 2023). Davon erhalten Tarifkunden 35,1 Mio. m<sup>3</sup>/a und Sonderabnehmer 35 Mio. m<sup>3</sup>/a. Im nördlichen Einzugsgebiet wird Grundwasser gefördert, im südlichen Bereich Oberflächenwasser aus der Ruhr und dem Rhein. Zudem unterhält sie ein 3.000 Kilometerlanges Leitungsnetz mit rund 140.000 Hausanschlüssen. Insgesamt gibt es 14 Druckzonen im Versorgungsgebiet. Die Rohrnetze sind weitestgehend miteinander vernetzt, so dass im Notfall eine Einspeisung aus den einzelnen Versorgungszonen in die benachbarten Zonen zur Stützung der Versorgung möglich ist.

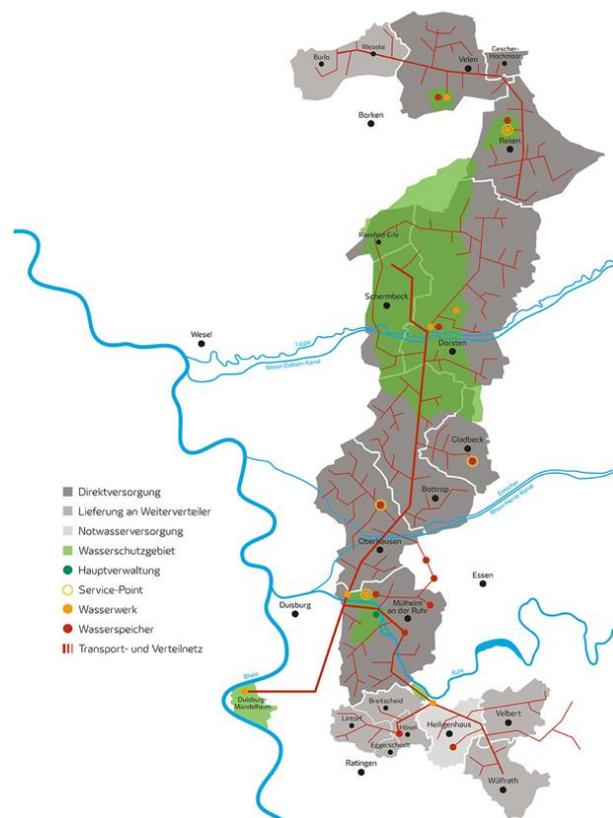


Bild 3.3: Trinkwassernetz der RWW

### 3.5 Wasserversorgung Rheinessen-Pfalz GmbH

Die Wasserversorgung Rheinessen-Pfalz GmbH (wvr) liefert jährlich ca. 15 Mio. m<sup>3</sup> Trinkwasser in die Region Rheinessen und Nordpfalz. Als zweitgrößter Trinkwasserversorger in Rheinland-Pfalz versorgt die wvr über 235.000 Einwohner in 102 Ortsgemeinden und Stadtteilen. Das Versorgungsgebiet der wvr befindet sich im mittleren Osten von Rheinland-Pfalz und erstreckt sich auf einer Fläche von etwa 800 km<sup>2</sup>. Die Grenze reicht von Kirchheimbolanden im Südwesten bis Mainz im Nordosten und von Gau-Algesheim im Nordwesten bis zur Gemeinde Alsheim im Südosten.

Die Trinkwassergewinnung erfolgt aus 36 Brunnen - davon 20 Uferfiltratbrunnen - und 7 Quelfassungen. Etwa 80 % des geförderten Rohwassers stammt aus den Uferfiltratbrunnen der Gewinnungen Bodenheim und Guntersblum. An diesen Standorten ist die Wassergewinnung sowohl von den verfügbaren Grundwasservorkommen als auch vom Oberflächenwasser Rhein abhängig.

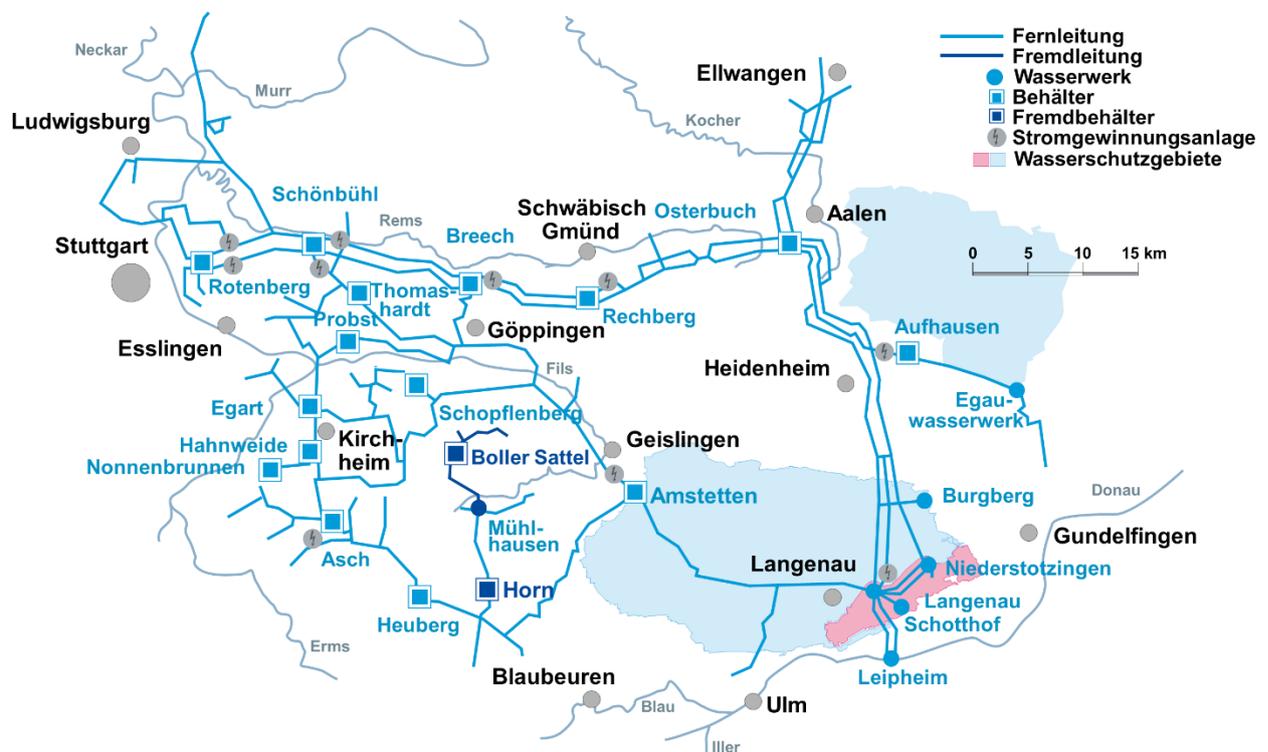
Nach der Aufbereitung wird das Wasser mithilfe von Pumpwerken in ein über 2.550 km langes Leitungsnetz gefördert. Das Wasser wird entweder direkt an die Kunden verteilt oder in Speicherbehältern zwischengespeichert. Für die Speicherung sind im Versorgungsgebiet der wvr insgesamt 95 Hochbehälter mit einem Gesamtspeichervolumen von mehr als 80.000 m<sup>3</sup> vorhanden. Von besonderer Bedeutung ist der Haupthochbehälter in Wintersheim mit einem Fassungsvermögen von insgesamt 20.500 m<sup>3</sup>.



**Bild 3.4:** Flächenversorgung bei der wvr

### 3.6 Zweckverband Landeswasserversorgung (LW)

Der Zweckverband Landeswasserversorgung (LW) ist ein Fernwasserversorger mit 106 Verbandsmitgliedern. Verbandsmitglieder sind Städte, Gemeinden, Stadtwerke und andere Zweckverbände. Die LW liefert jedes Jahr ca. 100 Mio. m<sup>3</sup> Trinkwasser an drei Millionen Menschen in Baden-Württemberg und Bayern. Die Trinkwassergewinnung umfasst insgesamt 10 verschiedene Ressourcen. Der größte Anteil wird dabei aus den 6 Grundwasserfassungen im Wasserschutzgebiet Donauried-Hürbe (max. 2.500 l/s) und aus der fließenden Welle der Donau (max. 2.300 l/s) bei Leipheim entnommen. Das Donauwasser wird dabei in einem aufwändigen Verfahren aufbereitet. Das Egauwasserwerk kann in der Spitze 800 l/s Karstquellwasser aus der Buchbrunnenquelle fördern. Aus den drei Karstwasserbrunnen bei Burgberg können maximal 500 l/s gewonnen werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit zum Fremdwasserbezug von der Bodenseewasserversorgung und den Stadtwerken Heidenheim. Das Leitungsnetz umfasst eine Länge von insgesamt ca. 775 km und ist in vier Hauptleitungen mit einem Durchmesser zwischen 0,7 m und 1,5 m sowie zahlreichen Zubringerleitungen gegliedert. In Bild 3.5 sind das Leitungsnetz und die wichtigsten Anlagen schematisch dargestellt.



**Bild 3.5: Trinkwasserverteilnetz des ZV Landeswasserversorgung**

Insgesamt beträgt die maximale Förderleistung ca. 450.000 m<sup>3</sup> pro Tag bzw. 5.200 l/s in der Spitze. Vom Wasserwerk Langenau gibt es zwei Förderrichtungen, Druckleitung 1 und 2 führen Richtung Aalen zum Scheitelbehälter Osterbuch mit 47.000 m<sup>3</sup> Speichervolumen.

Das Egauwasserwerk fördert in der Spitze 29.000 m<sup>3</sup> pro Tag in den Scheitelbehälter Aufhausen (21.000 m<sup>3</sup> Volumen) von dort wird das Wasser weiter Richtung Aalen (Behälter Osterbuch) gefördert. In westliche Richtung wird über das Remstal das Trinkwasser weiter bis in den Behälter Schönbühl (88.000 m<sup>3</sup>) geleitet, von dort aus wird der Mittlere Neckarraum einschließlich Stuttgart versorgt. Auf den Mittleren Neckarraum entfällt etwa die Hälfte des gesamten geförderten Trinkwassers. Durch das Pumpwerk-Ruit südlich von Stuttgart sowie die Verbindung „Solitudeallee“ bei Kornwestheim, sind leistungsfähige Verbindungen zur Bodensee-Wasserversorgung vorhanden. So kann beim Ausfall einer der großen Fernwasserversorgerkann der Mittlere Neckarraum über die BWV oder die LW notversorgt werden.

Die zweite Förderrichtung von Langenau ist Amstetten, der Scheitelbehälter (ca. 50.000 m<sup>3</sup> Speichervolumen) wird über die Druckleitung 3 versorgt, diese durchquert das gesamte Wasserschutzgebiet Donauried-Hürbe. Danach wird das Wasser über das Filstal durch die Fallleitung 3 weiterverteilt. Bei Göppingen gibt es eine leistungsfähige Querspanne, welche die Hauptleitungen miteinander verbindet. Das Netz ist so ausgelegt, dass auch in die andere Förderrichtung gefördert werden kann. Dies gewährleistet eine Redundanz beim Ausfall einer der Hauptleitungen.

Der Kirchheimer Raum, das obere Filstal und die Hochfläche der Schwäbischen Alb wird zum einen über den Behälter Amstetten mit Druckerhöhungsanlagen versorgt. Von Norden wird der Kirchheimer Raum von der Druckleitung 3 über die Zubringerleitung Göppingen-Süd versorgt.

Die Übergabe des Trinkwassers an die Verbandsmitglieder erfolgt in der Regel über einen Übergabebehälter. Die LW hat insgesamt 33 Wasserbehälter mit einem Gesamtvolumen von ca. 400.000 m<sup>3</sup>. Da die Übergabe des Trinkwassers bei der Kommune oder dem nächsten Versorger endet, ist generell wenig über den Endverbraucher und Industriekunden bekannt.

## 4 Wasserressourcen - Quantität

### 4.1 Modellierung extremer Trockenjahre in Folge

#### 4.1.1 Einführung

Durch in Zukunft gehäuft auftretende Dürreperioden steigt das Risiko, dass das Wasserdargebot nicht ausreicht, um den Wasserbedarf zu decken. Die konkreten Folgen von vermehrten Dürreperioden sind in Deutschland noch weitgehend unbekannt bzw. noch nicht ausreichend quantifiziert. Aus diesem Grund werden in diesem TAP extreme Dürreszenarien entworfen, welche mit einem Grundwassermodell quantifiziert werden. Ziel ist einerseits die Extremszenarien in Bezug auf die Auswirkungen auf den Wasserversorger zu analysieren und andererseits, das in Kapitel 6.1 vorgestellte Managementtool für Anwendungen in der Praxis zusätzlich zu verifizieren.

Es werden Szenarien mit einer Abfolge von mehreren Trockenjahren (3, 5 und 10 Jahre) exemplarisch für die Grundwasserressource im Donauried der LW erstellt. Zur Quantifizierung wird das vorhandene Grundwassermodell eingesetzt. Mit den Ergebnissen der Modellierung können auch die in Kapitel 6.1.2 entwickelten künstlichen neuronalen Netze für die Fassungen 1 bis 6 im Donauried für extreme Grundwasserstände, welche nicht in den Messzeitreihen vorhanden sind, trainiert werden.

Für die Szenarienerstellung ist die prognostizierte Grundwasserneubildung bis ins Jahr 2050 der wichtigste Parameter. Hierfür werden verschiedene Ansätze betrachtet:

- Verwendung von historischen Grundwasserneubildungsdaten (1965-2020) für die Prognosen mit einer Verschiebung der Häufigkeitsverteilung hin zu Jahren mit geringerer Grundwasserneubildung
- Direkte Verwendung von Klimaprognosen vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) (Boeing et al. 2023)

Es ist bei der Fragestellung wichtig zu beachten, dass gezielt nach extremen Szenarien gesucht wird, welche gemäß der Klimaprognosen möglich sind, aber nicht den wahrscheinlichsten Fall darstellen.

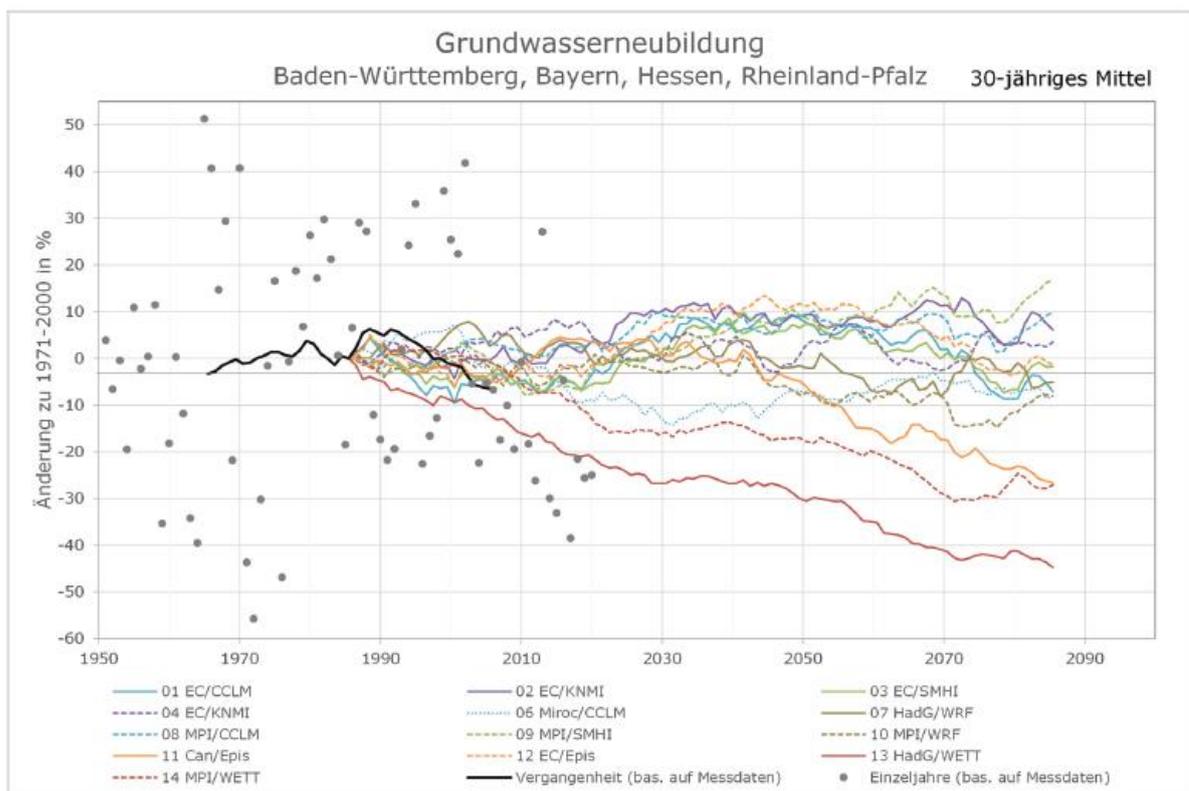
#### 4.1.2 Verwendung von historischen Grundwasserneubildungsdaten

In enger Abstimmung mit dem Projektpartner LW wurden Konzepte für die Entwicklung von Szenarien für 3, 5 oder 10 aufeinanderfolgende extreme Trockenjahre erstellt. Neben der notwendigen Analyse der Auswirkungen dieser Szenarien auf die Wasserversorgung, sollen

diese Szenarien auch als Nachweis zur praktischen Anwendbarkeit des oben beschriebenen Managementtools dienen.

Der hier beschriebene Ansatz basiert auf der Auswertung von historischen Daten zur Grundwasserneubildung. Zeitreihen für die Grundwasserneubildung stehen ab 1965 für die Einzugsgebiete der LW zur Verfügung. In diesem Datenpool liegen bereits Jahre mit extrem niedriger Grundwasserneubildung vor, z.B. die Jahre 1971 und 1972. Die Berechnung der Grundwasserneubildung erfolgt gemäß der Methodik des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW (Grundwasserneubildung Bodenwasserhaushalt).

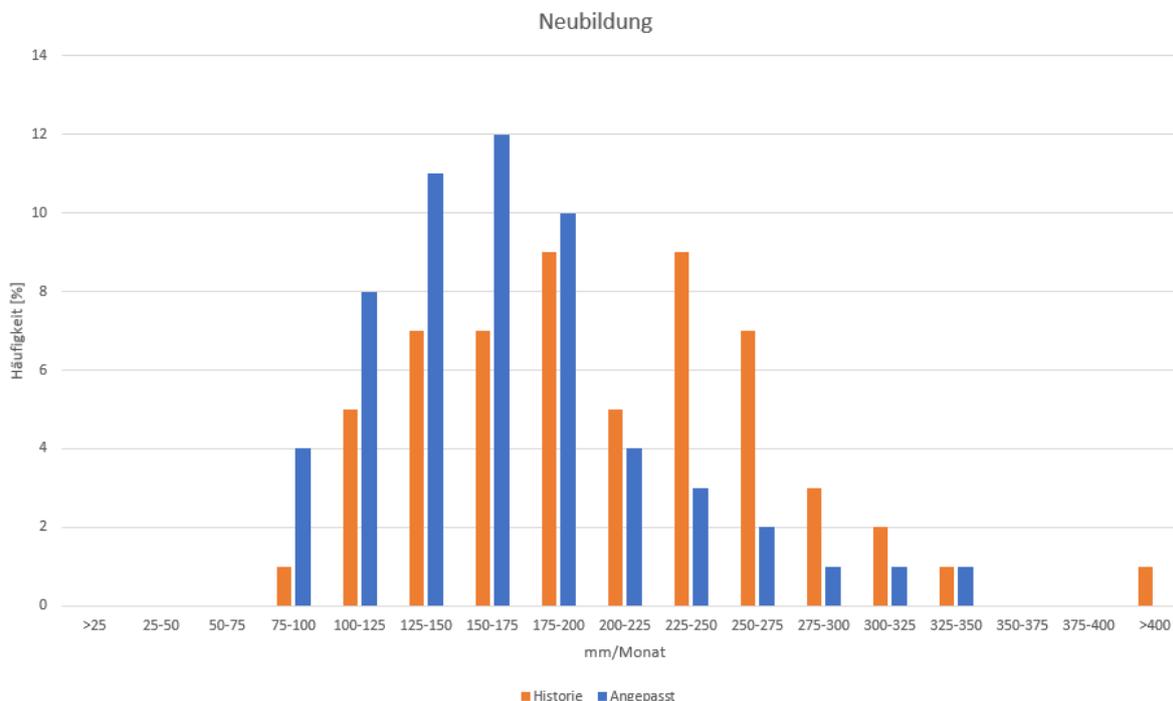
In Bild 4.1 sind mögliche Szenarien zur Entwicklung der Grundwasserneubildung dargestellt. Hierbei handelt es sich um die projizierte Entwicklung der Änderung der mittleren Grundwasserneubildung von Niederschlag im hydrologischen Jahr angegeben in Prozent für Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz. Verwendet wurden gleitende 30-jährige Mittel von 1971 bis 2100. Die Prognoserechnungen basieren auf dem erweiterten KLIWA-Ensemble, das neun dynamische und vier statistische Klimamodelle (KLIWA 2023) umfasst. Im Vergleich dazu sind Modellierungen der Vergangenheit auf Basis von Messdaten ab 1951 eingetragen.



**Bild 4.1:** Entwicklung der Grundwasserneubildung bei unterschiedlichen Klimaszenarien in Prozent (KLIWA 2023)

Wenige Szenarien gehen von einem drastischen Rückgang aus. Im ungünstigsten Szenario 13 geht die Neubildung im Jahr 2100 auf 75 % gegenüber der Neubildung in den Jahren 1951 bis 2000 zurück. In Szenario 13 ist schon ab ca. 1985 ein vermindertes Neubildungsmittel erkennbar. Dies ist im 30-Jahres-Mittel der Messungen erst später ersichtlich.

Aus der Regionalisierung der zu erwartenden Minderungen wurde für den Bereich des Donaurieds eine Verminderung auf 83-85 % im Zeitraum 2036-2065 gegenüber dem Zeitraum 1991-2020 ermittelt. Um hieraus eine extreme Abfolge von Trockenjahren zu generieren, wurde die statistische Verteilung der historischen Grundwasserneubildung verändert. Dazu wurden die historischen Daten ab 1965 bis 2020 verwendet. Es wurden die Häufigkeiten so angepasst, dass sich eine Reduktion der mittleren Grundwasserneubildung auf 85 % der historischen Datenreihe ergibt (Bild 4.2). In den historischen Daten bis 2020 ist eine Abminderung der Neubildung ab dem Jahr 2000 schon enthalten, die ca. 10 % beträgt. Somit ist die Gesamtminderung der Grundwasserneubildung für den Zeitraum 2020 bis 2050 gegenüber der Zeitreihe 1965-2020 geringer als 85 % und somit als Worst-Case Szenario zu betrachten.



**Bild 4.2:** *Abminderung der historischen Grundwasserneubildung auf 85%*

Eine Anpassung der Neubildung durch eine Umschichtung der Häufigkeitsverteilung hin zu geringeren Raten ist in Bild 4.2 dargestellt. Anhand des angepassten Pools wurden im Berichtszeitraum 2022 mit Hilfe von Zufallszahlen eine große Anzahl von Szenarien generiert. Dann erfolgte eine Auswahl der Szenarien, die zwischen 81 und 75 % der Neubildung gegenüber der Historischen Neubildung (1960 bis 1990) aufweisen. Aus diesem Szenariensensemble werden wiederum die Szenarien gewählt, welche z.B. die niedrigsten 3, 5 oder 10-Jahresmittel am Ende der Zeitperiode in den Jahren 2039 / 2044 bzw. 2047 / 2049 (jeweils inklusive) aufweisen. Die gewählten Szenarien wurden mit dem Grundwassermodell für das Donauried berechnet. Sie stellen eine extreme Abfolge von Trockenjahren dar und somit ergeben sich die niedrigsten Piezometerhöhen am Ende des Jahres 2049.

Der Vorteil dieser Methodik liegt in der Verwendung von historischen Grundwasserneubildungsdaten. Die vorliegenden Daten sind somit realistisch und basieren nicht auf prognostizierten Grundwasserneubildungsjahren. Eine Anwendung dieser Methodik bei anderen Wasserversorgern ist möglich, sofern ein ausreichend lang zurückreichender Datenpool gegeben ist.

#### *4.1.3 Verwendung von Klimaprognosen vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung*

Für die Modellierung der Grundwasserneubildung bei einer Abfolge von extremen Trockenjahren wurde ein weiterer Ansatz erprobt. Dieser basiert auf Klimaprognosen für hydrologische Daten (Niederschlag und potentielle Evapotranspiration), welche vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) Abteilung Mitteldeutsches Klimabüro deutschlandweit mit dem „mesoscale Hydrologic Model“ (mHM) durchgeführt wurden (Boeing et al. 2023). Das mHM wiederum basiert auf Daten von diversen globalen und regionalen Klimamodellen.

Ein Vergleich der aus den UFZ-Daten berechneten Grundwasserneubildung mit den für das Modellgebiet vorhandenen GWN-BW-Daten für den Kalibrierungszeitraum (1986-2005) ergab, dass die UFZ-Daten zu generell niedrigeren Grundwasserneubildungsraten führen, wobei der Unterschied zu der GWN-BW Methodik größer ist als die späteren prognostizierten Klimaänderungssignale.

Somit ist eine Anwendung der deutschlandweit vorhandenen UFZ-Daten auf den hier betrachteten Modellraum zur Erzeugung von Extremereignissen nicht ohne weiteres möglich. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

#### 4.1.4 Ergebnisse

Für die Berechnung der Piezometerhöhen im Gesamteinzugsgebiet des Donaurieds mit dem Grundwassermodell wurden die oben beschriebenen Szenarien (niedrigste 3, 5 und 10 Jahresmittel der Grundwasserneubildung bezogen auf den Prognosezeitpunkt 2049) verwendet. Die Prognose beginnt am 1.1.2020. Ab dem Jahr 2022 wurde ein zusätzliches Szenario mit extremer Entnahme an den Fassungen der LW am Donauried angesetzt.

In Bild 4.3 ist beispielhaft an einer fassungsnahe Messstelle die Entwicklung des Grundwasserstands bis zum Jahr 2050 für die Extremszenarien (Grundwasserneubildung) und das Szenario mit der Extrementnahme dargestellt. Alle Ganglinien zeigen einen jahreszeitlichen Verlauf mit Neubildung im Winterhalbjahr bzw. im Frühjahr/Frühsummer. Dargestellt sind:

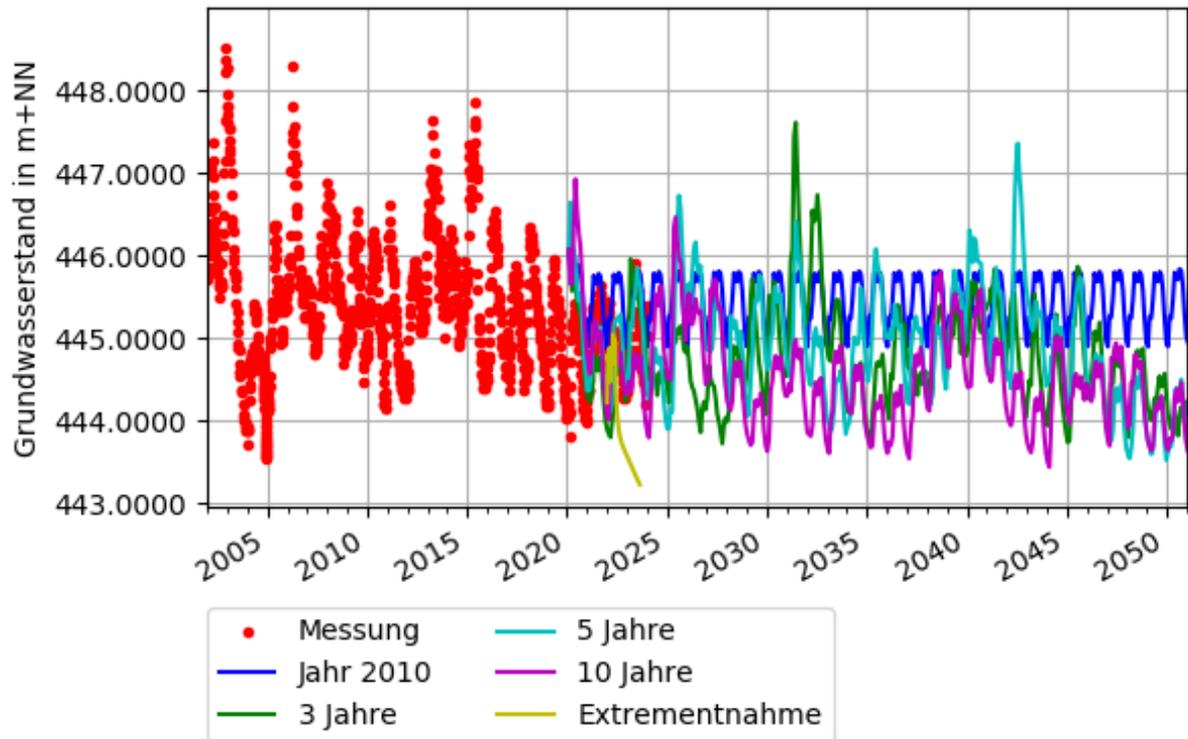
- Messwerte (rot)
- Wiederholende Berechnung für die Grundwasserneubildung im Jahr 2010, welche der mittleren Grundwasserneubildung entspricht (dunkelblau)
- Extremszenario 3 Jahre, extrem niedrige Neubildung in den letzten 3 Jahren (grün)
- Extremszenario 5 Jahre, extrem niedrige Neubildung in den letzten 5 Jahren (türkis)
- Extremszenario 10 Jahre, extrem niedrige Neubildung in den letzten 10 Jahren (violett)
- Extrementnahme ohne Grundwasserneubildung, maximale Raten über 1,5 Jahre (hellgrün)

Generell sind im Bereich des Donaurieds die Schwankungsbreiten an den einzelnen Grundwassermessstellen gut abgebildet. Die sich wiederholende Amplitude für die Testrechnungen für das Jahr 2010 hat eine etwas geringere Amplitude als die Messwerte, die konstante Höhenlage zeigt allerdings, dass die Neubildung wirklich mittlere Verhältnisse abbildet.

Die Ausschläge in den extremen Nass- und Trockenjahren bilden den gesamten Bereich der gemessenen Werte ab außer den sehr hohen Grundwasserständen am Anfang der 2000er-Jahre. Hier fehlen aufgrund der ausgewählten Szenarien mit insgesamt geringer Grundwasserneubildung aufeinanderfolgende Nassjahre, so dass die Piezometerhöhen generell tiefer liegen. Die tiefen Piezometerhöhen werden dagegen gut abgebildet und zeigen aufgrund aufeinanderfolgender Trockenjahre auch lange Perioden mit tiefen Grundwasserständen.

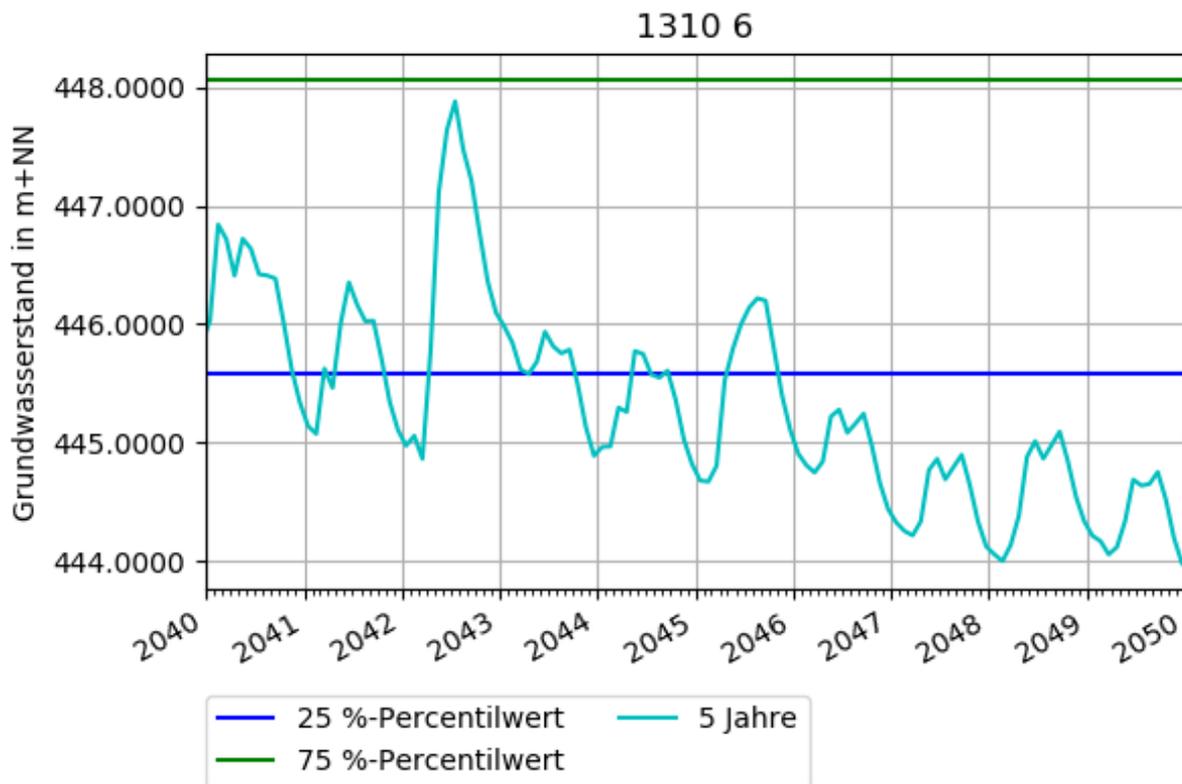
Die in hellgrün eingetragene Ganglinie („Extrementnahme“) für die Rechnung, in der die Brunnen im Donauried mit maximalen Entnahmen betrieben werden und die Entnahme erst

reduziert wird, wenn die berechnete Piezometerhöhe in der Heberanlage unter einen definierten Wert fällt, zeigen extrem tiefe Wasserstände, die so im Donauried noch nie gemessen wurden. Dies liegt daran, dass für dieses Szenario über 21 Monate keine Neubildung angesetzt wurde und die Entnahmen so groß wie möglich gewählt wurden.



**Bild 4.3:** Berechnungsergebnisse mit dem Grundwassermodell auf Basis der Realisationen mit endbetonter niedriger Grundwasserneubildung in den letzten 3, 5, 10 Jahren. Die Bedingungen im Jahr 2010 dienen als Referenz

Bild 4.4 zeigt die letzten 10 des Szenarios „5 Jahre“ für die in der Nähe von Fassung 1 gelegene Messstelle 1310. Die blaue und grüne Linie zeigen die 25 bzw. 75 % Perzentile der gemessenen Grundwasserstände an dieser Messstelle. Durch diese mit dem Grundwassermodell generierten Zeitreihen liegen Zustände vor, welche ein deutliches Absinken der Grundwasserstände auch unter den bisher gemessenen Bereich enthalten. Sie können für das Training der künstlichen neuronalen Netze der einzelnen Fassungen im Donauried in AP3 herangezogen werden.



**Bild 4.4:** Berechnungsergebnisse mit dem Grundwassermodell auf Basis der Realisationen mit endbetonter niedriger Grundwasserneubildung in den letzten 3, 5, 10 Jahren. Die Bedingungen im Jahr 2010 dienen als Referenz.

### Fazit Modellierung Grundwasserneubildung bei Extremjahren in Folge

**Einsatzgebiet:** Wasserwerken ist aus ihren Praxiserfahrungen bekannt, welche Rohwassermengen verfügbar sind wenn sich Trockenjahre und niederschlagsreiche Jahre abwechseln. Mit der in TrinkXtrem entwickelten Methodik können Wasserversorger anschaulich abschätzen, wie sich mehrere Trockenjahre in Folge auf ihr Rohwasserangebot auswirken würden. Dies trägt dazu bei, standortangepasste Entscheidungen zum Ausbau der Resilienz für die Wasserversorgung unter Extrembedingungen zu treffen.

**Merkmale:** Der hier verwendete Modellansatz erfordert den Einsatz eines kalibrierten Grundwassermodells mit instationärem Grundwasserneubildungsansatz, der auf einem Bodenwasserhaushaltsmodell basiert. Dies ermöglicht über statistische Verfahren extreme Niedrigwassersituationen mit mehrjährigen geringen Grundwasserständen in der Zukunft abzuschätzen und so der Wasserversorgung die Basis für Handlungsempfehlungen bereit zu stellen.

## **4.2 Verbesserung der Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen**

### *4.2.1 Einführung*

Angesichts des globalen Klimawandels und weiterer zunehmender anthropogener Einflüsse stellt ein effizientes Management der zur Verfügung stehenden Grundwasserressourcen eine drängende Herausforderung dar. In diesem Kontext stellt sich die Frage, inwiefern die Kalibrierung von Grundwassermodellen verbessert werden kann und ob das Verhalten von Grundwassersystemen durch Anpassungen von Modellparametern speziell für Extremereignisse besser vorhergesagt werden kann.

Für die Durchführung der Arbeiten wurde exemplarisch das numerische Grundwassermodell für das Donauried (Kapitel 3.6) verwendet, wobei die in Kapitel 4.2.2 aufgezeigte Methodik zur Verbesserung der Prognosefähigkeit auch auf andere Grundwassermodelle übertragbar ist.

### *4.2.2 Methodik zur Verbesserung der Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen*

Das Donauried-Modell basiert auf dem Grundwassersimulationsprogramm MODFLOW 6 (Emmert et al., 2000, Lang et al., 2020), das von der United States Geological Survey zur Verfügung gestellt wird (Langevin et al., 2017, Langevin et al., 2024). Für eine strukturierte und wissenschaftlich fundierte Untersuchung und Anpassung der Modellparameter wird die Software PESTPP verwendet (White et al., 2020).

Im ersten Schritt wird mit dem Modul PESTPP-SEN eine globale Sensitivitätsanalyse (GSA) durchgeführt. Die GSA zielt darauf ab, den Einfluss von Modellparametern auf die Modellausgabe über einen vorgegebenen Modellparameterbereich hinweg zu bewerten. Durch systematische Variation der Eingabeparameter quantifiziert PESTPP-SEN die Sensitivität der Modellausgabe auf Änderungen der Modellparameter und ermöglicht es, die Modellparameter mit dem größten Einfluss auf das Verhalten des Modells zu identifizieren. Dies liefert Erkenntnisse, welche Modellparameter im Rahmen der Modellkalibrierung als variable Freiheitsgrade dienen sollten.

PESTPP-GLM ist auf die Kalibrierung und Optimierung von Modellen mithilfe des Gauss-Levenberg-Marquardt-Algorithmus (GLM-Algorithmus) spezialisiert. Der GLM-Algorithmus passt die Modellparameter iterativ an, um die Abweichung zwischen beobachteten und si-

mulierten Daten zu minimieren und somit die Vorhersagefähigkeit des Modells zu optimieren. Durch die Anpassung an beobachtete Daten verbessert PESTPP-GLM Modellparameterwerte und steigert die Prognosefähigkeit des Modells. Dieser Prozess ermöglicht es, reale Szenarien zu simulieren und Entscheidungsprozesse im Zusammenhang mit der Bewirtschaftung der Grundwasserressource Donauried zu unterstützen.

Sowohl bei der GSA als auch bei der Modellkalibrierung wird die Zielfunktion  $\Phi$  mit der folgenden Gleichung ausgewertet:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n (w_i (s_i - m_i))^2$$

Hierbei beschreibt  $w_i$  die Gewichtung,  $s_i$  den Simulationswert und  $m_i$  den Messwert der Beobachtung  $i$  bei insgesamt  $n$  Beobachtungen. Um den Einfluss aller Beobachtungen gleich zu behandeln, wird  $w_i = 1 \forall i$  festgelegt.

Das numerische Grundwassermodell für das Donauried enthält insgesamt acht Modellschichten. In jeder dieser Modellschichten werden die Modellparameter horizontale hydraulische Durchlässigkeit, vertikale hydraulische Durchlässigkeit, spezifischer Speicherkoeffizient und nutzbare Porosität festgelegt, wobei auch innerhalb der jeweiligen Modellschichten eine räumliche Differenzierung der Werte der Modellparameter möglich ist.

Bei der GSA und der Modellkalibrierung werden die Werte der Modellparameter innerhalb einer Modellschicht jeweils gemeinsam um den gleichen Faktor verändert. Dementsprechend bleibt innerhalb einer Modellschicht das Verhältnis der Modellparameterwerte untereinander immer konstant. Auf diese Weise reduziert sich der Rechenaufwand für die GSA und die Modellkalibrierung. Außerdem werden im Modell vorhandene Gebietsstrukturen und somit das integrierte Expertenwissen beibehalten.

Da das Trockenjahr 2018 eine extreme Stresssituation für die Grundwasserressource Donauried, und damit für die LW, war (Haakh, 2019), wurde der Sommer 2018 als Bezugszeitraum für die GSA und die Modellkalibrierung ausgewählt.

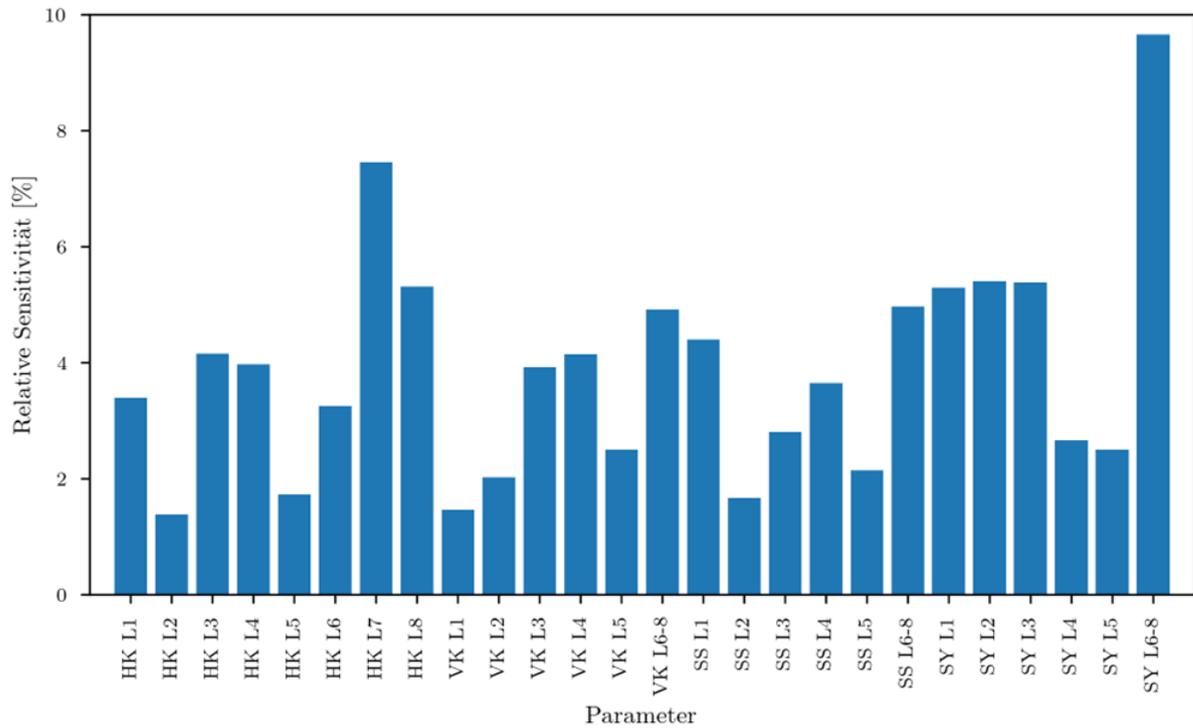
Sowohl bei der GSA als auch bei der Modellkalibrierung ist zu beachten, dass sich eine Änderung der Modellparameter auf den Anfangszustand bei der Simulation auswirkt. Theoretisch müsste für jeden untersuchten Parametersatz der jeweilige Anfangszustand simuliert werden, was jedoch zu rechenintensiv wäre. Die Dauer, während der die Modellausgabe von einer falschen Anfangsbedingung beeinflusst wird, lässt sich analytisch berechnen (Reilly, 2004). Außerdem nimmt der durch eine falsche Anfangsbedingung verursachte Fehler mit der Zeit etwa exponentiell ab. Mit diesem Wissen kann der Einfluss einer falschen

Anfangsbedingung abgeschätzt und die Modellausgabe für die jeweils korrekte Anfangsbedingung approximiert werden.

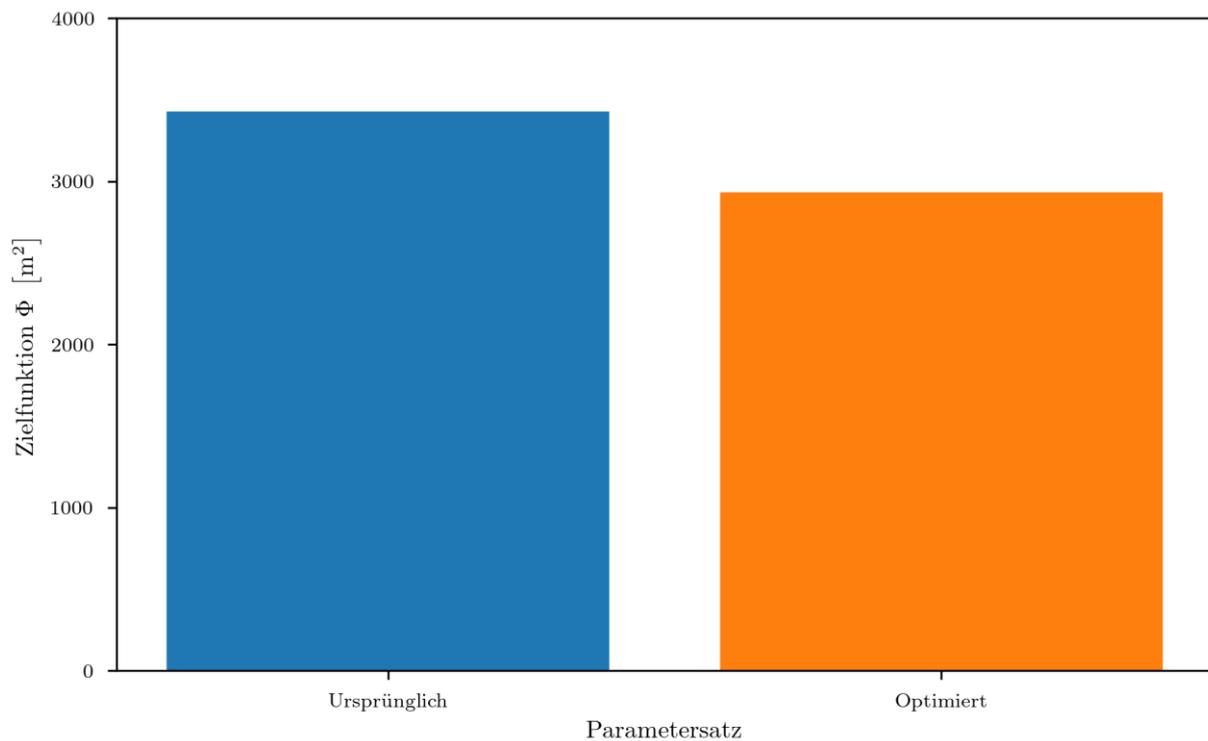
#### 4.2.3 *Ergebnisse der globalen Sensitivitätsanalyse und Modellkalibrierung*

Bei der GSA wird der Einfluss der Modellparameter horizontale hydraulische Durchlässigkeit (HK), vertikale hydraulische Durchlässigkeit (VK), spezifischer Speicherkoeffizient (SS) und nutzbare Porosität (SY) in den acht Modellschichten Torf (L1), Trennschicht unter Torf (L2), Kies (L3), Molasse (L4), Zementmergel (L5) und Karst (L6, L7, L8) auf die Modellausgabe untersucht. Die relative Sensitivität der Modellausgabe auf Veränderungen der untersuchten Modellparameter ist in Bild 4.5 zu sehen. Besonders sensitiv reagiert die Modellausgabe auf Änderungen bei der nutzbaren Porosität in den Karstschichten (SY L6-L8), gefolgt von Änderungen bei der horizontalen hydraulischen Durchlässigkeit in der Karstschicht 7 (HK L7).

Zur Bewertung der Kalibrierung des Grundwassermodells Donauried wird die Zielfunktion  $\Phi$  herangezogen. Bild 4.6 zeigt den Wert der Zielfunktion  $\Phi$  bei der Simulation des Zeitraums 01.06.2018 bis 31.07.2018 mit dem ursprünglichen und dem optimierten Parametersatz bei approximiertem Anfangszustand.



**Bild 4.5:** Relative Sensitivität der Modellausgabe auf eine Veränderung der Modellparameter horizontale hydraulische Durchlässigkeit (HK), vertikale hydraulische Durchlässigkeit (VK), spezifischer Speicherkoeffizient (SS) und nutzbare Porosität (SY) in den acht Modellschichten



**Bild 4.6:** Wert der Zielfunktion  $\Phi$  im Zeitraum 01.06.2018 bis 31.07.2018 mit dem ursprünglichen und dem optimierten Parametersatz

#### 4.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Das numerische Grundwassermodell Donauried reagiert besonders sensitiv auf Parameteränderungen bei der nutzbaren Porosität in den Karstschichten (SY L6-L8) und der Kiesschicht (SY L3). Diese Erkenntnis ist dadurch erklärbar, dass die nutzbare Porosität bedeutend für den Wasserstand und die Wasserentnahme in den Brunnen ist und sich die Entnahmebrunnen sowie zahlreiche Beobachtungspunkte in der Kiesschicht bzw. den Karstschichten befinden.

Die horizontalen hydraulischen Durchlässigkeiten in den Karstschichten (HK L6, L7, L8) sind ebenfalls sensitiv. Im Karstgrundwasserleiter fließt das auf der Schwäbischen Alb gebildete Grundwasser in Richtung Donauried, was dessen Bedeutung beim Zustrom in den Kiesgrundwasserleiter und damit zu den Entnahmebrunnen im Donauried erklärt.

Bei der Modellkalibrierung im Zeitraum 01.06.2018 bis 31.07.2018 wird der jeweilige Anfangszustand approximiert, um mit vertretbarem Rechenaufwand den Einfluss von Parameteränderungen zu berücksichtigen. Während der Modellkalibrierung reduziert sich der Wert der Zielfunktion  $\Phi$  für den betrachteten Zeitraum unter Berücksichtigung der vorgegebenen Beobachtungspunkte von 3.429 m<sup>2</sup> auf 2.934 m<sup>2</sup>, also auf 85,6 % des Ausgangswerts (Bild 4.6). Mit dem optimierten Parametersatz wird für den Kalibrierungszeitraum 01.06.2018 bis 31.07.2018 also eine bessere Übereinstimmung zwischen Messwerten und Simulationsdaten erreicht.

Das numerische Grundwassermodell für das Donauried ist im Hinblick auf eine effiziente Bewirtschaftung dieser Ressource ein wichtiges Werkzeug. Durch die langjährige Weiterentwicklung des numerischen Grundwassermodells Donauried besitzt dieses bereits eine gute Prognosefähigkeit.

Mit der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Methodik kann die gute Modellkalibrierung bestehender Grundwassermodelle nochmals verbessert werden, um u.a. die Auswirkungen von Extremereignisse zuverlässiger zu prognostizieren.

## Fazit Verbesserung der Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen

**Einsatzgebiet:** Mit der in TrinkXtrem eingesetzten Methodik kann die Kalibrierung eines bestehenden Grundwassermodells weiter verbessert werden. Dadurch können die Auswirkungen von Extremereignissen zuverlässiger prognostiziert werden.

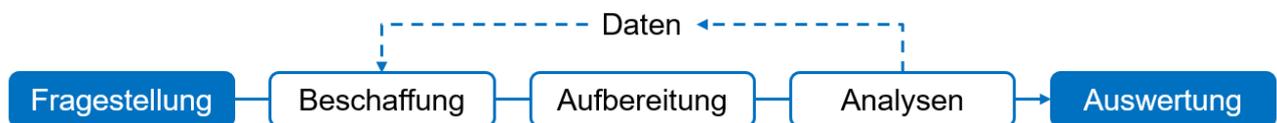
**Merkmale:** Die Methodik basiert auf einer globalen Sensitivitätsanalyse (GSA). Die GSA bewertet den Einfluss von Modellparametern auf die Modellausgabe über einen vorgegebenen Modellparameterbereich hinweg. Durch systematische Variation der Eingabeparameter wird die Sensitivität der Modellausgabe auf Änderungen der Modellparameter geprüft. Damit können die Parameter mit dem größten Einfluss auf das Verhalten des Modells identifiziert und anschließend bei der Modellkalibrierung optimiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass sich eine Änderung der Modellparameter auf den Anfangszustand bei der Simulation auswirkt.

## 5 Wasserressourcen - Qualität

### 5.1 Rohwasserbeschaffungsprognose

Mit Hilfe des Data Minings von Wasserqualitätsdaten können Wasserversorgungsunternehmen ihren Datenpool von Betriebsanalysen umfangreicher als bisher nutzen. Zunächst muss jedoch definiert werden, was Data Mining bedeutet, wozu es angewendet wird und wie es schließlich praktisch durchgeführt wird. Dies soll im Folgenden am Beispiel von Daten der LW zur Rohwasserqualität der Donau erfolgen.

Data Mining beinhaltet die Identifizierung von Mustern und Informationen aus Daten. Am Anfang des Data Mining Prozesses steht immer eine spezifische Fragestellung, zum Beispiel welche Faktoren einen Einfluss auf eine bestimmte Zielgröße oder die Vorhersage einer Zielgröße. Der Data Mining Prozess ist vereinfacht in Bild 5.1 dargestellt.

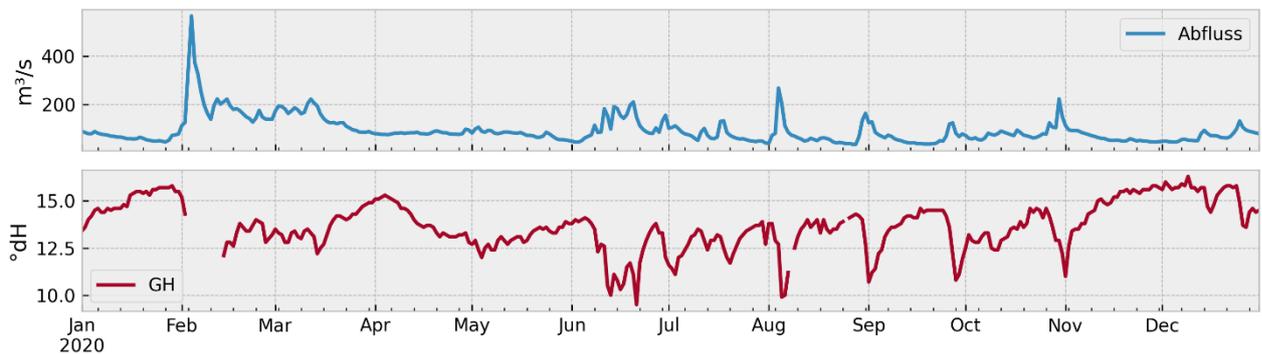


**Bild 5.1: Data Mining Prozess**

Die LW bereitet Donau- und Grundwasser zu Trinkwasser auf. Für die Wasseraufbereitung ist somit von Interesse, welche Faktoren einen Einfluss auf die Gesamthärte des Donauwassers besitzen und ob es möglich ist, Änderungen der Härte in der Donau vorherzusagen. Da das Trinkwasser eine Härte von 14 °dH nicht überschreiten soll, würde eine Vorhersage der Härte in der Donau die Steuerung und Betriebsoptimierung im Wasserwerk erleichtern.

Für ein Data-Mining wurden von der LW langjährige Zeitreihen der Wasserqualität der Donau zur Verfügung gestellt (zum Teil von 1975 bis heute). Weitere Daten, wie Klimadaten und Abflussmengen der Donau wurden aus entsprechenden Datenbanken abgefragt. Nach der Datenbeschaffung erfolgte deren Aufbereitung, was die Plausibilisierung, die Entfernung von Ausreißern und die Bearbeitung von Fehlstellen beinhaltet.

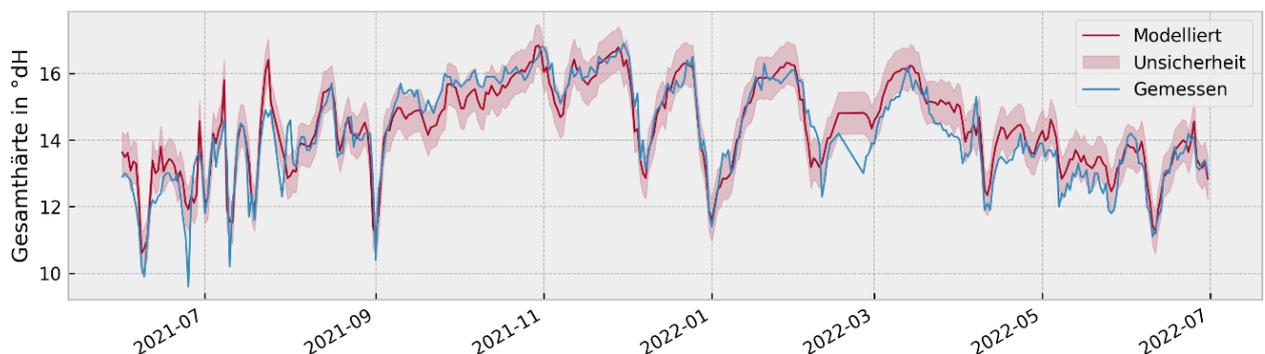
Das Data-Ming beginnt mit einer explorativen Datenanalyse. Sie dient dazu, sich einen Überblick über die Daten und mögliche Zusammenhänge zu verschaffen. Am Beispiel von Bild 5.2 wird deutlich, dass die Härte mit einer gewissen Zeitverzögerung von wenigen Tagen mit dem Abfluss der Donau korreliert.



**Bild 5.2: Explorative Datenanalyse am Beispiel von Abfluss und Härte der Donau bei Leipzig**

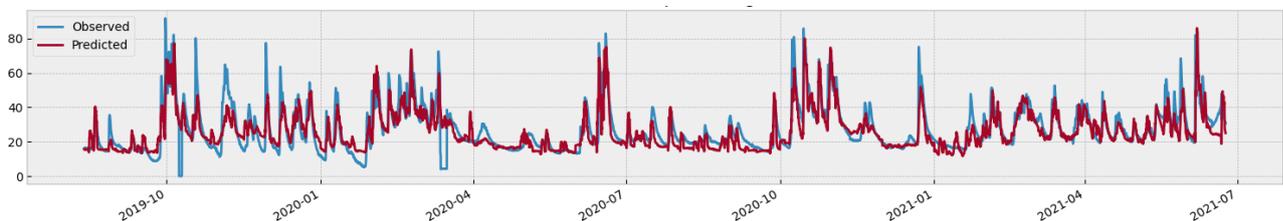
Für die Härteprognose ist daher die Vorhersage des Abflussgeschehens von großer Bedeutung. Dafür wurde das obere Einzugsgebiet der Donau (Einzugsgebiet oberhalb von Leipzig) betrachtet. Hierzu wurden insgesamt 36 Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes einbezogen und die Temperatur- und Niederschlagsdaten analysiert. Im Ergebnis entstand ein Vorhersagemodell, das mit einem mittleren Vorhersagefehler von 0,5 °dH eine sehr hohe Genauigkeit besitzt. In Bild 5.3 sind die Modellergebnisse einem unabhängigen Testzeitraum, der nicht für die Erstellung des Modells verwendet wurde, gegenüber gestellt.

Der letzte Schritt des Data-Mining-Prozess ist die Auswertung, bei dem alle Ergebnisse auf ihr Plausibilität geprüft werden. Dazu gehört auch die Analyse des Prognosemodells und die Bewertung der Einflussfaktoren, die das Modell für Prognosen verwendet. In diesem Fall konnten bestimmte Klimastationen und die Iller, als bedeutsamer Nebenfluss der Donau, als wichtige Einflussgrößen identifiziert und plausibilisiert werden.

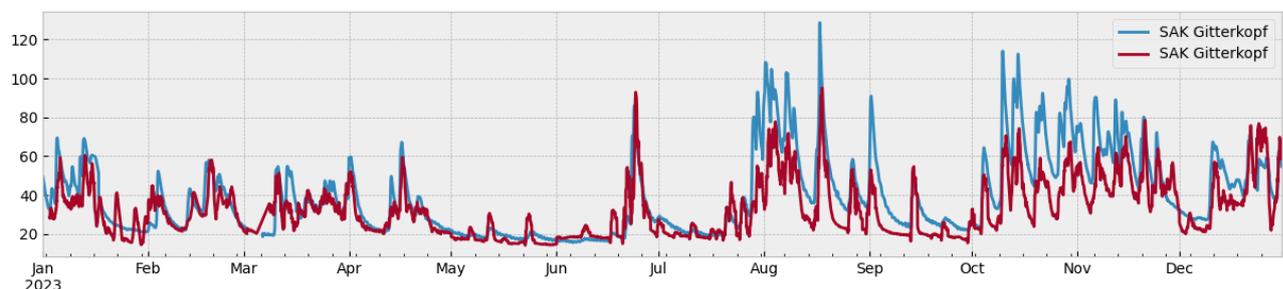


**Bild 5.3: Gemessene und modellierte Gesamthärte des Donaurohwassers bei Leipzig**

Neben den Anwendungsfall Donau soll im Folgenden noch das Beispiel der Eckertalsperre des Wasserversorgungsunternehmens Harzwasserwerke dargestellt werden. Die Rohwasserqualität im Wasserwerk ist abhängig vom Zuflussgeschehen im Einzugsgebiet der Talsperre. Eine wichtige Steuergröße für die Wasseraufbereitung ist der spektrale Absorptionskoeffizient bei 254 nm ( $SAK_{254}$ ). Der  $SAK_{254}$  wird im Zulauf der Eckertalsperre online gemessen. Die Fragestellung im Projekt war, ob es möglich ist den  $SAK$  in Zufluss auf Basis vom Wettergeschehen vorherzusagen. Wichtige Einflussgrößen für das Modell sind der Abfluss der vergangenen Tage, die Temperatur und der Niederschlag. Für jede Prognose werden hierzu der Abfluss der letzten Tage und der erfasste Niederschlag berücksichtigt. Für mehrtägige Prognose werden Wettervorhersagen hinzugezogen. Die Ergebnisse in Bild 5.4 und Bild 5.5 zeigen für den Trainings- und für den Testzeitraum jeweils den beobachteten und den prognostizierten Verlauf des  $SAK_{254}$  im Rohwasser. Im Trainingszeitraum gelang es, die gemessenen  $SAK_{254}$ -Werte gut mit den Algorithmen zu beschreiben. Im Testzeitraum wurden die Zeitpunkte für Extremereignisse zwar genau prognostiziert. Allerdings wurde bei verschiedenen Extremereignissen die Höhe der  $SAK_{254}$ -Werte in der Prognose unterschätzt. Mit zunehmender Anzahl an Trainingsdaten sollte künftig auch die Höhe der  $SAK_{254}$ -Werte genauer prognostizierbar sein.



**Bild 5.4: Modellierter (rot) und gemessener (blau)  $SAK_{254}$  (in 1/m) für den Trainingszeitraum.**



**Bild 5.5: Modellierter (rot) und gemessener (blau)  $SAK_{254}$  (in 1/m) für den Testzeitraum.**

## Fazit Explorative Analyse von Qualitätsdaten

**Einsatzgebiet:** Mit Data Mining von Wasserqualitätsdaten aus der Betriebsüberwachung können Wasserversorgungsunternehmen ihren Datenpool umfangreicher als bisher nutzen.

**Merkmale:** Am Beispiel von Betriebsdaten der Landeswasserversorgung zur Beschaffenheit der Donau wurde Data-Mining dazu verwendet, um relevante Muster und Erkenntnisse in den Datensätzen zu identifizieren. In Verbindung mit langjährigen Daten des Deutschen Wetterdienstes entstand daraus u.a. ein Prognosemodell, welches für den Zeitraum von Tagen die Härte im Donauwasser vorhersagen kann.

## 5.2 Auswirkungen von Extremereignissen auf die ökotoxikologischen Eigenschaften von Rohwässern

### 5.2.1 Einführung

Im Rahmen des qualitativen Rohwassermanagements wird der bisher nur selten berücksichtigte Aspekt der toxikologischen Belastung ermittelt. Dabei werden die Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf die toxikologischen Belastungen von Rohwässern mittels wirkungsbezogener Analytik (WBA) näher untersucht. Die zu überprüfende Hypothese lautet: Je niedriger die Abflüsse in Fließgewässern oder die Füllstände in Talsperren sind, desto höher sind die toxikologischen Belastungen.

### 5.2.2 Standorte und Probenahme

Für das Monitoring von toxikologischen Belastungen in Rohwässern bei Extremwetterereignissen wurden verschiedene Rohwasserarten ausgewählt, um möglichst ein gutes Abbild der Rohwasservielfalt in Deutschland zu schaffen. Dementsprechend wurden drei Flusswässer, zwei Uferfiltrate sowie zwei Talsperren mit den jeweiligen Zuläufen beprobt und analysiert. Zusätzlich wurde als exemplarischer Vergleich ein Grundwasser mituntersucht.

Die Entnahme der Gewässerproben sollte bei möglichst extremen Ereignissen erfolgen. Der Normalzustand diene als Vergleich. Als Kriterien wurden der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ), der mittlere Abfluss (MQ) sowie der mittlere Hochwasserabfluss (MHQ) der jeweiligen Flüsse herangezogen (Tabelle 5.1). Die Probenahme des Grundwassers, der Uferfiltrate sowie der Talsperren orientierte sich an den Probenahmen der jeweiligen Flüsse.

**Tabelle 5.1: Kriterien für die Probenahme von Flusswässern**

Fluss	Abfluss in m <sup>3</sup> /s		
	MNQ	MQ	MHQ
1	117	333	1.410
2	718	1.427	3.520
3	45	123	579

MNQ: Mittlerer Niedrigwasserabfluss

MQ: Mittlerer Abfluss

MHQ: Mittlerer Hochwasserabfluss

Bei den Uferfiltraten wurde die typische Fließzeit zwischen Fluss und jeweiligem Brunnen berücksichtigt und die entsprechenden Abflussraten zur Einordnung der jeweiligen Probenahme herangezogen. Bei Uferfiltrat 1 beträgt die Verzugszeit etwa 5 Monate bis 7 Monate und bei Uferfiltrat 2 etwa 30 Tage bis 60 Tage. Für das wirkungsbezogene Monitoring der Extremzustände wurden im Rahmen des Projektes sieben Probenahme-Kampagnen mit insgesamt 58 Probenahmen durchgeführt. Im Anhang 13.2.1 ist die Übersicht über die durchgeführten Probenahme-Kampagnen sowie die chemischen Metainformationen aller Wasserproben aufgeführt.

### 5.2.3 *Wirkungsbezogene Analytik*

Die WBA ermöglicht die Bestimmung der toxischen Wirkung der Spurenstoffe im Wasser. Es handelt sich um ein Analyseverfahren, das eine Kombination aus Fraktionierung, Bioassay und chemischer Analytik darstellt (Schulz et al., 2019).

Im Projekt wurde für die Fraktionierung der Substanzen die Hochleistungsdünnschichtchromatographie (HPTLC) eingesetzt, die eine Trennung der in der Probe vorliegenden Substanzen auf der Platte ermöglicht. Dabei werden die Stoffe nach ihrer Polarität getrennt und auf ihre Wirkung untersucht. Die Anwendung der WBA auf der HPTLC-Platte ermöglicht eine sensitive Beurteilung der toxikologischen Wasserbeschaffenheit, mit der auffällige Wirkungen frühzeitig erkannt werden können. So kann die WBA-Analytik als wirksames Instrument des Risikomanagements eingesetzt werden und stellt eine gute Ergänzung zur chemischen Analytik dar (Schulz et al., 2019).

### 5.2.4 *Biotestbatterie*

Bei der WBA in Kombination mit HPTLC werden bereits verschiedene Bioassays eingesetzt. Die Biotests ermöglichen die Untersuchung auf verschiedene Endpunkte. Es kommen dabei biologische Organismen wie Bakterien und Hefen sowie Enzyme zum Einsatz. Die Analytik ermöglicht die Ermittlung von beispielsweise basistoxischen, neurotoxischen und gentoxischen Wirkungen sowie die Detektion von östrogenen und androgenen Effekten (Schulz et al., 2019; Kienle et al., 2015). Die Biotestbatterie, die für das Monitoring der wirkungsbezogenen Rohwasserqualität eingesetzt wurde, ist in Tabelle 5.2 aufgeführt.

**Tabelle 5.2: Angewendete Biotestbatterie zum Monitoring der Rohwasserqualität**

Endpunkt	Biotest	Nachweis	Referenzsubstanz
Basistoxizität	AF	Hemmung der Biolumineszenz	Bromoxynil
Zytotoxizität	BS	Hemmung des Stoffwechsels	Sodiumdodecyl-benzene sulfonate
Neurotoxizität	AChE	Hemmung des Enzyms Acetylcholinesterase	Coffein, Paraoxon-ethyl, Theobromin
Östrogene Wirkung	YES	Aktivierung des humanen Östrogenrezeptors	17 $\beta$ -Estradiol

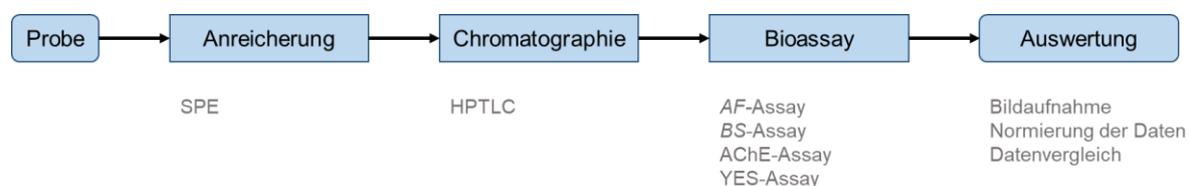
AF: *Aliivibrio fischeri* Hemmtest

BS: *Bacillus subtilis* Hemmtest

AChE: Acetylcholinesterase Hemmtest

YES: Yeast Estrogen Screen

Das Analyseverfahren der WBA mittels HPTLC unterteilt sich in vier aufeinanderfolgende Schritte, die in Bild 5.6 dargestellt sind.



SPE: Festphasenextraktion

HPTLC: Hochleistungsdünnschichtchromatographie

AF-Assay: *Aliivibrio fischeri* Hemmtest

BS-Assay: *Bacillus subtilis* Hemmtest

AChE-Assay: Acetylcholinesterase Hemmtest

YES-Assay: Yeast Estrogen Screen Test

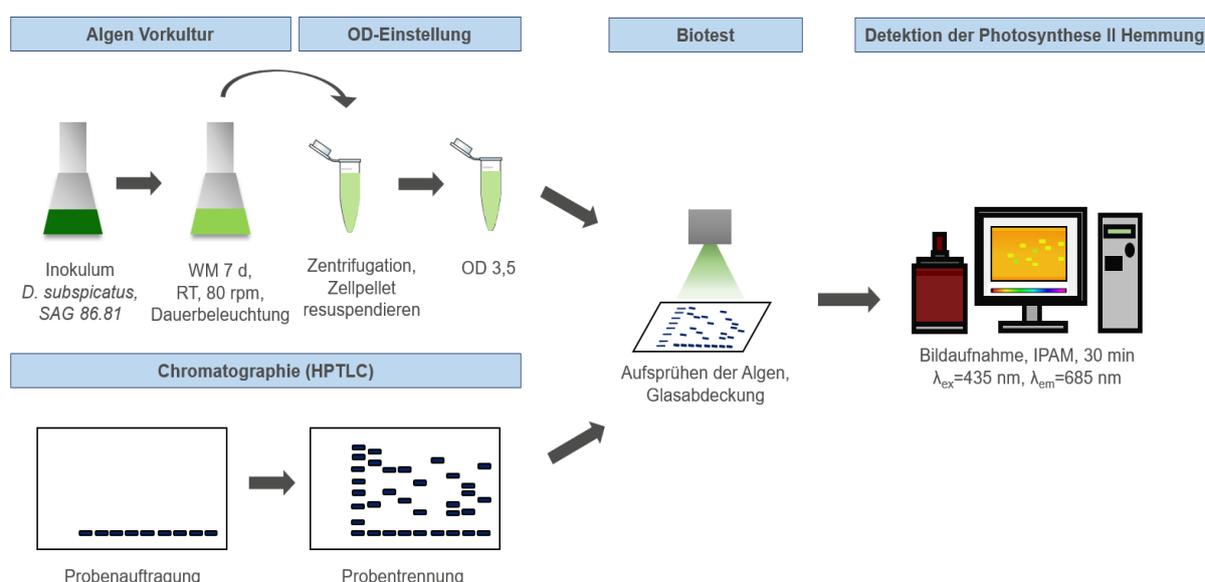
**Bild 5.6: Arbeitsschritte der wirkungsbezogenen Analytik**

Im ersten Schritt ist eine Anreicherung der Proben erforderlich, um eine ausreichend hohe Empfindlichkeit zu erreichen. Hierzu werden die Proben mittels Festphasenextraktion (SPE) angereichert. Die Substanzen in den Probenextrakten werden auf eine HPTLC-Platte aufgetragen und anschließend mittels HPTLC getrennt. Nach der Trennung findet im dritten Schritt die eigentliche Detektion mittels Bioassay statt, wobei die Wirkungen erfasst werden. Zum Schluss erfolgt die Auswertung der Bilder und Daten.

### 5.2.5 Phytotoxizität als neuer Endpunkt

Der großflächige Einsatz von Pflanzenschutzmitteln stellt ein Risiko für die Umwelt dar. Häufig werden Rückstände von Herbiziden in Oberflächengewässern nachgewiesen, die eine Gefährdung der Umwelt und des Rohwassers darstellen können. Starke Regenereignisse sowie Flutkatastrophen erhöhen die Wahrscheinlichkeit des Eintrags dieser Stoffe in die Umwelt.

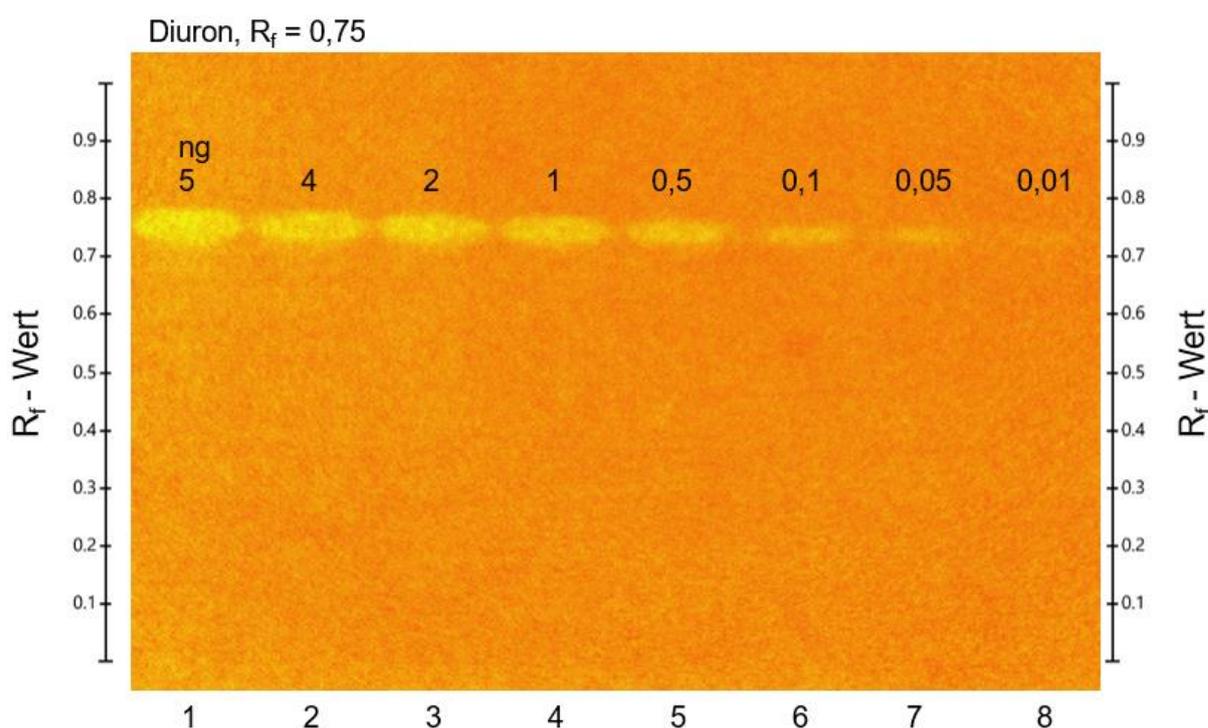
Im Rahmen des Projektes wurde deshalb die bestehende Biotestbatterie um den Endpunkt Phytotoxizität erweitert. Der Biotest beruht auf dem Nachweis von Herbiziden, die häufig die Hemmung der Photosynthese II (PS II) auslösen. Für den Assay wurde als Testorganismus die Grünalge *Desmodesmus subspicatus* (DS) eingesetzt. Die Durchführung des DS-Assays ist in Bild 5.7 dargestellt.



WM: Wachstumsmedium  
 OD: Optische Dichte  
 HPTLC: Hochleistungsdünnschichtchromatographie

**Bild 5.7 Durchführung des DS Assays**

Die Abschätzung der Nachweisgrenze erfolgte mit dem Herbizid Diuron als Modellanalyt. In Bild 5.8 ist die Kalibrierung von Diuron aufgeführt.



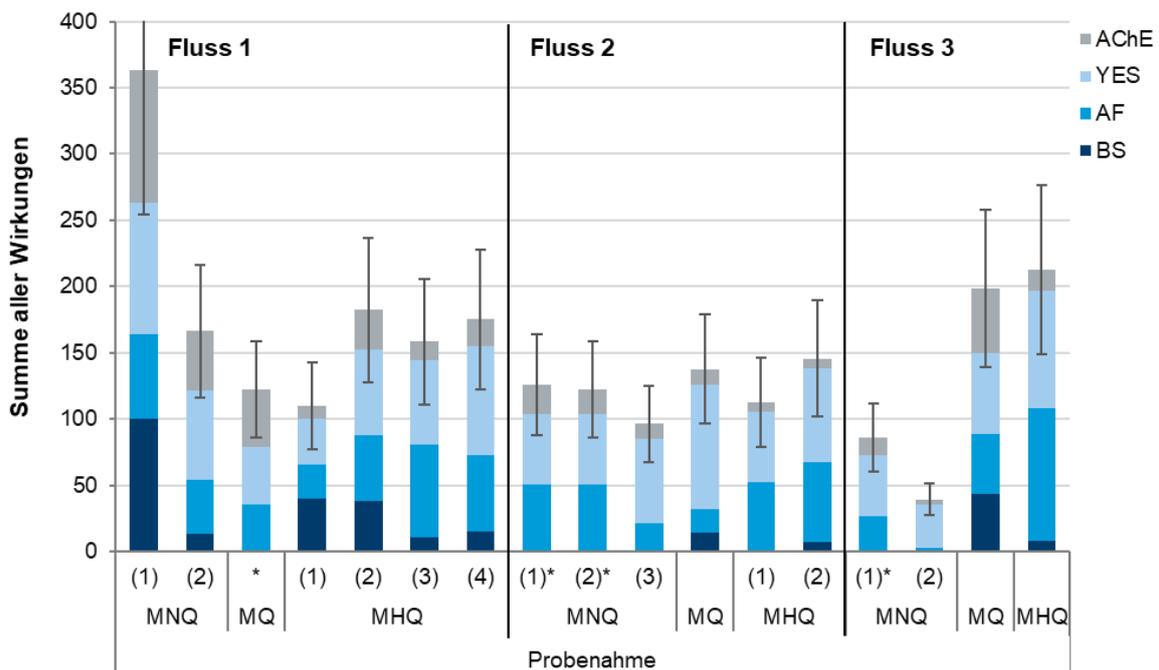
**Bild 5.8:** Dosis-Wirkungsbeziehung des Modellanalyten Diuron nach chromatographischer Trennung auf einer HPTLC-Platte (Aufzeichnung mit IPAM-Fluorometer nach 20 Sättigungsimpulsen (30 min))

Aus der Dosis-Wirkungsbeziehung wurde eine Nachweisgrenze von 50 pg absolut auf der HPTLC-Platte abgeschätzt. Bei einer angenommenen Wiederfindungsrate von 100 % und einem Anreicherungsfaktor von 1000 ergibt sich eine nachweisbare Konzentration von 1 ng/L in Wasserproben. In der Studie von Riegraf wurde die Nachweisgrenze für Diuron mit  $21,6 \pm 5,6$  pg bestimmt (Riegraf et al, 2019). Für beide Methoden liegen die Nachweisgrenzen im ähnlichen Größenbereich. Durch die hohe Empfindlichkeit des Assays ist es möglich, die Untersuchungen in den sehr niedrigeren Konzentrationsbereichen für Spurenstoffe durchzuführen. Damit ist der *DS* Assay ein sehr sensibler Biotest für die WBA.

### 5.2.6 Vergleich der Rohwasserqualität

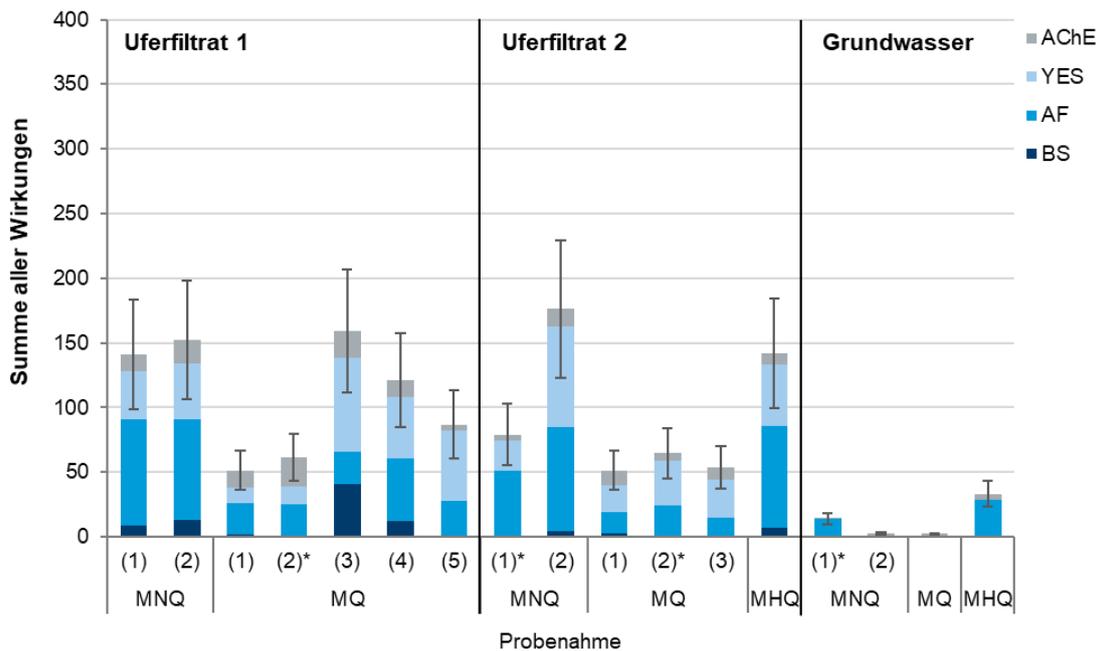
Rohwasser bei niedrigem (MNQ), normalem (MQ) sowie bei hohem (MHQ) Abfluss wurden mit Hilfe der WBA hinsichtlich der toxikologischen Belastung verglichen. Zudem wurden die Ergebnisse der wirkungsbezogenen Untersuchungen mit ausgewählten basischemischen Parametern verglichen und auf Korrelation geprüft.

Die Ergebnisse der wirkungsbezogenen Untersuchung sind in Bild 5.9 (Flusswässer), Bild 5.10 (Uferfiltrate und Grundwasser) sowie in Bild 5.11 (Talsperren) dargestellt. Die Summenwirkungen der vier Endpunkte einer Probe sind aufeinandergestapelt und stellen in Bezug auf die durchgeführten Biotests die gesamte Toxizität einer Probe dar (maximal 400 Summenwirkungen). Bei den mit Stern gekennzeichneten Proben liegen keine Daten zur Zytotoxizität (*BS*-Hemmtest) vor.



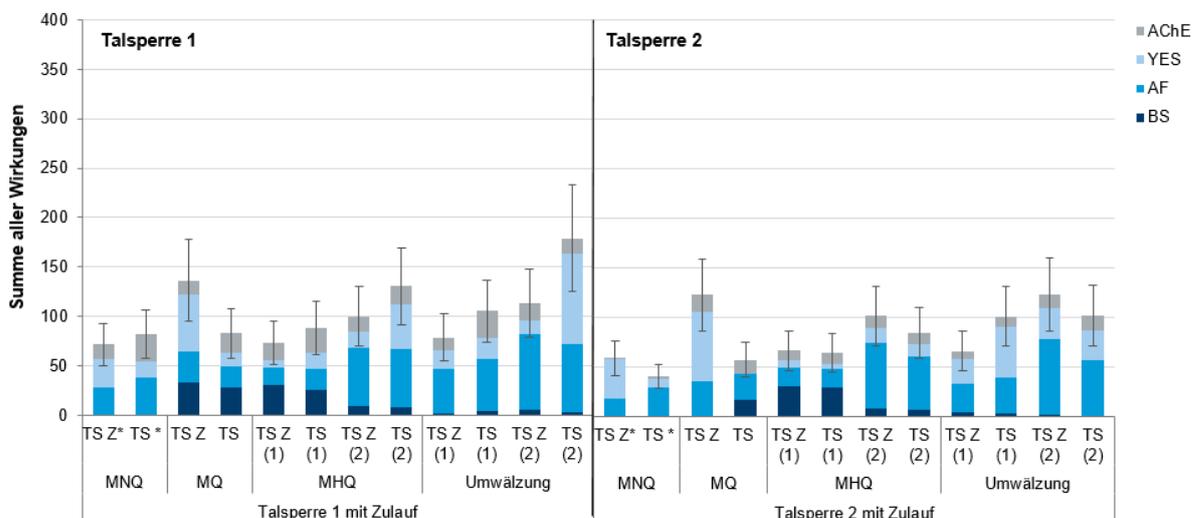
**Bild 5.9: Ergebnisse der wirkungsbezogenen Untersuchungen der Flusswässer 1-3 (\* keine Daten zu BS)**

Beim Vergleich der Wirkungen der Flusswässer fällt auf, dass die Summen der Wirkungen von vier Biotests weitgehend auf ähnlichem Niveau liegen. Lediglich eine Probe bei niedrigem Abfluss von Fluss 1 zeigt erhöhte Wirkungen und eine Probe bei niedrigem Abfluss weist verhältnismäßig niedrige Wirkungen auf.



**Bild 5.10: Ergebnisse der wirkungsbezogenen Untersuchungen von Uferfiltrat 1 und Uferfiltrat 2 sowie vom Grundwasser (\* keine Daten zu BS)**

Beim Vergleich der Ergebnisse der Uferfiltrate unter Berücksichtigung der Streuung der Messwerte fällt auf, dass die Summe der Wirkungen von vier Endpunkten ebenfalls überwiegend auf ähnlichem Niveau liegen. Bei Uferfiltrat 1 weist nur eine von fünf Proben bei mittlerem Abfluss niedrigere Wirkungen auf. Im Vergleich dazu sind die Wirkungen bei Uferfiltrat 2 weitgehend niedriger. Eine Probe bei niedrigem Abfluss und eine Probe bei hohem Abfluss zeigen im Vergleich höhere Wirkungen. Das Grundwasser weist erwartungsgemäß kaum toxische Effekte auf.



**Bild 5.11: Ergebnisse der wirkungsbezogenen Untersuchungen der Talsperren (TS) und der jeweiligen Zuläufen (Z) (\* keine Daten zu BS)**

Beim Vergleich der Ergebnisse der Talsperren unter Berücksichtigung der Streuung der Messwerte fällt auf, dass die Summe der Wirkungen der vier Biotests überwiegend auf gleichem Niveau liegen. Die stärkste Wirkung zeigt sich bei einer Probe der Talsperre 1 bei Umwälzung. Während der Umwälzung ist insbesondere eine höhere östrogene Wirkung zu beobachten. Bei der zweiten Talsperre weisen die Zuläufe tendenziell stärkere Wirkungen auf als die Talsperre selbst. Die Ergebnisse der beiden Talsperren deuten auf den Schichtungs- (Talsperre 1) bzw. Verdünnungseffekt (Talsperre 2) in den Talsperren hin. Über die Sommer- bzw. Winterjahreszeiten herrscht in den Talsperren eine thermische Schichtung, welcher zu einer stabilen Wasserqualität führt. Der Klimawandel kann durch die Verschiebung der Jahreszeiten zu Veränderungen der Wassertemperaturen führen, welche eine zeitliche Verlängerung bzw. Verschiebung der thermischen Schichtung in den Talsperren zur Folge haben (Jan und Meißner, 2015; Shatwell et al., 2013). Durch den Schichtungseffekt ist die Beschaffenheit des den Talsperren in einer gewissen Tiefe entnommenen Rohwassers weniger von den Zuläufen beeinträchtigt. Außerdem werden die Einträge von Stoffen in die Talsperren nivelliert, was sich meist in niedrigeren Summenwirkungen widerspiegelt (vgl. Talsperre 2).

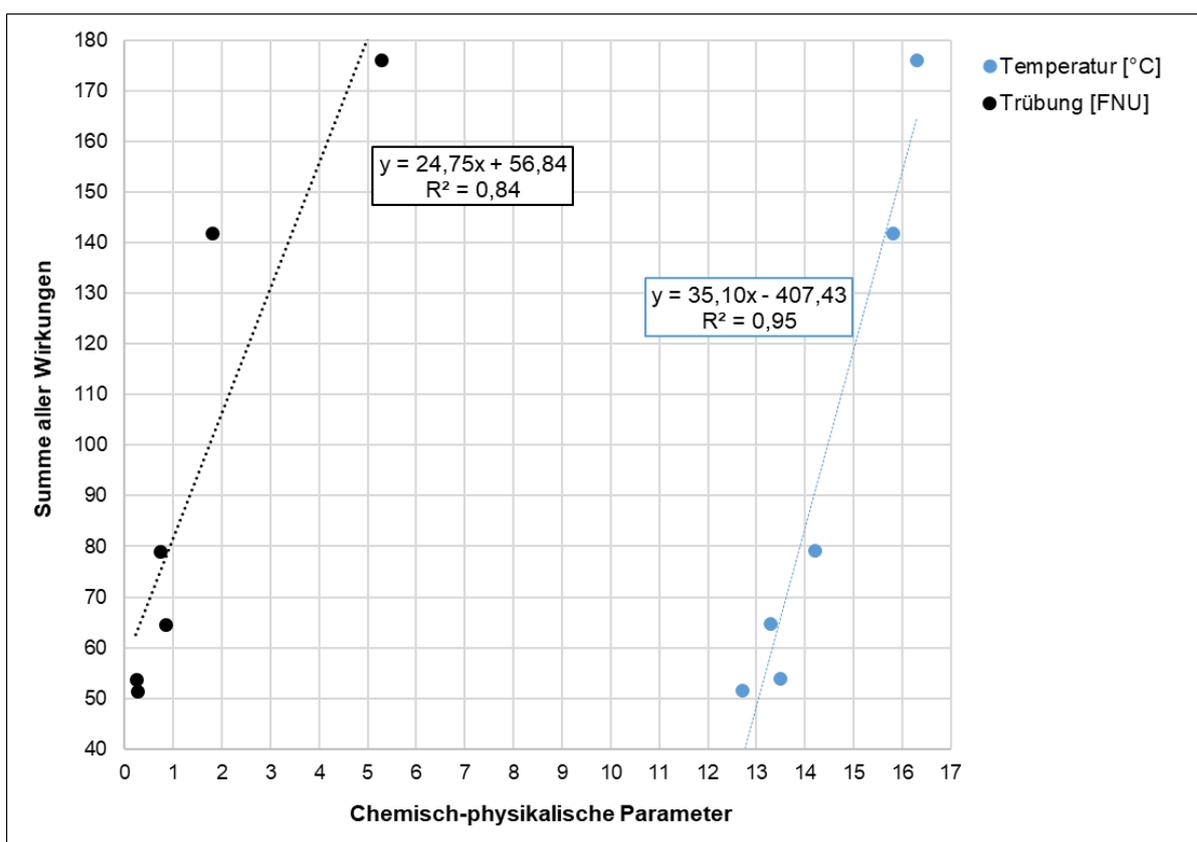
Die eingangs formulierte Hypothese, dass die Spurenstoffe im Wasser bei niedrigeren Abflussraten der Fließgewässer bzw. bei geringen Füllständen in Talsperren konzentrierter und bei höheren Abflussraten bzw. Füllständen verdünnt werden, kann auf Basis der vorliegenden Resultate nicht bestätigt werden. Die Rohwasserqualität ist grundsätzlich von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Beispielsweise kann der Abschlag aus Kläranlagen bei Starkregenereignissen zu Stoßbelastungen führen. Lokal ansässige Industrieunternehmen und andere Besonderheiten im jeweiligen Einzugsgebiet können zu weiteren sich überlagernden Effekten, die die Wasserqualität beeinflussen führen. Zudem ist anzunehmen, dass die Wassertemperaturen in den jeweiligen Jahreszeiten in den Fließgewässern die Abbauraten von Belastungen beeinflussen.

Bei der Interpretation der Daten ist zu berücksichtigen, dass im Rahmen des Projektes lediglich eine begrenzte Anzahl an Stichproben untersucht werden konnte. Dies reicht für eine umfassende und abschließende Beurteilung der möglichen Veränderungen der Rohwasserqualität bei Extremereignissen hinsichtlich der toxikologischen Belastung nicht aus. Dennoch kann die Betroffenheit des Rohwassers durch toxikologische Wirkungen mittels WBA ermittelt und relativ zu anderen Standorten eingeordnet werden.

Die Ergebnisse der wirkungsbezogenen Untersuchungen wurden im Weiteren mit ausgewählten Parametern der chemischen Analytik verglichen. Zu diesem Zweck wurden für alle Proben die Metainformationen abgefragt und mit den WBA-Ergebnissen auf Korrelationen geprüft. Die Metainformationen enthalten die folgenden Parameter:

- Temperatur
- Spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm (SAK254)
- Trübung
- pH
- Leitfähigkeit
- Gesamter organischer Kohlenstoff (total organic carbon, TOC)

Beim Vergleich der Ergebnisse der wirkungsbezogenen Untersuchung mit den Metainformationen konnte nur beim Uferfiltrat 2 eine signifikante Korrelation ( $R^2 > 0,8$ ) unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen den Summenwirkungen und den Parametern Temperatur bzw. Trübung festgestellt werden (Bild 5.12). Bei höheren Temperaturen bzw. Trübungswerten treten stärkere toxische Wirkungen auf. Dieser Zusammenhang muss von nachfolgenden Arbeiten detailliert untersucht werden, um eine Bewertung dieser Beobachtung vornehmen zu können.

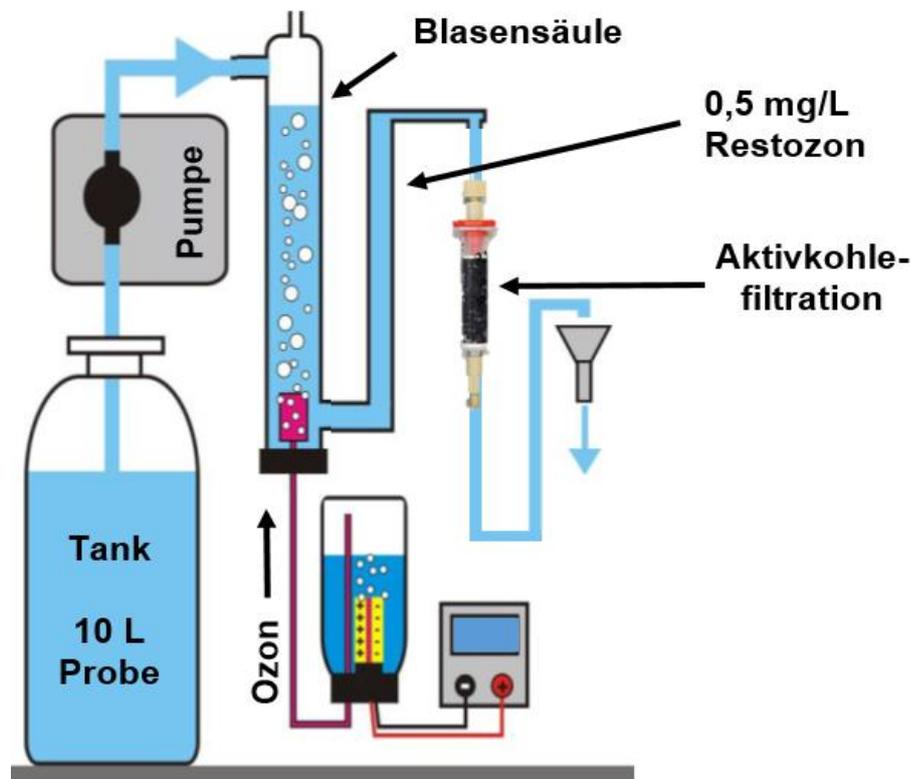


**Bild 5.12:** Korrelation der Ergebnisse der wirkungsbezogenen Untersuchungen des Uferfiltrates 2 mit den Parametern Temperatur (blau) und Trübung (schwarz)

### 5.2.7 Bewertung der Wasseraufbereitung (Stresstest)

Flutkatastrophen sowie Rohwasserknappheit bei extrem heißen Sommerzeiten können durch höhere Abwasseranteile zu Verunreinigungen der Rohwässer führen (Karakurt et al.,

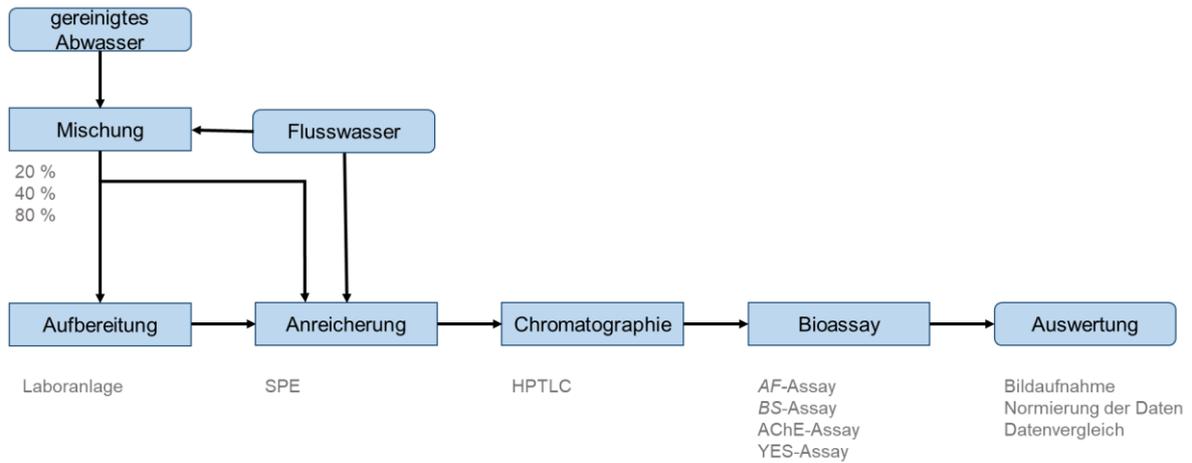
2019). Im Projekt TrinkXtrem wurde deshalb untersucht, ob im Rohwasser auftretende toxi-kologische Wirkungen durch die Wasseraufbereitung wirksam vermindert werden können. In Laborversuchen wurden die Aufbereitungsstufen Ozonung und Aktivkohlefiltration nachgebildet (Happel et al., 2019). Hierzu wurde die in den vorhergehenden Projekten WBA-BeReit und WBA-NTS-ProTrink eingesetzte Laborversuchsanlage zur kontinuierlichen Ozonung mit anschließender Langsamsandfiltration (KOLa) modifiziert (Schulz et al., 2019, Flörs et al., 2023). In Bild 5.13 wird die modifizierte KOLa-Anlage schematisch dargestellt.



**Bild 5.13: Schema der Laboranlage zur Simulation von Ozonung und Aktivkohlefiltration**

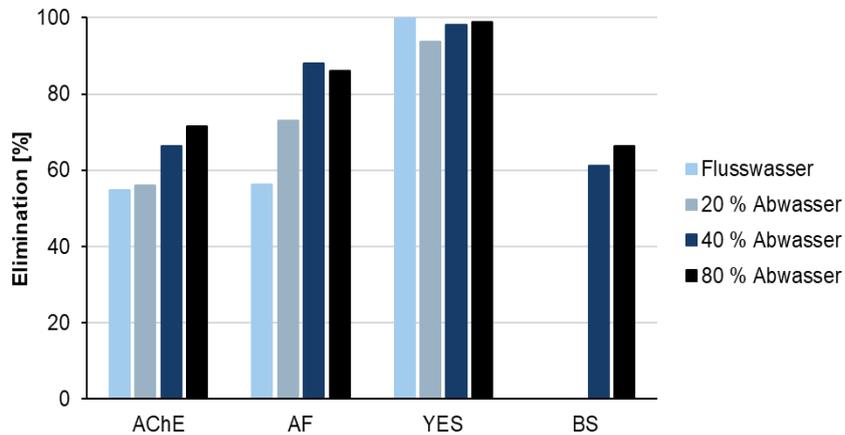
Die Extremszenarien wurden durch verschiedene Rohwasser-Abwasser-Mischungsverhältnisse nachgebildet. Hierzu wurde das Flusswasser mit 20 %, 40 % und 80 % Abwasseranteil versetzt. Zur Beurteilung der Wasseraufbereitungsprozesse wurde vom Flusswasser sowie von jedem Mischungsverhältnis vor und nach der Laboranlage 1 L Probe entnommen. Zusätzlich wurde von der Anlage 1 L Blindwertprobe genommen. Somit wurden für den Simulationsansatz insgesamt 8 Proben mittels WBA/HPTLC untersucht. Der Versuchsaufbau ist in Bild 5.14 schematisch dargestellt.

Die Ergebnisse der Laborversuche sind in Bild 5.15 zusammengefasst.



SPE: Festphasenextraktion  
 HPTLC: Hochleistungsdünnschichtchromatographie  
 AF-Assay: *Aliivibrio fischeri* Hemmtest,  
 BS-Assay: *Bacillus subtilis* Hemmtest  
 AChE-Assay: Acetylcholinesterase Hemmtest  
 YES-Assay: Yeast Estrogen Screen Test

**Bild 5.14: Versuchsaufbau zur Beurteilung der Wasseraufbereitungsprozesse**



AChE-Assay: Acetylcholinesterase Hemmtest  
 AF-Assay: *Aliivibrio fischeri* Hemmtest  
 YES-Assay: Yeast Estrogen Screen Test  
 BS-Assay: *Bacillus subtilis* Hemmtest

**Bild 5.15: Elimination der Wirkungen im Flusswasser nach Ozonung und Aktivkohlefiltration mittels Laboranlage**

Durch die im Labor nachgestellte Ozonung und Aktivkohlefiltration sind jeweils ca. 50 % der neurotoxischen und basistoxischen Wirkungen im Flusswasser eliminiert. Mit zunehmendem Abwasseranteil erhöht sich die Eliminationsrate bei Neurotoxizität bis zu 70 % und bei Basistoxizität bis nahe zu 90 %. Beim YES-Assay stellt sich heraus, dass in jeder Probe über 90 % der östrogenen Effekte durch die Ozonung und Aktivkohlefiltration entfernt werden. Im Vergleich zum Flusswasser sind basistoxische, neurotoxische sowie östrogene Wirkungen in den stärker belasteten Mischwasserproben effektiv durch die Ozonung und Aktivkohlefiltration eliminiert. Bei den Untersuchungen auf Zytotoxizität fällt auf, dass die Effekte nach der Behandlung auf ähnlichem Niveau liegen. Durch die Erhöhung des Abwasseranteils im Testwasser vor der Behandlung steigen die zytotoxischen Effekte an. Erst ab 40 % Abwasseranteil ergeben sich Eliminationsraten von rund 60 %.

#### 5.2.8 *Folgerungen für Extremwetterereignisse*

Der Einfluss der Extremwetterereignisse auf die Rohwasserqualität wurde hinsichtlich der toxikologischen Belastung mittels WBA näher untersucht. Hierbei wurden verschiedene Rohwasserarten (Flusswässer, Grundwasser, Uferfiltrate und Talsperren) je nach Möglichkeit beim Eintreten von Extremereignissen beprobt und auf Basistoxizität, Zytotoxizität, Neurotoxizität sowie auf östrogene Effekte analysiert. Des Weiteren wurde die Biotestbatterie um den Endpunkt Phytotoxizität zur Erfassung von herbiziden Wirkungen erweitert.

Die aufgestellte Hypothese „Je niedriger die Abflüsse in Fließgewässern oder die Füllstände in Talsperren sind, desto höher sind die toxikologischen Belastungen.“ konnte bei Flusswasseruntersuchungen auf Basis der vorliegenden Ergebnisse nicht bestätigt werden. Weder bei den Flusswässern noch bei den jeweiligen Uferfiltraten konnten systematischen Veränderungen der toxikologischen Beschaffenheit beobachtet werden. Untersuchungen an Talsperren wiesen auf den thermischen Schichtungseffekt hin. Während der Umwälzung konnten teilweise höhere östrogene Wirkungen detektiert werden. Grundsätzlich ist für eine umfassende und abschließende Aussage über die Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf die toxikologische Belastung von Rohwässern eine Langzeitbeobachtung mit einer breiteren Datenbasis erforderlich.

Der Algenassay erwies sich als ein potentiell sehr interessanter Biotest für die WBA. Erste Versuche mit dem Herbizid Diuron als Modellanalyt lassen eine sehr hohe Empfindlichkeit des Biotests erwarten. Nach einer Anreicherung können voraussichtlich Photosystem-II hemmende Stoffe bis in den unteren ng/L-Bereichen nachgewiesen werden, d. h. umwelttypische Konzentrationen können sicher erfasst werden. Somit können Extremereignisse künftig auch unter dem Aspekt Phytotoxizität betrachtet werden.

Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projektes die Wirksamkeit der Wasseraufbereitungsprozesse Ozonung und Aktivkohlefiltration hinsichtlich der Entfernung von toxikologischen Wirkungen näher untersucht. Hierbei wurde das Flusswasser bis zu 80 % mit gereinigtem Abwasseranteil belastet. Die Laborversuche zeigten, dass die Ozondosierung anhand der Restozonkonzentration von 0,5 mg/L und die anschließende Aktivkohlefiltration bis zu 70 % aller neurotoxischen und bis zu 90 % aller basistoxischen Wirkungen effektiv eliminiert. Bei den östrogenen Effekten wurde eine Elimination von über 90 % erreicht. Somit ist auch bei stärker belasteten Rohwässern eine ausreichend gute Aufbereitung mittels Ozonung und Aktivkohlefiltration zu erwarten.

Zusammenfassend zeigen die wirkungsbezogenen Untersuchungen, dass die Rohwässer zwar unterschiedliche Wirkungen aufweisen, jedoch derzeit kein eindeutiger Zusammenhang mit Hoch- oder Niedrigwasser festgestellt werden kann. Die wirksame Entfernung der toxischen Wirkungen bei der Wasseraufbereitung mittels Ozonung und Aktivkohlefiltration konnte erfolgreich im Laborversuch gezeigt werden.

### **Fazit Untersuchung der Auswirkungen von Extremereignissen auf die toxische Belastung von Rohwasser mittels wirkungsbezogener Analytik**

**Einsatzgebiet:** Mit Hilfe der wirkungsbezogenen Analytik (WBA) können Wasserversorgungsunternehmen die Rohwasserqualität sowie die Wirkung einzelner Aufbereitungsverfahren aus toxikologischer Sicht einschätzen.

**Merkmale:** Stichprobenuntersuchungen mittels WBA an verschiedenen Rohwässern zeigten, dass Extremwetterereignisse bei Flusswasser und Uferfiltraten keinen erheblichen Einfluss auf die toxikologische Belastung ausüben, wobei unter extremeren Bedingungen oder an anderen Standorten Einflüsse nicht auszuschließen sind. Bei Talsperrenwasser scheinen Veränderungen insbesondere bei östrogenen Wirkungen als Folge der jahreszeitlich bedingten Umwälzung aufzutreten. Durch die Kombination von Ozon und Aktivkohlefiltration wurden neurotoxische, basistoxische und östrogene Wirkungen effektiv eliminiert. Die Auswirkungen auf die toxikologische Belastung hängen oft von den jeweiligen örtlichen Bedingungen ab und sollten separat für jeden Einzelfall mittels WBA ermittelt werden. Mit dem neu etablierten Biotest können künftig Wasserproben auch unter dem Aspekt Phytotoxizität betrachtet werden.

## **5.3 Auswirkungen von Extremereignissen auf die mikrobiologische Rohwasserbeschaffenheit**

### **5.3.1 Einführung**

Die in der TrinkwV §6 festgelegte Forderung, dass „... im Trinkwasser Krankheitserreger...nicht in Konzentrationen enthalten sein dürfen, die eine Schädigung der menschlichen Gesundheit besorgen lassen“, ist nicht ausschließlich durch die Überwachung der Indikatorparameter im Trinkwasser zu gewährleisten. Auch Krankheitserreger mit niedriger Infektionsdosis müssen beherrscht werden. Von der WHO (2011) wird vorgeschlagen, den zu erreichenden Zielwert für bestimmte relevante Krankheitserreger festzulegen („health based targets“) und zu prüfen, ob dieser eingehalten wird, indem die Belastung im Rohwasser und die Entfernungswirksamkeit der daran angepassten Aufbereitung geprüft wird. Im Rohwasser sollen dabei die Konzentrationen der sogenannten Indexpathogene bestimmt werden, während die Aufbereitungsleistung anhand der Indikatoren geprüft wird. Dieses Verfahren wird als „quantitative microbial risk assessment“ (QMRA) bezeichnet.

Im durch den DVGW geförderten Forschungsvorhaben zur quantitativen mikrobiellen Risikobewertung (W 201808, W202012) wurden die Grundlagen für die Anwendung der QMRA bei mikrobiell hochbelasteten Rohwässern gelegt. Im Rahmen des hier durchgeführten Projektes war zu prüfen, ob eine Anwendung der QMRA bei der ganzen Breite der verschiedenen mikrobiell belasteten Rohwässer möglich ist und auch Aussagen für die Auswirkung von Extremereignissen zulässt.

Hydrologische Extremereignisse erschweren die Nutzung von Oberflächenwasser für die Trinkwasseraufbereitung. So kann es in Talsperren nach Trockenperioden bei gleichzeitig geringem Füllstand durch Starkniederschläge zu Gütebeeinträchtigungen des Talsperrenwassers durch Trübstoffe und Mikroorganismen kommen. In Flusswässern steigen insbesondere bei Hochwasser Trübung und mikrobiologische Belastung.

Bisher werden Rohwässer in der Wasseraufbereitung üblicherweise mikrobiologisch auf bakterielle Indikatorparameter untersucht, nicht jedoch auf virale Indikatoren und Krankheitserreger. Die Anforderungen für Rohwasseruntersuchungen sind im DVGW-Arbeitsblatt W 254 festgelegt.

### 5.3.2 Planung und Durchführung der Untersuchungen

Im Rahmen von TrinkXtrem wurde eine quantitative mikrobielle Risikobewertung (quantitative microbial risk assessment, QMRA) als Best Practice Beispiel bei drei Wasserversorgungsunternehmen erprobt. Diese Unternehmen setzen Oberflächenwasser als Rohwasser ein, zwei davon Flusswasser, das dritte Talsperrenwasser. Zur Bestimmung der Aufbereitungssicherheit wurden die folgenden Verfahrensschritte betrachtet:

- WVU A (Fluss 1)  
Wirksamkeit der Flockung und Sedimentation als erste partikelentfernende Stufe
- WVU B (Fluss 2)  
Wirksamkeit einer Uferfiltration mit ca. 35 d Aufenthaltszeit (2 Wasserwerke)
- WVU C (Talsperre)  
konventionelle Aufbereitung ohne Abschlussdesinfektion

Um eine QMRA zu ermöglichen, wurden in den Oberflächenwässern Paralleluntersuchungen von Indikatororganismen und Krankheitserregern durchgeführt. Um die Aufbereitungswirksamkeit der jeweils betrachteten Aufbereitung zu bestimmen, wurden die Indikatoren nach der jeweiligen Aufbereitung untersucht.

Die Untersuchung des mikrobiologischen Status quo durch die parallele Untersuchung der Krankheitserreger und der Indikatorparameter dient der Prüfung, ob eine Festlegung von Schwellenwerten auf Basis der Indikatoren möglich ist und wie das mikrobiologische Risiko bei Auftreten von Extremereignissen zu bewerten ist.

Das Messprogramm wurde für ein Jahr mit monatlichen Terminen geplant, wobei als Indexpathogene die viralen Krankheitserreger Adenoviren, Enteroviren und Noroviren, die bakteriellen Krankheitserreger thermotolerante *Campylobacter* und die parasitären Krankheitserreger Cryptosporidien und Giardien festgelegt wurden. Letztere wurden nicht monatlich, sondern einmal pro Quartal untersucht. Wie bereits erwähnt, wurden in den Oberflächenwässern sowohl die Krankheitserreger als auch die Indikatorparameter gemessen, in den Wässern nach Partikelentfernung (nach Flockung und Sedimentation bei WVU A, nach Uferfiltration bei WVU B, nach Filterablauf in den 2 Straßen des WVU C) dagegen nur die Indikatoren. Als bakterielle Indikatoren wurden coliforme Bakterien, als virale Indikatoren die somatischen Coliphagen gemessen und zur Berechnung verwendet.

### 5.3.3 Ergebnisse des Messprogramms

Die Messungen erfolgten im Zeitraum Oktober 2022 bis zum Dezember 2023. Im letzten Quartal 2023 traten Extremereignisse auf (Hochwasser bei Fluss 1 und Fluss 2, Starkregenereignis bei der Talsperre). Zum Jahresende 2023 lagen damit für die mikrobiologischen Messungen i. d. R. 15 Messwerte für Krankheitserreger und Indikatoren vor.

Bei beiden Flüssen und bei der Talsperre wurden im Rohwasser Messungen auf Indikatoren, bakterielle und virale Krankheitserreger sowie Untersuchungen auf Cryptosporidien und Giardien durchgeführt. In den Wässern nach Partikelentfernung wurden jeweils nur die Indikatoren bestimmt. Die Einzelergebnisse des Messprogramms sind in Anlage 13.2.2 zusammengestellt.

Die Untersuchungen zum Vorkommen der verschiedenen Krankheitserreger in den Oberflächenwässern zeigten, dass in den Flüssen bakterielle und parasitäre Krankheitserreger sehr häufig vorkamen (70-100%), während Viren nur in ca. 30 % der Messungen nachweisbar waren. Im Talsperrenwasser waren parasitäre Krankheitserreger am häufigsten nachweisbar (80%), gefolgt von bakteriellen Krankheitserregern (knapp 30%). Virale Krankheitserreger waren dagegen in der Regel nicht nachweisbar.

Die Ergebnisse der Mittelwerte der Indikatormessungen sind für die beiden Flusswässer und die Talsperre in Tabelle 5.3 zusammengestellt. Dabei wurden die Mittelwerte des TrinkXtrem-Messprogramms sowohl gesamt als auch ohne Extremereignisse und nur für Extremereignisse berechnet. Bei den Flusswässern lagen zusätzlich historische Daten vor, deren Mittelwerte ebenfalls darin aufgeführt sind.

Man erkennt aus diesen Werten, dass in den Flusswässern der Unterschied mit und ohne Extremereignisse maximal eine Abweichung um einen Faktor 2 aufweist. Dies stellt bei mikrobiologischen Messwerten die gleiche Größenordnung dar.

In dem gut geschützten Einzugsgebiet einer Talsperre sieht dies anders aus. Auch in dem Talsperren-Rohwasser trat im November und Dezember 2023 ein Extremereignis in Form von Starkregenereignissen auf. Bis dahin (10/2022 bis 10/2023) traten im Rohwasser keine *E. coli*, keine somatischen Coliphagen und maximal zweistellige Konzentrationen an coliformen Bakterien auf. Nach Eintreten des Extremereignisses traten somatische Coliphagen (einstellig) und dreistellige Coliformen-Konzentrationen auf. D. h., hier war eine Erhöhung bei den Indikatoren um eine log-Stufe zu erkennen. Damit war die Erhöhung merklich stärker ausgeprägt als bei den beiden Flusswässern, wo die Abweichungen der mittleren Konzentrationen der Indikatoren voneinander lediglich bei maximal einem Faktor 2 lagen.

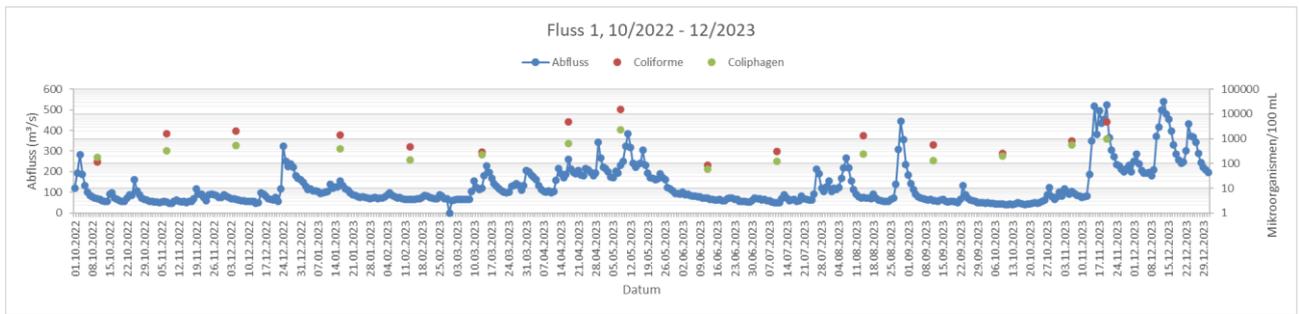
**Tabelle 5.3 Mittelwerte der Indikatoren coliforme Bakterien und somatische Coliphagen in den Rohwässern der drei WVU aus dem TrinkXtrem-Messprogramm mit und ohne Extremereignisse sowie aus historischen Daten**

Mittelwerte KBE bzw. PFU in 100 mL	Fluss 1			
	Histor. Daten 2000-2023	gesamt	ohne Extreme	nur Extreme
Coliforme Bakterien	3597	2277	2210	2714
Somat. Coliphagen	317	467	420	775
	Fluss 2			
	Histor. Daten 2014-2018	gesamt	ohne Extreme	nur Extreme
Coliforme Bakterien	4441	2971	2072	5308
Somat. Coliphagen	676	417	347	600
	Talsperre			
	Histor. Daten -	gesamt	ohne Extreme	nur Extreme
Coliforme Bakterien	-	47,1	20,8	218,1
Somat. Coliphagen	-	1,1	0,5	5

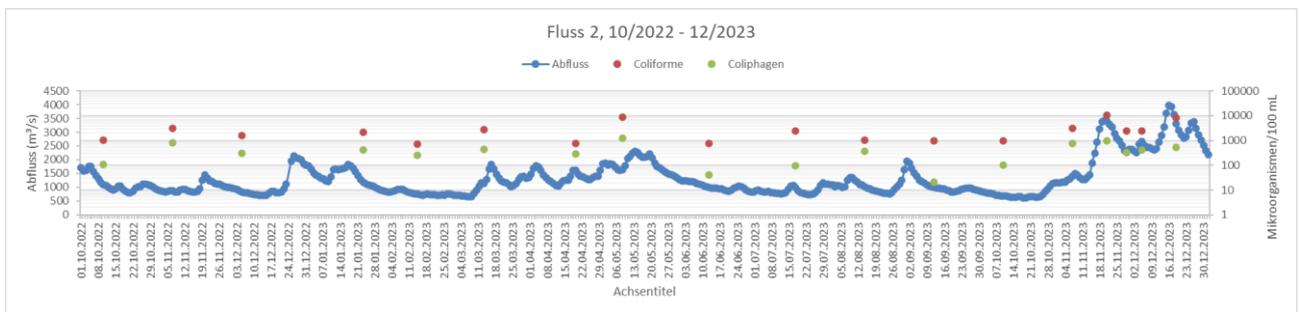
Die Indikator-Messungen im Flusswasser 1 im Zeitverlauf des Messprogramms sind in Bild 5.16 im Vergleich zum Abfluss dargestellt. Die Hochwasserbedingung war im Zeitraum November bis Dezember 2023 erfüllt.

Die Indikatoruntersuchungen im Flusswasser 2 sind in Bild 5.17 im Vergleich zum Abfluss dargestellt. Auch hier war die Hochwasserbedingung im Zeitraum November bis Dezember 2023 erfüllt.

Auch diese Darstellungen zeigen bei beiden Flusswässern, dass im Hochwasserzeitraum keine deutliche Konzentrationszunahme zu erkennen ist. Mikrobiologische Parameter unterliegen in Fließgewässern generell starken Schwankungen um bis zu drei Größenordnungen. Insofern spielen in diesen Flusswässern Hochwasserbedingungen zwar eine gewisse Rolle, gehen jedoch in den Schwankungsbreiten weitestgehend unter.



**Bild 5.16** Coliforme Bakterien und somatische Coliphagen im Fluss 1 im Vergleich zum Abfluss während des TrinkXtrem-Messprogramms (10/2022 – 12/2023)



**Bild 5.17** Coliforme Bakterien und somatische Coliphagen im Fluss 2 im Vergleich zum Abfluss während des TrinkXtrem-Messprogramms (10/2022 – 12/2023)

### 5.3.4 Aufbereitungswirksamkeit

Um eine QMRA für spezifische Krankheitserreger durchführen zu können, ist es erforderlich, die Aufbereitungswirksamkeit anhand der Indikatoren zu berechnen. Für parasitäre und bakterielle Krankheitserreger werden die coliformen Bakterien als Indikatoren verwendet, für virale Krankheitserreger die somatischen Coliphagen.

In Tabelle 5.4 sind die berechneten Rückhalte für die drei WVU zusammengestellt, wobei in den Flusswässern auch die Berechnungen aus historischen Daten aufgeführt sind. Für das TrinkXtrem-Messprogramm wurden die Rückhalte mit und ohne Extremereignisse berechnet.

Beim WVU A mit der Aufbereitung Flockung/Sedimentation sind die Unterschiede der Mittelwerte bei Betrachtung mit und ohne Extremereignisse nur minimal (< Faktor 2), siehe Tabelle 5.3. Dementsprechend ergaben sich sowohl historisch und auch im Rahmen des Messprogrammes Rückhalte in der gleichen Größenordnung von 0,7 bis 1 log-Stufe für bakterielle und für virale Indikatoren.

Beim WVU B wurde eine Uferfiltration mit einer Aufenthaltszeit im Untergrund von 35 Tagen betrachtet. Die Unterschiede der Mittelwerte mit und ohne Extremereignisse sind auch hier

nur minimal (< Faktor 2), siehe Tabelle 5.3. In den Uferfiltraten wurde jeweils kein Durchbruch der Indikatoren beobachtet, auch nicht bei dem Hochwasserereignis im November und Dezember 2023. Nach dem Maximum des Hochwassers wurde noch weitere vier Wochen beprobt, aber es traten dennoch keine Positivbefunde in den Uferfiltraten auf. Insofern lässt sich hier in Abhängigkeit von der Ausgangskonzentration nur ein Rückhalt von „größer als“ bestimmen. Der Bakterienrückhalt ergibt sowohl bei den historischen Daten als auch im Messprogramm mehr als 3,8 bis 4 log-Stufen, der Virenrückhalt mehr als 2,9 bis 3 log-Stufen.

Beim WVU C ist das Talsperren-Rohwasser normalerweise kaum belastet. Bei dem Extremereignis trat eine Erhöhung der Rohwasserbelastung um eine log-Stufe auf. Der Bakterienrückhalt erhöhte sich beim Extremereignis daher von 1,6 auf 2,3 log-Stufen, der Virenrückhalt von > 0,3 auf > 1 log-Stufen. Hier ist dementsprechend der Unterschied mit und ohne Extremereignis signifikant. Allerdings ist gleichzeitig die Ausgangsbelastung sehr niedrig und deutlich geringer als bei den Flusswässern, sodass selbst bei einer Erhöhung um eine log-Stufe die Messwerte immer noch sehr gering sind.

**Tabelle 5.4 Rückhalte berechnet aus den Mittelwerten der Indikatoren coliforme Bakterien und somatische Coliphagen in den drei WVU aus historischen Daten und dem TrinkXtrem-Messprogramm**

Rückhalt in Logstufen	WVU A Fluss 1, Flockung / Sed.		
	Historische Daten 2000-2023	TrinkXtrem Messprogramm	
		gesamt	nur Extremereignisse
Bakterien (coliforme Bakterien)	0,7	0,8	0,9
Viren (Coliphagen)	0,7	0,8	1,0
	WVU B Fluss 2, Uferfiltration 35 d		
	Historische Daten 2014-2018	TrinkXtrem Messprogramm	
		gesamt	nur Extremereignisse
Bakterien (coliforme Bakterien)	> 3,9	> 3,8	> 4,0
Viren (Coliphagen)	> 3,1	> 2,9	> 3,1
	WVU C Talsperre, Reinwasser vor Desinfektion		
	Historische Daten	TrinkXtrem Messprogramm	
		-	gesamt
Bakterien (coliforme Bakterien)	-	1,6	2,3
Viren (Coliphagen)	-	> 0,3	> 1,0

### 5.3.5 Berechnung der quantitativen mikrobiellen Risikobewertung (QMRA)

Für die WVU A, B und C wurden für die Krankheitserreger *Cryptosporidium*, *Giardia*, *Campylobacter* und Adenovirus aus der Rohwasserkonzentration, der Aufbereitungswirksamkeit und der Infektionswahrscheinlichkeit für die aufbereiteten Wässer nach Partikelentfernung (Fluss 1-FS, Fluss 2-UF 35 d, Talsperre-Reinwasser vor Desinfektion) die Infektionen pro Person pro Jahr berechnet. Dies zum einen über das gesamte Messprogramm, zum anderen ohne Extremereignisse und zum dritten nur mit den Extremereignissen.

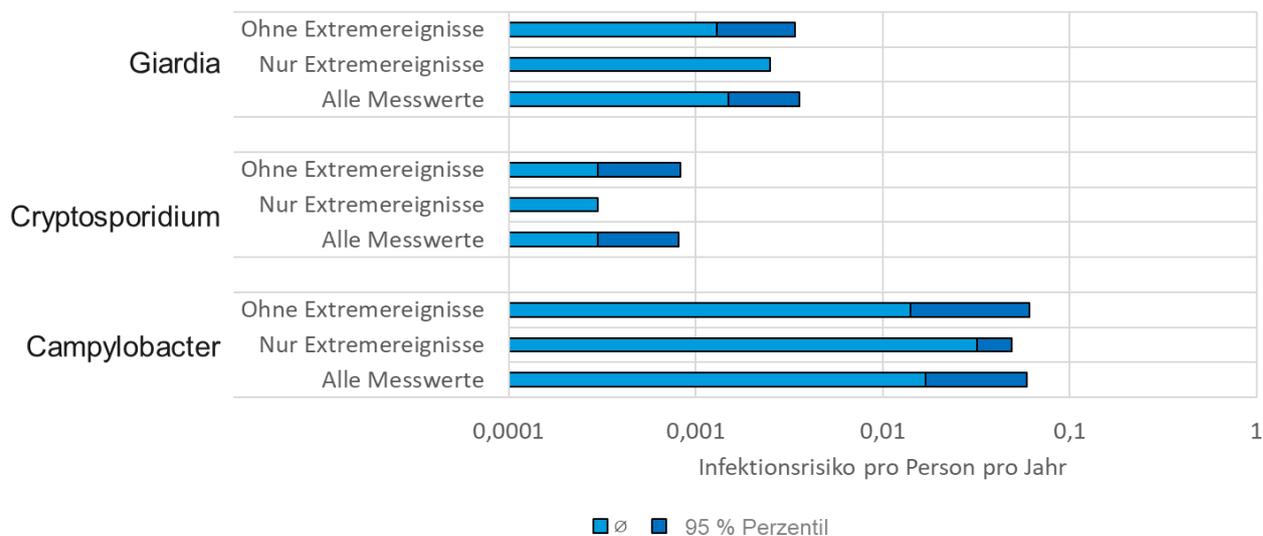
Bei den beiden Flusswässern war bereits anhand der Konzentrationen und der Aufbereitungswirksamkeit kein Unterschied zu erwarten. Bei dem Talsperrenwasser veränderte sich die Konzentration um etwa eine log-Stufe und damit erhöhte sich auch die Aufbereitungswirksamkeit. Gleichzeitig lag das Ausgangsniveau jedoch sehr niedrig. In Bild 5.18 sind die Infektionen pro Person pro Jahr für die parasitären und bakteriellen Krankheitserreger im Vergleich der drei Berechnungen zusammengefasst. Da keine Adenoviren im Talsperrenwasser nachweisbar waren, entfällt hierfür diese Berechnung.

Die Berechnungen zeigen, dass sich die Infektionen pro Person pro Jahr selbst bei einer Erhöhung der Konzentrationen um 1 log-Stufe fast nicht verändern.

Durch weitere Modellierungen und theoretische Betrachtungen ergab sich, dass sich erst bei 100-fach erhöhten Werten (2 log-Stufen) das jährliche Risiko um 0,5 log-Stufen erhöht, wenn 20 solche Ereignisse jährlich auftreten. Starke Effekte sind erst zu erwarten, wenn 1.000-fach höhere Werte, also eine Erhöhung um 3 log-Stufen, auftritt.

Die Ergebnisse des TrinkXtrem-Messprogramms zeigten, dass sich bei den Flüssen durch die Extremereignisse eine maximale Konzentrationserhöhung um den Faktor 2 ergab, bei der Talsperre maximal um den Faktor 10. Diese Erhöhung um den Faktor 10 (1 log-Stufe) hat jedoch fast keine Auswirkung auf das jährliche Risiko.

Daraus lässt sich ableiten, dass für eine QMRA eine getrennte Betrachtung von Extremereignissen nicht erforderlich ist. Eine QMRA setzt allerdings immer ein aussagekräftiges Messprogramm voraus, d. h. mindestens 10 bis 20 Messwerte pro Jahr. Die Empfehlung der Untersuchungshäufigkeit nach DVGW-Arbeitsblatt W 254 von einmal pro Monat erscheint daher sinnvoll und stellt eine gute Ausgangsbasis dar.



**Bild 5.18** Berechnete Infektionen pro Person pro Jahr für 3 Krankheitserreger im Talsperren-Reinwasser vor Desinfektion aus dem TrinkXtrem-Messprogramm (unten: alle Messwerte, Mitte: Messwerte nur Extremereignisse, oben: Messwerte ohne Extremereignisse)

### 5.3.6 Hinweise zur praktischen Durchführung der QMRA

Eine QMRA ist immer dann sinnvoll und notwendig, wenn in den Rohwässern regelmäßig coliforme Bakterien nachgewiesen werden. Durch das Messprogramm, den Vergleich mit historischen Daten und den Auswertungen wurde gezeigt, dass für eine QMRA keine getrennte Betrachtung von Extremereignissen erforderlich ist. Durch die Durchführung einer QMRA mit einem Mindestumfang von 10 Messwerten pro Jahr wird die Schwankungsbreite in den Oberflächenwässern bereits ausreichend abgedeckt. Bei mikrobiell beeinflussten Rohwässern (z. B. Uferfiltraten mit kurzen Fließzeiten) sind die Indikatoren coliforme Bakterien und somatische Coliphagen notwendig und geeignet, um eine QMRA durchführen zu können. Wenn coliforme Bakterien regelmäßig in den Rohwässern vorkommen (> 1% der Messwerte) sollten für das Ausgangswasser (Oberflächenwasser) in einem einjährigen Messprogramm auch virale Indikatoren und Krankheitserreger bestimmt werden. Durch die Untersuchung auf Krankheitserreger und die Bestimmung der Aufbereitungswirksamkeit durch die Indikatoren lässt sich dann das jährliche Risiko unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufbereitungsstufen berechnen.

Wenn in dem Uferfiltrat keine coliformen Bakterien vorkommen, bzw. die Häufigkeit deutlich unter 1 % der Messungen liegt, ist das Risiko so gering, dass eine QMRA mit Messung der Krankheitserreger und der somatischen Coliphagen als Indikatoren für den Virenrückhalt nicht erforderlich ist.

## Fazit Mikrobiologische Rohwasserbeschaffenheit bei Extremereignissen

**Einsatzgebiet:** Zur Bestimmung der mikrobiologischen Qualität werden Rohwässer in der Wasseraufbereitung üblicherweise auf bakterielle Indikatorparameter untersucht, nicht jedoch auf virale Indikatoren und Krankheitserreger. Mit Hilfe der quantitativen mikrobiellen Risikobewertung (QMRA) können Wasserversorgungsunternehmen zusätzliche theoretische Vorhersagen zum Infektionsrisiko durch Krankheitserreger treffen.

**Merkmale:** In TrinkXtrem wurden bei Fluss- und Talsperrenwässern sowie Uferfiltraten mit 35 Tagen Aufenthaltszeit im Untergrund zu Zeitpunkten mit und ohne Extremereignisse Untersuchungen zum Vorkommen von Krankheitserregern durchgeführt. Durch die Untersuchung auf Krankheitserreger und die Bestimmung der Aufbereitungswirksamkeit können Wasserversorger das jährliche Risiko unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufbereitungsstufen berechnen. In TrinkXtrem wurde festgestellt, dass Extremereignisse die statistischen Ergebnisse einer QMRA nicht signifikant verändern.

## 6 Anlagenbetrieb

### 6.1 *Managementtool zur Rohwasserbewirtschaftung bei Extremereignissen*

#### 6.1.1 *Einführung*

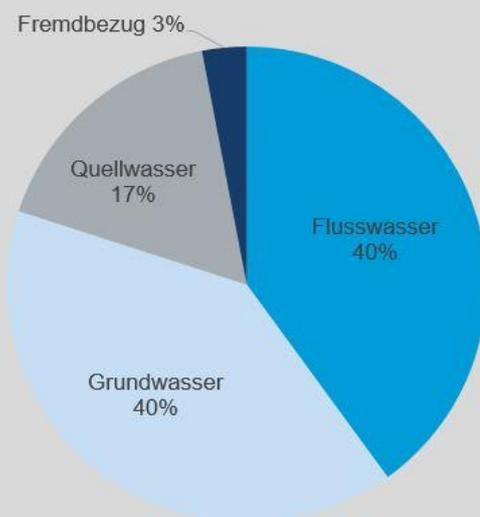
Die in Baden-Württemberg durchgeführte landesweite Auswertung der Grundwasserneubildungsprozesse durch die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg weist darauf hin, dass in Baden-Württemberg bereits seit dem Jahr 2003 vorwiegend unterdurchschnittliche Jahresneubildungsraten vorliegen, die zu einer Reduzierung des Grundwasserdargebots führen. In Zukunft ist davon auszugehen, dass sich häufiger meteorologische Extremsituationen einstellen werden, bei denen auch mehrere Jahre hintereinander die Erneuerung des Rohwasserdargebots in Trinkwassergewinnungsgebieten durch Grundwasserneubildung ausbleibt.

Mit dem im Projekt entwickelten Managementtool soll ein Werkzeug zu Verfügung stehen, mit dem auch unter ungünstigen hydrologischen Verhältnissen, die zur Trinkwassergewinnung genutzten Ressourcen optimal genutzt werden können. Dabei spielt nicht nur die Versorgungssicherheit eine wichtige Rolle, sondern auch die Trinkwasserqualität. Zusätzlich sind die Gewinnungskosten zu berücksichtigen, die insbesondere bei der Nutzung unterschiedlicher Gewinnungsgebiete oder Ressourcen von Bedeutung sind.

Das Managementtool wurde an den Ressourcen beim Zweckverband Landeswasserversorgung (LW) getestet, hat aber einen allgemeinen Aufbau, der die Übertragbarkeit auf die Ressourcen anderer Wasserversorger ermöglicht. Die Ressourcenherkunft der LW wurde in Kapitel 3.6 beschrieben. Der Steckbrief enthält weitere, auf das Managementtool bezogene Informationen. Im Folgenden wird ein Ansatz zur schnellen Berechnung von Grundwasserständen mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzen dargestellt, welcher für Optimierungsberechnungen im Managementtool zum Einsatz kommt. Weiterhin werden die Methodik der multikriteriellen Entscheidungsfindung und der Aufbau des Managementtools mit ersten Anwendungsbeispielen gezeigt.

## Steckbrief mit themenbezogenen Informationen zum Wasserversorger

Die LW nutzt verschiedene Rohwässer aus zehn unterschiedlichen Ressourcen. Im Donauried wird Kiesgrundwasser aus 7 bis 19 m tiefen Flachbrunnen der Fassungen 1 bis 6 im Heberbetrieb gewonnen. Hinzu kommen zwei 200 m bzw. 233 m tiefe Karstbrunnen an der Fassung 5, aus denen bis zu 100 l/s gefördert werden darf. Insgesamt dürfen aus den Grundwasserfassungen im Donauried 2.500 l/s in der Spitze gewonnen werden. Bei Leipheim wird Flusswasser aus der fließenden Welle der Donau gewonnen, hier dürfen maximal 2.300 l/s gefördert werden. Im Egauwasserwerk können bis zu 800 l/s aus der Buchbrunnenquelle entnommen werden, die zulässige Entnahme ist vom Abfluss der Egau bei Ballmertshofen abhängig und liegt im Sommer häufig bei 400 l/s.



**Bild:** Durchschnittliche Rohwasserzusammensetzung des Zweckverbandes Landeswasserversorgung (rechts), Quelltopf Buchbrunnenquelle (links oben), Donauwasserentnahme aus der fließenden Welle in Leipheim (links unten)

In Burgberg wird Grundwasser aus drei 37 m, 50 m und 58 m tiefen Karstbrunnen gefördert. Die maximale Entnahme aus den drei Brunnen beträgt nach Wasserrecht 500 l/s und ist ähnlich, wie bei der Buchbrunnenquelle an den Abfluss der Hürbe gekoppelt. Von der Bodenseewasserversorgung und den Stadtwerken Heidenheim können in der Spitze insgesamt 445 l/s zusätzlich bezogen werden.

### 6.1.2 Neuronales Netz zur Realtime-Prognose der Grundwasserstände

Mit dem Managementtool soll eine Optimierung der Ressourcenaufteilung bei einem gegebenen Wasserbedarf erfolgen. Hierfür müssen in jedem Optimierungsschritt Grundwasserstände simuliert werden. Durch die langen Rechenzeiten ist das numerische Grundwassermodell Donauried für diese Aufgabe nicht geeignet. Es besteht der Bedarf an schnellen prognosefähigen Werkzeugen, welche für die Optimierung eingesetzt werden können. Im Rahmen dieses Projekts wurden künstliche neuronale Netze (KNN) zur Ermittlung von Grundwasserständen eingesetzt, um eine schnelle Prognose zu ermöglichen. Im Folgenden werden die Möglichkeiten und Grenzen dieses Ansatzes erläutert.

#### 6.1.2.1 Methodik

Künstliche neuronale Netze sind in ihrem Aufbau und in ihrer Funktionsweise dem Gehirn von Menschen und Tieren nachempfunden. Ein KNN besteht aus Schichten, die Neuronen enthalten. Klassischerweise handelt es sich um drei Schichten: Die Eingabe-, Ausgabe- und die versteckte Schicht. Informationen werden von der Eingabeschicht aufgenommen und über die versteckte bis hin zur Ausgabeschicht weitergeben. Im vorliegenden Fall werden der Eingabeschicht externe Informationen der Grundwasserneubildung und der Pumpraten der entsprechenden Brunnen in Form von Zahlenwerten gegeben. Die Ausgabeschicht gibt schließlich Grundwasserstände zurück.

In diesem Anwendungsfall kommt ein sogenanntes „Long-short term memory“ (LSTM) (Hochreiter und Schmidhuber, 1997) zum Einsatz. Diese Art von KNN eignet sich sehr gut, um Probleme zu lernen, bei denen der Datensatz sequenzieller Natur ist und der zu lernende Zielparameter zeitabhängig und somit von vorangegangenen Zuständen beeinflusst ist, wie z.B. bei Grundwassersystemen, welche in den hier betrachteten Zeitskalen langsam reagieren.

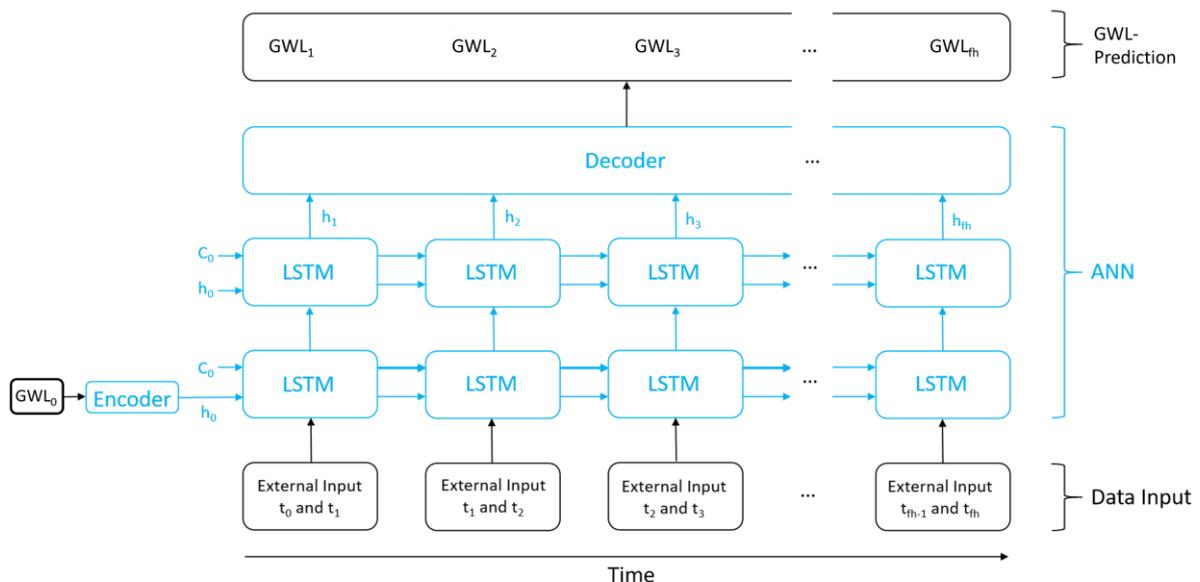
Die Vorgehensweise beim neuronalen Netz ist, dass dieses zunächst mit vorhandenen Messdaten trainiert wird. Je länger die Messzeitreihe für das Training ist, desto besser lässt sich das neuronale Netz trainieren. Ebenso ist es wichtig, dass alle Systemzustände in der Trainingsphase mit ausreichend Dateninformationen belegt sind. Systemzustände, die nicht im Training enthalten sind, werden mit großen Unsicherheiten bei einer Prognose simuliert. Weiterhin ist es wichtig, dass eindeutige Zusammenhänge zwischen den Eingabedaten und den berechneten Grundwasserständen vorliegen. Ist dies nicht der Fall und werden beispielsweise Eingabedaten verwendet, die keinen Einfluss auf den Grundwasserstand haben, so kann dies Auswirkungen auf die Abbildungsgenauigkeit des neuronalen Netzes haben.

In der Regel wird zusätzlich zur Trainingsphase eine Validierungsphase definiert, um mit Daten, die nicht Bestandteil der Trainingsphase waren, das neuronale Netz und dessen Performanz zu überprüfen. Mit dem so getesteten neuronalen Netz lassen sich nun Grundwasserstände prognostizieren.

Beim Einsatz eines neuronalen Netzes ist zu beachten, dass dieses im Gegensatz zu einem Grundwassermodell, das auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruht, zunächst keine physikalischen Zusammenhänge kennt. Das bedeutet, dass eine Grundwasserentnahme nicht zwangsläufig zu tieferen Grundwasserständen führt als ein Szenario ohne Entnahme.

### 6.1.2.2 Modellaufbau

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, wird ein LSTM-KNN verwendet. Der Modellaufbau des neuronalen Netzes ist in Bild 6.1 genauer illustriert. Dabei steht „GWL“ für den Grundwasserstand und „t“ für einen Zeitschritt (hier ein Tag).



**Bild 6.1: Modellaufbau künstliches neuronales Netz**

Bei dem Bild ist zu beachten, dass die „x-Achse“ eine Zeitachse ist. Es kommen nur zwei hintereinandergeschaltete LSTM-Zellen zum Einsatz die ihre Ausgabe nach jedem Zeitschritt sich selbst wieder zuführen, bevor eine externe Eingabe des nächsten Zeitschritts hinzugegeben wird und mit der vorherigen LSTM-Ausgabe eine neue Ausgabe berechnet.

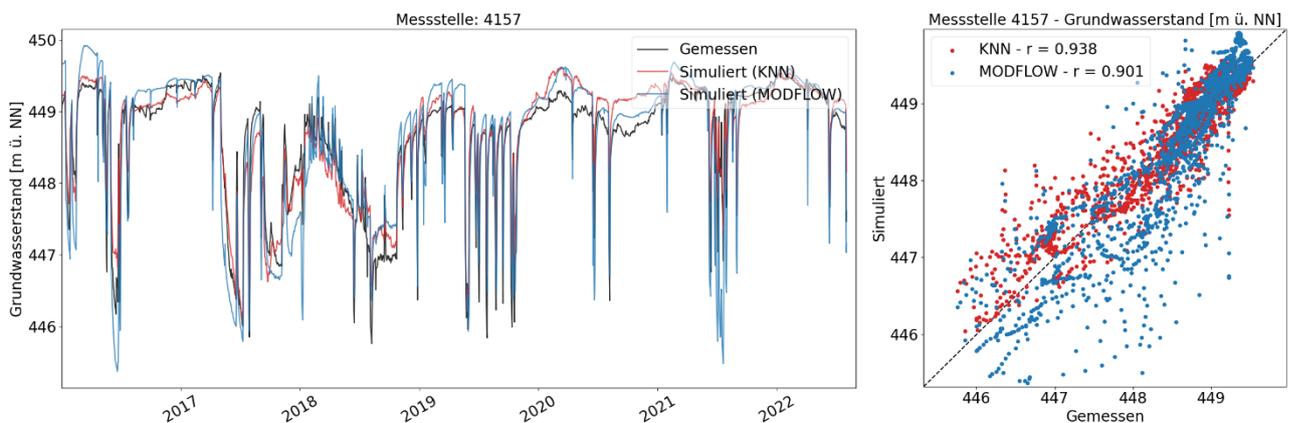
Die Methodik wurde anhand der Daten des ZV Landeswasserversorgung aufgebaut und ausgiebig getestet. Die Grundwasserentnahme der LW im Donauried umfasst 6 Fassungen. Für jede dieser Fassungen existiert eine Kontrollmessstelle anhand derer die Grundwasser-

stände überwacht werden, so dass keine kritischen Grundwasserstände unterschritten werden. Für jede der sechs Fassungen wurde ein separates KNN nach dem oben beschriebenen Schema erstellt.

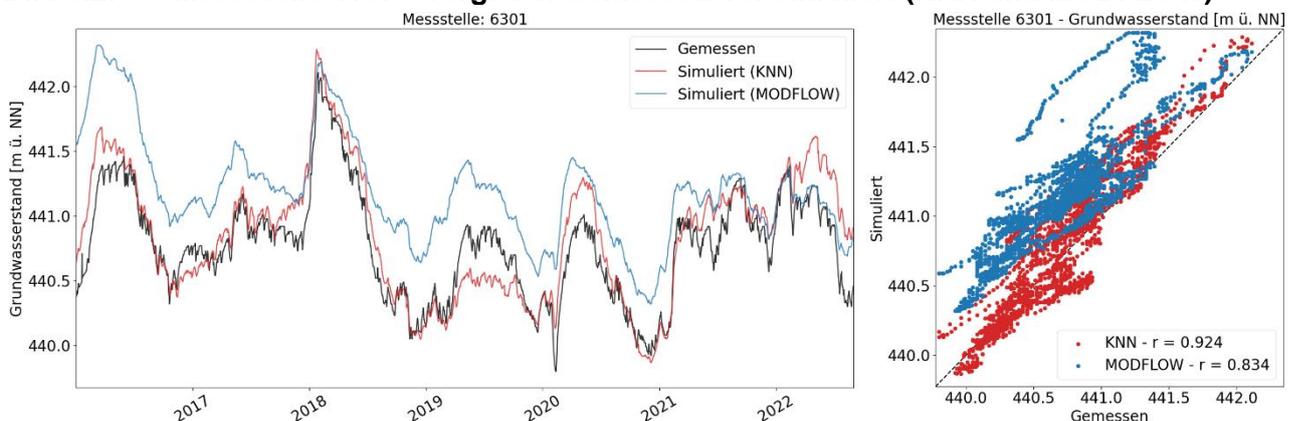
Die Trainingsdaten der KNN beinhalten Zeitreihen für die Grundwasserneubildung, der Entnahme an einer Fassung sowie der Grundwasserstände in der jeweiligen Kontrollmessstelle der Fassung. Die Daten liegen hierfür auf Tagesbasis für den Zeitraum vom 1.1.1996 bis zum 30.09.2022 vor.

### 6.1.2.3 Ergebnisse

In Bild 6.2 und Bild 6.3 sind exemplarisch Ergebnisse zu den Berechnungen der KNNs (rot) und dem oben bereits erwähnten numerischen Grundwassermodell der LW (MODFLOW-Modell, blau) der Kontrollmessstellen der Fassungen 1 und 6 im Vergleich zur gemessenen Ganglinie dargestellt. Auf der linken Seite sieht man jeweils den Vergleich der Ganglinien der Modelldaten und der gemessenen Grundwasserstände. Auf der jeweils rechten Seite sind Streudiagramme der Modelldaten im Vergleich zu den gemessenen Werten zusammen mit den Pearson-Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) visualisiert.



**Bild 6.2: Messstelle 4157 - Vergleich Gemessen vs. Simuliert (KNN und MODFLOW)**



**Bild 6.3: Messstelle 6301 - Vergleich Gemessen vs. Simuliert (KNN und MODFLOW)**

#### 6.1.2.4 Diskussion und Ausblick

In den Bildern ist zu erkennen, dass das KNN meist die gemessene Ganglinie besser oder ähnlich gut abbilden kann, wie das numerische MODFLOW-Modell. Dies spiegelt sich auch im Vergleich der in Tabelle 6.1 aufgelisteten Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) wider, die jeweils für die Berechnung des KNN- und MODFLOW-Modells für die abgebildeten Zeiträume berechnet wurde. Somit können mit den KNN für die durch die Messung abgedeckten Bereiche Prognosen durchgeführt werden, wie sie für die Optimierung im Managementtool benötigt werden.

**Tabelle 6.1: Vergleich RMSE für die simulierten Ganglinien der Kontrollmessstellen an den Fassungen 1 bis 6**

Messstelle	1310	2108	3107	4157	5111	6301
RMSE KNN	0.3246	0.3348	0.6482	0.2932	0.5208	0.2107
RMSE MODFLOW	0.4781	0.4507	0.4828	0.4406	0.7227	0.4865

Weiterhin wurden Tests für Extremzustände mit den in Kapitel 4.1 erzeugten Extremszenarien durchgeführt, bei denen der über die Messung abgedeckte Korridor verlassen wurde. Es zeigt sich, dass die KNN-Modelle den Messwert-Korridor nicht verlassen und es somit zu keiner Extrapolation kommt. Für das Managementtool sind jedoch auch Extremzustände relevant.

Um auch diese Bereiche mit den KNN-Modellen abdecken zu können, sollten zukünftig die Trainingsdaten mit Simulationsdaten des Grundwassermodells Donauried (Kapitel 4.2) für Extremzustände erweitert werden. Somit wird ein hybrider Ansatz aus Mess- und Simulationsdaten, welcher verschiedene Systemzustände bestmöglich abbildet, für das Training verfolgt.

#### 6.1.3 Struktur und Features des Tools Rohwasserbewirtschaftung

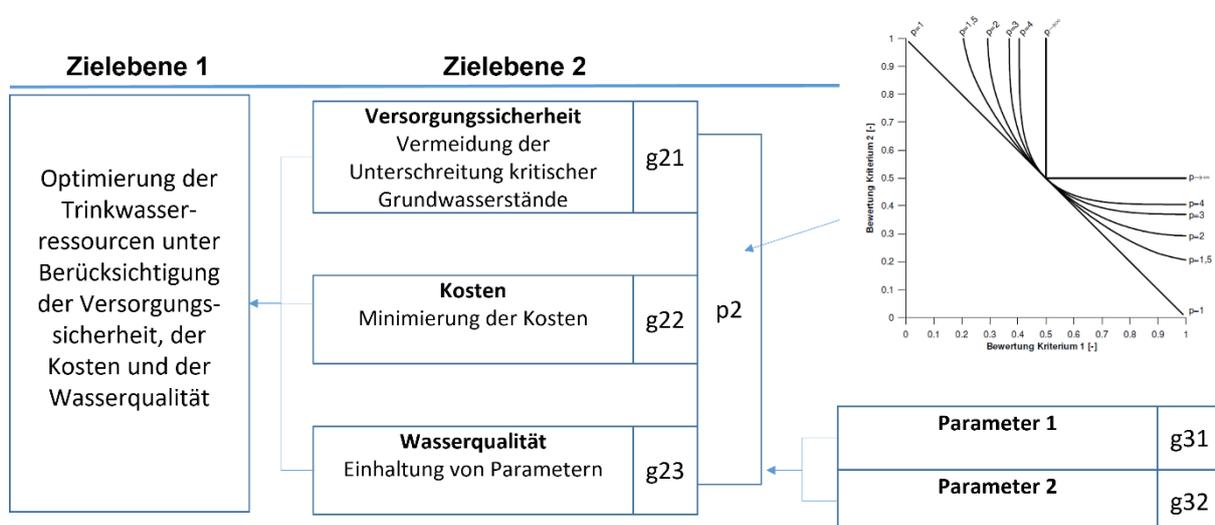
Im Folgendem wird der Aufbau und die Methodik des Managementtools erläutert. Das Managementtool wird an den Ressourcen der LW getestet, hat aber einen allgemeinen Aufbau, der die Übertragbarkeit auf die Ressourcen anderer Wasserversorger ermöglicht.

### 6.1.3.1 Bewertungsmethodik für die multikriterielle Entscheidungsfindung

Das zu erstellende Managementtool soll über eine multikriterielle Entscheidungsfindung bei gegebenen Randbedingungen eine optimale Lösung im Sinne der Kriterien Versorgungssicherheit, der ressourcenspezifischen Kosten und unter Berücksichtigung von Wasserqualitätsparametern finden. Da diese Aspekte nicht einfach vergleichbar sind, muss eine Bewertung dieser Aspekte die Umwandlung in eine für den Optimierungsalgorithmus verwertbaren Zahlenraum beinhalten.

Hierfür wird die Methodik des „Composite Programming“ (Bardossy et al. 1985) angewendet. Diese Bewertungsmethodik stellt eine Weiterentwicklung der Nutzwertanalyse zum Vergleich alternativer Zustände dar. Im Gegensatz zur Nutzwertanalyse ist die „Kompensierbarkeit“ der einzelnen Bewertungskriterien besser über spezielle Parameter steuerbar. So kann z.B. verhindert werden, dass die Versorgungssicherheit komplett zugunsten einer kostengünstigen Lösung vernachlässigt wird. Die Bewertung gliedert sich dabei in verschiedene Zielebenen und kann beliebig erweitert werden. In jeder Zielebene erfolgt eine Aggregation über Gewichtungsfaktoren. Die Zielfunktion für jede Bewertungsgröße in einer Zielebene liegt immer Wertebereich zwischen 0 (nicht erfüllt) und 1 (voll erfüllt).

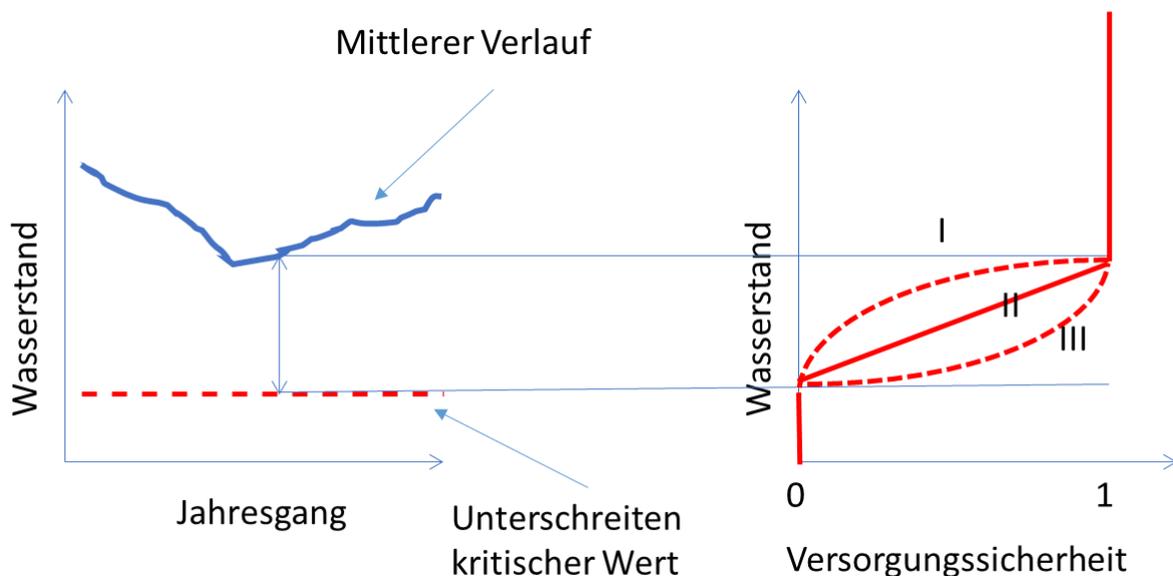
Eine notwendige Voraussetzung für die Bewertungsmethodik ist die Integrierbarkeit in bestehende Optimierungsalgorithmen. Für die Optimierung kommt die Software PEST (Parameter ESTimation, Version 13.6, zum Einsatz. Ein großer Vorteil von PEST ist, dass es unabhängig vom verwendeten Modell bzw. von der Bewertungsmethodik eingesetzt werden kann. Die Methodik des „Composite Programming“ wurde bereits erfolgreich zusammen mit PEST verwendet (Haakh et al. 2004). Mittels der in Bild 6.4 dargestellten Bewertungsmethodik kann die Optimierung erfolgen.



**Bild 6.4: Bewertungsmethodik im Managementtool mit Composite Programming**

Für Bewertungsgrößen wie die Kosten lässt sich diese Zielfunktion einfach umsetzen: Ein Wert der Zielfunktion von 0 entspräche hier, die Entnahme des geforderten Wasserbedarfs allein über die teuerste Ressource zu bewerkstelligen. Ein Wert von 1 entspricht einem Zustand, bei dem die geforderte Menge allein über die günstigste Ressource bewerkstelligt würde.

Weniger trivial verhält es sich bei der Bewertungsgröße Versorgungssicherheit. Diese muss i.d.R. anhand eines funktionellen Zusammenhangs zwischen Entnahme und einer davon abhängigen Variablen (z.B. dem Grundwasserstand) bewertet werden. 0 kann in diesem Fall ein definierter Grundwasserstand sein, dessen Unterschreitung vermieden werden soll (Bild 6.5). Im realen System kann eine Unterschreitung dieser Marke aber durchaus möglich sein. Dies stellt ein Problem für den Optimierer dar, da dieser in allen physikalisch möglichen Wertebereichen Differenzierbarkeit voraussetzt, das Composite Programming hingegen alle Zustände unterhalb dieses minimalen Grundwasserstands mit 0 bewertet.



**Bild 6.5: Zielfunktion Versorgungssicherheit an Grundwasser Fassung**

Dementsprechend müssen Nebenbedingungen eingeführt werden, welche separat zum Composite Programming bewertet werden und greifen, wenn die Bewertung mit dem Composite Programming nicht mehr differenzierbar ist. Für den Anwendungsfall der LW kann dies eine zusätzliche Funktion sein, welche anwächst, je weiter ein vorgegebener minimaler Grundwasserstand ( $h_{min}$ ) unterschritten wird:

$$Z(h) = \begin{cases} |h - h_{min}|, & h < h_{min} \\ 0, & h \geq h_{min} \end{cases}$$

Funktionen dieser Art wurden in Optimierungsbeispielen mit PEST erfolgreich implementiert und getestet.

Um betriebliche Vorgaben des Wasserversorgers zu berücksichtigen, ist die Einführung von weiteren Nebenbedingungen notwendig. So kann ein Wasserversorger vorgeben, dass die Summe der Entnahmen der Ressourcen X und Y einen gewissen Wert über- oder unterschreiten soll. Diese Art von Nebenbedingung resultiert in einer Ungleichung, bei der verschiedenen Ressourcen summarisch miteinander verknüpft sind. In der folgenden Gleichung müssen beispielhaft die Ressourcen  $R_1$  bis  $R_3$  größer als ein gewisser Minimalwert sein:

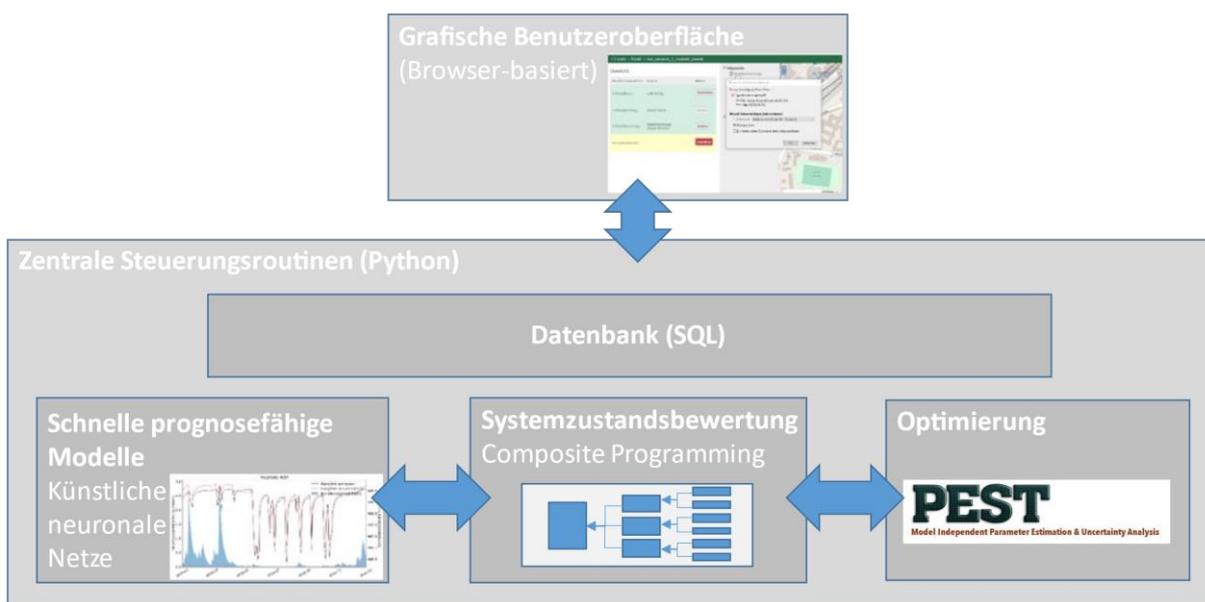
$$R_1 + R_2 + R_3 \geq \text{Minimalwert}$$

Auch diese Zusammenhänge müssen in der Optimierung berücksichtigt werden, so dass diese Kriterien eingehalten werden können. Weiterhin muss der vorgegebene Wasserbedarf eingehalten werden. Um diese Bedingungen einzuhalten, erfolgt eine Transformation der von PEST berechneten Entnahmen.

### 6.1.3.2 Aufbau des Managementtools

Die zuvor beschriebenen Komponenten (KNN-Modelle, Zielfunktionen, Nebenbedingungen und Optimierung) bilden die Grundlage des Managementtools. Eine Übersichtsgrafik der einzelnen Komponenten ist in Bild 6.6 dargestellt.

Der Wasserversorger greift über eine Web-Oberfläche auf das Managementtool zu. Dabei ist es möglich, dass verschiedene Nutzer (z.B. verschiedene Wasserversorger) parallel an ihren eigenen Systemen arbeiten können, d.h. Optimierungsläufe aufsetzen und Ergebnisse auswerten. Um dies zu gewährleisten, wurde eine Datenbankstruktur für das User- und Rechenjob-Management erstellt. Screenshots zum Managementtool sowie die Ergebnisse verschiedener Szenarien, welche mit dem Managementtool berechnet wurden, befinden sich in Anlage13.3.1.



**Bild 6.6: Aufbau des Managementtools mit seinen Komponenten**

### Fazit Managementtool zur Rohwasserbewirtschaftung

**Einsatzgebiet:** Mit Hilfe des Managementtools können Wasserversorger in Dürreperioden aber auch unter Normalbedingungen ihre verschiedenen Rohwasserressourcen optimal nutzen. Auch der zeitweise Ausfall einzelner Ressourcen kann mit dem Tool einfach umgesetzt werden. Das Tool wurde beim Projektpartner Zweckverband Landeswasserversorgung getestet.

**Merkmale:** Das Managementtool basiert auf einem neuronalen Netz zur Realtime-Prognose der Grundwasserstände. Ein darauf aufbauender Optimierungsalgorithmus berücksichtigt Versorgungssicherheit, Trinkwasserqualität sowie Gewinnungskosten. Der Wasserversorger greift über eine Web-Oberfläche auf das Tool zu und erhält eine Entscheidungshilfe welche Fassungsanlagen in welchen Umfang am effektivsten eingesetzt werden können.

## **6.2 Uferfiltration zur Erweiterung der Rohwasserressourcen**

### **6.2.1 Vorteile der Uferfiltration**

Ein Oberflächengewässer (Fluss oder See) fungiert meistens als Vorfluter, wenn Grundwasser dem natürlichen hydraulischen Gefälle folgend in Richtung Fluss bzw. See strömt. Die Uferfiltration ist ein Prozess, bei dem diese Strömungsrichtung entweder auf natürlichem oder auf künstlichem Weg umgedreht wird. Das Oberflächenwasser infiltriert dann aufgrund eines höheren Potentials im Oberflächengewässer im Vergleich zum Grundwasserleiter durch die Gewässersohle in den darunter liegenden Grundwasserkörper. In natürlichen Fällen tritt dieser Prozess nur bei hohen Pegelständen (z.B. Hochwasser) oder bei niedrigen Grundwasserständen auf. Der Uferfiltrationsprozess kann jedoch auch durch eine förderinduzierte Potentialminderung und der damit einhergehenden Grundwasserabsenkung im Aquifer künstlich hervorgerufen werden, also durch die Entnahme von Grundwasser über Brunnen im Nahbereich eines Flusses. Das in diesem Zuge geförderte Grundwasser wird auch „Uferfiltrat“ genannt, wobei dabei meist auch ein Anteil an landseitigem Grundwasser erfasst wird.

Die Uferfiltration stellt eine vergleichsweise ergiebige Trinkwasserquelle dar. Ein weiterer Vorteil aus qualitativer Sicht ist, dass während der Versickerung des Oberflächenwassers durch die Gewässersohle und im Laufe der Bodenpassage zahlreiche Prozesse stattfinden, die sich in der Regel positiv auf das Uferfiltrat und letztendlich auch auf das geförderte Rohwasser auswirken. Die biologisch aktive, jedoch in Teilen hydraulisch hemmende Kolmatationsschicht, die sich bei Niedrig- und Mittelwasser aus organischem und anorganischem Material auf und Bereich des ersten Meters unterhalb des Flussbetts bildet, spielt eine entscheidende Rolle. Hier werden aus dem versickernden Oberflächenwasser schwebende Partikel, Bakterien, Viren und Parasiten bzw. Pathogene sowie adsorbierbare und mikrobiell abbaubare, gelöste chemische Verbindungen durch eine Reihe von chemischen, biologischen und mechanischen Prozessen vollständig oder mindestens teilweise entfernt. Darüber hinaus finden hydrodynamische Prozesse und die Mischung des versickernden Oberflächenwassers bzw. Uferfiltrats mit landseitigem Grundwasser statt, wodurch zusätzlich Verdünnungseffekte auftreten. Durch diesen natürlichen Reinigungsprozess als Teil eines Multi-Barriere-Systems erreicht das entnommene Rohwasser meist beinahe Trinkwasserqualität und benötigt anschließend wesentlich einfachere und kostengünstigere Aufbereitungsmaßnahmen, bevor es in das Versorgungsnetz eingespeist wird.

Die Uferfiltratgewinnung weist eine bessere Resilienz gegenüber dem Klimawandel auf als herkömmliche Grundwassergewinnungsanlagen, da sie sowohl auf Grundwasser als auch auf Oberflächenwasser als duale Ressource zurückgreifen kann. Mit dem primären Bezug von Oberflächenwasser sind Uferfiltratgewinnungen jedoch auch besonders abhängig von

der quantitativen und qualitativen Entwicklung dieser „Uferfiltratquelle“, woraus sich insbesondere unter Berücksichtigung der bereits heute in Deutschland spürbaren Auswirkungen des Klimawandels komplexe Herausforderungen ergeben. Eine konkrete Vorhersage hinsichtlich der Klimawandelauswirkungen auf die Ergiebigkeit und Leistung von einzelnen Uferfiltratgewinnungen kann nur schwer getroffen werden. Die Gründe hierfür sind die unterschiedlichen Eigenschaften der individuellen Gewinnungsstandorte und die Unsicherheit der verschiedenen Klimaprojektionen (Masson-Delmotte, et al., 2021). Es ist jedoch grundsätzlich damit zu rechnen, dass insbesondere steigende Temperaturen und vermehrt vorkommende sowie ausgeprägtere Extremwetterereignisse zukünftig quantitativ und qualitativ negative Folgen für die Uferfiltratgewinnung haben können. Diese können sich auf die Gewinnungskapazitäten (Quantität) sowie auf die Reinigungsprozesse bei der Uferfiltration (Qualität) auswirken, womit insbesondere extreme Ereignisse wie intensive Niedrigwasserphasen in parallel bedarfsreichen Sommern oder große Hochwasserwellen eine komplexe Herausforderung für die Wasserversorgung aus Uferfiltrat darstellen (Sprenger, et al., 2011).

### 6.2.2 *Wissenschaftlich-technische Entscheidungshilfen zur Erweiterung Uferfiltration*

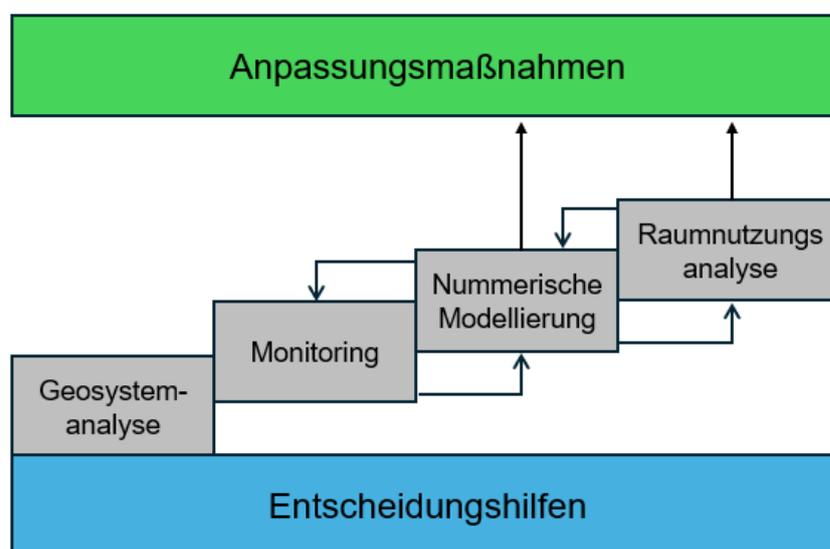
Die bereits spürbaren und künftig zu erwartenden Klimawandelfolgen bedeuten große Herausforderungen für die dauerhafte Sicherung der öffentlichen Trinkwasserversorgung. Vor diesem Hintergrund ist die Stärkung der Resilienz der klassischen Infrastruktur der öffentlichen Trinkwasserversorgung (Förder-, Aufbereitungs- und Verteilungsanlagen) im Klimawandel unumgänglich. Mit Blick auf die Trinkwassergewinnung mittels Uferfiltratanlagen kann diese Resilienzsteigerung unter anderem erreicht werden durch:

- die Überbohrung bestehender Wasserfassungen und dem Neuausbau mit größerem technischem Fassungsvermögen
- die Erweiterung bestehender Uferfiltratgewinnungen durch eine Infiltrationsstützung
- die Erweiterung bestehender Uferfiltratgewinnungen durch Brunnenneubau
- durch die Etablierung neuer Gewinnungsstandorte
- Etablierung von Verbundsystemen

Insbesondere die Kombination dieser aufgeführten Maßnahmen kann eine adäquate Anpassungsstrategie für klimawandelinduzierte Extremwetterereignisse darstellen und die Etablierung innovativer Bewirtschaftungskonzepte ermöglichen. Die Anwendung verschiedener Anpassungsmaßnahmen im Rahmen eines solchen Konzeptes gewährleistet außerdem, dass den unterschiedlichen Standortbedingungen Rechnung getragen und dahingehend eine flexible Betriebsweise ermöglicht werden kann.

Für die Entwicklung und Umsetzung solcher Konzepte sind Entscheidungshilfen notwendig (Bild 6.7), um eine effiziente Steigerung der wasserwirtschaftlichen Resilienz unter Berücksichtigung aller betroffenen wasserwirtschaftlichen Akteure und realistischer Klimaszenarien zu ermöglichen. Zu diesen Entscheidungshilfen zählen eine möglichst detaillierte Erforschung der geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften und Gegebenheiten des örtlichen Geosystems (**Geosystemanalyse**) sowie ein an Extremereignisse angepasstes **Monitoring** der Wasserressourcen und der bislang genutzten Anlagen. Eine weitere Entscheidungshilfe stellen **numerische Modelle** dar, in die diese gewonnenen Informationen einfließen und mit denen die Auswirkungen bestehender und neuer Anlagen sowie der Betrieb unter verschiedenen Zukunftsszenarien untersucht werden können. Eine weitere elementare Hilfe bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen können **Raumnutzungsanalysen** und der Dialog zwischen den in dem Vorhabengebiet tätigen Akteuren (zum Beispiel Land- und Forstwirtschaft, Natur- und Hochwasserschutz) darstellen. Dies kann möglichen Interessenskonflikten und Umsetzungsschwierigkeiten entgegenwirken. Das Ziel ist die Gestaltung nachhaltiger Anpassungsmaßnahmen mit der Chance, Mehrwerte für alle wasserabhängige Systemkompartimente und ein gemeinsames Verständnis für die Klimawandelfolgen und das Geosystem zu schaffen.

Die genannten Entscheidungshilfen Geosystemanalyse, Monitoring, numerische Modellierung und Raumnutzungsanalyse bauen einerseits aufeinander auf, ergänzen sich andererseits gegenseitig und sind als fortlaufender Prozess zu verstehen (Bild 6.7). Mit den erzielten Ergebnissen können bestehende Gewinnungen weiter- oder neue Bewirtschaftungskonzepte entwickelt werden. Dieser Weg wurde im Rahmen des Projekts am Beispiel der Gewinnungen Bodenheim und Guntersblum der wvr verfolgt, wodurch ein innovatives Bewirtschaftungskonzept nördlich der Gewinnung Guntersblum entwickelt und näher beleuchtet werden konnte. Dieses Konzept sieht eine neue infiltrationsgestützte Uferfiltratgewinnung entlang des Rheinufers nördlich der bestehenden Uferfiltratgalerie in Guntersblum vor. Diese „Nordgalerie“ wird im späteren Verlauf dieses Abschnittes detailliert vorgestellt. Zuvor wird im Folgenden die Anwendung der aufgeführten Entscheidungshilfen am Beispiel des Entwicklungsprozesses des Konzepts „Nordgalerie“ zusammenfassend erläutert.



**Bild 6.7:** Entscheidungshilfen zur Konzeptentwicklung für Klimawandelanpassungsmaßnahmen in der Wasserversorgung

### Entscheidungshilfe: Geosystem- und Bestandsanalyse

Das Versorgungsgebiet der wvr ist durch verschiedene Grundwasserkörper aufgebaut, die auf Grund ihrer geologischen Eigenschaften unterschiedlich gut für die Trinkwasserversorgung geeignet sind (Tabelle 6.2). Dies begründet sich zum einen durch die wasserwirtschaftliche Ergiebigkeit und zum anderen aufgrund der Sensitivität gegenüber den bereits heute spürbaren Folgen des Klimawandels. Eine wesentliche Bedeutung für die Trinkwasserversorgung weisen dabei nur die quartären Sedimente des „Rheinaquifers“ im Norden und im Osten des Versorgungsgebietes auf. Aus diesem Grund liegt der Fokus der wvr für wasserwirtschaftliche Anpassungen primär auf diesem Porengrundwasserleiter und dabei insbesondere auf den bestehenden Uferfiltratanlagen der Gewinnungen Bodenheim und Guntersblum.

Die größte Gewinnungsanlage der wvr mit einem Fördervolumen von rund 11 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr ist die Uferfiltratgewinnung Guntersblum. Sie befindet sich ebenso wie die Gewinnung in Bodenheim am Ufer des Rheins und wurde im Jahr 1999 in Betrieb genommen. Sie umfasst zehn Brunnen, welche rund 60 m tief sind und in einem Abstand von 60 m zueinander stehen - eine sogenannte „Brunnengalerie“. Sie liegen außerdem in rund 180 m Entfernung zur Rheinmitte. Das Uferfiltrat wird dabei zwischen 30 und 60 m Tiefe aus dem oberen Grundwasserleiter entnommen und setzt sich aus ca. 10 bis 20 % landseitigem Grundwasser und 80 bis 90 % uferfiltriertem Rheinwasser zusammen.

Die Uferfiltratanlage Bodenheim wird seit 1996 betrieben. Das dort gewonnene uferfiltrierte Grundwasser wird ebenfalls in einer Galerie aus zehn Brunnen gefördert, die sich in ca. 210

m Entfernung zur Rheinmitte befinden. Die Brunnen sind zwischen 11 und 14 m tief, mit denen ca. 950 000 m<sup>3</sup> Wasser pro Jahr gewonnen werden, welches sich primär aus uferfiltriertem Rheinwasser zusammensetzt.

**Tabelle 6.2: Grundwasserlandschaften im Versorgungsgebiet der wvr und spezifische Eigenschaften (rlp, 2003; verändert)**

Grundwasserlandschaft	Flächenanteil in %	Art Grundwasserleiter	Grundwasserneubildung (Stand 2000) in %			Wasserwirtschaftliche Bedeutung	Klimawandelresilienz
			Randzufluss	Uferfiltrat	Niederschlag		
Quartäre Sedimente	21	Poren	16	64	20	groß	mittel
Tertiäre Mergel & Tone	47	Poren/Kluft	-	-	100	keine	gering
Tertiäre Kalksteine	26	Kluft/Karst	-	-	100	Nur lokal	gering
Rotliegend-Sedimente	6	Kluft	-	-	100	Nur lokal	gering

In den beiden Uferfiltratgewinnungsgebieten in Guntersblum und Bodenheim der wvr wurde die Geosystem- bzw. Bestandsanalyse mithilfe öffentlich zur Verfügung stehenden Kartenwerken und mittels der von der wvr bereitgestellten Informationen wie Bohrdaten, Betriebs- und Monitoringdaten sowie mit Hilfe von Ergebnissen aus geophysikalischen und hydrogeologischen Untersuchungen, durchgeführt. Ziel war ein besseres Verständnis für die vorherrschenden Verhältnisse, auf dem die weitergehenden Untersuchungen und Entwicklungen fußt. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Eigenschaften der Grundwasserkörper im Umfeld der Gewinnungen Bodenheim und Guntersblum kann Tabelle 6.3 entnommen werden.

**Tabelle 6.3: Wichtigste geologisch-hydrogeologische Merkmale der Grundwasserleiter**

	<b>Guntersblum</b>	<b>Bodenheim</b>
Grundwasserleitertyp	Porengrundwasserleiter (Quartär)	
Räumliche Ausbreitung des Aquifers	3-4 km von der Rheingrabenstörung (West) bis zum Rhein (Ost)	2,5 km von der Rheingrabenstörung (West) bis zum Rhein (Ost)
Aquifermächtigkeit	ca. 60 m	ca. 10 m
Aquiferbasis	toniger Zwischenhorizont (Pliozän)	
Geologischer Aquiferaufbau	überwiegend Sande und Kiese mit tonig-schluffigen Zwischenlagerungen (tlw. Stockwerkbildung)	
Ergiebigkeit	hoch	
Hydraulische Eigenschaften	räumlich stark heterogen	
Grundwasserströmung	von Westen nach Osten auf den Rhein gerichtet	
Zustrom	aus dem westlichen Kalk/Mergelertär; aus dem Rhein bei Hochwasser	
Grundwasserneubildung	sehr gering (0-50 mm/Jahr)	
Flächennutzung	landwirtschaftlich geprägt mit geschützten Naturräumen	landwirtschaftlich geprägt mit geschützten Naturräumen und Siedlungsflächen

**Entscheidungshilfe: Monitoring**

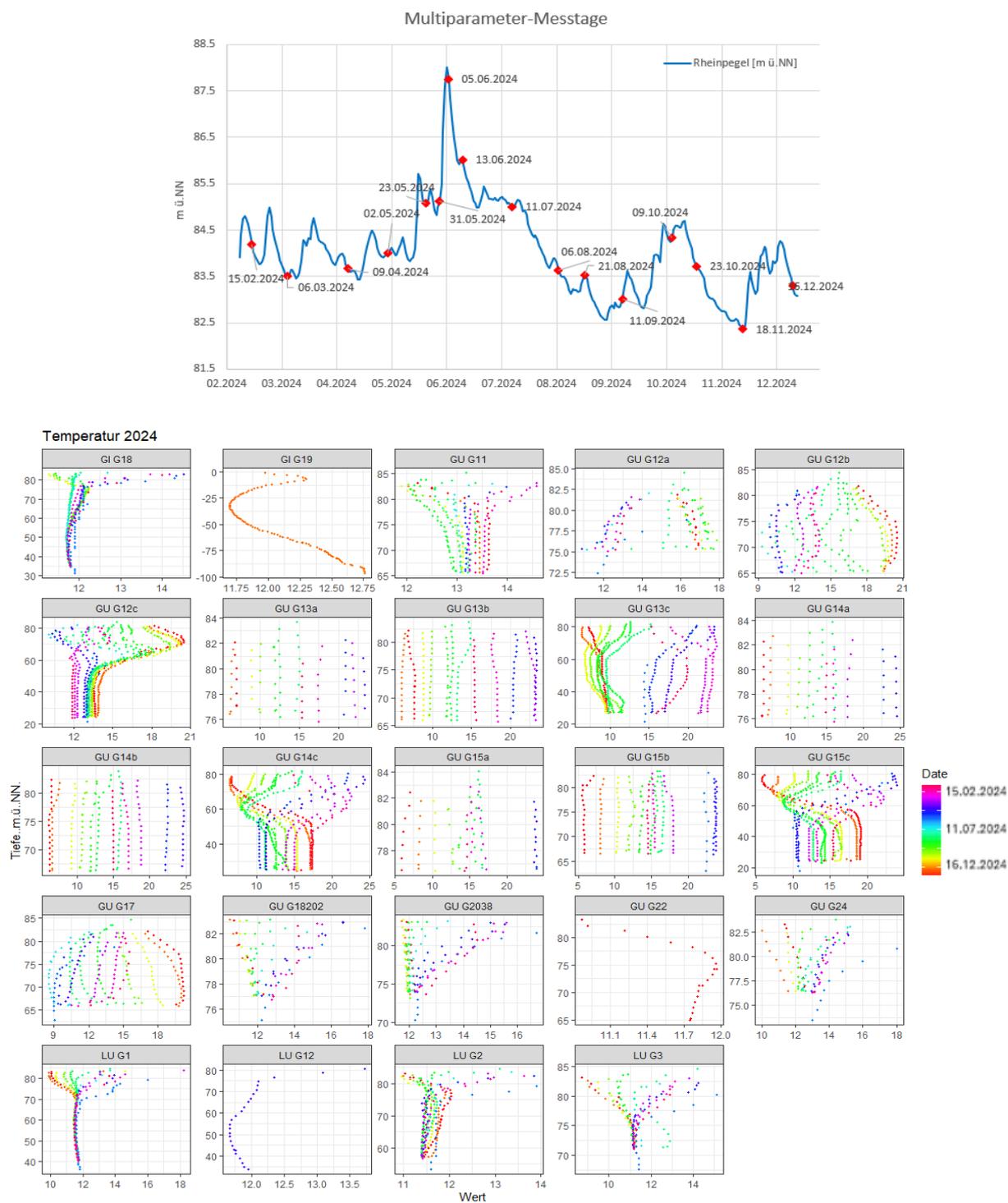
Die Überwachung der hydrogeologischen und hydrochemischen sowie der betrieblichen Parameter zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Grund- und Oberflächenwässern ist von wesentlicher Bedeutung. In diesem Zusammenhang betreibt die wvr ein gut ausgebautes Monitoringsystem. Im Rahmen dieses Projekts wurde dieses unter Berücksichtigung von Extremereignissen (Niedrig- und Hochwasser) weiterentwickelt und diente als Grundlage für die numerische Modellierung und die weiteren Analysen.

Neben einer umfangreichen Probenahmekampagne wurde der Einbau von Messtechnik (Datenlogger) in Grundwassermessstellen zur Messung der Wasserstände und qualitativer Daten wie Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit forsiert sowie die Methoden zur Erfassung der Wasserbeschaffenheit um „Messstellen- und Brunnen-Logs“ erweitert. Hierbei werden mit Hilfe einer Sonde in regelmäßigen Tiefenabständen unterschiedliche Qualitätsdaten erhoben. Dabei können unter Verwendung einer s.g. „Multiparametersonde“ neben

der Leitfähigkeit und Temperatur auch Parameter wie Sauerstoff, Redoxpotential oder pH-Wert erfasst werden (Bild 6.8). Durch monatliche und wöchentliche Messungen dieser Logs konnten Hoch- und Niedrigwasserphasen sowie deren Auswirkungen detailliert und standortspezifisch erfasst werden. Entscheidender Vorteil dieser Messmethode ist die vergleichsweise kosteneffiziente und schnelle Erfassung wesentlicher Qualitätsparameter, die zur Indikation von Veränderungen durch Extremwetterereignisse im Grund- und Rohwasser herangezogen werden können. Darüber hinaus können hydrochemische Schichtungen und unterschiedliche Zustromverhältnisse im Grundwasser gemessen und die Auswirkungen einer potenziellen Grundwasseranreicherung überwacht werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Uferfiltration gegenüber Hoch- und Niedrigwasserphasen eine robuste Trinkwassergewinnungsmethode darstellen kann. Dabei können auch bei geringer mächtigen Grundwasserleitern wie im Raum Bodenheim die Reinigungsprozesse ausreichen, um selbst bei Extremwetterereignissen für eine gute Rohwasserqualität zu sorgen. Die Ergebnisse deuten zudem darauf hin, dass in diesem Zusammenhang die Fließzeit einen wesentlichen Einfluss auf die Rohwasserbeschaffenheit hat.

Anhand der Grundwasserstandsdaten ist weiterhin zu beobachten, dass der landseitige Bereich des Rheinaquifers gegenüber dem in Rheinnähe und im Bereich der Uferfiltratbrunnen ein deutlich trägeres System ist, da er weniger dynamisch auf die Entwicklung des Rheins reagiert, weshalb auch die Messintervalle beispielsweise bei Datenloggern in Grundwassermessstellen an dieses unterschiedliche Systemverhalten angepasst werden sollte (Beispiel-Messintervall: dynamisches System im Nahbereich von Uferfiltratbrunnen: 15-Minuten; trägeres System mit Abstand zum Flussufer: 60-Minuten). Für beide vereinfacht beschriebenen Teilbereiche können Wetterextreme mittel- bis langfristige Auswirkungen auf den quantitativen Grundwasserzustand haben. Besonders intensive Hitzejahre, wie die Jahre 2003, 2018 und 2022, scheinen zu einer deutlich stärkeren, teilweise „stufenförmigen“ Abnahme der Grundwasserstände in vergleichsweise kurzer Zeit zu führen.



**Bild 6.8:** Oben: Stichtagsmessungen mittels Multiparametersonde im Umfeld der Gewinnung Guntersblum im Zusammenhang mit dem Rheinpegelverlauf. Unten: Exemplarisches Ergebnis einer Multiparameter-Stichtagsmessung.

## **Entscheidungshilfe: Numerische Modellierung**

Die numerische Modellierung ist eine gängige Methode zur Untersuchung und Visualisierung der hydraulischen und hydrochemischen Situation. Sie dient als wichtige Entscheidungshilfe für die Erarbeitung und Umsetzung von Betriebs- und Bewirtschaftungskonzepten unter Berücksichtigung von Klimawandelszenarien.

Aus diesem Grund wurde auf Basis der Geosystem- und Bestandsanalyse sowie mittels Monitorings gewonnener Daten und Erkenntnisse für die untersuchten Gewinnungsstandorte jeweils ein komplexes hydrodynamisches Modell aufgebaut. Dieses bildet den geologischen Aufbau des jeweiligen Untergrunds und die hydrologischen Gegebenheiten detailliert ab. Es wurden mehr als 160 Bohrdaten digitalisiert, standardisiert und ausgewertet. Die Modellgebiete umfassen die Wassergewinnungen und deren weitere Umgebung sowie das Konzept der geplanten „Nordgalerie“. Im Westen werden die Modelle durch die Rheingrabenstörung und im Osten durch den Rhein begrenzt, die untere Grenze bildet der tonige pliozäne Zwischenhorizont. Die vertikale Diskretisierung richtet sich nach dem geologischen Aufbau. Horizontal wurde das Gitternetz der Modelle im Bereich der Gewinnungsanlagen und entlang des Rheins bis auf 10 Meter verfeinert.

Die Modelle wurden für zwei Extremwettersituationen kalibriert: Niedrigwasser und Dürre im Jahr 2018 sowie Hochwasser im Jahr 2013. Um den zeitlichen Ablauf der Änderungen der hydraulischen Situationen zu erfassen, wurden neben stationären auch transiente Modellvariationen erarbeitet.

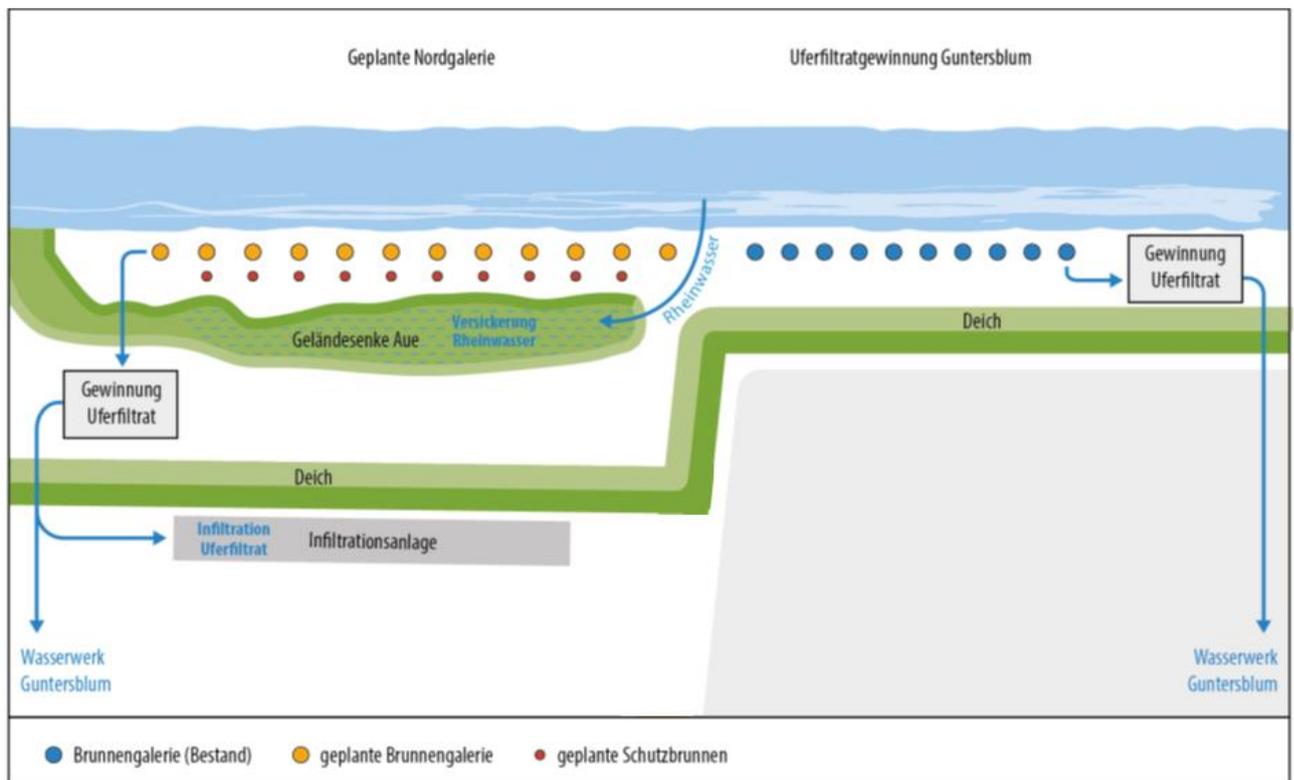
## **Entscheidungshilfe: Raumnutzungsanalyse**

Die wvr hat im Zuge der Entwicklung einer Anpassungsmaßnahme in Form des Bewirtschaftungskonzeptes „Nordgalerie“ im Raum Guntersblum eine Raumnutzungsanalyse durchgeführt, um alle betroffenen Akteure zu erfassen und um das Konzept möglichen Konflikten im Vorfeld anzupassen. Wesentliche Stakeholder umfassen dabei die Naturschutz- und Wasserbehörden, Naturschutzverbände, Vertreter im Bereich Hochwasserschutz, Winzerverbände sowie die Forst- und Landwirtschaft. Auf dieser Analyse aufbauend wurde ein Stakeholder-Workshop entwickelt, in dem das Gespräch mit diesen und allen weiteren vom Vorhaben betroffenen Akteuren gesucht werden soll, wobei die Moderation durch das IWW als von der wvr als Vorhabenträger unabhängige Instanz erfolgt. Der Workshop wird voraussichtlich im Anschluss an das Projekt stattfinden.

### 6.2.3 Neues Bewirtschaftungskonzept: „Nordgalerie“

Mit Unterstützung der beschriebenen Entscheidungshilfen wurde durch die wvr ein Bewirtschaftungskonzept in Form einer neuen infiltrationsgestützten Uferfiltratgewinnung erarbeitet, um den Auswirkungen durch den Klimawandel und durch Extremereignisse Rechnung zu tragen. Das Konzept dieser „Nordgalerie“ sieht die Etablierung von 10 neuen Uferfiltratbrunnen nördlich der bestehenden „Südgalerie“ in Guntersblum vor (Bild 6.9). Diese Galerie könnte einerseits die bestehenden Brunnen im Süden entlasten und andererseits die Gesamtförderkapazitäten aus dem Rheinaquifer nachhaltig erhöhen, in dem die Wasserförderung der Nordgalerie durch eine landseitige künstliche Infiltration über zwei Systeme gestützt werden könnte. Dabei ist einerseits vorgesehen, über einen ehemaligen Flusslauf des Rheins („Altarm“), der heute überwiegend trockengefallen ist, Wasser aus dem Rhein naturnah über die belebte Bodenzone zur Versickerung zu bringen und so das Grundwasser indirekt anzureichern sowie die Absenkung durch die geplante Nordgalerie zu puffern. Zum anderen sieht das Konzept vor, ein Infiltrationsorgan in Form eines Grabens landseitig hinter dem Rheinhauptdeich zu installieren. Dort könnte das Grundwasser im Winterhalbjahr, in Zeiten geringeren Bedarfs, direkt mit voraufbereitetem Uferfiltrat angereichert werden, um auf diesem Weg einen „Saisonalspeicher“ zu etablieren. Dieser würde die Möglichkeit bieten, langfristig im Sommer den landseitigen Grundwasseranteil im Rohwasser der Nordgalerie durch Uferfiltrat zu kompensieren, sodass das Quellwasser der Nordgalerie primär aus dem Rhein stammt und die Grundwasserressourcen geschont werden. Mittels dieser Maßnahmen könnte daher nicht nur die Wasserversorgung in Extremwettersituationen gesichert, sondern auch die Nachhaltigkeit und die Minimierung potenzieller negativer Auswirkungen einer Wasserentnahme auf die Landökosysteme gewährleistet werden. Neben diesen können weitere Mehrwerte für die Landwirtschaft in Form einer möglichen Bereitstellung von Beregnungswasser geschaffen werden.

Das Konzept der Nordgalerie beinhaltet außerdem eine Erweiterung in Form eines „Schutzbrunnenkonzepts“, welches den Bau weiterer 10 „Schutzbrunnen“ im unmittelbaren landseitigen Vorfeld der 10 zuvor erwähnten, „Hauptbrunnen“ vorsieht. Diese sollen jedoch deutlich flacher ausgebaut werden und dienen in erster Linie der Förderung von oberflächennahem Grundwasser in Hochwasserphasen, wenn das Umfeld der Nordgalerie überflutet ist. In diesem Fall könnten die Schutzbrunnen potenziell mit Stör- und Schadstoffen kontaminiertes Oberflächen- und Uferfiltratwasser „abpumpen“ und in den Rhein einleiten, damit dieses Wasser nicht den tieferen „Hauptbrunnen“ zuströmen kann.



**Bild 6.9: Konzept der infiltrationsgestützten Nordgalerie als Klimawandelanpassungsmaßnahme**

## Modellierung Zukunftsszenarien

Das Konzept der Nordgalerie als Klimawandelanpassungsmaßnahme erfordert die Berechnung zahlreicher Szenarien, da das Gewinnungs- und Betriebsdesign sehr komplex ist. Die Umsetzung und die möglichen Auswirkungen des Nordgaleriekonzeptes wurden daher im Rahmen des Projekts mit Hilfe des stationären bzw. instationären Modells untersucht. Die Randbedingungen bei der Modellierung wurden dabei möglichst vereinfacht, in dem die Grundwasserneubildung konstant gehalten und die Grundwasserstände auf historisch gemessenen Daten beruhen. Es ist davon auszugehen, dass der Rheinpegel der dominierende natürliche Faktor im System ist, weshalb in diesem Fall zwar ebenfalls auf historische Zeitreihen als Szenariengrundlage zurückgegriffen wurde, diese jedoch zusätzlich modifiziert wurden. Dieses Verfahren wurde auch auf die Fördermengen angewendet, um das Verbraucherverhalten und der zukünftige Bedarf bestmöglich widerspiegeln zu können. Die Grundwasseranreicherungsmengen wurden für die Berechnungszeiträume konstant angenommen.

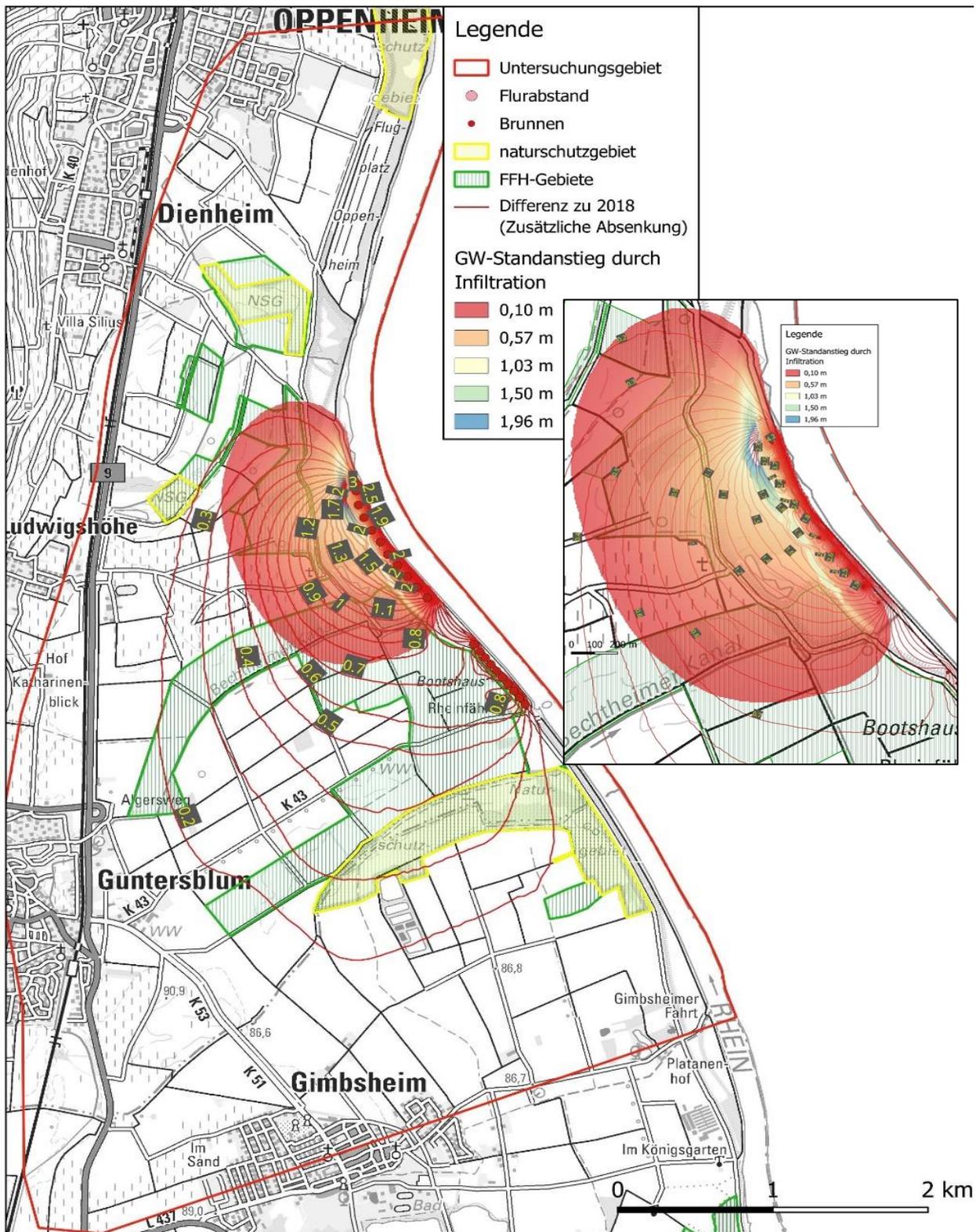
## Modellergebnis eines Klimawandelszenarios

Das folgende Beispielszenario für die konzipierte Kombination der bestehenden Uferfiltratgewinnung mit der geplanten Nordgalerie in Guntersblum simuliert eine langanhaltende Dürreperiode mit parallelem Rheinniedrigpegelstand. Dieses realistische Klimawandelszenario basiert auf den historischen Rheinpegelständen aus dem Jahr 2018 mit einer Gesamtförderrate von 30 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr, gleichmäßig verteilt auf die Süd- und Nordgalerie. In dem Szenario wurde ein Klimawandelfaktor eingebaut, indem der bisher gemessene niedrigste Rheinpegelstand (20.10.2018) um vier Wochen konstant verlängert wurde. Über die Geländesenke (alter Rheinarm) landseitig der geplanten Nordgalerie wurden 500 m<sup>3</sup>/h Wasser in den Aquifer ab dem Unterschreiten des mittleren Niedrigpegelstandes (46 cm bei Pegel Worms, Betrachtungszeitraum: 01.11.2010-31.10.2020) des Rheins ungefähr 10 Wochen lang infiltriert. Dieses Infiltrationsvolumen entspricht etwa der Größenordnung, die landseitiger bestehender Südgalerie zuströmt. Das Ziel der Szenarienberechnung war das Verstehen und die Visualisierung der Effekte und Auswirkungen der Infiltration (Bild 6.10).

Die Modellergebnisse (Isolinien) zeigen die Absenkungen am Ende des um vier Wochen verlängerten Zeitraums im Vergleich zur Periode 2018. Im Bereich der Nordgalerie (keine Förderung in 2018) können über 3 Meter Grundwasserabsenkungen verzeichnet werden. Im Bereich der Südgalerie wurden 70-80 cm zusätzliche Absenkungen simuliert. In 1 km Entfernung zu den Brunnen wurden 40-50 cm Absenkungen im Vergleich zum Jahr 2018 modelliert.

Die schattierte Fläche zeigt das Ausgleichspotential der Infiltration über den alten Rheinarm. In dem Bereich der Geländesenke wurden die Grundwasserabsenkungen um bis zu 2 Meter reduziert. Landseitig der Senke fallen die Absenkungen infolge der Infiltration um 0,5-1 m geringer aus. In größerer Entfernung (bis zu 1 km) vom Infiltrationsort erreicht die Maßnahme einen Absenkungsausgleich von 10-50 cm.

Die Modellergebnisse zeigen, dass eine Infiltration selbst bei extrem hohen Förderraten und bei Dauerniedrigpegelstand des Rheins zur Verbesserung der hydrologischen Verhältnisse in Bezug auf das bestehende Ökosystem führen und dort die förderbedingten Grundwasserabsenkungen durch die Nordgalerie wesentlich kompensieren könnte. Die Stabilisierung der Grundwasserstände wirkt sich somit positiv auf die Versorgungssicherheit und gleichzeitig auf die Flora und Fauna aus.



**Bild 6.10:** Exemplarisches Ergebnis für ein Szenario, welches die positiven Auswirkungen einer Infiltrationsstützung auf die Grundwasserstände im Bereich der geplanten Nordgalerie und sensibler Naturräume selbst unter ungünstigen Verhältnissen zeigt

Die durch die Nordgalerie potenziell zusätzlich bereitgestellten Förderkapazitäten könnten ebenfalls zur Bereitstellung von landwirtschaftlichen Beregnungswasser genutzt werden, sodass die landseitigen Grundwasserressourcen zusätzlich geschont und Wasser in der Landschaft zurückgehalten werden. Dieser positive Effekt ist im zuvor gezeigten Beispielszenario (Bild 6.10) noch nicht enthalten. Es jedoch zu erwarten, dass unter diesen Rahmenbedingungen die Grundwasserstände über das in Bild 6.10 gezeigte Maß hinaus stabilisiert werden könnten.

Die Ziele der Nordgalerie sind vielschichtig und involvieren zahlreiche Akteure. Die Schaffung der geplanten Mehrwerte für die wasserabhängigen Kompartimente basiert daher auch auf vielen komplexen Zusammenhängen, die bislang meist getrennt voneinander betrachtet wurden, obwohl sie unmittelbar zusammenhängen. Aus diesem Grund kann beim Nordgaleriekonzept als Klimawandelanpassungsmaßnahme für die Trinkwasserversorgung auch von einem „Integriertem Gebietswassermanagementkonzept“ zur Lösung von Klimawandel getriebenen Nutzungskonflikten gesprochen werden. Darüber hinaus könnte die Nordgalerie auch als eine der tragenden Säulen eines überregionalen Verbundsystems etabliert werden und einen Beitrag zur Umsetzung der Nationalen Wasserstrategie des Bundes beitragen.

## Fazit Uferfiltration zur Erweiterung der Rohwasserressourcen

**Einsatzgebiet:** Die Uferfiltratgewinnung weist prinzipiell eine bessere Resilienz gegenüber hydrologischen Extremereignissen auf als herkömmliche Grundwassergewinnungen, da sie sowohl auf Grundwasser als auch auf Oberflächenwasser als Ressource zugreifen kann. Am Beispiel der Wasserversorgung Rheinessen-Pfalz GmbH wurde gezeigt, welche Potentiale eine mögliche Erweiterung der Rohwasserfassung durch Uferfiltration bietet.

**Merkmale:** Auf Basis einer Geosystem- und Bestandsanalyse, eines Monitorings von Grundwasserständen und Indikatorparametern zur Grundwasserbeschaffenheit wurde eine numerische Modellierung zur Visualisierung der hydraulischen Verhältnisse und zur Modellierung von Zukunftsszenarien vorgenommen. Daraus wurden neue Bewirtschaftungskonzepte wie eine infiltrationsgestützte Uferfiltratgewinnung abgeleitet. Diese könnte die Grundlage für ein integriertes Gebietswassermanagement darstellen, mit dem die Trinkwasserversorgung auch in hydrologischen Extremzeiten nachhaltig und langfristig sichergestellt werden kann. Zusätzlich ist die Schaffung von Mehrwerten möglich, in dem Wasser für die Landwirtschaft bereitgestellt sowie durch die Stabilisierung der Grundwasserstände negativen Auswirkungen des Klimawandels auf wasserabhängige Ökosysteme entgegengewirkt werden könnte.

## **6.3 Stärkung der Resilienz des Trinkwasser-Verteilnetzes**

### **6.3.1 Optimierungmodell zur Behebung der Vulnerabilitäten im Wasserversorgungssystem**

Das Trinkwasserversorgungssystem in Deutschland ist für die öffentliche Gesundheit und Sicherheit von entscheidender Bedeutung. Klimabedingte Extremereignisse, wie Dürren und Überschwemmungen, stellen erhebliche Herausforderungen für die Widerstandsfähigkeit des Systems dar. Die damit verbundenen veränderten Rahmenbedingungen, wie längere Trockenperioden, gekoppelt mit einer ständig steigenden Nachfrage bei gleichzeitig sinkenden Rohwasserressourcen stellen Herausforderungen dar und bieten gleichzeitig eine Chance zur Verbesserung der traditionell gewachsenen Strukturen der Wasserversorgung. Mit Hilfe des Optimierungmodells können Lösungen und Empfehlungen zur Optimierung des Trinkwasserversorgungssystems abgeleitet werden, indem Schwachstellen im derzeitigen Trinkwasserspeicher- und -verteilungsnetz identifiziert werden, insbesondere fehlende Behältervolumina und nicht vorhandene Redundanzen, welche durch Aufzeigen kostenoptimierter Zubaumaßnahmen behoben werden können. Das Ziel ist es, die Versorgungssicherheit durch entsprechende Zubaumaßnahmen im Netz zu erhöhen und die Trinkwasserversorgung unter Normalbedingungen, aber auch bei Extremereignissen uneingeschränkt zu gewährleisten. Die Ziele der Optimierung werden wie folgt zusammengefasst:

- Identifizierung und Behebung von Schwachstellen im aktuellen Versorgungsnetz, speziell in Speicher- und Transportsystemen
- Untersuchung von Optionen zur Schaffung redundanter Verbindungen bestehender Versorgungszonen mithilfe eines mathematischen Optimierungmodells, um die Ausfallsicherheit der Versorgungszonen zu verbessern, außerdem die kostenoptimierte Platzierung von empfohlenen Zubaumaßnahmen
- Gewährleistung der Versorgungssicherheit unter verschiedenen Versorgungssituationen und klimatischen Extremszenarien durch eine optimierte dynamische Steuerung

### **6.3.2 Methodik**

Um ein Optimierungmodell für das betrachtete Gebiet zu erstellen und eine Sensitivitätsanalyse des untersuchten Versorgungssystems durchzuführen, um Vulnerabilitäten im Netz zu identifizieren aber auch kostenoptimale Ausbaumaßnahmen zur Behebung dieser Vulnerabilitäten und optimale dynamische Steuerungen zu bestimmen, wurden folgende Schritte unternommen:

Zur Durchführung von Vulnerabilitäts- und Sensitivitätsanalysen sowie Simulationen und zur Aufstellung zugehöriger Optimierungsmodelle ist eine Vielzahl relevanter Daten nötig, angefangen von den technischen Netzdaten bis hin zu Verbrauchsdaten und Prognosewerten. Die sorgfältige Identifizierung der benötigten Daten bildet die Grundlage für eine präzise Modellierung und Analyse, die es ermöglicht, sowohl den aktuellen Netzzustand zu bewerten als auch zukunftsorientierte Lösungsstrategien zu entwickeln. Eine methodische Herangehensweise an die Datenerhebung stellt sicher, dass sowohl die Effizienz als auch die Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen im Fokus stehen.

Zu Projektbeginn lagen die notwendigen Daten teilweise in unterschiedlicher Form und in unterschiedlichen Datenbanken vor. Deshalb wurden Sichtung, Konsolidierung und Zusammenführung der Daten vorgenommen, so dass alle relevanten Daten abschließend in einer GIS-Datenbank zur Verfügung standen und aus dieser zur weiteren Verwendung automatisiert extrahiert werden können. Eine gute Datenhaltung mit klarer Struktur und Dokumentation der enthaltenen Größen ermöglicht dabei auch eventuell später erst aufkommenden Datenanforderungen flexibel und in transparenter Form zu begegnen.

Darüber hinaus wurden Sicherheitsszenarien der quantitativen und qualitativen Beeinträchtigung der Wasserversorgung definiert, um die Rahmenbedingungen der weiteren Arbeiten und die Risikobewertung der Klimaauswirkungen insbesondere langer, heißer Trockenphasen, auf Dargebot und Bedarf festzulegen.

Im nächsten Schritt wurden die Abhängigkeiten zwischen dem (natürlichen Roh-) Wasserdargebot („Dargebot“), der (technischen) Kapazität zur Trinkwasserbereitstellung („Kapazität“) und der Trinkwasserentnahme („Bedarf“) hergestellt und deren Auswirkungen auf das Optimierungsmodell herausgearbeitet.

Um die definierten Szenarien als Eingangsparameter für die Validierung des Optimierungsmodells nutzen zu können, war eine quantitative Konkretisierung hinsichtlich entsprechender Kapazitäten notwendig, unterteilt in Gewinnung, Transport, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung. Dafür wurden die jeweils technischen Kapazitätsgrenzen des betrachteten Versorgungssystems ermittelt und quantitativ mit den Szenarien kombiniert. So konnte eine repräsentative Szenarienmenge entwickelt werden, welche zur Validierung des Optimierungsmodells herangezogen wurde. Der Fokus lag dabei auf verändertem Bedarf, also der Wasserabnahme durch die Verbraucher, entsprechend den betrachteten Klimaszenarien. Hierfür wurden entsprechende Lastfälle definiert und die Ganglinien als dynamische Entnahme an den Behälterabgängen als wirkende Bedarfe für die Optimierung angenommen.

Zur maschinellen Verarbeitung wurden die gesichteten GIS-Daten der untersuchten Trinkwassernetze in ein äquivalentes Knoten-Kanten-Modell überführt, welches die Topologie

der Netzelemente (Rohrleitungen, Verzweigungen, Behälter, Pumpen, Ventile...) in einer vereinfachten Form darstellt. Zudem wurden relevante Parameter der jeweiligen physischen Elemente aus den GIS-Datenbanken auf die entsprechenden Knoten und Kanten übertragen. So erhält beispielsweise eine Kante, die ein Rohr darstellt, unter anderem die Länge und den Durchmesser des repräsentierten Rohres.

Modelliert wurden unter anderem das Behältervolumen und die Durchflussmenge, der Tagesbedarf am Spitzentag, die Fließgeschwindigkeiten in den Leitungen, die Versorgungsdrücke sowie die Auswirkung der Netzsteuerung eines ausgewählten Teilgebiets des Transportnetzes. Darüber hinaus wurden Hydraulik und konkrete Optionen zum Netzausbau im entwickelten Optimierungsmodell abgebildet. Die Ergebnisse der hydraulischen Simulationen wurden anschließend mit den Ergebnissen des mathematischen Optimierungsmodells verglichen und kostenoptimale Zubauten ermittelt, welche die zuvor identifizierten Vulnerabilitäten des Netzes beheben und die Bedarfe der Extremszenarien netztechnisch decken können.

Zur Erstellung des Optimierungsmodells wurden folgende Arbeitsschritte ausgeführt:

- Datenerhebung: Identifikation und Bereitstellung der benötigten Daten. Dabei handelt es sich um Infrastrukturdaten des Versorgungsnetzes aber auch Betriebsdaten des Systems.
- Sicherheitsszenarien: Definition von Sicherheitsszenarien für quantitative und qualitative Beeinträchtigungen der Wasserversorgung, insbesondere bei langen, heißen Trockenphasen. Anschließend Entwicklung einer repräsentativen Szenariemenge zur Validierung des Optimierungsmodells.
- Analyse der Abhängigkeiten: Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Wasserdargebot, technischer Kapazität des Systems zur Trinkwasserbereitstellung und Trinkwasserbedarf sowie deren Auswirkungen auf das Optimierungsmodell.
- Quantitative Konkretisierung der Szenarien: Konkrete Quantifizierung der Kapazitäten in den Bereichen Gewinnung, Transport, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung für die betrachteten Szenarien.
- Technische Kapazitätsgrenzen: Ermittlung und Kombination der technischen Kapazitätsgrenzen des Versorgungssystems bezogen auf die ausgewählten Szenarien.
- Bestands- und Prognosenachweise: Durchführung von Netzberechnung des Transportnetzes basierend auf GIS- und Verbrauchsdaten.
- Modellierung bzw. Simulationen: Modellierung von Behältervolumen, Durchflussmengen, Tagesbedarf, Fließgeschwindigkeiten, Versorgungsdrücken und Steuerungsergebnissen entsprechend der definierten Szenarien.

- Optimierungsmodelle: Einsatz des Optimierungsmodells zur Abbildung der Hydraulik, der dynamischen Netzsteuerung und des Netzausbaus.
- Simulationsergebnisse: Vergleich der Simulationsergebnisse der hydraulischen Rohrnetzberechnung mit den Ergebnissen des Optimierungsmodells zur Identifizierung kostenoptimaler Zubauten.

### 6.3.3 *Vulnerabilitätsanalyse*

Um Vulnerabilitäten zu identifizieren, wurden Bestands- und Prognosenachweise vorgenommen. Dazu wurden Modellnetze von Transport- und ausgewählten Ortsnetzen auf der Basis aktueller GIS- und Verbrauchsdaten – einschließlich der maßgeblichen Anlagen inklusive Abbildung von Wasserdargebot, -transport, -speicherung und -verbrauch – entwickelt und darauf aufbauend, dynamische Netzberechnungen durchgeführt. Um die Belastbarkeit der Berechnungsergebnisse zu testen, wurde ein Zeitraum mit Spitzenbelastungen möglichst detailliert im Modellnetz abgebildet und die erzielten Berechnungsergebnisse mit Messdaten verglichen.

Die Vulnerabilitätsanalyse in Wasserversorgungssystemen ist ein entscheidender Prozess, um die Fähigkeit der Infrastruktur zu bewerten, die Nachfrage unter verschiedenen Bedingungen, insbesondere im Falle möglicher Engpässe oder Unterbrechungen, zu erfüllen. Diese Analyse umfasst die Identifizierung und Klassifizierung von Schwachstellen im System durch die Untersuchung zentraler Komponenten wie Speicherbehälter, Rohrleitungen und Aufbereitungsanlagen. Durch die Bewertung von Parametern wie Speicherkapazität, Spitzenbedarf und Umwelteinflüssen kann die Widerstandsfähigkeit des Systems ermittelt werden. Eine gründliche Vulnerabilitätsanalyse hilft dabei, Schwachstellen zu identifizieren, die zu erheblichen Ausfällen führen könnten, und Maßnahmen und Strategien einzuleiten, um eine zuverlässige Wasserversorgung zu gewährleisten. Dieser Prozess gewinnt angesichts der Herausforderungen durch den Klimawandel, das Bevölkerungswachstum und die alternde Infrastruktur von Versorgungssystemen zunehmend an Bedeutung, da diese Faktoren zu erhöhten Risiken und Belastungen für Wasserversorgungssysteme führen.

Im folgenden Abschnitt wird ein Beispiel für eine solche Analyse dargestellt, bei der die Clusterung und Klassifizierung von Vulnerabilitäten innerhalb des Pilotgebiets im Fokus steht. Insbesondere wird erläutert, wie Speicherkapazitäten und Bedarfsverhältnisse genutzt werden, um potenzielle kritische Ausfallszenarien zu bewerten.

Die im Netz identifizierten Vulnerabilitäten wurden mit Hilfe einer Hochbehälter-Analyse geclustert und durch eine Vulnerabilitätsanalyse klassifiziert. Bei dieser Vulnerabilitätsanalyse wurden die Speicherbehälter im Pilotgebiet als zu bewertende Netzelemente ausgewählt. Anhand des Verhältnisses zwischen dem maximalen Tagesbedarf und dem Speichervolumen wurde eine Vulnerabilitätsanalyse für gravierende Störfälle und damit verbundenen (Teil-)Ausfällen durchgeführt. Der maximale Bedarf in den Berechnungen entspricht dem maximalen Wert der gemessenen Werte der Jahre 2018 und 2019, repräsentativ als einige der trockensten Jahre der letzten Jahrzehnte und der prognostizierten Werte für die Jahre 2035 und 2040.

#### 6.3.4 Optimierungsmodelle

Die entwickelten Methoden zur Optimierung der Trinkwassernetze bestehen aus mehreren Komponenten: Im ersten Schritt wurde ein Basismodell entwickelt, welches als Nebenbedingungen die nichtlineare Physik des Wassers (Hydraulik) und die Funktionsweise der diskretisierten Elemente abbildet.

Dieses wurde anschließend je nach Ziel der Optimierung erweitert: Zur Bestimmung optimaler Zubaumaßnahmen werden unterschiedliche Varianten konkreter Ausbaumöglichkeiten bestimmt und in das Modell integriert. Hierbei wurden unter anderem zusätzliche Rohrleitungen, Behälter, Ventile und Druckerhöhungs- bzw. minderanlagen berücksichtigt und jeweils mit prognostizierten Kosten versehen. In den meisten Anwendungsfällen entsteht durch unterschiedliche Dimensionierungen und Anordnungen der Bauteile eine Vielzahl zu berücksichtigender Zubaumöglichkeiten, so dass der Variantenraum sehr groß ist. Eine händische Suche nach der optimalen Variante aus allen Kombinationsmöglichkeiten wäre deshalb nicht – oder nur mit großem Aufwand und vielen zeitaufwändigen Simulation – möglich. Deshalb wird eine Optimierungslösung genutzt, bei der die entwickelten Optimierungsmodelle die bestmögliche Zubaulösung bestimmen, welche eine Versorgung des untersuchten Gebietes auch in den bestimmten Extremszenarien noch gewährleisten kann. Dazu wird eine Instanz des Modelles für einen gewissen Zeitrahmen konkretisiert, beispielsweise ein Tag mit stündlichen Zeitschritten. Zusätzlich zu den Zubaumöglichkeiten werden für den gewählten Zeitrahmen der Startzustand des Netzes und Zeitreihen der Verbraucher und Einspeiser als Nebenbedingungen vorgegeben. Der Optimierungsalgorithmus bestimmt nun effizient diejenige Lösung mit den geringsten Kosten, welche auch alle Nebenbedingungen erfüllt, also hydraulisch zulässig ist. Neben der im Projektrahmen primär untersuchten Kostenoptimalität können auch andere Optimalitätskriterien, wie beispielsweise die Versorgungssicherheit, benutzt werden. Neben den Zubaumaßnahmen wurde auch eine optimierte Steuerung des Netzes berücksichtigt. Hierfür wurde das Optimierungsmodell um die

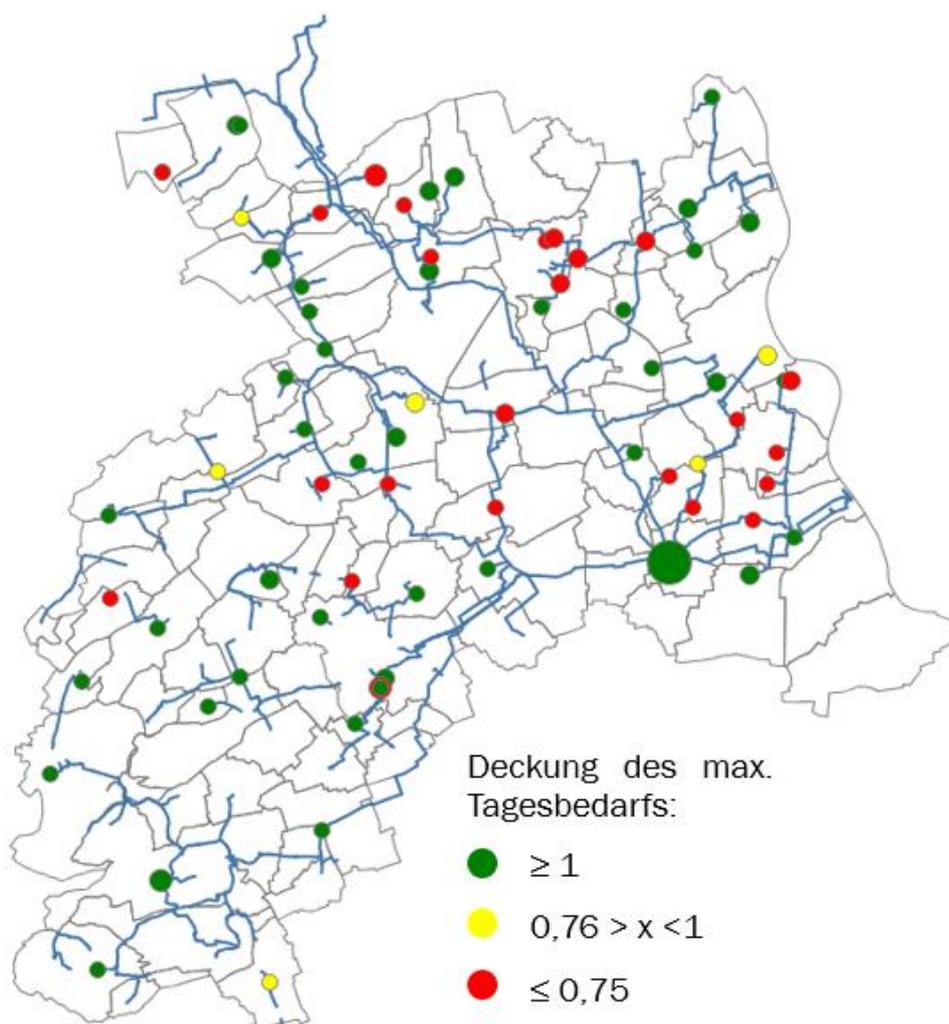
Schaltungsmöglichkeiten der aktiven Elemente erweitert. Anschließend wird für ein gegebenes Extremszenario mit einer Vulnerabilität die bestmögliche Steuerung bestimmt. Bestmöglich heißt in diesem Fall, dass versucht wird die Vulnerabilität durch eine verbesserte Steuerung zu beheben, also alle Bedarfe zu decken und die hydraulischen Rahmenbedingungen einzuhalten. Hierfür kann die Optimierungslösung beispielsweise geänderte Pumpenfahrpläne bestimmen, um Spitzenlasten zu begegnen. Zur Validierung der Steuerungsmodelle wurden die Eingangsdaten der Bestands- und Prognosenachweise auszugsweise zur Erstellung konkreter Modellinstanzen benutzt, die Optimierungsrechnungen durchgeführt, und die Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Beide Ansätze können nun kombiniert werden: Es werden Modelle definiert, welche sowohl mögliche Zubaumaßnahmen, als auch Steuerungsmöglichkeiten der aktiven Elemente beinhalten. Die optimale Lösung für ein gegebenes Extremszenario wird nun die bestmögliche Steuerung suchen, so dass möglichst wenige Zubaumaßnahmen nötig sind. Falls sich die Bedarfe allein mit der optimierten Schaltung decken lassen, wird diese optimale Steuerung bestimmt. Handelt es sich um eine „persistente“ Vulnerabilität werden zusätzlich die mindestens nötigen Netzinvestitionen unter Berücksichtigung der optimierten Steuerung ausgegeben.

### 6.3.5 Ergebnisse

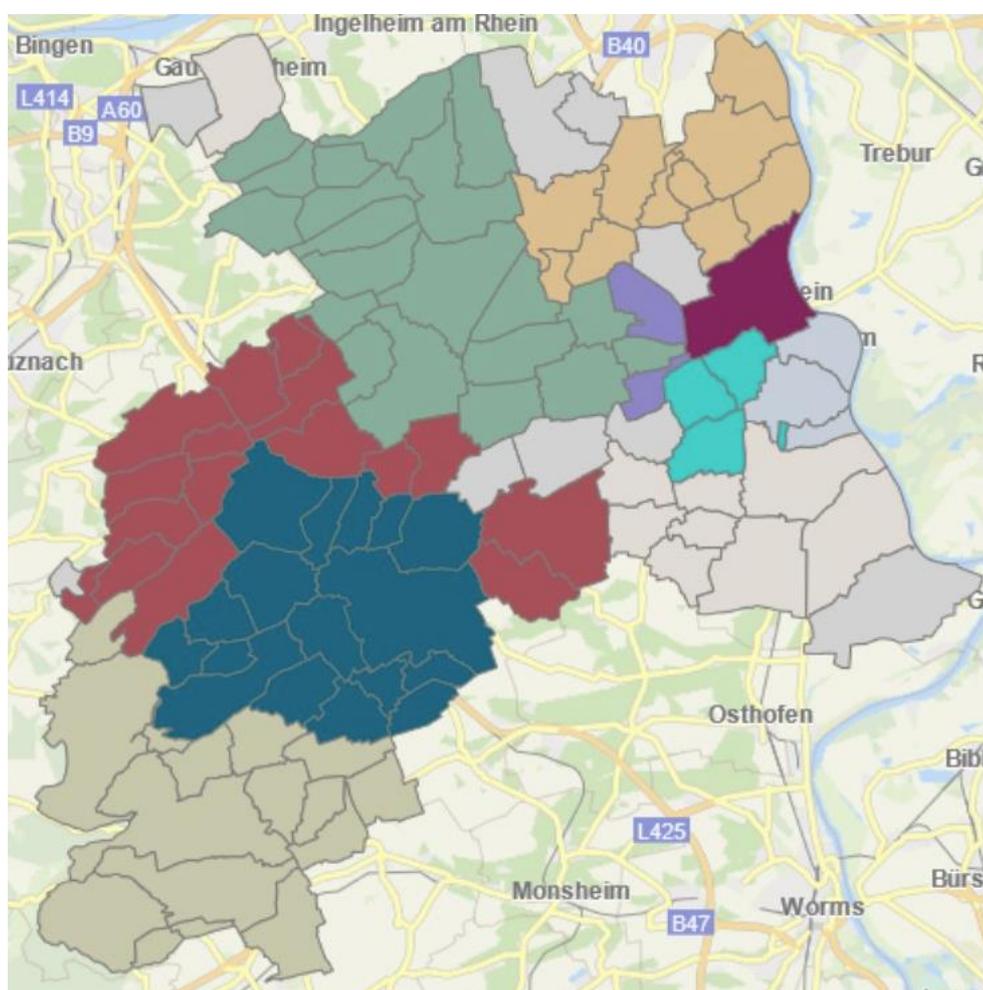
#### 6.3.5.1 Vulnerabilitätsanalyse

Bild 6.11 bildet grafisch das Vermögen jedes einzelnen Speicherbehälters ab, die Nachfrage eines Tages bei einem angenommenen Szenario unter Spitzenbedarf 2040 zu decken. Von den untersuchten Speicherbehältern haben die in der Karte grün markierten Speicherbehälter die nachgewiesene Kapazität, den maximalen Tagesbedarf selbst in ungünstigen, klimatischen Szenarien vollständig zu decken, die gelb markierten können zwischen 76 % und 99 % des Trinkwassertagesbedarfs decken und die rot markierten Behälter können bis zu 75 % des Trinkwassertagesbedarfs decken. Dies deutet darauf hin, dass die Bedarfe aktuell auch in Spitzenzeiten gedeckt werden können, es aber in Zukunft unter klimatischen Extremszenarien zu Versorgungsengpässen kommen könnte.



**Bild 6.11:** Beispielhafte Klassifizierung von Vulnerabilitäten im Pilotgebiet anhand einer Hochbehälteranalyse entsprechend extremen Klimaszenarien, Betrachtungszeitraum der Bedarfe 2040.

In diesem Zusammenhang wurde im Anschluss eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um zu untersuchen, inwieweit die klassifizierten Vulnerabilitäten durch Verkettung mit anderen Speicherbehältern bestehen bleiben und somit als echte anlagenbezogene Vulnerabilitäten angesehen werden können. Hierzu wurden Ketten miteinander verbundener Behälter betrachtet, die jeweils bei einem Wasserwerk beginnen und bei dem Behälter enden, der nur das angeschlossene Versorgungsgebiet mit Wasser versorgt und keinen weiteren Behälter (Bild 6.12). Durch die Verknüpfung der Einzelergebnisse der Behälteranalyse mit einer Über- oder Unterschreitung des täglichen Bedarfs volumens im Vergleich zum erforderlichen Tagesbedarf entlang einer Kette kann deren Gesamtvulnerabilität jeder Zone bilanziert werden. Auf diesem Weg können Zonen mit echten Vulnerabilitäten identifiziert und zur Ermittlung kostenoptimaler Zubaumaßnahmen zur Erhöhung der Versorgungssicherheit der betroffenen Zone an das Optimierungsmodell übergeben werden.



**Bild 6.12:** Bildung von Zonen aus Ketten miteinander verbundener Behälter

### 6.3.5.2 Optimierungsmodelle

Der kombinierte Optimierungsalgorithmus wurde für die Analyse und die Ableitung von Handlungsempfehlungen auf das Pilotgebiet „Rheinschiene“ angewandt. Dabei handelt es sich um vier benachbarte Netzzonen, welche aktuell jeweils durch einen Behälter versorgt werden. Lediglich in eine der Zonen kann auch aus einem zweiten Behälter über eine Verbindungsleitung und eine Pumpe Wasser zugeführt werden. Alle Behälter werden durch die gleiche Versorgungsleitung aus dem Wasserwerk gespeist. In der Vulnerabilitätsanalyse wurden die Behältervolumina und Ausfallresilienzen für diesen Teilbereich des Netzes als unzureichend für bestimmte Extremszenarien befunden: bei Ausfall der Versorgung aus dem Wasserwerk können die erwarteten Wasserbedarfe nicht für einen vollen Tag vorgehalten werden. Zudem können die meisten Ortsnetze nur durch jeweils einen Behälter versorgt werden, so dass bei einem Behälterausfall keinerlei Redundanz vorhanden ist.

Für dieses Pilotgebiet werden mittels Optimierung die kostengünstigsten Maßnahmen zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit bestimmt. Die Hydraulik der vier Behälter und der Ortsnetze mit insgesamt über 1200 Rohrleitungen und 649 Hausanschlüssen werden über 24 Stunden in einem Modell abgebildet. Als mögliche Zubaumaßnahmen werden der Ausbau der bestehenden Behälter, ein Behälterneubau, sowie neue Verbindungsleitungen zwischen den Ortsnetzen definiert. Bei den Verbindungsleitungen werden unterschiedliche Durchmesser und optionale Druckerhöhungs- und Druckminderlagen berücksichtigt. Für jede Ausbaumaßnahme werden jeweils konkrete Bau- und Planungskosten festgelegt und diese in das Modell integriert.

Um die Resilienz des Netzes möglichst umfassend zu evaluieren, werden als Basiszenarien der Ausfall des Wasserwerkes (äquivalent zum Ausfall des Transportnetzes), sowie der Ausfall jeweils eines der Behälter definiert. Diese Basiszenarien werden anschließend mittels Bedarfsszenarien diversifiziert. Hierfür werden die historischen Verbrauchsdaten herangezogen und diese mit verschiedenen Faktoren multipliziert sowie auf Anschlussbasis mit einer Zufallsverteilung überlagert. Damit wird das Spektrum der erwarteten zukünftigen Bedarfe möglichst umfassend abgebildet, vom aktuellen Durchschnittstag bis zum Extremtag im Jahr 2050. Durch die Kombination der Basiszenarien mit den Bedarfsszenarien ergibt sich die untersuchte Szenarienmenge.

Eine erste Analyse der Szenarien identifizierte dabei die Vulnerabilität des Netzes in nahezu allen Fällen als „persistent“. Lediglich eines der Basiszenarien kann mittels einer optimalen Steuerung allein unschädlich gemacht werden, in allen anderen Fällen sind Zubaumaßnahmen nötig. Für die definierte Szenarienmenge wurden deshalb nun die kostenoptimalen Zubaumaßnahmen bestimmt, welche die Bedarfe vollständig decken und hydraulisch zulässig sind. Der Optimierungsalgorithmus liefert die günstigste Kombination aus zusätzlichen Verbindungsleitungen und zusätzlichen Volumina der existierenden und des zusätzlichen Behälters. Als Ergebnis wurde die Behälterneubaulösung und zwei neue Verbindungsleitungen als günstigste Variante identifiziert. Aus den Ergebnissen wurde ein Bericht abgeleitet, welcher die zusätzlichen empfohlenen Verbindungsleitungen sowie das Mindestvolumen eines neuen Behälters für das untersuchte Netz angibt.

#### 6.3.5.3 Ausblick

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass der entwickelte Algorithmus optimale Ausbauentscheidungen unter Berücksichtigung der Netzhydraulik trifft. Dem Algorithmus können beispielsweise zusätzliche Rohrleitungen sowie Aus- und Neubaumöglichkeiten für Behälter übergeben werden, aber auch zusätzliche aktive Elemente wie Ventile oder Pumpen

sind möglich. Aus allen Kombinationen der definierten Möglichkeiten wird die kostengünstigste Variante ausgewählt, für die auch die Hydraulik sowie die angegebenen Bedarfe erfüllt werden kann.

Ausbauvarianten die zu hydraulisch unzulässigen Netzzuständen führen würden, werden vom Algorithmus automatisch aus dem Lösungsraum ausgeschlossen. Hierfür wird keinerlei Expertenwissen benötigt, welches über die reinen Netzdaten hinaus geht.

Der Größe des Netzes und der Anzahl an Zubaumaßnahmen ist dabei im Prinzip keine Grenze gesetzt, die benötigte Zeit für das Erkennen der hydraulischen Zulässigkeit steigt allerdings mit zunehmender Anzahl betrachteter Zeitschritte und der Größe des Netzes exponentiell an. Da die Spitzenwerte nicht zu sehr vom Mittelwert abweichen wurde deshalb auf eine zu große Zeitauflösung verzichtet. Diese Mittellung hilft die Berechnungszeiten für das betrachtete Netz (pro Zeitschritt ca. 3000 Variablen und 3500 Nebenbedingungen) im Bereich weniger Minuten zu halten. Zukünftig können Verbesserungen an der Modellierung und dem Lösungsalgorithmus (z.B. iterative Verfahren) sowie Anpassungen für das jeweilige Netz zu deutlich reduzierten Laufzeiten führen, welche auch eine Berechnung deutlich größerer Netze in kurzer Zeit möglich machen.

Das Finden hydraulisch zulässiger Lösungen für Szenarien mit vielen kurzen Zeitschritten ist für die Optimierung aber schwierig beziehungsweise sehr zeitaufwändig, da nicht iterativ pro Zeitschritt gerechnet, sondern das Gesamtmodell gelöst wird. Für das betrachtete Netz bedeutet das pro Zeitschritt etwa 3000 Variablen und 3500 Gleichungen mit Nebenbedingungen im Modell. Exemplarische Tests weisen keine unterschiedlichen Entscheidungsvorschläge in den Ergebnissen für verschieden lange Zeitschritte auf, da die Hydraulik sich trotz Mittellung nicht grundlegend unterscheidet. Deshalb kann auf eine zu feine Zeitauflösung verzichtet werden und damit die Rechenzeiten deutlich verkürzt werden.

### 6.3.6 *Empfehlungen zu Netzanpassungsmaßnahmen*

#### 6.3.6.1 *Allgemeine Empfehlungen*

- Gute Datenhaltung und Datenaufbereitung ist unerlässlich für eine Vulnerabilitätsanalyse des bestehenden Netzes und dessen Optimierung.
- Technisch unterstützte Netzanalysen unter Zuhilfenahme von Prognosedaten helfen zusätzlich bei der Identifizierung von Vulnerabilitäten in Trinkwassernetzen. Diese ergebnisoffenen Analysen können unerwartete Resultate liefern, welche das Assetmanagement zusätzlich bei der Infrastrukturplanung unterstützen.

#### 6.3.6.2 *Spezifische Empfehlung für den Netzausbau*

- Mit Hilfe der mathematischen Optimierung lassen sich optimale Erweiterungen von Rohrverbindungen und Druckregelungen zwischen bestehenden Zonen bestimmen, um die Integration und Ausfallsicherheit von Versorgungsnetzen zu erhöhen.
- Zudem lässt sich untersuchen, inwiefern ein konkretes Extremszenario durch eine optimierte Steuerung der aktiven Netzelemente vermieden werden kann.
- Die Optimierung erlaubt die gleichzeitige Untersuchung einer großen Zahl von Kombinationen verschiedener Ausbaumöglichkeiten und unterstützt bei der Auswahl hydraulisch zulässiger und kostenoptimaler Lösungen, um das Netz für das Auftreten von Extremereignissen zu härten, ohne dabei auf Expertenwissen angewiesen zu sein.
- Die Optimierung kann ebenfalls bei der Bestimmung der optimalen Dimensionierung neuer Behälter bzw. dem Ausbau bestehender Behälter unterstützen.

### Fazit Stärkung der Resilienz des Trinkwasser-Verteilnetzes

**Einsatzgebiet:** Die entwickelte Methodik hilft Wasserversorgern besonderes in Bezug auf Extremereignissen, Vulnerabilitäten im Wasserversorgungssystem zu identifizieren und zu beheben. Dazu werden Extremszenarien identifiziert und das System unter diesen Bedingungen simuliert. Die Methodik wurde am Beispiel der Wasserversorgung Rheinhesen-Pfalz GmbH umgesetzt.

**Merkmale:** Die Methodik erfordert eine umfassende Datenhaltung des Wasserversorgungsunternehmens bezüglich des Verteilungsnetzes. Mithilfe mathematischer Optimierung können verschiedene Versorgungssituationen dargestellt und hinsichtlich der gewählten Extremszenarien optimiert werden. Dazu zählen Zubaumaßnahmen wie zusätzliche Rohrverbindungen oder Speicherkapazitäten, Druckregelungen zwischen Zonen inklusive Bestimmung der optimalen Positionierung aber auch optimale Steuerungen der aktiven Netzelemente. Die Resilienz des Versorgungssystems wird so effektiv und kosteneffizient in Hinblick auf eine Anpassung an extreme Klimaereignisse gesteigert.

## 7 Trinkwasserbedarf

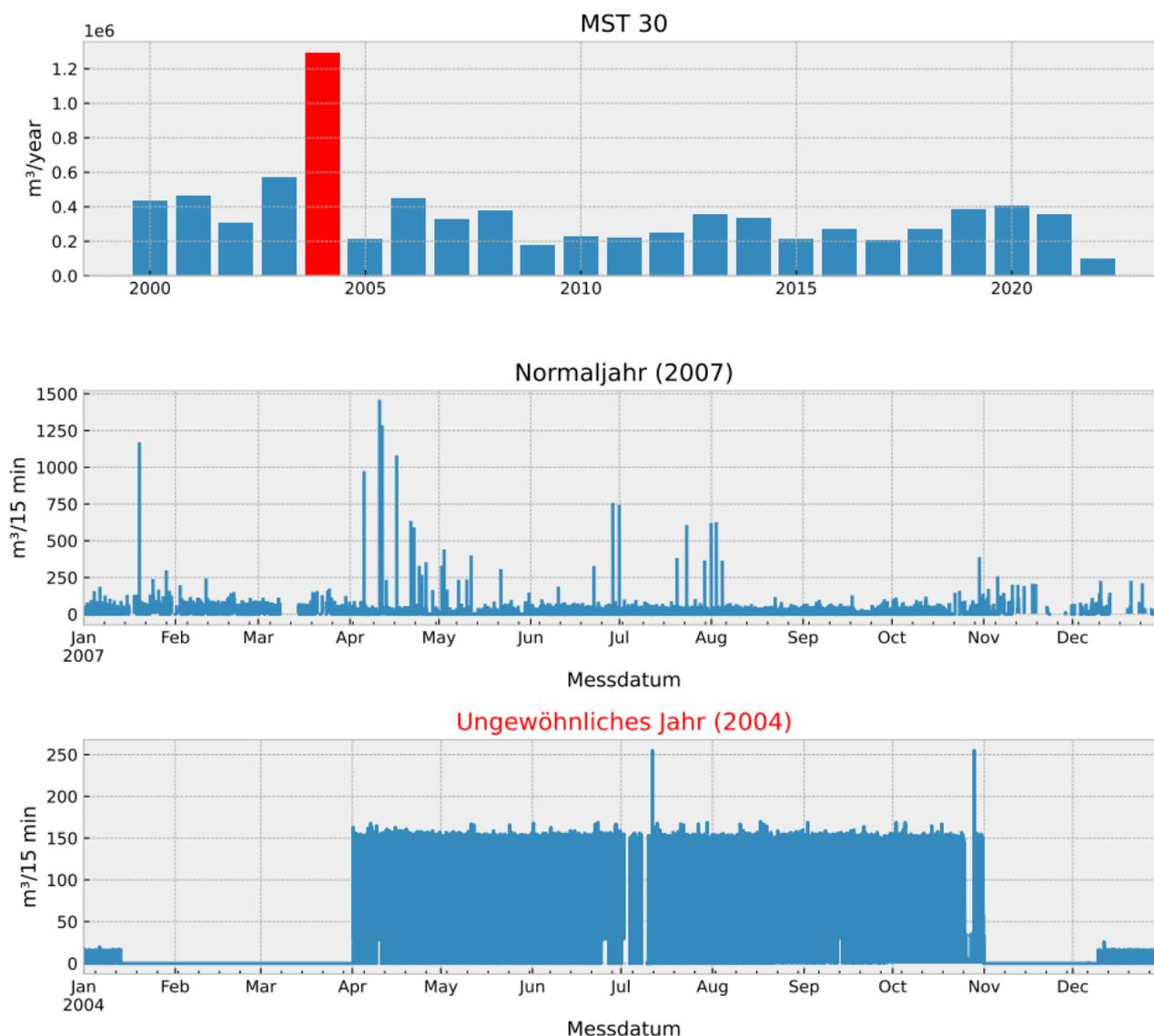
### 7.1 *Plausibilität von Smart-Meter Daten*

Smart Meter oder digitale Wasserzähler werden zunehmend eingesetzt, um den Wasserverbrauch bei den Verbrauchern besser zu erfassen. Die in TrinkXtrem beteiligten Wasserversorgungsunternehmen Harzwasserwerke (HWW), Rheinisch-Westfälische Wasserversorgungsgesellschaft (RWW) und Zweckverband Landeswasserversorgung (LW) haben verschiedene Trinkwasserübergabestellen im Verteilungsnetz bzw. an Übergabestellen mit Smart Metern ausgerüstet. Damit steht eine hervorragende Datenbasis bereit, um den Trinkwasserverbrauch insbesondere unter Extrembedingungen zu erfassen. Eine Auswertung liefert jedoch erst dann zuverlässige Aussagen, wenn die Eingangsdaten korrekt sind. Vor einer Auswertung wurden in TrinkXtrem daher zuerst die von den Wasserversorgungsunternehmen bereitgestellten Smart Meter Daten auf ihre Plausibilität geprüft. Das Vorgehen und die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden beispielhaft für die Daten der LW beschrieben.

Wasserzählerdaten werden bei der LW seit 1985 erfasst. In das Projekt sind Daten ab dem Jahr 2000 eingeflossen. Seit 2000 waren drei verschiedene Datenerfassungssysteme, zum Teil parallel, im Einsatz. In 2000 waren 254 Wasserzähler mit batteriebetriebenen Logger ausgerüstet. Dieses System weist generell plausible Daten auf. Da die Geräte von Hand ausgelesen wurden kam es in der Regel nur zu Datenverlust, wenn der Logger oder die Batterie einen Defekt aufwies. 2005 wurde auf ein Fernauslesesystem umgestellt. Dieses wurde in fast allen Schächten mit Stromanschluss verbaut. Damit konnten ab 2006 ca. 130 Zähler über das System ausgelesen werden. Die Daten wurden über Kupferkabel übertragen. Probleme sind hier vor allem während und nach Gewittern aufgetreten, so dass es regelmäßig zu Ausfällen und Datenlücken gekommen ist. Ein weiteres Problem hierbei ist, dass nach Datenlücken das System die fehlenden Viertelstundenwerte im ersten wieder verfügbarem Wert aufsummiert hat, so dass neben den Datenlücken noch unplausible Werte entstanden sind.

Ab 2015 wurde begonnen, auf batteriebetriebene Mobilfunkdatenlogger umzustellen. Diese senden täglich 96 Viertelstundenwerte über das Mobilfunknetz. Diese Logger sind geeicht und zeichnen grundsätzlich plausible Daten auf. Problem bei diesen Datenloggern waren hauptsächlich Lücken durch die Datenübertragung. Durch schlechten Empfang sendeten manche Logger nur sporadisch. Beispielsweise führte eine IP-Adressänderung bei einem Provider zu einem wochenlangen Datenverlust, da rund ein Drittel der Datenlogger nicht mehr sendeten und neu konfiguriert werden mussten.

Vereinzelt kam es bei allen drei Systemen zu fehlerhaft angeschlossenen Reedkabeln des Impulsausgangs am Wasserzähler, sodass zeh- bis hundertfach höhere Messwerte ausgewiesen wurden. Dies führt zu einem nicht plausiblen Jahresverbrauch (Bild 7.1).

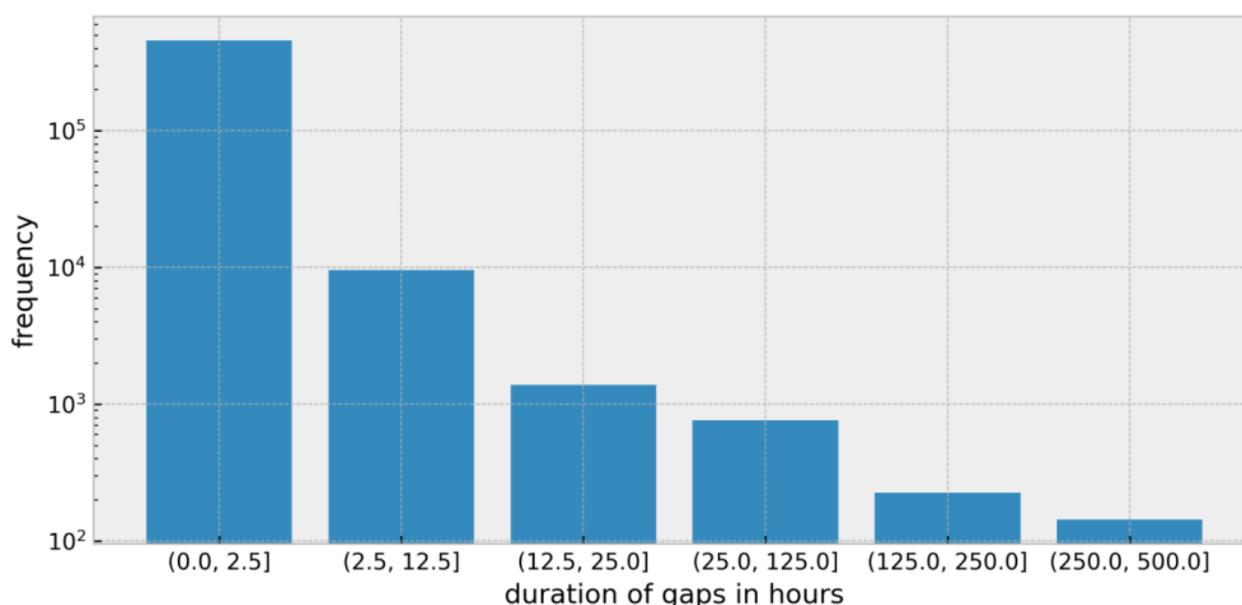


**Bild 7.1: Beispiel für die Verzehnfachung von Messwerten an einer Messstelle im Jahr 2004 durch eine fehlerhafte Impulswertigkeit.**

Zusammenfassend beinhalteten die Zeitreihen die folgenden Fehlerquellen:

- Falsche Impulswertigkeit und die damit 10- bis 100-fache Überhöhung der Messwerte
- Datenlücken (Zeiträume ohne Messwerte)
- Unplausible Bedarfspitzen nach Datenlücken entstanden durch Aufsummierung der Messwerte während der Dauer einer auftretenden Lücke

Die falsche Impulswertigkeit konnte vergleichsweise einfach korrigiert werden, indem die betroffenen Werte durch 10 bzw. 100 dividiert wurden. Unplausible Bedarfsspitzen nach Datenlücken wurden entfernt, indem der erste Messwert nach einer Datenlücke verworfen wurde. Abschließend wurden Datenlücken durch geeignete Imputationsverfahren (Ersatzwertbildung) geschlossen. Zunächst wurde dafür das Auftreten von Datenlücken charakterisiert, indem die Häufigkeit und Dauer von Lücken ermittelt wurde (Bild 7.2).

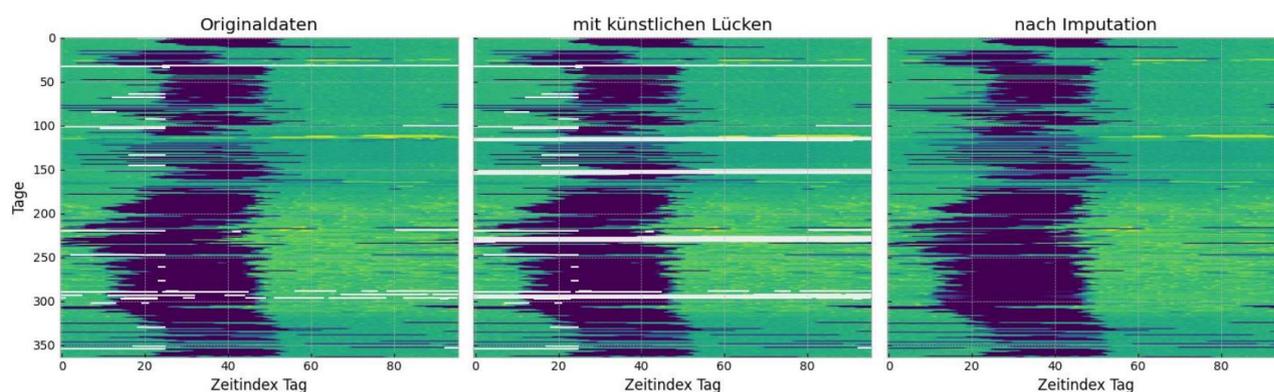


**Bild 7.2: Dauer und Häufigkeit von Datenlücken in allen Messstellen im Zeitraum 2000 bis 2021**

Um die Lücken mit Ersatzwerten zu füllen, wurden verschiedene Verfahren nach dem folgenden Schema getestet (Bild 7.3):

- Originalzeitreihe: Hinzufügen künstlicher Lücken mit definierter Länge/Dauer (an zufällig ausgewählten Zeitpunkten)
- Anwendung des Imputationsverfahrens
- Vergleich der gebildeten Ersatzwerte mit den Werten aus der Originalzeitreihe

Im Ergebnis wurde ermittelt, dass die Methode der nächsten Nachbarn (KNN) für die Ersatzwertbildung den geringsten Rekonstruktionsfehler aufweist.



**Bild 7.3:** Test von Imputationsverfahren durch Einfügen künstlicher Lücken, indem deren Ersatzwerte mit den Originalwerten verglichen werden

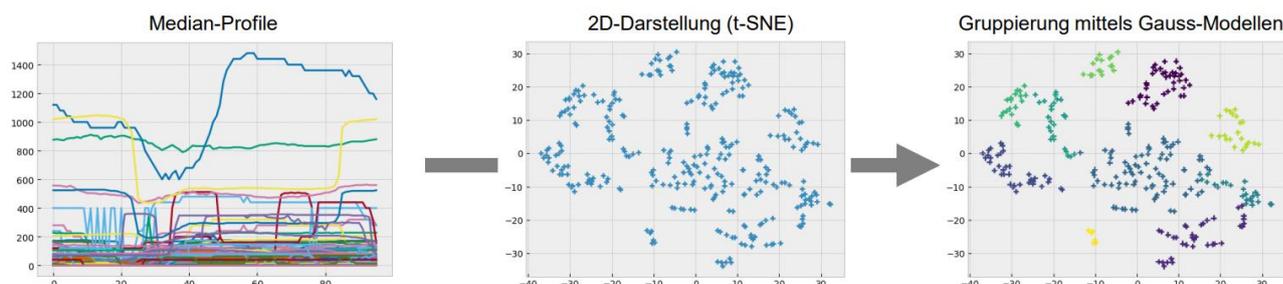
## 7.2 Identifikation von Kundengruppen

Wasserversorger verfügen über verschiedene Messstellen wie Übergabestellen, Behälter oder Smart Meter von einzelnen häuslichen, gewerblichen oder industriellen Abnehmern. Für Versorgungsunternehmen ist nicht immer bekannt, wie die einzelnen Abnehmer das bereitgestellte Wasser verbrauchen. Obwohl die Klasse des Abnehmers bekannt ist (z. B. Übergabestation, Behälter, Industriekunde), ist das Wasserabnahmeprofil unbekannt bzw. wird nur in Einzelfällen manuell ermittelt. Eine systematische, automatisierbare Zusammenfassung von Abnehmern nach deren zeitlichem Abnahmeverhalten (Kundengruppen) kann helfen, die Steuerung, insbesondere das Behältermanagement zu optimieren. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde das Abnahmeverhalten untersucht und Kundengruppen identifiziert. Das Vorgehen dazu soll am Beispiel der LW und ihren ca. 300 Verbandsmitgliedern im Folgenden dargestellt werden.

Die Datengrundlage bilden Zeitreihen aller Messstellen, deren Werte plausibilisiert wurden und in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten über einen Zeitraum von mehreren Jahren vorlagen. Für ein gegebenes Jahr (z. B. 2021) wurde von jeder Messstelle ein Median-Profil erstellt, um damit einen typischen Tag zu repräsentieren. Da sich die Abnahme zwischen den Messstellen deutlich unterscheidet (Großabnehmer gegenüber kleinen Gemeinden), wurden alle Profile skaliert, um sie vergleichbar machen zu können.

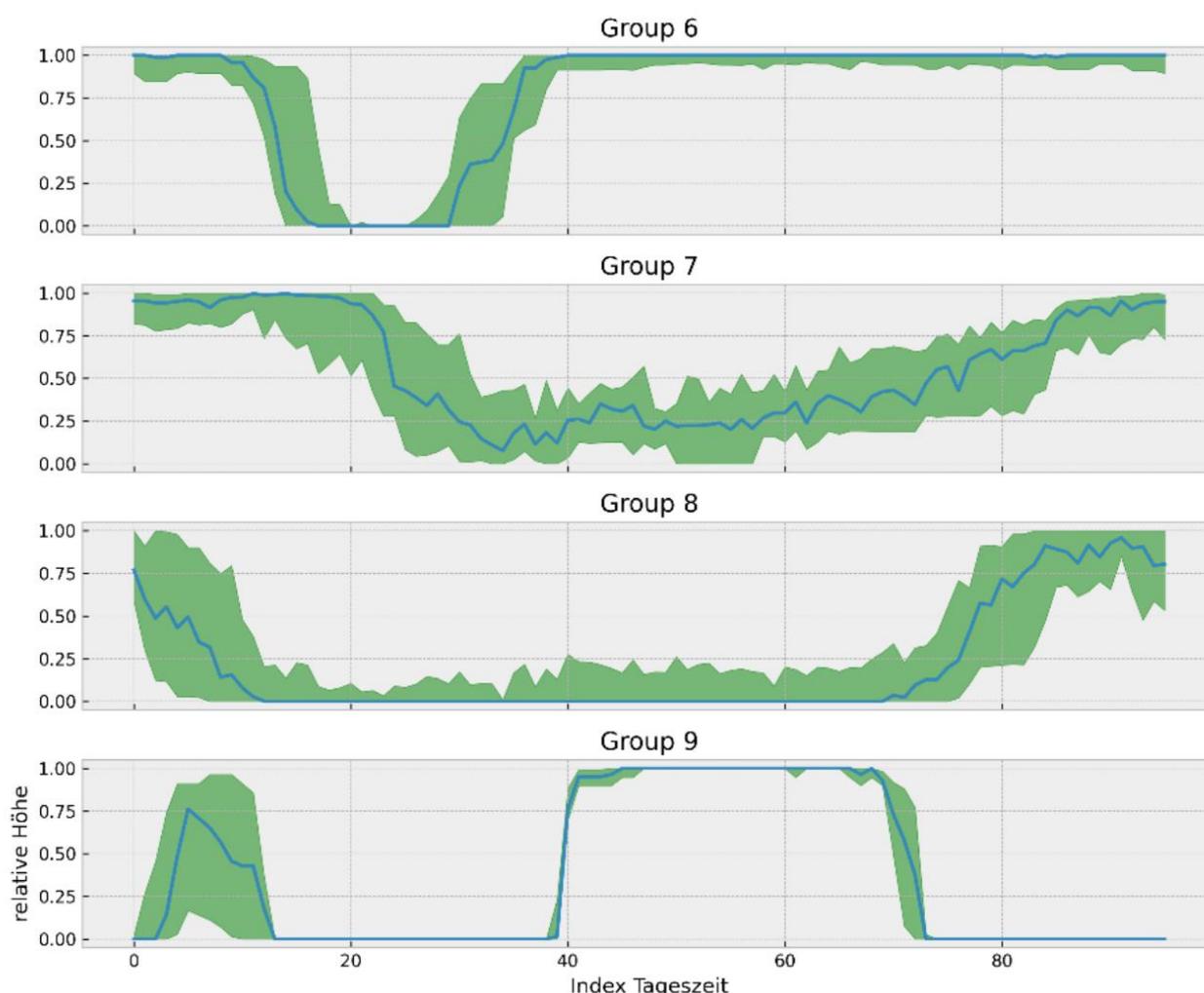
Im Anschluss erfolgte die Darstellung der Profile in einem 2-dimensionalen Raum durch Anwendung des t-SNE-Verfahrens. Das t-SNE-Verfahren (t-distributed Stochastic Neighbor Embedding) ist ein maschinelles Lernverfahren zur Visualisierung hochdimensionaler Daten in zwei oder drei Dimensionen. Es versucht Datenpunkte, die in der ursprünglichen hohen Dimension nah beieinanderliegen, auch in der niedrigeren Dimension nah beieinander zu

halten und wird verwendet, um komplexe Daten so zu visualisieren, dass Muster oder Gruppen leicht identifiziert werden können. Die Gruppen können abschließend durch eine Verfahren der Clusteranalyse bestimmt werden (in diesem Fall Gauss-Misch-Modelle). Bild 7.4 zeigt den beschriebenen Workflow.



**Bild 7.4:** Ermittlung von Median-Profilen (links, x-Achse = Index der Tageszeit, y-Achse Wasserabgabe in m<sup>3</sup>/15 min), Reduzierung der Profile auf zwei Dimensionen mittels t-SNE (Mitte) und Gruppierung durch Anwendung von Gauss-Misch-Modellen

Eine Auswahl der Profile der ermittelten Gruppen sind in Bild 7.5 dargestellt. Alle Profile sind für die bessere Vergleichbarkeit auf der y-Achse zwischen 0 und 1 skaliert und repräsentieren die relative Abnahme. Der grüne Fehlerschlauch stellt die Variabilität innerhalb einer Gruppe dar. Aus dem Bild können deutliche Verhaltensunterschiede in der Abnahme ausgemacht werden. So entnehmen die Kunden aus Gruppe 8 fast ausschließlich während der Nachtstunden Trinkwasser, während Kunden der Gruppe 6 fast ganztägig Wasser abnehmen und nur in den Morgenstunden die Abnahme reduzieren.



**Bild 7.5:** Typische Abnahmeprofile von identifizierten Kundengruppen der LW

### 7.3 Praxiserfahrungen zu Auswirkungen von Extremereignissen

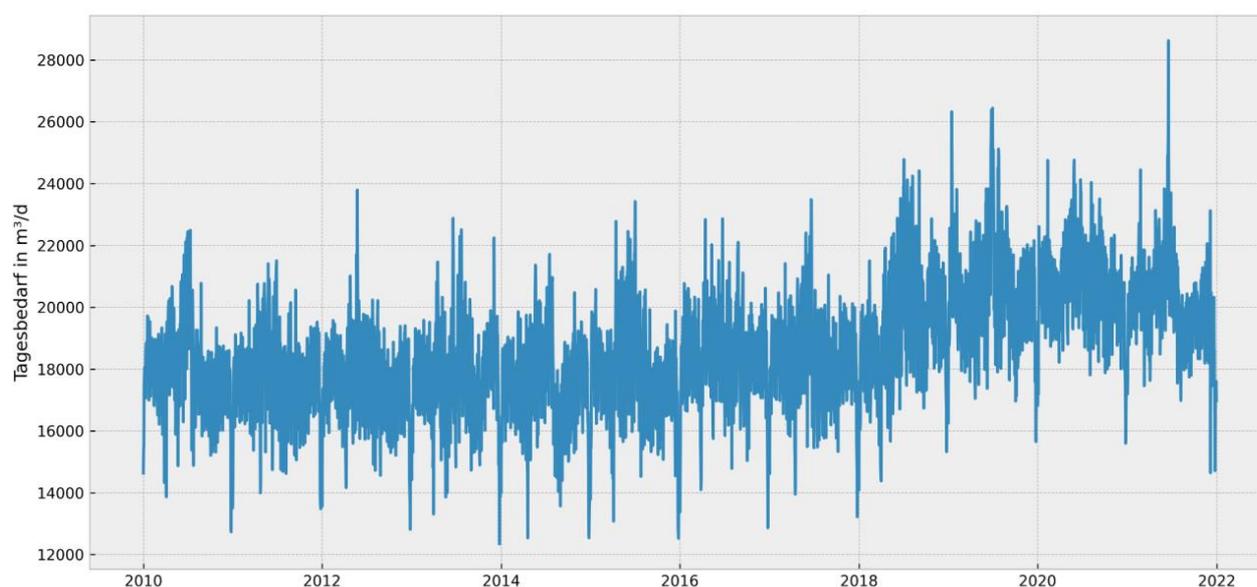
#### 7.3.1 Starkregen Mai/Juni 2024 beim ZV Landeswasserversorgung

Das Starkregenereignis Ende Mai/Anfang Juni 2024 in Württemberg und dem bayrischen Schwaben führte bei dem Projektpartner ZV Landeswasserversorgung (LW) zu einer unvorhergesehen erhöhten Wasserabgabe. Direkt betroffen waren die Anlagen der LW nicht, allerdings aktivierte ein Verbandsmitglied seine Notversorgung, um präventiv ihre eigenen Brunnen und ihr Trinkwasserleitungsnetz vor einem Schmutzwassereintrag schützen. Das Verbandsmitglied hat hierfür extra ein Bezugsrecht der LW. Innerhalb von einem Tag erhöhten die Stadtwerke nach Rücksprache mit der LW ihre Wasserabnahme von 1.800 m<sup>3</sup> pro Tag auf ca. 20.000 m<sup>3</sup> pro Tag und in einem zweiten Schritt auf 30.000 m<sup>3</sup> pro Tag. Die modellhafte Wasserbedarfsprognose konnte sich innerhalb weniger Tage an die Ausnahmesituation anpassen, was in Kapitel 7.4 noch beschrieben wird.

### 7.3.2 Spitzenbedarf im Juni 2021 bei den Harzwasserwerken

Die Harzwasserwerke betreiben insgesamt rund 220 kontinuierlich aufzeichnende Wasserzähler, die in den Übergabeschächten zu den Kunden (Großstädte, Kommunen, Industrieunternehmen) eingebaut sind. Das mit Datenfernübertragung ausgestattete Messnetz, das ursprünglich nur die Trinkwasserabgaben an etwa 10 Großkunden online erfasst hatte, wurde von 2018 bis 2021 Schritt für Schritt vervollständigt und liefert Messdaten auf Viertelstundenbasis. Für das vorliegende Projekt wurden ausschließlich die Wasserzählerdaten von 31 Übergabestellen als Viertelstundenwerte/Stundenwerte von 2001 bis 2021 bzw. von 2005 bis 2021 genutzt, weil bei diesen Kunden eine Vollversorgung durch die Fernwasserversorgung der Harzwasserwerke vorliegt.

Die Ganglinie in Bild 7.6 zeigt die Trinkwasserabgabe an einen städtischen Großkunden von 2010 bis 2020. Dabei ist mit Beginn der Trockenperiode ab 2018 generell eine Zunahme des durchschnittlichen Trinkwasserbedarfs festzustellen. Herausragend ist das Extremereignis am 18. Juni 2021. An diesem Sommertag betrug der Wasserbedarf des Kunden kurz vor den Sommerferien beachtliche 29.000 m<sup>3</sup>/Tag. Ein Spitzenbedarf in dieser Höhe war zuvor noch nicht aufgetreten.



**Bild 7.6:** Ganglinie der Trinkwasserabgabe an einen städtischen Großkunden mit Spitzenbedarf am 18. Juni 2021

## **7.4 Webservice für kundengruppenspezifische Wasserbedarfsprognosen**

Eine zentrale Aufgabe im vorliegenden Projekt war die Entwicklung von Modellen für die Prognose des Wasserbedarfs. Bei der Wasserbedarfsprognose geht es darum, den zukünftigen Wasserbedarf für verschiedene Zeiträume und Zwecke vorherzusagen. Die verschiedenen Prognosehorizonte haben unterschiedliche Bedeutungen und Anwendungen, je nach dem Zeitraum, für den die Vorhersage gemacht wird:

- Kurzfristige Prognose (Stunden bis Tage): Diese Prognosen sind entscheidend für den täglichen Betrieb und die Verwaltung von Wasserversorgungssystemen. Sie helfen bei der Planung des täglichen Wasserbedarfs, der Anpassung des Wasserdrucks und der Vermeidung von Versorgungsengpässen. Sie sind wichtig, um bei kurzfristigen Ereignissen wie Hitzeperioden oder starkem Regen, auf plötzliche Veränderungen im Wasserbedarf zu reagieren.
- Mittelfristige Prognose (Wochen bis Monate): Diese Prognosen unterstützen saisonale Planungen und Entscheidungen, wie die Planung der Wasserspeicherung für Trockenzeiten oder die Vorbereitung auf saisonale Spitzen im Wasserverbrauch. Sie sind wichtig die Bewirtschaftung von Wasserspeichern, Planung von Wartungsarbeiten an Wasserinfrastrukturen und Vorbereitung auf saisonale Schwankungen im Wasserverbrauch.
- Langfristige Prognose (Jahre bis Jahrzehnte): Langfristige Prognosen sind entscheidend für die strategische Planung und Entwicklung der Wasserinfrastruktur. Sie berücksichtigen langfristige Trends wie Bevölkerungswachstum, Klimawandel und wirtschaftliche Entwicklungen. Diese Prognosen helfen bei der Planung von Investitionen in neue Wasserquellen, Infrastrukturprojekte und nachhaltige Wassermanagementstrategien.

Im Projekt TrinkXtrem lag der Fokus auf Kurzeitprognosemodelle. Hierzu wurden für die beteiligten Wasserversorgungsunternehmen Modelle für ausgewählte Versorgungsgebiete und Kunden entwickelt. Jedes Wasserversorgungsunternehmen definierte dafür in der Anfangsphase des Projektes spezifische Anwendungsfälle, die entsprechend Tabelle 7.1 betrachtet wurden.

**Tabelle 7.1: Untersuchte Anwendungsfälle für Kurzzeitprognosemodelle**

Wasserversorger	Anzahl untersuchter Gebiete	Zeitliche Auflösung der Verbrauchsmessungen	Kundenstruktur
LW	3	Tageswerte	Kommunen
HWW	5	Tageswerte	Kommunen und Industriekunden
RWW	1	15 min	Großstadt und Industriekunden

Die Modelle basierten auf den von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten und plausibilisierten Daten. Mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzen wurden geeignete Vorhersagemodelle entwickelt. Die Vorhersage des Wasserbedarfs erfolgt für die kommenden 10 Tage unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren. Dazu zählen klimatische und sozioökonomische Parameter sowie der Wasserbedarf der letzten Tage.

Beispielhaft wurde für die LW ein Modell zur Wasserbedarfsprognose erstellt. Für den großtechnischen Betrieb erhielt die LW Zugang zu einem vom TZW entwickelten Webservice. Zusätzlich wurde eine tägliche Datenübertragung aktueller Wasserbedarfe von der LW in das TZW etabliert.

Der Webservice ist unter der Adresse <https://bedarfsprognose.tzw.de> erreichbar. Der Anwender kann sich über einen spezifischen Benutzernamen und Passwort einloggen und erhält Zugriff auf ein Dashboard, in welchem der historische sowie zukünftige Wasserbedarf (Prognosen) dargestellt wird. In Bild 7.7 ist ein Screenshot des Webservices dargestellt. Darin wird die Abgabe der LW für ihr gesamten Versorgungsgebiet gezeigt. Im oberen Bereich des Screenshots sind allgemeine Kennzahlen aufgeführt, wie z. B. die kumulierte Abgabe seit dem 01.01.2024, dem bisherigen Tagesmaximum sowie der mittleren Tagesabgabe. Die Zeitreihe zeigt die beobachteten und prognostizierten Abgaben. Die Schattierung entspricht der Modellunsicherheit, wobei die Bereiche in Türkis vergangene Prognosen darstellen und Bereiche mit grüner Schattierung aktuellen Prognosen für die naturgemäß noch keine gemessenen Werte vorliegen.



Prognosen pro Tag Abgabe, Gewinnung und Bezug, Behälterdifferenz



**Bild 7.7: Screenshot des Webservice**

Der Screenshot in Bild 7.7 zeigt das in Kapitel 7.3.1 beschriebene Extremereignis von Starkniederschlägen im süddeutschen Raum Anfang Juni 2024. Ein Verbandsmitglied musste die eigene Versorgung herunterfahren und auf eine Notversorgung durch die LW zurückgreifen, wodurch der Wasserbedarf für die LW ab dem 01.06.2024 sprunghaft angestiegen ist. Das Prognosemodell konnte das Ereignis der Notversorgung erwartungsgemäß nicht vorhersagen. Es war jedoch in der Lage, sich bereits nach wenigen Tagen an die neue Situation anzupassen und bereits ab dem 05.06.2024 wieder korrekte Prognosen vornehmen zu können. Damit kann das Prognosetool in schwierigen Versorgungssituationen die Mitarbeiter in der Leitwarte unterstützen, die Anlagen bestmöglich zu betreiben und die Ver-

sorgungssicherheit zu gewährleisten. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass die entwickelten Prognosemodelle bereits in der Großtechnik sowohl unter Normal- als auch unter Extrembedingungen eingesetzt werden können.

### Fazit Trinkwasserbedarfsprognose

**Einsatzgebiet:** Insbesondere unter extremen klimatischen Bedingungen erfordert der Wasserwerksbetrieb eine Vorhersage des Trinkwasserverbrauchs. Über einen Webservice können Wasserversorger auf ein entsprechendes Prognosetool zugreifen.

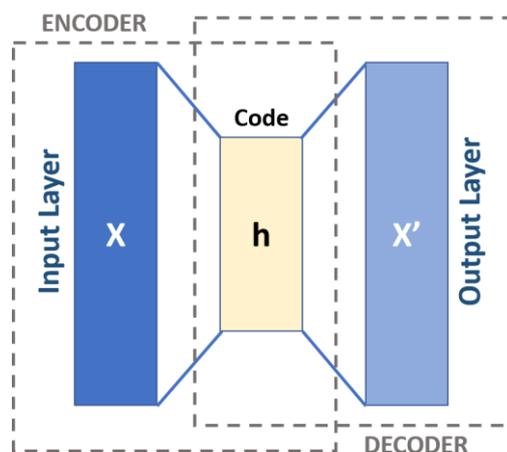
**Merkmale:** Für die Vorhersage des mittleren Wasserbedarfs und des Spitzenbedarfs wurden Modelle auf Basis des maschinellen Lernens entwickelt. Die Modelle basieren auf den Bedarfsdaten des Wasserversorgers aus der Vergangenheit sowie weiteren Daten wie beispielsweise Temperatur, Niederschlag, Wochen- bzw. Feiertage oder Ferienperioden. Im Rahmen des Projektes wurde die praktische Anwendbarkeit beim Zweckverband Landeswasserversorgung im großtechnischen Maßstab zur Prognose des Trinkwasserbedarfs für die jeweils nächsten Tage eingesetzt. Es zeigte sich eine hohe Prognosegüte mit Abweichungen im Bereich von 3 %.

## 7.5 App zur Anomalie-Detektion

Die in TrinkXtrem entwickelte App zur Anomalie Erkennung in Smart Meter Daten ist ein leistungsstarkes Werkzeug, das speziell zur Identifikation ungewöhnlicher und neuartiger Vorkommnisse im täglichen Betrieb von Wasserversorgungsunternehmen bei der Wasserbedarfsprognose konzipiert wurde. Ziel der App ist es, die Versorgungssicherheit zu erhöhen und den Betrieb effizienter zu gestalten. Die App überwacht dabei Daten aus einer Vielzahl von Sensoren, die in den Versorgungsnetzen installiert sind. Diese Datenaggregation ermöglicht es, häufige Herausforderungen wie fehlende Daten oder lokale Abweichungen zu überwinden und Anomalien als seltene Ereignisse im Gesamtsystem zu erkennen.

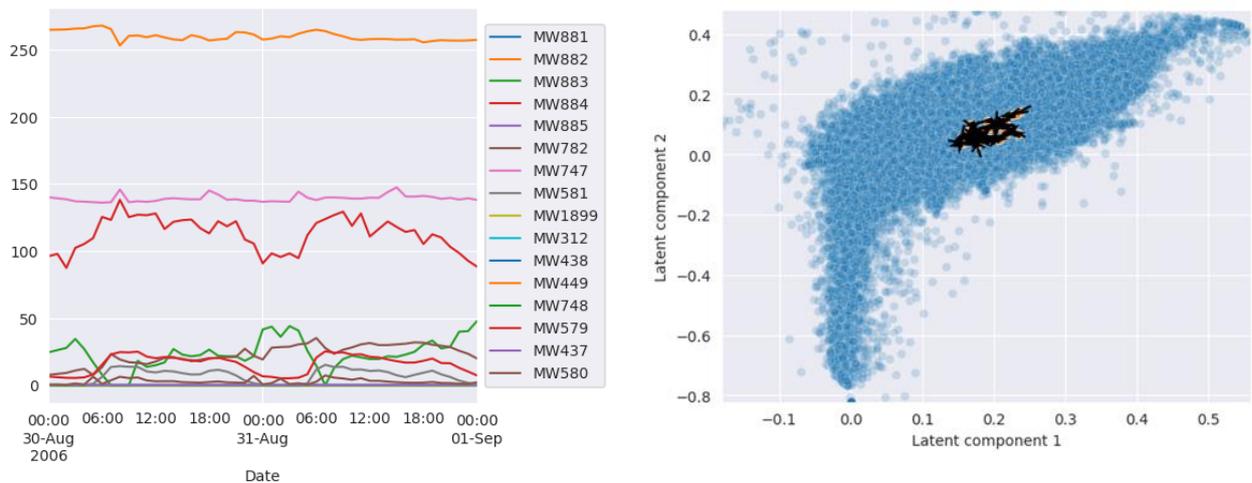
Die App wurde für Anwendungsfälle und spezifische Szenarien beim Data-Mining von Trinkwasserbedarfsdaten bei den Harzwasserwerken GmbH und der Rheinisch-Westfälischen Wasserwerksgesellschaft mbH konfiguriert und getestet. Dabei wurden alle relevanten Sensordaten, d.h. den Volumenströmen zur Trinkwasserabgabe, gemeinsam betrachtet oder nach spezifischen Gruppen segmentiert.

Im Anschluss an die Datenaggregation wird ein Anomalieerkennungmodell verwendet, das typische Verhaltensmuster der Sensorgruppe erlernt und Abweichungen von diesem Muster identifiziert. Hierfür kommen Autoencoder zum Einsatz, die es ermöglichen, die Komplexität der Daten zu reduzieren und eine abstrakte Darstellung der zugrundeliegenden Muster zu erzeugen. Ein Autoencoder ist ein neuronales Netzwerk, das darauf trainiert ist, Daten zu komprimieren und wiederherzustellen. Es besteht aus zwei Hauptteilen: einem Encoder, der die ursprünglichen Daten in eine komprimierte, niedrigdimensionale Darstellung (den sogenannten Code) überführt, und einem Decoder, der versucht, die ursprünglichen Daten aus diesem Embedding zu rekonstruieren. Bild 7.8 stellt den Aufbau eines Autoencoders schematisch dar.



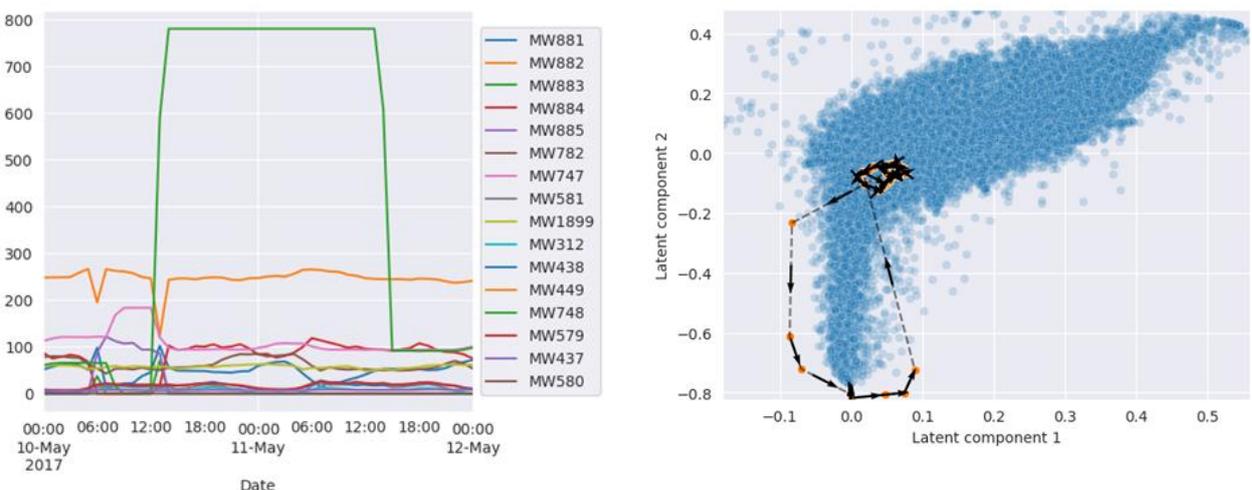
**Bild 7.8:** Schematischer Aufbau eines Autoencoders

Bei der Anomalie Erkennung wird der Autoencoder darauf trainiert, normale Datensätze möglichst präzise zu rekonstruieren. Wenn er jedoch mit einem anomalen Datensatz konfrontiert wird, fällt die Rekonstruktion schlechter aus, da dieser Datensatz nicht den gelernten Mustern entspricht. Bild 7.9 zeigt einen normalen Datensatz und seinen Code. Die Daten beider Abbildungen stammen von den Harzwasserwerken GmbH. Alle Werte dieser Sensorzeitreihe liegen eng im Zentrum des Wertebereiches.



**Bild 7.9: Normaler Tagesverlauf (links) und Code (rechts)**

Bild 7.10 verdeutlicht, wie ein abnormer Datensatz ein Abweichen des Codes erzeugt, was zu einer deutlich schlechteren Rekonstruktion führt. Diese Abweichung kann genutzt werden, um Anomalien im Datensatz zu identifizieren.



**Bild 7.10: Abnormaler Tagesverlauf (links) und Verlauf des Codes (rechts)**

Die App ist flexibel einsetzbar und kann an die spezifischen Bedürfnisse und Daten eines Wasserversorgers angepasst werden. So können Versorgungsunternehmen mit ihren eigenen Daten arbeiten und die App zur Überwachung ihrer Netze nutzen, um anomale Verhaltensweisen frühzeitig zu erkennen und präventiv zu reagieren. Zudem bietet die App die Möglichkeit, anomale Ereignisse im Kontext des allgemeinen Verbrauchsmusters zu betrachten, was eine fundierte Entscheidungsfindung unterstützt. Eine weitere Beschreibung der App befindet sich im Anhang Kap. 13.4.3.

### Fazit Anomalie-Detektion

**Einsatzgebiet:** Extremereignisse treten naturgemäß selten auf. Beim Data-Mining von Wasserverbrauchsdaten können solche Ereignisse als Anomalien definiert und automatisiert erkannt werden. Dazu wurde in TrinkXtrem eine entsprechende App entwickelt.

**Merkmale:** Die App basiert auf einem neuronalen Netz, die anormale Datensätze aus einem Pool von Trinkwasserverbrauchsdaten identifiziert. Die App wurde für Anwendungsfälle und spezifische Szenarien bei den Harzwasserwerken GmbH und bei der Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH konfiguriert und getestet.

## 8 Preismanagement von Spitzenbedarfen

### 8.1 Einführung

Die zeitabhängige Preisgestaltung zur Steuerung der Kapazitätsauslastung ist ein gängiges Instrument, das viele Bereiche des täglichen Lebens seit langem durchdrungen hat. Dazu zählt wie beispielsweise die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel oder der Bezug von Strom. In TrinkXtrem wurde untersucht, inwieweit auch die öffentliche Wasserversorgung von solchen Steuerungswerkzeugen profitieren kann. Prinzipiell zielt die Entwicklung einer dynamischen Preismodellkomponente darauf ab, die Nachfrage der Kunden effizient zu verschieben. Fern-, Flächen- und lokale Wasserversorger werden dabei unterstützt, indem ökonomische Anreize für Kunden geschaffen werden, um ihren Wasserverbrauch gemäß Bild 8.1 von lastintensiven (1) in lastärmere (2) Zeiten zu verlagern. Dadurch wird eine Kapazitätsentlastung bei den Versorgern angestrebt. Durch zeitliche Preis- oder Anreizvariationen werden die Kunden motiviert, ihren Wasserverbrauch in Zeiten zu verschieben, in denen das Angebot höher und die Nachfrage niedriger ist. Dies führt nicht nur zu einer besseren Auslastung der vorhandenen Infrastruktur und einer Erhöhung der Versorgungssicherheit, sondern auch zu einer Reduktion der Spitzenlasten. Kurzfristig führt dies zu Betriebskosteneinsparungen und verringert auf längerer Sicht die Notwendigkeit kostenintensiver Investitionen in zusätzliche Systemkapazitäten.

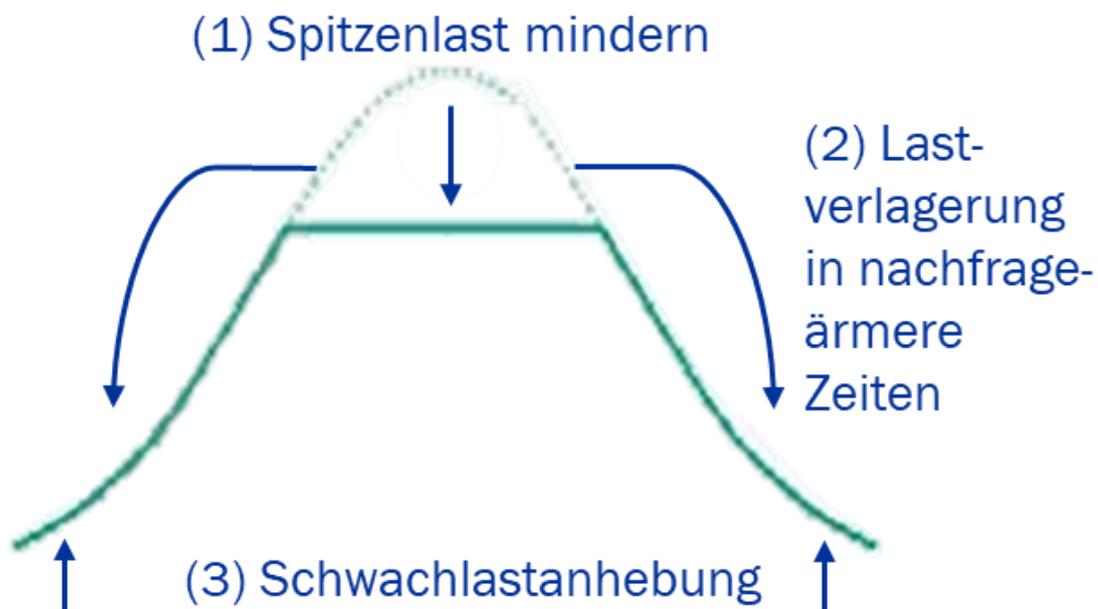


Bild 8.1: Zielstellung einer dynamischen Preismodellkomponente

Unter einer „zeitlichen Verschiebung der Kundennachfrage“ („Lastverschiebung“) wird die Reduzierung des Wasserverbrauchs eines Kunden zum Zeitpunkt  $t_0$  (ursprünglicher Zeitpunkt) und das zeitlich verzögerte Nachholen des Verbrauchs zu einem späteren Zeitpunkt  $t_1$  verstanden. Dabei bleibt der Gesamtverbrauch über die Zeit gleich. Im Gegensatz dazu steht der sogenannte „Lastabwurf“, bei dem der Verbrauch zu  $t_0$  reduziert, aber nicht zu  $t_1$  nachgeholt wird. In diesem Fall deckt der Kunde den entfallenen Verbrauch durch alternative Bezüge (z. B. eigene Quelle).

Die Handlungsempfehlungen beziehen die Erfahrungen aus der Zusammenarbeit im TrinkXtrem-Projekt mit den Fern- und Flächenwasserversorgern Harzwasserwerke (HWW) und Landeswasserversorgung (LW) sowie dem Wasserversorgungsunternehmen Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH (RWW) mit ein. Die Praxispartner gaben jeweils essenzielle Einblicke in die praktischen Anforderungen und Herausforderungen der (Fern-) Wasserversorgung.

## **8.2 Arbeitsschritte zu einem zeitlich variierenden Preis-/Anreizmodell**

Die folgenden Empfehlungen sind so gestaltet, dass sie die Erarbeitung eines zeitlich variierenden Preis- bzw. Anreizmodells in fünf Arbeitsschritten beschreiben, wodurch die Rahmenbedingungen verschiedener Versorgungsunternehmen berücksichtigt werden.

### *8.2.1 Schritt 1: Aufbereitung und Aggregation von Verbrauchsdaten*

#### 1. Ziel:

Bereitstellung vollständig bereinigter und aggregierter Datensätze zur Analyse der Wasserabgabe und Kundennachfrage auf Grundlage von Wasserwerks- und Smart-Meter-Daten.

#### 2. Wichtigkeit und Nutzen

Die Bereinigung und Aggregation der Datensätze ermöglichen eine plausible Datengrundlage für die Folgeschritte der Angebots-, Nachfrage- und Nutzenanalyse. Dadurch wird eine verlässliche Basis für weiterführende Auswertungen geschaffen.

#### 3. Inhaltliches Vorgehen

Der Versorger stellt für die spätere Angebots- und Nutzenanalyse zum einen Datensätze zur Wasserabgabe von Wasserwerken und Hochbehältern zur Verfügung. Zum anderen

sind Smart-Meter-Auswertungen von den Übergabestellen der Kunden für die Nachfrageanalyse von Bedeutung. Die jeweiligen Datensätze werden im Idealfall in ihrer kleinsten Zeitauflösung (z. B. Liter/Sekunde) bereitgestellt. In der Datenaufbereitung sollten Lücken geschlossen, Ausreißer beseitigt und Smart Meter-Daten hinsichtlich ihrer Plausibilität mit Abrechnungswerten geprüft werden, um für Folgeauswertungen eine möglichst reale Abbildung der Versorgung zu erhalten. Abschließend ist eine Datenaggregation in kleineren Auflösungen (15 Min.-Werte, Stundenwerte, Tageswerte) für Folgeanalysen zu empfehlen.

#### 4. Verantwortlichkeiten und Ressourcen

Datenbereitstellung durch den Versorger. Bei Bedarf kann der Versorger bei diesem Arbeitsschritt unterstützt werden.

#### 5. Herausforderungen

Der Umgang mit Lücken- und fehlerhaften Datensätze sowie nicht ganzjährig vorhandenen Datensätze kann zu Herausforderungen führen. Hier kann MOcons mit seiner Datenexpertise unterstützen und bei der Validierung, Bereinigung und Ergänzung von Daten helfen.

#### 6. Ergebnisbeispiele

Das Ergebnis sind vollständig bereinigte und plausibilisierte Datensätze, die in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen (z. B. 15-Minuten-, Stunden- oder Tageswerte) vorliegen.

### 8.2.2 *Schritt 2: Durchführung einer Angebotsanalyse*

#### 1. Ziel

In diesem Schritt wird das Problem der Kapazitätsauslastung des Versorgers unter geografischen und zeitlichen Aspekten analysiert (Problemanalyse).

#### 2. Wichtigkeit und Nutzen

Die dynamische Preismodellkomponente (Schritt 5) benötigt Regelgrößen (Kriterien) für eine zielorientierte Steuerung des Angebots. Neben ausgewählten Kriterien sind dazu entsprechende Grenzwerte erforderlich, die bei Überschreitung als Auslöser für einen variierenden Preis bzw. Anreiz benötigt werden, um somit die Nachfrageverschiebung anzuregen.

### 3. Inhaltliches Vorgehen

Bei der Angebotsanalyse sind zwei zentrale Aspekte von entscheidender Bedeutung: Wo und wann soll eine zeitliche Verschiebung der Nachfrage erfolgen?

#### *A. Wo ist die Nachfrageverschiebung anzureizen?*

Die Frage nach der geografischen Dimension der Nachfrageverschiebung ist von grundlegender Bedeutung für die Effizienz der dynamischen Preismodellkomponente. Hierbei sind zwei wesentliche Ansätze zu unterscheiden, die jeweils verschiedene Perspektiven auf das Versorgungssystem ermöglichen:

- Gesamtangebots-Lastgang: Dieser Ansatz umfasst die ganzheitlichen Kapazitätsengpässe bezogen auf das Versorgungssystem als Ganzes.
- Relevante leitungsbezogene Teilabschnitte: Dieser Ansatz umfasst die spezifischen Kapazitätsengpässe in bestimmten Netzabschnitten. Durch die detaillierte Untersuchung einzelner Leitungsabschnitte können lokale Probleme und Engpässe präzise identifiziert werden.

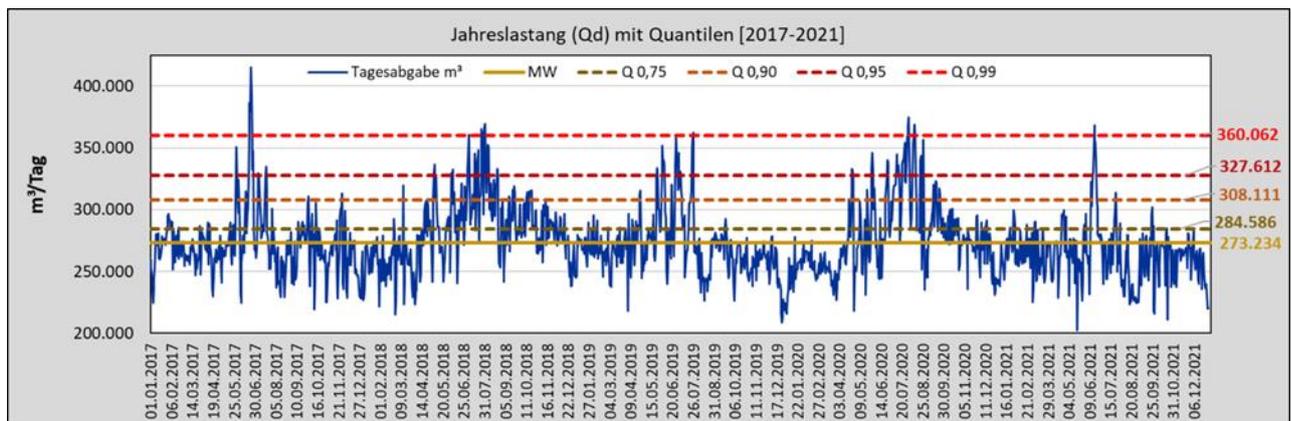
Um eine tiefgehende und aussagekräftige Analyse zu ermöglichen, kann es erforderlich sein, eine Datenaggregation einzelner Kundenlastgänge aus mehreren Smart-Meter-Daten durchzuführen und diese zu leitungsbezogenen Angebots-Lastgängen zusammenzufassen. Diese Aggregation ermöglicht präzise Einblicke in das Verbrauchsverhalten und hilft, Muster zu erkennen, die für die Steuerung des Angebots von entscheidender Bedeutung sind.

#### *B. Wann ist die Nachfrageverschiebung anzureizen?*

Die Frage nach der zeitlichen Dimension zielt darauf ab, die spezifischen Bedingungen und Zeitpunkte zu definieren, unter denen eine dynamische Preismodellkomponente zur Anwendung kommen soll. Diese Entscheidung hängt maßgeblich davon ab, wann für einen Versorger ein steuerungswürdiges Ereignis eintritt (z. B. ein Extremereignis oder hohe Nachfragespitzen, die die Versorgungssicherheit gefährden können). Um diese Kriterien zu ermitteln, sind folgende detaillierte Schritte erforderlich:

1. Für die Quantifizierung des Angebots werden geeignete statistische Methoden und Kennzahlen verwendet, die eine präzise und aussagekräftige Beschreibung der Angebotssituation ermöglichen.
2. Spitzenabgaben werden nach ihrer Intensität, Häufigkeit, Dauer und ihrem zeitlichen Auftreten analysiert, um Spitzencharakteristika bzw. Hochlastphasen zu identifizieren. Hierbei wird ein umfassendes Verständnis ihrer Eigenschaften und Auswirkungen auf das gesamte Versorgungssystem erlangt.

3. Mit Hilfe der Kennzahlen aus 2. können Spitzencharakteristika gebildet werden:
- Ab welcher Höhe einer Spitzenabgabe entstehen Kapazitätsengpässe und mit welcher Häufigkeit treten diese auf? In Bild 8.2 zeigt das Quantil  $Q_{0,99}$  beispielsweise, dass 1% (ca. 18 Tage) der Tagesabgaben innerhalb der fünf Jahren oberhalb von 360.062 m<sup>3</sup> gewesen sind. Eine Schwellenwertbestimmung ist entscheidend für die Festlegung von Auslösepunkten für Steuerungsmaßnahmen.
  - Welche Dauer von Abgabespitzen (kurz- oder langfristig) ist für verschiedene Wertschöpfungsstufen kritisch? Die Betrachtung unterschiedlicher Zeitskalen ermöglicht eine differenzierte Bewertung der Auswirkungen auf verschiedene Bereiche des Versorgungssystems.
  - Zu welchen Zeitpunkten treten Spitzen typischerweise auf? Die zeitliche Verortung von Spitzen gibt Aufschluss über das Nachfrageverhalten (z. B. Saisonalitäten oder Muster) und stellt eine wichtige Information für die spätere Wahl des Preissystems dar. Ein Beispiel ist im Anhang (Bild 13.22) zu sehen.



**Bild 8.2: Identifizierung relevanter Spitzenhöhen mit Quantilen (Bsp. LW)**

Diskussion der Zwischenergebnisse in einem Workshop:

- In einem Workshop werden die Ergebnisse hinsichtlich der Relevanz von Spitzenabgaben für verschiedene Wertschöpfungsstufen und Assets diskutiert: Hierbei werden die Auswirkungen der identifizierten Spitzen auf unterschiedliche Bereiche des Versorgungssystems (z. B. Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung) sowie auf spezifische Assets (z. B. Druckerhöhungsanlagen oder Förderpumpen) gemeinsam mit dem Versorger analysiert.
- Die angebotsseitigen Auswirkungen werden unter technischen, sicherheitsbedingten, wirtschaftlichen und rechtlichen Aspekten analysiert. Neben Spitzenabgaben sind wei-

tere Risiken für Versorgungssicherheit und Lieferkapazität zu beachten, die Nachfrageverschiebungen erfordern könnten. Auch zukünftige Entwicklungen wie ein erhöhter Bedarf oder das Hinzukommen von Neukunden sind einzubeziehen.

3. Ein weiterer wichtiger Baustein ist die Klärung der grundsätzlichen Ziele des Versorgers bezüglich der Verlagerung der Nachfrage: Es wird erörtert, ob primär Extremwerte vermieden oder eine weitgehende Vergleichmäßigung der Nachfrage angestrebt werden soll. Diese Zieldefinition ist von entscheidender Bedeutung für die spätere Modellierung und die Gestaltung der Steuerungsstrategien (Schritt 5). Eine weitere Konkretisierung lässt sich ggf. in der Nutzenrechnung bestimmen.

Die Analyse geografischer und zeitlicher Aspekte der Nachfrageverschiebung ermöglicht die Entwicklung der dynamischen Preismodellkomponente, die bedarfsgerecht auf die spezifischen Herausforderungen des Wasserversorgungssystems zugeschnitten ist.

#### 4. Verantwortlichkeiten und Ressourcen

Die Analyse der Daten und die Ableitung der Implikationen erfolgt durch MOcons. Fachpersonal aus den Wertschöpfungsstufen (Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung, Verteilung) wird zur Einordnung der Ergebnisse und als Diskussionspartner im Workshop benötigt.

#### 5. Herausforderungen

Falls der Versorger die Auswirkungen und Grenzen von spezifischen Spitzenabgaben oder anderer sicherheitsrelevanter Ereignisse für das Versorgungssystem nicht kennt, sind möglicherweise weitere Analysen und die gemeinsame Festlegung von Prämissen erforderlich.

#### 6. Ergebnisbeispiele

Im Ergebnis wurden zwei grundlegende Informationen gewonnen:

##### A. *Wo ist die Nachfrageverschiebung anzureizen (Versorgungsbereich)?*

- Entweder Anreiz zur Nachfrageverschiebung für das ganze Versorgungsgebiet oder
- Fokussierung auf einen problematischen leitungsbezogenen Teilabschnitt.

##### B. *Wann ist die Nachfrageverschiebung anzureizen?*

- Definition von Kriterien und Grenzwerten, die eine Nachfrageverschiebung durch eine dynamische Preismodellkomponente auslösen bzw. anreizen.

Die Kriterien, nach denen ein Versorger die Nachfrageverschiebung anreizen kann, lassen sich in zwei Hauptkategorien einteilen:

(1) Nach Versorgungssicherheit bzw. Lieferkapazität:

Bsp. 1: Niedriger Grundwasserstand, der zu einer (temporär) verringerten Lieferkapazität führt.

Bsp. 2: Temporärer Ausfall eines Assets (z. B. Rohrbruch), der die Lieferkapazität beeinträchtigt.

(2) Nach Kostenoptimierung bzw. Nachhaltigkeit:

Bsp. 3: Spitzenabgaben, die zum zusätzlichen Einschalten von Förderpumpen führen und damit kurzfristig steigende Betriebskosten verursachen.

Bsp. 4: Spitzenabgaben, die einen Kapazitätsausbau erforderlich machen und somit steigende Investitionskosten nach sich ziehen.

Für die praktische Umsetzung ist es essenziell, Grenzwerte für die ausgewählten Kriterien zu definieren. Diese Grenzwerte dienen der dynamischen Preismodellkomponente als Auslöser für zeitliche Preisvariationen bzw. Anreize zur Nachfrageverschiebung (prognostizierter Wasserbedarf nach Kapitel 6.5). Beispiele für solche Grenzwerte könnten sein:

- Der Grundwasserstand in Millimetern (mm) für die Beurteilung der Versorgungssicherheit (Beispiel 1).
- Die Wasserwerksabgabe in Liter pro Sekunde (l/s) für die Bewertung von Spitzenabgaben und deren Kostenauswirkungen (Beispiel 2).

Durch die sorgfältige Festlegung dieser Steuerungsparameter kann eine effiziente dynamische Preismodellkomponente entwickelt werden, die sowohl die Versorgungssicherheit gewährleistet als auch die Kosteneffizienz und Nachhaltigkeit der Wasserversorgung optimiert.

### 8.2.3 Schritt 3: Durchführung einer Nachfrageanalyse

#### 1. Ziel

In diesem Schritt wird die Kundennachfrage des Versorgers analysiert, um steuerungswürdige Kunden und die Ursache der Kapazitätsbelastung zu identifizieren.

#### 2. Wichtigkeit und Nutzen

Unter Einbezug der Nachfrageseite können später in der Modellfindung (Schritt 5) Lösungsansätze zum besseren Ausgleich von Wasserangebot und -nachfrage erarbeitet werden. In diesem Schritt ist es von Bedeutung zu eruieren, welche Kunden sich für eine zielorientierte Lastverlagerung eignen.

### 3. Inhaltliches Vorgehen

#### *Welche Kunden sind zeitlich zu verschieben?*

Nachdem in Schritt 2 die Frage nach der geografischen und zeitlichen Dimension der Nachfrageverschiebung untersucht wurde, ist in der Nachfrageanalyse die Identifikation steuerungswürdiger Kunden ein zentraler Schritt, um gezielte Maßnahmen für eine dynamische Preismodellkomponente zu entwickeln. Steuerungswürdige Kunden sind diejenigen, die einerseits ein signifikantes Potenzial zur Reduzierung oder Verschiebung von Lasten bieten und dies andererseits zu vertretbaren Kosten heben können. Diese Kunden weisen daher entweder besonders ausgeprägte Spitzenlastphasen auf oder besitzen die (technische) Flexibilität, ihre Nachfrage systemdienlich zu verlagern.

Das Ziel ist es, das Potenzial für Nachfrageverschiebungen bei unterschiedlichen Kundengruppen zu identifizieren. Durch die Auswertung von Smart-Meter-Daten kann ermittelt werden, welche Kunden ihre Nachfrage besonders in Spitzenlastzeiten platzieren und damit für eine hohe Kapazitätsauslastung beim Versorger verantwortlich sind.

Quantifizierung und Bewertung der Smart-Meter-Daten von Kunden:

Die detaillierte Analyse der Smart-Meter-Daten liefert präzise Informationen über das individuelle Verbrauchsverhalten der Kunden und bildet die Grundlage für eine fundierte Entscheidungsfindung der Anreize in der Nachfrageverschiebung.

1. Ein im Rahmen des TrinkXtrem-Projekts entwickelter Algorithmus erfasst zunächst die täglichen Spitzenlasten jedes Kunden während der Hochlastphasen im Laufe des gesamten Jahres. Die Analyse zeigt auf, welche Kunden zu welchem Anteil das Gesamtniveau der Spitzenlast bestimmen. Kunden, die einen großen Teil der Spitzenphasen verursachen, sind besonders attraktiv für Maßnahmen zur Lastverschiebung.
2. Ein weiterer entwickelter Algorithmus ermittelt im Anschluss die Zeitpunkte, zu denen die Hoch- und Niedriglastphasen der Kunden auftreten sowie die Momente, in denen die Nachfrage signifikant ansteigt oder abfällt. Die zeitliche Einordnung des Nachfrageverhaltens ermöglicht eine gezielte Erkennung, wann Steuerungsmaßnahmen notwendig und effizient wären.
3. In einem Workshop werden die Ergebnisse anschließend mit dem Wasserversorger gemeinsam diskutiert und validiert. Die individuelle Analyse verbessert die Planbarkeit für die Folgeschritte, da dadurch präzisiert werden kann, wann und in welchem Umfang die einzelnen Kunden Wasser nachfragen oder reduzieren könnten.

#### 4. Verantwortlichkeiten und Ressourcen

Die Analyse der Daten und die Ableitung der Implikationen erfolgt durch MOcons. Fachpersonal aus dem Vertriebsbereich bzw. der Kundenbetreuung werden in die Bewertung und Diskussion der Ergebnisse eingebunden.

#### 5. Herausforderungen

Datenlücken aus den Smart-Meter Auslesungen können die Analyse erschweren. Zudem kann ein Nachfrageverhalten (z. B. Ausreißer) und eventuell zusammenhängende Zählerbeziehungen (z. B. ein Kunde bezieht Wasser aus zwei Zählern komplementär zueinander) nicht immer anhand von Daten vollständig erklärt werden und bedarf fachlichen Input aus der Kundenbetreuung (z. B. Key Account Manager).

#### 6. Ergebnisbeispiele

Die Analyse von Smart-Meter-Daten ermöglicht tiefe Einblicke in das individuelle Verbrauchsverhalten (Bild 8.3) und lassen sich u. a. für die Simulation von Lastverschiebungen nutzen (Bestandteil von Schritt 5):

Übergabestelle		MW881	Nicht relevant MW882	MW883	relevant MW341	Scheint relevant MW580	MW581
$Q_{Total,2021}$	[m <sup>3</sup> ]	336.698	7.757.065	393.551	546.600	5.619	387.279
$Q_{Peak}$	[m <sup>3</sup> ]	96.131	9.377	97.581	293.854	2.390	52.297
$Q_{Peak}/Q_{Total}$	[%]	28,6%	0,1%	24,8%	53,8%	42,5%	13,5%
$T_{Qh,Max}$		Night Peak	Night Peak	Night Peak	Afternoon Peak	Morning Peak	Morning Peak
$Q_{h,Max,T}$	[m <sup>3</sup> ]	44.054	3.329	45.425	103.034	1.262	22.737
$Q_{h,Max,T}$	[%]	46%	36%	47%	35%	53%	43%
$T_{Qh,Min}$		Morning Base	Evening Base	Morning Base	Night Base	Night Base	Night Base
$Q_{h,Min,T}$	[%]	57%	33%	35%	28%	100%	99%

**Bild 8.3: Lastverschiebungspotenzial von Spitzenlast in nachfragearme Zeiten (Bsp. HWW)**

- Das berechnete spezifische Lastspitzenvolumen ( $Q_{Peak}$ ) zeigt zunächst das grundlegende Potenzial für Lastverschiebungen bei jedem Kunden auf.
- Die ermittelten Zeiten der Spitzen- ( $T_{Qh,Max}$ ) und Niedriglastphasen ( $T_{Qh,Min}$ ) verdeutlichen, zu welchen Tageszeiten bei jedem Kunden Verlagerungspotenzial besteht und wann dieses genutzt werden könnte.
- Eine weitere Auswertung liefert die Information, zu welcher Uhrzeit die jeweiligen Kunden für gewöhnlich ihre Nachfrage besonders intensiv ausweiten und vermindern.
- Analyseergebnisse zu klimatischen Abhängigkeiten, wie Temperatur und Niederschlag, sind weitere Informationen über das Verhalten der Kunden und wichtige Erkenntnisse für die Festlegung der Rahmenbedingungen eines preis- oder anreizbasierten Modells.

Auf Grundlage dieser Analyse werden Kunden nach ihrem Einfluss auf das Versorgungssystem in eine Rangfolge von besonders relevanten bis weniger relevanten Kunden eingeteilt. Ein wichtiger Aspekt der Ergebnisse ist die Möglichkeit, Kunden mit ähnlichem Verbrauchsverhalten zu gruppieren. Dies erfolgt durch die Clusterung von Kunden, die ähnliche Hoch- und Niedriglastmuster zeigen und ein gleichbleibendes Nachfrageverhalten aufweisen. Dadurch kann ein Modell entwickelt werden, das sich auf tatsächliche Verbrauchsmuster anstatt auf Durchschnittswerte aller Kunden stützt und ermöglicht dem Wasserversorger, gezielt Maßnahmen auf jene Kunden zu fokussieren, die das System aufgrund der angebotsseitigen Spitzenabgaben (Schritt 2: Angebotsanalyse als Problemanalyse) am stärksten belasten.

Die Analyse kann jedoch auch steuerungsrelevante Kunden identifizieren, die nicht nur durch hohe Spitzenlasten auffallen. Sie zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität im Verbrauchsverhalten oder durch eine konstante bzw. vorhersehbare Nachfrage aus. Diese Kunden können durch gezielte Nachfrageverschiebungen dazu beitragen, das Gesamtsystem in bestimmten Zeiten zu entlasten. Wie bereits in Schritt 2 beschrieben, können nicht nur Spitzenlasten zu einer Extremsituation führen, sondern auch andere Umstände, die die Lieferkapazität des Versorgers einschränken – etwa technische Ausfälle. In solchen Situationen kann es ebenso sinnvoll sein, Nachfrageverschiebungen anzureizen, um das System zu stabilisieren. Dabei ist es oft nicht notwendig, alle Kunden eines Versorgers einzubeziehen; vielmehr reicht es, eine kleinere Gruppe zu identifizieren, die durch gezielte Maßnahmen das System wirksam entlasten kann.

#### 8.2.4 Schritt 4: Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse

##### 1. Ziel

In diesem Schritt wird eine wirtschaftliche Entscheidungsgrundlage für den Versorger erarbeitet.

##### 2. Wichtigkeit und Nutzen

Mit Hilfe der Analyse ist abzuschätzen, ob die Vorteile der Einführung einer dynamischen Preismodellkomponente die damit verbundenen Kosten übersteigen und somit einen positiven Gesamtnutzen sowohl für Versorger als auch für die Kunden liefert.

### 3. Inhaltliches Vorgehen

#### A) *Nutzen des Versorgers:*

Die Motivation des Versorgers, die Kundennachfrage zeitlich zu verschieben, liegt in der Entlastung der Versorgungskapazitäten durch das Vermeiden von Spitzenlasten bzw. Extremsituationen. Wie bereits in Schritt 2 (Angebotsanalyse) herausgearbeitet, lassen sich zwei Hauptkategorien bestimmen, nach denen ein Versorger die Nachfrageverschiebung anreizen kann. Diese Kategorien repräsentieren gleichzeitig den grundsätzlichen Nutzen für den Versorger:

- Der wichtigste Nutzen ergibt sich aus der Erhöhung der Versorgungssicherheit. Das bedeutet, dass der Versorger seine Kunden weiterhin jederzeit zuverlässig mit Wasser versorgen kann, ohne die Kapazitätsgrenzen seiner Anlagen zu überschreiten.
- Ergänzend dazu entsteht ein betriebswirtschaftlicher Nutzen. Kundenseitig verursachter Spitzenbedarf kann den Versorger dazu zwingen, seine Kapazitäten an ihre Grenzen zu bringen. Dies führt zu erhöhten Betriebskosten. Drohen die Spitzenbedarfe allerdings die Kapazitätsgrenzen zu überschreiten, so sieht sich ein Versorger häufig gezwungen, Investitionen zu tätigen. Durch den Anreiz zur zeitlichen Nachfrageverschiebung würden sich vermeidbare Kosten identifizieren und letztlich einsparen lassen.

#### B) *Kosten des Versorgers:*

Der Versorger erstellt eine Kosten-Nutzen-Rechnung, indem er den erwähnten Nutzenpositionen die neu entstehenden Kosten gegenüberstellt, die durch die Implementierung einer dynamischen Preismodellkomponente entstehen.

- Beispiele hierfür wären intelligente Zähler zur zeitgenauen Verbrauchsmessung und Datenübermittlung, Kommunikationsnetzwerke zur Preis- oder Ereignisbenachrichtigung sowie Systeme zur Datenspeicherung und -verarbeitung für die Abrechnung. Welche Investitions- und Betriebskosten anfallen, hängt vom gewählten preis- oder anreizbasierten Modell ab.

#### C) *Kosten-Nutzen-Rechnung – Verwendung Nutzenüberhang:*

Der daraus resultierende größere Nutzen fließt als Anreizgröße in eine dynamische Preismodellkomponente für die Kunden ein.

- Kunden müssen davon überzeugt werden, ihre Nachfrage zeitlich zu verschieben. Dies tun sie jedoch nur, wenn für sie ein größerer individueller Nutzen mit dieser Verschiebung gegenüber ihrer aktuellen Situation einhergeht. Somit ergibt sich für den Kunden ebenfalls eine individuelle Kosten-Nutzen-Rechnung.

- Der Nutzen entsteht aus dem monetären Anreiz des Versorgers (dynamische Preismodellkomponente), indem der Kunde durch seine Nachfrageverschiebung seine zu bezahlende Rechnung reduzieren kann. Die Kosten entstehen durch die etwaigen erforderlichen Investitionen für die Reaktionsfähigkeit. Diese werden durch gegebenenfalls zusätzliche Betriebskosten ergänzt. In diesem Fall entstehen jeweils individuelle Wirtschaftlichkeitsrechnungen bei den Kunden, da unterschiedliche Voraussetzungen vorliegen:
  - ▶ Es ist keine Investition erforderlich, falls eine Änderung im Betriebsablauf ausreicht, um die erforderliche Flexibilität der Nachfrage zu gewährleisten (z. B. wird der Hochbehälter des Kunden zukünftig anders befüllt).
  - ▶ Es werden ggf. Erweiterungsinvestitionen notwendig, z. B. in eine neue Steuerungstechnik oder eine Kapazitätserweiterung des Kunden-Hochbehälters (um erweiterte Reaktionsmöglichkeiten zu schaffen).
  - ▶ Möglicherweise ist eine Neuinvestition in einen Kunden-Hochbehälter erforderlich.

Durch die sorgfältige Abwägung der Nutzenpotenziale gegenüber den Implementierungskosten kann eine fundierte Entscheidung über die Einführung einer dynamischen Preismodellkomponente getroffen werden. Dabei ist zu beachten, dass einige der genannten Aspekte nicht vollumfänglich quantifizierbar sind und möglicherweise qualitative Bewertungen ausreichen müssen. Eine ganzheitliche Betrachtung, die sowohl kurz- als auch langfristige Auswirkungen berücksichtigt, ist für eine aussagekräftige Kosten-Nutzen-Analyse unverzichtbar.

#### 4. Verantwortlichkeiten und Ressourcen

Fachpersonal aus dem Bereich Finanzen und Controlling zur Abwägung der entstehenden Kosten und des möglichen Nutzens. Letzteres erfordert ggf. Stromverbrauchsdaten und Anlagewerte von Assets. MOcons hat im TrinkXtrem-Projekt vielfältige Ansätze entwickelt, die hierbei genutzt werden können.

#### 5. Herausforderungen

Betriebswirtschaftliche Auswirkungen durch Spitzenlasten lassen sich weitgehend quantifizieren und als Nutzen darstellen. Der Nutzen der Versorgungssicherheit lässt sich auf Basis von Annahmen quantifizieren.

## 6. Ergebnisbeispiele

Als Ergebnisbeispiele werden die Nutzenpotenziale eines Versorgers dargestellt. Exemplarisch werden drei Berechnungen zur Quantifizierung des Nutzens aufgeführt, weitere werden benannt. Bei den Berechnungen ist zu beachten, dass die Einsparungspotenziale sich auf unterschiedliche Wasserversorger aus dem TrinkXtrem-Projekt beziehen.

A) Im ersten Ergebnisbeispiel werden die Stromkosteneinsparungen bei Förderpumpen durch das Vermeiden von Spitzenwasserabgaben dargestellt. Es wurde angenommen, dass bei einer hohen gleichzeitigen Kundennachfrage die erhöhte Wasserabgabe des Versorgers zu einem überproportionalen Strombedarf führt. In diesem Fall lässt der Versorger die Pumpen oberhalb des Betriebsoptimums laufen oder schaltet zusätzliche (Reserve-) Pumpen hinzu. Somit wird für die gleiche Menge an geliefertem Wasser mehr Strom benötigt als bei einer durchschnittlichen Wasserabgabe.

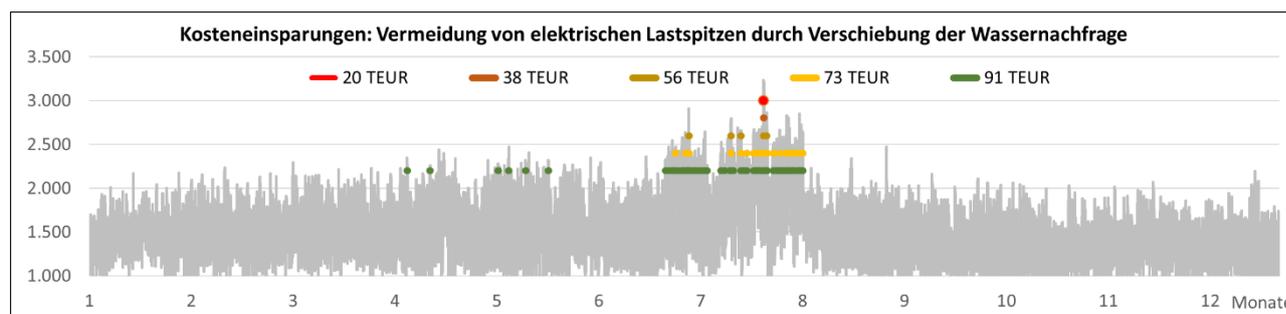
Für die Berechnung wurden die Förderpumpen (ca. 85 % des Gesamtenergiebedarfs) des Versorgers auf den spezifischen Stromverbrauch (kWh pro abgegebenen Kubikmeter Wasser) untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass ab einer bestimmten Wasserabgabe ein sprunghaft ansteigender spezifischer Stromverbrauch (kWh/m<sup>3</sup>) auftritt. Dies trifft auf etwa 15 % der höchsten Spitzenabgaben im Jahr zu (siehe Anhang - Bild 13.23). Kosteneinsparungen sind zwischen 17 TEUR und 119 TEUR pro Jahr möglich (siehe Anhang - Bild 13.24).

Als Folge ergeben sich zwei weitere Kostensenkungspotenziale. Zum einen sind die verzögerten Instandhaltungsmaßnahmen der (Reserve-) Pumpen nicht berücksichtigt, die aufgrund der reduzierten Betriebsstunden später erfolgen würden. Zum anderen könnte das Einsparungspotenzial erheblich vergrößert werden, wenn bei einer verringerten Nutzung die Pumpe nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer kleiner dimensioniert wird und somit die Ersatzinvestition geringer ausfällt. Eine vollständige Stilllegung der Pumpe würde die Ersatzinvestition sogar gänzlich entfallen lassen sowie Strom- und Instandhaltungskosten einsparen.

B) Ein zweites Ergebnisbeispiel zeigt eine Pumpe in einer Druckerhöhungsanlage. Hier ergab sich im besten Fall eine Stromkosteneinsparung von 31 TEUR, wenn die Pumpe nahezu nicht gelaufen wäre. Das Kernergebnis hierbei ist jedoch, dass sich die Pumpe jeweils nur zu Spitzenzeiten der Wasserabnahme bestimmter Kunden hinzuschaltete und dafür nur etwa 13 % der Betriebsstunden eines Jahres hätten vermieden werden müssen. Dies verdeutlicht erneut, dass durch die erfolgreiche Entlastung von Anlagenkapazitäten mittels Lastverschiebungen Investitionen eingespart werden können.

C) Ein erhöhter Strombedarf wirkt sich auch auf die zu zahlenden Stromnetznutzungsentgelte des Wasserversorgers aus. Einerseits führt der erhöhte Strombedarf insgesamt zu

höheren Kosten für die zu zahlenden Netzentgelte des Versorgers (erster Teil der Kosten). Der zweite Teil bezieht sich auf den Strombedarf pro Zeiteinheit, der durch einen Leistungspreis berechnet wird. Je höher die Stromentnahme innerhalb eines kurzen Zeitraums (15 Minuten) ist – in diesem Fall ausgelöst durch einen Spitzenbedarf an Wasser durch die Kunden –, desto höher fallen die Kosten aus. Einen Eingriff regelt der Versorger durch eine Teillastverschiebung der Wassernachfrage, wodurch weniger Stromlast anfällt.



**Bild 8.4:** Berechnung der Stromkosteneinsparungen für Netznutzungsentgelte (Bsp. RWW)

Der rote Punkt in Bild 8.4 demonstriert einen Eingriff des Versorgers für 75 Minuten und einer Einsparung von rd. 20 TEUR. Die Kosteneinsparungen sind im Beispiel bis 91 TEUR pro Jahr möglich. Neben den hier dargestellten Beispielen werden im Anhang, Tabelle 13.12 alle möglichen Einsparpotenziale bzw. Nutzen zusammengefasst.

### 8.2.5 Schritt 5: Durchführung einer Modellfindung

#### 1. Ziel

In diesem Schritt wird eine dynamische Preismodellkomponente entwickelt, die sowohl den Anforderungen des Versorgers als auch den Bedürfnissen der Kunden gerecht wird (Wie kann die Kundennachfrage verschoben werden?).

#### 2. Wichtigkeit und Nutzen

Die Wahl eines geeigneten Modells für die Preismodellkomponente hängt von den spezifischen Zielen und Rahmenbedingungen des Versorgers ab. Die Visualisierung einer dynamischen Komponente und seines gesamten Prozesses ist entscheidend, um sowohl aus der Perspektive des Versorgers als auch aus der des Kunden eine klare Vorstellung der Funktionsweise zu vermitteln.

### 3. Inhaltliches Vorgehen

Grundsätzlich lässt sich die dynamische Preismodellkomponente in preis- und anreizbasierte Modelle unterscheiden:

- Bei preisbasierten Modellen spiegelt der Preis die Kapazitätsauslastung des Versorgers wider und beabsichtigt durch zeitliche Preisvariationen die Kundennachfrage von Hoch- in Niedriglastzeiten zu verschieben.
- Bei anreizbasierten Modellen stellt der Versorger die Kapazitätsauslastung dar, indem er zu kritischen Spitzenzeiten zeitlich festgelegte Ereignisse ausruft und die Kunden durch Anreizzahlungen anregt, ihre Nachfrage zu verschieben.

Für beide Modelle lassen sich verschiedene Varianten entwickeln, die unterschiedliche Ziele verfolgen, finanzielle Anreize bieten und spezifische Stärken sowie Schwächen aufweisen:

- Eine Variante kann bspw. eine starke Vergleichmäßigung der Nachfrage für den Versorger ermöglichen, was zu einer besseren Entlastung der Infrastruktur führt. Dies geht jedoch oft mit einer höheren Komplexität einher, was die Akzeptanz seitens der Kunden verringern kann, da die Teilnahme am neuen Preismodell schwieriger umsetzbar ist.
- Eine andere Variante könnte eine hohe Kontrolle über Lastspitzen bieten, indem der Versorger in der Lage ist, Nachfragehochs effizient zu reduzieren. Der Nachteil dieser Variante liegt jedoch in einer geringeren Vergleichmäßigung der Nachfrage und einem höheren administrativen Aufwand für den Versorger.

Die Wahl des passenden Modells und der geeigneten Variante hängt maßgeblich von den infrastrukturellen Gegebenheiten (siehe Schritt 2), der Kundenstruktur (siehe Schritt 3) und den Zielen des Versorgers ab. Letzteres ist vom Versorger zu eruieren und zu priorisieren. Durch eine sorgfältige Abwägung der Auswirkungen auf den Versorger – etwa in Bezug auf Lastkontrolle, Preisrisiko und administrativen Aufwand – sowie auf den Kunden – beispielsweise hinsichtlich Akzeptanz und Preisstabilität – kann ein Modell entwickelt werden, das die Bedürfnisse beider Parteien erfüllt. In Verbindung mit der kurzfristigen (Stunden bis Tage) prognostizierten Wasserabgabe auf Angebotsseite (Kapitel 6.5 - Webservice für kundengruppenspezifische Wasserbedarfsprognosen) können zeitlich variierende Anreize die Kapazitätsprobleme des Versorgers lösen.

#### 4. Verantwortlichkeiten und Ressourcen

MOcons entwickelt auf Basis der spezifischen Rahmenbedingungen und der Wünsche des Versorgers eine dynamische Preismodellkomponente. Für die technische Implementierung von Smart-Metern und IT-Systemen sowie die Verwaltung des Preis-/ Anreizprogrammes ist der Versorger zuständig. Zudem müssen Kundenkommunikation, rechtliche Rahmenbedingungen und Betrieb und Wartung der Systeme sichergestellt werden.

#### 5. Herausforderungen

Dynamische Preismodellkomponenten können komplex sein und eignen sich nicht für jede Kundengruppe. Daher ist es wichtig, das passende Modell für die geeignete Kundengruppe auszuwählen, welches nicht nur die Ziele des Versorgers erreicht, sondern auch verständlich vermittelt werden kann (Kundenakzeptanz).

#### 6. Ergebnisbeispiele

##### A) Beispielhafte Anwendung eines Modells

Im Rahmen eines Workshops mit einem Wasserversorger und acht Kunden wurde ein anreizbasiertes Modell angewendet, um die Wirkung auf die Reduzierung der Spitzenlast zu veranschaulichen. Als Zielwert wurde die Reduktion der Spitzenlast an zehn Spitzentagen (rückblickend auf ein vergangenes Belieferungsjahr bezogen) definiert, wobei als Regelgröße (behandelt in Schritt 2) die Wasserabgabe in Liter pro Sekunde herangezogen wurde. Zudem ist ein fiktives finanzielles Anreizvolumen (behandelt in Schritt 4) angenommen worden, welches in diesem Anwendungsbeispiel den Kunden in drei unterschiedlichen finanziellen Varianten in Aussicht gestellt wurde. Zwei Szenarien stellten dabei in Bild 8.5 einen Vergleich dar: Die Beteiligung aller Kunden an der Spitzenlastreduzierung (Szenario 1) und das Mitwirken von nur der Hälfte der Kunden (Szenario 2).

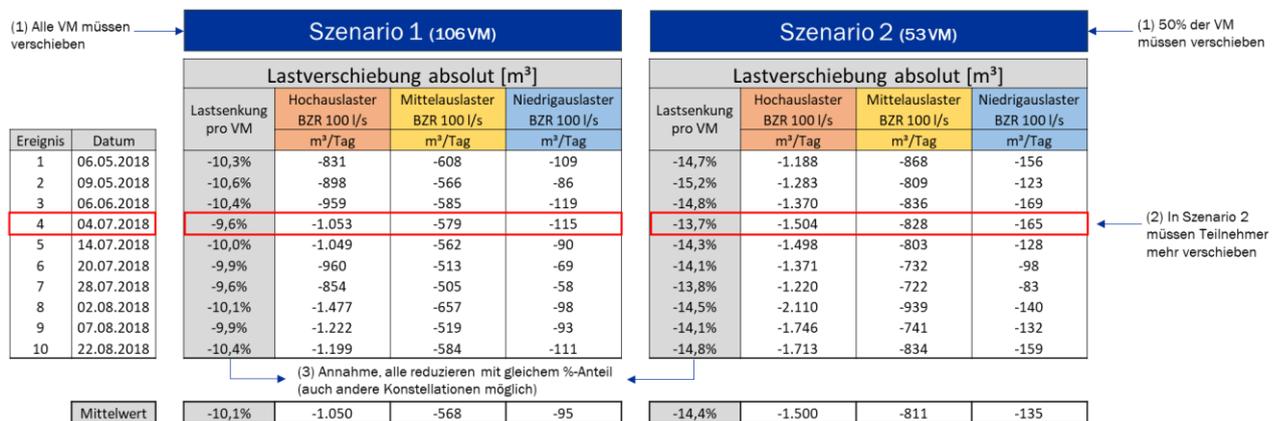
##### ► Szenario 1 - Beteiligung aller Kunden:

Bei einer gleichverteilten Lastsenkung ( $\approx 10\%$ ) auf mehr Teilnehmer fällt die Reduktion pro Kunde geringer aus. Der dadurch niedrigere finanzielle Anreiz könnte die Kundengewinnung erschweren, bei dem Vorhaben teilzunehmen.

##### ► Szenario 2 – Beteiligung der Hälfte der Kunden:

Die höhere Lastsenkung pro Kunde ( $\approx 14\%$ ) steigert den finanziellen Anreiz und die Teilnahmebereitschaft. Weniger zu überzeugende Kunden bedeuten geringere gesamtheitliche

Investitions- und Verwaltungskosten. Besonders effizient wäre die Beteiligung weniger großer Kunden zur Spitzenlastreduzierung.



**Bild 8.5: Szenariodarstellung: Reduzierung der Kundennachfrage (Bsp. LW)**

**B) Diskussion über Reaktions- und Verschiebungsmöglichkeiten**

Darüber hinaus wurden mit den Kunden Möglichkeiten einer Nachfrageverschiebung von Hoch- in Niedriglastphasen diskutiert. Dabei wurden Anpassungsmöglichkeiten erörtert, wie Kunden ihre Nachfrage verschieben könnten (siehe Anhang - Bild 13.25), z. B. durch eine optimierte Behälterbewirtschaftung. Auch die Alternative zur Nachfrageverschiebung, der sogenannte Lastabwurf, wurde vorgestellt. Hierbei wird die reduzierte Wassernachfrage vom Kunden nicht zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt, sondern z. B. durch den Einsatz von Eigenwasser oder den Rückgriff auf andere Vorlieferanten ersetzt.

**C) Diskussion zu weiteren preis- und anreizbasierten Modellen**

Ein weiteres bedeutendes Ergebnis war die Diskussion mit zwei Wasserversorgern sowie Kunden über verschiedene preis- und anreizbasierte Modelle (siehe Anhang - Bild 13.26). Im Mittelpunkt standen Themen wie die Komplexität der Modelle, ihre Umsetzbarkeit und ihre Planbarkeit. Es wurde ausführlich diskutiert, welche Modelle größere Erfolgsaussichten haben und welche Herausforderungen bei der Implementierung aus Sicht von Kunden und Versorgern zu erwarten sind.

Abschließend lässt sich für den Versorger klären, welche finanziellen Anreize die Kunden zur gewünschten Nachfrageverschiebung motivieren, um die Gleichzeitigkeitseffekte der Nachfrage (Spitzenlasten) zu beeinflussen.

## Fazit Preismanagement von Spitzenbedarfen

**Einsatzgebiet:** Mit der in TrinkXtrem entwickelten Methodik können Wasserversorger dynamische Preismodellkomponenten entwickeln, um die Kundennachfrage effizient zu verschieben. Damit werden ökonomische Anreize für Kunden geschaffen, um ihren Wasserverbrauch von lastintensiven in lastärmere Zeiten zu verlagern.

**Merkmale:** Die Gestaltung des zeitlich variierenden Preis- bzw. Anreizmodells ist in 5 Arbeitsschritten beschrieben. Ziel ist eine bessere Auslastung der vorhandenen Infrastruktur, eine Erhöhung der Versorgungssicherheit sowie eine Verminderung der Spitzenlasten. Kurzfristig führt dies zu Betriebskosteneinsparungen und verringert langfristig die Notwendigkeit von Investitionen in zusätzliche Systemkapazitäten. Die Methodik bezieht die Erfahrungen aus der Zusammenarbeit mit den Harzwasserwerken GmbH, der Landeswasserversorgung sowie der Rheinisch-Westfälischen Wasserwerksgesellschaft mbH ein.

## 9 Risiko und Vorsorge

### 9.1 Update der Vorsorgekonzepte

#### 9.1.1 Einführung

Vorsorgekonzepte berücksichtigen vorbeugende Maßnahmen, die zur Vermeidung, Verringerung sowie zur Bewältigung von Schadensereignissen ergriffen werden (BBK Glossar „Vorsorge“). Ziel ist es, das Schadensausmaß oder die Eintrittswahrscheinlichkeit von Extremereignissen zu reduzieren oder zu verhindern. Im Projekt TrinkXtrem wurde eine übertragbare Vorgehensweise zur Erstellung von Vorsorgekonzepten entwickelt, um die Effektivität und Wirksamkeit von Risikomanagementmaßnahmen bei hydrologischen Extremereignissen zu verbessern. Insbesondere Niedrigwasserereignisse, Trocken- und Dürreperioden stellen eine Herausforderung dar. Denn anders als häufig betrachtete Gefahren wie Stromausfälle, Epidemien oder IT-Ausfällen können diese zu irreversiblen Beeinträchtigungen des Wasserdargebots führen. Die zeitliche Dimension ist hierbei entscheidend, da solche Ereignisse von mehreren Monaten bis hin zu Jahren anhalten können. Sowohl die in den vergangenen Jahren in Deutschland vermehrt aufgetretenen hydrologischen Extremereignisse als auch die Prognosen des Weltklimarats (IPCC) weisen darauf hin, dass sich dieser Trend mit hoher Wahrscheinlichkeit in Zukunft weiter verstärken wird. Vor diesem Hintergrund wird die langfristige Sicherung einer resilienten Trinkwasserversorgung immer wichtiger. Dabei können gezielte Vorsorgekonzepte, die speziell auf solche Ereignisse abgestimmt sind und wirksame vorbeugende Maßnahmen ermöglichen, eine entscheidende Rolle spielen.



**Bild 9.1:** Übersicht der Phasen des Risiko- und Krisenmanagements

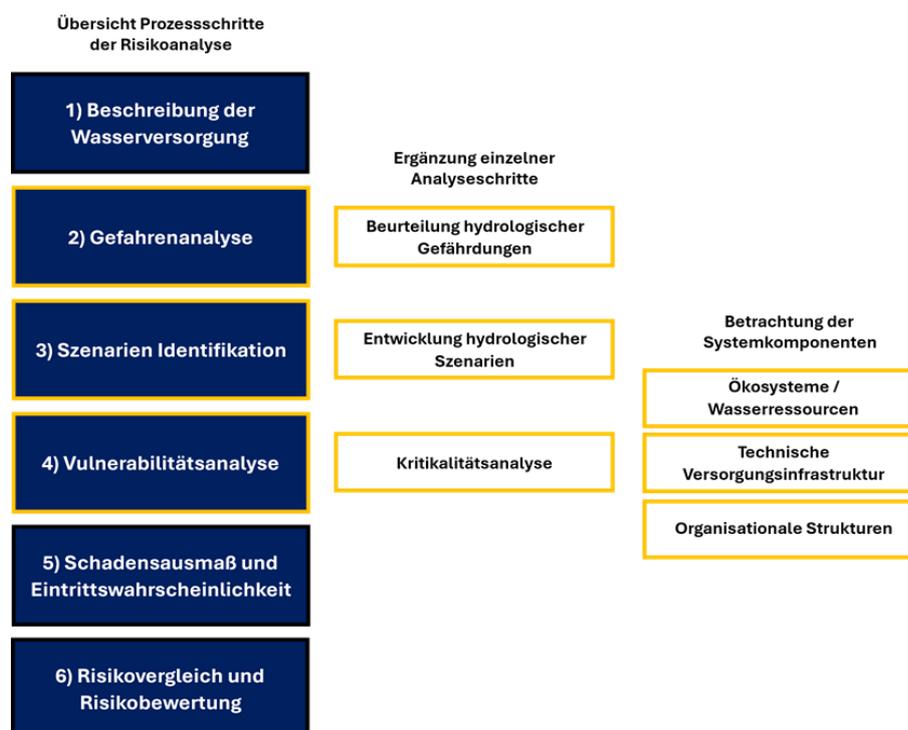
Da eine systematische Vorgehensweise nach allen fünf Prozessschritten des Risiko- und Krisenmanagements entscheidend ist für ein umfassendes Vorsorgekonzept (BMI 2011; BBK 2016), wurden diese in TrinkXtrem betrachtet und auf Anpassungsbedarf überprüft. Die Methodik des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) aus den Leitfäden Sicherheit der Trinkwasserversorgung Teil 1 und 2 bildet die Basis der hier angepassten Vorgehensweise. Darüber hinaus wurden folgende Vorsorgekonzepte gesichtet:

- BBK Teil 1 „Sicherheit der Trinkwasserversorgung
- BBK Teil 2 „Notfallvorsorgeplanung“
- BMI-Leitfaden „Schutz Kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement“
- DVWG W 1002 (A)
- DVWG W 1003 (A)
- DIN EN 15975-1
- DIN EN 15975-2

Anpassungsbedarf wurde bei der Durchführung der Risikoanalyse und der Ableitung vorbeugender Maßnahmen identifiziert (Bild 9.1). Hydrologische Extremereignisse, insbesondere Trocken- und Dürreperioden, unterscheiden sich deutlich von anderen Szenarien (z. B. Stromausfällen) in ihrer Eintrittsgeschwindigkeit und -dauer, wodurch veränderte Vulnerabilitäten berücksichtigt werden müssen.

### 9.1.2 Anpassungsbedarf Risikoanalyse (Phase 2)

Wie in Kapitel 2.3 erläutert, sind laut dem Weltklimarat IPCC die folgenden Komponenten zentral für die Bewertung des Risikos: 1. Gefährdung (Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen), 2. Exposition (Betroffenheit durch Extremereignisse) und 3. Verwundbarkeit bzw. Vulnerabilität (Anfälligkeit gegenüber Schäden durch Extremereignisse). Daher werden in Phase 2 der Risikoanalyse die Schritte 2) Gefahrenanalyse, 3) Szenarien Identifikation und 4) Vulnerabilitätsanalyse auf hydrologische Extremereignisse abgestimmt. Auf dieser Grundlage können dann in Schritt 5) sowohl das Schadensausmaß als auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt und anschließend in Schritt 6) das Risiko bewertet werden (Bild 9.2).



**Bild 9.2:** Übersicht der Anpassungen die im Projekt TrinkXtrem vorgenommen wurden

## 2) Gefahrenanalyse

Ziel der Gefahrenanalyse ist es, potenzielle Gefahren für die Trinkwasserversorgung zu identifizieren und ihre Relevanz zu bewerten. Dabei wird die Analyse gezielt auf hydrologische Gefahren abgestimmt. Für dessen kann das in der Methodik des BBK vorgeschlagene Ablaufschema herangezogen werden. Auf Basis der Ergebnisse der Gefahrenanalyse werden anschließend Vorschläge für mögliche Szenarien entwickelt.

## 3) Szenarien Identifikation

Die im Rahmen der Gefahrenanalyse entwickelten Szenarien bilden die Grundlage für die Vulnerabilitätsanalyse. Diese Szenarien sollten präzise Informationen zu Beginn, Dauer, räumlicher Ausdehnung und Intensität des Ereignisses enthalten. Im Vergleich zu anderen Gefahren können sich bei hydrologischen Extremereignissen sowohl die Eintrittsgeschwindigkeit als auch die -dauer erheblich unterscheiden und das Wasserdargebot nachhaltig beeinflussen. Dieser Schritt ist besonders entscheidend, denn eine detaillierte Beschreibung der Szenarien trägt zu einer gezielteren und effektiveren Ableitung vorbeugender Maßnahmen bei.

#### 4) Vulnerabilitätsanalyse

Die Vulnerabilitätsanalyse stellt den komplexesten Schritt der Methodik dar, in dem auch die meisten Anpassungen der vorliegenden Vorgehensweise vorgenommen wurden. Sie ist ein wesentlicher Bestandteil der Risikoanalyse, um die Verwundbarkeit von Systemkomponenten und Prozessen in der Wasserversorgung zu bestimmen. Gemäß der BBK-Methodik gliedert sich die Analyse in fünf Schritte.

- 1) Festlegung der zu analysierenden Komponenten
- 2) Überprüfung der Exposition
- 3) Überprüfung der Funktionsanfälligkeit
- 4) Überprüfung der technischen Ersetzbarkeit
- 5) Überprüfung der organisatorischen Ersetzbarkeit

Schritt 1) „Festlegung der zu analysierenden Komponenten“ wird durch eine Kritikalitätsanalyse ergänzt, da diese in der bisherigen Methodik nicht berücksichtigt ist. Das BBK hat kürzlich eine Herangehensweise zur Kritikalitätsanalyse für die leitungsgebundene Trinkwasserversorgung in einer entsprechenden Publikation veröffentlicht (BBK 2024). Die Kritikalitätsanalyse bewertet die Bedeutung einer (Anlagen-)Komponente für die Versorgungssicherheit. Bisherige Verfahren zur Kritikalitätsanalyse fokussieren sich überwiegend auf technische Komponenten. Jedoch sollten auch Ökosysteme und Wasserressourcen (TrinkwEGV) sowie organisationale Strukturen (Nick et al. 2023; Sängler et al. 2021) als eigene Systemkomponenten in der Analyse betrachtet werden, da diese ebenso zentral für die Versorgungssicherheit sind. Daher sollten auch alle folgenden Analyse-Schritte für die als besonders kritisch identifizierten Systemkomponenten exemplarisch durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse dienen anschließend als Grundlage für die Bestimmung des Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios sowie für den Vergleich und die Bewertung der Risiken.

##### 9.1.3 Anpassungsbedarf vorbeugende Maßnahmen (Phase 3)

Eine umfassende Risikoanalyse angepasst auf hydrologische Extremereignisse ist unerlässlich, um vorbeugende Maßnahmen für diese Szenarien wirksam zu planen und umzusetzen. Vorbeugende Maßnahmen haben das Ziel, die betriebliche Kontinuität kritischer Prozesse sicherzustellen und die Anfälligkeit gegenüber Gefahren zu minimieren. Insbesondere sollen die Auswirkungen hydrologischer Extremereignisse auf die öffentliche Trinkwasserversorgung verringert oder sogar vermieden werden, wie zum Beispiel:

- Beeinträchtigung der Trinkwasserqualität
- Verringerung der mengenmäßigen Trinkwasserversorgung
- Direkte Schäden an der Infrastruktur
- Einschränkungen der Wassernutzung oder -verfügbarkeit vor Ort
- Notwendigkeit einer Ersatzversorgung
- Höhere Kosten für Reparaturen und Notfallmaßnahmen

Vor baulichen Änderungen sollte eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden, um die Investitionen im Vergleich zu den potenziellen Kosten eines Versorgungsausfalls zu bewerten. Die besten Maßnahmen werden basierend auf der Risiko- und Kosten-Nutzen-Analyse ausgewählt, wobei das Gesamtrisiko durch den Vergleich von Investitionen und möglichen Beeinträchtigungen der Wasserversorgung bewertet wird. Extreme Risiken können jedoch nicht immer nur auf dieser Basis bewertet werden. Beispiele für mögliche vorbeugende Maßnahmen der öffentlichen Trinkwasserversorgung an hydrologische Extremereignisse sind im DVGW-Arbeitsblatt W 1003 zusammengefasst (Tabelle 9.1).

**Tabelle 9.1: Mögliche vorbeugende Maßnahmen der öffentlichen Trinkwasserversorgung an hydrologische Extremereignisse (DVGW, 2022)**

Teilprozess der Wasserversorgung	Vorbeugende Maßnahme
Ressourcen / Gewinnung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausbau des Monitorings</li> <li>- Erkundung neuer Gewinnungsgebiete</li> <li>- Künstliche Grundwasseranreicherung</li> <li>- Umstellung auf Öko-Landbau/Waldumbau</li> <li>- Reaktivierung stillgelegter Anlagen</li> <li>- Bau neuer Brunnen</li> <li>- Vertiefung von Brunnen in tiefere Grundwasserleiter</li> <li>- Anpassung wasserrechtlicher Genehmigungen</li> <li>- Verbesserung des Erosionsschutzes und Ausbau von Abwasserrückhaltekapazitäten bei Talsperren zur Vermeidung erhöhter Stoffeinträge in Folge von Starkniederschlägen</li> <li>- Dynamisches Bewirtschaftungskonzept bei Talsperren</li> </ul>
Aufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Neubau Wasserwerk</li> <li>- Ausbau der Kapazitäten</li> <li>- Sanierung / Nachrüstung von Anlagen</li> </ul>
Speicherung / Transport / Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausbau der Kapazitäten</li> <li>- Diverse Instandhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen</li> <li>- Senkung des Netzdrucks</li> </ul>
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anschluss einer Fernwasserversorgung</li> <li>- Verbundsysteme mit benachbarten Versorgern</li> </ul>

## Fazit Update Vorsorgekonzepte

**Einsatzgebiet:** Ein übertragbares Vorgehen zur Erstellung von Vorsorgekonzepten wurde so optimiert, dass es die Wirksamkeit und Effektivität von Risikomanagementmaßnahmen bei hydrologischen Extremereignissen steigert. Dazu wurden bestehende Vorsorgekonzepte methodisch weiterentwickelt.

**Merkmale:** Die Anpassungen betreffen insbesondere die Vorgehensweise der Risikoanalyse sowie die Ableitung vorbeugender Maßnahmen. So wurde die Gefährdungsanalyse als Teil der Risikoanalyse auf Szenarien hydrologischer Extremereignisse abgestimmt. Die Vulnerabilitätsanalyse wurde um eine Kritikalitätsanalyse ergänzt, um die Bedeutung einzelner Komponenten für die Versorgungssicherheit gezielt bewerten zu können. Dabei umfasst die Vulnerabilitätsanalyse nicht nur technische Komponenten, sondern auch Ökosysteme, Wasserressourcen und organisatorische Strukturen. Diese stellen ebenfalls zentrale Systemkomponenten dar und können gegenüber hydrologischen Extremereignissen verwundbar sein. Die Ergebnisse dieser Analyse-Schritte bilden die Grundlage für die Ableitung wirksamer und effektiver Risikomanagementmaßnahmen.

## **9.2 Update des Risikomanagements in Trinkwassereinzugsgebieten**

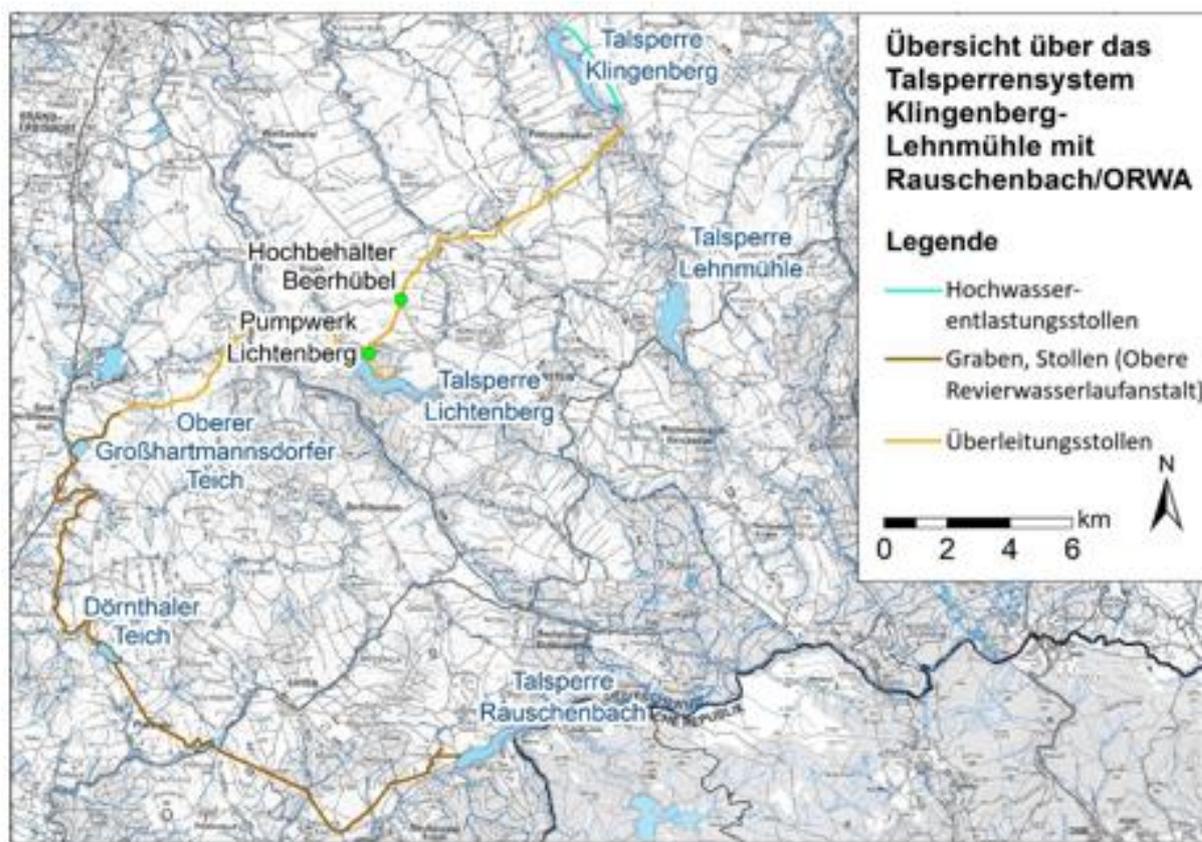
### *9.2.1 Einführung*

Das Risikomanagement in der Wasserversorgung adressiert vorrangig die Zielfunktionen Versorgungssicherheit und Trinkwasserqualität. Dabei wird in der Regel der Ist-Zustand im jeweiligen Versorgungssystem betrachtet. Da hydrologische Extremereignisse selten auftreten, führen sie – trotz eines oft extrem hohen Schadensausmaßes der verursachten Ereignisse - tendenziell zu geringen Risiken. Die mit Extremereignissen verbundenen Gefährdungseignisse werden deshalb in konventionellen Risikomanagementsystemen häufig nur am Rande berücksichtigt und bezüglich des Handlungsbedarfs als nachrangig priorisiert. Der Klimawandel führt jedoch bereits heute dazu, dass beispielsweise lange Trockenperioden und Starkregenereignisse häufiger auftreten und stärker ausgeprägt sind, sodass ihre Auswirkungen immer häufiger die Wasserversorgung qualitativ und quantitativ beeinflussen und beeinflussen werden.

Im Projekt TrinkXtrem wurde anhand eines Talsperren-Einzugsgebiets des assoziierten Partners Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV) eine Methodik zur Erweiterung bestehender GIS-gestützter Risikomanagementsysteme für Einzugsgebiete entwickelt, um eine angemessene Vorbereitung auf die Folgen von Extremereignissen zu ermöglichen. Ausgehend von einem bestehenden Risikomanagementsystem nach DIN EN 15975-2 wurde im Detail analysiert, wo in den bestehenden Ansätzen zum Risikomanagement ein Anpassungsbedarf besteht, um hydrologische Extremereignisse geeignet zu berücksichtigen.

### *9.2.2 Projektgebiet Talsperrensystem Klingenberg/Lehnmühle*

Die Talsperre Klingenberg an der Wilden Weißeritz im Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge dient der Trinkwasserversorgung (unter anderem für Dresden) sowie zum Hochwasserschutz und hat einen Stauraum von 16,1 Mio. m<sup>3</sup>. Mit der Talsperre Klingenberg ist über den gestauten Wasserlauf der Wilden Weißeritz die südlich gelegene Talsperre Lehnmühle mit einem Stauraum von 21,9 Mio. m<sup>3</sup> verbunden. Zur perspektivischen Stabilisierung der Talsperrenwasserversorgung für die Stadt Dresden und zum Zweck von bauzeitlich notwendigen Ersatzwasserversorgungen infolge von Talsperrensanierungen wurde im Jahr 2004 eine Rohwasserüberleitung von der Talsperre Rauschenbach und der Oberen Revierwasserlaufanstalt (ORWA) zur Talsperre Klingenberg fertiggestellt. Zudem kann auch die Talsperre Lichtenberg bei Bedarf zeitweise operativ in die Systembewirtschaftung einbezogen werden.



**Bild 9.3:** Schematische Abbildung des Talsperrensystems

### 9.2.3 Methodik für das Risikomanagement

Die Risikobewertung erfolgt anhand der Vorgaben der DIN EN 15975-2. Am Anfang steht eine umfassende GIS-basierte Bestandsaufnahme von Gefährdungen und Gefährdungseignissen aus der Land- und Forstwirtschaft über den Verkehr bis hin zur Abwasserentsorgung. Die darauf aufbauende Risikobewertung erfolgt zweistufig: Zunächst wird anhand von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß das lageunabhängige Ausgangsrisiko am Ort des Ereignisses ermittelt. Anschließend wird der Einfluss der Standortbedingungen auf den Rückhalt von Gefährdungen bewertet (Vulnerabilität). Dabei werden Faktoren wie Nähe zu Oberflächengewässern, Hangneigung, Bodeneigenschaften und Nutzung einbezogen. Zusätzlich wird die Verweilzeit in der Talsperre sowie in den vorgeschalteten Stauhaltungen berücksichtigt. Die Verknüpfung der beiden Informationen für zum Risiko für das Rohwasser. Dieses ist hoch für Gefährdungseignisse mit hohem Ausgangsrisiko, die in vulnerablen Bereichen liegen. Diese sollten bei der anschließenden Risikobeherrschung vorrangig betrachtet werden (Brauer, 2021).

#### 9.2.4 Anpassung der Risikobewertung an Extremereignisse

Um die Risikobewertung an Extremereignisse anzupassen, sind an verschiedenen Stellen Anpassungen erforderlich. Im Folgenden sind die empfohlenen Schritte beschrieben:

- Ergänzung der Systembeschreibung durch einen Klimasteckbrief, der Informationen zu aktuellen Klimabedingungen, zu historischen Extremereignissen und zu Klimaprognosen enthält. Eine mögliche Informationsquelle sind die Klimaprognosen als aufbereitete Auswertungen für alle Landkreise Deutschlands, die vom Geric's Climate Service Center Germany (2021) bereitgestellt werden. Zudem können Überschwemmungs- und Hochwassergefahrenkarten sowie Starkregenrisikokarten einbezogen werden, um die Betroffenheit einzelner Objekte abzuschätzen. Diese Daten stehen in der Regel über die Geoportale der Bundesländer zur Verfügung.
- Ableitung relevanter Extremereignisse für das betrachtete Gebiet: Aus den Klimaprognosen und den Eigenschaften von Einzugsgebiet und betrachteter Rohwasserressource kann abgeleitet werden, welche Extremereignisse zukünftig möglicherweise mit erhöhter Wahrscheinlichkeit zu Beeinträchtigungen der Wasserqualität führen können. Diese bilden die Grundlage für die weiteren Betrachtungen.
- Anpassung der Bewertung des Ausgangsrisikos: Extremereignisse beeinflussen die Merkmale von Auslösern und Gefährdungsereignissen im Einzugsgebiet. Dabei ist vor allem zu bewerten, wie stark sich das Schadensausmaß verändert. Es ist zielführend, bei dieser Betrachtung die Eintrittswahrscheinlichkeit nur nachrangig zu berücksichtigen.
- Durch Starkregenereignisse beeinflusste Gefährdungsereignisse sind beispielsweise das Anspringen von Mischwasserentlastungsanlagen oder der überlastungsbedingte Ausfall von Abwasserpumpwerken. Hitzeperioden beeinflussen vor allem die Prozesse innerhalb der Talsperre und begünstigen das Algenwachstum. Niedrige Wasserstände führen beispielsweise zur verstärkten Rücklösung von Schwermetallen aus dem Sediment oder unerwünschten Stoffumsätzen in ehemals wasserbedeckten Uferbereichen von Flüssen und Talsperren.
- Die Bewertung des Ausgangsrisikos, sowie die zugrundeliegenden Informationen und Annahmen können in Risikosteckbriefen dokumentiert werden.

- Die Vulnerabilität eines Einzugsgebietes ermöglicht eine Aussage darüber, wie stark Gefährdungen zurückgehalten werden. Sie hängt bei Talsperreneinzugsgebieten vor allem von Hangneigung, Gewässeranbindung, Bodeneigenschaften und Nutzung ab. Bei der Anpassung an Extremereignisse ist zu berücksichtigen, dass sich die hydraulische Leitfähigkeit von Böden durch anhaltende Trockenheit verändert. Für Normalverhältnisse übliche Richtwerte für die Bildung von Oberflächenabfluss sind unter den geänderten Rahmenbedingungen nur noch teilweise gültig. Vor allem bei Starkregenereignissen nach langer Trockenheit kann auch auf Flächen, auf den sonst hauptsächlich Tiefensickerung erfolgt, oberflächlicher Abfluss stattfinden, der Gefährdungen schnell in die Oberflächengewässer einträgt. Die Verweilzeiten in Stauhaltungen und Talsperren sind bei Starkniederschlagsereignissen deutlich reduziert, so dass die natürliche Reinigungsleistung des Fließgewässers ggf. nur stark eingeschränkt ist.
- Die Bewertung der Vulnerabilität erfolgt GIS-basiert und kann auf frei verfügbaren Daten basieren (z. B. Bodenkarten, digitales Geländemodell, Geometrien der Fließgewässer). Zur Umsetzung der an Extremereignisse angepassten Vulnerabilität wurden im Projekt an ausgewählte Extremereignisse angepasste Entscheidungsbäume entwickelt und in Python zur Nutzung im GIS umgesetzt.

Im Ergebnis zeigt sich, dass beim betrachteten Talsperreneinzugsgebiet vor allem Starkniederschlagsereignisse nach langen Trockenphasen zu relevanten Risiken für die Qualität des Rohwassers führen. Die als hohe Risiken identifizierten Ereignisse können künftig bei der Risikobeherrschung verstärkt berücksichtigt werden.

Durch die Berücksichtigung von hydrologischen Extremereignissen beim Risikomanagement können sich Wasserversorger zielgerichteter auf hydrologische Extremereignisse vorbereiten und ihre Systeme klimaresilienter und zukunftssicherer machen. Die Ergebnisse können auch in der Kommunikation mit Behörden oder anderen Stakeholdern im Einzugsgebiet wertvolle Hilfsmittel sein und als Basis für die Diskussion über Maßnahmen zur Risikobeherrschung dienen.

## Fazit Update Risikomanagement im Einzugsgebiet

**Einsatzgebiet:** Die entwickelte Methodik erweitert bestehende GIS-gestützte Risikomanagementsysteme für Trinkwassereinzugsgebiete, um hydrologische Extremereignissen besser berücksichtigen zu können.

**Merkmale:** Das Risikomanagement im Einzugsgebiet wird erweitert und angepasst, um hydrologische Extremereignisse verstärkt zu berücksichtigen. Die vorhandene Systembeschreibung wird durch einen Klimasteckbrief ergänzt, der gebietsspezifische Informationen zum aktuellen und prognostizierten Klima enthält. Auf dieser Grundlage werden die für dieses Gebiet relevanten hydrologischen Extremereignisse identifiziert. Die Risikobewertung wird an diese Extremereignisse angepasst, indem sowohl die Bewertung von Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit adaptiert werden als auch eine Neubewertung der Schutzwirkung bei Extremereignissen erfolgt. So entsteht eine Grundlage für die Risikobeherrschung, die die Klimaresilienz des Systems steigert.

## 10 Geplante weitere Verwertung der Ergebnisse

Die im Projekt TrinkXtrem erarbeiteten Softwarelösungen sowie Methoden und Konzepte werden bei den Projektpartnern nach Abschluss des Projektes genutzt und ausgebaut. Die im Projekt TrinkXtrem beteiligten Wasserversorgungsunternehmen versorgen etwa 10 % der Bevölkerung Deutschlands mit Trinkwasser, was bereits eine breite Anwendung sicherstellt. Darüber hinaus stehen die Projektergebnisse zum Ergebnistransfer für andere Wasserversorgungsunternehmen zur Verfügung. Konkret sind die nachstehend beschriebenen Aktivitäten vorgesehen.

### 10.1 Software

#### 10.1.1 Managementtool zur Rohwasserbewirtschaftung

Das vom Projektpartner KUP entwickelte Managementtool liegt im Status einer Pilotanwendung vor. Diese kann beim Projektpartner LW für die saisonale Bewirtschaftungsplanung der Rohwasserressourcen zum Einsatz kommen. Das Managementtool besteht aus mehreren Komponenten (Web-Server, künstliche neuronale Netze (KNN), Steuerung der Cloud Server, Datenbank usw.) welche zusammengeführt wurden. Die Programmierung dieser Komponenten erfolgte durch den Projektpartner KUP generalisiert, so dass die einzelnen Komponenten ohne Probleme im Nachgang auch in anderen Projekten eingesetzt werden können (Baukastenprinzip). Beispielsweise können die entwickelten KNN-Modelle zum Betrieb der Fassungen des Projektpartners LW unter Extrembedingungen auch unabhängig vom Managementtool für die Prognose der Grundwasserstände bei gegebenen Bewirtschaftungsplänen eingesetzt werden. Des Weiteren werden vergleichbare KNN vom Projektpartner KUP für die Prognose von Moorwasserständen in Oberau im Wasserschutzgebiet der Stadtwerke München getestet.

#### 10.1.2 Rohwasserbeschaffenheitsprognose und Web-Service Trinkwasserbedarfsprognose

Methoden des Data Mining wurden durch den Projektpartner TZW auf Betriebsdaten von am Projekt beteiligten Wasserversorgungsunternehmen angewandt. Unter Betriebsdaten sind physikalisch-chemische Analysen aus Stichproben, Datensätze von online Sensoren wie z.B. online-Sensoren zur Wasserqualität, Smart-Meter zur Wassermengenmessung sowie Wetter- und weitere Umweltdaten wie Pegelstände zusammengefasst. Typischerweise sind solche Betriebsdaten zuerst zu plausibilisieren. Nur plausibilisierte Eingangsdaten liefern belastbare Ergebnisse. Die dazu ausgewählten Algorithmen können durch das TZW bei anderen Wasserversorgungsunternehmen eingesetzt werden. Das zur **Prognose der**

**Rohwasserbeschaffenheit** entwickelte Softwaretool wurde versuchsweise auf die Beschaffenheit der Donau im Raum Leipheim, einer Rohwasserentnahmestelle beim Projektpartner LW angepasst. Eine Adaption an die lokalen Bedingungen bei anderen Flusswässern ist möglich. Für die **Prognose des Trinkwasserbedarfs** wurde ein Web-Service eingerichtet, über den der Wasserversorger aktuelle Prognosen abrufen kann. Dadurch werden umfangreiche manuelle Tätigkeiten beim Wasserversorger automatisiert. Die Aussagekraft wird durch eine vergrößerte Datenbasis verbessert. Im Rahmen von TrinkXtrem erfolgte beim Projektpartner LW bereits ein großtechnischer Test. Darüber hinaus wurde die Trinkwasserbedarfsprognose bei dem Wasserversorger Mühlbach Wasser eingesetzt. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in einen künftigen Web-Service des TZW unter dem Namen PrognEAU einfließen, um den Wasserbedarf in einem Versorgungsgebiet mit Hilfe von KI vorher zu sagen.

### *10.1.3 Softwaretool zur Detektion von Anomalien bei Smart-Meter Daten*

Das von der TU Clausthal entwickelte Softwaretool wird in Vorlesungen und Übungen der TU Clausthal als Anwendungsbeispiel und als Basis für weiterführende Forschungsarbeiten genutzt. Weiterhin ist die Aquisition von Transferprojekten im Bereich Anomalie-Erkennung für Wassersysteme geplant.

## **10.2 Methoden + Konzepte**

### *10.2.1 Wirkungsbezogene Analytik zur Erfassung des Einflusses von Extremereignissen*

Die etablierten Verfahren der Wirkungsbezogenen Analytik sollen beim Projektpartner LW nach Projektende zur Eigenüberwachung und in anderen Wasserlaboren zur Erfassung toxischologischer Wirkungen genutzt werden. Der neu etablierte Endpunkt zur Messung herbizider Wirkungen erweitert das Analysespektrum und ist besonders vor dem Hintergrund möglicher landwirtschaftlicher Einflüsse interessant.

### *10.2.2 Quantitative mikrobielle Risikobewertung*

Mit Hilfe der quantitativen mikrobiellen Risikobewertung (QMRA) können Wasserversorgungsunternehmen zusätzliche theoretische Vorhersagen zum Infektionsrisiko durch Krankheitserreger treffen. In TrinkXtrem wurde festgestellt, dass Extremereignisse die statistischen Ergebnisse einer QMRA nicht signifikant ändern. Die QMRA kann somit vom Projektpartner TZW und anderen Laboren vor dem Hintergrund eingesetzt werden, dass die Resultate auch klimatische Extremereignisse berücksichtigen und somit eine erweiterte Aussagekraft besitzen.

### *10.2.3 Verbesserung der Prädiktivität von Grundwassermodellen*

Die vom Projektpartner Universität Stuttgart eingesetzten Methoden und Konzepte zur Verbesserung der Prädiktivität von Grundwassermodellen sowie deren Ergebnisse im TrinkXtrem-Projekt werden durch Beiträge in wissenschaftlichen Fachzeitschriften sowie durch einen Vortrag auf einer Fachkonferenz publiziert. Die verwendeten und weiterentwickelten Methoden und Konzepte sind auf andere Grundwassermodelle übertragbar und bieten dadurch auch für andere Forschende einen Mehrwert. Zudem erfolgt eine Einbindung in wissenschaftliche Arbeiten, in ein Promotionsvorhaben sowie eine Masterarbeit. Die Methodik stellt eine Grundlage für zukünftige wissenschaftliche Arbeiten dar.

### *10.2.4 Uferfiltration zu Ressourcenerweiterung*

Die in TrinkXtrem durch IWW und wvr weiter entwickelten geologischen Modellbetrachtungen zur Uferfiltration werden vom Projektpartner wvr eingesetzt, um dessen bestehende Uferfiltratgewinnungen in Bodenheim und Guntersblum zu erweitern. Die Erweiterung der Uferfiltratgewinnung in Guntersblum durch eine zusätzliche Nordgalerie soll neben neu zu errichtenden Uferfiltratbrunnen auch eine Infiltration umfassen. Dies trägt dazu bei, die Versorgungssicherheit unter Extrembedingungen der Zukunft zu gewährleisten. Die Planung und Umsetzung der „Nordgalerie“ als innovatives Bewirtschaftungskonzept ist eine Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel in der besonders betroffenen Region am Oberrheingraben.

### *10.2.5 Resilienz Verteilungsnetz*

In TrinkXtrem erstellte der Projektpartner Fraunhofer IIS ein Optimierungsmodell für die Flächenwasserversorgung beim Projektpartner wvr. Das Modell identifiziert Vulnerabilitäten des Versorgungsnetzes der wvr hinsichtlich der definierten Szenarien. Dies gestattet die Untersuchung diverser Betriebsszenarien unter Berücksichtigung von Extremereignissen. Auf dieser Grundlage können notwendige Zubaumaßnahmen in der Versorgungsinfrastruktur kostenoptimiert geplant und realisiert werden, wie beispielsweise die Schaffung redundanter Verbindungen für bestehende Versorgungszonen. Dies erhöht die Resilienz des Versorgungssystems hinsichtlich Extremszenarien.

### *10.2.6 Dynamische Preismodellkomponenten*

Die in TrinkXtrem vom Projektpartner MOcons entwickelte Preismodellkomponente soll wirtschaftlich genutzt und in bestehende Entgeltmodelle von Wasserversorgern integriert werden, um eine kosteneffizientere und zugleich sichere Wasserversorgung zu gewährleisten. Zwischenergebnisse aus dem Projekt hat MOcons bereits in verschiedenen Gesprächen mit Wasserversorgern erörtert und Rückmeldungen im Projekt berücksichtigt. Die Forschungsergebnisse fließen direkt in die Lehre des Studiengangs „BWL - Energie- und Wassermanagement“ an der Hochschule Ruhr West ein, den Prof. Dr. Mark Oelmann als Studiengangsleiter verantwortet. Studierende erhalten damit praxisnahe Einblicke in moderne Entgeltmodelle. Die Erkenntnisse werden zudem in Fachzeitschriften publiziert, um das Potenzial dynamischer Preismodelle im wissenschaftlichen Diskurs zugänglich zu machen. Die Ergebnisse werden auf Konferenzen vorgestellt, um den Austausch mit Fachleuten zu fördern und die Forschung national und international sichtbar zu machen. Während des Projekts hat MOcons die Ansätze bereits in verschiedenen Webinaren vorgestellt.

### *10.2.7 Anpassung Risikomanagement und Vorsorgekonzepte an Extremereignisse*

In TrinkXtrem wurde durch den Projektpartner TZW eine Methode entwickelt, um bestehende Risikomanagementsysteme um Einflüsse und Gefährdungen durch hydrologische Extremereignisse zu erweitern. Zudem wurde für verschiedene Rohwasserressourcen ein Katalog erforderlicher Anpassungsmaßnahmen zur Verfügung gestellt, der bei künftigen Kooperationen mit Wasserversorgungsunternehmen angewendet werden kann. Hierzu zählt u.a. die Entwicklung von vorbeugenden Maßnahmen hinsichtlich relevanter Extremszenarien. Der Projektpartner wvr hat bestehende Vorsorgekonzepte bezüglich Erweiterungsbedarf hinsichtlich Extremereignisse geprüft und einen Vorschlag zur Erweiterung der bestehenden Methodik erarbeitet.

## 11 Ansprechpersonen

### 11.1 Softwaretools

Managementtool zur Rohwasserentnahme unter Extrembedingungen

Kontakt: Dr. Ulrich Lang, Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH

[lang@kobus-partner.com](mailto:lang@kobus-partner.com)

Softwaretool zur Detektion von Anomalien bei Smart-Meter Daten

Kontakt: Dr. Stefan Wittek, TU Clausthal

[stefan.wittek@tu-clausthal.de](mailto:stefan.wittek@tu-clausthal.de)

Web-Service zur Trinkwasserbedarfsprognose sowie Rohwasserbeschaffenheitsprognose

Kontakt: Dr. Martin Wagner, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser

[martin.wagner@tzw.de](mailto:martin.wagner@tzw.de)

### 11.2 Modelle & Konzepte

Modellierung Grundwasserneubildung beim Auftreten von Extremjahren in Folge

Dr. Ulrich Lang, Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH

[lang@kobus-partner.com](mailto:lang@kobus-partner.com)

Methodik zur Verbesserung der Prädiktivität von Modellen

Prof. Dr. Holger Class, Tim Jupe Universität Stuttgart

[holger.class@iws.uni-stuttgart.de](mailto:holger.class@iws.uni-stuttgart.de), [tim.jupe@iws.uni-stuttgart.de](mailto:tim.jupe@iws.uni-stuttgart.de)

Geologisches Modell zur Uferfiltration

Kontakt: Dr. Tim aus der Beek, IWW Rheinisch-Westf. Institut f. Wasserforschung gGmbH

[t.ausderbeek@iww-online.de](mailto:t.ausderbeek@iww-online.de)

Dr. Jörg Bork, Natalie Wick, Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH, [j.Bork@wvr.de](mailto:j.Bork@wvr.de),

[n.wick@wvr.de](mailto:n.wick@wvr.de)

Optimierungsmodell zur Flächenwasserversorgung

Kontakt: Dr. Jörg Bork, Natalie Wick, Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH

[j.Bork@wvr.de](mailto:j.Bork@wvr.de), [n.wick@wvr.de](mailto:n.wick@wvr.de)

Dr. Benjamin Trummer, Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen

[benjamin.trummer@iis.fraunhofer.de](mailto:benjamin.trummer@iis.fraunhofer.de)

#### Quantitative mikrobielle Risikobewertung (QMR)

Dr. Beate Hamsch, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser

[beate.hamsch@tzw.de](mailto:beate.hamsch@tzw.de)

#### Preismodellkomponenten

M.Sc. VWL Christoph Czichy, MOcons GmbH & Co. KG

[christoph.czichy@mocons.de](mailto:christoph.czichy@mocons.de)

#### Anpassung Risikomanagement an Extremereignisse

Kontakt: Dipl.-Geoökol. Friederike Brauer, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser

[Friederike.Brauer@tzw.de](mailto:Friederike.Brauer@tzw.de)

#### Anpassung Vorsorgekonzepte an Extremereignisse

Dr. Jörg Bork, Natalie Wick, Wasserversorgung Rheinhessen-Pfalz GmbH

[j.Bork@wvr.de](mailto:j.Bork@wvr.de), [n.wick@wvr.de](mailto:n.wick@wvr.de)

#### Wirkungsbezogene Analytik zur Erfassung des Einflusses von Extremereignissen.

Dr. Wolfram Seitz, Zweckverband Landeswasserversorgung

[Seitz.W@lw-online.de](mailto:Seitz.W@lw-online.de)

## 12 Literatur

Andersen, H. et al. (2006). Climate-change impacts on hydrology and nutrients in a Danish lowland river basin. *Science of the Total Environment*, 365, 223-237.

Bardossy, A.; Bogardi, I.; Duckstein, L. (1985): „Composite Programming as an extension of Compromise Programming“, in: *Mathematics of Multiple Objective Optimization* (Ed. Serafini, P.), S. 375 ff., Wien.

BBK Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2016). Sicherheit der Trinkwasserversorgung – Teil 1: Risikoanalyse; Praxis im Bevölkerungsschutz Band 15.

BBK Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2019). Sicherheit der Trinkwasserversorgung – Teil 2: Notfallvorsorgeplanung; Praxis im Bevölkerungsschutz Band 15; Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.

BBK Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2024). Identifizierung Kritischer Infrastrukturen und Entwicklung einer Methodik zur räumlichen Kritikalitätsanalyse für leitungsgebundene Trinkwasserversorgung. *Forschung für den Bevölkerungsschutz*; Band 33.

BBK Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2025): Glossar. Abrufbar unter: [Glossar - BBK](#).

BMI Bundesministerium des Innern und für Heimat (2005): Schutz Kritischer Infrastrukturen – Basisschutzkonzept, Empfehlungen für Unternehmen. Berlin.

BMI Bundesministerium des Inneren (2022): Schutz Kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement. Leitfaden für Unternehmen und Behörden.

Boeing, F. und Marx, A. (2023): Klimafolgenstudie für das DVGW-Innovationsprogramm „Zukunftsstrategie Wasser“. DVGW-Förderkennzeichen W 202122.

Brauer, F., Sturm, S., Hegewald, T., Freier, K. (2021). Risikomanagement für ein komplexes Talsperrensystem. In *energie | wasser-praxis* 5/2021, 72-77.

Bundesrepublik Deutschland: Trinkwassereinzugsgebieteverordnung – TrinkwEGV vom 4. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 346).

Del Gómez-Ramos, M. M., Mezcua, M., Agüera, A., Fernández-Alba, A. R., Gonzalo, S., Rodríguez, A., Rosal, R. (2011). Chemical and toxicological evolution of the antibiotic sulfamethoxazole under ozone treatment in water solution, *Journal of hazardous materials*, 192, 1, 18–25.

Deutscher Bundestag (2019). Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Drucksache 19/9521 ([Zugriff hier](#)).

Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., et al. (2019). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27, 1–30.

DIN EN 15975-1 (2016). Sicherheit der Trinkwasserversorgung – Leitlinien für das Risiko- und Krisenmanagement – Teil 1: Krisenmanagement.

DIN EN 15975-2 (2013): Sicherheit der Trinkwasserversorgung - Leitlinien für das Risiko- und Krisenmanagement - Teil 2: Risikomanagement.

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2022): Arbeitsblatt W 1002 (A); Krisenmanagement.

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2022). Arbeitsblatt W 1003 (A); Resilienz und Versorgungssicherheit in der öffentlichen Trinkwasserversorgung.

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2022). Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot Deutschlands. Überblick zu aktuellen Ergebnissen der deutschen Klimaforschung. Bonn. ([Zugriff hier](#)).

DVGW-Technologiezentrum Wasser (Hrsg.) (2014): Leitfaden zum Risikomanagement für Trinkwasserversorgungen hinsichtlich gezielter Einträge von chemischen, biologischen oder radioaktiven Substanzen – Ergebnis des Verbundprojektes „Schutz der Trinkwasserversorgung im Hinblick auf CBRN-Bedrohungsszenarien“ (STATuS). Karlsruhe.

Emmert, M., Haakh, F., Lang, U., Schloz, W. (2000). Das numerische Grundwassermodell für das Donauried. LW-Schriftenreihe 2000, 15-23.

Flörs, M., Betz, L., Happel, O., Schertzinger, G., Schmutz, B. (2023). Integration der Wirkungsbezogenen Analytik in die Non-Target-Screening basierte Bewertung von Prozessen der Trinkwassergewinnung. Abschlussbericht W202003.

Gerics Climate Service Center Germany (2021). Klimaausblick auf Landkreisebene. Zugriff: [https://www.gerics.de/products\\_and\\_publications/fact\\_sheets/landkreise/index.php.de](https://www.gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/landkreise/index.php.de).

Haakh, F. (2019). Die Landeswasserversorgung und das Trockenjahr 2018 – Analyse, Konsequenzen und Ausblick. LW-Schriftenreihe 2019, 56-71.

Haakh, F., Lang, U., Keim, B., Eisele, W., Schneck, A., Emmert, M., Kopp, A., Sanzenbacher, J., Maier, A. (2004): Optimierung des Gebietswasserhaushalts in Wassergewinnungsgebieten: BMBF-Forschungsvorhaben Endbericht. Projektlaufzeit: 1.3.01-30.6.04. Förderkennzeichen 02WA0111 und 02WA0112

Handl, S., Perfler, R. & Schmoller, C. (2020). Uferfiltration - Stand der Technik und neue Herausforderungen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 72, 464-471.

Happel, O., Zoumpouli, G. A., Wenk, J. (2019). KOLa–Kontinuierliche Ozonung mit Langsandsandfiltration für oxidative und mikrobiologische Untersuchungen an organischen Verbindungen, 25, 3, 79–84.

Hochreiter, S. und Schmidhuber, J. (1997): Long short-term memory. Neural computation, 9(8):1735–1780.

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2020): Bericht zum Niedrigwasserereignis Juli-November 2018.

IPCC (2013/2014). Klimaänderung 2013/2014: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern, 2016. ([Zugriff hier](#)).

IPCC (2023). Annex I: Glossary [Reisinger, A., D. Cammarano, A. Fischlin, J.S. Fuglestedt, G. Hansen, Y. Jung, C. Ludden, V. Masson-Delmotte, R. Matthews, J.B.K Mintenbeck, D.J. Orendain, A. Pirani, E. Poloczanska, and J. Romero (eds.)]. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 119-130, doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.002. ([Zugriff hier](#)).

Jan, E., Meißner, J. (2015). Die gewässerchemischen und chemisch-physikalischen Prozesse einer Trinkwassertalsperre unter Berücksichtigung eines dynamisierten Talsperrenbetriebs, Enerwa, 2, 1–66.

Karakurt, S., Schmid, L., Hübner, U., Drewes, J. E. (2019). Dynamics of Wastewater Effluent Contributions in Streams and Impacts on Drinking Water Supply via Riverbank Filtration in

Germany-A National Reconnaissance, *Environmental science & technology*, 53, 11, 6154–6161.

Kienle, C., Gauch, R., Vermeirssen, E., Werner, I. (2015). Methoden zur Beurteilung der Wasserqualität anhand von ökotoxikologischen Biotests. Ergebnisse einer Literaturrecherche und einer Expertenbefragung Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie Eawag-EPFL, Dübendorf.

KLIWA (2023): Positionspapier der Kooperation KLIWA – Aussagen zur Grundwasserneubildung auf Basis regionaler Klimaprojektionen im Kontext Wasserversorgung. KLIWA-Berichte, Heft 5

Lang, U., Justiz, J., Steffinger, F. (2020). Grundwasserbilanzmodell Donauried – Modelaufbau und instationäre Berechnung mit MODFLOW 6. Berichtsnummer A767-1.

Langevin, C.D., Hughes, J.D., Provost, A.M., Russcher, M.J., Niswonger, R.G., Panday, Sorab, Merrick, Damian, Morway, E.D., Reno, M.J., Bonelli, W.P., Boyce, S.E., Banta, E.R. (2024). MODFLOW 6 Modular Hydrologic Model version 6.4.4. U.S. Geological Survey Software Release. 7 February 2024. <https://doi.org/10.5066/P9FL1JCC>.

Li, K., Yediler, A., Yang, M., Schulte-Hostede, S., Wong, M. H. (2008). Ozonation of oxytetracycline and toxicological assessment of its oxidation by-products, *Chemosphere*, 72, 3, 473–478.

Masson-Delmotte, V. et al. (2021). IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.

Nick, F. C., Sängler, N., van der Heijden, S., & Sandholz, S. (2023). Collaboration is key: exploring the 2021 flood response for critical infrastructures in Germany. *International journal of disaster risk reduction*, 91, 103710.

Reilly, E., Harbaugh, W. (2004). Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models. U.S. Geological Survey. Scientific Investigations Report 2004-5038.

Riedel, T., K. D. Weber, T. & Bergmann, A. (2022). Der Einfluss der Landnutzung und des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung. *BBR*, 07/08-2022, 38-41.

Riedel, T., Nolte, C., aus der Beek, T., Liedtke, J., Sures, B., Grabner, D. (2021). Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung - Bestandsaufnahme der gegenwärtigen Situation in Deutschland, der Klimaprojektionen und der bereits existierenden Maßnahmen und Strategien, UBA Texte 174.

Riegraf, C., Reifferscheid, G., Becker, B., Belkin, S., Hollert, H., Feiler, U., Buchinger, S. (2019): Detection and Quantification of Photosystem II Inhibitors Using the Freshwater Alga *Desmodesmus subspicatus* in Combination with High-Performance Thin-Layer Chromatography, *Environmental science & technology*, 53, 22, 13458–13467.

Sänger, N., Heinzl, C., & Sandholz, S. (2021). Advancing resilience of critical health infrastructures to cascading impacts of water supply outages—insights from a systematic literature review. *Infrastructures*, 6(12), 177.

Schulz, W., Happel, O., Stütz, L., Schmutz, B. (2019). Wirkungsbezogene Analytik als neuer Ansatz zur orientierenden Bewertung organischer Spurenstoffe in Rohwasserressourcen zur Trinkwassergewinnung und bei Aufbereitungsprozessen. Abschlussbericht zum DVGW-Forschungsvorhaben W 201518.

Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, doi:10.1017/9781009157896.013. ([Zugriff hier](#)).

Shatwell, T., Jordan, S., Ackermann, G., Dokulil, M., Rückner, J., Scharf, W., Wagner, A., Kasprzak, P. (2013). Langzeitbeobachtungen zum Einfluss von Klimawandel und Eutrophierung auf Seen und Talsperren in Deutschland, *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 6, 12, 729–736.

Sprenger, C. et al. (2011). Vulnerability of bank filtration systems to climate change. *Science of The Total Environment*, 409, 655-663.

Statistisches Bundesamt (2022). Jeder Mensch in Deutschland nutzt durchschnittlich 128 Liter Wasser pro Tag, Pressemitteilung Wiesbaden.

Thober, S., Marx, A., & Boeing, F. (2018). Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ. Leipzig, Mai ([Zugriff hier](#)).

Tomczyk, A. M., Bednorz, E. & Polrolniczak, M. (2019). The occurrence of heat waves in Europe and their circulation conditions. *Geografie*, 1-14.

Umweltbundesamt (2023). Trockenheit in Deutschland – Fragen und Antworten. ([Zugriff hier](#)).

van Vuuren, D. P. et al. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 5-31.

White, J.T., Hunt, R.J., Fienen, M.N., Doherty, J.E. (2020). Approaches to Highly Parameterized Inversion: PEST++ Version 5, a Software Suite for Parameter Estimation, Uncertainty Analysis, Management Optimization and Sensitivity Analysis. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 7C26. 52 p. <https://doi.org/10.3133/tm7C26>.

## 13 Anhang

### 13.1 Wasserressourcen – Quantität

#### 13.1.1 Verbesserung der Prognosefähigkeit von Grundwassermodellen

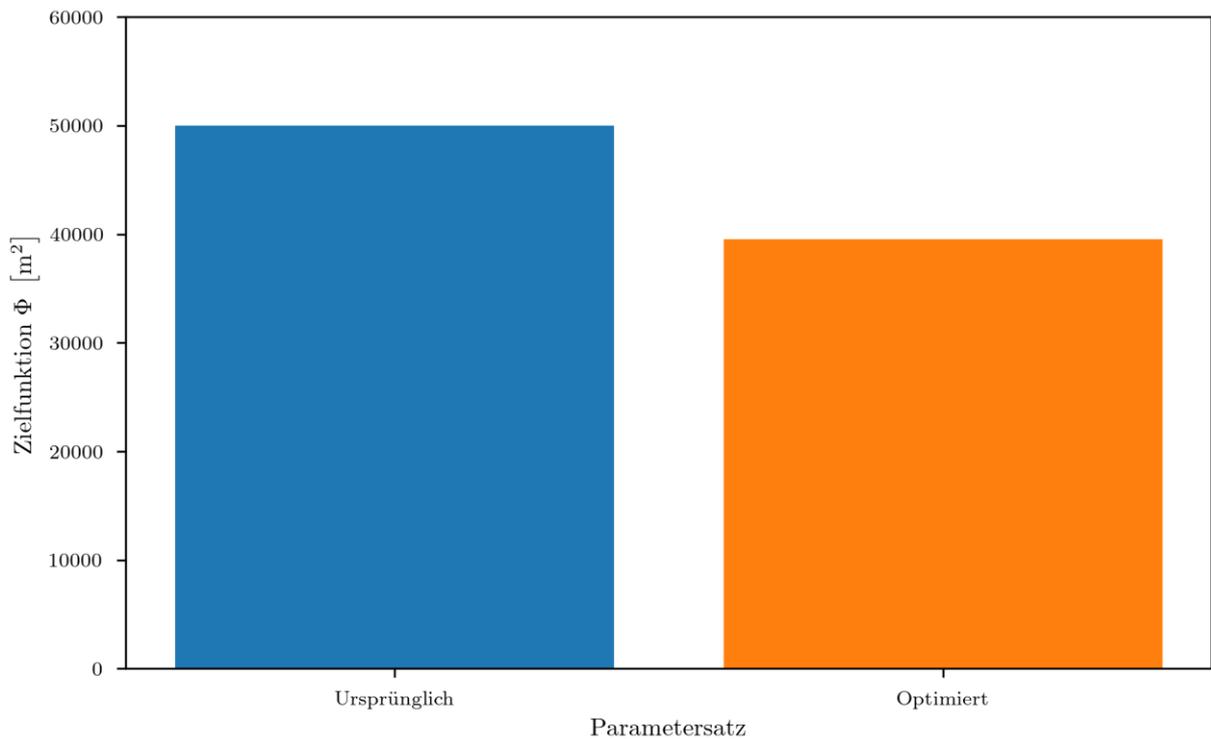
Tabelle 13.1 enthält eine Übersicht über die Anfangswerte und die unteren sowie oberen Grenzwerte der Modellparameter bei der globalen Sensitivitätsanalyse und der Modellkalibrierung mit dem Gauss-Levenberg-Marquardt-Algorithmus.

**Tabelle 13.1: Anfangswerte und untere sowie obere Grenzwerte der Modellparameter bei der globalen Sensitivitätsanalyse und der Kalibrierung mit dem Gauss-Levenberg-Marquardt-Algorithmus.**

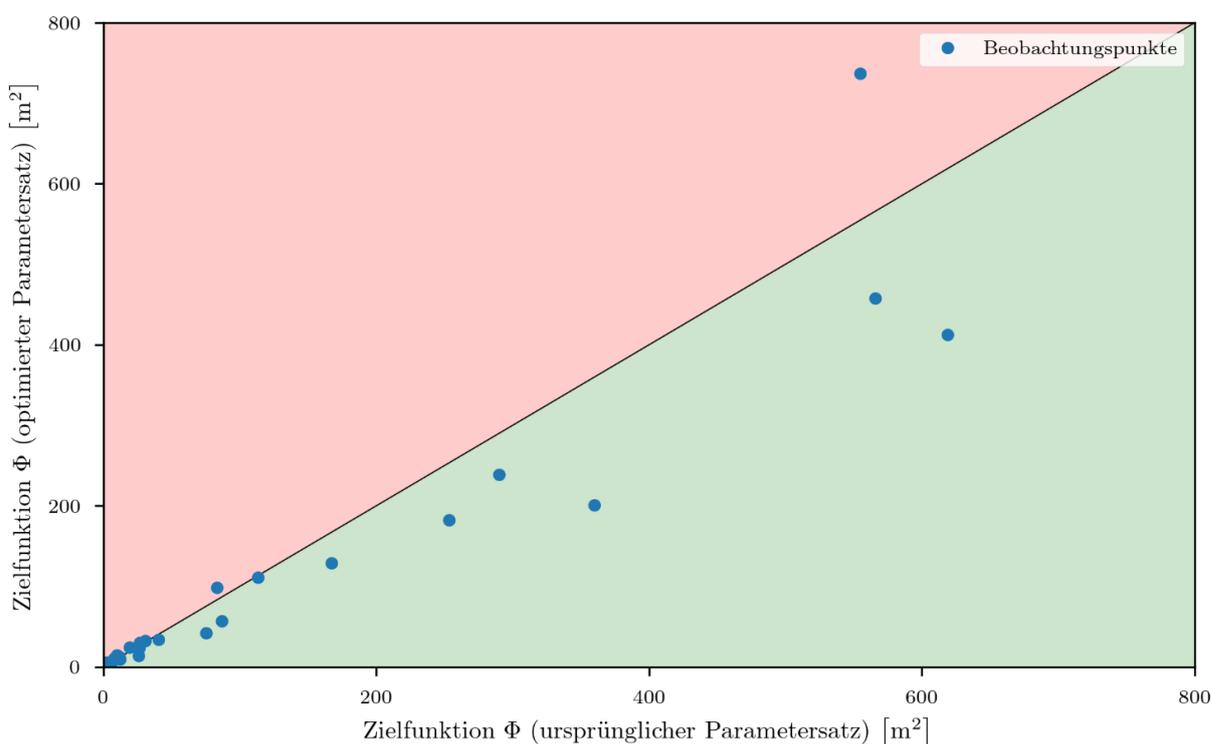
Modellparameter und Modellschicht	Anfangswerte		Untere Grenzwerte		Obere Grenzwerte	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
HK L1	8.00e-05	8.00e-05	7.60e-06	7.60e-06	8.40e-04	8.40e-04
HK L2	1.00e-06	1.00e-06	9.50e-07	9.50e-07	1.05e-06	1.05e-06
HK L3	1.00e-04	3.00e-02	9.50e-05	2.85e-02	1.05e-04	3.15e-02
HK L4	1.40e-07	1.00e-03	1.33e-07	9.50e-04	1.47e-07	1.05e-03
HK L5	7.00e-09	8.50e-05	6.65e-09	8.07e-05	7.35e-09	8.93e-05
HK L6	2.13e-07	7.20e-02	2.02e-07	6.84e-02	2.23e-07	7.56e-02
HK L7	1.50e-07	1.08e-01	1.43e-07	1.03e-01	1.58e-07	1.13e-01
HK L8	9.60e-09	1.44e-01	9.12e-09	1.37e-01	1.01e-08	1.51e-01
VK L1	1.00e-04	1.00e-04	9.50e-05	9.50e-05	1.05e-04	1.05e-04
VK L2	3.10e-10	6.39e-03	2.95e-10	6.07e-03	3.26e-10	6.71e-03
VK L3	1.15e-12	1.00e-02	1.09e-12	9.50e-03	1.21e-12	1.05e-02
VK L4	1.00e-11	1.00e-03	9.50e-12	9.50e-04	1.05e-11	1.05e-03
VK L5	1.15e-12	1.00e-03	1.09e-12	9.50e-04	1.21e-12	1.05e-03
VK L6-8	1.00e-11	1.00e-03	9.50e-12	9.50e-04	1.05e-11	1.05e-03
SS L1	5.00e-05	5.00e-04	4.75e-04	4.75e-04	5.25e-04	5.25e-04
SS L2	5.00e-06	9.00e-02	4.75e-06	8.55e-02	5.25e-06	9.45e-02
SS L3	1.00e-05	1.00e-01	9.50e-06	9.50e-02	1.05e-05	1.05e-01
SS L4	1.00e-06	5.00e-02	9.50e-07	4.75e-02	1.05e-06	5.25e-02
SS L5	1.00e-06	1.00e-02	9.50e-07	9.50e-03	1.05e-06	1.05e-02
SS L6-8	1.00e-05	2.00e-02	9.50e-06	1.90e-02	1.05e-05	2.10e-02
SY L1	5.00e-02	1.00e-01	4.75e-02	9.50e-02	5.25e-02	1.05e-01
SY L2	9.00e-02	9.00e-02	8.55e-02	8.55e-02	9.45e-02	9.45e-02
SY L3	5.00e-03	2.00e-01	4.75e-03	1.90e-01	5.25e-03	2.10e-01
SY L4	1.00e-04	1.00e-04	9.50e-05	9.50e-05	1.05e-04	1.05e-04
SY L5	1.00e-04	1.00e-04	9.50e-05	9.50e-05	1.05e-04	1.05e-04
SY L6-8	2.50e-03	8.00e-02	2.37e-03	7.60e-02	2.63e-03	8.40e-02

HK: Horizontale hydraulische Durchlässigkeit (horizontal hydraulic conductivity) [m/s]  
 VK: Vertikale hydraulische Durchlässigkeit (vertical hydraulic conductivity) [m/s]  
 SS: Spezifischer Speicherkoeffizient (specific storage coefficient) [-]  
 SY: Nutzbare Porosität (specific yield) [-]  
 L1: Torf  
 L2: Trennschicht unter Torf  
 L3: Kies  
 L4: Molasse  
 L5: Zementmergel  
 L6: Karst  
 L7: Karst  
 L8: Karst

Der ursprüngliche und der für den Zeitraum 01.06.2018 bis 31.07.2018 optimierte Parametersatz werden zusätzlich auf den Zeitraum 01.01.2017 bis 31.12.2018 angewendet. Die Zielfunktion  $\Phi$  beträgt für den ursprünglichen Parametersatz 49.976 m<sup>2</sup> und für den optimierten Parametersatz 39.508 m<sup>2</sup>, also 79,1 % des Ausgangswerts (Bild 13.1).

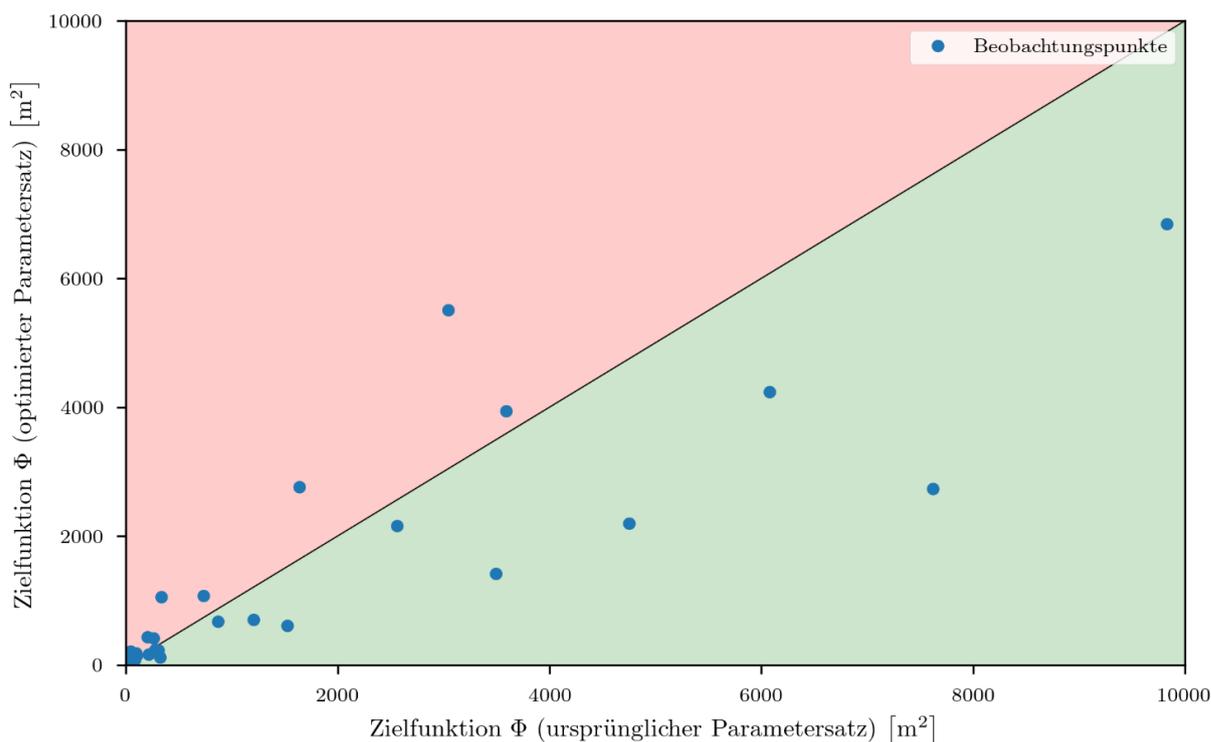


**Bild 13.1:** Wert der Zielfunktion  $\Phi$  im Zeitraum 01.01.2017 bis 31.12.2018 mit dem ursprünglichen und dem optimierten Parametersatz.



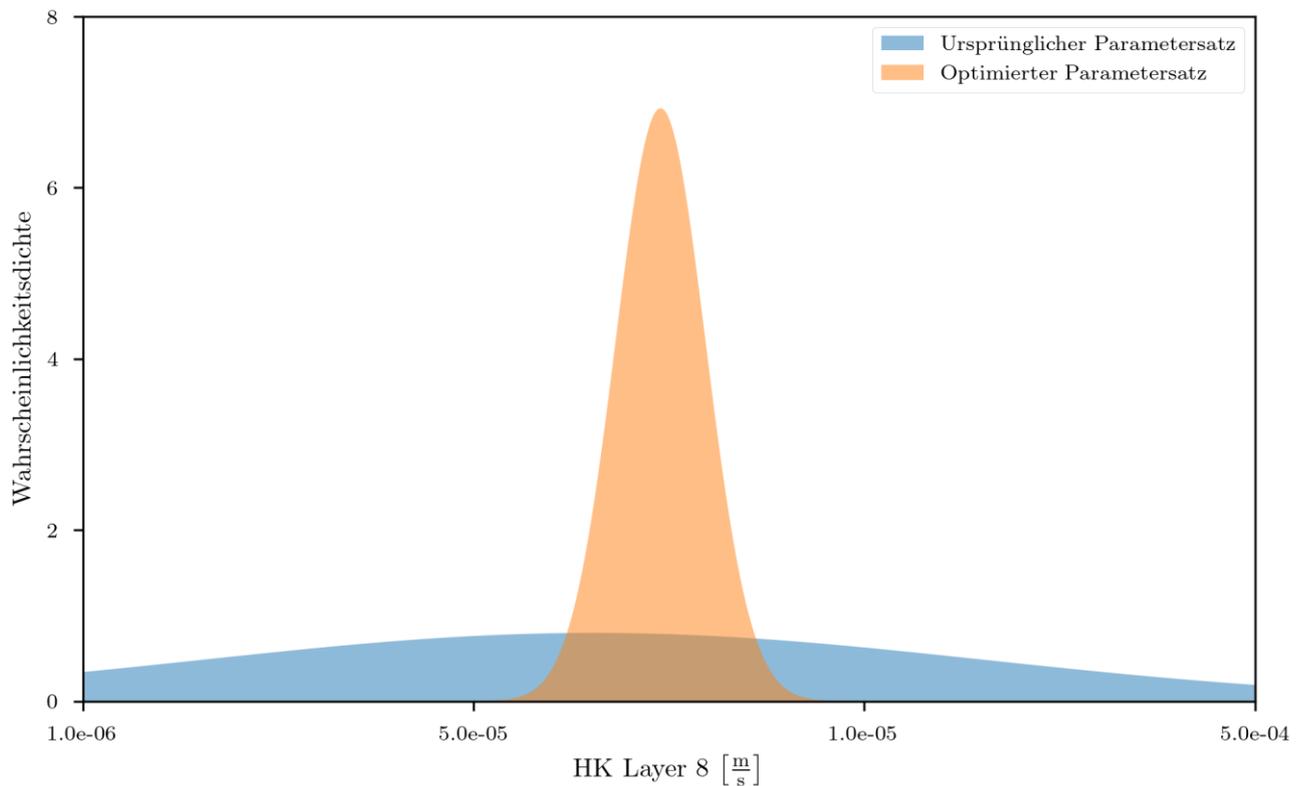
**Bild 13.2:** Wert der Zielfunktion  $\Phi$  an den berücksichtigten Beobachtungspunkten im Zeitraum 01.06.2018 bis 31.07.2018 mit dem ursprünglichen und dem optimierten Parametersatz.

Für den Zeitraum 01.06.2018 bis 31.07.2018 zeigt Bild 13.2 für den ursprünglichen und den optimierten Parametersatz den Wert der Zielfunktion  $\Phi$  an den berücksichtigten Beobachtungspunkten. An den meisten Beobachtungspunkten ist die Abweichung zwischen Messwerten und Modellausgabe bereits mit dem ursprünglichen Parametersatz gering, was die gute Prognosefähigkeit des Grundwassermodells belegt. Für mehrere Beobachtungspunkte konnte die Zielfunktion  $\Phi$  mit dem optimierten Parametersatz im Vergleich zu dem ursprünglichen Parametersatz reduziert werden. An einem Beobachtungspunkt resultiert durch die Parameteränderungen eine größere Abweichung zwischen Messwerten und Modellausgabe. Dies kann jedoch im Hinblick auf die insgesamt Verbesserung der Prognosefähigkeit des Grundwassermodells toleriert werden.



**Bild 13.3:** Wert der Zielfunktion  $\Phi$  an den berücksichtigten Beobachtungspunkten im Zeitraum 01.01.2017 bis 31.12.2018 mit dem ursprünglichen und dem optimierten Parametersatz.

Der für den Zeitraum 01.06.2018 bis 31.07.2018 optimierte Parametersatz wird auf den Zeitraum 01.01.2017 bis 31.12.2018 angewendet. Für diesen Zeitraum zeigt Bild 13.3 den Wert der Zielfunktion  $\Phi$  mit dem ursprünglichen und dem optimierten Parametersatz an den berücksichtigten Beobachtungspunkten. An den meisten Beobachtungspunkten treten sowohl für den ursprünglichen als auch für den optimierten Parametersatz geringe Abweichungen zwischen Messwerten und Modellausgabe auf. An einzelnen Beobachtungspunkten kommt es durch die Parameteränderungen zu einer Erhöhung der Zielfunktion. Demgegenüber stehen jedoch deutliche Verringerungen der Abweichungen zwischen Messwerten und Modellausgabe an mehreren Beobachtungspunkten. Insgesamt wird auch für den Zeitraum 01.01.2017 bis 31.12.2018 eine Verbesserung der Prognosefähigkeit des Grundwassermodells erreicht.



**Bild 13.4:** Wahrscheinlichkeitsdichte für die horizontale hydraulische Durchlässigkeit in Schicht 8 (HK Layer 8) für den ursprünglichen und den optimierten Parametersatz.

Neben der Verbesserung der Prognosefähigkeit des Grundwassermodells wird auch die Unsicherheit bei den betrachteten Modellparametern reduziert. Bild 13.4 zeigt am Beispiel der horizontalen hydraulischen Durchlässigkeit in Schicht 8 (Karst) die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für den ursprünglichen und den optimierten Parametersatz. Im Vergleich zu den bei der globalen Sensitivitätsanalyse und Modellkalibrierung verwendeten unteren und oberen Grenzwerten kann der Bereich, in dem sich der Wert des betrachteten Parameters mit großer Wahrscheinlichkeit befindet, deutlich eingeschränkt werden. Analog verringert sich auch für die anderen berücksichtigten Modellparameter die Unsicherheit.

## 13.2 Wasserressourcen – Qualität

### 13.2.1 Auswirkungen auf die ökotoxikologischen Eigenschaften von Rohwässern

**Tabelle 13.2: Übersicht über die Anzahl der Probenahmen**

Proben	MNQ			MQ		MHQ		Umwälzung TS		Kampagne
	2022	2023	2024	2022	2023	2023	2024	2022	2023	2022-2024
Fluss 1	1	1	-	1	-	3	1	-	-	7
Fluss 2	2	1	-	1	-	1	1	-	-	6
Fluss 3	1	1	-	1	-	1	-	-	-	4
Talsperre 1	1	-	-	1	-	1	1	1	1	6
Talsperre 1 Zulauf	1	-	-	1	-	1	1	1	1	6
Talsperre 2	1	-	-	1	-	1	1	1	1	6
Talsperre 2 Zulauf	1	-	-	1	-	1	1	1	1	6
Uferfiltrat 1	-	1	1	2	3	-	-	-	-	7
Uferfiltrat 2	1	1	-	2	1	-	1	-	-	6
Grundwasser	1	1	-	1	-	1	-	-	-	4
<b>Summe Proben</b>										<b>58</b>

MNQ: Niedrigwasser

MQ: Normalzustand

MHQ: Hochwasser

TS: Talsperre

Tabelle 13.3: Metainformationen der untersuchten Wasserproben

Rohwasserart	Abfluss der jeweiligen Flüsse / (m <sup>3</sup> /s)	Füllungsgrad der Talsperren / %	Temperatur / °C	SAK / (1/m)	Trübung / FNU	pH / -	Leitfähigkeit / (µS/cm)	TOC / (mg/L)
Fluss 1	122	-	21,1	15,8	12,4	8,4	483,0	8,9
	100	-	21,3	15,1	13,9	8,5	486,0	10,4
	190	-	16,0	16,5	5,0	7,9	365,0	7,6
	616	-	5,7	15,2	25,2	8,0	382,0	9,2
	900	-	8,9	18,5	120,9	7,9	393,0	15,0
	475	-	5,4	17,1	23,2	7,8	433,0	-
	1150	-	3,0	21,0	39,7	7,9	341,0	9,0
Fluss 2	575	-	23,7	4,4	1,6	7,7	479,0	1,5
	626	-	23,1	5,0	1,2	7,9	484,0	1,6
	744	-	23,2	4,4	0,9	7,5	440,0	-
	880	-	23,7	4,6	1,9	7,7	474,0	2,0
	3412	-	12,3	15,2	10,4	7,6	318,0	-
	1958	-	5,3	9,2	10,6	7,5	393,0	-
Fluss 3	40	-	21,6	6,5	3,3	8,0	554,0	2,4
	46	-	20,3	4,9	3,9	7,9	566,0	-
	58	-	22,2	6,6	4,3	8,4	528,0	2,9
	580	-	11,8	21,5	62,2	8,0	385,0	6,9
Uferfiltrat 1	151	-	11,7	6,8	0,2	6,8	440,0	-
	123	-	11,7	6,5	0,5	6,9	458,0	3,6
	252	-	11,8	5,0	0,4	6,7	479,0	3,8
	382	-	11,7	5,3	0,3	6,7	470,0	3,4
	210	-	11,7	4,7	0,2	6,7	473,0	3,4
	209	-	12,1	5,8	0,1	6,7	445,0	3,7
	306	-	13,5	4,6	1,1	6,7	468,0	3,6
Uferfiltrat 2	669	-	14,2	4,9	0,7	7,6	658,0	1,2
	766	-	16,3	7,6	5,3	7,6	538,0	-
	1043	-	12,7	4,1	0,3	7,4	704,0	1,2
	1025	-	13,3	5,1	0,8	7,4	686,0	1,3
	1133	-	13,5	6,2	0,2	7,3	657,0	-
	2559	-	15,8	6,1	1,8	7,2	643,0	-
Grundwasser	3	-	10,6	1,4	0,1	7,0	760,0	0,8
	-	-	12,9	-	0,0	7,1	810,0	-
	-	-	10,9	1,7	0,1	7,1	776,0	0,9
	-	-	12,6	-	0,0	7,2	824,0	0,7

SAK: Spektraler Absorptionskoeffizient

TOC: Total Organic Carbon

### 13.2.2 Auswirkungen auf die mikrobiologische Rohwasserbeschaffenheit

**Tabelle 13.4: TrinkXtrem-Messungen Fluss 1 (Rohwasser, Indikatoren u. Pathogene)**

	Indikatoren (KBE bzw. PFU / 100 mL)			Cysten bzw. Oocysten / 100 L		KBE / 1000 mL	Viren (Genkopien) / 1000 mL		
	coliforme Bakt.	E. coli	somat. Coliphagen	Giardia lamblia-Cysten	Cryptospor.-Oocysten	Campylobacter	Adenoviren	Enteroviren	Noroviren
10/2022	112	62,2	172			12	532	<93	<93
11/2022	1553	308	324			15	<111	<111	<111
12/2022	1986	210	533	14	8	110	<121	<121	<121
01/2023	1414	365	381			43	<85	<85	<85
02/2023	461	69,7	138			150	212	<88	121
03/2023	291	16	223	4,5	7,2	9,2	<52	<52	<52
04/2023	4884	866	639			15	<89	<89	<89
05/2023	15531	1733	2300			9,2	641	<103	103
06/2023	83	1	59	6	10	<0,3	<117	<117	<117
07/2023	308	4	124			<0,3	<76	<76	<76
08/2023	1300	93	237			<0,3	<102	<102	<102
09/2023	548	50	134	2	<1	23	<84	<84	<84
10/2023	261	18	194			43	8134	<100	<100
11/2023	816	179	550			43	<89	<89	<89
12/2023	4611	932	1000	-	-	460	<67	<67	<67
12/2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12/2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12/2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-
n <sub>ges</sub>	15	15	15	4	4	15	15	15	15
n <sub>pos</sub>	15	15	15	4	3	12	4	0	2
Prozentsatz	100%	100%	100%	100%	75%	80%	27%	0% <10%	13%

**Tabelle 13.5: TrinkXtrem-Messungen Fluss 2 (Rohwasser, Indikatoren u. Pathogene)**

	Indikatoren (KBE bzw. PFU / 100 mL)			Cysten bzw. Oocysten / 100 L		KBE / 1000 mL	Viren (Genkopien) / 1000 mL		
	coliforme Bakt.	E. coli	somat. Coliphagen	Giardia lamblia-Cysten	Cryptospor.-Oocysten	Campylobacter	Adenoviren	Enteroviren	Noroviren
10/2022	1046	32,7	109			<0,3	96	<96	<96
11/2022	3076	613	814			2,3	216	<91	<91
12/2022	1553	114	310	22,2	9,99	46	<55	<55	<55
01/2023	2143	308	414			23	<101	<101	<101
02/2023	727	25,0	249			0,36 - 2,30	87	<64	<64
03/2023	2755	184	431	2	14	0,36 - 2,30	102	<57	<57
04/2023	770	38	293			0,36 - 2,30	<99	<99	<99
05/2023	8664	1935	1262			2,3	258	<105	<105
06/2023	770	7,4	41	12	8	<0,3	<95	<95	<95
07/2023	2419	276	95			<0,3	<57	<57	<57
08/2023	1046	91	373			<0,3	<100	<100	<100
09/2023	980	39	21			<0,3	<80	<80	<80
10/2023	980	38	100	4	<1	3,6	<105	<105	<105
11/2023	3076	488	750			0,36 - 2,30	<112	<112	<112
12/2023	10462	2063	1000	-	-	43	<72	<72	<72
12/2023	2419	276	315	-	-	-	-	-	-
12/2023	2419	206	409	-	-	-	-	-	-
12/2023	8164	1414	526	-	-	-	-	-	-
n <sub>ges</sub>	18	18	18	4	4	15	15	15	15
n <sub>pos</sub>	18	18	18	4	3	10	5	0	0
Prozentsatz	100%	100%	100%	100%	75%	67%	33%	0% <10%	0% <10%

**Tabelle 13.6: TrinkXtrem-Messungen Talsperre (Rohwasser, Indikatoren u. Pathogene)**

	Indikatoren (KBE bzw. PFU / 100 mL)			Cysten bzw. Oocysten / 100 L		KBE / 1000 mL	Viren (Genkopien) / 1000 mL		
	coliforme Bakt.	E. coli	somat. Coliphagen	Giardia lamblia-Cysten	Cryptospor.-Oocysten	Campylobacter	Adenoviren	Enteroviren	Noroviren
10/2022	19,9	<1	0			<0,3	<100	<100	<100
11/2022	13,1	<1	0			<0,3	<70	<70	<70
12/2022	37,9	<1	0	<0,69	0,69	2,3	<144	<144	<144
01/2023	65,0	<1	0			<3,0	<85	<85	<85
02/2023	48,0	<1	0			0,36 - 2,30	<83	<83	<83
03/2023	23,8	<1	0	11	9,7	<0,3	<57	<57	<57
04/2023	18,1	<1	0			<0,3	<100	<100	<100
05/2023	7,4	<1	0			<0,3	<219	<219	<219
06/2023	1,0	<1	0	1,8	1,8	<0,3	<131	<131	<131
07/2023	6,3	<1	0			<0,3	<82	<82	<82
08/2023	1,0	<1	0			<0,3	<56	<56	635
09/2023	5,2	<1	0	2	<0,54	<0,3	<88	<88	<88
10/2023	24,3	1	0			<0,3	<108	<108	<108
11/2023	137,4	2	6			0,36 - 2,30	<94	<94	<94
12/2023	298,7	6,3	4	7,02	3,12	0,36	<78	<78	<78
12/2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12/2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12/2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-
n <sub>ges</sub>	15	15	15	5	5	15	15	15	15
n <sub>pos</sub>	15	3	2	4	4	4	0	0	1
Prozentsatz	100%	20%	13%	80%	80%	27%	0% <10%	0% <10%	7% <10%

**Tabelle 13.7: Indikatoren und Rückhalte im TrinkXtrem-Messprogramm WVU A****coliforme Bakterien / 100 mL**

PN-Datum	Fluss 1	Fluss 1 ohne extrem	Fluss 1 nur extrem	nach Flockung /Sed.	Rückhalt gesamt	Rückhalt extrem
10/2022	112	112		517		
11/2022	1553	1553		135		
12/2022	1986	1986		816		
01/2023	1414	1414		116		
02/2023	461	461		86		
03/2023	291	291		27		
04/2023	4884	4884		649		
05/2023	15531	15531		1300		
06/2023	83	83		185		
07/2023	308	308		49		
08/2023	1300	1300		387		
09/2023	548	548		320		
10/2023	261	261		88		
11/2023	816		816	411		
12/2023	4611		4611	228		
12/2023	-			-		
12/2023	-			-		
12/2023	-			-		
<b>Mittel</b>	<b>2277</b>	<b>2210</b>	<b>2714</b>	<b>354</b>	<b>-0,8</b>	<b>-0,9</b>

**somatische Coliphagen / 100 mL**

PN-Datum	Fluss 1	Fluss 1 ohne extrem	Fluss 1 nur extrem	nach Flockung /Sed.	Rückhalt gesamt	Rückhalt extrem
10/2022	172	172		18		
11/2022	324	324		27		
12/2022	533	533		166		
01/2023	381	381		80		
02/2023	138	138		20		
03/2023	223	223		36		
04/2023	639	639		107		
05/2023	2300	2300		172		
06/2023	59	59		30		
07/2023	124	124		28		
08/2023	237	237		53		
09/2023	134	134		38		
10/2023	194	194		45		
11/2023	550		550	292		
12/2023	1000		1000	88		
12/2023	-			-		
12/2023	-			-		
12/2023	-			-		
<b>Mittel</b>	<b>467</b>	<b>420</b>	<b>775</b>	<b>80</b>	<b>-0,8</b>	<b>-1,0</b>

**Tabelle 13.8: Indikatoren und Rückhalte im TrinkXtrem-Messprogramm WVU B****coliforme Bakterien / 100 mL**

PN-Datum	Fluss 2	Fluss 2 ohne extrem	Fluss 2 nur extrem	Uferfiltrat 35 d, WW 1	Uferfiltrat 35 d, WW 2	Rückhalt gesamt	Rückhalt extrem
10/2022	1046	1046		<1	<1		
11/2022	3076	3076		<1	<1		
12/2022	1553	1553		<1	<1		
01/2023	2143	2143		<1	<1		
02/2023	727	727		<1	<1		
03/2023	2755	2755		<1	<1		
04/2023	770	770		<1	<1		
05/2023	8664	8664		<1	<1		
06/2023	770	770		<1	<1		
07/2023	2419	2419		<1	<1		
08/2023	1046	1046		<1	<1		
09/2023	980	980		<1	<1		
10/2023	980	980		<1	<1		
11/2023	3076		3076	<1	<1		
12/2023	10462		10462	<1	<1		
12/2023	2419		2419	<1	<1		
12/2023	2419		2419	<1	<1		
12/2023	8164		8164	<1	<1		
Mittel	2971	2072	5308	0,5	0,5	-3,8	-4,0

**somatische Coliphagen / 100 mL**

PN-Datum	Fluss 2	Fluss 2 ohne extrem	Fluss 2 nur extrem	Uferfiltrat 35 d, WW 1	Uferfiltrat 35 d, WW 2	Rückhalt gesamt	Rückhalt extrem
10/2022	109	109		0	0		
11/2022	814	814		0	0		
12/2022	310	310		0	0		
01/2023	414	414		0	0		
02/2023	249	249		0	0		
03/2023	431	431		0	0		
04/2023	293	293		0	0		
05/2023	1262	1262		0	0		
06/2023	41	41		0	0		
07/2023	95	95		0	0		
08/2023	373	373		0	0		
09/2023	21	21		0	0		
10/2023	100	100		0	0		
11/2023	750		750	0	0		
12/2023	1000		1000	0	0		
12/2023	315		315	0	0		
12/2023	409		409	0	0		
12/2023	526		526	0	0		
Mittel	417	347	600	0,5	0,5	-2,9	-3,1

**Tabelle 13.9: Indikatoren und Rückhalte im TrinkXtrem-Messprogramm WVU C**

**coliforme Bakterien / 100 mL**

PN-Datum	Talsperre	Talsperre ohne extrem	Talsperre nur extrem	Reinwasser vor Des., WW 1	Reinwasser vor Des., WW 2	Rückhalt gesamt	Rückhalt extrem
10/2022	19,9	19,9		0	0		
11/2022	13,1	13,1		-	3		
12/2022	37,9	37,9		0	0		
01/2023	65,0	65,0		0	0		
02/2023	48,0	48,0		0	0		
03/2023	23,8	23,8		0	0		
04/2023	18,1	18,1		0	0		
05/2023	7,4	7,4		0	0		
06/2023	1,0	1,0		0	0		
07/2023	6,3	6,3		0	0		
08/2023	1,0	1,0		0	0		
09/2023	5,2	5,2		0	7,4		
10/2023	24,3	24,3		-	0		
11/2023	137,4		137,4	-	0		
12/2023	298,7		298,7	-	0		
12/2023	-			-	-		
12/2023	-			-	-		
12/2023	-			-	-		
<b>Mittel</b>	<b>47,1</b>	<b>20,8</b>	<b>218,1</b>	<b>0,5</b>	<b>1,13</b>	<b>-1,6</b>	<b>-2,3</b>

**somatische Coliphagen / 100 mL**

PN-Datum	Talsperre	Talsperre ohne extrem	Talsperre nur extrem	Reinwasser vor Des., WW 1	Reinwasser vor Des., WW 2	Rückhalt gesamt	Rückhalt extrem
10/2022	0	0		0	0		
11/2022	0	0		-	0		
12/2022	0	0		0	0		
01/2023	0	0		0	0		
02/2023	0	0		0	0		
03/2023	0	0		0	0		
04/2023	0	0		0	0		
05/2023	0	0		0	0		
06/2023	0	0		0	0		
07/2023	0	0		0	0		
08/2023	0	0		0	0		
09/2023	0	0		0	0		
10/2023	0	0		-	0		
11/2023	6		6	-	0		
12/2023	4		4	-	0		
12/2023	-						
12/2023	-						
12/2023	-						
<b>Mittel</b>	<b>1,1</b>	<b>0,5</b>	<b>5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>-0,3</b>	<b>-1,0</b>

## 13.3 Anlagenbetrieb

### 13.3.1 Managementtool

Das Managementtool steht im Status eines Prototyps zur Verfügung. Die grafische Oberfläche ist als Webanwendung umgesetzt und kann mit einem gängigen Browser bedient werden. Der Web-Server sowie die Rechenserver, auf dem die Optimierungsberechnungen mit dem Optimierer PEST durchgeführt werden, wird auf einer Cloud betrieben. Im Folgenden wird zuerst eine kurze Einführung in die Webanwendung gegeben. Anschließend folgt die Auswertung verschiedener Testszenarien mit dem Optimierungstool.

#### 13.3.1.1 Einführung in die Webanwendung

Über die Webanwendung können sowohl „Szenarien“, also Optimierungsberechnungen, erstellt und gestartet werden, als auch die Ergebnisse analysiert und heruntergeladen werden. Nach erfolgreicher Anmeldung kann sich der User über Buttons in den gewünschten Bereich klicken (Bild 13.5). Ist der User dem Wasserversorger „Landeswasserversorgung“ zugeordnet, so sind die Szenarien und die darin hinterlegten Ressourcen der Landeswasserversorgung verwendbar. Wird die Plattform von einem anderen Wasserversorger verwendet, so müssen im Vorfeld für diesen die Ressourcen und die für die Anwendung benötigten Zeitreihen bzw. sogenannte Masterszenarien angelegt werden.

## TrinkXtrem Online

> Login

### Landeswasserversorgung

Szenarien erstellen, auswählen und bearbeiten

Szenarien

Ergebnisse der Szenarienberechnung anschauen und vergleichen

Ergebnisse

**Bild 13.5: Webanwendung - Startseite**

Klickt der User auf „Szenarien“, gelangt man auf eine neue Seite, auf der ein neues Szenario erstellt oder ein bereits erstelltes Szenario ausgewählt, umbenannt oder gelöscht werden kann (Bild 13.6, links). Beim Erstellen eines neuen Szenarios wird über ein Dropdown-Menü ein entsprechendes Masterszenario, welches als Vorlage dient, ausgewählt. In den Masterszenarien der LW liegen die Ressourcen vorkonfiguriert für unterschiedliche hydrologische Bedingungen (Niedrige-, Mittlere und Extreme Bedingungen) vor. Nach Erstellung eines neuen Szenarios kann dieses bearbeitet werden (Bild 13.6, rechts).

### Szenarienauswahl

Neues Szenario erstellen:

Kopieren von Mastermodell

Mittlere GWN ▾

Szenariename

Erstellen

Bestehendes Szenario auswählen, umbenennen oder löschen:

AusfallDonau  
 Brunnenausfall F1  
 Extreme GWN  
 Mittlere GWN

Auswählen  
 Löschen

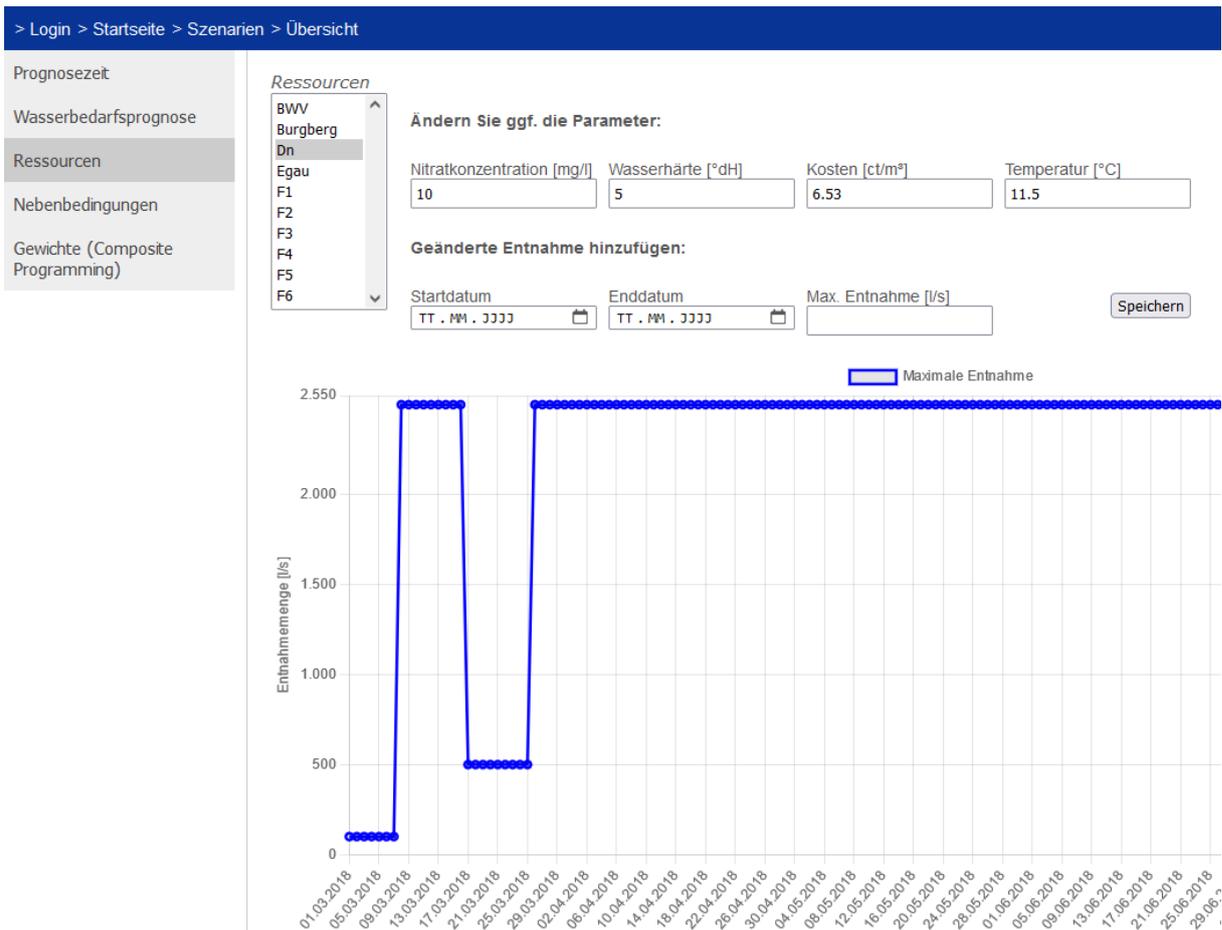
Umbenennen

### Übersicht - Szenario "Mittlere GWN"

Bearbeitungsschritt	Status	Aktion
1 Input		Bearbeiten
2 Rechnung		Starten
3 Zur Ergebnisseite		Link

**Bild 13.6: Webanwendung – Szenarienauswahl (links), Übersicht Szenario (rechts)**

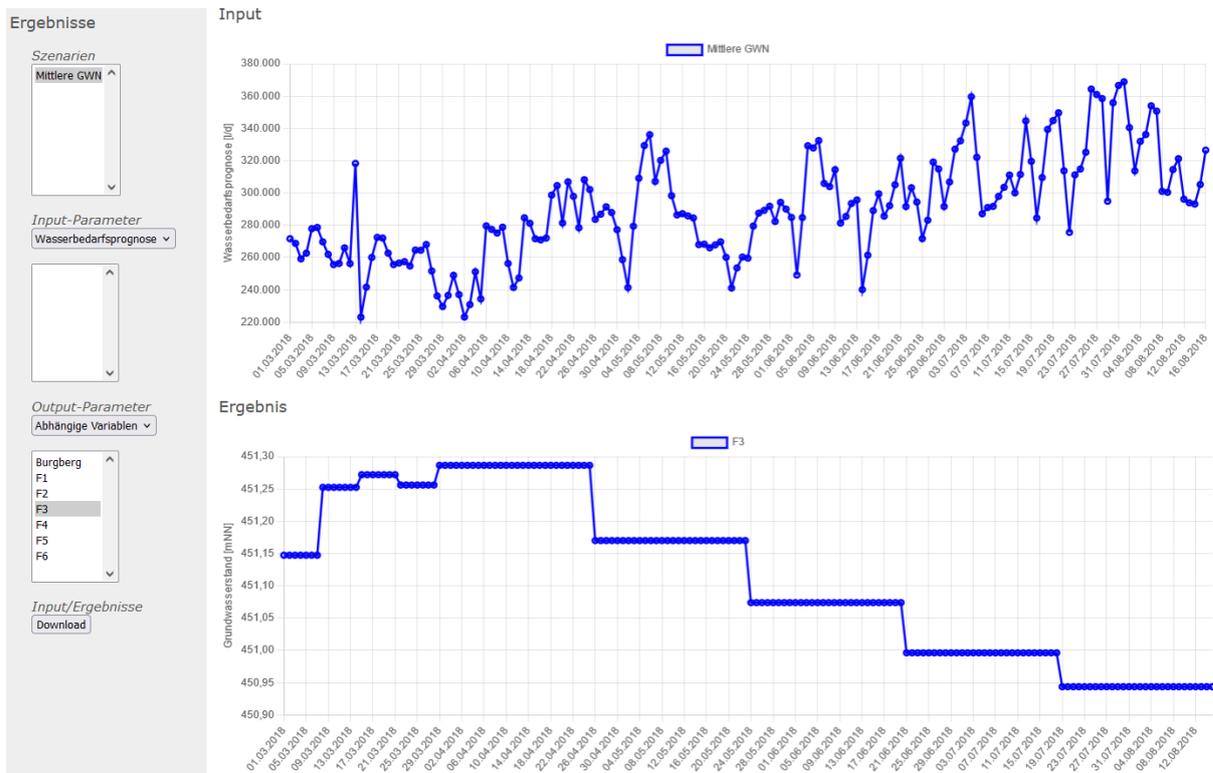
Über die Inputseite können die Parameter für die Berechnung bearbeitet werden (Bild 13.7). Gleichzeitig kann hier, nachdem Parameter individuell angepasst wurden, die Optimierungsberechnung gestartet werden. Nach Klicken auf „Starten“ wird im Hintergrund die Berechnung in einem asynchronen, also unabhängigen Prozess gestartet, sodass die Seite weiter funktionsfähig bleibt. Unter Punkt 3 wird bei erfolgreich abgeschlossener Berechnung ein Link zur Ergebnisseite bereitgestellt.



**Bild 13.7: Webanwendung - Inputseite**

Über die Inputseite können viele der für die Berechnung relevanten Eingabeparameter bearbeitet werden. Thematisch kann am linken Bildrand zwischen Prognosezeit, Wasserbedarfsprognose, Ressourcen, Nebenbedingungen und Gewichte ausgewählt werden. Unter dem Reiter „Prognosezeit“ kann der Zeithorizont der Berechnung geändert werden. Unter „Wasserbedarfsprognose“ kann zwischen verschiedenen vordefinierten Bedarfen ausgewählt werden. Alternativ kann auch eine selbst definierte Zeitreihe in Form eines vordefinierten csv-Formats hochgeladen werden. Wie in Bild 13.7 zu erkennen ist, kann man unter „Ressourcen“ die Parameter der zur Verfügung stehenden Ressourcen bearbeiten. Im Tab „Nebenbedingungen“ kann neben den Werten, auch die Formel der Nebenbedingungen geändert werden. Zuletzt können auf der „Gewichte“-Seite die Gewichte für das Composite-Programming der verschiedenen Zielebenen gesetzt werden. Dabei werden über die Angabe der Ergiebigkeiten der Ressourcen automatisch die Gewichte der Versorgungssicherheit (Zielebene 3) berechnet.

Wie in Bild 13.7 am oberen Rand zu sehen ist, kann durch Klicken der Namen im blauen Balken zu den entsprechenden Seiten gesprungen werden. Über die Startseite gelangt man schließlich zur Ergebnisseite (Bild 13.8).



**Bild 13.8: Webanwendung – Ergebnisse**

In der oberen Auswahlliste erscheinen alle berechneten Szenarien. Nach Auswahl eines Szenarios können sämtliche Zeitreihen der Inputparameter angezeigt werden. Neben der Wasserbedarfsprognose und den Nebenbedingungen, können auch die Zeitreihen der Ressourcen im oberen Diagramm angezeigt werden. Im unteren Diagramm können die Bewertungen der Zielebenen (Composite-Programming), die abhängigen Variablen (z.B. Grundwasserstand) und die Wasserentnahmen der Ressourcen dargestellt werden. Durch das Klicken des Download-Buttons erhält der User sowohl alle Input-, als auch Output-Zeitreihen im Excel-Format.

### 13.3.1.2 Auswertung von Testszenerien

#### Aufbau

Im Folgenden werden drei Testszenerien für die Trinkwasserressourcen des Projektpartners LW betrachtet, für die die Entnahmeverteilung mit dem Managementtool optimiert wurde. Für alle Szenarien gelten die folgenden Vorgaben:

- Prognosezeitraum: 24 Wochen. Der Prognosezeitraum wird in einzelne Zeitschritte für die Optimierung unterteilt. Für die ersten vier Wochen liegt die Zeitschrittgröße bei 7 Tagen. Alle darauffolgenden Zeitschritte haben eine Länge von vier Wochen.

- Die Gewichtung der beiden Kriterien auf Zielebene 2 des „Composite Programming“ Schemas in Bild 6.4 beträgt jeweils 0,5, so dass diese gleichgewichtet sind
- Die Gewichtung des Kriteriums Qualität beträgt 0, so dass dieses Kriterium unberücksichtigt bleibt (das Kriterium Qualität steht jedoch im Managementtool prinzipiell zur Verfügung und es kann eine beliebige Anzahl von Qualitätsparametern definiert und in der Optimierung berücksichtigt werden)
- Nebenbedingung: Die Summe der Entnahmen der Fassungen 1 bis 6 im Donauried sollte  $\geq 600$  l/s sein
- Zusätzlich zur Nebenbedingung wird für jede Ressource eine minimale und maximale Entnahmerate im Managementtool festgelegt, welche nicht unter- bzw. überschritten werden darf

In Bezug auf das Kriterium Versorgungssicherheit lassen sich die Ressourcen in Ressourcen bei denen ein entnahmebegrenzender Einfluss durch ein Mindestkriterium gegeben ist (z.B. minimaler Grundwasserstand) und Ressourcen die nur durch eine betriebliche oder wasserrechtliche Entnahmeobergrenze beschränkt sind, unterteilen. Ein Überblick über die Ressourcen ist in Tabelle 13.10 gegeben.

Für die Ressourcen mit Mindestkriterium (z.B. Fassung 1) muss ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Entnahmemenge und dem einzuhaltenden Kriterium gegeben sein. Für die Fassungen 1 bis 6 kommen hierfür die in Kapitel 6.1.2 vorgestellten künstliche Neuronale Netze zum Einsatz. Die Entnahme an den Brunnen in Burgberg mindert den Abfluss der Hürbe. Da der Zusammenhang zwischen Entnahmerate und Abflussminderung in der Hürbe gut untersucht ist, kann hier ein einfacher linearer Zusammenhang hergestellt werden, so dass der entnahmebeeinflusste Abfluss bestimmt werden kann. Wie in Bild 6.5 dargestellt, muss zur Bewertung des Kriteriums Versorgungssicherheit eine Zielfunktion zwischen 0 (Kriterium nicht erfüllt) und 1 (Kriterium voll erfüllt) erzeugt werden. Eine Bewertung von 0 für eine einzelne Ressource entspricht hierbei einem Zustand bei dem das in Tabelle 13.10 jeweils genannte Mindestkriterium unterschritten ist. Eine Bewertung von 1 ist mit einem Zustand ohne Entnahme gleichzusetzen.

**Tabelle 13.10: Übersicht der Ressourcen**

	Mindestkriterium zur Beurteilung der Versorgungssicherheit	Funktionaler Zusammenhang zur Berechnung der Entnahmebeeinflussten Parameter
Bodenseewasserversorgung (BWV)	Kein Kriterium	-
Burgberg	Minimaler Abfluss am der Hürbe	Linearer Zusammenhang zwischen Pumprate und Abflussminderung Hürbe
Donau	Kein Kriterium	-
Egau Wasserwerk	Kein Kriterium	-
Fassung 1	Minimaler Grundwasserstand	Künstliches Neuronales Netz
Fassung 2	Minimaler Grundwasserstand	Künstliches Neuronales Netz
Fassung 3	Minimaler Grundwasserstand	Künstliches Neuronales Netz
Fassung 4	Minimaler Grundwasserstand	Künstliches Neuronales Netz
Fassung 5	Minimaler Grundwasserstand	Künstliches Neuronales Netz
Fassung 6	Minimaler Grundwasserstand	Künstliches Neuronales Netz

Für jede Ressource sind im Managementtool Kosten in Cent/m<sup>3</sup> hinterlegt. Die Kostenstruktur wird hier nur qualitativ wiedergegeben. Die Kosten für den Fremdwasserbezug sind mit deutlichem Abstand am größten. Die Kosten der Ressource Donau sind am niedrigsten und betragen ca. die Hälfte der Kosten der übrigen Ressourcen (Fassung 1 bis 6, Egau Wasserwerk und Burgberg).

Eine Übersicht über die drei Szenarien ist in Tabelle 13.11 gegeben. Die Szenarien basieren auf historischen Daten hinsichtlich der hydrologischen Bedingungen und der angesetzten Wasserbedarfsprognose der jeweiligen Jahre.

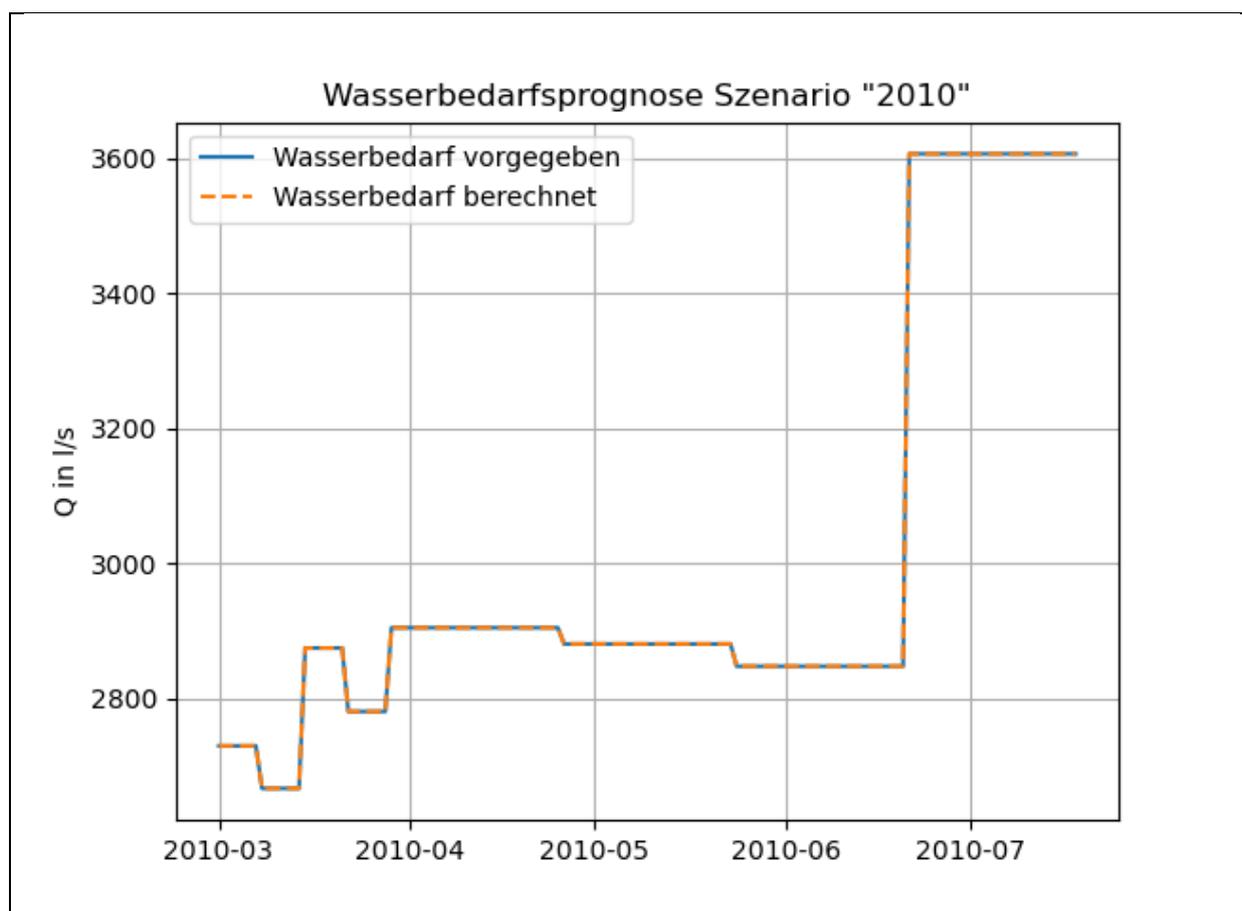
**Tabelle 13.11: Szenarien Übersicht**

Szenario-Name	Beschreibung
2010	Ca. mittlere hydrologische Verhältnisse
2010 Donau teuer	Wie Szenario 2010 aber mit Anstieg der Kosten des Donauwassers um ca. 150 %
2018 Donau Ausfall	Niedrige hydrologische Verhältnisse. Die maximale Donauentnahme ist für einen Zeitraum von zwei Wochen auf 100 l/s reduziert

Durch die Erhöhung der Kosten der Ressource Donau im Szenario „2010 Donau teuer“ wird die Donau in diesem Szenario zur zweit teuersten Ressource nach der Ressource BWV. Es besteht aber weiterhin ein deutlicher Abstand zur Ressource BWV.

### Ergebnisse

Eine notwendige Voraussetzung für das Funktionieren des Managementtools ist, dass der vorgegebene Gesamtwasserbedarf in der Optimierung eingehalten wird. Bild 13.9 zeigt den vorgegeben und berechneten Wasserbedarf für das Szenario „2010“. Der berechnete Wasserbedarf ist die Summe der durch die Optimierung berechneten Einzelentnahmen der Ressourcen im jeweiligen Zeitschritt. Es zeigt sich, dass der berechnete Wasserbedarf für das Szenario „2010“ identisch mit dem vorgegebenen Wasserbedarf ist. Für die beiden weiteren Szenarien ist diese Bedingung auch erfüllt, hier aber nicht dargestellt.



**Bild 13.9: Vorgegebener und berechneter Wasserbedarf für das Szenario „2010“**

Als nächstes wird die optimierte Entnahmeaufteilung des vorgegebenen Wasserbedarfs auf die einzelnen Ressourcen betrachtet, welche das wesentliche Ergebnis des Managementtools darstellt. Die Ergebnisse sind in Bild 13.10 dargestellt.

Im Szenario „2010“ wird der Hauptanteil des Wasserbedarfs über die Ressource Donau gedeckt. Die Ressource Donau hat hier die geringsten Kosten pro m<sup>3</sup> und das Kriterium Versorgungssicherheit spielt für diese Ressource keine Rolle, da kein Mindestkriterium (minimaler Abfluss) eingehalten werden muss. Im Zeitraum bis ca. Mitte Juni wird die Donauentnahme durch die vorgegebenen Mindestentnahmen der einzelnen Ressourcen eingeschränkt sowie durch die Nebenbedingung für die Fassungen 1 bis 6 im Donauried, welche in Summe mindestens 600 l/s entnehmen müssen. Letzt genanntes Kriterium wird genau eingehalten. Im Sinne einer optimalen Lösung unter Berücksichtigung der Kosten und der Versorgungssicherheit und der Einhaltung der Nebenbedingungen entspricht dies dem optimalen Ergebnis. Im Zeitraum ab Mitte Juni erreicht die Ressource Donau die zulässige vorgegebene Maximalentnahme. In diesem Zeitraum wird die Entnahme über das Egauwasserwerk hochgefahren, um den Gesamtbedarf zu decken. Die Ressource Egauwasserwerk

wird vom Optimierer bevorzugt hochgefahren, da einerseits die hinterlegten Kosten geringfügig niedriger als für die restlichen Ressourcen sind und andererseits die Versorgungssicherheit für diese Ressource keine Rolle spielt. Die Ressource BWV ist mit Abstand die teuerste Ressource und wird aus diesem Grund konstant mit der minimal einzuhaltenden Rate angesetzt.

Für das Szenario „2010 Donau teuer“ ist die Entnahmeverteilung deutlich geändert gegenüber dem Szenario „2010“. Aufgrund der um 150 % erhöhten Kosten ist die Donau teurer als die anderen Ressourcen mit Ausnahme der BWV. Es wird somit die maximal mögliche Menge über das Egauwasserwerk entnommen, da dieses die geringsten hinterlegten Kosten hat und nicht über das Kriterium Versorgungssicherheit eingeschränkt wird. Auch die Entnahmen der Fassungen 1 bis 6 im Donauried liegen in Summe über den 600 l/s für alle Zeitschritte und sind damit höher als im Szenario „2010“. Die Entnahme der Fassungen wird über das Kriterium Versorgungssicherheit beschränkt. Eine geringere Gewichtung der Versorgungssicherheit gegenüber dem Kriterium Kosten (z.B. 0,3 zu 0,7 anstelle 0,5 zu 0,5) würde zu höheren Entnahmen der Fassungen im Donauried führen.

Im Szenario „2018 Donau Ausfall“ wird die maximal zulässige Entnahme der Donau auf 100 l/s für einen Zeitraum von zwei Wochen im März beschränkt. Generell sind die hydrologischen Bedingungen im Jahr 2018 ungünstiger als im Jahr 2010. Dies spiegelt sich neben geringeren Grundwasserständen auch in einem höheren Wasserbedarf wider. Um den Ausfall der Donauentnahme zu kompensieren, wird die maximal mögliche Entnahme am Egauwasserwerk gefahren. Weiterhin werden die Fassungen im Donauried auf über 2.000 l/s hochgefahren. Sobald die Donauentnahme wieder voll zur Verfügung steht, wird diese maximal gefahren unter Einhaltung der vorgegebenen Mindestentnahmen sowie der Nebenbedingung für die Fassungen im Donauried.

Generell ist das Managementtool so aufgebaut, dass ein befristeter Ausfall bzw. eine Reduzierung der maximal zulässigen Gesamtentnahme einer oder mehrerer Ressourcen einfach umgesetzt werden kann.

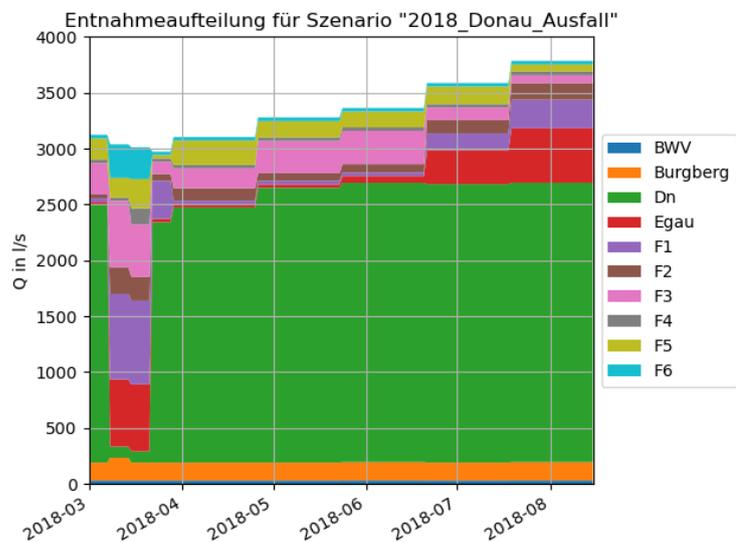
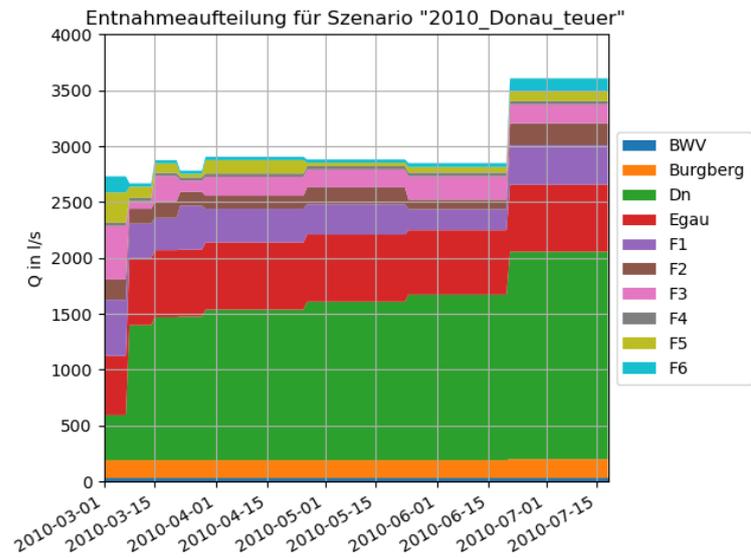
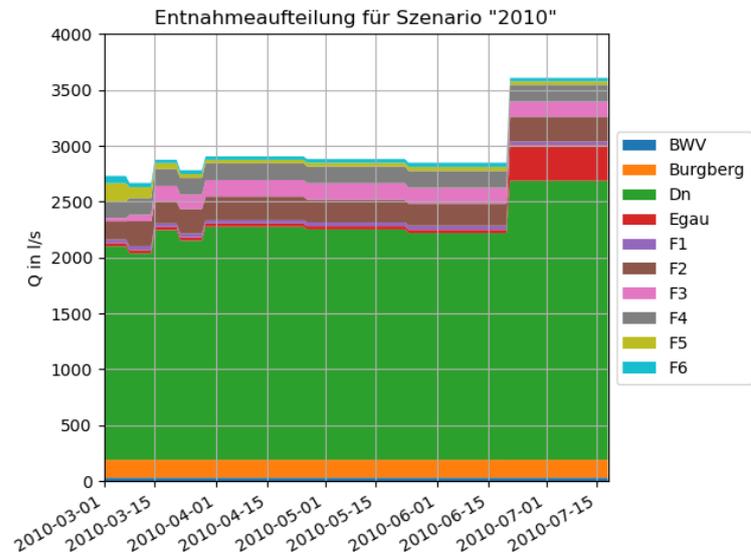


Bild 13.10: Optimierte Entnahmeanforderung

In Bild 13.11 sind die Verläufe der entnahmeabhängigen Variablen (blaue Linie) im Vergleich zum 0-Entnahmestand (Unterkante grüner Bereich) und zum Mindestkriterium (Oberkante roter Bereich) für das Szenario „2018 Donau Ausfall“ dargestellt. Für die Fassungen 1 bis 6 (F1 bis F6) ist die abhängige Variable der Grundwasserstand. An den Grundwasserständen sind die Absenkungen während des Donauausfalls durch die hohen angesetzten Entnahmen deutlich erkennbar. Die optimierte Entnahme der einzelnen Fassungen sowie der Ressource Burgberg ist abhängig von den ressourcenspezifischen Kosten, den ressourcenspezifischen Maximalentnahmen und dem Verlauf der grünen und roten Bereiche, welche die Zielfunktion der Versorgungssicherheit beeinflussen.

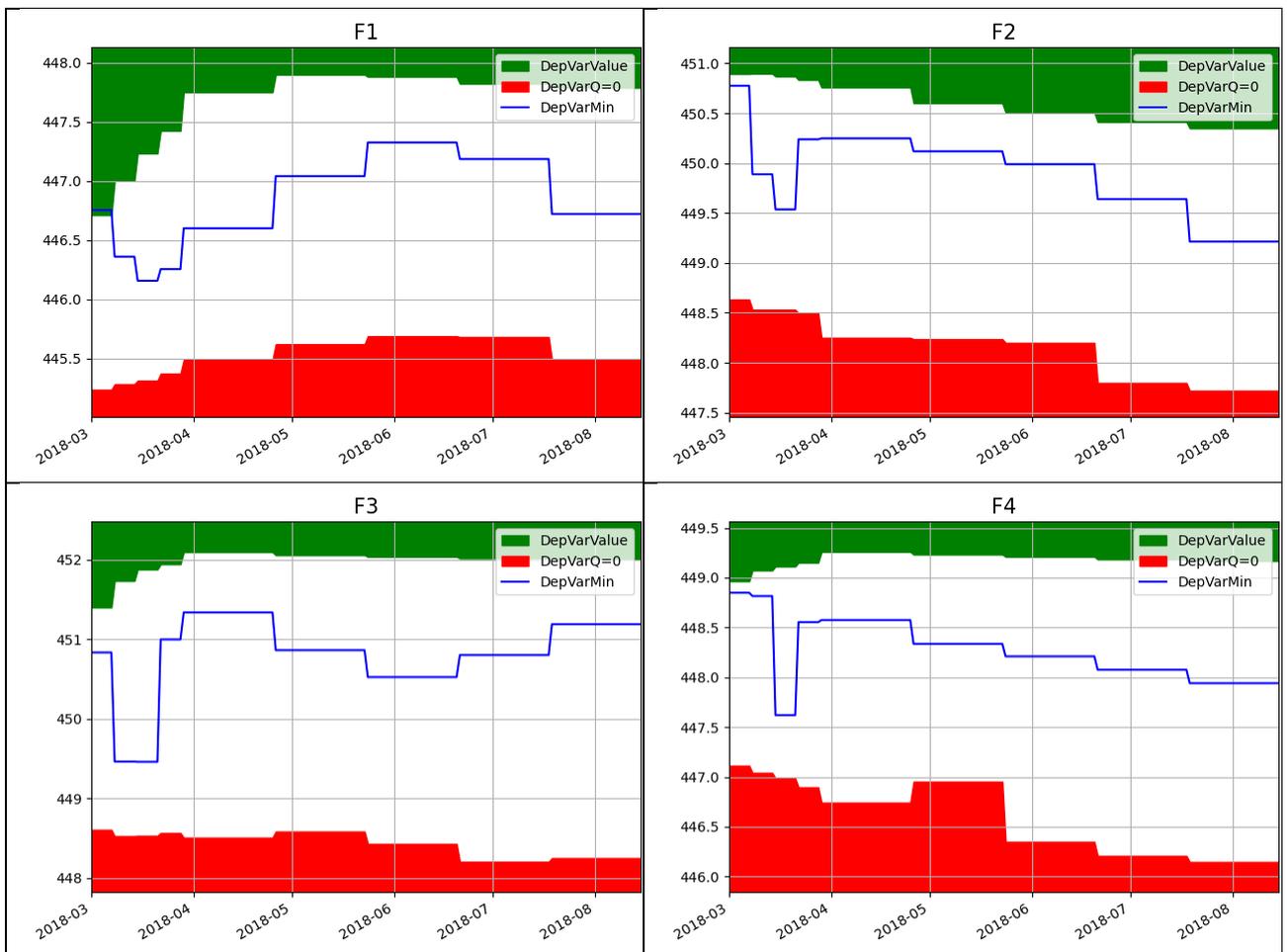
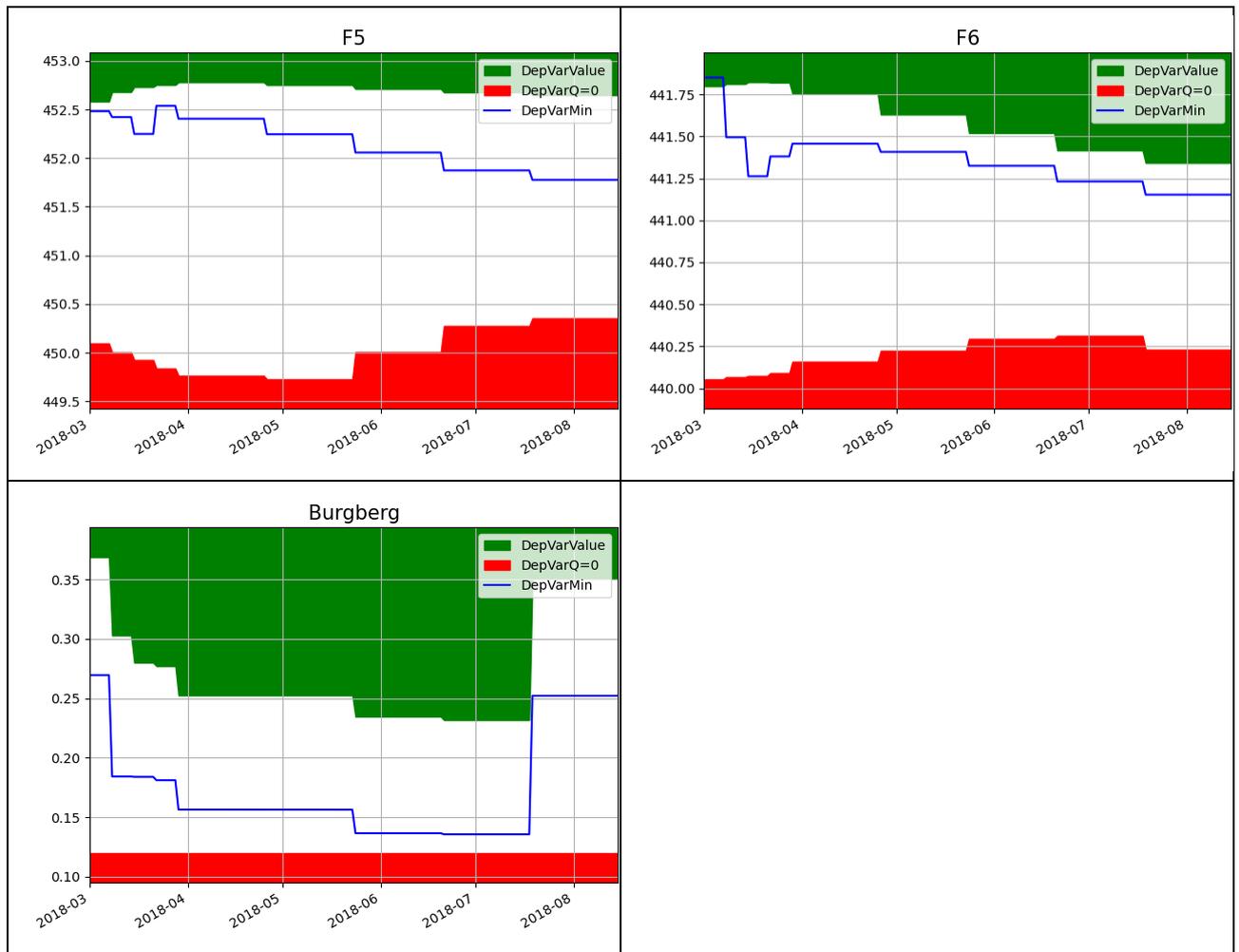


Bild - Fortsetzung nächste Seite

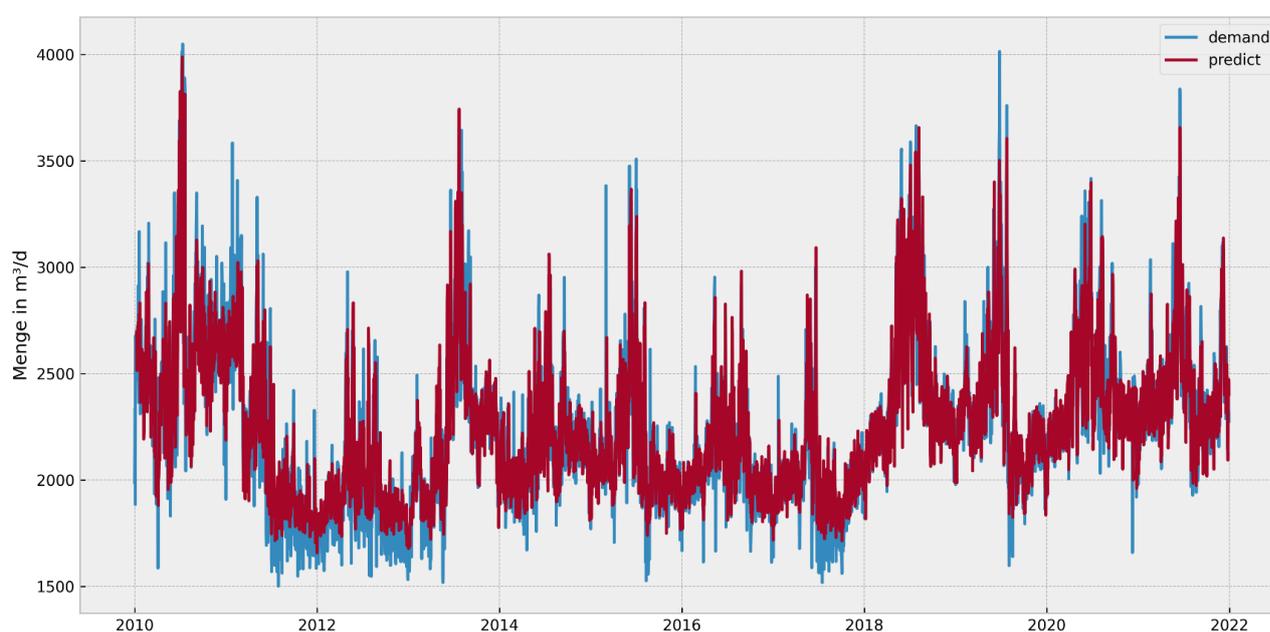


**Bild 13.11:** Verläufe der entnahmeabhängigen Variablen (DepVar) für das Szenario „2018 Donau Ausfall“. DepVar kann je nach Ressource für den Grundwasserstand in m+NN (Fassung 1 bis Fassung 6) oder den Hürbeabfluss in m<sup>3</sup>/s stehen. Unterkante grüner Bereich entspricht dem Verlauf ohne Entnahme. Oberkante roter Bereich entspricht dem Verlauf des Mindestkriteriums

## 13.4 Trinkwasserbedarf

### 13.4.1 Trinkwasserbedarfsprognose

Für die Harzwasserwerke GmbH wurden für fünf Abnehmer bzw. Gemeinden Prognosemodelle für den Trinkwasserbedarf erstellt. Hierzu wurden zunächst historische Verbrauchsdaten zur Verfügung gestellt, aufbereitet und auf Plausibilität geprüft. Die Vorhersagemodelle liefern Tagessummen für die kommenden zehn Tage. In der folgenden Abbildung sind die Modellergebnisse für einen Abnehmer der Harzwasserwerke dargestellt (Bild 13.12).

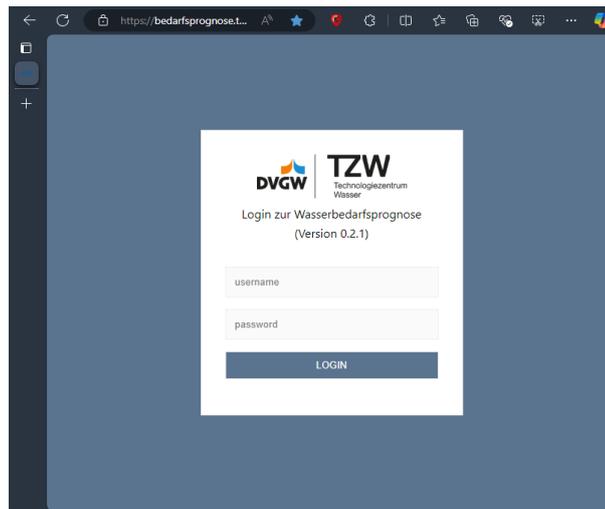


**Bild 13.12: Gemessener (blau) und vorhergesagter (rot) Wasserverbrauch eines Abnehmers der Harzwasserwerke**

### 13.4.2 Webservice Trinkwasserbedarfsprognose

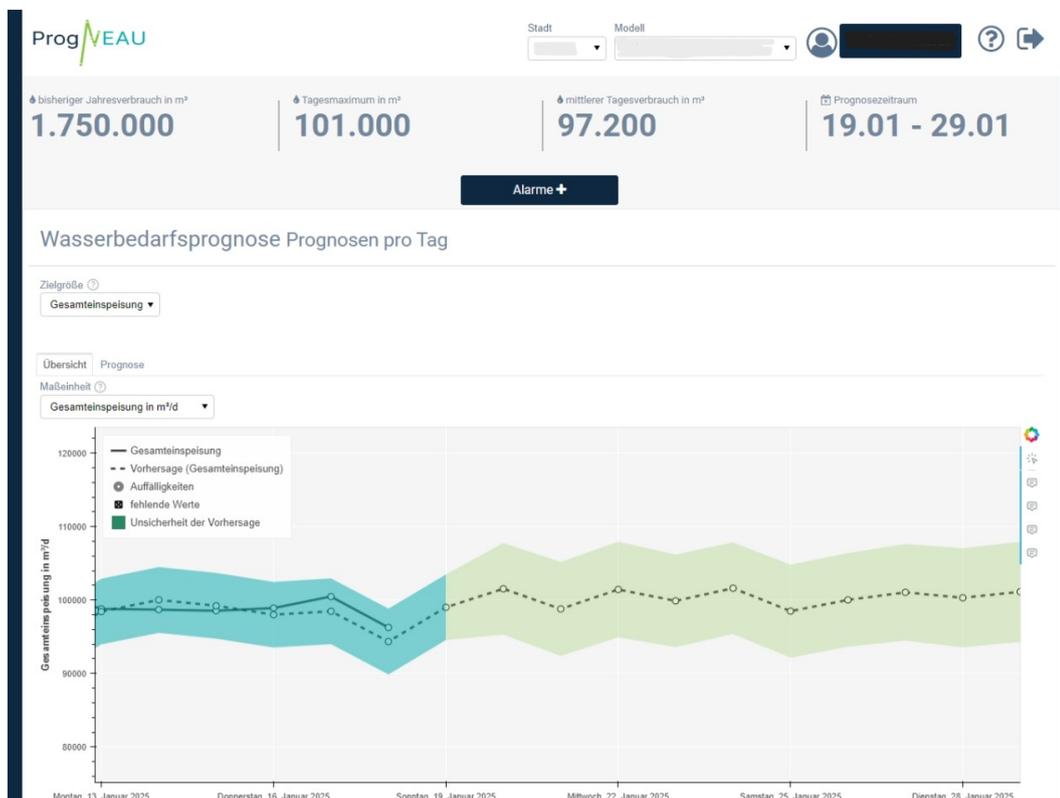
Das TZW hat einen Webservice für die kurzfristige Prognose des Wasserbedarfs entwickelt. Er kann Prognosen für die kommenden zehn Tage für Zonen innerhalb einer Gemeinde, einer vollständigen Gemeinde sowie für größere Versorgungsgebiete, die mehrere Gemeinden umfassen, bereitstellen.

Der Service kann nur von beim TZW registrierten Anwendern genutzt werden. Über ein Login-Bildschirm erfolgt zunächst die Anmeldung mit Benutzername und Kennwort (Bild 13.13).



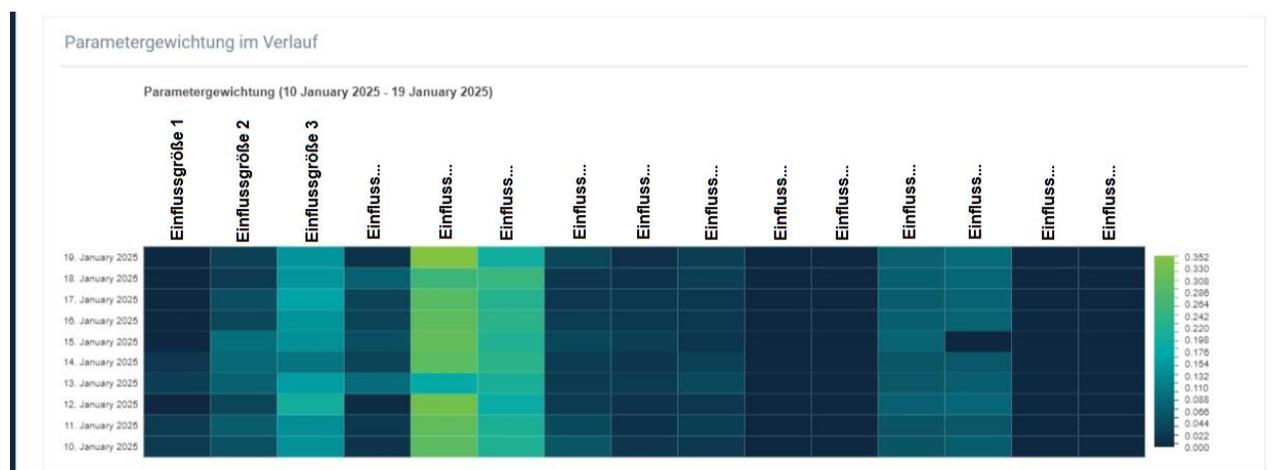
**Bild 13.13: Anmeldebildschirm**

Nach der Anmeldung erscheint der Hauptbildschirm, wo der Anwender zwischen verschiedenen Modellen wählen kann, aktuelle Kennzahlen (Verbrauchsdaten) sowie eine Zeitreihe mit dem historischen Verbrauch sowie den Prognosen einsehen kann. Der tatsächlich gemessene Verbrauch der letzten zurückliegenden Tage wird als durchgezogene schwarze Linie dargestellt, die Prognosen als gestrichelte Linie. Für jede Prognose wird auch eine Unsicherheit berechnet, die als farbige Fläche um die prognostizierten Werte dargestellt werden (Bild 13.14).



**Bild 13.14: Hauptbildschirm der Anwendung**

Ein wichtiger Aspekt ist die Nachvollziehbarkeit der Prognosen durch den Anwender. Hierzu wird für jede Prognose die Wichtung der verwendeten Einflussgrößen berechnet und in Form einer Heatmap dargestellt (Bild 13.15).



**Bild 13.15: Wichtung der Einflussgrößen für jede Prognose**

Der Service ermöglicht die Prognose von verschiedenen Parametern, also nicht nur den Gesamtwasserbedarf einer Gemeinde, sondern auch den Bedarf von beispielsweise verschiedenen Zonen. Der Anwender kann entsprechend verschiedene Größen auswählen und sich die Prognosen anzeigen lassen.

Ein wichtiges Feature ist die Möglichkeit, einzelne Datenpunkte zu editieren und zu markieren. So können:

- fehlerhafte Daten durch den Anwender korrigiert werden
- auffällige Datenpunkte (Anomalien) durch den Anwender markiert und beschrieben werden

Ein Beispiel ist Bild 13.16 in dargestellt.



**Bild 13.16: Markierte auffällige Datenpunkte in der Zeitreihe des Tagesverbrauchs**

Jeder Datenpunkt kann angeklickt und bearbeitet werden. In Bild 13.17 ist es beispielsweise möglich, den Datenpunkt mit einem selbst definiert Wert zu korrigieren und zu beschriften.



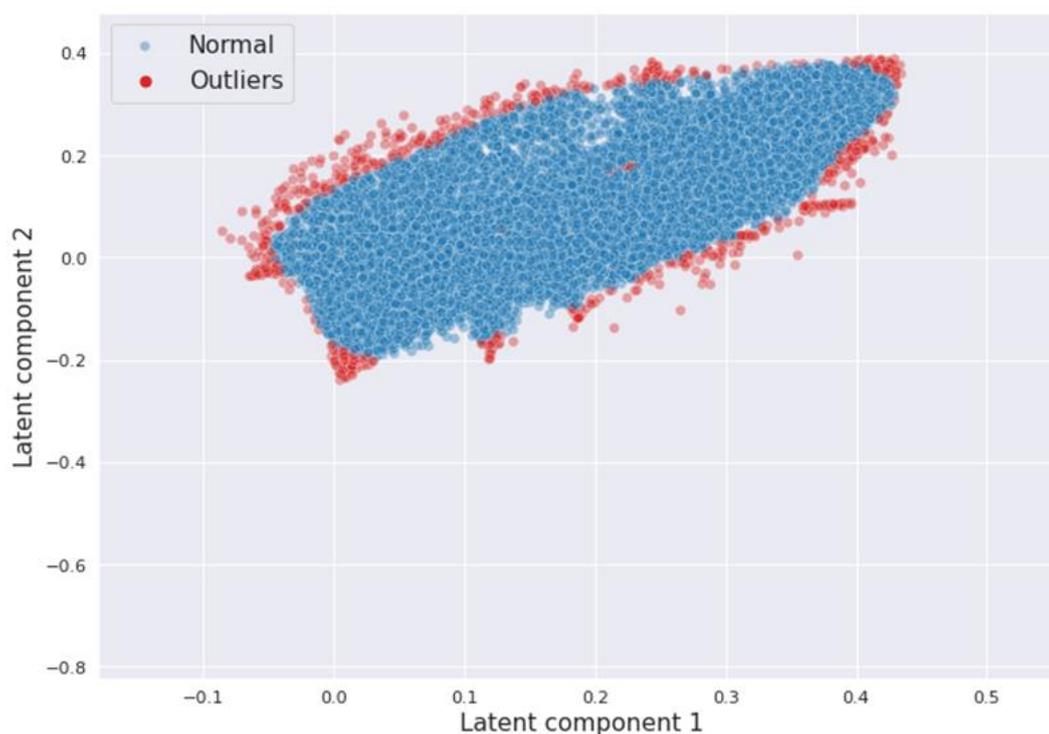
**Bild 13.17: Korrektur und Beschriftung einzelner Datenpunkte**

Diese Funktionen sind sehr wertvoll und ermöglichen einen reibungslosen Ablauf zwischen den Mitarbeitern in der Leitwarte eines Wasserversorgungsunternehmens insbesondere zwischen Schichtwechseln. Damit resultieren folgende Vorteile für das System:

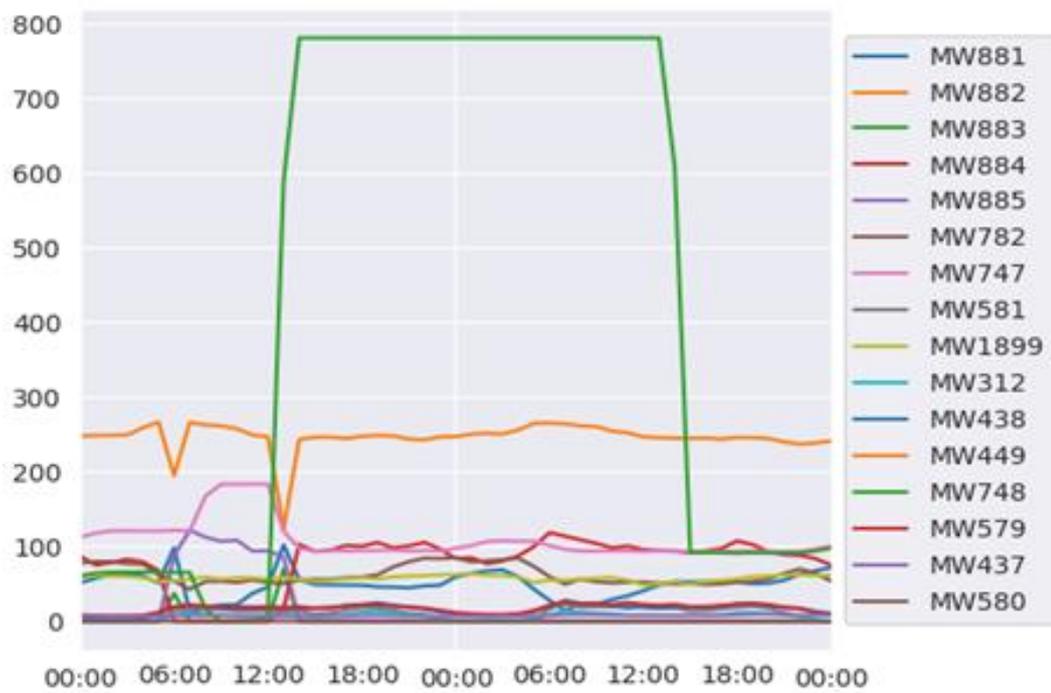
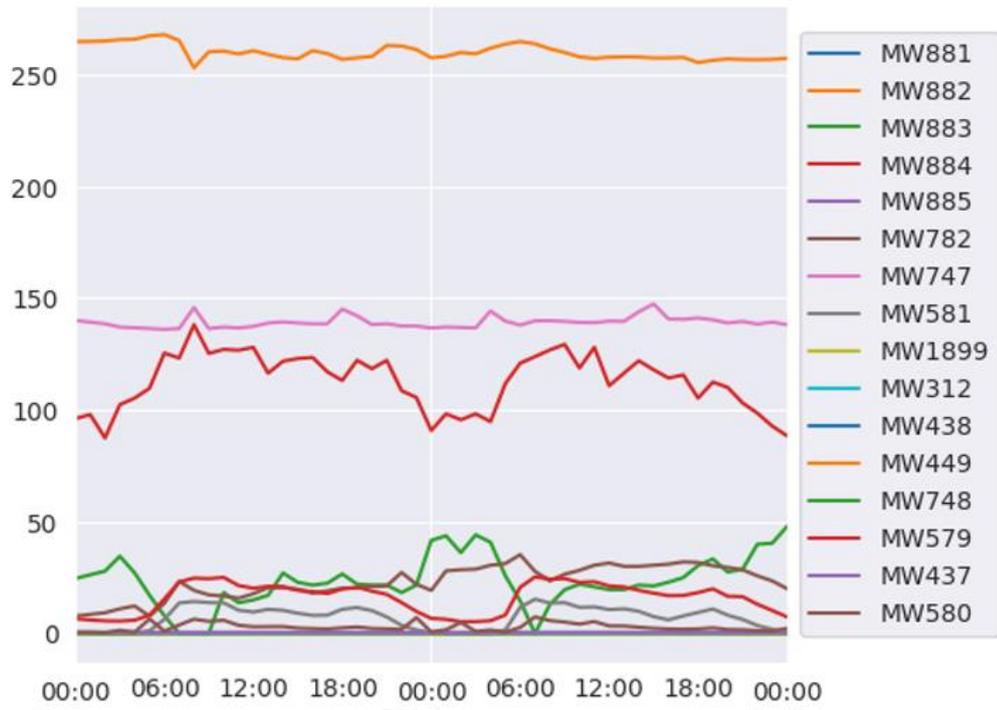
- Ökologische energieeffizientere Fahrweise der Wasserbehälter und Pumpen zur Vergleichmäßigung des Betriebs
- Kontrolle der Wasserbilanzierung (Eigen- bzw. Fernwasserbedarf und deren Abhängigkeit zueinander)
- Bewertung der Einflussfaktoren im Versorgungsgebiet wie Wetterabhängigkeiten, saisonale Einflüsse und Verbrauchsverhalten
- Spitzenverbrauchsanalyse, um somit z.B. Spitzenverbräuche besser abfangen zu können
- Optimierung der künftigen Anlagen- und Leitungsauslegung
- Bessere Planung und Sicherheit der Ersatzversorgung bei vorübergehender Außerbetriebnahme von Anlagen bzw. Leitungen

### 13.4.3 App zur Anomalie-Detektion

Der erste Schritt bei der Nutzung der App liegt im Training mit ausgewählten normalen Daten aus dem Versorgungsnetz. Bild 13.18 zeigt die resultierenden Codes. Jeder Punkt steht für den Verlauf eines gesamten Tages, in dem Beispiel alle 16 betrachteten Entnahmestellen (Bild 13.19). Auf Basis dieser Codes wird ein Schwellwert für die Detektion festgelegt. Dieser wird durch den Übergang von blauen zu roten Punkten dargestellt. Bild 13.19 gibt einen Überblick über die Wasserbedarfe an zwei unterschiedlichen Tagen. Die auf Python basierte Anwendung liest diese Daten ein und führt eine Auswertung durch. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Bild 13.20 und Bild 13.21 zu finden. Im Bild 13.20 bleibt die Projektion des Tagesverlaufs nahe dem Zentrum des Auswertungsraumes. Im Gegensatz hierzu verlässt der anormale Datenausschnitt klar den zentralen Bereich (Bild 13.21).



**Bild 13.18:** Darstellung aller Codes aus den Tagesverläufen der Trainingsdaten



**Bild 13.19: Verlauf eines normalen Tags (oben), sowie eines anormalen Tages (unten)**



### 13.5 Preismanagement

Verweis aus 8.2.2: Schritt 2: Durchführung einer Angebotsanalyse (Bild 13.22)

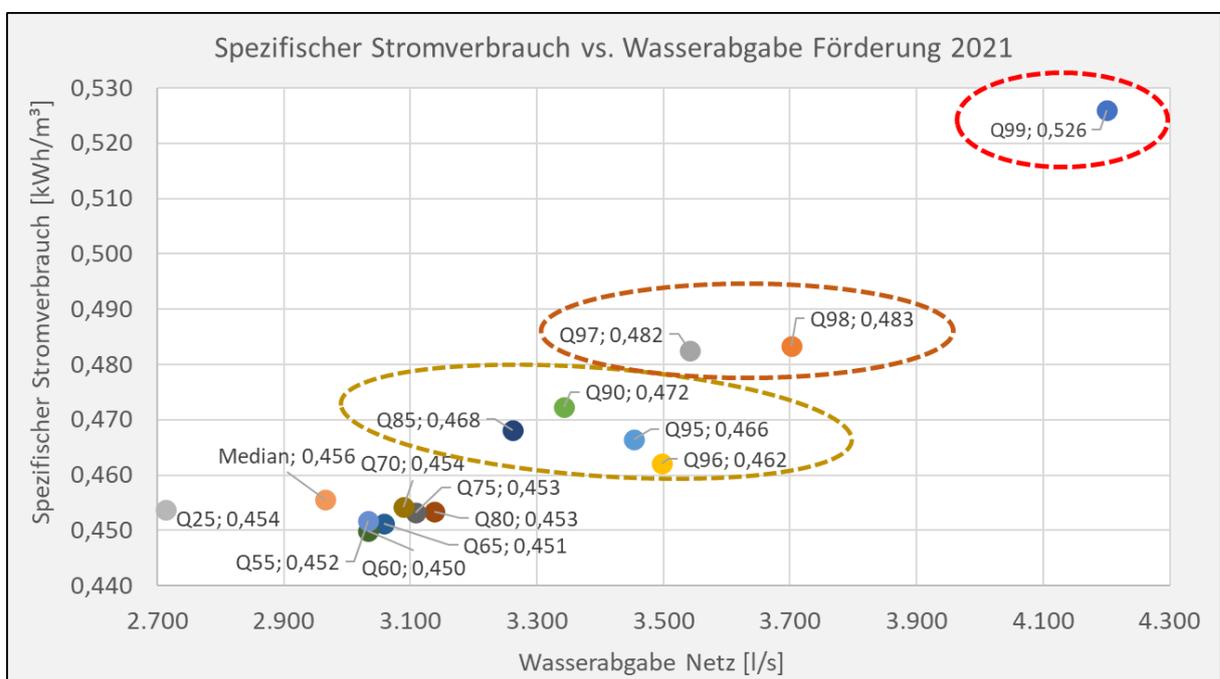
Eine Heatmap zeigt durchschnittliche Tagesmuster nach Wochentagen für das Jahr 2022 an. Hierüber wird ersichtlich, an welchen Wochentagen und Tageszeiten eine besonders hohe Wasserabgabe an die Kunden erfolgt. In der Abbildung haben z. B. alle Wochentage eine gemeinsame Spitzenzeit in den Abendstunden. Darüber hinaus gibt es am Wochenende eine leichte zeitliche Verschiebung.

2022	1	2	3	4	5	6	7
h	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag	Samstag	Sonntag
0	10.571	10.843	11.253	11.258	11.209	10.849	10.523
1	9.451	9.508	9.802	9.834	9.762	9.709	9.517
2	8.415	8.224	8.616	8.706	8.737	8.657	8.485
3	7.630	7.335	7.682	7.675	7.685	7.709	7.755
4	7.009	6.707	7.243	7.213	7.037	7.166	7.152
5	7.168	6.897	7.402	7.306	7.118	6.916	6.859
6	8.141	7.629	8.048	8.283	7.948	6.644	6.597
7	9.831	9.145	9.604	9.690	9.119	6.900	6.250
8	10.954	10.411	10.964	10.863	10.494	8.028	6.986
9	11.907	11.323	11.804	11.827	11.792	9.922	8.901
10	12.372	11.954	12.362	12.453	12.445	11.521	10.735
11	12.836	12.373	12.498	12.584	13.006	12.498	11.767
12	12.979	12.385	12.431	12.571	12.964	13.138	12.728
13	12.998	12.578	12.500	12.595	12.874	13.510	13.049
14	13.176	12.757	12.797	12.920	12.993	13.583	13.107
15	12.917	12.712	12.976	12.936	12.966	13.231	12.639
16	12.666	12.704	13.019	12.985	13.088	13.080	12.137
17	12.632	12.766	13.113	13.017	13.231	13.236	12.236
18	12.778	13.018	13.326	13.162	13.361	13.580	12.814
19	13.172	13.364	13.567	13.492	13.376	13.661	13.352
20	13.593	13.770	13.931	13.764	13.314	13.545	13.673
21	13.626	13.873	13.813	13.647	13.099	13.092	13.381
22	13.042	13.535	13.598	13.231	12.688	12.307	12.799
23	12.204	12.653	12.764	12.455	11.843	11.371	11.861

Bild 13.22: Zeitpunkt von Spitzenabgaben (Bsp. LW)

Verweis aus 8.2.4: Schritt 4: Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse (Bild 13.23)

Ab einer Wasserabgabe von ca. 3.250 l/s ist ein sprunghaft ansteigender spezifischer Stromverbrauch (kWh/m<sup>3</sup>) zu beobachten. Die Auswertung zeigt, dass ca. 15% (ab Q85 = ca. 1.300 h im Jahr) der höchsten Spitzenabgaben im Jahr davon betroffen sind. Beispiel: Eine Wasserabgabe von ca. 4.200 l/s verursacht einen Stromverbrauch von 0,526 kWh pro abgegebenen m<sup>3</sup> (Q99 = ca. 87 h im Jahr). Hingegen liegt der Stromverbrauch bei einer mittleren Wasserabgabe von ca. 3.000 l/s bei ca. 0,450 kWh/m<sup>3</sup>.



**Bild 13.23: Proportionaler Anstieg des Stromverbrauchs bei Spitzenabgaben (Bsp. LW)**

Verweis aus 8.2.4: Schritt 4: Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse (Bild 13.24)

In der Abschätzung werden drei Fälle (Ableitung aus Quantilen Bild 13.23) dargestellt, in denen der Versorger ab einem bestimmten Grenzwert der Wasserabgabe (l/s) eingegriffen hätte. Der Eingriff erfolgt in Form eines Anreizes für Kunden, die ihre Nachfrage verschieben würden. Die Berechnung plant ein, dass die Nachfrage zu einem späteren Zeitpunkt bei einer mittleren Wasserabgabe (spez. Stromverbrauch 0,440 - 0,465 kWh/m<sup>3</sup>) nachgeholt wird. Je geringer dabei der gewählte Grenzwert, desto höher die zu verschiebende Wassermenge und Kosteneinsparung. Im Weiteren sind die Einsparungen für einen längeren Zeithorizont zu berücksichtigen. Angesetzter Strompreis: 20 ct./ kWh.

Spez. Stromverbr. (kWh/m <sup>3</sup> )	Grenzwerte für Eingriffe (Netzabgabe Wasser)			
	[Fall 1] 4.200 l/s	[Fall 2] 3.542 l/s	[Fall 3] 3.262 l/s	
0,465	17.100 €/a	25.600 €/a	36.500 €/a	
0,460	18.500 €/a	29.300 €/a	53.000 €/a	
0,450	21.300 €/a	36.800 €/a	86.000 €/a	
0,440	24.100 €/a	44.300 €/a	119.000 €/a	
Zeitlicher Horizont	1 Jahr	17.100 €	bis	119.000 €
	5 Jahre	85.500 €	bis	595.000 €
	10 Jahre	171.000 €	bis	1.190.000 €

**Bild 13.24: Berechnung der Stromkosteneinsparungen für Förderpumpen (Bsp. LW)**

Verweis aus 8.2.4: Schritt 4: Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse (Tabelle 13.12)

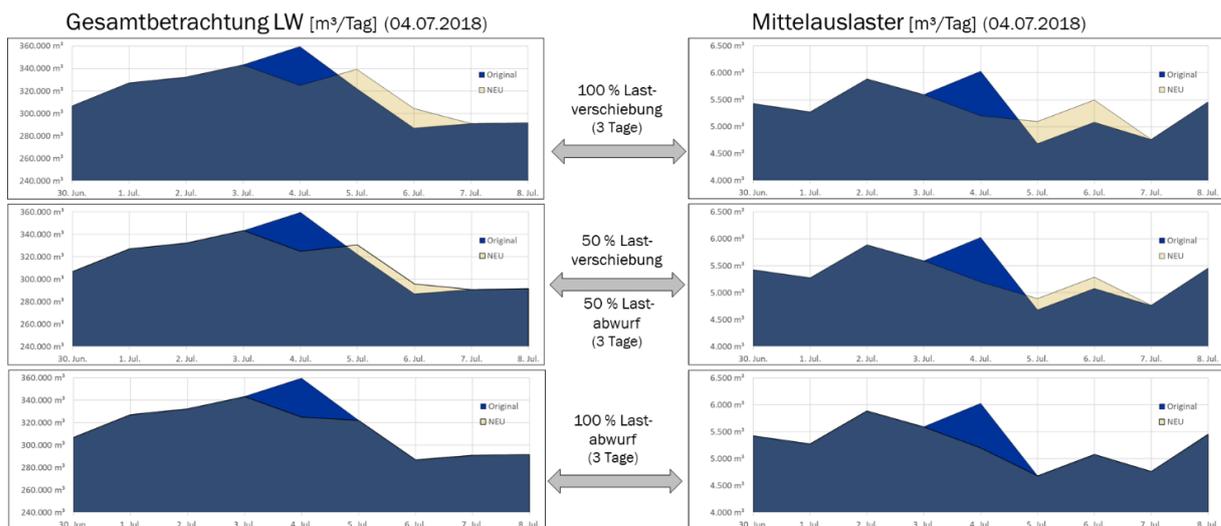
Der nachfolgend dargestellte Nutzen eines Wasserversorgers setzt sich aus den Einsparpotenzialen aus Betriebskosten, Erweiterungsinvestitionen und Ersatzinvestitionen sowie den qualitativen Nutzenaspekten zusammen.

**Tabelle 13.12: Zusammenfassung der möglichen Einsparpotenziale (Nutzen)**

Nutzen	Beschreibung
Betriebskosten	Stromkosten bei Förderpumpen im Wasserwerk (Beispiel A)
	Stromkosten bei Druckerhöhungsanlagen (Beispiel B)
	Stromkosten bei Netznutzungsentgelten (Beispiel C)
	Stromkosten durch geringere Druckverluste
	Stromkosten bei dynamischen Strompreisen
	Verzögerung von Instandhaltungsmaßnahmen durch reduzierte Betriebsstunden
Erweiterungsinvestitionen	Neubauten/ Erweiterungen von Kapazitäten durch steigende Spitzenabgaben (z. B. Neubau von Reinwasserbehälter als zusätzlichen Speicher)
Ersatzinvestitionen	Bei Kapazitätserweiterungen erhöhen sich zukünftige Ersatzinvestitionen nach Ablauf der Nutzungsdauer (z. B. drei anstatt zwei Pumpen ersetzen)
	Sollten Spitzenlasten Abnutzungseffekte oder sogar Beschädigungen auslösen, erhöhen diese die Ersatzinvestitionen (z. B. Leitungsrohrbrüche – Korrelationen festgestellt)
	Kleinere Anlagendimensionierungen und damit geringere Ersatzinvestitionen (z. B. kleinere Förderpumpen)
	Einsparungen durch Wegfall bestimmter Anlagenkomponenten (z.B. Pumpen einer Druckerhöhungsanlage)
Qualitativer Nutzen	Potenzielle Einsparung des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes durch verringerten Strombedarf
	Entlastung des Stromverteilnetzes durch verringerte Stromlastspitzen

Verweis aus 8.2.5: Durchführung einer Modellfindung (Bild 13.25)

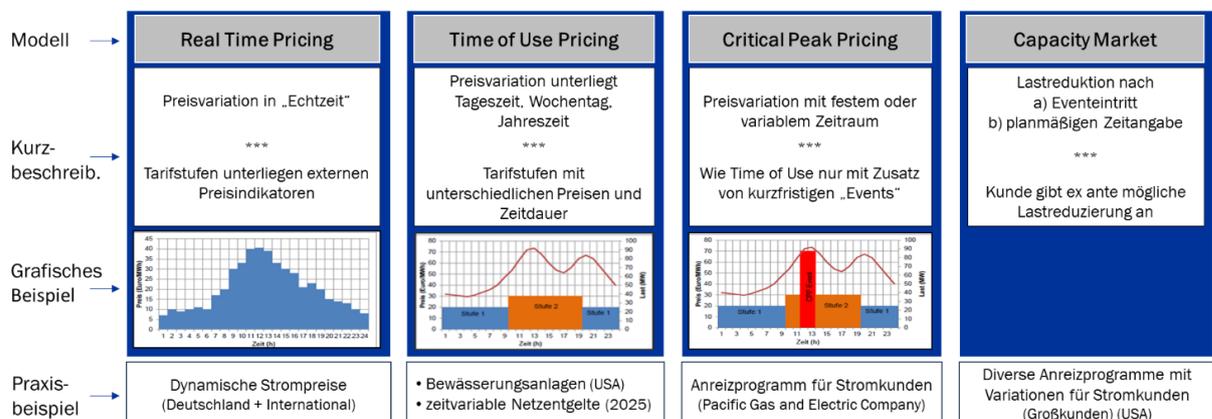
Nach einer Reduzierung der Nachfrage gibt es drei Möglichkeiten für Kunden: Die Nachfrage kann zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt werden (Lastverschiebung), die Last wird nicht nachgeholt (Lastabwurf) oder ein Teil der Last wird jeweils verschoben und abgeworfen (im Beispiel 50% | 50%). In der Abbildung sind die 3 Varianten aus Sicht des Versorgers (links) und eines Beispielkunden (rechts) anhand eines Beispieltages dargestellt.



**Bild 13.25: Möglichkeiten der Lastverschiebung und des Lastabwurfs (Bsp. LW)**

Verweis aus:8.2.5: Durchführung einer Modellfindung (Bild 13.26)

Als eine dynamische Preismodellkomponente kann sowohl ein preisbasiertes (Real Time Pricing, Time of Use Pricing, Critical Peak Pricing) als auch ein anreizbasiertes (Capacity Market) Modell in Frage kommen. Hier wird eine Auswahl von vielzähligen Varianten dargestellt, die jeweils mit Stärken und Schwächen einhergehen. Bei der Auswahl kommt es auf die Ziele, die infrastrukturellen Rahmenbedingungen und der Kundenstruktur an.



**Bild 13.26: Preis- und anreizbasierte Modelle (Bsp. HWW, LW)**

## 13.6 Vorsorgekonzepte - Risikoanalyse

### 13.6.1 1. Schritt: Beschreibung der Wasserversorgung

Im ersten Schritt der Risikoanalyse sollte die aktuelle Versorgungssituation beschrieben werden, um die Zusammenarbeit zwischen Wasserversorgungsunternehmen (WVU) und Behörden zu verbessern. WVU können den Behörden die lokalen Wasserversorgungsstrukturen und Besonderheiten erläutern. Bereits vorhandene oder neu erhobene Daten ermöglichen erste Abschätzungen zur Vulnerabilität (BBK, 2016; 2019). Ein einfaches Beispiel zur Beschreibung der Wasserversorgungsstruktur folgt.

#### Beispiel

- Das Versorgungsgebiet befindet sich im Muster-Bundesland und erstreckt sich auf einer Fläche von etwa 1000 km<sup>2</sup>.
- Es umfasst insgesamt 100 Gemeinden und Stadtteile mit rund 200.000 Einwohner\*innen und 70.000 Hausanschlüssen.
- Pro Jahr werden rund 15 Mio. m<sup>3</sup> Wasser aus 30 Brunnen und 5 Quelfassungen gewonnen und über ein 2500 km langes Leitungsnetz verteilt.
- Das geförderte Grund- oder Uferfiltratwasser wird in drei Wasserwerken aufbereitet und kann in 100 Hochbehältern zwischengespeichert werden.
- Der Rhein stellt eine potenzielle Überschwemmungsgefahr dar. Die Trinkwassergewinnung liegt im Oberrheintiefland mit sandigen und kiesigen Terrassen, die gute Wasserspeicher sind.
- Die mittlere Lufttemperatur betrug 2016-2020 etwa 10,5 °C, und die jährlichen Niederschlagsmengen lagen bei 400-600 mm.
- Aufgrund hoher Verdunstung und Bodenverhältnisse ist die Grundwasserneubildung gering (50-75 mm).
- Der Klimawandel verschlechtert die Wasserbilanz durch höhere Temperaturen, längere Trockenphasen und Extremwetterereignisse, was die Grundwasserstände und die Kontaminationsgefahr des Rohwassers erhöht.

### 13.6.2 2. Schritt: Durchführung einer Gefahrenanalyse

Das Ziel der Gefahrenanalyse ist es, mögliche Gefahren für die Trinkwasserversorgung zu identifizieren und auf ihre Relevanz zu überprüfen. Gängige Gefahren, die bisher in Vorsorgekonzepten berücksichtigt wurden, wie beispielsweise Stromausfälle, Cyberangriffe oder Hochwassersituationen, dauern meist nur wenige Tage bis Wochen und beeinträchtigen das Wasserdargebot nicht nachhaltig. Dagegen können hydrologische Extremereignisse wie Trockenperioden und Dürreereignisse mehrere Monate bis Jahre andauern und das Wasserdargebot irreversibel beeinträchtigen. Aufgrund der zunehmenden Häufigkeit und Intensität solcher Ereignisse gewinnt die Betrachtung solcher Ereignisse zunehmend an Bedeutung und sollten in Vorsorgekonzepten mitbetrachtet werden.

Auf der Grundlage der Gefahrenanalyse werden Vorschläge für Szenarien in der Vulnerabilitätsanalyse erarbeitet. Für hydrologische Gefahren sollte auf öffentlich zugängliche Datenbestände zurückgegriffen werden. Zusätzlich sollten auch Informationen durch Vertreter\*innen der Gefahrenabwehr, der Umwelt- und Gesundheitsämter eingeholt werden. Für das weitere Vorgehen in der Risikoanalyse ist es wichtig, die Gefahren zu priorisieren. So kann in dem Arbeitskreis festgelegt werden, welche Gefahren bevorzugt in die Szenariengestaltung und somit in die weitere Risikoanalyse einfließen (vgl. BBK, 2016; 2019).

<b>Hochwasser Kategorien (gängige Einteilung)</b>	
Hochwasser	HQ $\geq$ 100
	HQ $\geq$ 50
	HQ $\geq$ 20
	HQ $\geq$ 10
<b>Dürretypen nach Mishra &amp; Singh (2010)</b>	
Dürre / Niedrigwasser	Meteorologisch Ausbleiben von Niederschlägen über einen Raum für eine bestimmte Zeit
	Hydrologisch Zeitraum mit unzureichender Verfügbarkeit von Oberflächenwasser für einen spezifischen Zweck (gemessen am Abfluss)
	Grundwasser: Rückgang der Grundwasserstände, -neubildung, -abflüsse im Zeitraum von Monaten oder Jahren
	Landwirtschaftlich Rückgang der Bodenfeuchtigkeit und daraus resultierende Ernteausfälle ohne Bezug zu Oberflächengewässern in einem Zeitraum
	Sozioökonomisch Zeitraum, in dem die Nachfrage nach Wasser droht, das Angebot zu übersteigen

### 13.6.3 3. Schritt: Identifikation relevanter Szenarien

Basierend auf der Gefahrenanalyse sind Szenarien zu entwickeln, die als Grundlage für die Vulnerabilitätsanalyse dienen. Diese Szenarien sollten detaillierte Angaben zu Beginn, Dauer, räumlicher Ausdehnung und Intensität des Ereignisses enthalten. Dazu können wissenschaftliche und statistische Erkenntnisse sowie Expert\*inneneinschätzungen einbezogen werden. Kaskadeneffekte, wie der Einfluss eines Hochwassers auf die Stromversorgung, sollten in den Szenarien berücksichtigt werden. Die Kombination mehrerer unabhängiger Gefahren in einem Szenario sollte vermieden werden, um komplexe und schwer nachvollziehbare Szenarien zu verhindern. Das Szenario muss klar und wenig interpretierbar sein, um eine vergleichbare Vulnerabilitätsanalyse zu gewährleisten. Die Auswahl und Gestaltung eines Szenarios sind zu dokumentieren (vgl. BBK, 2016; 2019).

## Beispiel Szenario Dürre / Niedrigwasser

<b>Parameter</b>	<b>Leitfragen &amp; Beispiel</b>								
<b>Gefahr</b>	<p><i>Welches Ereignis wird betrachtet?</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dürre / Niedrigwasser</li> </ul>								
<b>Schadensort</b>	<p><i>Wo tritt das Ereignis ein?</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausgeprägtes Niederschlagsdefizit im Rheingebiet</li> </ul>								
<b>Räumliche Ausdehnung</b>	<p><i>Welches Gebiet ist durch das Ereignis betroffen?</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Im Jahresverlauf am gesamten Rhein markantes Niedrigwasser</li> </ul>								
<b>Intensität</b>	<p><i>Wie stark ist das Ereignis?</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rheinpegel historisch niedrig</li> <li>• Kennwerte und statistische Einordnung des Niedrigwasserereignis 2018 nach IKS Monitoring (Abflüsse und Dauer) in Worms:</li> </ul> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">Niedrigwasser-Abfluss [m<sup>3</sup>/s]</td> <td style="width: 50%;">Niedrigwasser-Dauer [Tage]</td> </tr> <tr> <td>MNM7Q 1961-2010: 720</td> <td>Max D &lt; NM7Q2 1961-2010: 5</td> </tr> <tr> <td>NM7Q Jul/Nov 2018: 443,6</td> <td>max D &lt; MNM7Q Jul/Nov 2018: 84</td> </tr> <tr> <td>Jährlichkeit Jul/Nov: 40</td> <td>Jährlichkeit Jul/Nov 2018: &gt;50</td> </tr> </table> <p>maxD = maximale Andauer von zusammenhängenden Tagen        &lt; MNM7Q NM7Q = kleinster Abflussmittelwert von 7 aufeinanderfolgenden Tagen in einem Jahr        NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q        NM7Q2 = 2-jährlicher Niedrigwasserabfluss NM7Q        Jahresangaben beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1961 – 2010        MNM7Q = langjähriges Mittel der NM7Q</p>	Niedrigwasser-Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	Niedrigwasser-Dauer [Tage]	MNM7Q 1961-2010: 720	Max D < NM7Q2 1961-2010: 5	NM7Q Jul/Nov 2018: 443,6	max D < MNM7Q Jul/Nov 2018: 84	Jährlichkeit Jul/Nov: 40	Jährlichkeit Jul/Nov 2018: >50
Niedrigwasser-Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	Niedrigwasser-Dauer [Tage]								
MNM7Q 1961-2010: 720	Max D < NM7Q2 1961-2010: 5								
NM7Q Jul/Nov 2018: 443,6	max D < MNM7Q Jul/Nov 2018: 84								
Jährlichkeit Jul/Nov: 40	Jährlichkeit Jul/Nov 2018: >50								
<b>Zeitpunkt</b>	<p><i>Wann passiert das Ereignis? (Jahreszeit)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhepunkt Sommer 2018</li> </ul>								
<b>Dauer</b>	<p><i>Wie lange dauert das Ereignis und/oder seine direkten Auswirkungen an?</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Februar bis November 2018</li> </ul>								
<b>Verlauf</b>	<p><i>Welche Geschehnisse führen zu dem Ereignis? Wie verläuft das Ereignis?</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Extremes Niedrigwasserereignis, gekennzeichnet durch anhaltende Trockenheit und niedrige Niederschläge und weitreichende Auswirkungen:</li> <li>- Anfang 2018: Niedrige Niederschläge führten zu einem langsamen Rückgang der Wasserstände</li> <li>- Sommer 2018: Erreichen des Tiefpunkts der Wasserstände, besonders im Juli und August.</li> <li>- Herbst 2018: Leichter Anstieg der Wasserstände, aber die Werte blieben unter dem Durchschnitt.</li> <li>- Winter 2018/19: Langsame Erholung durch zusätzliche Niederschläge und Schneeschmelze.</li> </ul>								
<b>Vorwarnzeit</b>	<p><i>Kann sich die Bevölkerung auf das Ereignis einstellen? Können sich die Behörden und Unternehmen auf das Ereignis einstellen?</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dürren bzw. Niedrigwasser sind langsam einsetzende Ereignisse, die sich ankündigen lassen, wenn es über einen längeren Zeitraum nicht regnet und der Pegel abfällt</li> <li>- Im Vergleich zu Hochwasser längere Vorwarnzeit gegeben, in der sich Behörden, Unternehmen und die Bevölkerung auf das Ereignis einstellen können</li> </ul>								
<b>Betroffenheit</b>	<p><i>Wie ist die Trinkwasserversorgung von dem Ereignis betroffen?</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierte nutzbare Wasserressourcen, reduzierte mögliche Wassernahmemengen</li> <li>• Qualitätsprobleme durch erhöhte Schadstoffkonzentration, höhere Kosten für Wasseraufbereitung</li> <li>• Zusätzliche Versorgungsbelastung durch erhöhte Nachfrage</li> </ul>								
<b>Referenzereignisse</b>	<p><i>Gab es bereits vergleichbare Ereignisse?</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sommer 2018: Rheinpegel historisch niedrig</li> <li>• Sommer 2022: knapp oberhalb des Niveaus von 2018</li> </ul>								
<b>Weitere Informationen</b>	<p><i>Was ist wichtig für das Szenario, aber bisher nicht erfasst?</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Z.B. Ermittlung, ab welchem Rheinpegel die Entnahmekapazität eingeschränkt wird</li> </ul>								

### Beispiel Szenario Hochwasser

<b>Parameter</b>	<b>Leitfragen &amp; Beispiel</b>
<b>Gefahr</b>	<i>Welches Ereignis wird betrachtet?</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochwasser</li> </ul>
<b>Schadensort</b>	<i>Wo tritt das Ereignis ein?</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rheingebiet</li> </ul>
<b>Räumliche Ausdehnung</b>	<i>Welches Gebiet ist durch das Ereignis betroffen?</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahlreiche Regionen entlang des Rheins in Deutschland und den angrenzenden Gebieten</li> </ul>
<b>Intensität</b>	<i>Wie stark ist das Ereignis?</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• HQ 100</li> </ul>
<b>Zeitpunkt</b>	<i>Wann passiert das Ereignis? (Jahreszeit)</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sommer (Mai-Juni)</li> </ul>
<b>Dauer</b>	<i>Wie lange dauert das Ereignis und/oder seine direkten Auswirkungen an?</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ca. zwei Wochen</li> </ul>
<b>Verlauf</b>	<i>Welche Geschehnisse führen zu dem Ereignis?</i> <i>Wie verläuft das Ereignis?</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auslöser: sommerliches Starkregenereignis</li> <li>• Anstieg der Wasserstände Beginn Ende Mai 2013; Ursache intensive und anhaltende Regenfälle in den Einzugsgebieten des Rheins</li> <li>• Höhepunkt des Hochwassers Anfang Juni</li> <li>• Rückgang der Wasserstände, Beginn nach Erreichen des Höchststands, langsame Senkung der Wasserstände, Normalisierung der Pegelstände dauerte einige Tage</li> </ul>
<b>Vorwarnzeit</b>	<i>Kann sich die Bevölkerung auf das Ereignis einstellen? Können sich die Behörden und Unternehmen auf das Ereignis einstellen?</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Im Vergleich zum Niedrigwasser haben Hochwasser eine kurze Vorwarnzeit, durch Schneeschmelze, lang anhaltende sowie starke Regenereignisse kann der Pegel schnell und stark ansteigen</li> <li>• Faktoren, die Schneeschmelze begünstigen sowie Niederschläge beobachtet werden, damit sich Behörden, Unternehmen und die Bevölkerung auf ein Ereignis einstellen können</li> </ul>
<b>Betroffenheit</b>	<i>Wie ist die Trinkwasserversorgung von dem Ereignis betroffen?</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte Schäden an der Infrastruktur</li> <li>• Akute Kontamination des Rohwassers</li> <li>• Höhere Kosten für Wasseraufbereitung bei Kontamination, Reparaturen und Notfallmaßnahmen</li> </ul>
<b>Referenzereignisse</b>	<i>Gab es bereits vergleichbare Ereignisse?</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochwasserereignis Sommer 2013 (QH 10 – 15)</li> <li>• Hochwasserereignis Dezember 1993 (HQ100)</li> </ul>
<b>Weitere Informationen</b>	<i>Was ist wichtig für das Szenario, aber bisher nicht erfasst?</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Z.B. Ermittlung, aber welchem HQ Anlagen der Trinkwasserversorgung betroffen sind</li> </ul>

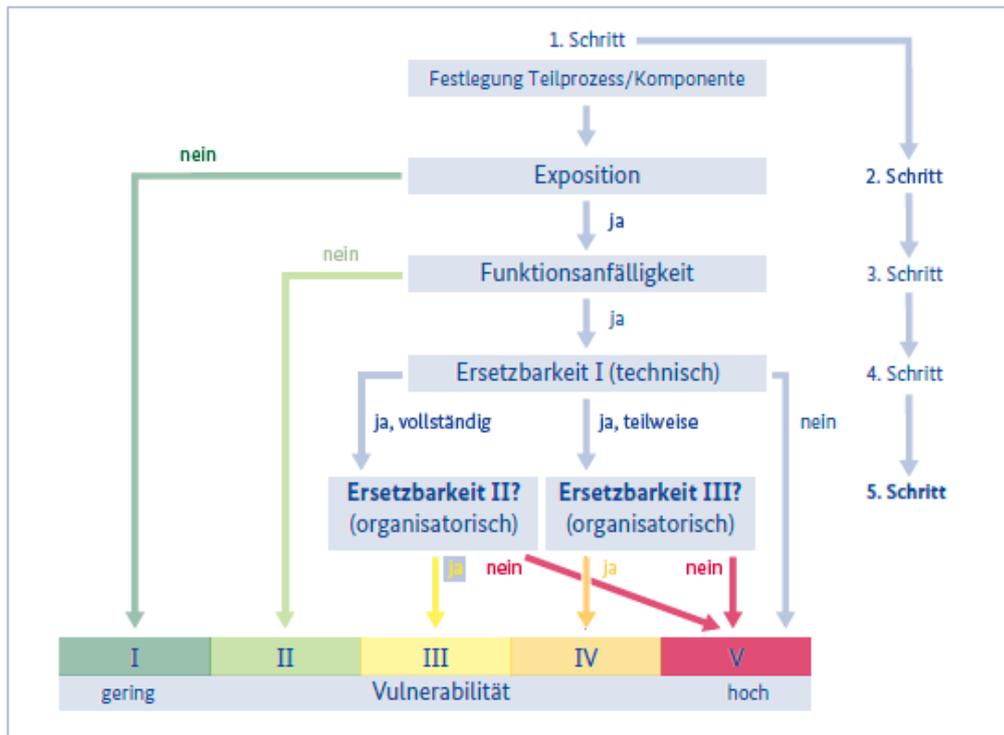
#### 13.6.4 4. Schritt: Durchführung einer Vulnerabilitätsanalyse

Die Vulnerabilitätsanalyse ist ein wesentlicher Bestandteil der Risikoanalyse, um die Verwundbarkeit von Anlagen und Prozessen in der Wasserversorgung zu ermitteln. Sie besteht aus fünf Schritten:

- Festlegung der zu analysierenden Komponenten
- Überprüfung der Exposition
- Überprüfung der Funktionsanfälligkeit
- Überprüfung der technischen Ersetzbarkeit und Schritt
- Überprüfung der organisatorischen Ersetzbarkeit.

Jede Komponente erhält eine Vulnerabilitätsklasse von I (gering) bis V (hoch), um ihre Exposition, Funktionsanfälligkeit und Ersetzbarkeit zu bewerten. Die Analyse konzentriert sich auf die Fähigkeiten und Kapazitäten des WVU. Bei dem Verfahren sollen die Fähigkeiten und Kapazitäten des WVU betrachtet werden. Um die eigene Einschätzung der WVU im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse zu erleichtern, können Checklisten aus den Leitfäden des BBK verwendet werden (vgl. siehe BBK, 2016; 2019). Eine mögliche Unterstützung durch Feuerwehr, Katastrophenschutz, Technisches Hilfswerk (THW) oder private Dienstleister wird in der Vulnerabilitätsanalyse nicht berücksichtigt. Auch wird hier nur die kurzfristige Ersetzbarkeit überprüft. Langfristige Maßnahmen, wie z. B. Baumaßnahmen, sollen nicht in die Vulnerabilitätsanalyse miteinbezogen werden. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Vulnerabilitätsanalyse näher erläutert (vgl. BBK, 2016; 2019). Im Gegensatz zu bisherigen Leitfäden sollen nicht nur die Komponenten der Versorgungsinfrastruktur, sondern auch die Komponenten Ökosysteme, Wasserressourcen und organisationale Strukturen betrachtet werden, da diese ebenso kritisch für die öffentliche Trinkwasserversorgung sind.

## Übersicht der Schritte einer Vulnerabilitätsanalyse



In Schritt 1) werden die wichtigsten Komponenten des Wasserversorgungssystems zur Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser festgelegt.

### Komponente Versorgungsinfrastruktur

Teilprozesse der Wasserversorgung	Komponente
Gewinnung von Rohwasser	Brunnen/Gewinnungsanlagen
Aufbereitung von Trinkwasser	Wasserwerk
Einspeisung von Trinkwasser	Pumpwerk
Anpassung des Netzdrucks	Druckerhöhungsanlage
Zwischenspeicherung	Speicher/Hochbehälter
Verteilung des Wassers	Rohrnetz
Überwachung und/oder Steuerung des Netzes	Netzleitstelle

### Komponente Ökosystem & Wasserressourcen

Teilprozesse der Wasserversorgung	Wasserquelle	Komponente
Gewinnung von Rohwasser	Grundwasser	Aquifere
	Oberflächenwasser	Flüsse, Seen und Talsperren
	Quellwasser	Natürliche Quellen
	Uferfiltrat	Flussufer

**Komponente Organisationale Strukturen**

<b>Teilprozesse der Wasserversorgung</b>	<b>Komponente</b>
Betrieb der Anlagen im Normal- und Spitzenlastmanagement	Personelle Ressourcen (Qualifikation und Verfügbarkeit von Fachpersonal) Materialressourcen (bspw. Ersatzbevorratung)
Betrieb der Anlagen im Krisenmanagement	Dienstleister, Zulieferer, Abnehmer Personelle Organisationseinheit in Not- und Krisenlagen (bspw. Krisenstab) Notfallpläne und -konzepte vorhanden und dem Personal verfügbar und bekannt

In Schritt 2) wird geprüft, ob die betrachtete Komponente in einem Bereich liegt, in dem die zuvor identifizierten Gefahren auftreten können.

**Beispiel Schritt 2) Exposition**

Nr.	<b>Komponente</b>	<b>Exposition</b>	<b>Antwort (ja)</b>	<b>Antwort (nein)</b>
1	Brunnen	<i>Liegt der betrachtete Brunnen in einem Bereich, das von Niedrigwasser/Hochwasser betroffen sein kann?</i>	<i>Der Brunnen liegt in einem Gebiet, das vom Niedrigwasser/Hochwasser betroffen ist. Weiter mit 3. Schritt.</i>	<i>Der Brunnen liegt nicht in einem Gebiet, das von Niedrigwasser/Hochwasser betroffen ist. Ihm wird die Vulnerabilitätsklasse I zugewiesen. Die Vulnerabilitätsanalyse ist damit für den Brunnen beendet.</i>

In Schritt 3) wird geprüft, ob es durch den Eintritt der Gefahr zu einem Ausfall der Komponente kommen kann.

**Beispiel Schritt 3) Funktionsanfälligkeit**

Nr.	<b>Komponente</b>	<b>Funktionsanfälligkeit</b>	<b>Antwort (ja)</b>	<b>Antwort (nein)</b>
1	Brunnen	<i>Kommt es durch ein Niedrigwasser/Hochwasser zu einer Beeinträchtigung des Brunnens?</i>	<i>Aufgrund von Niedrigwasser/Hochwasser, muss die Förderung aus diesem Brunnen reduziert oder eingestellt werden. Weiter mit dem 4. Schritt.</i>	<i>Der Brunnen kann regulär genutzt werden. Ihm wird die Vulnerabilitätsklasse II zugewiesen. Die Vulnerabilitätsanalyse ist damit für den Brunnen beendet.</i>

In Schritt 4) wird geprüft, ob die funktionsanfällige Komponente teilweise oder sogar vollständig durch andere technische Komponenten ersetzt werden kann.

<b>Beispiel Schritt 4) Ersetzbarkeit I</b>			
<b>Nr.</b>	<b>Komponente</b>	<b>Ersetzbarkeit I</b>	<b>Antwort (ja, vollständig)    Antwort (nein)</b>
1	Brunnen	<p>Das WVU verfügt über weitere Brunnen, die nicht vom Niedrigwasser/Hochwasser betroffen sind.</p> <p>Oder</p> <p>Gibt es technische Maßnahmen, mit denen der Brunnen trotz des Ereignisses weiterbetrieben werden kann?</p>	<p>Weitere Brunnen im Versorgungsgebiet liefern auch im Niedrigwasser/Hochwasserfall genügend Trinkwasser, um die Bevölkerung wie gewohnt zu versorgen.</p> <p>Oder</p> <p>Werden technische Maßnahmen umgesetzt, kann der Brunnen weiter betrieben werden. Weiter mit 5. Schritt.</p> <p><b>Antwort ja, (teilweise)</b></p> <p>Aufgrund der Struktur des Netzes können nur einige Ortsteile, die bisher durch den ausgefallenen Brunnen versorgt wurden, mit Wasser aus anderen Brunnen versorgt werden. Oder die verbliebenen Brunnen liefern nicht genügend Wasser für die Deckung des regulären Tagesbedarfs. Oder eingeschränkte Versorgung ist unter Verwendung von „fliegenden Leitungen“ des WVU möglich. Weiter mit 5. Schritt.</p>

In Schritt 5) wird geprüft, ob eine Ersetzbarkeit der funktionsanfälligen Komponente nicht nur technisch, sondern auch organisatorisch möglich ist.

<b>Beispiel Schritt 4) Ersetzbarkeit I</b>				
<b>Nr.</b>	<b>Komponente</b>	<b>Ersetzbarkeit I</b>	<b>Antwort (ja)</b>	<b>Antwort (ja)</b>
1	Brunnen	<i>Ist genügend eingewiesenes Personal vorhanden, um die Umschaltungen des Netzes vorzunehmen oder wohnt das Personal selbst in vom Ereignis betroffenen Gebieten und steht Ihnen als Arbeitgeber nur eingeschränkt zur Verfügung?</i>	<p><i>Es steht ausreichend qualifiziertes Personal zur Verfügung. Dem Brunnen wird die Vulnerabilitätsklasse III zugewiesen, die Vulnerabilitätsanalyse ist damit für den Brunnen beendet.</i></p> <p><b>Antwort (nein)</b>  <i>Das Personal hat aufgrund des Hochwassers nicht die Möglichkeit, den erforderlichen Umschaltpunkt zu erreichen, um die Versorgung aus anderen Brunnen herzustellen. Dem Brunnen wird die Vulnerabilitätsklasse V zugewiesen. Die Vulnerabilitätsanalyse ist damit für den Brunnen beendet.</i></p>	<p><i>Es steht ausreichend qualifiziertes Personal zur Verfügung. Dem Brunnen wird die Vulnerabilitätsklasse IV zugewiesen, die Vulnerabilitätsanalyse ist damit für den Brunnen beendet.</i></p> <p><b>Antwort (nein)</b>  <i>Es steht nicht genügend Personal zur Verfügung. Dem Brunnen wird die Vulnerabilitätsklasse V zugewiesen.</i></p>

Tabelle 12: Beispiel Ersetzbarkeit II (Darstellung nach BBK, 2016).

### 13.6.5 5. Schritt: Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß

Erst die Klassifizierung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß ermöglichen eine Bewertung und einen Vergleich zwischen verschiedenen Gefahren. Dazu wird sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit, als auch das Schadensausmaß in jeweils fünf Klassen unterteilt (vgl. BBK, 2016; 2019).

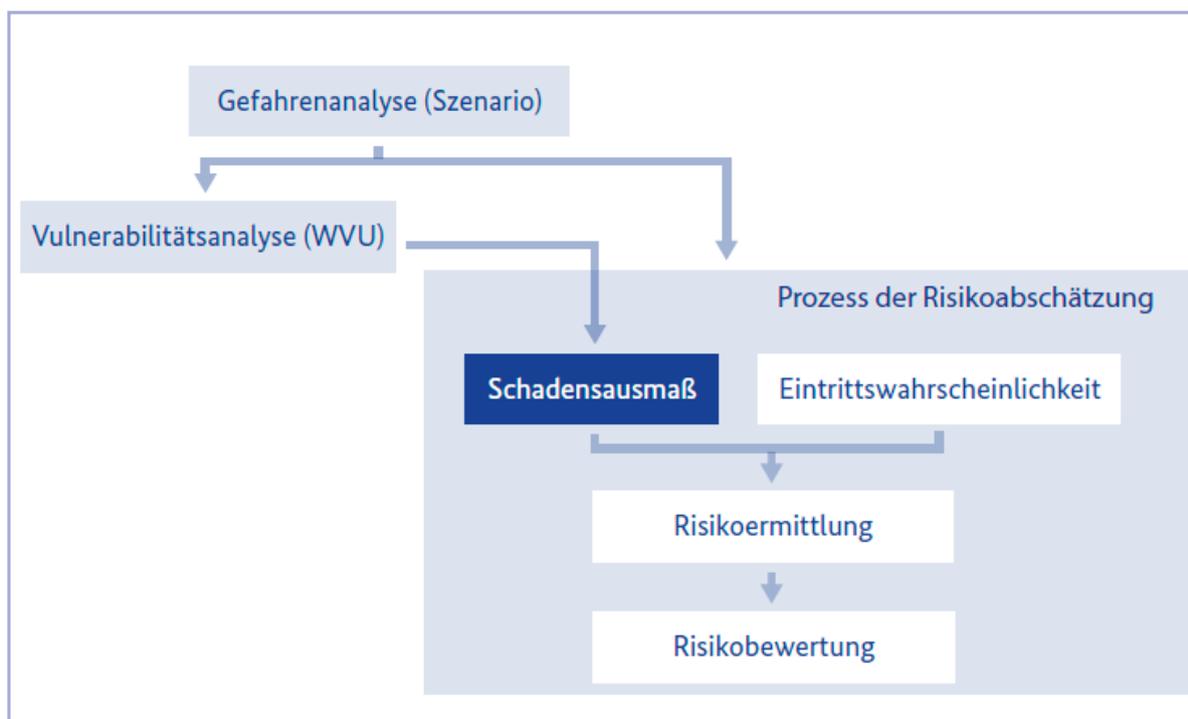
Wert	Klassifizierung	... mal im Jahr	1x in ... Jahren
5	sehr wahrscheinlich	≤ 0,1	10
4	wahrscheinlich	≤ 0,01	100
3	bedingt wahrscheinlich	≤ 0,001	1.000
2	unwahrscheinlich	≤ 0,0001	10.000
1	sehr unwahrscheinlich	≤ 0,00001	100.000

Auf Grundlage der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse zu jeder Komponente kann das Schadensausmaß in den betrachteten Szenarien ermittelt werden. Das Schadensausmaß ist stets von der Anzahl der betroffenen Bevölkerung (samt Sondereinrichtungen) und der Dauer des Ereignisses abhängig. Die Dauer ist in der Regel durch das gewählte Szenario festgelegt. Eine große Anzahl Betroffener über eine längere Zeitspanne bedeutet in der Regel ein großes Schadensausmaß. Da auch eine geringe Anzahl Betroffener über einen langen Zeitraum oder eine große Anzahl über einen relativ kurzen Zeitraum ein großes Schadensausmaß bedeuten können, müssen auch diese Varianten berücksichtigt werden (vgl. BBK, 2016; 2019).

Dauer des Ereignisses Anzahl Betroffene	Dauer des Ereignisses				
	< 8 Std.	8-24 Std.	1-3 Tage	4-7 Tage	> 7 Tage
< 500	1	1	2	2	3
500- < 7.500	1	2	3	3	3
7.500- < 20.000	2	3	3	4	4
20.000- < 50.000	2	3	4	4	5
50.000- ≥ 100.000	3	3	4	5	5

1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mäßig, 4 = groß, 5 = sehr groß

Um das Schadensausmaß je WVU abzuschätzen, ist es notwendig, auf Grundlage der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse die Anzahl der vom Ausfall der Wasserversorgung betroffenen Personen zu ermitteln. Die Eintrittswahrscheinlichkeit bezieht sich jeweils auf eine Gefahr mit einer bestimmten Intensität. Bei deren Bestimmung sollten möglichst vorhandene wissenschaftliche/statistische Erkenntnisse berücksichtigt werden. Hierbei wird die Einbindung von Fachbehörden und/oder Forschungseinrichtungen empfohlen (vgl. BBK, 2016; 2019).



Eintrittswahrscheinlichkeit			
Gefahr	Klassifizierung	1x in ... Jahren	Wert
Niedrigwasser	<b>sehr wahrscheinlich:</b> ein Ereignis, das in Deutschland durchschnittlich mehrere Male pro Menschenleben eintritt (Eintritt in den nächsten 5-10 Jahren sehr plausibel)	10	5 = sehr wahrscheinlich
Hochwasser	<b>Wahrscheinlich:</b> ein Ereignis, das in Deutschland durchschnittlich nur einmal/wenige Male pro Menschenleben eintritt (Eintritt in den nächsten 5-10 Jahren plausibel)	100	4 = wahrscheinlich

Um später das Schadensausmaß je WVU abzuschätzen, ist es notwendig, auf Grundlage der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse die Anzahl der vom Ausfall der Wasserversorgung betroffenen Personen zu ermitteln (vgl. BBK, 2016; 2019).

Schadensausmaß			
Ereignis	Anzahl betroffene Einwohner	Dauer des Ereignisses	Wert
Niedrigwasser	200.000	> 14 Tage	5 = sehr groß
Hochwasser	200.000	< 7 Tage	5 = sehr groß

### 13.6.6 6. Schritt: Risikovergleich und Risikobewertung

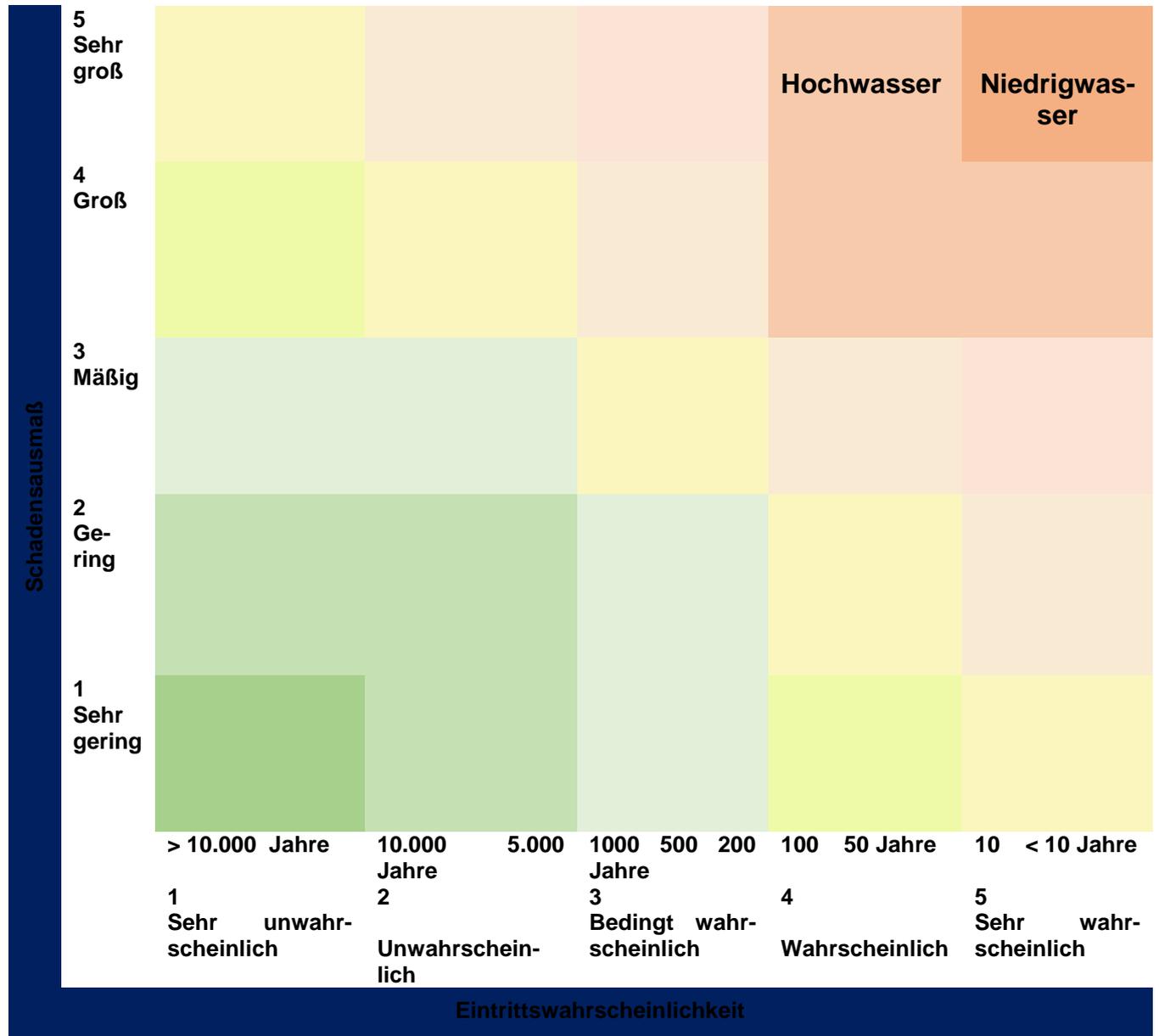
Auf Basis der vorab durchgeführten Risikoanalyse kann dem betrachteten Szenario ein Schadensausmaß zugeordnet werden. In Kombination mit der ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeit kann das Szenario in der Risikomatrix dargestellt werden. So ist ein einfacher Vergleich der nach und nach bearbeiteten Szenarien und deren Risiken möglich (vgl. BBK, 2016; 2019).

Das betrachtete Niedrigwasserereignis ist mit der Eintrittswahrscheinlichkeit 5 (sehr wahrscheinlich) klassifiziert worden, da es statistisch gesehen einmal in 10 Jahren vorkommen könnte. Das Schadensausmaß wurde als 5 (sehr groß) klassifiziert, da in diesem Szenario eine Anzahl von 200.000 Menschen von dem Ereignis betroffen sind über einen Zeitraum von <14 Tagen.

Das betrachtete Hochwasserereignis ist mit der Eintrittswahrscheinlichkeit 4 (wahrscheinlich) klassifiziert worden, da es statistisch gesehen einmal in 100 Jahren vorkommen könnte. Das Schadensausmaß wurde als 5 (sehr groß) klassifiziert, da in diesem Szenario eine Anzahl von 200.000 Menschen von dem Ereignis betroffen sind über einen Zeitraum von <7 Tagen.

Demnach hat das betrachtete Niedrigwasserereignis ein höheres Schadensausmaß als das betrachtete Hochwasserereignis. Beide sind Ereignisse sind in ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und Ihrem Schadensausmaß als Extremereignisse einzustufen, weshalb sie in dem roten Bereich liegen.

### Ergebnis der Risikoanalyse mit Szenarienvergleich - Risikomatrix



## 13.7 Risikomanagement im Einzugsgebiet

### 13.7.1 Klimasteckbrief Talsperre Klingenberg (Beispiel)

Einzugsgebiet / Zuflüsse	
Zufließende Gewässer	Wilde Weißeritz
Gestaute Gewässer	Wilde Weißeritz
Einzugsgebietsfläche	89,025 km <sup>2</sup>
Niederschlag – mittlere Jahressumme	818,6 mm (1961-2010)
Mittelwasserzufluss MQ	1,40 m <sup>3</sup> /s (1991-2017)
Mittlerer Jahreszufluss	45,7 Mio. m <sup>3</sup> /a
<b>HQ<sub>100</sub></b>	
	47 m <sup>3</sup> /s
<b>HQ<sub>1000</sub></b>	
	145 m <sup>3</sup> /s
<b>HQ<sub>10000</sub></b>	
	224 m <sup>3</sup> /s

#### Klimakennwerte für den Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge

Datenquelle:

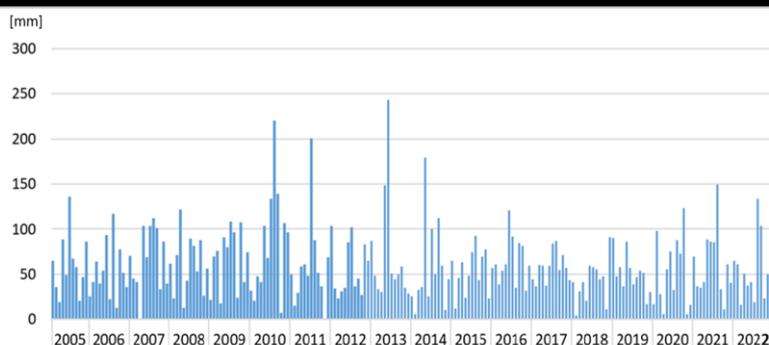
[https://www.gerics.de/products\\_and\\_publications/factsheets/landkreise/index.php.de](https://www.gerics.de/products_and_publications/factsheets/landkreise/index.php.de)

Temperatur	7,9 °C
Sommertage	28,8 Tage/Jahr
Heiße Tage	4,3 Tage/Jahr
Tropische Nächte	0,1 Tage/Jahr
Frosttage	103,1 Tage/Jahr
Spätfrosttage	8,6 Tage/Jahr
Eistage	29,7 Tage/Jahr
Maximale Dauer von Hitzeperioden	2,6 Tage
Tage > 5°C	224,9 Tage/Jahr
Niederschlag	772,4 mm/Jahr
Trockentage	235,3 Tage/Jahr
Niederschlag >= 20 mm/Tag	4,8 Tage/Jahr
95. Perzentil des Niederschlags	10,1 mm/Tag
99. Perzentil des Niederschlags	23,0 mm/Tag
Schwüle Tage	2,6 Tage/Jahr

#### Niederschlagsganglinie an der DWD-Station Dippoldiswald im EZG der Talsperre

Datenquelle:

[https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/hourly/precipitation/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/precipitation/)



### Klimaänderungen für das Ende des 21. Jahrhunderts

Datenquelle:

[https://www.gerics.de/products\\_and\\_publications/fact\\_sheets/landkreise/index.php.de](https://www.gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/landkreise/index.php.de)

Basierend auf den Ergebnissen von 85 regionalen Klimamodellsimulationen wurden von Climate Service Center Germany (GERICS) Kennwerte für Klimaänderungen abgeleitet. Die Trends der relevanten Parameter sind hier zusammengestellt.

	RCP 2.6*	RCP 2.6*	RCP 8.5*
Temperatur	Zunahme	Zunahme	Zunahme
Sommertage / Heiße Tage	Zunahme	Zunahme	Zunahme
Frost-/Eistage	Abnahme	Abnahme	Abnahme
Max. Dauer v. Hitzeperioden	Zunahme	Zunahme	Zunahme
Niederschlag	Tendenz zur Zunahme	Tendenz zur Zunahme	Zunahme
Niederschlag ≥ 20 mm/Tag	Tendenz zur Zunahme	Tendenz zur Zunahme	Zunahme
95. Perz. des Niederschlags	Tendenz zur Zunahme	Tendenz zur Zunahme	Zunahme
Klimatische Wasserbilanz	Keine Änderungen	Keine Änderungen	Tendenz zur Zunahme

### Prognostizierte Zuflüsse zur Talsperre Klingenberg

Datenquelle:

<https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/w202122-dargebotsanalyse-abschlussbericht.pdf>

Im Rahmen einer DVGW-Klimafolgen-Studie wurden 70 Klimasimulationen eingesetzt, die jeweils das Wasserhaushaltsmodell mHM antreiben. So wurden für die großen deutschen Talsperren Zuflüsse bis zum Ende des 21. Jahrhundert prognostiziert. Hier ist die aktuelle mittlere jährliche Zuflusssumme für die Talsperre Klingenberg sowie die prognostizierte Änderung dargestellt.

	RCP 2.6*			RCP 8.5*		
	min	med	max	min	med	max
1971-2000 [Mio. m <sup>3</sup> /a]	41,8	43,6	46,0	40,0	43,8	48,3
2021-2050 [%]	-15,5	7,5	15,3	-4,9	8,7	19,1
2036-2065 [%]	-17,5	5,8	17,0	-12,7	11,1	21,4
2069-2098 [%]	-19,1	8,3	17,5	-38,8	10,7	33,0

\* RCP 8.5: Szenario mit hohen Emissionen; RCP 4.5: Szenario mit mittleren Emissionen; RCP 2.6: Szenario mit niedrigen Emissionen

Datenquelle:  
Beobachtungen des Be-  
treibers

Zu den wichtigsten Trends der Wasserbeschaffenheit gehören folgende, möglicherweise teilweise klimatisch beeinflusste Änderungen:

- Deutlicher Rückgang der Nährstoffbelastung der Talsperre, insbesondere der Nitratkonzentration, in den letzten Jahren.
- Abnahme des Gesamtsalzgehalts (z.B. Gesamthärte, Leitfähigkeit).
- Aufwärtstrend der organischen Belastung, vorrangig durch Huminstoffe verursacht - bedingt auch durch die beiden Extremjahre.
- Veränderungen im Artenspektrum im Phytoplankton der Talsperre, welche aufgrund der möglichen negativen Auswirkungen auf die Wasseraufbereitung in den Vordergrund gerückt sind. An Bedeutung gewonnen haben die benthischen Algen, da sie mit der Abgabe von geruchs- und geschmacksbeeinträchtigenden Stoffen die Trinkwasseraufbereitung stark beeinflussen können.

## 13.7.2 Risikosteckbrief (Beispiel)

Risikomanagement nach DIN EN 15975 - 2

*Risikosteckbriefe für das Einzugsgebiet  
mit Bewertung für hydrologische Extremereignisse  
(Beispiel)*

**TZW**  
Technologiezentrum  
Wasser

Risikosteckbrief: Siedlung – Abwasser – Pumpwerk zur Ausleitung aus dem WSG	
RISK_ID	4410
Stand	23.06.2023
Gefährdungsanalyse	
Sektor / Klasse	Abwasser
Gefährdendes Ereignis / Auslöser	Freisetzung von ungereinigtem Abwasser
Gefährdungsart(en)	mikrobiologisch, chemisch
Datenquelle	Abwasserzweckverbände
Eintrags-Typ	punktuellem Eintrag bei Extremereignissen
Risikoabschätzung (Regelfall)	
Abschätzung des Ausgangsrisikos	Schadensausmaß: sehr hoch (25)
	Eintrittswahrscheinlichkeit: hoch (4)
	Ausgangsrisiko: sehr hoch (100)
	<u>Erläuterungen zur Abschätzung des Schadensausmaßes:</u> Im Regelfall werden keine Gefährdungen innerhalb des WSG frei, da das gereinigte Abwasser aus dem WSG ausgeleitet wird. Bei Überlastung oder Ausfall der Pumpen, kann Abwasser überlaufen und ungereinigt freigesetzt werden. Ungereinigtes Abwasser enthält (möglicherweise pathogene) Fäkalkeime, hohe Konzentrationen an Nährstoffen und verschiedene Spurenstoffe. <u>Erläuterungen zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit:</u> In der Vergangenheit sind solche Fälle bereits mehrmals aufgetreten. Auch ein Ausfall der öffentlichen Stromversorgung führt zum Ausfall der Anlagen, da keine Netzersatzanlage vorhanden ist.
Risikoabschätzung Extremereignis Starkniederschlag	
Abschätzung des Ausgangsrisikos	Schadensausmaß: sehr hoch (25)
	Eintrittswahrscheinlichkeit: (nicht bewertet)
	Ausgangsrisiko: sehr hoch (125)
	<u>Erläuterungen zur Abschätzung des Schadensausmaßes:</u> Starkniederschlagsereignissen können zur Überlastung der Abwasserpumpen führen, so dass Abwasser überläuft und ungereinigt freigesetzt wird. Ungereinigtes Abwasser enthält (möglicherweise pathogene) Fäkalkeime, hohe Konzentrationen an Nährstoffen und verschiedene Spurenstoffe. <u>Weitere Erläuterungen:</u> Beim Starkniederschlagsereignis 2014 ist dieser Fall bereits eingetreten. Es kam zu einer bedeutenden Beeinträchtigung der Wasserqualität in den Oberflächengewässern.
Risikoabschätzung Extremereignis Trockenperiode	
	Für diesen Gefährdungsträger nicht relevant.

## Projektpartner



Universität Stuttgart



Fraunhofer  
IIS



TU Clausthal



## Assoziierte Partner

- Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH
- Fernwasserversorgung Elbaue-Ostharz GmbH
- Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Verbundprojekt TrinkXtrem unter den Förderkennzeichen 02WEE1625A-J in der Fördermaßnahme Wasser-Extremereignisse (WaX) des Bundesprogramms Wasser:N. Wasser:N ist Teil der BMBF-Strategie Forschung für Nachhaltigkeit (FONA). Zusätzlich steuerten die beteiligten Unternehmen aus Wasserversorgung und Mittelstand rund 20 % der Gesamtkosten an Eigenleistung bei.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



## Herausgeber:

Projektkoordination TrinkXtrem – TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser  
Karlsruher Str. 84 | 76139 Karlsruhe  
T: +49 721 9678-0 | E: kontakt@trinkxtrem.de

[www.trinkxtrem.de](http://www.trinkxtrem.de)

