der Bundeswehr Universität München

Institut für Wasserwesen

MITTEILUNGEN

133/2020

Lisa Broß

Wasserversorgung in Notsituationen

Verfahren zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung

Mitteilungen / Institut für Wasserwesen – Nr. 133

Universität der Bundeswehr München
Institut für Wasserwesen
Werner-Heisenberg-Weg 39
D-85577 Neubiberg
www.unibw.de/wasserwesen

Wasserversorgung in Notsituationen

Verfahren zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung

Lisa Broß

Referent
Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Krause
Korreferent
Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Fekete
Prof. Dr.-Ing. André Lerch

Tag der Einreichung der Dissertation
17.06.2020
Tag der mündlichen Prüfung
23.11.2020

Copyright 2020

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen 4.0 International zugänglich.
Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/.

ISSN 2700-7332

ISBN 978-3-943297-51-4

Wasserversorgung in Notsituationen

Verfahren zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung

Lisa Broß

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
– Dr.-Ing. –

genehmigten Dissertation.

Gutachter:
1. Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Krause
2. Prof. Dr.-Ing. André Lerch
3. Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Fekete

Die Dissertation wurde am 17. Juni 2020 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften am 02. November 2020 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 23. November 2020 statt.

der Bundeswehr
Universität München

Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
Institut für Wasserwesen
Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik

Dissertation

Wasserversorgung in Notsituationen

Verfahren zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung

Lisa Broß

Neubiberg, den 17. Juni 2020

Kurzfassung

Die gestiegene Eintrittswahrscheinlichkeit verschiedener Gefährdungen für die Wasserversorgung erfordert die Stärkung ihrer Resilienz durch eine effektive Notfallvorsorgeplanung. Die vorliegende Arbeit widmet sich der Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung.

Mit 20 eindeutig definierten Notsituationen werden alle möglichen Beeinträchtigungen der Wasserversorgung erfasst. Daraufhin werden mit der entwickelten Systemanalyse für jede Notsituation sämtliche geeignete Versorgungsarten zur Reduzierung des Versorgungsdefizits ermittelt und priorisiert. Auf Grundlage der Daten eines realen Fallbeispiels wurde anhand des entwickelten System Dynamics Modells NOTWASSER für die jeweiligen Notsituationen der Ressourceneinsatz untersucht und die bereitgestellte Wassermenge berechnet. Damit wurde das Potential transportabler Speicherbehältnisse für eine effektive Versorgung identifiziert und sowohl der Einfluss des Notfallverlaufs als auch des Bevorratungsverhaltens der Bevölkerung auf die Minimierung des Versorgungsdefizits dargelegt. Zur Beurteilung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung wurde ein Verbundindikator entwickelt, mit dem sich zeigen lässt, dass zahlreiche Aspekte der Notfallvorsorgeplanung bislang nicht ausreichend umgesetzt werden. Bereits die konsequente Durchführung von Risikoanalysen kann zur Stärkung der Resilienz beitragen, da hiermit die Voraussetzungen für angemessene vorbeugende Maßnahmen und ein zielgerichtetes Krisenmanagement geschaffen werden.

Abstract

The increased probability of occurrence of various hazards to water supply systems requires the strengthening of their resilience through effective emergency preparedness planning. This dissertation introduces a method for the assessment of the resilience of water supply systems considering emergency water supply options.

With 20 uniquely defined emergencies, all possible impairments of the water supply are documented. The system analysis developed for each emergency is then used to determine and prioritize all suitable supply types for reducing the supply deficit. Based on the data of a real case study, the developed System Dynamics model NOTWASSER was used to examine the resource utilization for the respective emergencies and to calculate the amount of water provided. Thus, the potential of transportable storage tanks for an effective supply was identified and the influence of the course of the emergency as well as the stocking behavior of the population on the minimization of the supply deficit was presented. To assess the status quo of emergency preparedness planning in water supply, a composite indicator was developed which allows showing that numerous aspects of emergency preparedness planning are not sufficiently implemented yet. The consequent implementation of risk analyses can contribute to the strengthening of resilience, as the preconditions for appropriate preventive measures and targeted crisis management are created.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Problemstellung und Motivation . . . 1
1.2 Identifizierte Defizite und abgeleitete Forschungsfragen . . . 2
1.3 Zielsetzung und Ansatz . . . 4
1.4 Aufbau der Arbeit . . . 6

2 Resilienz der Wasserversorgung 9
2.1 Definitionen und Überblick . . . 10
2.2 Eigenschaften von resilienten Systemen . . . 12
2.3 Verfahren zur Resilienzbeurteilung von Wasserversorgungssystemen . . . 14
2.3.1 Dimensionen der Resilienz von Wasserversorgungssystemen . . . 15
2.3.2 Ökologiebasierte Verfahren . . . 15
2.3.3 Technikorientierte Verfahren . . . 16
2.3.4 Gesellschaftsorientierte Verfahren . . . 18
2.3.5 Ökonomiebasierte Verfahren . . . 18
2.4 Identifizierte Forschungslücken . . . 19

3 Grundlagen der Ersatz- und Notwasserversorgung 21
3.1 Definitionen und Überblick . . . 22
3.2 Teilprozesse und Anlagenteile der Wasserversorgung in Notsituationen . . . 24
3.2.1 Wassergewinnung . . . 24
3.2.2 Aufbereitung . . . 25
3.2.3 Wasserverteilung . . . 26
3.2.4 Abgabe . . . 29
3.2.5 Speicherung . . . 30
3.3 Klassifizierung von Versorgungsarten . . . 30
3.3.1 Versorgungsarten gemäß DIN 2001-3 (2015) . . . 31
3.3.2 Versorgungsarten in dieser Dissertation . . . 31
3.4 Rechtliche Rahmenbedingungen und Verantwortlichkeiten bei der Wasserversorgung in Notsituationen . . . 32

4 Anforderungen an eine resiliente Wasserversorgung in Notsituationen 35
4.1 Schutzziele und Mindestversorgungsstandards für die Wasserversorgung in Notsituationen . . . 36

4.2 Quantitative Anforderungen an die Wasserversorgung in Notsituationen . 37
4.2.1 Anforderungen an die leitungsgebundene Wasserversorgung der Bevölkerung . . . 37
4.2.2 Anforderungen an die leitungsungebundene Wasserversorgung der Bevölkerung . . . 38
4.2.3 Anforderungen an die Wasserversorgung von Patienten in Einrichtungen des Gesundheitswesens . . . 39
4.2.4 Empfehlungen für die Eigenbevorratung der Bevölkerung . . . 40
4.2.5 Geltungsdauer für die quantitativen Anforderungen . . . 41
4.3 Qualitative Anforderungen an die Wasserversorgung in Notsituationen . . 41
4.4 Anforderungen an Planungen zur Notfallvorsorge . . . 42

5 Methoden 43
5.1 Identifikation geeigneter Versorgungsarten und der für deren Einsatz notwendigen Rahmenbedingungen . . . 44
5.2 Entwicklung eines Modells zur Steuerung und Bewertung des Umgangs mit begrenzten Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung . . . 45
5.2.1 Anforderungen an eine geeignete Modellierungsmethode . . . 45
5.2.2 Identifikation einer geeigneten Modellierungsmethode . . . 45
5.2.3 Theoretische Grundlagen von System Dynamics . . . 46
5.2.4 Vorgehen bei der Entwicklung von System Dynamics Modellen . . 48
5.2.5 Entwicklung des Modells NOTWASSER . . . 51
5.2.6 Verifizierung und Validierung des Modells NOTWASSER . . . 62
5.2.7 Auswirkung der Notsituationen, des Bevorratungsverhaltens sowie des Notfallverlaufs auf die fehlende Wassermenge . . . 63
5.3 Entwicklung eines Indikatorsystems zur Beurteilung der Resilienz durch Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung . . . 67
5.3.1 Verbundindikatoren . . . 67
5.3.2 Definition des theoretischen Rahmens und Identifizierung eines repräsentativen Indikatorensatzes . . . 69
5.3.3 Datenauswahl und -akquisition . . . 75
5.3.4 Analyse und Imputation fehlender Daten . . . 75
5.3.5 Normalisierung . . . 76
5.3.6 Gewichtung . . . 77
5.3.7 Visualisierung der Ergebnisse . . . 78
5.4 Validierung sowie Überprüfung der Praxistauglichkeit des entwickelten Verfahren anhand eines Fallbeispiels . . . 79

6 Ergebnisse 81
6.1 Versorgungsarten der Ersatz- und Notwasserversorgung . . . 82
6.1.1 Systemanalyse zur Ermittlung der geeigneten Versorgungsarten . . 82
6.1.2 Anforderungen an Ressourcen und Voraussetzungen für deren Einsatz zur Ersatz- und Notwasserversorgung . . . 89

6.2 Steuerung und Bewertung des Einsatzes von begrenzten Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung mittels System Dynamics Modell NOTWASSER 91
6.2.1 Effektiver Einsatz der Ressourcen zur Reduzierung der fehlenden Wassermenge 91
6.2.2 Einfluss des Bevorratungsverhaltens der Bevölkerung auf die fehlende Wassermenge und zu versorgenden Einwohner 105
6.2.3 Einfluss des Notfallverlaufs auf die fehlende Wassermenge 107
6.3 Anwendung des Notfallvorsorgeplanungsindikators zur Ermittlung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung 114
6.3.1 Ermittlung der Gewichtung der Haupt- und Teilindikatoren 114
6.3.2 Überprüfung der Anwendbarkeit und Aussagekraft des Notfallvorsorgeplanungsindikators anhand des Fallbeispiels 117
6.3.3 Status quo der Notfallvorsorgeplanung 117

7 Diskussion 125
7.1 Versorgungsarten der Ersatz- und Notwasserversorgung 126
7.2 Modell zur Bewertung und Steuerung des Umgangs mit begrenzten Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung 128
7.3 Verbundindikator zur Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung . 134
7.4 Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen in Notsituationen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung 138

8 Zusammenfassung und Ausblick 141
8.1 Zusammenfassung der Arbeit 141
8.2 Ausblick 143

Literaturverzeichnis 145

Abkürzungsverzeichnis 166

Symbolverzeichnis 168

Anhang 168

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Die Corona-Pandemie in 2020 beeinflusst die Gesellschaft, aber auch die Wasserversorgungsunternehmen (WVU) auf eine neue und tiefgreifende Weise [Sowby, 2020]. Unter Quarantäne gestelltes Personal, Heimarbeit zur räumlichen Distanzierung sowie unvorhersehbare Lieferketten für Verbrauchsmaterial sind neue und ungewohnte Rahmenbedingungen, die den Betrieb von WVU erschweren und die Versorgung potentiell gefährden [Haakh und Merkel, 2020; Nghiem et al., 2020; Walton, 2020].

Die zuverlässige Trinkwasserversorgung ist eine der Grundvoraussetzungen für ein stabiles Gesellschafts- und Wirtschaftssystem. Beeinträchtigungen lassen sich jedoch nicht vollständig vermeiden, sodass WVU z. B. bei Rohrleitungsbrüchen vom Normalbetrieb abweichen müssen. Solche kleinen Störungen treten vergleichsweise häufig auf und haben nur geringe Auswirkungen [Mays, 2004]. Sie können in der Regel schnell identifiziert und behoben werden. Durch die Verbrauchenden bleiben sie meist unbemerkt [States, 2010]. Ausfälle oder umfangreichere Beeinträchtigungen der Wasserversorgungssysteme können dahingegen negative Auswirkungen für die betroffene Bevölkerung sowie die Wirtschaft zur Folge haben [Gopalakrishnan und Peeta, 2010; Grigg, 2003; Mays, 2004; Spellman, 2007]. Ursachen können schwerwiegende Naturereignisse, durch Menschen verursachte Unfälle oder vorsätzliche Angriffe sein [BMI, 2011; Mendonça und Wallace, 2006a,b], deren Eintrittswahrscheinlichkeit stetig zunimmt [Nelson et al., 2007].

Die Anfälligkeit von Trinkwasserversorgungssystemen für Naturgefahren zeigte sich u. a. am Beispiel des Starkregenereignisses in Simbach am Inn an der deutsch-österreichischen Grenze. Starke Niederschläge und der Bruch eines Damms führten zu einer Flutwelle, die am 1. Juni 2016 große Teile von Simbach überfluteten [Hübl et al., 2017]. Die zentrale Trinkwasserversorgung der Stadt musste unterbrochen werden, da die Gewinnungsanlagen unter Wasser standen und Leitungen beschädigt waren [SZ, 2016; WB, 2016]. In den Tagen nach der Flut wurde eine Ad-hoc-Ersatzwasserversorgung umgesetzt. Mehr als 5,5 Millionen Liter Oberflächenwasser wurden zu Trinkwasser aufbereitet und anschließend in das Trinkwassernetz eingespeist [THW, 2016, 2018]. Eine Notwasserversorgung mit Wasser minderer Qualität war somit nicht notwendig.

Bereits im März 2015 wurde die Relevanz der Resilienz Kritischer Infrastrukturen durch die Vereinten Nationen (UN) im „Sendai Rahmenwerk für Katastrophenvorsorge 2015 - 2030“ betont. Eines der sieben globalen Kernziele besteht darin, die Vulnerabilität von Kritischen Infrastrukturen erheblich zu reduzieren sowie ihre Resilienz zu erhöhen [UNDRR, 2015].

Kritische Infrastrukturen wie z. B. die Wasser- oder Energieversorgung sind per Definition essentiell für die Gesellschaft [BMI, 2009; DHS, 2015]. Eine Unterbrechung, Beschädigung oder Zerstörung von Kritischen Infrastrukturen kann erhebliche negative Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit und die Sicherheit der Bevölkerung haben [OECD, 2019; UNDRR, 2009, 2017]. Die Gesellschaft erwartet, dass Kritische Infrastrukturen auch während Notsituationen kontinuierlich funktionieren [Boin und McConnell, 2007; Bruijne und van Eeten, 2007; Curnin, 2018; Curnin und Heumüller, 2016; Duchek, 2014; Gheorghe et al., 2007].

Die Corona-Pandemie rückt die Bedeutung von Kritischen Infrastrukturen und den Bedarf an proaktiver Notfallvorsorgeplanung zur Erhöhung deren Resilienz, im Sinne von Widerstandsfähigkeit, in den Mittelpunkt des Bevölkerungs- und Katastrophenschutzes [Sowby, 2020]. Das Verständnis, die Analyse und die Quantifizierung der Resilienz durch WVU, Behörden, Entscheidungstragende und andere Beteiligte ist eine Voraussetzung hierzu.

Die Resilienz von Wasserversorgungssystemen kann durch angemessene Notfallvorsorgeplanungen anstelle von Ad-hoc-Bewältigungsreaktionen erhöht werden. Hierdurch werden die konzeptionellen, organisatorischen und technischen Voraussetzungen zur Risikominderung geschaffen und Strukturen für die Reaktion im Krisenfall vorbereitet [WHO, 2002]. Die Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung umfasst somit neben Maßnahmen zur Vermeidung von Schadensereignissen insbesondere vorbeugende, absichernde, reaktive und wiederherstellende Aspekte des Risiko- und Krisenmanagements (Abbildung 1.1).

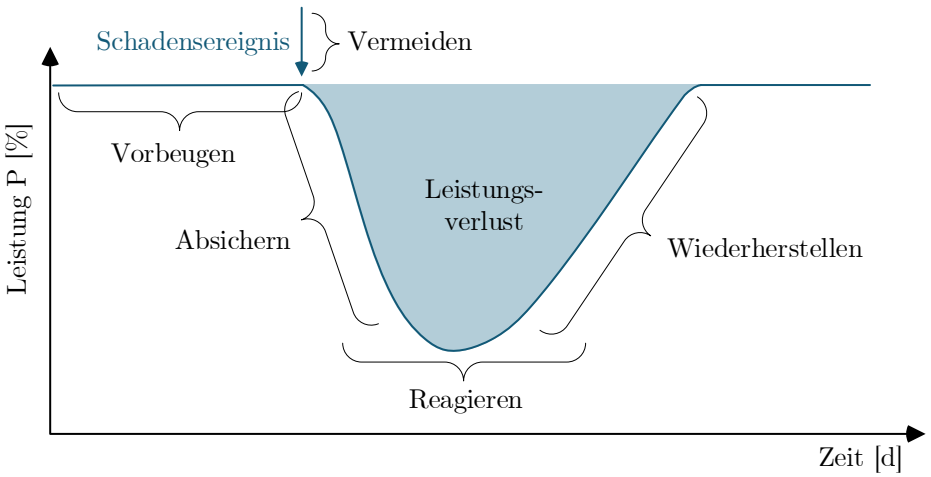


Abbildung 1.1: Minderung des Leistungsverlusts und Erhöhung der Resilienz durch Maßnahmen der Notfallvorsorge

1.2 Identifizierte Defizite und abgeleitete Forschungsfragen

Traditionell ist die Resilienz von Kritischen Infrastrukturen eng mit der Planung von Sicherheitsstrategien und dem Risikomanagement verbunden. Dabei wird stets zwischen der Wirtschaftlichkeit von risikomindernden Maßnahmen sowie der Akzeptanz eines Restrisikos

abgewogen. Um bestehende und zukünftige Systeme zu verbessern wird hierbei vorwiegend ein rückblickender *Lessons-Learned*-Ansatz verfolgt, der Erfahrungen aus vergangenen Vorfällen berücksichtigt. Für die Forschung ergeben sich viele Vorteile bei der Untersuchung von Misserfolgen und Katastrophen aus der Vergangenheit. Dies gilt insbesondere, wenn rückwirkend Erkenntnisse über die Resilienz oder Reaktion von Systemen gewonnen werden konnten.

Alternativ können mögliche Zukunftsszenarien proaktiv hinsichtlich der Auswirkungen und Bewältigungsstrategien untersucht werden. Ein solches Vorgehen dient der Entwicklung von Systemen, die sich den Herausforderungen möglicher Zwischenfälle anpassen, um so das potenzielle Schadensausmaß zu verringern. Die zentrale Frage bei der Anwendung eines proaktiven Vorgehens in der Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung ist:

Wie kann die Resilienz von Wasserversorgungssystemen vor dem Eintreten eines Notfalls beurteilt werden, um die Notfallvorsorge effektiv planen zu können?

Um diese übergeordnete Forschungsfrage zu beantworten, werden in dieser Dissertation drei Forschungsaspekte behandelt. Der erste Aspekt ist die Identifikation geeigneter Versorgungsarten zur Ersatz- und Notwasserversorgung, die sich aus einer Analyse des Wasserversorgungssystems anhand verschiedener Notsituationen ableiten lassen. Der zweite Aspekt ist die Steuerung des Einsatzes von Ressourcen für die geeigneten Versorgungsarten zur Ersatz- und Notwasserversorgung. Zur abschließenden Beurteilung der Resilienz wird als dritter Aspekt ein Indikatorensystem zur Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung entwickelt und angewandt.

Bei einer Beeinträchtigung oder einem Ausfall der Normalversorgung werden einzelne oder mehrere Alternativen zur Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung des Wassers benötigt. Für die Ersatz- oder Notwasserversorgung kommt, abhängig vom vorliegenden Schadensereignis und den lokalen Gegebenheiten, nur ein Teil der möglichen Versorgungsarten in Frage. Es lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

FF 1.1: Welche Ressourcen werden für die verschiedenen Versorgungsarten benötigt?

FF 1.2: Welche Versorgungsarten können abhängig vom jeweiligen Schadensereignis zum Einsatz kommen?

FF 1.3: Was sind die Anforderungen an Ressourcen sowie Voraussetzungen für deren Einsatz?

Krisen sind durch Mangelzustände gekennzeichnet. WVU verfügen aufgrund wirtschaftlicher Einschränkungen nur über begrenzte finanzielle Mittel zur Vorhaltung oder Bereitstellung von Ressourcen zur Ersatz- oder Notwasserversorgung. Die Notfallvorsorge steht somit in ständiger Konkurrenz zu anderen unternehmerischen Maßnahmen [Prokopf, 2020]. Die Herausforderung der Vorsorgeplanung besteht folglich darin, ausreichend Personal, Zeit und Infrastruktur bereitzustellen, selbst wenn in einem Versorgungsgebiet jahrzehntelang keine Notsituation aufgetreten ist [Fekete, 2018]. Für die Planung des Ressourceneinsatzes lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

FF 2.1: Welche Wassermengen können beim Einsatz des vorhandenen Ressourcenbestandes an die Verbraucher abgegeben werden?

FF 2.2: Welche zusätzlichen Ressourcenkapazitäten werden für die Erfüllung von Schutzzielen benötigt?

FF 2.3: Welche Versorgungsart eignet sich bei welchem Ressourcenbestand?

FF 2.4: Wie beeinflusst das Bevorratungsverhalten der Bevölkerung die fehlende Wassermenge?

FF 2.5: Wie beeinflusst der Notfallverlauf die fehlende Wassermenge?

Durch eine umfassende Notfallvorsorgeplanung lassen sich die negativen Auswirkungen von Beeinträchtigungen in der Wasserversorgung begrenzen, indem die an der Bewältigung beteiligten Akteure besser auf unvorhersehbare Ereignisse vorbereitet werden. Um die Effektivität der bisher umgesetzten Maßnahmen einzuschätzen und um weiteren Verbesserungsbedarf vor Eintritt eines Schadensereignisses identifizieren zu können, bedarf es der Beurteilung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung. Für diese Analyse lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

FF 3.1: Welche Schritte muss eine effektive Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung umfassen?

FF 3.2: Wie kann der Status quo der Notfallvorsorgeplanung quantitativ erfasst werden?

FF 3.3: Wie ist der Status quo der Notfallvorsorge in der Wasserversorgung in Deutschland zu beurteilen und wo besteht Handlungsbedarf?

1.3 Zielsetzung und Ansatz

Um Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen effektiv planen und umsetzen zu können, ist die Beurteilung der Resilienz des bestehenden Systems erforderlich. Hierzu werden in dieser Dissertation Methoden entwickelt, die in ihrer Gesamtheit ein praxistaugliches Verfahren zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen in Notsituationen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung darstellen.

Das Verfahren basiert auf der Ermittlung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung. Die Inhalte der Notfallvorsorgeplanung lassen sich den fünf Prozessschritten des Risiko- und Krisenmanagements nach BMI (2011) zuordnen (Abbildung 1.2). Die Vorplanung und Risikoanalyse werden in der Literatur bereits umfangreich behandelt (z. B. AWWA (2018), BBK (2016)). Für die Durchführung einer Systemanalyse, die Identifikation von geeigneten Versorgungsarten und die Steuerung des Ressourceneinsatzes fehlt die wissenschaftliche Grundlage (hervorgehobene Aspekte in Abbildung 1.2). Um die Notfallvorsorgeplanung als

Maß zur Beurteilung der Resilienz anwenden zu können, werden daher in dieser Dissertation zunächst diese Forschungslücken aufgegriffen und geschlossen.

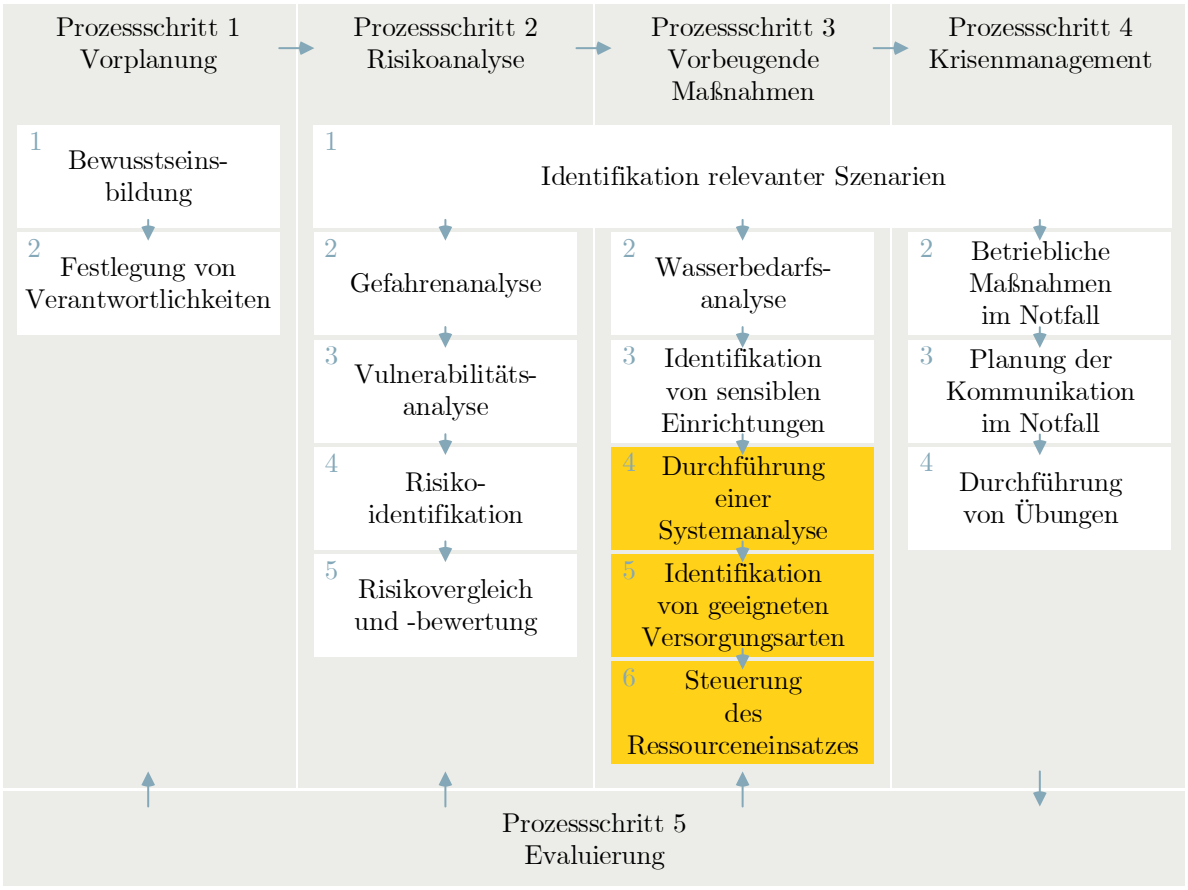


Abbildung 1.2: Strukturierung des Vorgehens zur Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung und Einordnung der Inhalte dieser Dissertation (hervorgehoben) in Anlehnung an BBK (2008), BMI (2011) und Bross, Wienand et al. (2019)

Die Systemanalyse soll die Identifikation von geeigneten Versorgungsarten durch Ableitung von charakteristischen Notsituationen ermöglichen. Diese werden durch die Auswirkungen verschiedener Szenarien auf das Wasserversorgungssystem beschrieben. Das erarbeitete Vorgehen sowie die aufgeführten Anforderungen an die Umsetzung der Versorgungsarten wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung - Notfallvorsorgekonzepte“ (NoWa II) in einem Stakeholder-Workshop diskutiert und mit Praxispartnern verifiziert.

Zur Steuerung des Ressourceneinsatzes wird ein System Dynamics Modell entwickelt. Um den Ressourceneinsatz differenzierter planen zu können, wird zudem untersucht, wie der Notfallverlauf und das Bevorratungsverhalten der Bevölkerung das Ausmaß der Beeinträchtigung beeinflusst. Die Praxistauglichkeit des Modells wird durch die Anwendung an einem Fallbeispiel überprüft.

Für die Beurteilung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung wird ein Indikatorensystem entwickelt. Es berücksichtigt die Erkenntnisse der Systemanalyse, der Identifikation von geeigneten Versorgungsarten sowie der Steuerung des Ressourceneinsatzes.

Somit werden in der vorliegenden Arbeit Aspekte der Notfallvorsorgeplanung untersucht, die bisher in der Forschung und Praxis nur nachrangig berücksichtigt wurden, jedoch für eine effektive Notfallvorsorgeplanung und zur Erhöhung der Resilienz unabdingbar sind. Die Praxistauglichkeit des Indikatorensystems wird an zwei Datensätzen überprüft. Zum einen wird ein lokaler Datensatz eines realen Fallbeispiels analysiert. Zum anderen wird ein für Deutschland repräsentativer Datensatz aus dem Forschungsprojekt „Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung - Kapazitäten und Ressourcen“ (NoWa I) ausgewertet.

Teilinhalte dieser Arbeit wurden vorab in Bross und Krause (2017), Krause und Bross (2017), Bross, Krause et al. (2019), Bross, Wienand et al. (2019), Bross, Wienand et al. (2020a) sowie Bross, Wienand et al. (2020b) publiziert. Des Weiteren sind Teilinhalte in Bross, Bäumer et al. (2020) zur Veröffentlichung eingereicht und befinden sich zum Zeitpunkt der Einreichung dieser Dissertation noch im Begutachtungsprozess.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit orientiert sich an der Strategie der angewandten Forschung nach Ulrich et al. (1984), die den Praxisbezug in den Fokus der Untersuchungen stellt. Zur Erfüllung der Zielsetzung und Beantwortung der Forschungsfragen umfasst diese Dissertation einschließlich Einleitung, Zusammenfassung und Ausblick acht Kapitel. Die thematischen Schwerpunkte der Kapitel werden im Folgenden kurz dargestellt.

Kapitel 2: Resilienz der Wasserversorgung

Den Einstieg in die Thematik der Resilienzbeurteilung bildet das Kapitel 2. Dieses umfasst die Definition von wesentlichen Begriffen im Kontext der Resilienz von Wasserversorgungssystemen und deren Zusammenhänge. Zudem werden ausgewählte, in der Literatur veröffentlichte, Verfahren zur Resilienzbeurteilung erläutert sowie deren Anwendungsmöglichkeiten dargestellt und abgegrenzt. Anschließend werden Forschungslücken aufgezeigt, die im Rahmen dieser Dissertation geschlossen werden.

Kapitel 3: Grundlagen der Ersatz- und Notwasserversorgung

Die technischen und rechtlichen Grundlagen der Ersatz- und Notwasserversorgung werden im dritten Kapitel dieser Dissertation aufgezeigt. Zu Beginn des Kapitels werden wesentliche Begriffe definiert und deren Abhängigkeiten aufgezeigt. Anschließend werden, aufbauend auf einer Erläuterung der Teilprozesse der Ersatz- und Notwasserversorgung, charakteristische Versorgungsarten abgeleitet und klassifiziert.

Kapitel 4: Anforderungen an die Wasserversorgung in Notsituationen

Im vierten Kapitel werden die Anforderungen an die Wasserversorgung in Notsituationen dargelegt. Hierbei werden insbesondere quantitative sowie qualitative Schutzziele und Mindestversorgungsstandards hergeleitet sowie Anforderungen an eine effektive Notfallvorsorgeplanung aufgezeigt.

Kapitel 5: Methodik

Die angewandte Methodik für die Entwicklung des Verfahrens zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung wird im fünften Kapitel thematisiert. Dieses unterteilt sich in vier Abschnitte. Der erste Abschnitt beinhaltet die Methodik zur Entwicklung der Systemanalyse für die Identifikation von geeigneten Versorgungsarten. Des Weiteren beinhaltet der zweite Abschnitt die Methodik des hier entwickelten System Dynamics Modells NOTWASSER. Im dritten Abschnitt wird die Methodik des Verbundindikatorensystems zur Entwicklung des Notfallvorsorgeplanungsindikators aufgezeigt. Anschließend wird im vierten Abschnitt das Fallbeispiel charakterisiert, anhand dessen das entwickelte Verfahren auf seine Praxistauglichkeit getestet wird.

Kapitel 6: Ergebnisse

Die Ergebnisse werden gemäß der beschriebenen Methodik in drei Abschnitten aufgezeigt. Zunächst werden die identifizierten Versorgungsarten der Ersatz- und Notwasserversorgung dargestellt und charakterisiert sowie deren Eignung anhand einer Systemanalyse ermittelt. Im Anschluss wird die Auswertung des entwickelten Modells NOTWASSER dargestellt. Abschließend wird der Status quo der Notfallvorsorgeplanung behandelt, der durch Anwendung des Verbundindikators auf das Fallbeispiel sowie auf einen für Deutschland repräsentativen Datensatz ermittelt wird.

Kapitel 7: Diskussion

Im siebten Kapitel werden die Ergebnisse dieser Dissertation eingeordnet, diskutiert und mit ergänzender Literatur verglichen.

Antworten zu den adressierten Forschungsfragen werden an jeweiliger Stelle anlassbezogen hervorgehoben. Zudem veranschaulicht eine Abbildung am Beginn jedes Kapitels die Einordnung in den Gesamtkontext.

2 Resilienz der Wasserversorgung

Die Entwicklung eines Verfahren zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen ist das zentrale Ziel dieser Dissertation. Dieses Kapitel widmet sich deshalb zunächst der übergreifenden Thematik der Resilienz von Wasserversorgungssystemen. Hierbei ist das Kapitel in vier Abschnitte untergliedert (Abbildung 2.1). Im ersten Abschnitt des Kapitels werden zentrale Begriffe im Kontext der Resilienz von Wasserversorgungssystemen definiert (Abschnitt 2.1). Vertiefend werden in Abschnitt 2.2 wesentliche Eigenschaften von resilienten Systemen aufgezeigt. Im dritten Abschnitt werden ausgewählte, in der Literatur veröffentlichte Verfahren zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen und deren Beurteilungsansätze dargestellt (Abschnitt 2.3). Aufbauend auf den drei ersten Abschnitten werden in Abschnitt 2.4 die aus der Literatur abgeleiteten Forschungslücken aufgezeigt, die durch das in dieser Dissertation entwickelte Verfahren geschlossen werden.

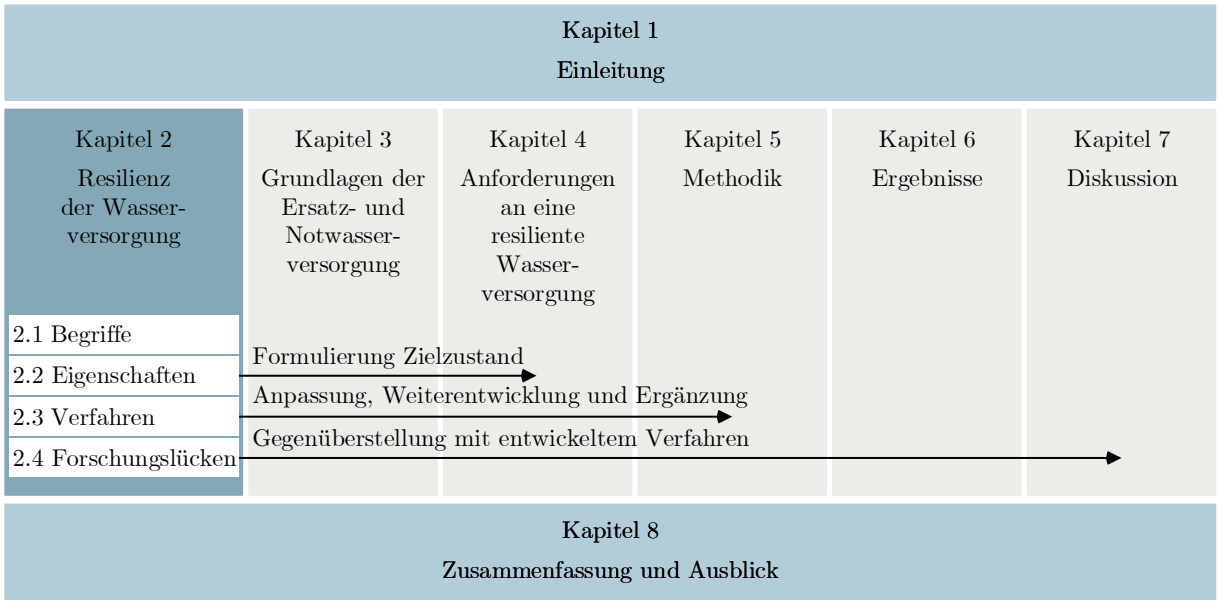


Abbildung 2.1: Aufbau des Kapitels *Resilienz der Wasserversorgung* und Einordnung der Inhalte in die Dissertation

2.1 Definitionen und Überblick

Im Folgenden werden die Begrifflichkeiten Szenario, Notsituation und Notfallverlauf definiert und in einen Kontext gebracht. Die Abhängigkeit der aufgeführten Begrifflichkeiten ist in Abbildung 2.2 aufgezeigt.

Zu Beginn steht das Szenario, welches als konkretes Ereignis Auslöser für eine Beeinträchtigung ist. Es wird daraufhin genauer betrachtet, welche Teilprozesse von den Auswirkungen des Szenarios beeinträchtigt werden. Diese Beeinträchtigungen werden in Notsituationen charakterisiert. Ein wesentliches Charakteristikum der Beeinträchtigung ist sowohl der Verlauf des Ausfalls als auch der Wiederherstellung. Anhand der Notsituation und des Notfallverlaufs können für das Wasserversorgungssystem die zu ersetzenden Teilprozesse abgeleitet und der Einsatz der vorhandenen Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung effektiv gesteuert werden.

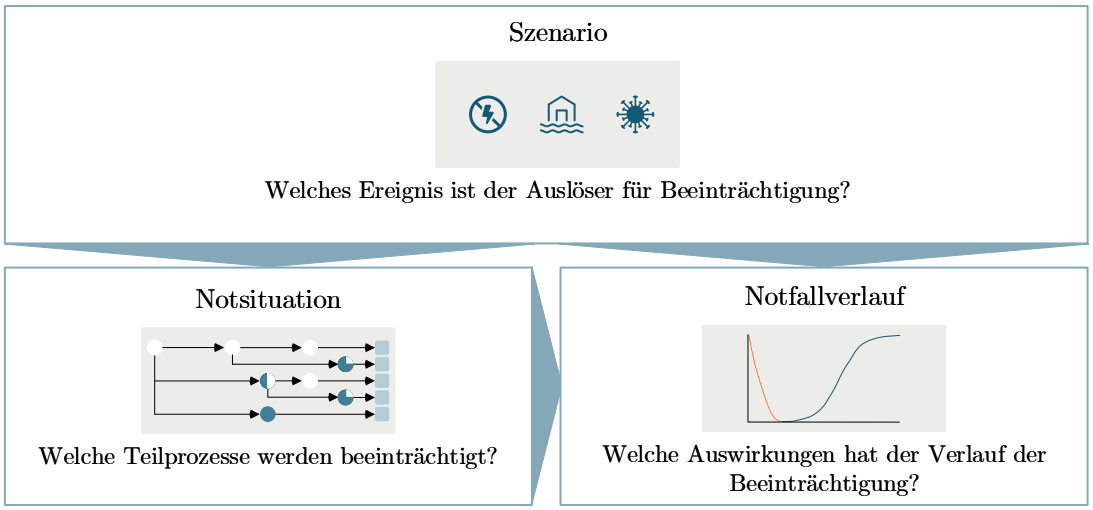


Abbildung 2.2: Zusammenhang und Relevanz der Begriffe Szenario, Notsituation, Notfallverlauf und Wasserversorgungssystem im Rahmen dieser Dissertation

Szenario

Ein Szenario ist eine Annahme eines möglichen Ereignisses (z. B. Stromausfall, Pandemie) oder Abfolgen von mehreren Ereignissen sowie derer Auswirkungen auf die Wasserversorgungssysteme [BBK, 2019].

Notsituation

Im Kontext dieser Dissertation ist eine Notsituation der Wasserversorgung ein plötzliches, akutes und allgemein unerwartet verursachtes Schadensereignis, welches zu einer erheblichen Beeinträchtigung oder gar zum Ausfall der Trinkwasserversorgung führen kann. Notsituationen unterscheiden sich anhand der beeinträchtigten Teilprozesse der Normalversorgung und der Möglichkeiten diese durch die Ersatz- oder Notwasserversorgung zu ersetzen.

Notfallverlauf

Der zeitliche Verlauf einer Notsituation wird in dieser Dissertation durch einen Funktionsgraphen dargestellt (Abbildung 2.3). Dieser Funktionsgraph wird als Notfallverlauf v(t) definiert und stellt die Beeinflussung der Systemleistung dar. Er umfasst eine Phase des Ausfalls und eine der Wiederherstellung. Die Beeinflussung der Normalversorgung führt zu einer fehlenden Wassermenge, die durch das Integral zwischen v(t) und der vollständigen Systemleistung ermittelt wird.

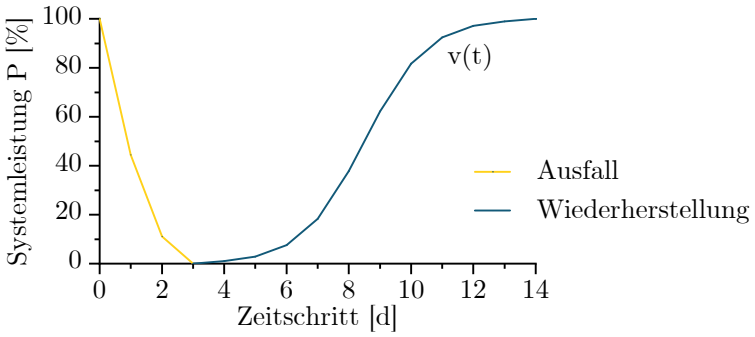


Abbildung 2.3: Notfallverlauf v(t)

In Ergänzung zu den drei aufgeführten Begriffen werden im Folgenden die Begriffe Wasserversorgungssystem, Risiko, Vulnerabilität und Resilienz definiert sowie in einen Kontext gebracht.

Wasserversorgungssystem

Die Definition eines Wasserversorgungssystems im Rahmen dieser Dissertation umfasst neben der Infrastruktur des Versorgungssystems zur Normalversorgung auch die Ressourcen, die zur Ersatz- bzw. Notwasserversorgung eingesetzt werden.

Risiko

Ein Risiko wird als das Ergebnis einer Interaktion zwischen einer Gefahr und einem vulnerablen Objekt beschrieben [Birkmann, 2008]. Häufig wird dies in vielen Bereichen der Risikoforschung u. a. durch die Eintrittswahrscheinlichkeit des Gefahrenereignisses bzw. der Interaktion ergänzt (z. B. Dikau und Pohl (2007), DIN SPEC 91390 (2019) und UNDRR (2004)). In Anlehnung an die DIN EN 15975-1 (2016) sowie die DIN EN 15975-2 (2013) ist ein Risiko in dieser Dissertation die Kombination aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem resultierenden Schadensausmaß einer Gefährdung des Wasserversorgungssystems.

Vulnerabilität

Vulnerabilität (von lateinisch *vulnus* „Wunde“, engl. *vulnerability*) beschreibt gemäß UNDRR (2017) die Eigenschaften und Umstände, die ein System, eine Gemeinschaft oder ein materielles Schutzgut gegenüber einem Schadensereignis anfällig machen. In der deutschen Sprache werden als Synonym für die Vulnerabilität auch die Begriffe *Verwundbarkeit* oder *Anfälligkeit* verwendet. Im Rahmen dieser Dissertation wird

unter Vulnerabilität eines Wasserversorgungssystems, abgeleitet aus der Definition gemäß Lenz (2009), die gefahrenspezifische Anfälligkeit eines Wasserversorgungssystems für Beeinträchtigung oder Ausfall seiner Funktionsfähigkeit verstanden, welche zur Unterbrechung der Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser führt.

Resilienz

Resilienz (von lateinisch *resilire* „zurückspringen", „abprallen", engl. *resilience* und *resiliency*) bezeichnet gemäß UNDRR (2017) die Eigenschaften und Umstände, von Systemen, Gemeinschaften oder materiellen Schutzgüter, den schädlichen Auswirkungen einer Gefährdung, rechtzeitig und effizient zu widerstehen, sie zu absorbieren und aufzunehmen, sich an sie anzupassen, sie zu transformieren und sich von ihnen zu erholen. Im Rahmen dieser Dissertation wird die Resilienz eines Wasserversorgungssystems als die Fähigkeit eines Systems definiert, seine Leistung auf einem akzeptablen Niveau zu halten. Dies geschieht indem Störungen mit den grundlegenden Fähigkeiten und vorhandenen Ressourcen rechtzeitig und effizient nach einem Systemausfall behoben werden können. Die Resilienz von Wasserversorgungssystemen ergibt sich somit aus den vor Eintritt des Schadensereignis vorhandenen Widerstandsfähigkeiten und der Verfügbarkeit von Ressourcen, die nicht nur endlich, sondern in Kommunen und Wasserversorgungsunternehmen auch unterschiedlich verteilt sind.

2.2 Eigenschaften von resilienten Systemen

Resilienten Systemen wird eine Vielzahl von Eigenschaften zugeordnet (Tabelle 2.1). Die Fähigkeit eines Systems, während und nach einem Schadensereignis die erforderliche Leistung zu gewährleisten, wird durch die Anpassungsfähigkeit, die Absorptionsfähigkeit, die Beständigkeit sowie die Robustheit beschrieben [Bruneau et al., 2003; Kallaos et al., 2014; Lenz, 2009; Sharifi und Yamagata, 2016a; Shin et al., 2018]. Diese Fähigkeiten stehen im Zusammenhang mit der Gewährleistung von Zuverlässigkeit, Langlebigkeit und Kontinuität der Systemfunktionalität [Cimellaro et al., 2016; Sharifi und Yamagata, 2016a]. Eine der Möglichkeiten, diese Fähigkeiten zu bewerten, ist es, die Systemfunktionalität zu definieren und die Funktionalitäten unter normalen und gestörten Bedingungen zu vergleichen. Die Beurteilung dieser Fähigkeiten kann über die Differenz der minimalen Leistung nach dem Schadensereignis und einem vollständigen Ausfall erfolgen [Ayyub, 2014; Tierney und Bruneau, 2007].

Die Wiederherstellungsfähigkeit sowie deren Schnelligkeit sind ausgeprägte Eigenschaften von resilienten Systemen, da mit diesen Fähigkeiten die gestörten Systemkomponenten bzw. die Leistung schnell wieder auf das normale Leistungslevel oder in einen akzeptablen Zustand gebracht werden können [Bruneau et al., 2003; Cimellaro et al., 2010; Sharifi und Yamagata, 2016a]. Eine schnelle Erkennung und Diagnose von Systemausfällen sowie rechtzeitig und effizient eingesetzte Notfallmaßnahmen können dazu beitragen, potenzielle erweiterte und kaskadierte Auswirkungen auf das gesamte System oder miteinander

verbundene Systeme zu vermeiden. Hierbei werden die gestörten Komponenten isoliert und Wiederherstellungsmaßnahmen rasch durchgeführt [Dinh et al., 2012; Sharifi und Yamagata, 2016a].

Die Resilienz eines Systems wird zudem durch seine Ressourceneffizienz und Redundanz erhöht [Bruneau et al., 2003; Coaffee, 2008; Glassop, 2007; Herrera, 2017; Lenz, 2009]. Zur Bewältigung von Schadensereignissen ist eine Priorisierung von Maßnahmen notwendig. Die Ressourceneffizienz drückt aus, ob ein WVU in der Lage ist, identifizierte Probleme zu priorisieren sowie Lösungen unter Berücksichtigung aller vorhandenen sowie benötigten Ressourcen einzuleiten. Durch redundante Elemente in Wasserversorgungssystemen (z. B. Gewinnungsanlagen oder Leitungen) steigt die Wahrscheinlichkeit, dass im Störungsfall die funktionalen Anforderungen erfüllt bzw. aufrecht erhalten werden.

Tabelle 2.1: Übersicht der in der Literatur aufzeigten Eigenschaften von Resilienz

Resilienzeigenschaften	**Quelle**
Anpassungsfähigkeit	Dinh et al. (2012), Kallaos et al. (2014), Sharifi (2016), Sharifi und Yamagata (2016b), Shin et al. (2018)
Absorptionsfähigkeit	Sharifi und Yamagata (2016a), Shin et al. (2018)
Beständigkeit	Bruneau et al. (2003), Cimellaro et al. (2016), Herrera (2017), Sharifi und Yamagata (2016a,b), Shin et al. (2018)
Redundanz	AWWA J100 (2010), Blackmore und Plant (2008) Bruneau et al. (2003), Glassop (2007)
Ressourceneffizienz	Bruneau et al. (2003), Coaffee (2008) Glassop (2007)
Robustheit	Bruneau et al. (2003), Herrera (2017), Lenz (2009)
Schnelligkeit	Blackmore und Plant (2008), Bruneau et al. (2003), Herrera (2017)
Wiederherstellungsfähigkeit	Bruneau et al. (2003), Cimellaro et al. (2010), Sharifi und Yamagata (2016a), Shin et al. (2018)

Die Resilienz Kritischer Infrastrukturen wird häufig anhand einer leistungsbasierten Resilienzkurve bzw. eines „Resilienzdreieckes“ beschrieben (Abbildung 2.4) [Bruneau et al., 2003; Cimellaro et al., 2007; McDaniels et al., 2008; Zobel, 2010]. Angewandt auf ein Wasserversorgungssystem wird somit im Normalbetrieb der mittlere tägliche Wasserbedarf ($Q_{d,m}$) als P_0 an die Verbraucher abgegeben. Zum Zeitpunkt t_S tritt eine Störung auf (Punkt A). Bei einem unmittelbaren Eintritt der Auswirkungen der Störung auf das Wasserversorgungssystem liegen die Punkte A und B senkrecht übereinander und treten beide zum Zeitpunkt $t_S = t_A$ auf. Bei einer Verzögerung der Auswirkungen der Störungen auf das Wasserversorgungssystem liegt der Punkt B_1 nicht direkt senkrecht unter A, sodass t_A zeitlich nach t_S eintritt.

In Abbildung 2.4 werden verschiedene Kurven für den Wiederherstellungsverlauf (von B_1 nach D) aufgezeigt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Systemleistung nach der Wiederherstellung wieder auf das Niveau vor der Unterbrechung zurückkehrt und danach konstant ist. In vereinfachten Darstellungen wird der Wiederherstellungsverlauf als

lineare Funktion (durchgezogene Linie) dargestellt. Andere Verläufe stellen sich bei schnell startenden oder anfänglich langsameren Wiederherstellungsprozessen ein [Attoh-Okine et al., 2009].

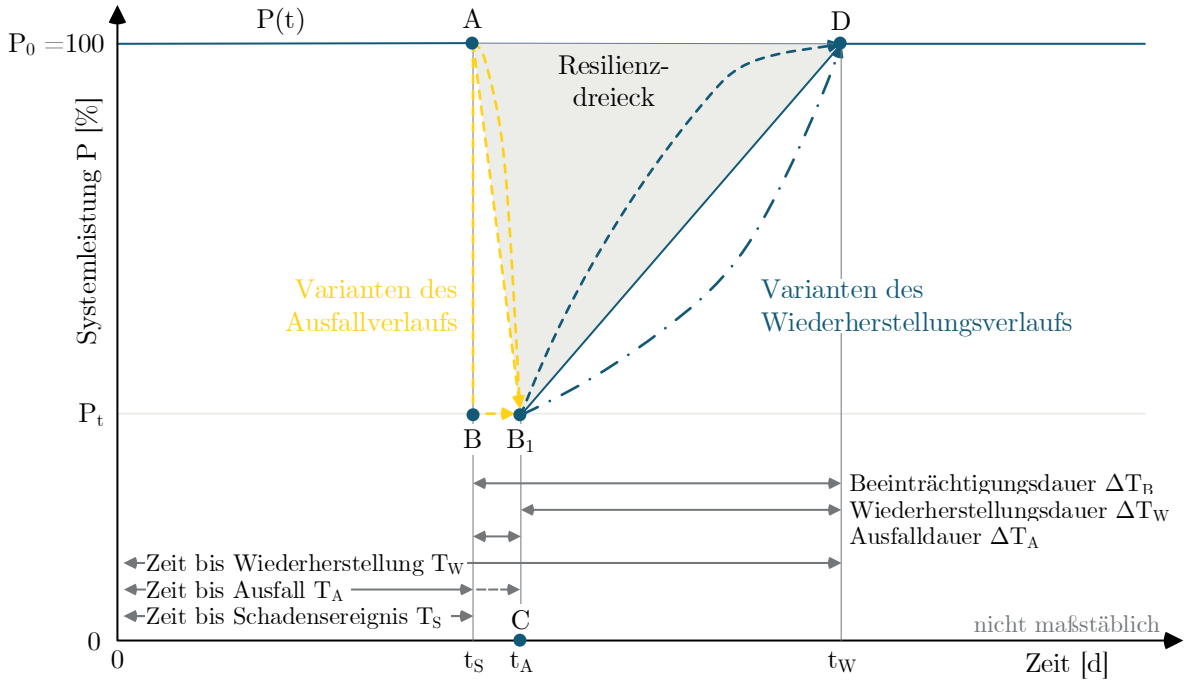


Abbildung 2.4: Leistungsabhängige Resilienzkurve in Anlehnung an Ayyub (2014) und Tierney und Bruneau (2007)

Der Resilienzverlust R kann über die Fläche zwischen der Leistungskurve ohne Störereignis und der Resilienzkurve durch den Verlauf der erwarteten Leistungsverschlechterung über die Zeit (d. h. Zeit bis zur Wiederherstellung) ermittelt werden (Gleichung 2.1) [Bruneau et al., 2003]. Die Resilienz wird gemäß Ayyub (2014) anhand Gleichung 2.2 als Leistung pro Zeiteinheit ermittelt.

$$R = \int_{t_S}^{t_W} [P_0 - P_t]\, dt \tag{2.1}$$

$$\text{Resilienz} = \frac{\int_{t_S}^{t_W} [P_0 - P_t]\, dt}{100 \cdot (t_S - t_W)} \tag{2.2}$$

2.3 Verfahren zur Resilienzbeurteilung von Wasserversorgungssystemen

Die veröffentlichten Verfahren zur Resilienzbeurteilung betrachten verschiedene Dimensionen. Es werden in diesem Abschnitt daher zunächst die Dimensionen der Resilienz von Wasserversorgungssystemen vorgestellt (Abschnitt 2.3.1). Im Anschluss werden diese Schwerpunkte einzeln erläutert sowie Beispiele für die jeweiligen Verfahren vorgestellt (Abschnitt 2.3.2 bis 2.3.5).

2.3.1 Dimensionen der Resilienz von Wasserversorgungssystemen

Netzbasierte Infrastruktursysteme, wie die Wasserversorgung, agieren innerhalb der Dynamik natürlicher, sozialer und baulicher Rahmenbedingungen [Pearce und Vanegas, 2002]. Die Abbildung 2.5 stellt ein Wasserverteilungssystem und dessen Umfeld dar. Der technische Bereich umfasst die Netzstruktur, den Betrieb und die Leistung des Systems. Die Leistung des Wasserversorgungssystems wird jedoch von sozialen Anforderungen bestimmt, da das System so konzipiert wurde, dass es den gesellschaftlichen Bedürfnissen gerecht wird. Gleichzeitig ist das Wasserversorgungssystem eine Schnittstelle zwischen der Nachfrage (Wasserbedarf) und der natürlichen Umwelt, welche die Ressourcen zur Deckung dieser Nachfrage bereitstellt (in diesem Fall Rohwasser). Die Dynamik zwischen diesen drei Elementen hat einen signifikanten Einfluss auf das Systemmanagement. Sie wird durch wirtschaftliche und finanzielle Überlegungen noch verstärkt. Vier Schwerpunkte der bestehenden Verfahren zur Resilienzbeurteilung von Wasserversorgungssystemen sind daher Ökologie, Technik, gesellschaftliche Aspekte und Ökonomie. In den folgenden Abschnitten 2.3.2 bis 2.3.5 werden die Grundlagen der jeweiligen Schwerpunkte der Resilienzbeurteilung aufgezeigt. Zudem werden ausgewählte Beispiele der in der Literatur verfügbaren Verfahren zur Resilienzbeurteilung vorgestellt.

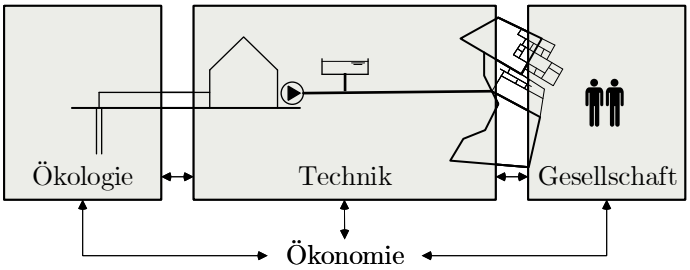


Abbildung 2.5: Zusammenhang der vier Schwerpunkte von bestehenden Verfahren zur Resilienzbeurteilung nach Gay und Sinha (2013)

2.3.2 Ökologiebasierte Verfahren

Ökologiebasierte Verfahren zur Resilienzbeurteilung befassen sich hauptsächlich mit der Verfügbarkeit und Qualität natürlicher Ressourcen und dem Verständnis spezifischer Ökosystemprozesse wie z. B. dem Klimawandel. Die ökologische Resilienz umfasst die Fähigkeit eines Systems, nach Erreichen eines bestimmten Schwellenwerts das Gleichgewicht zu erlangen [Abel et al. 2006]. Dabei wird berücksichtigt, dass Ökosysteme nach einer Beeinträchtigung häufig nicht in den gleichen früheren Zustand zurückkehren, sondern ein neues Gleichgewicht erreichen, wie es in anderen Bereichen, z. B. der Wirtschaft, ebenfalls der Fall ist.

Der ökologische Ansatz zur Resilienzbeurteilung inspirierte insbesondere durch Holling (1973, 1978, 1987) und Holling und Meffe (1996) Entwicklungen im Bereich der technischen Resilienz. Die Grundlage zahlreicher in der Literatur verfügbaren Resilienzkonzepte stellt zudem das von Hashimoto et al. (1982) veröffentlichte Resilienzmaß für Wasserversorgungssysteme dar. Dieses Resilienzmaß basiert auf der Annahme, dass ein Systemausfall das

Auftreten eines unbefriedigenden Zustands des Systems darstellt, der bei Überschreitung eines Schwellenwerts identifiziert wird. Somit ist die Resilienz als die Wahrscheinlichkeit der Wiederherstellung in den zufriedenstellenden Zustand definiert, sobald ein Ausfall bzw. eine Beeinträchtigung aufgetreten ist. Die Zustände werden durch einen Schwellenwert (z. B. eine vertragliche Verpflichtung) bestimmt, der den Übergang zum Systemausfall bzw. zu einer Beeinträchtigung anzeigt. Die Resilienz ist somit größer, je geringer die Wahrscheinlichkeit ist, nach einem Ausfall im unbefriedigenden Zustand zu bleiben, d. h. je höher die Wahrscheinlichkeit einer schnellen Wiederherstellung ist. In diesem Zusammenhang konzentriert sich die Resilienzbeurteilung auf die schnelle Wiederherstellung einer zufriedenstellenden Funktionalität nach einem Systemausfall [Hashimoto et al., 1982].

Fowler et al. (2003) nutzen die von Hashimoto et al. (1982) veröffentlichte Methode, um die Resilienz eines Wasserversorgungssystems bei Dürreereignissen mit verschiedenen Szenarien des Klimawandels zu bewerten. Srdjevic et al. (2004) wenden diese Methode an, um die Resilienz als eine der Eigenschaften für verschiedene Szenarien der Wasserwirtschaft auf der Grundlage von Stauseen, Flussläufen und Wasserverteilung zu betrachten. Asefa et al. (2014) nutzen dahingegen die Bewertung der Resilienz in einem Wasserressourcensystem unter sich ändernden, zukünftigen klimatischen Bedingungen (z. B. monatliche Niederschläge) und Wasserversorgungsbedingungen (z. B. zukünftiger Bedarf, Speicherkapazität und Beschränkung der Oberflächenwasserentnahme) an. Li und Lence (2007) erweitern Hashimotos Resilienzmessung zur Berücksichtigung stochastischer hydrologischer Bedingungen und eines nichtstationären Prozesses der Systemfunktionalität.

2.3.3 Technikorientierte Verfahren

2.3.3.1 Hydraulische Verfahren

Bei der hydraulischen Modellierung werden Wasserversorgungssysteme in Form von Rohrnetzmodellen mit den verschiedenen Netzelementen abgebildet. Auf Basis von Lastfällen wird der hydraulische Systemzustand, d. h. die Druck- und Flussverteilung des Wasserversorgungssystems, mathematisch ermittelt [Klingel, 2018].

Chmielewski et al. (2016) beschreiben eine Vorgehensweise zur Resilienzbeurteilung, bei der physische Schäden und die Funktionalität eines Wasserverteilungssystems als Reaktion auf Naturkatastrophen wie ein Erdbebenereignis mit EPANET modelliert werden. Hierzu wird die Ausfallsicherheit des Systems als Verhältnis des Funktionsniveaus an den Knoten und dem Niveau der Basisfunktionalität oder einem akzeptablen operativen Schwellenwert in Zeitschritten gemessen [Parra et al., 2019]. Die Betrachtung von Ausfällen einzelner Anlagenteile und deren Auswirkungen sind darüber hinaus mit verschiedenen Schwerpunkten vielfach veröffentlicht (z. B. Baños et al. (2011), Ozger und Mays (2003), Prasad und Park (2004), Wagner et al. (1988)).

2.3.3.2 Graphentheoretische Verfahren

Der graphentheoretische Ansatz zur Resilienzbeurteilung kommt bei allen netzbasierten Infrastrukturen (u. a. Wasserversorgung, Abwasserableitung, Energieversorgung, Straßennetze, Telekommunikation) zum Einsatz [Chen, 1990; Matisziw et al., 2009]. Ein Graph ist eine zeichnerische Konstruktion in der Punkte (Knoten) mit spezifizierten Geraden (Kanten) verbunden sind (Abbildung 2.6) [Diestel, 2017].

Angewandt auf die Wasserversorgung ist ein Graph ein Netzwerk, bei dem die Kanten (Leitungen) eine Durchflussmenge transportieren und jede Kante eine Grenzkapazität aufweist [Ahuja et al., 1993]. Der graphentheoretische Ansatz zur Resilienzbeurteilung berücksichtigt die Auswirkungen von zufällig oder bewusst ausgewählten Knoten- oder Kanten-Entfernungen [Dueñas-Osorio et al., 2007]. Die zufällige Entfernung von Elementen wird zur Simulation von Naturereignissen oder anderen Gefährdungen genutzt. Die Eliminierung ausgewählter Knoten und Verbindungen simuliert gezielte Angriffe, die maximale Schäden verursachen sollen [Albert et al., 2000; Callaway et al., 2000; Latora und Marchiori, 2001].

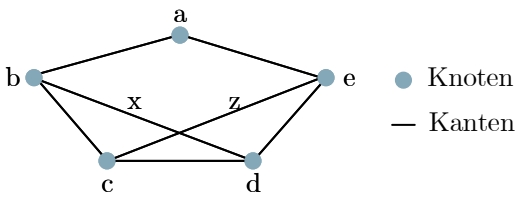


Abbildung 2.6: Beispiel eines Graphen

Graphentheoretische Verfahren werden z. B. in System Dynamics Modellen eingesetzt, um die Versorgungssicherheit zu untersuchen. Gohari et al. (2013) beurteilen die Wahrscheinlichkeit, dass die verfügbaren Wasserressourcen den Bedarf während der gesamten Simulationsperiode decken können, anhand eines Zuverlässigkeitsindex mittels eines System Dynamics Modells. Sie ziehen damit Schlüsse bzgl. der langfristigen Fähigkeit eines Systems eine ausreichende Wasserversorgung zu gewährleisten. Sahin et al. (2017) ermitteln einen Wassersicherheitsindex, der die vorhandene Rohwassermenge in Bezug auf den Wasserbedarf wiedergibt. Bagheri et al. (2010) beurteilen im Kontext des Bam Erdbebens im Iran im Jahr 2003 die Effektivität von getroffenen Wasserversorgungsmaßnahmen in ihrem Krisenindex. Dieser wird durch das Verhältnis des Gesamtverbrauchs und der bereitgestellten Wassermenge ermittelt.

Ein weiteres graphentheoretisches Verfahren ist das *n-1*-Prinzip. Hierbei wird für ein Versorgungssystem ermittelt, welche maximale Anzahl (n) von Versorgungsleitungen entfernt werden können, ohne dass die Versorgung unterbrochen wird [DVGW W 399, 2014; DVGW W 400-1, 2015]. Die Reduktion von $n-1$ Leitungen führt folglich zu einer Unterbrechung der Versorgung [Ostfeld et al., 2002].

Zhuang et al. (2013) koppeln das *n-1*-Prinzip mit einem hydraulischem Modell zur Beurteilung der verfügbaren Wassermenge als Systemresilienz eines Wasserverteilungsnetzes. Dabei wird die Resilienz durch die Differenz zwischen der zugeführten Wassermenge bei

einer Unterbrechung und dem regulären Wasserbedarf ermittelt. Dieses Maß kann auch für die individuelle Knotenverfügbarkeit angewandt werden und liefert Informationen über die Intensität des Systemausfalls.

2.3.4 Gesellschaftsorientierte Verfahren

Die gesellschaftliche Resilienz umfasst unter anderem die Rolle von Akteuren wie Organisationen und Unternehmen [Prud'homme, 2008; Quarantelli, 1998; West und Lenze, 1994], die Reaktion der Gemeinschaft auf Katastrophen [Mileti und Noji, 1999; Paton und Johnston, 2006], das Notfallmanagement und die gesellschaftlichen Auswirkungen von Infrastrukturausfällen [Collins et al., 2011]. Sie ist für die Infrastruktur wichtig, denn das oberste Ziel der zivilen Resilienz ist es, soziale Folgen von Systemausfällen zu minimieren [Gay und Sinha, 2013]. Gemäß Adger (2000) ist die gesellschaftliche Resilienz die Fähigkeit von Gemeinschaften, mit externem Stress und Störungen infolge sozialer, politischer und ökologischer Veränderungen umzugehen. Die Erhaltung der Leistungsfähigkeit der Wasserversorgung ist folglich ein Mittel zur Erreichung eines gesellschaftlichen Ziels.

Die Verwundbarkeit von Bevölkerungsgruppen gegenüber Naturgefahren wurde von Cutter et al. (2003) durch einen Social Vulnerability Index (SoVI) ermittelt. Basierend auf der physikalischen und sozialen Verwundbarkeit wurde ein Verbundindikator entwickelt, anhand dessen die am stärksten für Naturgefahren gefährdeten Gemeinden in den USA identifiziert wurden. Seither wurden weltweit indikatorbasierte Ansätze zur Beurteilung der Vulnerabilität und Resilienz bezüglich verschiedener Gefahren entwickelt (z. B. Birkmann (2007), Forrester et al. (2012), Marzi et al. (2019), Pelling (2006), Williams et al. (2014),). Die umfangreichen Indikatorensysteme zeigen, dass die Vulnerabilität, ebenso wie die Resilienz, ein mehrdimensionales System ist [Yates und Sanjeevi, 2012], sich jedoch auf eine statische Bewertung der Schwächen eines Systems konzentriert [Adger, 2006]. Da sich die Resilienz eher auf die Dynamik eines Systems sowie dessen Erholung bei Schadensereignissen bezieht [Nelson et al., 2007; Paton und Johnston, 2006], variieren die einbezogenen Variablen bei Indikatoren zur Beurteilung der Resilienz im Vergleich zur Beurteilung der Vulnerabilität.

2.3.5 Ökonomiebasierte Verfahren

Ökonomiebasierte Verfahren zur Resilienzbeurteilung basieren auf der Bewertung der finanziellen Auswirkungen von Systemvorbereitungen, -ausfall und -wiederherstellung, wie z. B. Einkommensverluste, Kosten für Vorsorgeplanung und Wiederherstellung sowie wirtschaftliche Auswirkungen auf die Aktivitäten der Gemeinschaft [Jain et al., 2009; Qiao et al., 2007; Vugrin et al., 2010; Weick und Sutcliffe, 2007].

Die bei der wirtschaftlichen Resilienz berücksichtigten Kosten umfassen nicht nur direkte Schäden, sondern auch die Kosten für Anpassung, Vorbereitung und Minderungsoptionen [Vugrin et al., 2010]. Die Bewertung aller indirekten Kosten eines zerstörenden Ereignisses auf Gesellschaftsebene stellt nach wie vor eine Herausforderung dar [Gay und Sinha, 2013]. Die Ausfallkosten werden häufig mit den Kosten der verfügbaren Minderungs-

und Anpassungsoptionen verglichen, einschließlich der Kosten für die Notfallvorsorge und die Opportunitätskosten [Rose, 2004]. Die Auswirkungen von Schadensereignissen werden im Allgemeinen in wirtschaftlicher Hinsicht gemessen und geben Anhaltspunkte für Kosten-Nutzen-Verhältnisse, die Bewertung von Investitionen, Vorsorgekosten und andere Entscheidungsprozesse unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und finanzieller Aspekte [Paton und Johnston, 2006]. Die wirtschaftliche Resilienz ist folglich eine Schlüsselkomponente der sozialen Resilienz von Gemeinschaften [Gay und Sinha, 2013].

2.4 Identifizierte Forschungslücken

Die aufgezeigten Verfahren ermöglichen eine thematisch spezifische Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen. Diese berücksichtigen jedoch nicht die Möglichkeiten beeinträchtigte Teilprozesse durch die Ersatz- und Notwasserversorgung zu substituieren und somit das Wasserversorgungssystem als Ganzes beständiger und robuster gegenüber möglicher Schadensereignissen machen. Des Weiteren werden Prozesse, die zu einer Verbesserung der Anpassungsfähigkeit, Absorptionsfähigkeit und Wiederherstellungsfähigkeit von Wasserversorgungssystemen führen, nicht oder nur teilweise berücksichtigt. Es lassen sich somit im Kontext dieser Dissertation vier wesentliche Forschungslücken identifizieren.

Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen

Die Resilienz von Wasserversorgungssystemen wird in der Literatur insbesondere durch die Widerstandsfähigkeit des Leitungssystems z. B. durch schrittweise Ausfallszenarien (*n-1-Prinzip*) gegenüber verschiedenen Gefahren betrachtet. Der Einsatz von Maßnahmen der Ersatz- bzw. Notwasserversorgung zur Bereitstellung von Trinkwasser als Teil der Wasserversorgung wird derzeit nicht berücksichtigt. Zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen wird ein Verfahren benötigt, die sowohl die Widerstandsfähigkeit der Strukturen während der Normalversorgung sowie die Effektivität der Maßnahmen zur Ersatz- und Notwasserversorgung unter Berücksichtigung der bereitgestellten Wassermenge einschließt.

Versorgungsarten der Ersatz- und Notwasserversorgung

Eine Wasserversorgung, bei der das Wasser über ein Leitungssystem vom Wasserversorger zu den Verbrauchenden gelangt, gilt aus hygienischen sowie aus logistischen Gründen als die sicherste Art der Wasserversorgung. Kann die leitungsgebundene Wasserversorgung nicht aufrechterhalten werden, muss die Umstellung auf eine Ersatz- oder Notversorgung erfolgen. Bei der Ersatzwasserversorgung gelten in Deutschland weiterhin die Vorgaben der Trinkwasserverordnung. Wie die Ersatzversorgung zu erfolgen hat, ist jedoch in der Literatur nicht vertiefend beschrieben. Daher besteht der Bedarf zur Identifizierung von geeigneten Versorgungsarten, der dafür benötigten Rahmenbedingungen sowie den möglichen Einsatzbereichen.

Einsatz von begrenzten Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung

Aufgrund wirtschaftlicher Einschränkungen verfügen die Wasserversorgungsunternehmen nur über begrenzte finanzielle Mittel, um Ressourcen für Notfälle (z. B. mobile

Aufbereitungsanlagen, Speicher- oder Transportkapazitäten) vorzuhalten bzw. bereitzustellen. Zudem obliegt die Verantwortung für die Bewältigung von Notsituationen den Kommunen. Sowohl die Wasserversorgungsunternehmen als auch die Kommunen benötigen szenarienbasierte Betrachtungen zur Steuerung und Priorisierung des Einsatzes vorhandener – jedoch begrenzter – Ressourcen als Grundlage zur Entscheidungsfindung in Notsituationen.

Stand der Notfallvorsorgeplanung

Die Notfallvorsorge als Gesamtheit aller Planungen für die Ersatz- und Notwasserversorgung umfasst zahlreiche Aspekte, die bei einer Unterbrechung des Normalbetriebs Berücksichtigung finden und die Resilienz von Wasserversorgungssystemen erhöhen. Zur Beurteilung des Status Quo der Notfallvorsorgeplanung wird ein Bewertungssystem benötigt, dass die präventiven Maßnahmen, die Festlegung von Ressourcen und Verantwortlichkeiten sowie die Planungen für das Krisenmanagement umfasst.

3 Grundlagen der Ersatz- und Notwasserversorgung

Das Verfahren in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt in Erweiterung zu den in Kapitel 2 aufgezeigten Verfahren den Einfluss der Ersatz- und Notwasserversorgung bei der Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen. Das dritte Kapitel dieser Dissertation umfasst daher die Grundlagen der Ersatz- und Notwasserversorgung und gliedert sich in vier Abschnitte (Abbildung 3.1). Einen Überblick über die zentralen Begriffe in diesem Kontext gibt Abschnitt 3.1. Relevante Teilprozesse und Anlagenteile werden im Abschnitt 3.2 beschrieben. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 3.3 die Versorgungsarten als Kombination der aufgezeigten Teilprozesse klassifiziert. In Abschnitt 3.4 werden anschließend die wesentlichen Aspekte der rechtlichen Rahmenbedingungen dargelegt.

Die klassifizierten Versorgungsarten verdeutlichen die Möglichkeiten des Ressourceneinsatzes für die Ersatz- und Notwasserversorgung und bilden die Basis für das Modell zur Steuerung der begrenzt verfügbaren Ressourcen (Abschnitt 5.2). Aus den in Abschnitt 3.4 aufgezeigten rechtlichen Rahmenbedingungen werden die qualitativen und quantitativen Anforderungen an die Wasserversorgung in Notsituation abgeleitet (Kapitel 4).

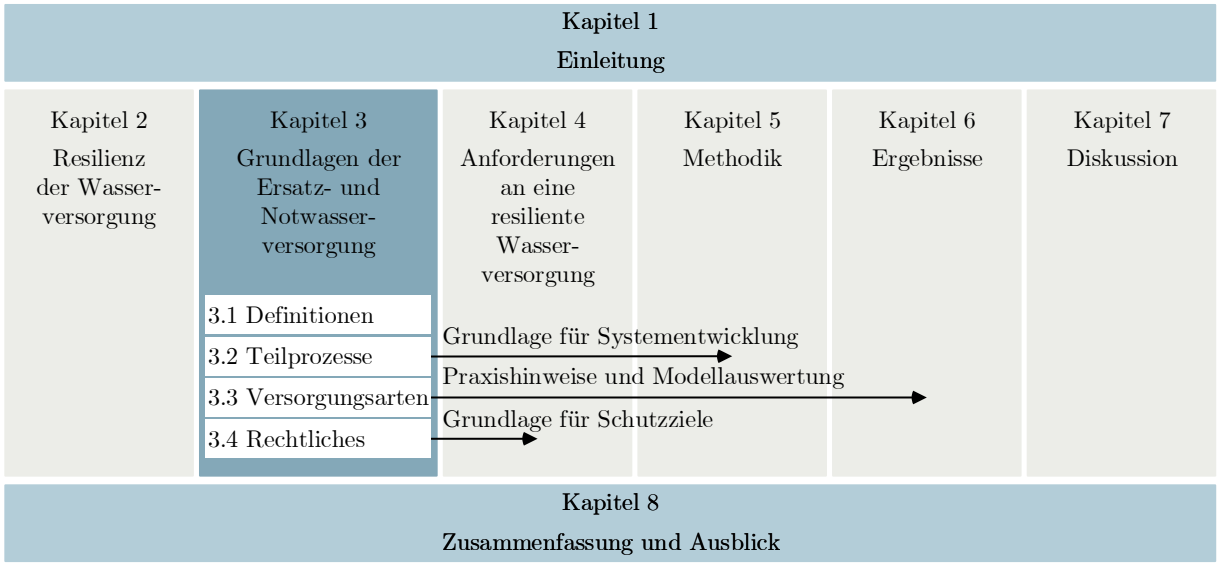


Abbildung 3.1: Aufbau des Kapitels *Grundlagen der Ersatz- und Notwasserversorgung* und Einordnung der Inhalte in die Dissertation

3.1 Definitionen und Überblick

Bei der Wasserversorgung in Notsituationen wird hinsichtlich der Qualität des bereitgestellten Wassers zwischen der Trink-, Ersatz- und Notwasserversorgung unterschieden.

Trinkwasserversorgung

Die Trinkwasserversorgung ist eine Versorgung mit Wasser, welches den Qualitätsanforderungen der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) in ihrer geltenden Fassung entspricht. Hierbei kann es sich auch um Trinkwasser handeln, für das nach den §§ 9 und 10 TrinkwV die Nichteinhaltung von Grenzwerten oder die Nichterfüllung von Anforderungen von der zuständigen Behörde (Gesundheitsamt) zugelassen wurde. Die Gewinnung und Aufbereitung des Wassers, die Verteilung des Trinkwassers sowie der Betrieb der Wasserversorgungsanlagen erfolgen nach den geltenden Rechtsvorschriften und den allgemein anerkannten Regeln der Technik [DIN 2000, 2017]. Durch den Grundsatz der öffentlichen Wasserversorgung gemäß § 50 Abs. 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) wird das Risiko für Beeinträchtigungen dezentralisiert und das Schadensausmaß minimiert. Da es sich bei der Trinkwasserversorgung gemäß § 50 Abs. 1 WHG um eine Aufgabe der Daseinsvorsorge handelt, obliegt diese den Gemeinden.

Ersatzwasserversorgung

Eine Ersatzwasserversorgung stellt gemäß DIN 2001-3 (2015) eine zeitlich begrenzte Bereitstellung von Trinkwasser, das der TrinkwV entspricht, bei Unterbrechung des Normalbetriebs dar. Diese Versorgung erfolgt jedoch mit anderen Ressourcen als im Normalbetrieb. Somit kann für die Versorgung z. B. Wasser aus Notbrunnen eingesetzt werden, welches vor Ort zu Trinkwasser aufbereitet und an die Verbrauchenden leitungsgebunden oder -ungebunden abgegeben wird. Im Falle einer Ersatzversorgung handelt es sich weiterhin um einen Bereich der Daseinsvorsorge, sodass die Vorgaben und Zuständigkeiten gemäß der TrinkwV, des WHG und der Landeswassergesetze gelten. Zudem sind die Katastrophenschutzgesetze der Länder, das Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz (ZSKG) sowie das Wassersicherstellungsgesetz (WasSiG) zu berücksichtigen.

Notwasserversorgung

Von einer Notwasserversorgung wird gesprochen, wenn eine Ersatzwasserversorgung nicht möglich ist und das bereitgestellte Wasser nur zur Deckung des lebensnotwendigen Bedarfs dient. Im Verteidigungsfall sind für eine Notwasserversorgung die allgemeinen Vorgaben des WasSiG sowie die Vorgaben zur Wassermenge gemäß der ersten Wassersicherstellungsverordnung (1. WasSV) und zur Wasserqualität gemäß BMI (2015) zu berücksichtigen.

Für die Planung aller Arten der Versorgung sind der Wasserbedarf und die -abgabe relevante Größen. Im Folgenden werden diese Wassermengen differenziert.

Wasserbedarf

Der Wasserbedarf stellt einen Planungs- bzw. Prognosewert für die voraussichtlich benötigte Wassermenge dar [DVGW, 2017]. Zur Ermittlung des mittleren täglichen Wasserbedarfs ($Q_{d,m}$) wird die Anzahl der Verbrauchenden (E) sowie deren spezifischer Tagesbedarf $q_{d,m}$ zu Grunde gelegt (Gleichung 3.1) [DVGW W 410, 2008]. Der Tagesbedarf kann regional und saisonal variieren [DVGW, 2017]. Für die Ersatz- und Notwasserversorgung sind die in Abschnitt 4.2 aufgeführten quantitativen Anforderungen zu berücksichtigen.

$$Q_{d,m} = E \cdot q_{d,m} \tag{3.1}$$

Wasserabgabe

Die Wasserabgabe stellt die Wassermenge dar, die an die Verbrauchenden abgegeben wird [Baur et al., 2019]. Sie stellt somit die ins Netz eingespeiste Wassermenge abzüglich des Eigenverbrauchs des WVU und Wasserverlusten dar, unter Berücksichtigung von Volumendifferenzen in Speicherbehältern [Grombach et al., 2000].

Analog zur Trinkwasserversorgung im Normalbetrieb werden für die Ersatz- und Notwasserversorgung technische Komponenten zur Gewinnung, Aufbereitung, Verteilung und Speicherung des für die Versorgung vorgesehenen Wassers benötigt [DIN 2001-3, 2015]. Hierbei können neben den für die Normalversorgung eingesetzten Ressourcen auch weitere zum Einsatz kommen.

Ressource

Eine Ressource im Sinne dieser Dissertation ist die technische Ausstattung, die zur Ersatz- oder Notwasserversorgung benötigt wird. Ressourcen umfassen neben dem Wasser selbst, alle Anlagen zur Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung des Wassers. Beispiele für Ressourcen zur Ersatz- oder Notwasserversorgung sind mobile Aufbereitungsanlagen, Transportfahrzeuge sowie mobile Leitungen.

Bei einer Beeinträchtigung oder einem Ausfall der Normalversorgung werden alternative Möglichkeiten zur Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung des Wassers benötigt [AWWA, 2018; DIN 2001-3, 2015]. Abhängig vom Ausmaß der Beeinträchtigung oder des Ausfalls sowie weiteren Rahmenbedingungen, kommen bestimmte Versorgungsarten zur Ersatz- und Notwasserversorgung zum Einsatz.

Versorgungsart

In dieser Dissertation entspricht eine Versorgungsart einer Kombination aus Ressourcen zur Gewinnung, Aufbereitung, Verteilung und Speicherung von Wasser. Als eine Versorgungsart der Ersatz- oder Notwasserversorgung wird z. B. die Versorgung mit Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen betrachtet, bei der das Wasser nach einer mobilen Aufbereitung mit einem Transportfahrzeug zum Abgabeort transportiert und dort an die Verbraucher abgegeben wird.

Für die Versorgung kommt, abhängig vom vorliegenden Schadensereignis und den lokalen Gegebenheiten, meist nur ein Teil der möglichen Versorgungsarten für die Ersatz- und Notwasserversorgung in Frage. Im Folgenden werden die Teilprozesse und Anlagenteile der Wasserversorgung in Notsituationen erläutert. Anschließend werden die aus den eingesetzten Ressourcen abgeleiteten Versorgungsarten und die Voraussetzungen für deren Einsatz aufgezeigt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die Versorgung möglicherweise weitere Ressourcen (z. B. Notstromaggregate oder Pumpen) benötigt werden. Da diese jedoch nicht spezifisch für die Versorgungsarten sind, werden diese bei der Unterscheidung der Versorgungsarten und im Rahmen dieser Dissertation nicht weitergehend betrachtet. An dieser Stelle wird daher auf weiterführende Literatur (z. B. AWWA G440 (2017), BBK (2015a)) verwiesen.

3.2 Teilprozesse und Anlagenteile der Wasserversorgung in Notsituationen

3.2.1 Wassergewinnung

Die Wassergewinnung erfolgt bei der Normalversorgung in der Regel durch Grundwasserfassungen mit Bohrbrunnen, Sickerleitungen und Horizontalfilterbrunnen, Fassungen von Schicht- und Stauquellen, Anlagen zur Gewinnung von Uferfiltrat und zur Grundwasseranreicherung sowie Oberflächenwasserfassungen aus Trinkwassertalsperren, Seen und Flüssen [Baur et al., 2019]. Ausschlaggebend für die zur Wassergewinnung genutzte Wasserart sind die vorherrschenden geologischen, hydrogeologischen und klimatischen Randbedingungen [DIN 2001-1, 2019].

Für die Ersatz- und Notwasserversorgung kommen die dargestellten Rohwässer ebenfalls zum Einsatz [DIN 2001-1, 2019]. Zusätzlich wird in der Ersatz- und Notwasserversorgung bei der Gewinnung zwischen Versorgung mit Wasser aus eigenen Gewinnungsanlagen, Wasser eines anderen Versorgungsunternehmens, Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen und Oberflächenwasser unterschieden [DIN 2001-3, 2015].

Wasser aus eigenen Gewinnungsanlagen

Das für die Versorgung benötigte Wasser kann aus den Gewinnungsanlagen des WVU gewonnen werden, die für die Normalversorgung genutzt werden. Hier müssen diese mindestens teilweise funktionstüchtig sein. Da die eigenen Gewinnungsanlagen in der Regel für den maximal täglichen Wasserbedarf $Q_{d,max}$ (Gleichung 3.2) auslegt sind, stehen hier im Allgemeinen größere Wassermengen zur Verfügung als bei dezentralen Gewinnungsarten. $Q_{d,max}$ ist dabei um den einwohnerabhängigen Spitzentagesfaktor f_d (Gleichung 3.3) größer als $Q_{d,m}$.

$$Q_{d,max} = q_{d,m} \cdot E \cdot f_d \tag{3.2}$$

$$f_d = 3{,}9 \cdot E^{-0{,}0752} \tag{3.3}$$

Wasser eines anderen Versorgungsunternehmen

Ein anderes WVU kann Wasser aus seiner Wasserversorgung bereitstellen [DIN 2001-3, 2015; DVGW, 2017; Morley und Riordan, 2006]. Dies kann notwendig sein, wenn die vorhandene Wassermenge aus den eigenen Gewinnungsanlagen nicht ausreichend ist [Baur et al., 2019].

Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen

Brunnen, Quellen oder andere geeignete Wasserfassungen, die als leitungsunabhängige Anlagen nicht an das Wasserversorgungssystem angeschlossen sind, können bei der Ersatz- oder Notwasserversorgung zur Wassergewinnung genutzt werden [DIN 2001-3, 2015]. Da diese nicht für die Versorgung im Normallfall genutzt werden, sind sie nur selten in Betrieb und fördern in der Regel nur geringe Wassermengen [BBK, 2009b]. Je nach technischer Ausstattung wird das Wasser mit Handpumpen oder elektrisch angetriebenen Pumpen gefördert. Diese haben jedoch in der Regel deutlich geringere Förderleistungen als Pumpen, welche bei Gewinnungsanlagen zur Normalversorgung eingesetzt werden.

Oberflächenwasser

Wasser, das an der Erdoberfläche durch stehende oder fließende Gewässer vorhanden ist, kann als Rohwasserquelle für die Ersatz- oder Notwasserversorgung verwendet werden [DIN 2001-3, 2015]. Die Qualität des Oberflächenwassers schwankt zeitlich sowie räumlich und kann von Witterungseinflüssen abhängig sein [Baur et al., 2019]. Zudem kann die Qualität je nach eingetretenem Schadensereignis (z. B. Hochwasser, Chemieunfall) beeinträchtigt sein [Braubach, 2011]. Daher muss dieses Rohwasser vor der Abgabe an die Verbraucher oder vor der Einspeisung in das Leitungsnetz in jedem Fall aufbereitet und desinfiziert werden [DIN 2001-3, 2015]. Die Wassergewinnungskapazität bei der Verwendung von Oberflächenwasser ist von der Art des Oberflächengewässers und den Kapazitäten der verwendeten Pumpen abhängig und müssen vor der Verwendung durch das WVU ermittelt werden.

Die tägliche Gewinnungskapazität ($C_{Gd,i}$) berechnet sich aus der spezifischen täglichen Kapazität einer Gewinnungsanlage ($c_{Gd,i}$) multipliziert mit der Anzahl der Gewinnungsanlagen ($n_{G,i}$) (Gleichung 3.4). Die Untersuchungen dieser Dissertation berücksichtigen primär die Kapazitäten der Gewinnungsressourcen. Die getroffene Unterscheidung betrachtet folglich nicht die Rohwasserart (Grundwasser oder Oberflächenwasser), sondern die allein durch diese Art der Gewinnung bereitstellbaren Wassermengen.

$$C_{Gd,i} = c_{Gd,i} \cdot n_{G,i} \tag{3.4}$$

3.2.2 Aufbereitung

Das für die Trinkwasserversorgung ideale Rohwasser benötigt in hygienischer, physikalischer und chemischer Hinsicht keinerlei Aufbereitung um die gesetzlichen und sonstigen Qualitätskriterien zu erfüllen [DIN 2000, 2017]. Eine solche ideale Trinkwasserversorgung erfordert

jedoch eine Reihe von natürlichen Randbedingungen wie z. B. gute Filtereigenschaften des Untergrunds und lange Aufenthaltszeiten in diesem [Baur et al., 2019]. Eine Aufbereitung des Rohwassers ist notwendig, wenn solche günstigen natürlichen Randbedingungen nicht gegeben sind [DVGW W 202, 2010].

Aufbereitung

Eine Aufbereitung ist eine Behandlung eines Wassers von minderer Beschaffenheit zur Erzeugung eines Wassers einer gewünschten oder erforderlichen Qualität [DVGW W 202, 2010]. Die Aufbereitung kann in Form einer biologischen, chemischen, physikalischen oder chemisch-physikalischen Behandlung erfolgen. Zur Erzeugung von Trinkwasser wird ein Rohwasser unter Berücksichtigung der Liste der Aufbereitungs- und Desinfektionsstoffe des Umweltbundesamts gemäß §11 der TrinkwV behandelt.

Die Anforderungen an Aufbereitungsanlagen ergeben sich zum einen aus der vorhandenen Rohwasserqualität, zum anderen aus den gesetzlichen Vorgaben der Ersatz- und Notwasserversorgung. Beim Einsatz von Aufbereitungsanlagen wird in dieser Dissertation zwischen stationären und mobilen Aufbereitungsanlagen unterschieden.

Stationäre Aufbereitungsanlagen

Anlagen mit einem festen Einsatzort werden als stationäre Aufbereitungsanlagen bezeichnet. Hierbei handelt es sich insbesondere um die Aufbereitungsanlagen, die WVU im Normalbetrieb zur Aufbereitung des Rohwassers einsetzen. Diese Anlagen können bei Bedarf zur Aufbereitung anderer Rohwässer eingesetzt werden, wenn das Wasser am Standort der stationären Aufbereitungsanlage eingespeist werden kann.

Mobile Aufbereitungsanlagen

Mobile Aufbereitungsanlagen sind Anlagen mit einem variablen Aufstellungs- und Einsatzort. Diese Anlagen müssen uneingeschränkt transportierbar, aufstellbar und für den Betrieb einsetzbar sein, um bei einer Vielzahl von Schadensereignissen zum Einsatz kommen zu können [DIN 2001-3, 2015].

Stationäre und mobile Anlagen unterscheiden sich zudem durch die jeweilige Aufbereitungskapazität. Die tägliche Aufbereitungskapazität ($C_{Ad,i}$) wird durch die stündliche Aufbereitungskapazität einer Aufbereitungsanlage ($c_{Ah,i}$), ihrer Betriebsdauer ($t_{Ad,i}$) sowie die Anzahl der Aufbereitungsanlagen ($n_{A,i}$) berechnet (Gleichung 3.5). Die Aufbereitungskapazität wird in dieser Dissertation unabhängig von der Rohwasserqualität und der benötigten Reinwasserqualität betrachtet.

$$C_{Ad,i} = c_{Ah,i} \cdot t_{Ad,i} \cdot n_{A,i} \tag{3.5}$$

3.2.3 Wasserverteilung

Die Wasserverteilung wird als Sammelbegriff für die Förderung und den Transport des Wassers von der Gewinnung bzw. Aufbereitung zum Verbrauchsort verstanden [DVGW

W 400-1, 2015]. Im Normalbetrieb erfolgt die Verteilung des Trinkwassers durch ein fest installiertes, unterirdisch verlegtes Wasserverteilungssystem [Baur et al., 2019; DVGW W 410, 2008]. In Abbildung 3.2 ist ein Beispiel für ein Wasserverteilungssystem dargestellt.

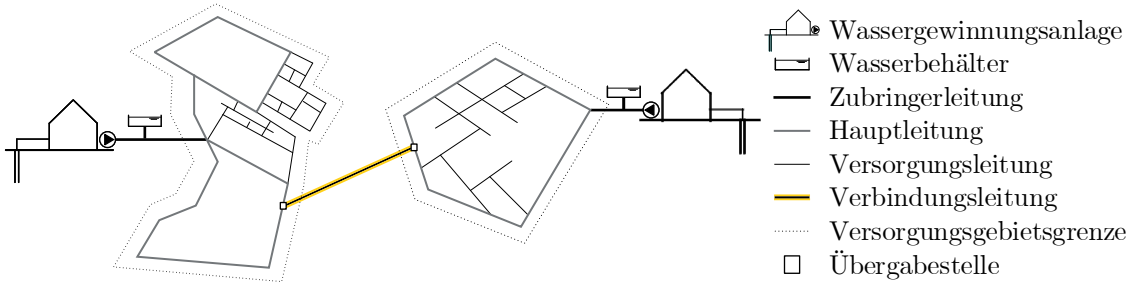


Abbildung 3.2: Beispiel eines Wasserverteilungssystem in Anlehnung an DVGW W 400-1 (2015)

Bei der Ersatz- und Notwasserversorgung kommen zur Wasserverteilung zudem Verbindungsleitungen zu anderen Wasserversorgern, mobile Leitungen sowie Transportfahrzeuge zum Einsatz [DIN 2001-3, 2015]. Zur Verteilung muss das Wasser in der Regel von der Fassungsanlage zur Aufbereitung, von den zentralen Speicherbehältern direkt in das Wasserverteilungsnetz oder über die weitere Verteilung mittels mobiler Leitungen oder Transportfahrzeugen in die dezentralen Speicherbehälter gefördert werden [DIN 2001-3, 2015].

3.2.3.1 Verteilung mittels Verbindungsleitungen

Reicht die bereitstellbare Trinkwassermenge des eigenen WVU z. B. aufgrund einer Beeinträchtigung der eigenen Gewinnungs- oder Aufbereitungsanlage nicht zur Deckung des Wasserbedarfs aus, so kann Wasser eines anderen Versorgungsunternehmen durch Verbindungsleitungen in das Versorgungsnetz eingespeist werden.

Verbindungsleitungen

Verbindungsleitungen sind fest installierte Leitungen, die zwei Wasserversorgungssysteme miteinander verbinden (Abbildung 3.2) [DVGW W 400-1, 2015]. Entlang der Verbindungsleitungen sind keine Endverbraucher angeschlossen, da diese außerhalb der Versorgungsgebiete liegen.

Diese Leitungen schaffen zwischen zwei WVU eine beidseitige Rückfallebene bei Beeinträchtigung der Rohwasserquellen oder der Wasseraufbereitung [Boyle, 1980; Klingel, 2018]. Verbindungsleitungen können als „trockene“ oder als „nasse“ Leitungen betrieben werden. Trockene Verbindungsleitungen sind reine Notfallverbindungsleitungen, die nur im Notfall in Betrieb genommen werden [Boyle, 1980]. Während des Normalbetriebs werden diese trocken gehalten. Nasse Verbindungsleitungen dienen auch im Normalbetrieb zur Wasserverteilung.

Die Verbindungsleitungen sind anhand des benötigten Durchflusses (Q_{VL}) sowie des Drucks bemessen. Der Durchfluss wird vereinfacht über das stationäre Fließen im Rohr

berechnet, wobei keine Änderung der Fließgeschwindigkeit erfolgt. Wasser gilt für stationäre Verhältnisse näherungsweise als inkompressibles Fluid mit konstanter Dichte. Gemäß des Prinzips der Massenerhaltung bzw. der Kontinuitätsgleichung (Gleichung 3.6) ist der Durchfluss Q_{VL} durch zwei Rohrquerschnitte (A_i) eines mit Wasser vollgefülltem Rohres mit einer Fließgeschwindigkeit (v_i) konstant. Die Betrachtung des Versorgungsdrucks wird in dieser Dissertation vernachlässigt, da dieser im entwickelten Modell nicht berücksichtigt wird. Dennoch stellt dieser für die Planung der Ersatz- und Notwasserversorgung eine relevante Einflussgröße dar. In dieser Dissertation wird Q_{VL}, als für das Versorgungssystem bekannt, angenommen.

$$Q_{VL} = v_{VL,i} \cdot A_{VL,i} = konstant \tag{3.6}$$

3.2.3.2 Verteilung mittels mobiler Leitungen

Die Verteilung kann alternativ mittels mobiler Leitungen erfolgen, die in der Regel zur Überbrückung von Leitungsabschnitten eingesetzt werden.

Mobile Leitungen

Als mobile Leitungen werden nicht fest verlegte Leitungen bezeichnet, die im Einsatzfall oberirdisch verlegt werden [DIN 2001-3, 2015]. Diese mobilen Leitungen werden umgangssprachlich auch als „fliegende Leitungen“ bezeichnet.

Die Kapazität der mobilen Leitungen ($Q_{d,mL}$) ist der spezifischen täglichen Kapazität einer Anlage ($q_{d,mL}$), deren Betriebsdauer ($t_{mLd,i}$) sowie der Anzahl parallel genutzten der mobilen Leitungen ($n_{mL,i}$) abhängig (Gleichung 3.7). Der spezifische Durchfluss ($q_{d,mL}$) wird für mobile Leitungen durch die Kontinuitätsgleichung aus dem Produkt der Fließgeschwindigkeit ($v_{mL,i}$) und der Fläche des Rohrquerschnitts der mobilen Leitung ($A_{mL,i}$) angenähert (Gleichung 3.8) und in dieser Dissertation als gegeben angenommen. Der Versorgungsdruck wird bei der Betrachtung von mobilen Leitungen im entwickelten Modell vernachlässigt, ist jedoch bei der Umsetzungsplanung der Ersatz- und Notwasserversorgung ein maßgeblicher Einflussfaktor.

$$Q_{d,mL} = q_{d,mL} \cdot t_{mLd,i} \cdot n_{mL,i} \tag{3.7}$$

$$q_{d,mL} = v_{mL,i} \cdot A_{mL,i} = konstant \tag{3.8}$$

3.2.3.3 Verteilung mittels Transportfahrzeugen

Netzabschnitte können durch die Verteilung des Wassers mittels Transportfahrzeugen überbrückt werden, wenn dies aufgrund der zu überbrückenden Distanz oder mangels Kapazitäten der mobilen Leitungen nicht möglich ist.

Transportfahrzeuge

Trinkwassertransportfahrzeuge dienen dem Transport von Wasser sowohl für eine anschließende Einspeisung in das bestehende Leitungsnetz oder Hochbehälter als

auch für den Transport zu den Abgabestellen für die Holversorgung [DIN 2001-3, 2015]. Der Begriff Trinkwassertransportfahrzeug dient als Sammelbegriff für Fahrzeuge, die zum Transport von Wasser verwendet werden, wie z. B. Zugfahrzeuge mit Anhängern verschiedener Größe. Wenngleich der Begriff Trinkwassertransport impliziert, dass es sich um den reinen Transport von Trinkwasser handelt, wird das Wasser je nach Planung vor oder nach dem Transport aufbereitet. Folglich kommen Trinkwassertransportfahrzeuge zum Transport von Rohwasser, als auch von Reinwasser zum Einsatz.

Zur Ermittlung der Verteilungskapazität durch Transportfahrzeuge ($C_{Td,i}$) werden die Anzahl der Transportfahrzeuge ($n_{T,i}$), das Fassungsvermögen eines Transportfahrzeugs ($V_{T,i}$) sowie deren Betriebsdauer ($t_{Td,i}$) und die Dauer einer Tour ($t_{T,i}$) berücksichtigt (Gleichung 3.9).

$$C_{Td,i} = n_{T,i} \cdot V_{T,i} \cdot t_{Td,i} \cdot t_{T,i} \tag{3.9}$$

3.2.4 Abgabe

Die Abgabe des Wassers an den Verbraucher erfolgt bei der Ersatz- und Notwasserversorgung entweder, wie bei der Normalversorgung, leitungsgebunden über das zentrale Leitungsnetz oder in Form einer leitungsungebunden Holversorgung [DIN 2001-3, 2015]. Leitungsgebundene Versorgungsarten sind u. a. aufgrund von hygienischen Aspekten den leitungsungebundenen Versorgungsarten vorzuziehen. Insbesondere bei der Holversorgung besteht die Gefahr von Verschmutzung oder Verkeimung des Wassers aufgrund von mangelhaften Transportgefäßen.

Einspeisung in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter

Bei der vollständigen oder teilweisen Funktionstüchtigkeit des Leitungsnetzes kann eine Überbrückung von Leitungsabschnitten erfolgen und das Wasser in das Leitungsnetz oder in einen Speicherbehälter eingespeist werden [DIN 2001-3, 2015]. Die Abgabe des Wassers an die Verbrauchenden erfolgt anschließend über das zentrale leitungsgebundene Verteilungssystem.

Direkte, nicht abgepackte Abgabe an die Verbrauchenden

Die Abgabe des Wassers kann als sogenannte Holversorgung umgesetzt werden [BBK, 2009b]. Dabei wird das Wasser direkt an die Verbrauchenden, z. B. mittels Gruppenzapfstellen, abgegeben, ohne dass es abgepackt wurde [BBK, 2009a]. Anschließend wird das Wasser durch den Verbrauchenden selbst in Behältnissen transportiert.

Direkte Abgabe von abgepacktem Wasser an die Verbrauchenden

Wasser kann durch Abfüllanlagen in verschiedene Behältnisse abgepackt werden [DIN 2001-3, 2015]. Dafür kommen Flaschen, Kanister aber auch einfache Beutel zum Einsatz, welche direkt an den Verbrauchenden ausgehändigt werden.

Die Einspeisekapazität in das Leitungsnetz oder in den Hochbehälter sind von zahlreichen Faktoren (z. B. Füllstand des Hochbehälters zum Einspeisezeitpunkt) abhängig. Die Kapazität der direkten, nicht abgepackten Abgabe ergibt sich u. a. aus der Anzahl der Gruppenzapfstellen und deren Zapfhähne, der Fließgeschwindigkeit bei Entnahme und von der Betriebsdauer. In dieser Dissertation wird angenommen, dass diese Kapazitäten größer sind als der jeweilige Wasserbedarf.

Zur Berechnung der Kapazität von Abfüllanlagen ($C_{AAd,i}$) werden deren Anzahl ($n_{AA,i}$), die spezifische stündliche Kapazität einer Anlage ($c_{AAd,i}$) sowie deren Betriebsdauer ($t_{AAd,i}$) multipliziert (Gleichung 3.10).

$$C_{AAd,i} = n_{AA,i} \cdot c_{AAd,i} \cdot t_{AAd,i} \tag{3.10}$$

3.2.5 Speicherung

Die Wasserspeicherung hat die Zielsetzung, als Ausgleich zwischen Gewinnung und Abgabe zu dienen, Reserven vorzuhalten und die anschließende Weiterverteilung bzw. Abgabe zu entkoppeln [Baur et al., 2019; Klingel, 2018]. Je nach Versorgungsplanung wird das Wasser vor oder nach der Aufbereitung gespeichert [DIN 2001-3, 2015]. Zudem können die Speicher sowohl zentral als auch dezentral eingesetzt werden.

Zentrale Rohwasserspeicherung
: Eine zentrale Rohwasserspeicherung stellt die Speicherung des Rohwassers direkt am Gewinnungsort dar. Das Wasser wird anschließend aufbereitet und verteilt. Diese Art der Speicherung erfolgt aus hygienischen und technischen Gründen bei der Normalversorgung nur in seltenen Fällen.

Zentrale Reinwasserspeicherung
: Bei der zentralen Reinwasserspeicherung wird das Wasser am Gewinnungsort vor der Speicherung aufbereitet und anschließend zentral gespeichert.

Dezentrale Reinwasserspeicherung
: Dezentrale Reinwasserspeicher dienen der Speicherung von aufbereitetem Wasser nach der Verteilung.

3.3 Klassifizierung von Versorgungsarten

Die Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten der Teilprozesse der Ersatz- und Notwasserversorgung wird im Folgenden klassifiziert. Hierbei in Abschnitt 3.3.1 wird zunächst aufgezeigt, wie die Versorgungsarten gemäß DIN 2001-3 (2015) bestimmten Kriterien zugeordnet sind. Anschließend wird in Abschnitt 3.3.2 eine weitergehende Klassifizierung aufgezeigt. Diese wird in den anschließenden Kapiteln beibehalten.

3.3.1 Versorgungsarten gemäß DIN 2001-3 (2015)

Die Versorgungsarten sind gemäß DIN 2001-3 (2015) nach der Trink-, Ersatz- und Notwasserversorgung differenziert (Abbildung 3.3). Lediglich Trinkwasser (ohne eine Angabe der Herkunft) sowie Wasser eines anderen Wasserversorgers soll bzw. kann auf festen Leitungswegen bereitgestellt werden. Die Versorgung mit Wasser aus Notbrunnen sowie Oberflächenwasser erfolgt nach der Aufbereitung und Desinfektion ausschließlich durch eine Holversorgung an Gruppenzapfstellen oder über eine Direkteinspeisung in Gebäude. Eine derartige Unterscheidung der Versorgungsmöglichkeiten ohne weitere Klassifizierung erfolgt u. a. in AWWA (2018), Petermann et al. (2011) und TAB (2010).

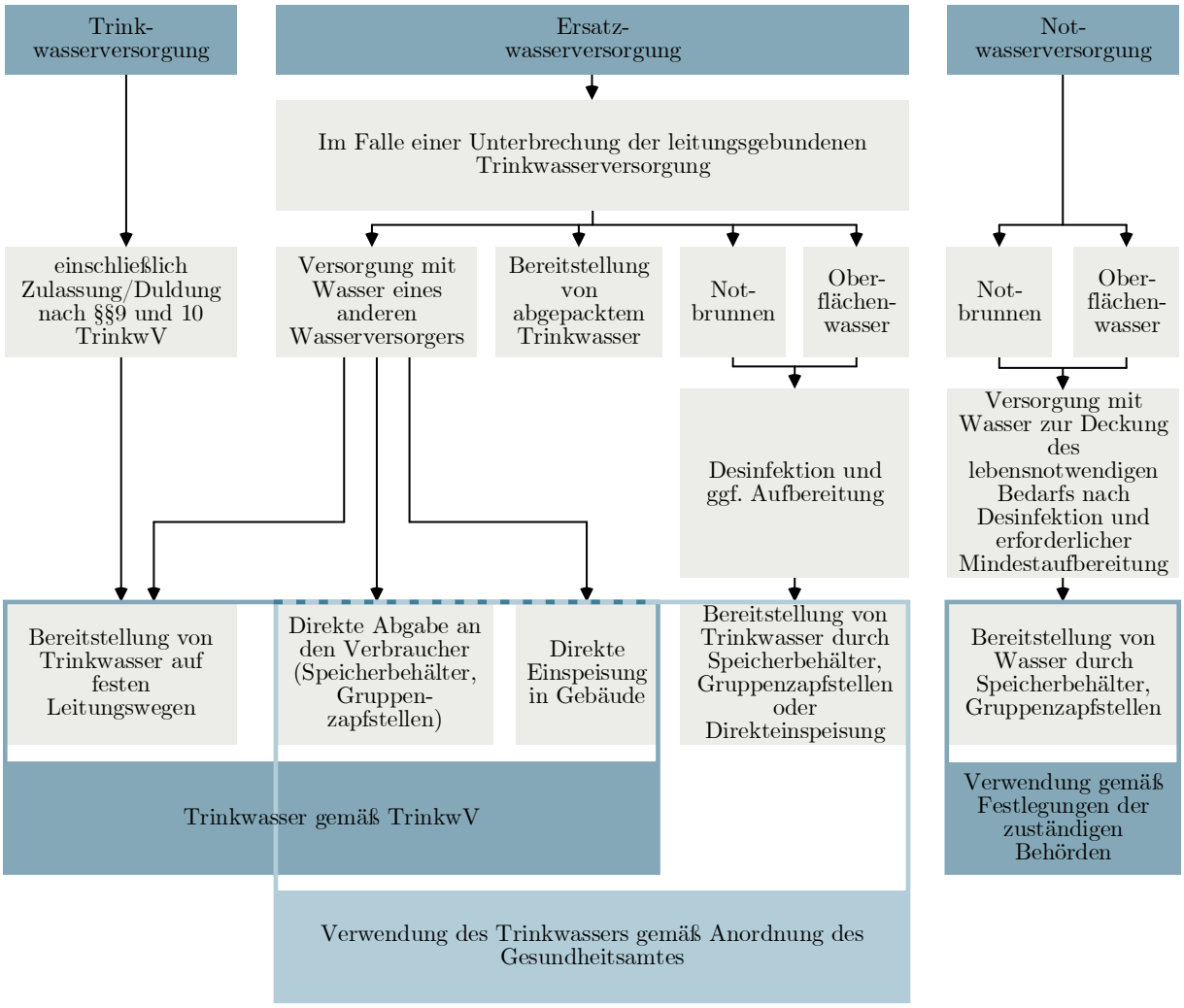


Abbildung 3.3: Übersicht der Versorgungsarten in Anlehnung an DIN 2001-3 (2015)

3.3.2 Versorgungsarten in dieser Dissertation

Anhand der in Abschnitt 3.2 aufgezeigten Möglichkeiten der Wassergewinnung, der Verteilung und der Abgabe lassen sich 19 Versorgungsarten ableiten. Die Versorgungsarten werden nach der Art der Gewinnung, der Verteilung und der Abgabe differenziert und zur eindeutigen Kennzeichnung mit jeweils einer Ziffer (1 bis 4) und einem Buchstaben (a bis e)

versehen. Die Ziffern entsprechen dabei jeweils einer Art bzw. Herkunft des Wassers. Die Buchstaben dienen der Unterscheidung der Versorgungsarten danach, wie das Wasser zu den Verbrauchenden gelangt.

FF 1.1: Welche Ressourcen werden für die verschiedenen Versorgungsarten benötigt?

Durch die Klassifizierung wird die Gesamtheit der Versorgungsarten in ihrer Komplexität reduziert und in übersichtlicher Form dargestellt. Anhand der Darstellung und eindeutigen Bezeichnung können die benötigten Ressourcen (gemäß Abschnitt 3.2) identifiziert werden. Weitere Materialien (z. B. Druckerhöhungsanlagen) werden in Abhängigkeit der Struktur des Versorgungssystems benötigt.

Tabelle 3.1: Klassifizierung der Versorgungsarten der Ersatz- und Notwasserversorgung

		Gewinnung			
		Wasser aus eigener Gewinnungs-anlage 1	Wasser eines anderen Versorgers 2	Wasser aus leitungs-unabhängigen Brunnen 3	Wasser aus Oberflächen-gewässern 4
Verteilung	Verbindungs-leitung	2a			
	mobile Leitungen	1a	2b	3a	4a
	Transport-fahrzeuge	1b 1c	2c 2d	3b 3d	4b 4d
	keine Verteilung durch WVU[a]	1d	2e	3c 3e	4c 4e
Abgabe	Einspeisung in Versorgungssystem[b]	1a 1b 2a	2b 2c	3a 3b	4a 4b
	direkte Abgabe[c]	1c	2d	3c 3d	4c 4d
	Abfüll-anlage[c]	1d	2e	3e	4e

[a] Abgabe in Form einer Holversorgung am Ort der Gewinnung

[b] leitungsgebundene Versorgungsarten

[c] leitungsungebundene Versorgungsarten

3.4 Rechtliche Rahmenbedingungen und Verantwortlichkeiten bei der Wasserversorgung in Notsituationen

Die der Allgemeinheit dienende Wasserversorgung ist in der Bundesrepublik Deutschland eine Aufgabe der Gemeinden. Als Teil der kommunalen Daseinsvorsorge ist diese Aufgabe im Rahmen der Selbstverwaltungsgarantie Art. 28 Abs. 2 GG verankert. Ergänzend hierzu

hat die öffentliche Wasserversorgung gemäß § 50 Abs. 1 WHG einen hohen gesellschaftlichen Stellenwert und genießt eine Vorrangstellung vor anderen Wassernutzungen. Die Pflichtaufgabe der Wasserversorgung können die Gemeinden entweder selbst umsetzen (öffentlich-rechtliche Form) oder auf privat-rechtlich organisierte Unternehmen übertragen [Thimet und Krause, 2017]. Bei letztgenannter Variante verbleibt die Daseinsvorsorge dennoch weiterhin Pflichtaufgabe der Gemeinden.

In Notsituationen der Wasserversorgung, deren Bewältigung mit den normalen Ablauf- und Aufbauorganisationen des Wasserversorgungsunternehmen nicht möglich ist, verändern sich die Verantwortlichkeiten. Die Abbildung 3.4 zeigt die Verantwortlichkeiten abhängig vom Ausmaß der Notsituation.

Benötigt der Betreiber der Wasserversorgungsanlage für die Ersatzwasserversorgung mehr als die üblichen Betriebsmittel zur Bewältigung der Situation, handelt es sich nicht mehr um den sogenannten Normalbetrieb, sondern je nach Ausmaß des Schadensereignisses um einen Notfall, eine Krise oder einen Katastrophenfall [DIN EN 15975-1, 2016]. Die Begriffe Notfall, Krise sowie Katastrophe bezeichnen verschiedene Schadensereignisse und stehen in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Dies gilt zum einen bezüglich des zu erwartenden oder bereits eingetretenen Schadensausmaßes, das vom Notfall über die Krise zur Katastrophe zunimmt (Tabelle A.1 im Anhang). Zum anderen gilt dies hinsichtlich der Art und Weise, wie den betreffenden Situationen begegnet werden kann.

Die Wasserversorgung im Verteidigungsfall ist nach dem WasSiG eine Maßnahme des Bevölkerungsschutzes. Gemäß BBK (2011) bezeichnet der Bevölkerungsschutz die Summe aller Aufgaben und Maßnahmen des Bundes im Zivilschutz sowie der Kommunen und der Länder im Katastrophenschutz. Dies umfasst neben Maßnahmen zur Bewältigung der genannten Ereignisse auch Maßnahmen zu deren Vermeidung sowie Minimierung ihrer Auswirkungen.

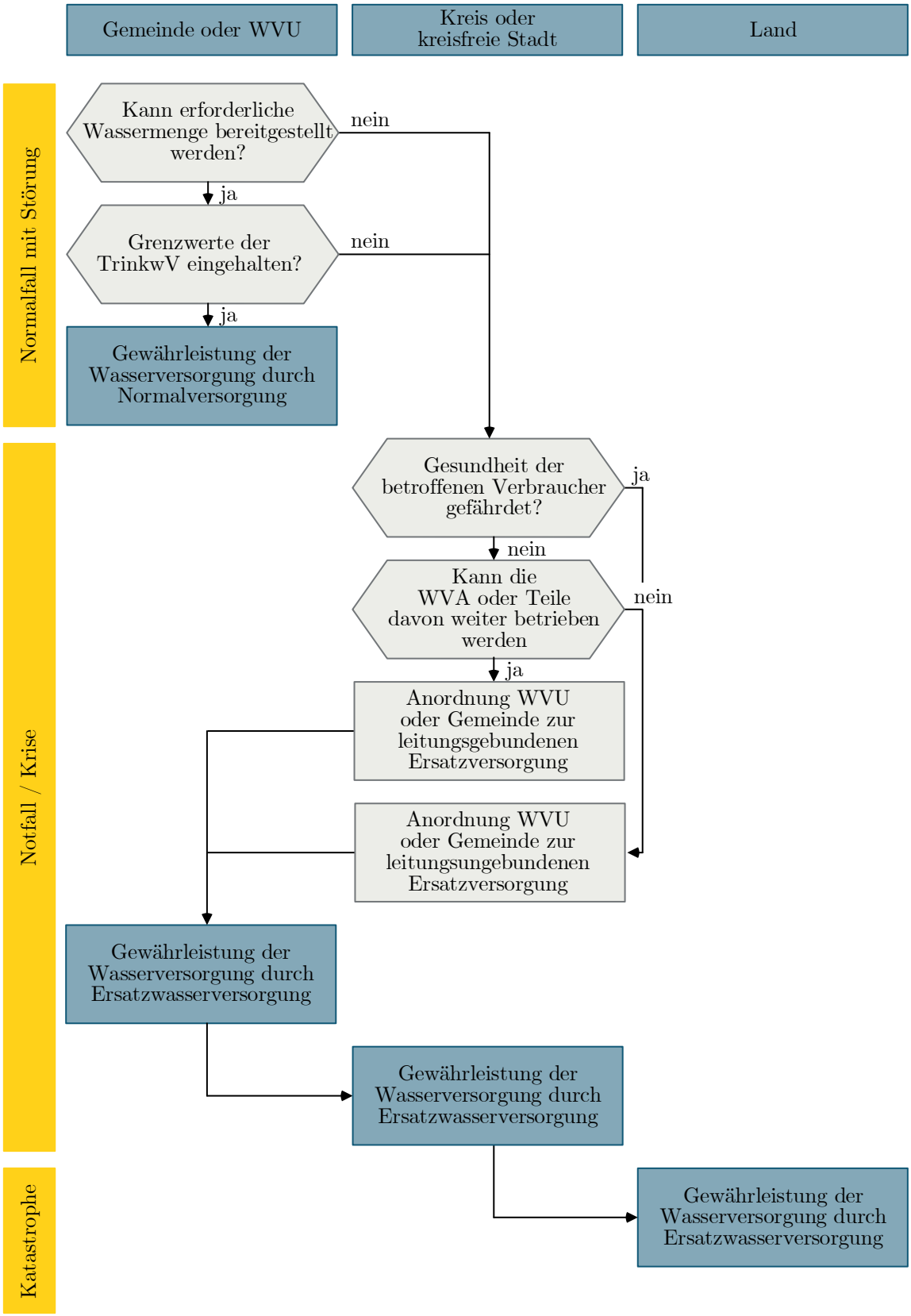


Abbildung 3.4: Verantwortlichkeiten abhängig vom Ausmaß der Notsituation gemäß DIN 2001-1 (2019), TrinkwV und ZSKG

4 Anforderungen an eine resiliente Wasserversorgung in Notsituationen

Zur Beurteilung der Resilienz erfolgt ein Abgleich des vorherrschenden Systems mit definierten Zielgrößen. Die Zielgrößen im Kontext dieser Dissertation werden in diesem vierten Kapitel durch die Anforderungen an die Wasserversorgung in Notsituationen aufgezeigt und in vier Abschnitte gegliedert (Abbildung 4.1). Abschnitt 4.1 widmet sich einleitend der Unterscheidung von Mindestversorgungsstandards und Schutzzielen, wobei die Ableitung der Anforderungen sowohl durch *Bottom-Up* als auch *Top-Down* Ansätze erfolgen kann. In den Abschnitten 4.2 und 4.3 werden anschließend die quantitativen und qualitativen Anforderungen benannt. Ergänzend behandelt Abschnitt 4.4 die Anforderungen an eine effektive Notfallvorsorgeplanung.

Die Inhalte dieses Kapitels bilden die Zielgrößen für das Verfahren zur Beurteilung der Resilienz und fließen insbesondere in das System Dynamics Modell zur Steuerung des Umgangs mit begrenzten Ressourcen (Abschnitt 5.2, 6.2 und 7.2) sowie den Notfallvorsorgeplanungsindikator (Abschnitt 5.3, 6.3 und 7.3) ein.

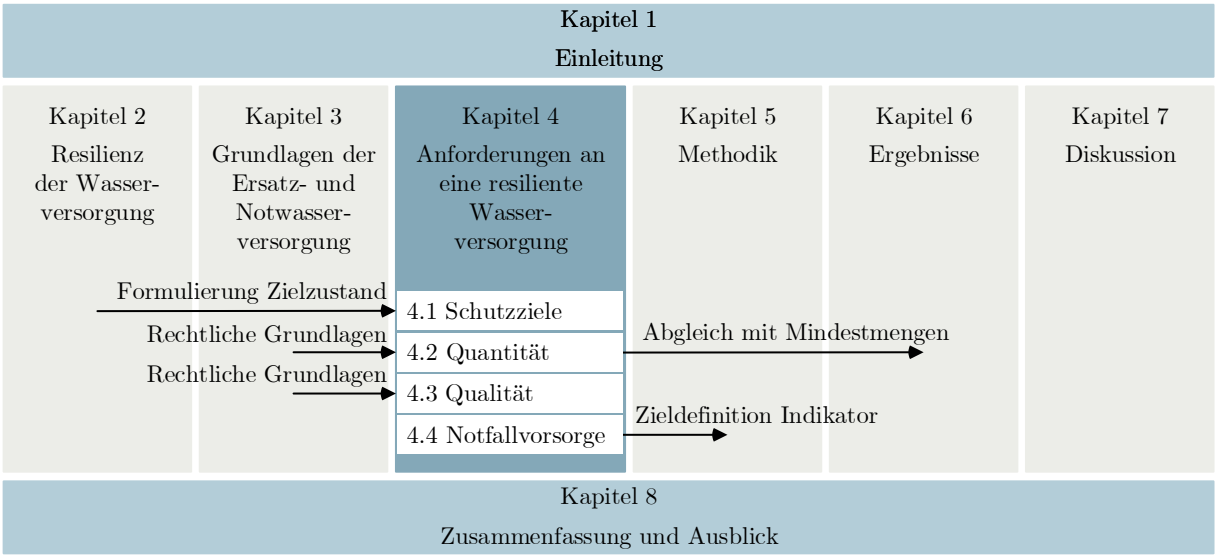


Abbildung 4.1: Aufbau des Kapitels *Anforderungen an eine resiliente Wasserversorgung* und Einordnung der Inhalte in die Dissertation

4.1 Schutzziele und Mindestversorgungsstandards für die Wasserversorgung in Notsituationen

Schutzziele sind die implizite oder explizite Festlegung von Grenzwerten oder abgeleiteten Schwellenwerten. Sie dienen der Zielvereinbarung zum Schutz der Bevölkerung und sind somit Teil des gesellschaftlichen Umgangs mit Risiken [BMI, 2009; Lauwe und Mayer, 2017]. Als angestrebte Sollzustände dienen sie der Evaluation von umgesetzten oder geplanten Maßnahmen [BBK, 2011]. Die Schwellenwerte betreffen in der Trinkwasserversorgung sowohl die Wasserqualität (qualitative Schutzziele) als auch die Wassermenge (quantitative Schutzziele). Des Weiteren können Schutzziele bezüglich der Realisierungsphase der Aufrechterhaltung von Maßnahmen sowie der Ausfallzeit definiert sein.

Die Schutzzielsystematik nach BMI (2009) unterscheidet zwischen strategischen und operationalisierten Schutzzielen. Strategische Schutzziele stellen übergeordnete Zielsetzungen mit einer abstrakten Formulierung dar. Das strategische, übergeordnete Schutzziel im Bereich der Wasserversorgung ist die körperliche Unversehrtheit der gesamten Bevölkerung und Nutztierpopulation durch die Versorgung mit Trinkwasser [AWWA, 2018; Lauwe und Mayer, 2017]. Im Vergleich zu strategischen Schutzzielen sind operationalisierte Schutzziele konkret formuliert und können sowohl die Vorbeugung von Schadensereignissen als auch die Vorbereitung auf Notfälle adressieren [BMI, 2009]. Durch die konkrete Formulierung und die Hinterlegung von Schwellenwerten kann aus operationalisierten Schutzzielen das vorherrschende Schutzniveau ermittelt und folglich Schutzmaßnahmen abgeleitet werden [Lauwe und Mayer, 2017]. Ein konkret formuliertes, operationalisiertes Schutzziel im Bereich der Wasserversorgung ist die Gewährleistung einer kontinuierlichen Versorgung der Bevölkerung und der Nutztierpopulation mit einer ausreichenden Wassermenge in einer ausreichenden Qualität [AWWA, 2018]. Das WVU legt in der Regel selbst fest, welche operationalisierten Schutzziele gewährleistet werden sollen [Heyen, 2013]. Hierbei werden sowohl die Dauer des Ausfalls als auch die Auswirkungen für das Versorgungsnetz (z. B. Druckmangel, Anzahl der betroffenen Einwohner, nicht gelieferte Wassermenge) betrachtet [DVGW W 400-1, 2015].

Mindestversorgungsstandards sind per Definition eine mindestens benötigte Menge oder Qualität eines gewissen Guts (z. B. Trinkwasser) [Sphere Association, 2018]. Im Kontext der humanitären Hilfe werden für die Trinkwasserversorgung häufig überlebensnotwendige Mindestversorgungsstandards angegeben [UNHCR, 1992].

Die Ermittlung der benötigten Wassermenge kann anhand eines *Bottom-Up*-Ansatzes sowie durch einen *Top-Down*-Ansatz durchgeführt werden (Abbildung 4.2). Bei der Formulierung der lebensnotwendigen Wassermenge wird ein *Bottom-Up*-Ansatz angewandt. Hier wird davon ausgegangen, dass eine Mindestwassermenge von den Verbrauchenden benötigt wird, die als untere Grenze festgelegt wird. Bei der Bestimmung von akzeptablen Einbußen bzgl. der Menge oder der Qualität des Wassers wird hingegen ein *Top-Down*-Ansatz angewandt. Dieser betrachtet die technischen Mindestwassermengen zur Aufrechterhaltung eines Systems bzw. zur Vermeidung des „Point of no return“ [Bross, Krause et al., 2019]. Der *Bottom-Up*-Ansatz orientiert sich somit an den Anforderungen durch die Verbraucher.

Im Gegensatz dazu basiert der *Top-Down*-Ansatz auf den Anforderungen des technischen Systems, insbesondere dem Wasserverteilungsnetz.

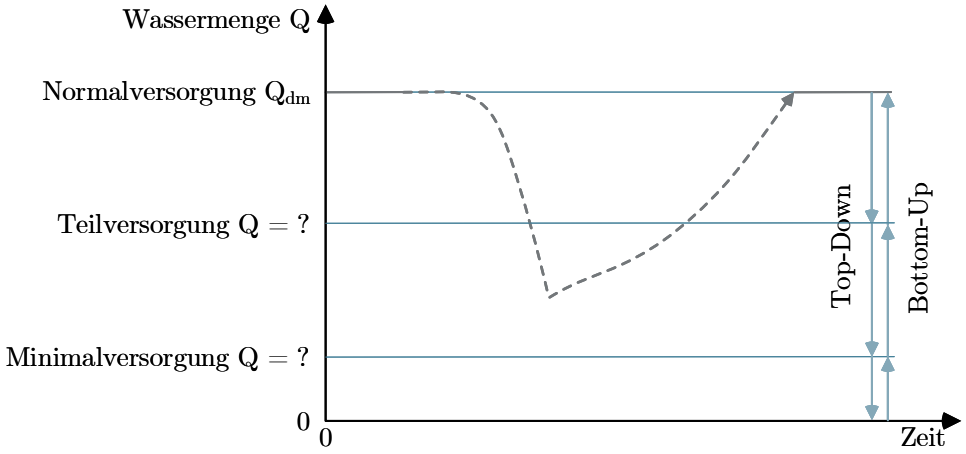


Abbildung 4.2: *Top-Down* und *Bottom-Up*-Ansatz der benötigten Wassermenge

4.2 Quantitative Anforderungen an die Wasserversorgung in Notsituationen

4.2.1 Anforderungen an die leitungsgebundene Wasserversorgung der Bevölkerung

Im Normalbetrieb gelten für die zentrale Trinkwasserversorgung die Vorgaben der DIN 2000 (2017) und der AVBWasserV, mit einer Planungsgrundlage für den mittleren einwohnerbezogenen Tagesbedarf ($q_{d,m}$) gemäß DVGW W 410 (2008) in Höhe von 120 l/(P·d). Sowohl aus der DIN 2000 (2017) als auch der AVBWasserV geht dabei hervor, dass die Versorgungssicherheit das oberste Ziel für die zentrale Wasserversorgung darstellt.

Die leitungsgebundene Wasserversorgung sollte, sofern möglich, aufrechterhalten werden, auch wenn das Wasser keine Trinkwasserqualität hat. Dies kann durch eine leitungsgebundene Versorgung mit Brauchwasser erfolgen. Bei Brauchwasser handelt es sich gemäß DIN 4046 (1983) um „Wasser, das einer spezifischen technischen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder hauswirtschaftlichen Anwendung dient und nicht für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasser) vorgesehen ist“. Nur so kann die Abwasserentsorgung – insbesondere eine sichere Beseitigung von Fäkalien – gewährleistet werden. Sofern die Qualität des Leitungswassers auch nach Abkochen menschlichen Genuss nicht mehr zulässt, muss die Trinkwasserversorgung leitungsungebunden erfolgen.

Durch ein zu geringes Wasservolumen im System kann es aufgrund von Unterdruck zum Eintrag von Verunreinigungen kommen. Für den Betrieb der leitungsgebundenen Versorgung ist daher zur Vermeidung von hygienischen und technischen Problemen eine systemabhängige Mindestwassermenge notwendig. Dieses Volumen ist von verschiedenen Faktoren wie dem Aufbau des Versorgungsnetzes, dem Versorgungsdruck und der Möglichkeit der temporären Abtrennung von Teilbereichen abhängig und vom WVU auf

Basis von hydraulischen Rohrnetzberechnungen abzuschätzen [Bross, Krause et al., 2019]. Unabhängig von der systemabhängigen Mindestwassermenge sollen gemäß der Konzeption Zivile Verteidigung (KZV) sowohl im Regelbetrieb als auch bei eingeschränkter Versorgung unbefristet mindestens 50 l/(P · d) Wasser durch den Betreiber der Trinkwasserversorgungsanlage bereitgestellt werden [BMI, 2016].

4.2.2 Anforderungen an die leitungsungebundene Wasserversorgung der Bevölkerung

Eine leitungsungebundene Wasserversorgung stellt die Möglichkeit dar, der Bevölkerung Wasser abzugeben, wenn dies auf festen Leitungswegen nicht möglich ist. In der 1. WasSV sowie BMI (2016) sind die im Verteidigungsfall geltenden quantitativen Anforderungen an die leitungsungebundene Wasserversorgung niedergeschrieben. Da in Deutschland keine weiteren Vorgaben für die leitungsungebundene Versorgung existieren, werden die aufgezeigten Anforderungen auch für die Wasserversorgung in Notsituationen betrachtet.

Ein quantitativer Vergleich mit Vorgaben aus einem hinsichtlich der Wasserversorgung sehr ähnlichen Land (Österreich) sowie länderübergreifenden Anforderungen ist in Tabelle 4.1 aufgezeigt. Die beiden Handbücher Sphere Association (2018) und UNHCR (1992) definieren ähnliche Mengen für den minimalen Wasserbedarf des Einzelnen im Notfall. Die österreichischen Vorgaben orientieren sich an diesen Werten. Im Vergleich zu Österreich erfolgt in Deutschland keine Unterscheidung des lebensnotwendigen und des mittelfristigen Bedarfs (Tabelle 4.1). Die Unterschiede zu den deutschen Anforderungen können durch zweierlei Aspekte erklärt werden. Zum einen besteht bei den deutschen Anforderungen die Notwendigkeit zur Aktualisierung. Zum anderen wurden die österreichischen Anforderungen aus bestehenden internationalen Standards ohne Anpassung an lokale Gegebenheiten übernommen.

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der quantitativen Anforderungen zur leitungsungebundenen Wasserversorgung gemäß 1. WasSV, BMI (2016), ÖVGW W 74 (2017), Sphere Association (2018) und UNHCR (1992)

	Rechtliche Rahmenbedingungen		Mindestversorgungsstandards	
	Deutschland	Österreich	global	
	1. WasSV, BMI (2016)	ÖVGW W 74 (2017)	Sphere Association (2018)	UNHCR (1992)
täglicher Wasserbedarf pro Person [l/(P·d)]	15	2,5 - 3 lebensnotwendiger Bedarf	2,5 - 3 Trinkwasser	7 lebensnotwendiger Bedarf
		7,5 - 15 mittelfristiger Bedarf nach einem Ereignis	5 - 12 Nutzwasser	15 - 20 Bedarf zur Verteilung im Camp

Über Sphere Association (2018) und UNHCR (1992) hinaus sind nur sehr wenige andere Dokumente veröffentlicht, die Mengenangaben zum minimalen, täglichen Wasserbedarf pro Person beinhalten (z. B. AWWA (2011), De Buck et al. (2015), FEMA (2004), Smadi et al. (2018), USACE (2008), USAID (2005) und WHO (2002)). Diese sind jedoch weniger verbreitet als das Sphere Association (2018), enthalten jedoch Angaben, die mit den Handbüchern von Sphere Association (2018) und UNHCR (1992) vergleichbar sind.

4.2.3 Anforderungen an die Wasserversorgung von Patienten in Einrichtungen des Gesundheitswesens

In Krisensituationen ist die Aufrechterhaltung des Betriebs von Einrichtungen des Gesundheits- und Pflegewesens für die Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit und für die Krisenbewältigung maßgeblich. Als hoch sensible und komplexe Systeme sind Krankenhäuser von einer dauerhaften und zuverlässigen Verfügbarkeit anderer Infrastruktursysteme abhängig, die auch in Krisensituationen für die Erhaltung der Funktionsfähigkeit und zum Schutz der versorgten bzw. dort arbeitenden Personen notwendig sind.

Der Wasserverbrauch pro Krankenhausbett kann erheblich vom durchschnittlichen Verbrauch zwischen Krankenhäusern unterschiedlicher Größe und Ausstattung abweichen. Die Möglichkeit der Reduktion des Wasserverbrauchs in Notsituationen ist von der Infrastruktur des Krankenhauses abhängig.

Die quantitativen Anforderungen von Einrichtungen des Gesundheitswesens werden in der Literatur als spezifischer Wasserbedarf eines Patienten (z. B. 1. WasSV, BMI (2016)) als auch auf Basis der maximal verfügbaren Krankenhausbetten durch den spezifischen Wasserbedarf pro Krankenbett (z. B. DVGW W 410 (2008), VDI 3807-2 (2016) und WSDH (2009)) angegeben. Die Tabelle 4.2 zeigt den durchschnittlichen täglichen Wasserbedarf für die Belegung eines Krankenhausbettes in verschiedenen Ländern und Regionen.

Die Wassermengen für den Mindestversorgungsstandard pro Patient oder Krankenhausbett werden zusätzlich zu Sphere Association (2018) auch in einigen Studien aufgeführt. Während Adams (1999), House und Reed (2004), Reed und Shaw (1995) und Reed und Reed (2011) geringe Wassermengen beziffern, die mit Sphere Association (2018) vergleichbar sind, geben Welter et al. (2011, 2010, 2013) mit circa 300 l/(Pat·d) deutlich höhere Zahlen an.

Tabelle 4.2: Gegenüberstellung der Literaturwerte zum Wasserbedarf in Krankenhäusern bei Normalversorgung sowie in Notsituationen

	Wasserbedarf			
	Normalversorgung		Notsituationen	
Land/Region	l/(Bett·d)	Quelle	l/(Bett·d)	Quelle
Welt			5*a 40 - 60*b 100*c	Sphere Association (2018)

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle 4.2

	Wasserbedarf			
	Normalversorgung		Notsituationen	
Land/Region	l/Bett·d	Quelle	l/Bett·d	Quelle
			220 - 300*	UNHCR (1992)
Europa	500 - 1 000	Ludwig (2002)		
Deutschland	120 - 830	Karger und Hoffmann (2013)	75*d - 150*e	1. WasSV, BMI (2016)
	283	González et al. (2018)		
	370	VDI 3807-2 (2016)		
	455	Reller (2000)		
	679	Dettenkofer et al. (2000)		
Österreich	120 - 830	Neunteufel et al. (2010)	40 - 60*b	ÖVGW W 74 (2017)
USA	300 - 1 514	VDT (2008), WSDH (2009)	298*	Welter et al. (2013)

* l/(Pat·d)

[a] Ambulanter Patient

[b] Stationärer Patient

[c] pro Operation oder Entbindung

[d] Patient in Krankenhaus- und Pflegeeinrichtungen

[e] Patient in intensivmedizinischen Einrichtungen

4.2.4 Empfehlungen für die Eigenbevorratung der Bevölkerung

Im Katastrophenschutz wird davon ausgegangen, dass die Bevölkerung über eine gewisse Selbsthilfefähigkeit verfügt, die in einer Krise unerlässlich ist [BMI, 2016]. Die Vorsorge in der Bevölkerung stellt somit eine Ergänzung zu den Maßnahmen von WVU und staatlichen Institutionen dar. Broschüren wie der „Leitfaden für Notfallvorsorge und richtiges Handeln in Notfällen“ des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe [BBK, 2014] informieren die Öffentlichkeit über eine angemessene Vorbereitung und machen der Bevölkerung deutlich, dass sie in einer Krise Eigenverantwortung trägt.

Ein Vergleich verschiedener Veröffentlichungen und Leitfäden zur Notfallvorsorge zeigt, dass nach dem gemeinsamen Verständnis Einzelpersonen mindestens die ersten 72 Stunden nach einer Katastrophe teilweise oder vollständig autark sein müssen [Basolo et al., 2008; Kohn et al., 2012; Murti et al., 2014; Russell et al., 1995; SVGW W VN 300, 2007]. Ausgehend von der Annahme, dass die Menschen mindestens zwei Liter Trinkwasser pro Tag benötigen [BMI, 2016], besteht eine dreitägige Wasserversorgung aus sechs Litern pro Person. Gemäß der KZV soll die Bevölkerung durch „geeignete Maßnahmen angehalten werden, zur Eigen- bzw. Erstversorgung bis zur Installation staatlicher Einzelmaßnahmen für einen Zeitraum von fünf Tagen je zwei Liter Wasser pro Person und Tag in nicht gesundheitsschädlicher Qualität vorzuhalten“ [BMI, 2016].

4.2.5 Geltungsdauer für die quantitativen Anforderungen

Notsituationen können in ihrer Dauer variieren. Die Dauer der Notsituation beeinflusst die zu ergreifenden Maßnahmen, da nicht alle Maßnahmen für einen unbegrenzten Zeitraum verfügbar sein können. In der KZV ist daher aufgeführt, dass „die staatliche Notfallvorsorge (...) insbesondere die Minimalversorgung für die gesamte Bevölkerung mit Trinkwasser für mindestens 14 Tage“ sichert [BMI, 2016].

4.3 Qualitative Anforderungen an die Wasserversorgung in Notsituationen

Die Anforderungen an die Wasserqualität sind als Schwellenwerte der Konzentrationen verschiedener Wasserinhaltsstoffe formuliert. Aufgrund der unterschiedlichen Zielsetzungen und rechtlichen Rahmenbedingungen für die Ersatz- und Notwasserversorgung bestehen in Deutschland hinsichtlich der qualitativen Schutzziele unterschiedliche Anforderungen an das bereitgestellte Wasser. Der Unternehmer oder Inhaber einer Wasserversorgungsanlage ist unter anderem für die Qualität des abgegebenen Trinkwassers verantwortlich und hat deshalb besondere Vorsorge-, Anzeige- und Informationspflichten. Er unterliegt der Überwachung durch die zuständige Gesundheitsbehörde. Definiert sind die Anforderungen an Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasser und Wasser für Lebensmittelbetriebe) in Deutschland insbesondere in der TrinkwV und im Infektionsschutzgesetz (IfSG). Die Einhaltung der TrinkwV ist auch bei der Ersatzwasserversorgung vorgeschrieben. Anlagen, welche für die Aufbereitung oder Verteilung von Trinkwasser gedacht sind, wie zum Beispiel mobile Trinkwasseraufbereitungsanlagen oder Transportbehälter für Trinkwasser, müssen nach § 17 TrinkwV mindestens den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen.

Gemäß § 3 Abs. 1 1. WasSV muss das Wasser zur Deckung des lebensnotwendigen Bedarfs im Verteidigungsfall so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch die Gesundheit der Menschen sowie der Nutztiere durch Krankheitserreger nicht beeinträchtigt werden kann. Zudem muss es weiterhin frei von anderen Stoffen in gesundheitsschädlicher Konzentration sein. Richtwerte für die Wasserqualität im Verteidigungsfall sind durch den Bund in den sogenannten Qualitätsstandards für Anlagen der Trinkwassernotversorgung festgelegt [BMI, 2015]. Hierbei handelt es sich um so genannte Notwasserversorgungshöchstwerte für eine Versorgungsdauer von 30 Tagen (NWV_{MHW30}) [Kalberlah et al., 2018]. Bei Einhaltung dieser Richtwerte ist eine gesundheitliche Beeinträchtigung durch das Wasser für die genannte Versorgungsdauer von 30 Tagen nicht zu erwarten. Die Richtwerte sind in der Tabelle B.2 den Grenzwerten der TrinkwV gegenübergestellt. Die NWV_{MHW30} liegen fast ausschließlich über den Grenzwerten der TrinkwV. Dies ist auf den kürzeren Bezugszeitraum für den Konsum des Wassers zurückzuführen.

4.4 Anforderungen an Planungen zur Notfallvorsorge

Die Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung umfasst neben präventiven Maßnahmen zur Risikominimierung insbesondere Aspekte des Krisenmanagements. Eine effektive Notfallvorsorgeplanung zeichnet sich u. a. dadurch aus, dass die Planungen präventiv durchgeführt werden und die festgelegten Maßnahmen in Notsituationen umgesetzt werden können [BBK, 2011]. Eine solche Notfallvorsorgeplanung berücksichtigt verschiedene Szenarien und deren mögliche Auswirkungen auf die Wasserversorgung. Neben vorbeugenden Maßnahmen führen auch die zahlreichen Aspekte des Krisenmanagements zur Risikominimierung durch Begrenzung des Schadensausmaßes. Die Abbildung 4.3 zeigt die fünf Prozessschritte des Risiko- und Krisenmanagements nach BBK (2016) und BMI (2011).

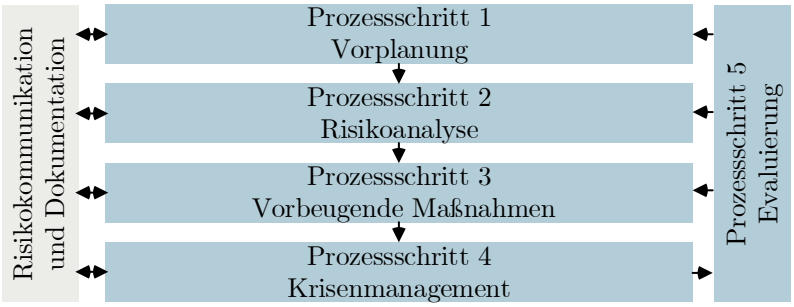


Abbildung 4.3: Fünf Schritte des Risiko- und Krisenmanagements in Anlehnung an BBK (2016) und BMI (2011)

Eine gründliche Vorplanung bildet die Basis für eine erfolgreiche Etablierung eines Risiko- und Krisenmanagements, indem die Zuständigkeiten und strategische Schutzziele festlegt werden und hierdurch ein Risikobewusstsein geschaffen wird [BBK, 2016; BMI, 2011]. Anschließend wird durch eine Risikoanalyse die Sammlung von Informationen zu bestehenden und potenziellen Risiken für die Wasserversorgung strukturiert und objektiviert [AWWA, 2018; BBK, 2016; DIN EN 15975-1, 2016]. Hierbei werden Gründe und Ursachen von Risiken betrachtet, mögliche Auswirkungen untersucht und der Rahmen, in dem diese Konsequenzen auftreten können bestimmt [BBK, 2015b].

Vorbeugende Maßnahmen tragen zur Minderung von Risiken für kritische Prozesse bei. Sie helfen dabei, operative Schutzziele zu erreichen und damit die Schwelle für Ereignisse mit Krisenpotenzial in der Einrichtung anzuheben. Hierdurch kann die Anzahl krisenhafter Ereignisse minimiert bzw. die Intensität bei deren Auftreten reduziert werden.

Das Krisenmanagement liefert einen maßgeblichen Beitrag zum Schutz von Kritischen Infrastrukturen und der Bevölkerung. Wechselwirkungen bestehen zum Risikomanagement, da nicht alle Risiken durch risikomindernde Maßnahmen reduziert werden können und immer ein Restrisiko bestehen bleibt [BBK, 2016]. Das Krisenmanagement bietet deshalb eine Struktur zur Bewältigung von Krisen, die trotz Prävention nicht verhindert werden können [BMI, 2011].

Die Betrachtung der Prozessschritte des Risiko- und Krisenmanagements erfolgt dynamisch. Die Evaluierung bezieht sich daher auf die regelmäßig Prüfung der Inhalte aller Phasen sowie einer bedarfsorientierten Anpassung [BBK, 2016].

5 Methoden

Kapitel 5 widmet sich der in dieser Dissertation angewandten Methodik und untergliedert sich in vier Abschnitte. In Abschnitt 5.1 wird die Methodik aufgezeigt, die für die Entwicklung einer Systemanalyse angewandt wurde, um für entsprechende Notsituationen die geeigneten Versorgungsarten zu identifizieren. Abschnitt 5.2 widmet sich der Methodik des System Dynamics Modells NOTWASSER zur Steuerung und Bewertung des Umgangs mit begrenzten Ressourcen. Hierbei werden wesentliche Aspekte der Kapitel 3 sowie 4 modelltechnisch umsetzt. Die Methodik des Verbundindikatorensystems zur Betrachtung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung wird in anschließend Abschnitt 5.3 beleuchtet. Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit der entwickelten Methoden, werden diese an einem Fallbeispiel angewandt. Dieses Fallbeispiel wird in Abschnitt 5.4 charakterisiert.

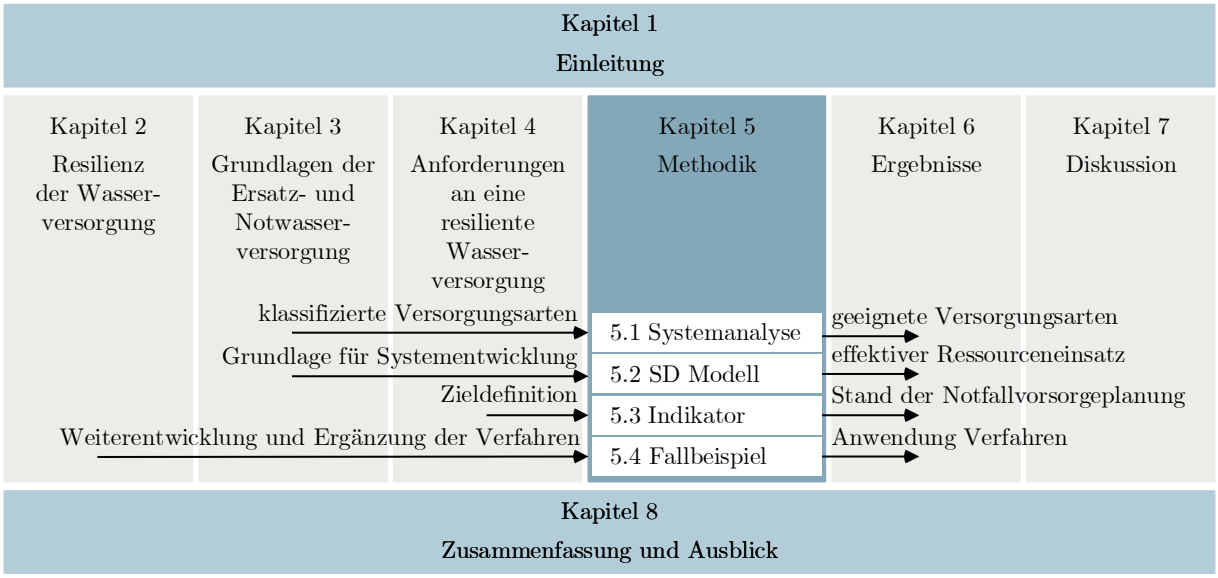


Abbildung 5.1: Aufbau des Methodenkapitels und Einordnung der Inhalte in die Dissertation

5.1 Identifikation geeigneter Versorgungsarten und der für deren Einsatz notwendigen Rahmenbedingungen

Zur Entwicklung einer Systemanalyse zur Identifikation von geeigneten Versorgungsarten der Ersatz- und Notwasserversorgung wurde eine umfassende Literaturanalyse durchgeführt. Diese wurde durch einen Expertenworkshop ergänzt.

Die Auswirkungen von Szenarien wie z. B. Hochwasser, Stromausfall, Pandemie sind von der Struktur des jeweiligen Wasserversorgungssystems der Normalversorgung abhängig. Daher wurden die Auswirkungen auf die Teilprozesse in Schadensereignissen kategorisiert. Jedes Schadensereignis spiegelt eine Kombination der Beeinträchtigung der Anlagenteile Gewinnung, Aufbereitung, Verteilung und Speicherung wider. Die Beeinträchtigung kann in Form einer eingeschränkten Funktionstüchtigkeit oder in Form eines vollständigen Ausfalls der Anlagenteile des Wasserversorgungssystems der Normalversorgung erfolgen.

Basierend auf diesen Auswirkungen wurde eine Systemanalyse entwickelt. Die Systemanalyse dient der Abstrahierung von einzigartigen Notsituationen und der Ableitung der jeweils geeigneten Versorgungsarten. Die identifizierten Versorgungsarten wurden anhand des genutzten Wassers, der Art der Verteilung sowie der Abgabe kategorisiert. Das Ziel war es hierbei, die möglichen Versorgungsarten zu charakterisieren und die für ihren Einsatz notwendigen Rahmenbedingungen aufzuzeigen.

Es erfolgt zusätzlich zur Betrachtung der Eignung eine Priorisierung von Versorgungsarten. Die Priorisierung erfolgt, um gemäß Clarke et al. (2004) eine Bereitstellung von größeren Mengen Wasser, unter Umständen mit Einschränkungen der Qualität im Rahmen des Erlaubten und erhöhtem Aufwand, der Bereitstellung einer geringfügigen Menge Wasser von sehr hoher Qualität zu bevorzugen. Hierbei werden die folgenden Annahmen aufbauend auf den im Kapitel 4 dargestellten Anforderungen angewandt:

(i) Das oberste Ziel ist, die benötigte Wassermenge bereitzustellen.
(ii) Eine leitungsgebundene Versorgung hat Vorrang vor jeder leitungsungebundenen Versorgung.
(iii) Das Wasser aus den eigenen Gewinnungsanlagen erfüllt ohne Aufbereitung nicht die qualitativen Anforderungen der TrinkwV.
(iv) Das von einem anderen WVU bezogene Wasser erfüllt die qualitativen Anforderungen der TrinkwV.
(v) Bei einer teilweisen Funktionstüchtigkeit des Leitungsnetzes werden sowohl leitungsgebundene als auch leitungsungebundene Versorgungsarten betrachtet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die beeinträchtigten Leitungsabschnitte überbrückbar sind. Die Beurteilung der Eignung erfolgt anhand des Vergleichs der bereitstellbaren Wassermenge mit dem systemabhängigen Mindestbedarf.
(vi) Eine Einspeisung in den Hochbehälter kann nur erfolgen, wenn dieser voll funktionstüchtig und ans Netz angeschlossen ist.

5.2 Entwicklung eines Modells zur Steuerung und Bewertung des Umgangs mit begrenzten Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung

Um den Umgang mit begrenzten Ressourcen im Notfall zu steuern und zu bewerten, wurde ein Entscheidungshilfemodell entwickelt. Im Folgenden wird aufgezeigt, welche Anforderungen hierzu an die Modellierungsmethode bestehen und wodurch die Methodik System Dynamics (SD) als geeignete Methode identifiziert wurde. Des Weiteren werden die theoretischen Grundlagen von SD aufgezeigt und die Anwendung dieser in der Entwicklung des SD Modells NOTWASSER erläutert.

5.2.1 Anforderungen an eine geeignete Modellierungsmethode

Das Ziel dieser Modellentwicklung ist die Abbildung von Abläufen und Teilprozessen eines Wasserversorgungssystems in diversen Notsituationen unter Berücksichtigung der Maßnahmen der Ersatz- und Notwasserversorgung. Das Modell zur Steuerung und Bewertung des Umgangs mit begrenzten Ressourcen soll der Entscheidungsfindung dienen und auch bei einer geringen Datenverfügbarkeit anwendbar sein. Die Zielgruppe für die Modellanwendung und Ergebnisverwertung umfasst Verantwortung tragende Personen in WVU, Gesundheitsämtern, Katastrophenschutzbehörden sowie anderen nationalen oder internationalen Institutionen.

Die Maßnahmen der Ersatz- und Notwasserversorgung kommen bei einer Beeinträchtigung der Normalversorgung zum Einsatz. Diese Beeinträchtigung soll im Modell mit verschiedenen Zeitverläufen berücksichtigt werden. Zudem sind Notsituationen von sich dynamisch ändernden Rahmenbedingungen geprägt. Variierende Rahmenbedingungen umfassen im betrachteten Fall zudem die Ressourcenverfügbarkeit, die Speicherkapazitäten sowie die Wasservorräte in der Bevölkerung. Hierzu sind durch das Modell diverse zeitabhängige Zustände abzubilden.

Unter Berücksichtigung der Zielgruppe sollen die Teilprozesse der Wasserversorgung abstrakt abgebildet werden, aber dennoch intuitiv erfassbar sein. Hydraulische Prozesse sollen bei der Modellbildung vernachlässigt werden, um eine Simulation auch bei geringem Datenbestand oder fehlender Detailkenntnis zu ermöglichen.

5.2.2 Identifikation einer geeigneten Modellierungsmethode

Modelle lassen sich u. a. durch die Art ihrer Zustandsänderung und der Berücksichtigung des Zeitverlaufs charakterisieren. Bezüglich der Art ihrer Zustandsänderung wird zwischen statischen und dynamischen Modellen unterschieden [Soares und Secchi, 2012]. Statische Modelle betrachten nur einen Zeitpunkt ohne Zustandsänderung in Form einer Momentaufnahme [Safiullin und Safiullin, 2018]. Die zeitliche Perspektive wird bei statischen Modellen somit nicht berücksichtigt. Dynamische Modelle zeichnen sich dahingegen durch zeitabhängige Modellzustände aus [Forrester, 1987, 1994]. Hierdurch wird die zeitliche

Perspektive berücksichtigt, sodass diese Modelle folglich zur Betrachtung von Abläufen und Prozessen geeignet sind [Soares und Secchi, 2012]. Aufgrund der Berücksichtigung des zeitlichen Effekts bei der Modellierung eines Notfalls in der Trinkwasserversorgung ergibt sich eine Einschränkung der möglichen Modellarten auf dynamische Simulationsmodelle.

Bei dynamischen Modellen wird bezüglich der Art der Berücksichtigung des Zeitverlaufs zwischen kontinuierlichen und diskreten Modellen unterschieden. Zustandsänderungen können bei kontinuierlichen Modellen zu allen Zeitpunkten der Simulation auftreten, wohingegen diese Änderungen bei diskreten Modellen nur zu bestimmten Zeitpunkten erfolgen [Schwaninger und Groesser, 2011]. Insbesondere zur Untersuchung von strukturellen Zusammenhängen, ist die Anwendung von dynamischen Systemen in einem kontinuierlichen Modell sinnvoll, wenn Systemreaktionen bei Veränderungen von verschiedenen Eingangsgrößen analysiert werden sollen [Richardson, 2011]. Zur Berücksichtigung der veränderlichen Rahmenbedingungen in Notsituationen wird somit ein kontinuierliches Modell benötigt.

Die SD Methode ermöglicht die Abbildung der Zustandsänderungen diskreter Systeme in Form eines kontinuierlichen Flusses und somit die Überführung nicht stetiger Systeme in kontinuierliche Modelle [Forrester, 1973a]. Zudem bietet die Methode die Möglichkeit komplexe, nicht lineare, dynamische und rückgekoppelte Systeme abzubilden [Richardson, 2011]. Des Weiteren können komplexe Zusammenhänge strukturiert beschrieben werden und somit für ein tiefer gehendes Verständnis für vorherrschende Problemstellungen sorgen. Aufgrund der Eignung zur Erfüllung der erläuterten inhaltlichen und modelltechnischen Anforderungen an die geeignete Modellierungsmethode wird die SD-Methode angewandt. Im Folgenden wird die SD-Methode näher erläutert und das Modell NOTWASSER vertiefend dargestellt.

5.2.3 Theoretische Grundlagen von System Dynamics

System Dynamics ist eine Methode zur Abbildung und Simulation von technischen und sozioökonomischen, quantitativen sowie qualitativen Systemen auf Basis eines systemtheoretischen und kybernetischen Modellansatzes [Niemeyer, 1977]. Die theoretischen Grundlagen von SD bilden somit die Ansätze und Grundgedanken der Systemtheorie. Während innerhalb der Systemtheorie der Fokus auf der strukturellen Analyse von Systemen liegt, werden in SD dynamische und komplexe Systeme betrachtet und modelliert.

Die Grundideen und ersten Veröffentlichungen der SD Methode gehen auf Forrester (1972) zurück, der diese Methode – damals veröffentlicht unter dem Begriff Industrial Dynamics – auf die Simulation von Ablauf- und Entscheidungsstrukturen in Unternehmen anwendete. Die Erweiterung der Methodik durch die Entwicklung komplizierterer Simulationsmodelle (z. B. Forrester (1973a,b)), insbesondere durch die Simulation eines Weltmodells durch den Club of Rome [Meadows et al., 1972] führte zu einer größeren Bekanntheit und vermehrten Anwendung der Methodik. Anwendungsbeispiele im Bereich der Wasserversorgung sind z. B. in Mirchi et al. (2012), Pagano et al. (2017), Phan et al. (2018) zu finden.

Die Basis von SD bilden nach Forrester (1973a) dabei die theoretischen Grundlagen aus den Bereichen der Informations-Rückkopplungs-Theorie, der Entscheidungstheorie, verbalen Problemlösungsprozessen sowie der Computersimulation.

Informations-Rückkopplungs-Theorie

Komplexe Systeme werden primär durch die Rückkopplungen der einzelnen Elemente eines Systems beeinflusst. Gemäß der Informations-Rückkopplungs-Theorie bestehen Rückkopplungen immer dann, wenn ein Systemelement ein anderes oder mehrere andere Elemente des Systems beeinflusst, und diese wiederum zugleich eine Auswirkung auf das sich ursprünglich ändernde Systemelement haben.

Entscheidungstheorie

Auf der Grundlage der Entscheidungstheorie werden einzelnen oder mehreren Systemelementen vorhersehbare Reaktionsmuster in Abhängigkeit vom Zustand ihrer Systemumgebung zugeordnet. Diese Reaktionsmuster werden durch Entscheidungsprozesse beschrieben und als mathematische Gleichungen formuliert. Dabei können die Verhaltensweisen der Systemelemente variieren und für jedes Systemelement exakt definiert werden. Hierdurch wird die Simulation eines komplexen Systems sowie die Bewertung von Strategien bzw. Szenarien über einen kompletten Simulationsablauf ermöglicht.

Verbale Problemlösungsprozesse

Subjektive Inhalte werden durch verbale Problemlösungsprozesse in SD umgesetzt, sodass neben *harten* bzw. leicht messbaren Faktoren (z. B. tägliche Kapazität einer Aufbereitungsanlage) auch *weiche* bzw. schwer messbare Faktoren (z. B. Bevorratungsverhalten der Bevölkerung) in SD Modelle einfließen können. Meadows et al. (1972) sowie Forrester (1973a) zeigen auf, dass weiche Faktoren aufgrund ihrer Relevanz für das System als Ganzes integriert werden sollten. Eine Nichtberücksichtigung weicher Faktoren ist mit der Annahme gleichzusetzen, dass *weiche* Faktoren keinen Einfluss auf das System hätten [Forrester, 1973a]. Aufgrund der subjektiven Einschätzung bei verbalen Problemlösungsprozessen sind die Zusammenhänge zwischen Systemelementen transparent zu dokumentieren und weiche Faktoren notfalls zu schätzen [Meadows et al., 1972].

Computersimulation

Aufgrund der zahlreichen Rückkopplungen und Entscheidungsprozesse können mittels der SD Methode sehr komplexe Modelle entstehen. Um diese komplexen Modelle mit nicht-linearen, dynamischen, mathematischen Beziehungen verarbeiten zu können, werden Computersimulationen durchgeführt.

Die folgenden Kapitel beinhalten das Vorgehen bei der Erstellung eines SD Modells und der Anwendung für das NOTWASSER Modell.

5.2.4 Vorgehen bei der Entwicklung von System Dynamics Modellen

5.2.4.1 Problemspezifikation bei System Dynamics Modellen

In der ersten Phase der Erstellung eines SD Modells wird die Fragestellung spezifiziert, zu deren Beantwortung das Modell entwickelt und angewandt werden soll. Hierbei wird der Modellzweck festgelegt [Niemeyer, 1977]. Aufbauend auf dem Modellzweck werden der Zeithorizont der Modellierung und die Systemgrenzen festgelegt. Die Systemgrenzen trennen den endogenen vom exogenen Bereich (Abbildung 5.2).

Der exogene Bereich umfasst die von außen wirkenden Variablen. Diese werden außerhalb des Modells vorgegeben und können durch das Modell nicht beeinflusst werden. Der endogene Bereich beinhaltet die von innen wirkenden Variablen. Diese werden durch das Modell untersucht. SD orientiert sich an einem abgeschlossenen endogenem Konzept. Bei der Festlegung der Systemgrenzen müssen daher alle Variablen, die für die Erklärung des Systemverhaltens benötigt werden, innerhalb der Systemgrenzen befinden [Forrester, 1972].

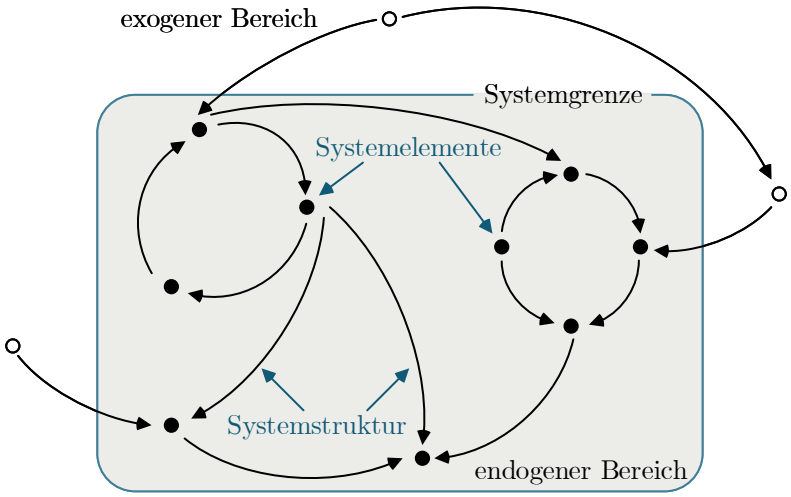


Abbildung 5.2: Systemgrenzen als Trennung des endogenen vom exogenen Bereich in Anlehnung an Forrester (1972)

5.2.4.2 Qualitativer Entwurf eines System Dynamics Modells

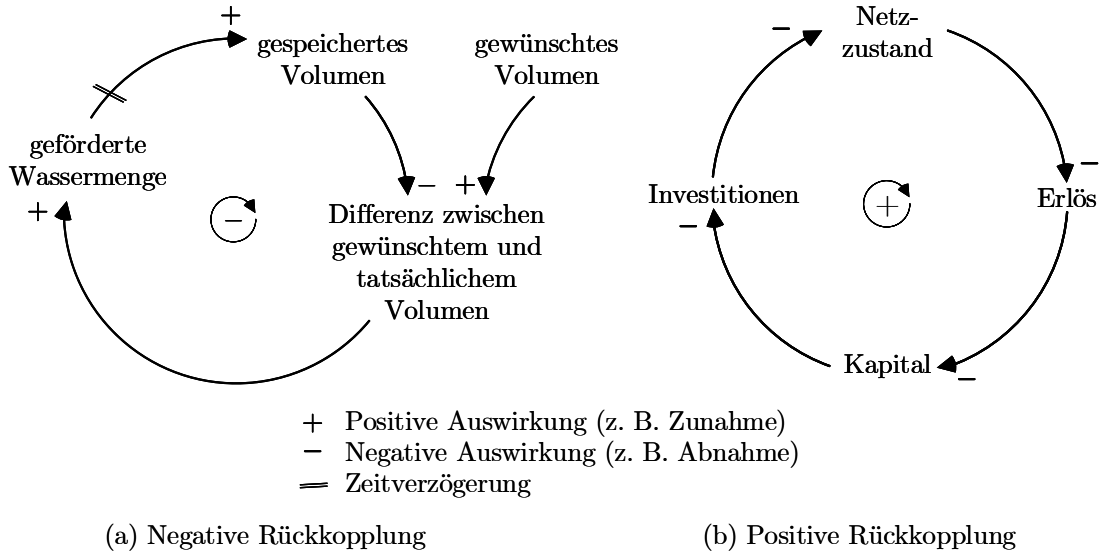
Die Struktur eines Modells lässt sich durch Wirkungsgraphen darstellen und analysieren. Gemäß der SD Philosophie wird das Systemverhalten zum großen Teil von seiner Struktur bestimmt. Deshalb wird bei SD Modellen mehr Gewicht auf die Beziehungen zwischen den Systemelementen als auf die Genauigkeit der Input- und Outputdaten gelegt [Forrester, 1987].

Die Beziehungen zwischen Systemelementen werden durch Beziehungspfeile mit positiven oder negativen Operatoren ausgedrückt. Diese positiven oder negativen Operatoren sagen aus, welchen Einfluss ein Systemelement auf ein anderes Element ausübt.

Rückkopplungen lassen sich anhand der Wirkungsgraphen abbilden, indem ausgehend von einem Systemelement eine Folge von Beziehungspfeilen betrachtet wird, die wieder zum Ursprungssystemelement zurückführen. Hierbei werden kein Beziehungspfeil oder

Systemelement doppelt betrachtet. Rückkopplungen werden in positive sowie negative Rückkopplungsschleifen unterteilt [Meadows et al., 1972]. Negative Rückkopplungsschleifen sind zielsuchend, d. h. sie führen Systeme zu einem konstanten Zustand. Wirkungsgraphen zeigen negative Rückkopplungen, wenn die Folge von Beziehungspfeilen eine ungeradzahlige Anzahl von Beziehungspfeilen mit negativen Operatoren umfasst. Die Wasserspeicherung in der Normalversorgung ist ein Beispiel für eine negative Rückkopplungsschleife ($n^- = 1$ in Abbildung 5.3 (a)). Es wird das gewünschte Volumen des gespeicherten Wassers definiert und anschließend der aktuelle Speicherstand gemessen. Aus diesen beiden Größen berechnet sich die Differenz zwischen Soll-Speicherstand und Ist-Speicherstand, welche Einfluss auf den Zufluss zum Speicher hat. Die geförderte Wassermenge führt zeitverzögert (gekennzeichnet durch das Gleichheitszeichen) zu einer Erhöhung des gespeicherten Volumens. Da sich das gespeicherte Volumen dem gewünschten Volumen annähert, ist die dargestellte Rückkopplung zielsuchend.

Anhand von positiven, sich verstärkenden Rückkopplungen werden Systeme dargestellt, die sich einem Grenzwert annähern (Abbildung 5.3 (b)). Die Anzahl der negativen Wirkungspfeile ist bei diesen Rückkopplungen gerade. Ein Beispiel für eine solche Rückkopplung ist die Abhängigkeit des Netzzustands von den getätigten Investitionen eines Wasserversorgungsunternehmens im Normalbetrieb. Geringere Investitionen führen zu einer Verschlechterung des Netzzustands. Ein schlechterer Netzzustand resultiert aufgrund von höherem Wartungsaufwand sowie Wasserverlusten in einem geringeren Erlös. Dies zieht wiederum geringeres Kapital nach sich. Aufgrund von weniger Kapital können weniger Investitionen getätigt werden und der Netzzustand verschlechtert sich zunehmend.



(a) Negative Rückkopplung (b) Positive Rückkopplung

Abbildung 5.3: Rückkopplungsschleife

Umfassendere Systeme beinhalten oft eine Vielzahl von Rückkopplungen. Eine Kombination dieser erschwert die intuitive Ableitung des Systemverhaltens. Bei der SD Methode werden die bedeutendsten Rückkopplungen zwischen kausalen Determinanten des Systemverhaltens als Causal-Loop-Diagramm (CLD) dargestellt. Das CLD dient zur Veranschaulichung und Darlegung der komplexen Zusammenhänge und nutzt hierzu eine vereinfachte

Veranschaulichung der einflussnehmenden Variablen. In der Regel repräsentieren die einflussnehmenden Variablen mehrere Systemelemente und deren -strukturen, sodass das CLD nur einen Ausschnitt der Systemelemente und -struktur zeigt.

5.2.4.3 Erstellung eines System Dynamics Modells

SD Modelle werden durch verschiedene Elemente spezifiziert (Abbildung 5.4). Zustands- und Flussvariablen stellen die beiden wichtigsten Elemente von SD Modellen dar. Des Weiteren werden Hilfsvariablen, Konstanten, Beziehungspfeile und Systemgrenzen eingesetzt.

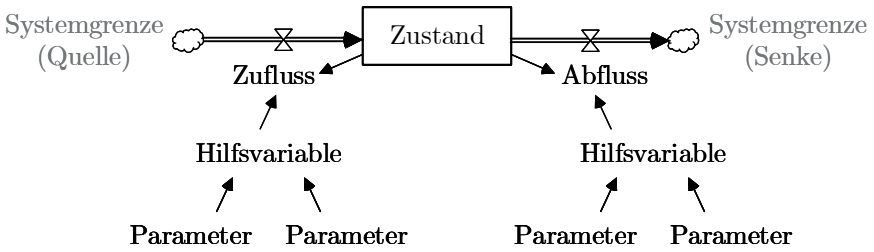


Abbildung 5.4: Systemelemente und deren Visualisierung in SD Modellen

Zustände stellen eine Akkumulation aller vorangegangenen Systemveränderungen dar und ändern sich somit kontinuierlich im Zeitverlauf, abhängig von anderen Größen [Forrester, 1972; Meadows et al., 1972]. Flüsse beeinflussen die Zustände, indem sie als Zuflüsse zu einer Erhöhung bzw. als Abflüsse zu einer Absenkung des Systemzustands führen. Somit verändern sie den Wert der Zustandsvariablen pro Zeiteinheit. Zustände werden mathematisch durch Differentialgleichungen beschrieben und Flüsse durch die Integranden ausgedrückt [Forrester, 1972]. Ein Zustand Z zum Zeitpunkt $t + dt$ berechnet sich somit aus dem Wert seiner Vorperiode $Z(t)$ addiert mit dem Integral der Differenz der Zufluss- und Abflussrate (Gleichung 5.1) [Niemeyer, 1977]. Ein Alleinstellungsmerkmal von Zustandsvariablen ist es, dass diese nur von Flüssen und nicht von anderen Elementen beeinflusst werden. Andere Variablen wie Flüsse oder Hilfsvariablen unterliegen dieser Einschränkung nicht.

$$Z(t + dt) = Z(t) + \int_{x=t}^{t+dt} (Zuflussrate(x) - (Abflussrate(x)) \cdot \mathrm{dx} \tag{5.1}$$

Zu- und Abflüsse werden durch Hilfsvariablen sowie Parameter charakterisiert. Hilfsvariablen dienen als Unterstützung bei der Formulierung eines Gleichungsmodells. Sie geben die Abhängigkeiten von mehreren Zuständen, Flüssen oder Parametern wider und können im Zeitverlauf variable Werte annehmen. Der Wert von Parametern bleibt während einer Simulation dahingegen konstant.

Die Beziehungspfeile (Pfeile in der Abbildung 5.4) haben dieselbe Funktion wie die Pfeile in den Wirkungsgraphen. Es werden Informationen über den Wert eines Systemelements an ein anderes Systemelement weitergegeben. Die Systemgrenzen werden durch Quellen und Senken definiert. Sie werden im Allgemeinen nur bei Flüssen eingezeichnet und kennzeichnen den Übergang vom endogenen in den exogenen Bereich.

Zur Visualisierung und Programmierung der Zusammenhänge der Systemelemente wurde in dieser Dissertation Vensim® als Implementierungsprogramm verwendet. Vensim® basiert auf der Programmiersprache DYNAMO, die zur rechnerunterstützten Abbildung von komplexen, dynamischen Systemen entwickelt wurde [Forrester, 1973a]. Durch übersichtliche Ablaufdiagramme können in Vensim® komplexe mathematische Gleichungen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen im dynamischen Zeitablauf dargestellt werden.

Die Zustandsänderungen werden in der Software Vensim® durch INTEG-Funktionen angegeben. Hierzu akkumuliert die Zustandsvariable die Differenz der Zu- und Abflüsse, beginnend beim Anfangszustand (Gleichung 5.2). Da Zustandsgleichungen die Systembedingungen darstellen, müssen zum Start der Computersimulation allen Zustandsgleichungen Anfangswerte (engl. *initials*) zugeordnet werden.

$$\text{Zustand} = \text{INTEG}(\text{Zufluss} - \text{Abfluss}, \text{Anfangszustand}) \tag{5.2}$$

5.2.5 Entwicklung des Modells NOTWASSER

5.2.5.1 Problemspezifikation des Modells NOTWASSER

Das hier entwickelte Modell NOTWASSER bildet ein Wasserversorgungssystem ab, bei dem aufgrund einer Beeinträchtigung der Normalversorgung Teilprozesse durch Versorgungsarten der Ersatz- bzw. Notwasserversorgung substituiert werden. Diese Versorgungsarten sind jedoch mit einer begrenzten Verfügbarkeit der benötigten Ressourcen verknüpft.

Die Effektivität des Einsatzes von vorhandenen Ressourcen wird durch diese Wassermenge sowie der unversorgten Bevölkerung und Patienten betrachtet. Das Ziel des Modells NOTWASSER ist es daher, die durch den Einsatz von begrenzten Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung in einem Notfall fehlende Wassermenge zu ermitteln und zu minimieren.

Anhand der betrachteten Notsituationen werden alle gemäß der entwickelten Systemanalyse geeigneten Versorgungsarten verglichen und bewertet. Hierzu werden verschiedene Alternativen durch Kombination von Versorgungsarten zur Ersatz- und Notwasserversorgung anhand von verschiedenen Notsituationen gegenübergestellt. Anschließend werden die bereitgestellte Wassermenge sowie die versorgten Einwohner und Patienten vergleichen.

Die Struktur des Modells basiert auf den kausalen Zusammenhängen von Bedarf und Abgabe sowie der Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung. Abbildung 5.5 zeigt die Systemgrenzen des Modells NOTWASSER. Es ist zu erkennen, dass die Qualitätsaspekte des Wassers (Rohwasserqualität und Art der Aufbereitung), das Verbraucherverhalten (insbesondere Schwankungen des Wasserbezugs innerhalb eines Tages) sowie die Netzstruktur nicht berücksichtigt werden, da diese für die Erfüllung der Zielsetzung des Modells NOTWASSER nicht relevant sind.

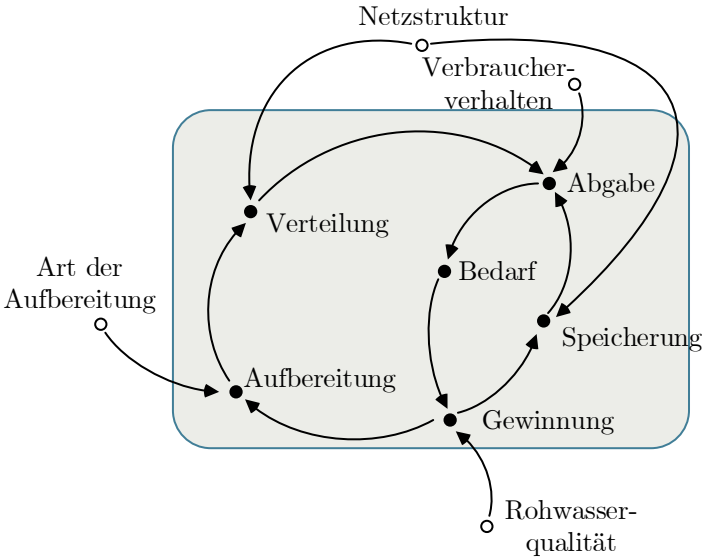


Abbildung 5.5: Systemgrenze des Modells NOTWASSER

5.2.5.2 Qualitativer Entwurf des Modells NOTWASSER

Die Struktur des NOTWASSER Modells wird durch zwei gekoppelte Kreisläufe dargestellt (Abbildung 5.6). Der primäre Rückkopplungskreislauf (B1) berücksichtigt den Wasserbedarf, die Gewinnung, die Aufbereitung und die Verteilung sowie die Wasserabgabe. Der Wasserbedarf bedingt die Höhe der zu gewinnenden oder einzusetzenden Wassermenge, die im Allgemeinen anschließend aufbereitet, verteilt und abgegeben wird. Je größer der Bedarf ist, desto mehr Wasser wird abgegeben. Dies gilt unter der Annahme, dass ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stehen. Der Wasserbedarf und die Wasserabgabe schließen diesen Kreislauf, da die Art der Abgabe (z. B. Menge des Wassers das nach der Verteilung abgegeben werden kann) ausschlaggebend dafür ist, ob der Bedarf sich aus dem spezifischen Bedarf der leitungsgebundenen oder leitungsungebundenen Versorgung berechnet. Dieser primäre Kreislauf beschreibt somit die Struktur der Wasserversorgung in Notsituationen.

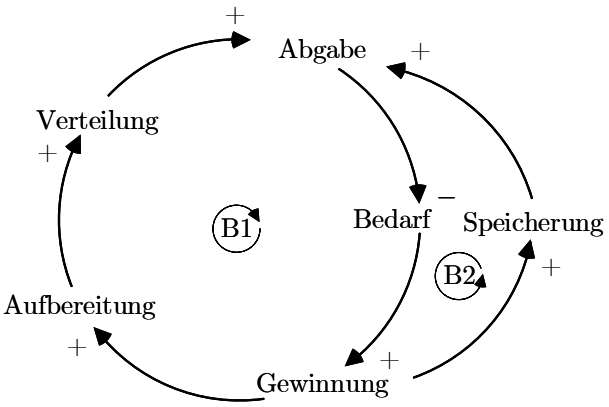


Abbildung 5.6: Causal-Loop-Diagramm des Modells NOTWASSER

Der sekundäre Rückkopplungskreislauf (B2) umfasst den Wasserbedarf, die Speicherung, die Gewinnung und die Wasserabgabe. Der Wasserbedarf und die Wasserabgabe sind entsprechend des primären Kreislaufs voneinander abhängig. Die Wasserabgabe beeinflusst zudem die gespeicherte Wassermenge. Wird weniger Wasser abgegeben als bereitgestellt, so wird dieses, wenn möglich, gespeichert. Sind gespeicherte Wassermengen vorhanden, so muss weniger Wasser zusätzlich gewonnen werden. Die gewonnene Wassermenge ist wie beim primären Kreislauf vom Wasserbedarf abhängig und somit wird hierdurch die Schleife des sekundären Kreislaufs geschlossen. Dieser zweite Kreislauf bildet somit die Struktur der Wasserspeicherung bei der Wasserversorgung in Notsituationen ab.

5.2.5.3 Erstellung des System Dynamics Modells NOTWASSER

Das Modell NOTWASSER dient der Beurteilung der Resilienz des Wasserversorgungssystems anhand der zur vollständigen Bedarfsdeckung fehlenden Wassermenge. Abbildung 5.7 zeigt, die Struktur des SD Modells NOTWASSER und die Zusammenhänge zur Ermittlung der Zielgröße. Der Wasserbedarf der Ersatzversorgung hängt von der gegenüber der Normalversorgung fehlenden Wassermenge ab. Die abgegebene Wassermenge ist wiederum von den Kapazitäten der Versorgungsarten der Ersatz- und Notwasserversorgung abhängig. Alle 19 Versorgungsarten, die in Abschnitt 3.3.2 erläutert wurden, sind im Modell NOTWASSER abgebildet.

Die Versorgungsarten setzen sich jeweils aus mehreren, charakteristischen Systemelementen zusammen. Jede Versorgungsart besteht aus einem Systemelement der Wassergewinnung, einem oder mehreren Systemelementen der Speicherung sowie einem Systemelement der Verteilung. Zudem umfassen einige Versorgungsarten, zusätzlich ein Systemelement der Aufbereitung. Der Aufbau des Systems wird nachfolgend dargestellt. Die Gleichungen des Modells sind im Anhang in Abschnitt D.1 aufgeführt.

Beeinträchtigung der Normalversorgung und Identifikation der benötigten Wassermenge

Für das Modell NOTWASSER gilt das Prinzip der Massenerhaltung. Die Wassermenge, die in das Modell eingespeist wird, muss, abzüglich der in den Speicherbehältern zwischengespeicherten Wassermenge, das Modell in der gleichen Zeit als Abgabe an die Verbrauchenden verlassen.

Den Ausgangspunkt für das Modell NOTWASSER stellt eine Beeinträchtigung der Normalversorgung dar. Die Beeinträchtigung der Normalversorgung wird im Modell durch einen Notfall verursacht, der zu einer Einschränkung der mit der Normalversorgung bereitstellbaren Wassermenge führt. Die durch den Notfall beeinträchtigten Prozesse der Normalversorgung werden durch die dafür geeigneten Versorgungsarten substituiert.

Die im Normalfall bereitgestellte Wassermenge stellt eine wesentliche Eingangsgröße des Modells dar. Hierfür wird eine Wassermenge in Höhe von $Q_{d,m}$ angenommen.

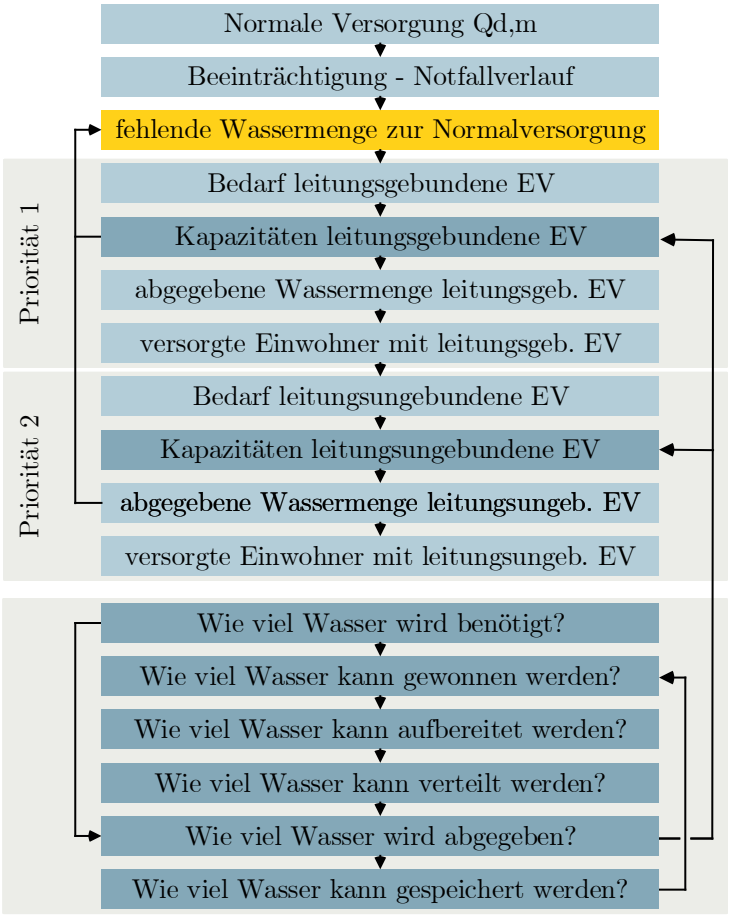


Abbildung 5.7: Struktur des *System Dynamics* Modells NOTWASSER

Abhängig vom Verlauf des Notfalls kann mit der Normalversorgung nur ein bestimmter Anteil von $Q_{d,m}$ bereitgestellt werden (Abbildung 5.8). Über den vorgegebenen Notfallverlauf wird somit festgelegt, welcher Anteil der Wassermenge an einem jeweiligen Tag über die Normalversorgung bereitgestellt wird. Der Notfallverlauf wird durch einen Faktor zwischen 0 und 1 (0 bis 100 %) für jeden Zeitschritt vorgegeben und durch die Betrachtung von Szenarien erläutert, variiert.

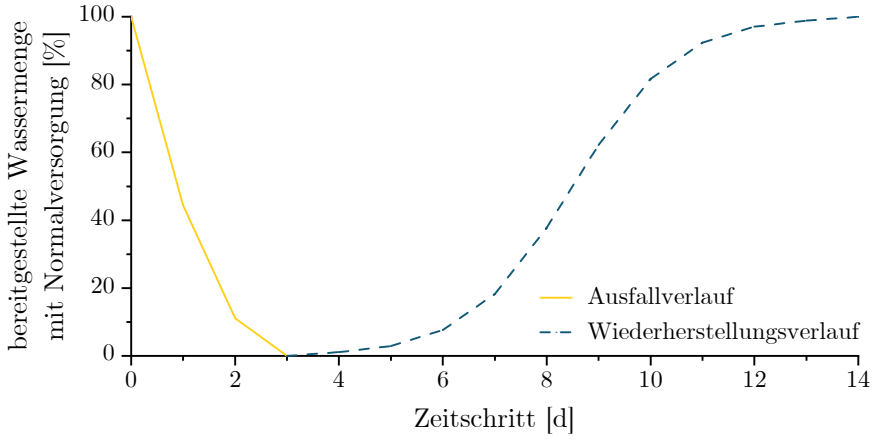


Abbildung 5.8: Notfallverlauf $v(t)$ der zu einer Unterversorgung führt

In Abhängigkeit des Notfallverlaufs entsteht ein Mengendefizit (Gleichung 5.3). Dieses Mengendefizit ist somit die Basis des Modells. Es verursacht einen Bedarf der Ersatz- oder Notwasserversorgung, da Einwohner und Patienten von der Normalversorgung unversorgt bleiben. Der Verlauf des Notfalls wird durch die Betrachtung von Szenarien, wie in Abschnitt 5.2.7 erläutert, variiert.

bereitgestellte Wassermenge mit normaler Versorgung
= bereitgestellte Wassermenge im Normalfall (5.3)
· (1 - Notfallverlauf)

Abbildung der fehlenden Wassermenge und versorgten sowie unversorgten Einwohner und Patienten

Als fehlende Wassermenge gilt die Wassermenge, die nicht durch die Normalversorgung und leitungsgebundene sowie -ungebundene Ersatzversorgung bereitgestellt werden kann, jedoch zur Deckung von $Q_{d,m}$ benötigt werden würde. Sie wird aus der Differenz von Wasserbedarf und -abgabe ermittelt (Abbildung 5.9). Diese Differenz wird für jeden modellierten Zeitschritt erfasst und durch einen Systemzustand abgebildet. Dabei wird betrachtet, wie viel Wasser durch die Normalversorgung sowie welche Wassermenge mit den verfügbaren Kapazitäten der Ersatz- und Notwasserversorgung bereitgestellt werden kann.

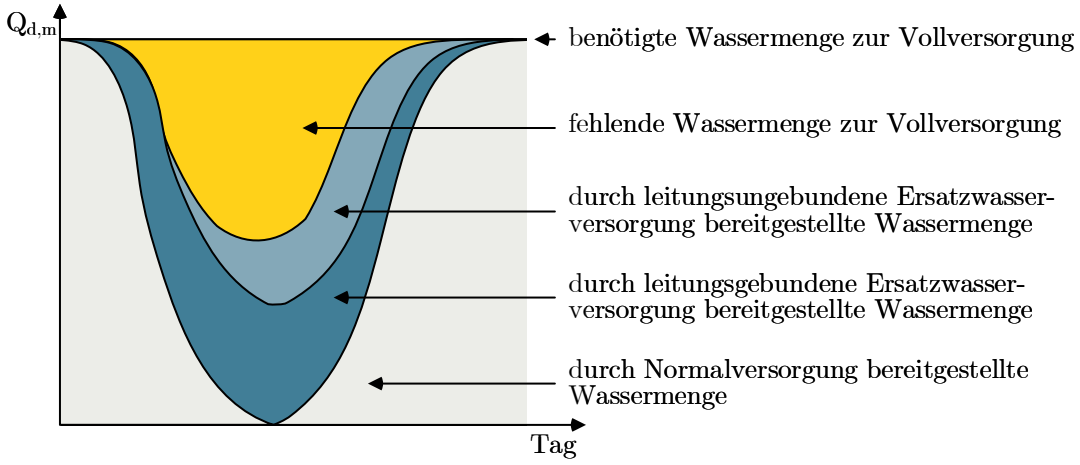


Abbildung 5.9: Bestimmung der fehlenden Wassermenge über die Differenz der benötigten und bereitgestellten Wassermenge

Im Modell wird die fehlende Wassermenge als Zustandsvariable abgebildet (Abbildung 5.10). Sie wird somit durch das Integral (INTEG) über die Differenz der zur Normalversorgung fehlenden Wassermenge [m^3/d] und die durch die Ersatzversorgung abgegebene Wassermenge [m^3/d] sowie durch die im vorherigen Zeitschritt fehlende Wassermenge [m^3/d] ermittelt (Gleichung 5.4). Die Subtraktion der fehlenden Wassermenge des vorherigen Zeitschritts [m^3/d] dient dazu, die fehlende Wassermenge jedes Zeitschritts zu ermitteln. Diese wird durch die fehlende Wassermenge [m^3] dividiert durch den Zeitschritt [d] berechnet. Zu Beginn der Simulation ist die fehlende Wassermenge gleich Null. Die durch die Ersatz-

versorgung abgegebene Wassermenge ist die Summe aus der Wassermenge die durch die leitungsgebundenen sowie leitungsungebundenen Versorgungsarten an die Verbrauchenden abgegeben wird.

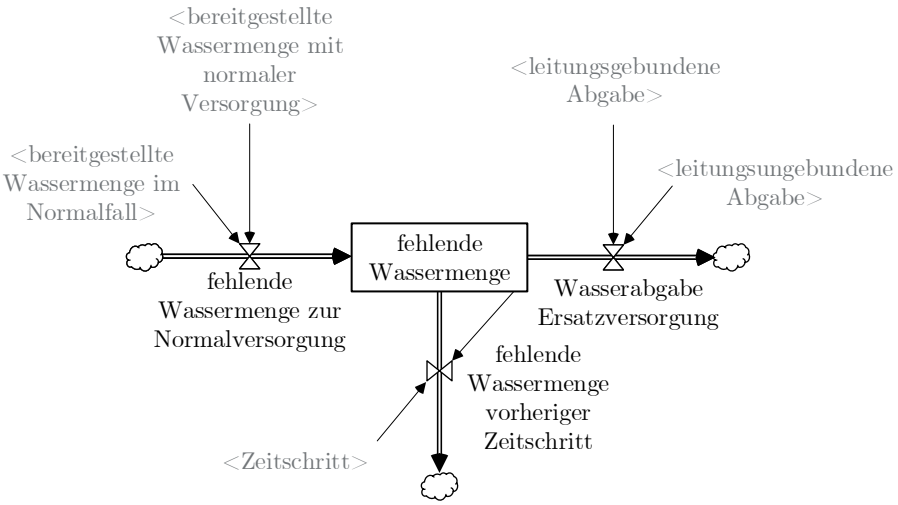


Abbildung 5.10: Zustands-, Fluss- und Hilfsvariablen zur Abbildung der fehlenden Wassermenge

fehlende Wassermenge
= INTEG (fehlende Wassermenge zur Normalversorgung
– Wasserabgabe Ersatzversorgung
– fehlende Wassermenge vorheriger Zeitschritt,
0) *Wert zu Beginn der Simulation* (5.4)

Aus der fehlenden Wassermenge werden anhand der spezifischen Bedarfe die Anzahl der unversorgten Einwohner und Patienten abgeleitet. Die Abbildung 5.11 zeigt die Ermittlung der Anzahl der unversorgten Einwohner im SD Modell NOTWASSER. Die Anzahl der unversorgten Einwohner [P] wird, wie in der Gleichung 5.5 zu erkennen, durch das Integral über die Differenz der Anzahl der zu versorgenden Einwohner [P/d] und der versorgten Einwohner [P/d] sowie der im vorherigen Zeitschritt unversorgten Einwohner [P/d] ermittelt.

unversorgte Einwohner
= INTEG (zu versorgende Einwohner
– versorgte Einwohner
– unversorgte Einwohner vorheriger Zeitschritt,
0) *Wert zu Beginn der Simulation* (5.5)

Zu Beginn der Simulation sind alle Einwohner versorgt und somit die Anzahl der unversorgten Einwohner gleich Null. Die Anzahl der zu versorgenden Einwohner entspricht der

gesamten Bevölkerung. Um die Anzahl der unversorgten Einwohner getrennt ermitteln zu können, ist die Subtraktion des Ergebnisses des vorherigen Zeitschritts notwendig.

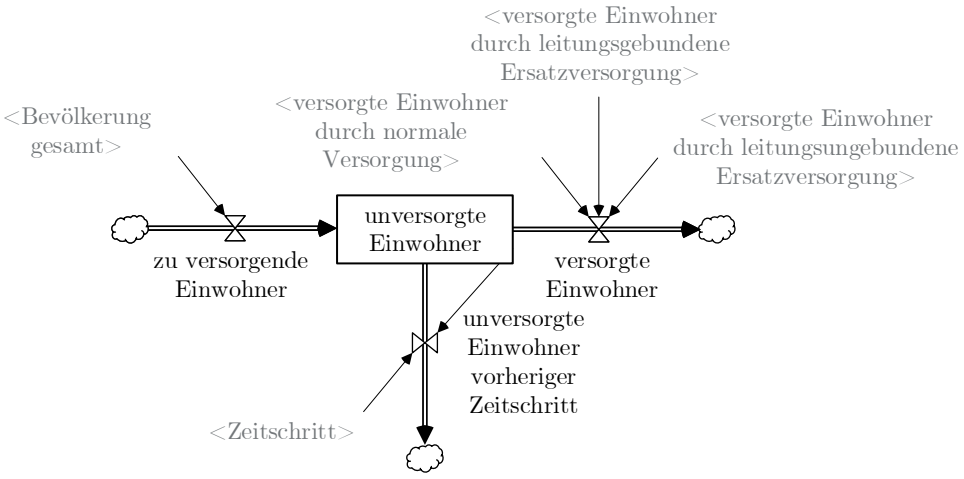


Abbildung 5.11: Zustands-, Fluss- und Hilfsvariablen zur Abbildung der unversorgten Einwohner

Die Abbildung der unversorgten Patienten im SD Modell NOTWASSER ist in der Abbildung 5.12 dargestellt. Die unversorgten Patienten [Pat] werden durch das Integral über die Differenz der zu versorgenden Patienten [Pat/d] und der versorgten Patienten [Pat/d] sowie der im vorherigen Zeitschritt unversorgten Patienten [Pat/d] ermittelt (Gleichung 5.6). Die zu versorgenden Patienten ergeben sich aus dem Produkt des Anteils der Patienten in der Bevölkerung und der Anzahl der gesamten Einwohner. Zur Ermittlung der Anzahl der unversorgten Patienten in jedem Zeitschritt ist die Subtraktion der Anzahl des vorherigen Zeitschritts erforderlich.

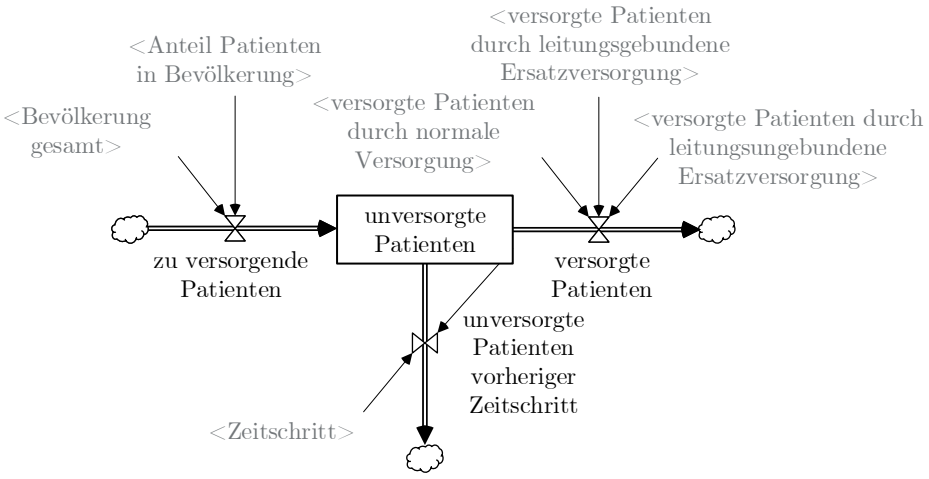


Abbildung 5.12: Zustands-, Fluss- und Hilfsvariablen zur Abbildung der unversorgten Patienten

unversorgte Patienten
= INTEG (zu versorgende Patienten
– versorgte Patienten
– unversorgte Patienten vorheriger Zeitschritt,
0) *Wert zu Beginn der Simulation* (5.6)

Wasserbedarf und -abgabe

Die für die Versorgung der gesamten Einwohner und Patienten benötigte Wassermenge wird über den spezifischen leitungsgebundenen Bedarf ermittelt. Der Wasserbedarf der Einwohner sowie Patienten durch Normalversorgung wird somit anhand des mittleren täglichen Wasserbedarfs $Q_{d,m}$ bestimmt.

Der Ersatzwasserbedarf ergibt sich aus der Differenz der durch die Normalversorgung aufgrund des Notfallverlaufs reduziert bereitgestellten Wassermenge und $Q_{d,m}$. Zur Ermittlung der unversorgten Einwohner bzw. Patienten wird die fehlende Wassermenge durch die spezifischen Bedarfe der Verbrauchergruppen im Normalfall geteilt.

Die Abgabe durch Versorgungsarten der Ersatzwasserversorgung wird von diesem Bedarf und den vorhandenen Kapazitäten der Versorgungsarten beeinflusst. Im Modell wird die leitungsgebundene Ersatzversorgung vor einer leitungsungebundenen Ersatzversorgung priorisiert.

Um die leitungsgebundene Wasserversorgung aufrecht zu erhalten, ist eine systemabhängige Mindestwassermenge nötig (Abschnitt 4.2.1). Zur Berücksichtigung dieses Aspekts wurde eine Hilfsvariable im Modell eingefügt. Durch die Hilfsvariable wird die mit der normalen Versorgung sowie die mit einer leitungsgebundenen Ersatzversorgung bereitgestellten Wassermenge mit der systemabhängigen Mindestwassermenge verglichen. Hierbei wird ermittelt, für welchen Anteil der Bevölkerung eine leitungsgebundene Versorgung mit der spezifischen systemabhängigen Mindestwassermenge möglich ist. Übersteigen die Kapazitäten der Versorgungsarten die systemabhängige Mindestwassermenge, so wird bei der Bedarfsermittlung der spezifische leitungsgebundene Bedarf $q_{d,m}$ berücksichtigt.

Wassergewinnung

Die Gewinnung wird als Synonym für die Systemeinspeisung verwendet und entspricht somit der gesamten, eingespeisten Wassermenge. Im Modell werden vier Möglichkeiten der Wassergewinnung bzw. der Wasserherkunft in Anlehnung an die DIN 2001-3 (2015) sowie Bross, Wienand et al. (2019) betrachtet. Die Nummerierung der aufgeführten Möglichkeiten der Wassergewinnung dient zur eindeutigen Benennung der Versorgungsarten und entspricht der in Abschnitt 3.3.2 aufgezeigten Klassifizierung.

Die Hilfsvariablen der Gewinnung setzen sich, gemäß der in Gleichung 3.4 dargestellten Zusammenhänge, jeweils aus der täglichen Kapazität einer Gewinnungsanlage und der Anzahl der Gewinnungsanlagen zusammen. Die Abbildung 5.13 zeigt exemplarisch die Hilfsvariablen des Gewinnungselements *Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder*

Quellen. Für alle Versorgungsarten einer Gewinnungsart steht in Summe die Kapazität dieser zur Verfügung.

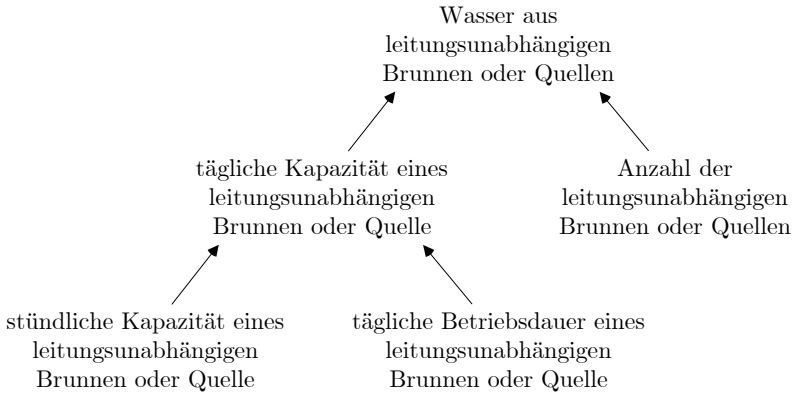


Abbildung 5.13: Hilfsvariablen zur Abbildung der Gewinnung von Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen im SD Modell NOTWASSER

Wasseraufbereitung

Einige Versorgungsarten (z. B. 3a) beinhalten ein Aufbereitungselement. Die Abbildung 5.14 zeigt die Hilfsvariablen zur Abbildung von mobilen Aufbereitungsanlagen. Die Kapazität der mobilen Aufbereitungsanlagen ergibt sich gemäß den in Gleichung 3.5 aufgezeigten Zusammenhängen.

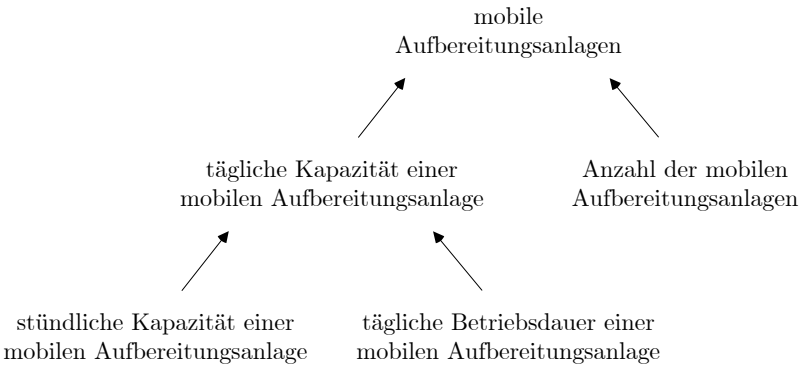


Abbildung 5.14: Hilfsvariablen zur Abbildung von mobilen Aufbereitungsanlagen im SD Modell NOTWASSER

Wasserspeicherung

Wasserspeicher sind im Modell als Zustandsvariablen umgesetzt und verfügen somit über einen Zulauf, eine Entnahme und eine begrenzte Kapazität zur Speicherung von Wasser. Die Differenz zwischen Zulauf und Entnahme führt zu einer Fluktuation der gespeicherten Wassermenge.

Im Modell kommen zur Speicherung drei verschiedene Arten von Speicherelemente jeweils als Zustandsvariablen zum Einsatz. In einer Versorgungsart sind ein bis drei Speicherzustandsvariablen enthalten. Dies ist zum einen eine Rohwasserspeicherung, welche

nach der Gewinnung und vor der Aufbereitung angeordnet ist, zum anderen eine zentrale und eine dezentrale Reinwasserspeicherung, die das Wasser nach der Aufbereitung und jeweils vor oder nach der Verteilung speichern. Der Aufbau der Speicher ist identisch, lediglich der Zufluss und der Abfluss sind von unterschiedlichen Größen abhängig.

Die Zustandsvariable *Rohwasserspeicherung* ist wie in der Abbildung 5.15 zu erkennen, von dem Zufluss durch die Gewinnung und dem Abfluss zur Aufbereitung abhängig. Die gewonnene Wassermenge hängt von der freien Kapazität des Rohwasserspeichers und der Kapazität der Gewinnungsanlagen ab. Die freie Kapazität des Speichers zum Zeitpunkt t_i bestimmt sich durch die Kapazität des Rohwasserspeicher, des gefüllten Volumens beim Zeitpunkt t_{i-1} sowie des Zu- und Abflusses zum Zeitpunkt t_i.

Die Zustandsvariable *zentrale Reinwasserspeicherung* ist vom Zufluss aus der Aufbereitungsanlage und vom Abfluss der Verteilung abhängig. Den zentralen Reinwasserspeicherbehältern fließt so viel Wasser zu, wie es die Kapazität der Aufbereitungsanlage bzw. die freie Kapazität des zentralen Reinwasserspeichers zulässt. Der Abfluss ergibt sich aus der Wassermenge, die verteilt und direkt verbraucht sowie verteilt und dezentral gespeichert wird. Somit ist der Abfluss der zentralen Reinwasserspeicherung von der Verteilungskapazität und der freien Kapazität des dezentralen Reinwasserspeichers abhängig.

Eine Zustandsvariable *dezentrale Reinwasserspeicherung* wird im Modell eingesetzt, wenn die Verteilkapazitäten zeitweise größer sind als die Abgabe. Somit ist der Zufluss zur dezentralen Reinwasserspeicherung die Wassermenge, die verteilt, aber nicht direkt verbraucht wird. Der Abfluss entspricht der Wassermenge, die aus dem dezentralen Reinwasserspeicher abgegeben wird.

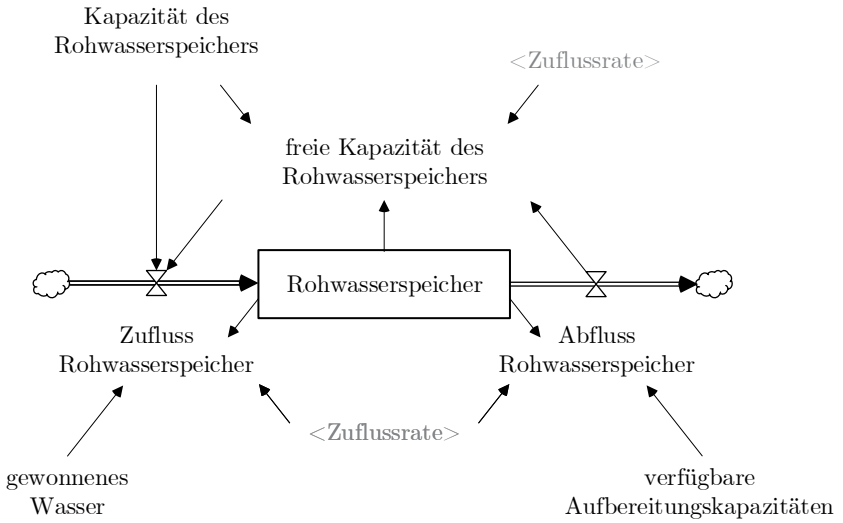
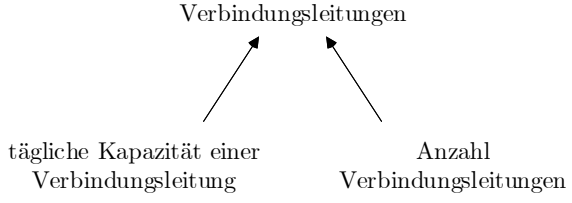


Abbildung 5.15: Zustandsvariable und Hilfsvariablen zur Abbildung von Rohwasserspeichern im System Dynamics (SD) Modell NOTWASSER

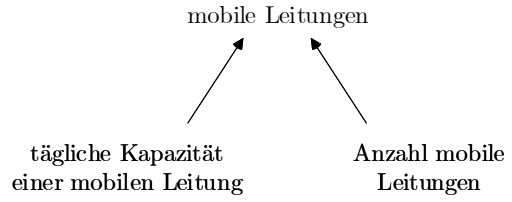
Wasserverteilung

Die Verteilung wird im Modell durch Hilfsvariablen umgesetzt. Je nach Versorgungsart handelt es sich dabei um die Hilfsvariable *Verbindungsleitung*, *mobile Leitungen* oder

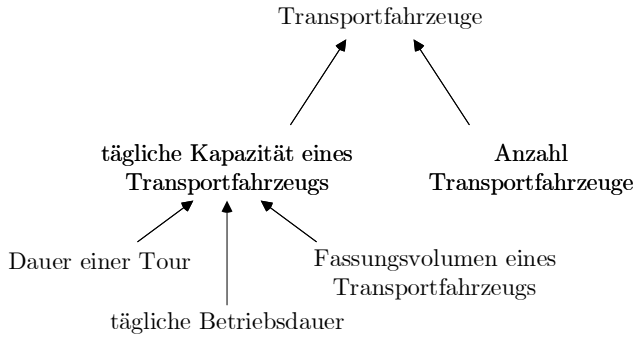
Transportfahrzeuge (Abbildung 5.16). Die Kapazität der Verteilung ergibt sich jeweils aus der spezifischen täglichen Kapazität einer Leitung bzw. eines Transportfahrzeugs multipliziert mit der Anzahl der Leitungen oder Fahrzeuge.



(a) Hilfsvariablen zur Abbildung von Verbindungsleitungen



(b) Hilfsvariablen zur Abbildung von mobilen Leitungen



(c) Hilfsvariablen zur Abbildung der Verteilung mit mobilen Leitungen

Abbildung 5.16: Hilfsvariablen zur Abbildung der Verteilung im SD Modell NOTWASSER

Abfüllanlagen werden im Modell durch Zustandsvariablen abgebildet, da das Wasser in abgefüllter Form gespeichert bzw. gelagert werden kann (Abbildung 5.17). Die hierzu einsetzbaren Kapazitäten der Abfüllanlagen werden durch die tägliche Kapazität einer Abfüllanlage sowie der Anzahl der Abfüllanlagen ermittelt (Gleichung 3.10).

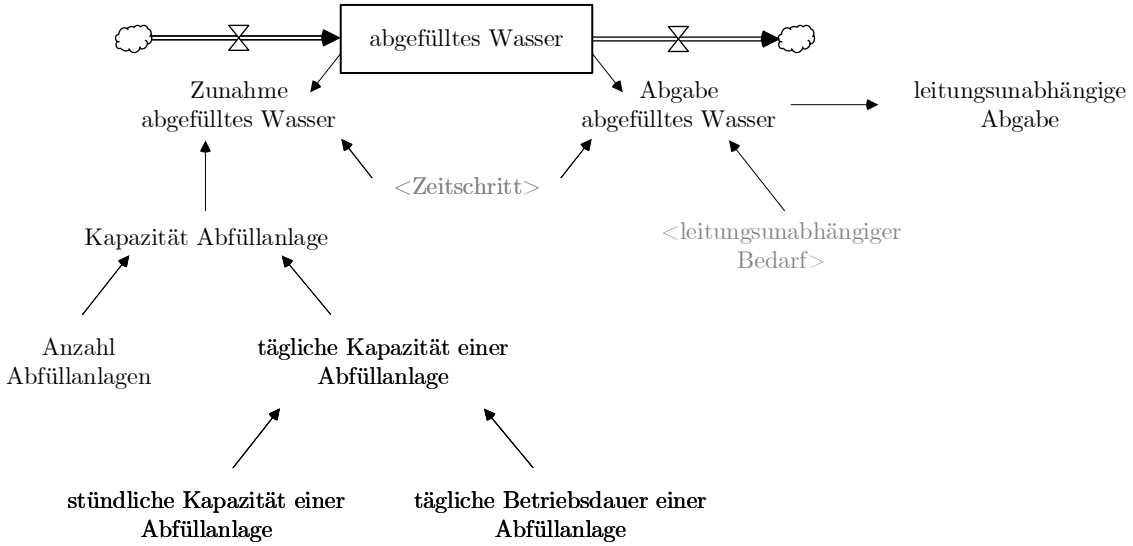


Abbildung 5.17: Zustandsvariable und Hilfsvariablen zur Abbildung von Abfüllanlagen im SD Modell NOTWASSER

5.2.6 Verifizierung und Validierung des Modells NOTWASSER

5.2.6.1 Verifizierung und Validierung von System Dynamics Modellen

Bei der Verifizierung (von lateinisch *veritas* „Wahrheit“ und *facere* „machen“) von SD Modellen wird sichergestellt, dass die Software des rechnergestützten Modells und seine Implementierung korrekt sind [Sargent, 2013]. Die Verifizierung von SD Modellen erfolgt durch die Sicherstellung, dass eine fehlerfreie Simulationssprache verwendet wurde, die geltenden Verhaltensregeln korrekt kodiert wurden, und die Struktur, in der diese Regeln funktionieren, zu einer korrekten und ausreichenden Replikation der als Anforderungen an das erstellte Modell spezifizierten Referenzverhaltensweise führt [SDA, 2005].

Die Modellvalidierung (von lateinisch *validus* „wirksam“, „fest“, „kräftig“) ist „der Nachweis, dass ein Modell innerhalb seines Anwendungsbereichs einen zufriedenstellenden Genauigkeitsbereich besitzt, der mit der beabsichtigten Anwendung des Modells vereinbar ist“ [Sargent, 2013]. Der Validierungsprozess dient der Überprüfung des vorliegenden Modells sowohl analytisch als auch auf der Basis von synthetischen Daten [Barlas, 1996]. Die Validierung ist dabei auf das Modell als Ganzes sowie auf die Komponenten des Modells gerichtet [Schwaninger und Groesser, 2011]. Gemäß Sterman (2000) „sind alle Modelle falsch“, sodass das Prüfkriterium der Validität weniger ist, ob das Modell richtig oder falsch ist, sondern ob das Modell seinen Zweck erfüllt.

Im Zuge der Erstellung des SD Modells NOTWASSER wurden die Parameter verifiziert sowie die Modellstruktur und das -verhalten validiert. Das jeweilige Vorgehen wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

5.2.6.2 Verifizierung der Parameter

Das Ziel der Parameterverifizierung ist es, die Parameter eines Modells anhand von Evidenz oder Wissen über das reale System zu bewerten [Barlas, 1996]. Bei der konzeptuellen Parameterprüfung wird ermittelt ob die Parameter des Modells den Elementen im realen System entsprechen [Sargent, 2013; Schwaninger und Groesser, 2011]. Bei der numerischen Parameterprüfung wird geprüft, ob die Größen der konzeptuell bestätigten Parameter ebenfalls übereinstimmen [Barlas, 1996].

Die Parameter des Modells NOTWASSER basieren auf den für die Ersatz- und Notwasserversorgung identifizierten Versorgungsarten (Abschnitt 6.1). Die Inhalte wurden im Rahmen des Forschungsprojekts NoWa II von Experten während eines Stakeholder-Workshops diskutiert und verifiziert.

5.2.6.3 Validierung der Modellstruktur

Die Modellstruktur wird validiert, in dem die formalen Konzepte und Wechselbeziehungen getestet werden. Hierbei wird beurteilt, ob die Logik des Modells mit der entsprechenden Struktur des realen Systems übereinstimmt [Schwaninger und Groesser, 2011]. Bei der Validierung der Modellstruktur werden die Strukturelemente und deren Verbindun-

gen überprüft. Als Resultat sind im Modell nur die enthalten, die im realen System höchstwahrscheinlich auch vorhanden sind [Barlas und Carpenter, 1990; Sargent, 2013].

In diesem Zusammenhang wurden die Gleichungen des Modells NOTWASSER, die Zusammenhänge für das Zustands- und Flussdiagramm, die Systemgrenzen sowie die Abhängigkeiten entlang der CLD-Diagramme und ihrer implementierten kausalen Erklärungen überprüft.

5.2.6.4 Validierung des Modellverhaltens

Die Validierung des Modellverhaltens erfolgt empirisch durch einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit Daten aus dem untersuchten realen System [Barlas und Carpenter, 1990; Schwaninger und Groesser, 2011]. Auf dieser Grundlage können Rückschlüsse auf die Zweckmäßigkeit des Modells gezogen werden. Die empirischen Daten können entweder historisch sein oder sich auf angemessene Erwartungen über mögliche zukünftige Entwicklungen beziehen [Sargent, 2013].

Für das Modell NOTWASSER liegen keine historischen Daten vor, da bei vergangenen Notsituationen keine Erfassung der abgegebenen bzw. fehlenden Wassermenge durchgeführt wurde und somit kein Abgleich mit den Modellergebnissen möglich ist. Zur Validierung des Modellverhaltens wurden ein *worst-case* und ein *best-case* Szenario für ein Beispielwasserversorgungssystem herangezogen. Dem *worst-case* Szenario liegt zugrunde, dass keine Ressourcen zur Ersatz- bzw. Notwasserversorgung zur Verfügung stehen. Das *best-case* Szenario basiert auf der Annahme, dass unbegrenzte Ressourcen vorhanden sind. Die Modellgleichungen und der Modellaufbau wurde iterativ angepasst, bis das Modellverhalten dem zu erwartenden Verhalten entsprach.

5.2.7 Auswirkung der Notsituationen, des Bevorratungsverhaltens sowie des Notfallverlaufs auf die fehlende Wassermenge

5.2.7.1 Berücksichtigung verschiedener Notsituationen

Für das Fallbeispiel werden die Auswirkungen verschiedener Notsituation auf die fehlende Wassermenge untersucht. Hierzu werden diese aus der in Abschnitt 6.1.1 aufgezeigten Systemanalyse für das Fallbeispiel abgeleitet und in der Simulation angewandt. Ergänzend zu den vorhandenen Ressourcen werden für die in Abschnitt 4.2 erläuterten Schutzziele die benötigten Ressourcen und deren effektiver Einsatz betrachtet. Hierbei wird sowohl die fehlende Wassermenge als auch die Zahl der unversorgten Einwohner und Patienten betrachtet.

5.2.7.2 Berücksichtigung der Eigenbevorratung der Bevölkerung

Die Eigenbevorratung der Bevölkerung ist ein Erfolgsfaktor bei der Bewältigung von Notsituationen in der Wasserversorgung. Durch eine Onlinebefragung wurde die durchschnittlich bevorratete Wassermenge der deutschen Bevölkerung ermittelt, um diese als

Eingangsgröße in das Modell NOTWASSER einfließen zu lassen. Hierzu wurden vom 11. Juni bis 15. September 2017 Teilnehmende zu einer Online-Umfrage eingeladen.

Die Umfrage wurde durch den Versand von E-Mails an die Mitglieder der Universität der Bundeswehr verteilt. Über Mailinglisten wurde die Umfrage zudem an Mitarbeitende von WVU sowie verschiedener Institutionen aus dem Bereich des Katastrophenschutz versandt. Weitere Teilnehmer wurden durch eine Schneeballstichprobe generiert, indem der Fragebogen eine Aufforderung zum Weiterversand enthielt. Diese Art der Erhebung ermöglicht jedoch keine zufällige oder repräsentative Stichprobe der deutschen Bevölkerung und dient daher nur zur Unterstützung der qualitativen Szenarienbildung.

Der Fragebogen enthielt 34 Fragen (Abschnitt D.2 im Anhang). Die Bevorratung sowie die allgemeinen Maßnahmen zur Vorbereitung auf einen Ausfall der Wasserversorgung waren Gegenstand von 21 Fragen. Neun Fragen beschäftigten sich mit der Haushaltssituation. Weitere vier Fragen wurden zur Bestimmung von Geschlecht, Alter und Wohnort formuliert. Der einleitende Teil des Fragebogens informierte die Teilnehmer über den Zweck der Studie, stellte die Universität der Bundeswehr als Träger vor und gewährleistete die Anonymität der Antworten.

5.2.7.3 Berücksichtigung des Notfallverlaufs

Die Beeinträchtigung der Normalversorgung wird im Modell NOTWASSER durch einen 14-tägigen Notfall umgesetzt. Der Anteil der mit der Notmalversorgung bereitgestellten Wassermenge wird über den Notfallverlauf vorgegeben. Der Verlauf des Ausfalls sowie der Wiederherstellung ist jedoch von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig (z. B. Reparaturmöglichkeiten vs. Neuverlegung von Leitungen), sodass sich unterschiedliche Notfallverläufe ergeben können (Abbildung 5.18).

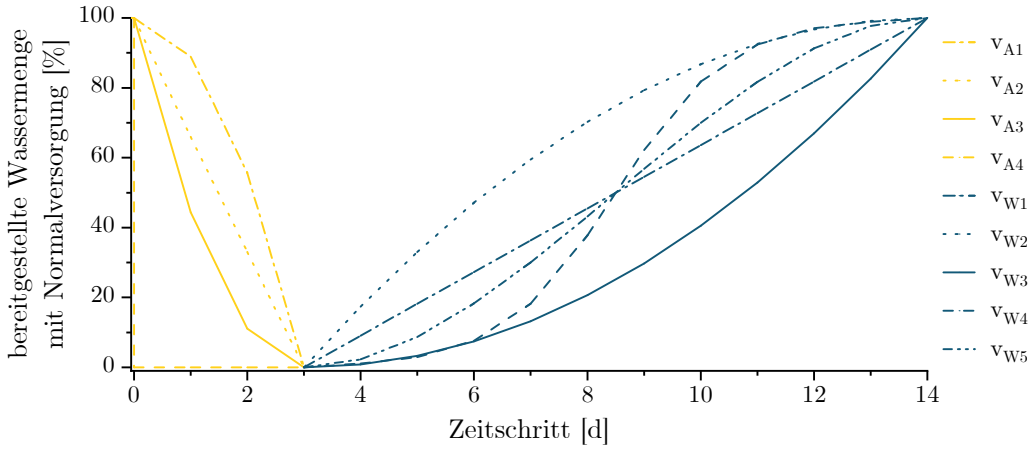


Abbildung 5.18: Im Modell betrachtete Ausfall- und Wiederherstellungsverläufe

Im Modell sind für die Ausfallverläufe die Werte an den Tagen 0 bis 3, für die Wiederherstellungsverläufe die Werte der Tage 3 bis 14 hinterlegt. Diese werden anhand der im Folgenden aufgezeigten Gleichungen ermittelt. Die Kurvenverläufe orientieren sich an der Literatur (z. B. Abokifa et al. (2017), Attoh-Okine et al. (2009), Balut et al. (2018), Deuer-

lein et al. (2018), Sophocleous et al. (2018) und Zhang et al. (2018)) sowie vergangenen, realen Beeinträchtigungen von Wasserversorgungssystemen, für die jedoch keine konkreten Daten zur fehlenden Wassermenge verfügbar sind. Die fehlende Wassermenge wird über das Integral des jeweiligen Verlaufs ermittelt.

Der Ausfallverlauf v_{A1} (Gleichung 5.7) dient der Abbildung der Annahme, dass die Bevölkerung in den ersten Tagen einer Beeinträchtigung für sich selbst sorgen kann. Zudem sind die Speicherkapazitäten im Netz weitgehend gefüllt. Die Neigung des Verlaufs ist zunächst flach. Die Verringerung der Wassermenge nimmt mit jedem Zeitschritt zu. Die Ermittlung der fehlenden Wassermenge bei diesem Ausfallverlauf erfolgt durch Gleichung 5.8.

$$v_{A1}(t) = -\frac{1}{9}t^2 + 1 \tag{5.7}$$

$$V_{A1}(t) = t - \frac{1}{27}t^3 + C \tag{5.8}$$

Ein linear verlaufender Ausfall wird durch den Ausfallverlauf v_{A2} (Gleichung 5.9) abgebildet. Die Basis dieses Verlaufs bildet die Annahme, dass sich das Abgabeverhalten innerhalb von drei Tagen nicht verändert und die vorhandenen Wasserressourcen der Normalversorgung somit konstant abnehmen. Die fehlende Wassermenge wird durch Gleichung 5.10 berechnet.

$$v_{A2}(t) = -\frac{1}{3}t + 1 \tag{5.9}$$

$$V_{A2}(t) = t - \frac{1}{6}t^2 + C \tag{5.10}$$

Der Ausfallverlauf v_{A3} (Gleichung 5.11) stellt eine zunächst steilere Abnahme der bereitgestellten Wassermenge mit der Normalversorgung dar, die bis zum Totalausfall etwas abflacht. Ein solcher Verlauf kann durch eine zunächst zeitweise erhöhte Abgabe aufgrund von Vorratsbildung (z. B. Befüllung von Badewannen mit Trinkwasser) der Bevölkerung begründet sein. Die aus diesem Ausfallverlauf resultierende fehlende Wassermenge wird anhand Gleichung 5.12 ermittelt.

$$v_{A3}(t) = \frac{1}{9}(t-3)^2 \tag{5.11}$$

$$V_{A3}(t) = \frac{1}{27}(t-3)^3 + C \tag{5.12}$$

Eine abrupte Reduktion der bereitgestellten Wassermenge mit der Normalversorgung von 100 auf 0 % wird durch den Ausfallverlauf v_{A4} (Gleichung 5.13) abgebildet. Eine mögliche Ursache für einen solchen Verlauf ist ein Bruch einer Hauptleitung [Attoh-Okine et al., 2009], wenn keine Speicherkapazitäten im dahinterliegenden Netz vorhanden sind oder alternativ ein Stromausfall, der aufgrund von fehlenden Notstromaggregaten nicht verhindert werden kann. Die fehlende Wassermenge wird durch Gleichung 5.14 berechnet.

$$v_{A4}(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } t = 0 \\ 0 & \text{für } t > 0 \end{cases} \tag{5.13}$$

$$V_{A4}(t) = C \tag{5.14}$$

Der Wiederherstellungsverlauf v_{W1} (Gleichung 5.15) stellt eine konstant zunehmende Wiederherstellung der Normalversorgung dar. Die Ermittlung der fehlenden Wassermenge bei diesem Wiederherstellungsverlauf erfolgt durch Gleichung 5.8.

$$v_{W1}(t) = \frac{1}{11}t \tag{5.15}$$

$$V_{W1}(t) = \frac{1}{22}t^2 + C \tag{5.16}$$

Die Steigung der Kurve des Wiederherstellungsverlaufs v_{W2} (Gleichung 5.17) ist zu Beginn der Wiederherstellung steil und nimmt mit zunehmender Wiederherstellung ab. Ein solcher Verlauf kann durch die unmittelbare Priorisierung und Umsetzung von Wiederherstellungsmaßnahmen mit einer größeren Auswirkung auf die bereitgestellte Wassermenge mit der Normalversorgung begründet werden [Sophocleous et al., 2018]. Die Ermittlung der fehlenden Wassermenge bei diesem Ausfallverlauf erfolgt durch Gleichung 5.18.

$$v_{W2}(t) = -\frac{1}{121}(t-11)^2 + 1 \tag{5.17}$$

$$V_{W2}(t) = t - \frac{1}{363}(t-11)^3 + C \tag{5.18}$$

Der Wiederherstellungsverlauf v_{W3} (Gleichung 5.19) stellt eine über die Zeit zunehmende Wiederherstellungsrate dar. Der Beginn der Wiederherstellung verläuft hierbei zunächst mit einer geringen Steigung die mit jedem Zeitschritt zunimmt [Balut et al., 2018]. Die aus diesem Wiederherstellungsverlauf resultierende fehlende Wassermenge wird anhand Gleichung 5.20 ermittelt.

$$v_{W3}(t) = \frac{1}{121}t^2 \tag{5.19}$$

$$V_{W3}(t) = \frac{1}{363}t^3 + C \tag{5.20}$$

Eine zu Beginn ebenfalls geringe Wiederherstellungsrate wird durch den Wiederherstellungsverlauf v_{W4} (Gleichung 5.21) abgebildet. Hierbei ist die Steigung der Wiederherstellungskurve im zweiten und dritten Quartal der Wiederherstellungsphase steil und flacht im vierten Quartal wieder ab [Zhang et al., 2018]. Diese Kurve stellt sich ein, wenn die Umsetzung von Wiederherstellungsmaßnahmen zunächst verzögert stattfindet. Sobald die Maßnahmen umgesetzt werden, ist eine rasche Zunahme der bereitgestellten Wassermenge mit Normalversorgung zu verzeichnen. Die vollständige Normalversorgung wird jedoch mit einer weiteren Verzögerung erreicht. Die fehlende Wassermenge wird durch Gleichung 5.22

berechnet.

$$v_{W4}(t) = \frac{1}{1 + e^{-t+11}} \tag{5.21}$$

$$V_{W4}(t) = \ln(e^t + e^{11}) + C \tag{5.22}$$

Der Wiederherstellungsverlauf v_{W5} (Gleichung 5.23) verläuft mit denselben Annahmen wie der Verlauf v_{W4}. Es ist jedoch in der Abbildung 5.18 zu erkennen, dass die Unterschiede der Kurvensteigung in den einzelnen Abschnitten weniger ausgeprägt sind. Die Ermittlung der fehlenden Wassermenge bei diesem Ausfallverlauf erfolgt durch Gleichung 5.24.

$$v_{W5}(t) = -\frac{2}{1331}(t-3)^3 + \frac{3}{121}(t-3)^2 \tag{5.23}$$

$$V_{W5}(t) = -\frac{1}{2662}(t-25)(t-3)^3 + C \tag{5.24}$$

5.3 Entwicklung eines Indikatorsystems zur Beurteilung der Resilienz durch Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung

Die Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen in Notsituationen erfolgt im Rahmen dieser Dissertation anhand des Status quo der Notfallvorsorgeplanung. Hierzu wird ein Verbundindikator basierend auf den Inhalten des Risiko- und Krisenmanagements gemäß BBK (2016) und Bross, Wienand et al. (2019) entwickelt.

5.3.1 Verbundindikatoren

Indikatoren dienen dazu verschiedene latente, nicht direkt messbare Größen mit Hilfe von empirisch erfassbaren Variablen, abbilden zu können [Birkmann, 2013]. Durch die Integration und Kombination mehrerer Indikatoren werden so genannte Verbundindikatoren (engl. *composite indicators*) ermittelt [OECD, 2008]. Verbundindikatoren setzen sich aus mehreren Haupt-, Teil- sowie Einzelindikatoren zusammen, deren jeweilige Anzahl variieren kann (Abbildung 5.19).

Die Berechnung des Verbundindikators erfolgt durch die gewichtete Summe der Hauptindikatoren (Gleichung 5.25). Ferner werden Hauptindikatoren aus der gewichteten Summe der Teilindikatoren (Gleichung 5.26) und diese durch die gewichtete Summe der Einzelindikatoren Gleichung 5.27 ermittelt.

Der hier entwickelte Notfallvorsorgeplanungsindikator (NVP) basiert auf einer Reihe von zugrunde liegenden organisatorischen und technischen Haupt-, Teil- und Einzelindikatoren. Zur Entwicklung und Berechnung des NVP wurde ein mehrstufiger und iterativer Prozess nach OECD (2008) durchgeführt. Die Abbildung 5.20 zeigt das angewandte Vorgehen. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die einzelnen Schritte bei der Erstellung und Zusammensetzung des NVP.

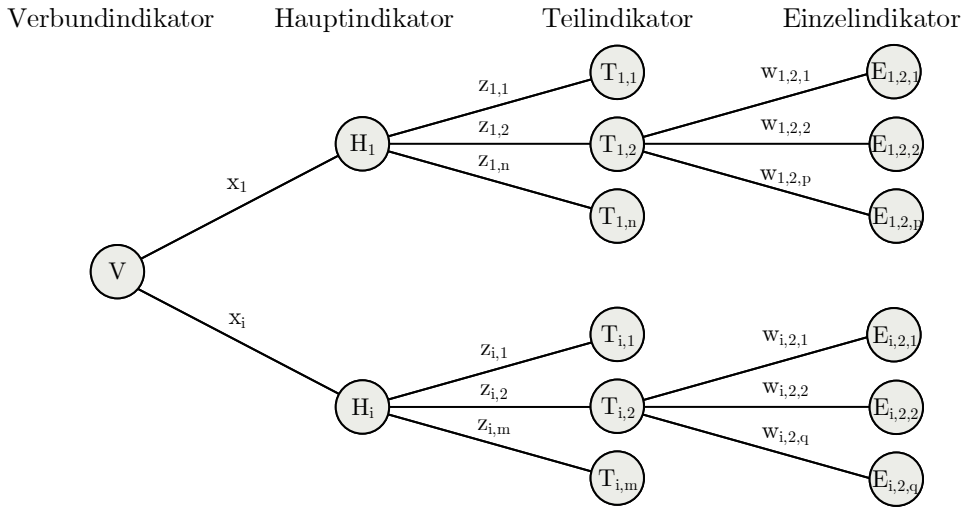


Abbildung 5.19: Zusammensetzung und Hierarchie eines Verbundindikators aus Haupt-, Teil- und Einzelindikatoren in Anlehnung an OECD (2008)

$$\mathrm{V} = \sum_{j=1}^{i} x_j \mathrm{H_j} \tag{5.25}$$

$$\mathrm{H}_i = \sum_{j=1}^{n} z_n \mathrm{T_{i,j}} \tag{5.26}$$

$$\mathrm{T}_{i,n} = \sum_{j=1}^{p} w_p \mathrm{E_{i,n,j}} \tag{5.27}$$

1. Definition des theoretischen Rahmens und Identifizierung eines repräsentativen Indikatorensatzes auf der Grundlage von Literatur sowie Experteninterviews
2. Datenauswahl und -akquisition
3. Analyse und Imputation fehlender Werte
4. Normalisierung
5. Gewichtung
6. Grafische Darstellung der Ergebnisse

Abbildung 5.20: Vorgehen bei der Erstellung eines Verbundindikators in Anlehnung an OECD (2008)

5.3.2 Definition des theoretischen Rahmens und Identifizierung eines repräsentativen Indikatorensatzes

Den Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Verbundindikators bildet ein fundierter theoretischer Rahmen. Gemäß OECD (2008) dient der theoretische Rahmen dazu, das zu messende Phänomen und seine Teilkomponenten klar zu definieren, indem die einzelnen Indikatoren und deren Gewichte die Dimensionen des Gesamtbilds widerspiegeln.

Um die Vorteile und Anwendungsgrenzen des Indikators insbesondere für politische Entscheidungsträger verständlich zu machen, ist eine transparente Darstellung der Indexkonstruktionsmethoden notwendig [Pelling, 2006; Schauser et al., 2010]. Daher werden die Teil- und Einzelindikatoren im Folgenden erläutert, welche in die Ermittlung des Notfallvorsorgeplanungsindikators einfließen. Durch die Anwendung einer Stakeholder-orientierten Methodik wurden die Einzelindikatoren ergänzend zur Literatur und bestehenden Theoriemodellen, durch das Wissen von Stakeholdern in Workshops ausgewählt. Diese Methodik wird bei der Erarbeitung von Verbundindikatoren meist herangezogen (z. B. Bollin und Hidajat (2006), Joerin et al. (2014)), wenn deren Einsatz, wie im vorliegenden Fall, als Selbstbewertungsinstrument für Kommunen oder Behörden vorgesehen ist.

FF 3.1: Welche Schritte muss eine effektive Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung umfassen?

Die Inhalte des Indikators entsprechen den Bestandteilen einer effektiven Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung und dienen der Beantwortung einer betrachteten Forschungsfrage dieser Dissertation. Die weiteren Forschungsfragen werden in den Kapiteln 6 und 7 aufgegriffen und beantwortet.

Den theoretischen Rahmen des NVP bildet das systematische Vorgehen des Risiko- und Krisenmanagements nach BBK (2016) und BMI (2011), deren notwendiger Umfang durch fünf Prozessschritte beschrieben wird. Der NVP setzt sich daher aus den fünf Hauptindikatoren *Vorplanung* (VP), *Risikoanalyse* (RA), *Vorbeugende Maßnahmen* (VM), *Krisenmanagement* (KM) und *Evaluierung* (E) zusammen (Tabelle 5.1). Die Tabelle 5.1 zeigt die Unterteilung der fünf Hauptindikatoren und der insgesamt 19 Teilindikatoren. Die Teilindikatoren bestehen aus aggregierten Einzelindikatoren die im Folgenden erläutert werden.

Tabelle 5.1: Zusammensetzung und Hierarchie des Notfallvorsorgeplanungsindikators durch fünf Hauptindikatoren sowie deren Teil- und Einzelindikatoren

Verbundindikator		Hauptindikator		Teilindikator		Einzelindikator
NVP	Notfall-vorsorge-planungs-indikator	VP	Vorplanung	VP_1	Bewusstseins-bildung	$VP_{1,1}$ bis $VP_{1,9}$
				VP_2	Festlegung von Verantwortlichkeiten	$VP_{2,1}$ bis $VP_{2,3}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle 5.1

Verbundindikator	Hauptindikator		Teilindikator		Einzelindikator
	RA	Risiko-analyse	RA_1	Gefahrenanalyse	$RA_{1,1}$ bis $RA_{1,8}$
			RA_2	Vulnerabilitätsanalyse	$RA_{2,1}$ bis $RA_{2,8}$
			RA_3	Risikoidentifikation	$RA_{3,1}$ bis $RA_{3,7}$
			RA_4	Risikovergleich und -bewertung	$RA_{4,1}$ bis $RA_{4,2}$
	VM	Vorbeugende Maßnahmen	VM_1	Strukturelle Redundanzen	$VM_{1,1}$ bis $VM_{1,2}$
			VM_2	Lieferverflechtungen	$VM_{2,1}$
			VM_3	Leitungsbau, Maßnahmen im Verteilsystem	$VM_{3,1}$ bis $VM_{3,2}$
			VM_4	Fernüberwachung, Leitsysteme	$VM_{4,1}$ bis $VM_{4,2}$
			VM_5	Krisenmanagement	$VM_{5,1}$ bis $VM_{5,3}$
	KM	Krisen-management	KM_1	Organisation und Koordination	$KM_{1,1}$ bis $KM_{1,7}$
			KM_2	Ressourcenvorhaltung	$KM_{2,1}$ bis $KM_{2,2}$
			KM_3	Übungen	$KM_{3,1}$ bis $KM_{3,2}$
			KM_4	Kommunikation	$KM_{4,1}$
	E	Evaluierung	E_1	Evaluierung Vorplanung	$E_{1,1}$ bis $E_{1,2}$
			E_2	Evaluierung Risikoanalyse	$E_{2,1}$ bis $E_{2,4}$
			E_3	Evaluierung Vorbeugende Maßnahmen	$E_{3,1}$ bis $E_{3,5}$
			E_4	Evaluierung Krisen-management	$E_{4,1}$ bis $E_{4,4}$

5.3.2.1 Hauptindikator Vorplanung

Eine umfassende Vorplanung bildet die Basis für eine erfolgreiche Etablierung des Risiko- und Krisenmanagements. Im Vorfeld des Auf- oder Ausbaus sollten daher grundsätzliche Festlegungen getätigt werden. Hierzu zählen die Schaffung eines Risikobewusstseins sowie die Festlegung von wichtigen Akteuren und Zuständigkeiten im Zuge des Prozesses der Notfallvorsorgeplanung.

Der Hauptindikator Vorplanung (VP) setzt sich folglich aus den zwei Teilindikatoren *Bewusstseinsbildung* (VP_1) sowie *Festlegung von Verantwortlichkeiten* (VP_2) zusammen. Die Ermittlung des Hauptindikators VP erfolgt durch die gewichtete Summe der zwei Teilindikatoren. In den Teilindikator VP_1 fließen neun und in den Teilindikator VP_2 drei Einzelindikatoren ein.

Der Teilindikator VP_1 *Bewusstseinsbildung* umfasst den Bereich des Bewusstseins für die vorhandene Infrastruktur sowie für mögliche Gefahren. Verschiedene Aspekte des Wasserversorgungssystems sollten bekannt sein [DIN EN 15975-2, 2013]. Zum einen sind die Strukturen des Versorgungsgebiets ($VP_{1,Gebiet}$) sowie die Eigenschaften der Gewinnungs- ($VP_{1,TmAbgabe}$, $VP_{1,Kapazität}$ und $VP_{1,Gewinnung}$) und Speicherungsanlagen ($VP_{1,Speicher}$, $VP_{1,Herkunft}$, $VP_{1,Fassung}$ und $VP_{1,Einspeise}$) zu erfassen [BBK, 2016]. Zum anderen ist der technisch mögliche Wasserbezug von anderen WVU ($VP_{1,Bezug}$) für die Notfallvorsorgeplanung von Relevanz [Bross, Wienand et al., 2019]. Zur weitergehenden Planung muss eine Betrachtung mit den operationalisierten Schutzzielen [BMI, 2009] und der mit den vorhandenen Ressourcen möglichen Wasserabgabe erfolgen ($VP_{1,Abgabe}$). Zudem sollte das Bewusstsein für quantitative ($VP_{1,Quanti}$) und qualitative Beeinträchtigungen ($VP_{1,Quali}$) der Wasserversorgung vorhanden sein [DIN EN 15975-2, 2013].

Der Teilindikator *Verantwortlichkeiten* VP_2 bildet die Regelung der Zuständigkeiten in der Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung ab. Hierbei sind die Aufgaben zwischen dem WVU, der Gemeinde und dem Landkreis zu definieren [BBK, 2016]. Bei der Wasserversorgung von kreisfreien Städten fallen die Verantwortlichkeiten der Gemeinde und des Kreises zusammen. Daher sollte im Landkreis bzw. in der kreisfreien Stadt bekannt sein, wer im WVU Ansprechpartner für Notsituationen ist ($VP_{2,WVU}$). Zudem sind die Verantwortlichkeiten für den Krisenstab ($VP_{2,Krisenstab}$) sowie die Aufbau- und Ablauforganisation festzulegen ($VP_{1,Aufbau}$) [DIN EN 15975-2, 2013].

5.3.2.2 Hauptindikator Risikoanalyse

Eine Risikoanalyse strukturiert und objektiviert die Sammlung von Informationen zu bestehenden und potenziellen Risiken. Dabei werden Gründe und Ursachen von Risiken betrachtet, die möglichen Auswirkungen untersucht und der Rahmen, in dem diese Konsequenzen auftreten können, bestimmt [DIN SPEC 91390, 2019]. Die Risikoanalyse bildet somit die Grundlage zum effektiven und effizienten Umgang mit begrenzten Ressourcen durch den Vergleich und die Priorisierung von verschiedenen ermittelten Risiken von Prozessen und Komponenten der Wasserversorgung. Die Risikoanalyse gemäß BBK (2016) gliedert sich in vier Schritte. Der Hauptindikator RA besteht somit aus den vier Teilindikatoren *Gefahrenanalyse* (RA_1), *Vulnerabilitätsanalyse* (RA_2), *Risikoidentifikation* (RA_3) sowie *Risikovergleich und -bewertung* (RA_4). Er wird aus der gewichteten Summe der vier Teilindikatoren ermittelt. Die Teilindikatoren RA_1 bis RA_4 setzen sich aus je acht (RA_1 und RA_2), sieben (RA_3) und zwei (RA_4) Einzelindikatoren zusammen. Die Teil- und Einzelindikatoren des Hauptindikators Risikoanalyse sind in der Tabelle E.6 im Anhang aufgeführt.

In der Regel sind für die Wasserversorgung eines Untersuchungsgebietes verschiedene potenzielle Gefahren relevant. Da es nicht möglich und auch nicht nötig ist, für alle Gefahren sofort und gleichzeitig eine Risikoanalyse durchzuführen, ist zu überprüfen, welche Gefahren bzw. Bedrohungen für das Untersuchungsgebiet vorliegen. Die Durchführung einer Gefahrenanalyse ($RA_{1,GA}$) sollte anhand einer Gefahrenliste dokumentiert werden ($RA_{1,Gliste}$) [BBK, 2016]. Des Weiteren ist eine Priorisierung der zu betrachtenden Ge-

fahren notwendig ($RA_{1,Gprio}$). Die Gefahrenanalyse umfasst zudem eine Betrachtung der Gefahren, die in der Vergangenheit aufgetreten sind sowie zusätzlich potentiell eintreten können ($RA_{1,PastG}$, $RA_{1,PastQuali}$, $RA_{1,PastQuanti}$ und $RA_{1,sonstG}$) [DIN EN 15975-2, 2013]. Die möglichen Gefahren, die in den Einzelindikator $RA_{1,Gefahr}$ einfließen sind Naturgefahren ($RA_{1,Natur}$), technologische Störungen ($RA_{1,Unglück}$), durch menschliches Versagen verursachte Unglücksfälle ($RA_{1,Unfälle}$) sowie kriminelle Gefahren in Form von Anschlägen ($RA_{1,Anschläge}$) [BBK, 2016; BMI, 2009]. Diese vier Einzelindikatoren werden im Indikator $RA_{1,Gefahr}$ zusammengefasst.

Mit Hilfe der Vulnerabilitätsanalyse ($RA_{2,VA}$) ist es möglich, die Verwundbarkeit der Trinkwasserversorgung gegenüber den beschriebenen Gefahren zu ermitteln. Hierzu ist die Zusammenarbeit von WVU und der Katastrophenschutzbehörde notwendig ($RA_{2,Zusammen}$) [BBK, 2016; DIN SPEC 91390, 2019]. Im Mittelpunkt der Vulnerabilitätsanalyse steht die mögliche funktionelle Beeinträchtigung einzelner technischer Komponenten der Wasserversorgung. Sie umfasst nach BBK (2016) fünf Schritte, die als Einzelindikatoren in den Teilindikator RA_2 einfließen. Im ersten Schritt werden die zu analysierenden Komponenten ($RA_{2,Komp}$) und die betrachteten Szenarien ($RA_{2,Szenarien}$) festgelegt. Anschließend wird im zweiten Schritt Exposition der Komponenten überprüft ($RA_{2,Expo}$). Der dritte Schritt umfasst die Überprüfung der Funktionsanfälligkeit der Komponenten, wenn diese exponiert sind ($RA_{2,Funktion}$). Sind die Komponenten funktionsanfällig, erfolgt die Überprüfung der technischen bzw. der organisatorischen Ersetzbarkeit ($RA_{2,techE}$ und $RA_{2,orgE}$).

Die Verbindung relevanter Gefahren- und Verwundbarkeitsinformationen führt zur Risikoidentifikation für die betrachteten Risikoelemente. Diese wird mit Einbindung von Fachbehörden oder Forschungseinrichtungen durchgeführt ($RA_{3,Fach}$). Zur Risikoidentifikation werden Informationen zum Schadensausmaß ($RA_{3,Ausmaß}$, $RA_{3,Bevölkerung}$ und $RA_{3,AusmaßKreis}$) und zur Eintrittswahrscheinlichkeit ($RA_{3,Eintritt}$ und $RA_{3,EintrittFach}$) benötigt [DIN ISO 31000, 2018]. Anhand dieser Informationen lassen sich die Risiken klassifizieren ($RA_{3,Klasse}$) [BBK, 2016].

Die Ergebnisse der Risikoidentifizierung werden miteinander verglichen und bewertet. Für die betrachteten Szenarien kann auf Basis des ermittelten Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit eine Risikomatrix erstellt werden. Anhand dieser Risikomatrix können die bearbeiteten Szenarien und deren Risiken verglichen und priorisiert werden ($RA_{4,Vergleich}$) [BBK, 2016]. Mit Hilfe der Risikomatrix können zudem diejenigen Szenarien erkannt werden, die für die Trinkwasserversorgung im Untersuchungsgebiet das größte Risiko darstellen ($RA_{4,Bewertung}$) [DIN EN 15975-2, 2013]. Durch diese Bewertung kann eine Priorisierung von Maßnahmen zur Risikobeherrschung veranlasst werden.

5.3.2.3 Hauptindikator Vorbeugende Maßnahmen

Vorbeugende Maßnahmen tragen zur Minderung von Risiken für kritische Prozesse bei. Sie dienen zur Erreichung von operative Schutzzielen und helfen damit die Schwelle für Ereignisse mit Krisenpotenzial in der Einrichtung anzuheben. Hierdurch kann die Anzahl krisenhafter Ereignisse minimiert, bzw. die Intensität auftretender Ereignisse reduziert werden. Der Hauptindikator VM setzt sich aus den fünf Teilindikatoren *Redundante*

Systeme (VM_1), *Lieferverflechtungen mit anderen Versorgern* (VM_2), *Leitungsbau und Maßnahmen im Verteilungssystem* (VM_3), *Fernüberwachung und Leitsysteme* VM_4) sowie *allgemeine Maßnahmen* (VM_5) zusammen. Der Hauptindikator wird durch die gewichtete Summe der Teilindikatoren berechnet. Die Teil- und Einzelindikatoren des Hauptindikators VM sind in der Tabelle E.6 im Anhang aufgeführt.

Das Prinzip der Versorgungssicherheit durch Redundanzen kann auch im Bereich der Notfallvorsorgeplanung angewandt werden. Sowohl die Gewinnungs- als auch die Speicherungssysteme sollten daher redundant ausgelegt sein ($VM_{1,\,G}$, $VM_{1,\,S}$, $VM_{1,\,quantRedu}$ und $VM_{1,\,strukRedu}$), sodass bei einem Ausfall eines einzelnen Systems die Funktionstüchtigkeit des Gesamtsystems weiterhin gegeben ist [Grombach et al., 2000].

Ist die eigene Gewinnung eines WVU nicht mehr nutzbar oder die notwendige Aufbereitung nicht möglich, so kann Wasser eines anderen Versorgers bezogen werden. Hierzu müssen Lieferverflechtungen mit diesem WVU bestehen. Der Teilindikator VM_2 wird durch den Einzelindikator $VM_{2,aWVU}$ abgebildet, welcher das Bestehen von Lieferverflechtungen mit mindestens einem anderen WVU erfasst.

Vorbeugende Maßnahmen zur Risikominderung von Schadensereignissen können zudem durch den Aufbau des Leitungssystems sowie durch nachträgliche Maßnahmen im Verteilsystem erfolgen. Vermaschte Leitungssysteme können zur Aufrechterhaltung der Versorgung bei einem Ausfall von Teilabschnitten des Versorgungsnetzes dienen [Baur et al., 2019; Hoch, 1999]. Des Weiteren können nachträgliche Maßnahmen zum Netzausbau im Verteilsystem die Versorgungssicherheit erhöhen [Hoch, 1999]. Der Teilindikator VM_3 setzt sich somit aus den Einzelindikatoren $VM_{3,Masch}$, und $VM_{3,Netz}$ zusammen. Je früher Beeinträchtigungen identifiziert werden, desto eher können Maßnahmen zu deren Behebung eingeleitet werden. Um die Anlagen eines Wasserversorgungssystems überwachen zu können werden Leitsysteme eingesetzt [Grombach et al., 2000; Mehlhorn und Weiß, 1999], Diese können durch online verfügbare Daten auch von der Ferne überwacht werden. Der Teilindikator VM_4 umfasst die Einzelindikatoren $VM_{4,Fern}$ sowie $VM_{4,LS}$, welche vorbeugende Maßnahmen darstellen.

Weitere vorbeugende Maßnahmen werden im Teilindikator VM_5 zusammengefasst. Dies umfasst neben Erneuerungsmaßnahmen $VM_{5,Neu}$ auch Instandhaltungsmaßnahmen $VM_{5,Instand}$ [Schlicht, 1999]. Des Weiteren werden Maßnahmen des Objektschutzes durch den Einzelindikator $VM_{5,Objekt}$ einbezogen [DVGW W 1050, 2012].

5.3.2.4 Hauptindikator Krisenmanagement

Das Krisenmanagement bietet eine Struktur zur Bewältigung von Krisen, die trotz Prävention nicht verhindert werden können. Der Hauptindikator Krisenmanagement (KM) setzt sich aus der gewichteten Summe der vier Teilindikatoren zusammen. Der erste Teilindikator umfasst den Bereich *Organisation und Koordination* (KM_1). Der zweite Teilindikator bildet den Bereich *Ressourcenvorhaltung* (KM_2) ab. Der dritte Teilindikator berücksichtigt den Bereich *Übungen* (KM_3). Der vierte Teilindikator betrachtet den Bereich *Krisenkommunikation* (KM_4). Die Teil- und Einzelindikatoren des Hauptindikators KM sind in der Tabelle E.6 im Anhang aufgeführt.

Das Krisenmanagement beinhaltet Organisationsmaßnahmen sowie koordinative Aufgaben [Doe und Whitman, 2011]. Für die Einzelindikatoren des Teilindikators KM_1 *Organisation und Koordination* sind zahlreiche Aspekte zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den nach TrinkwV geforderten Maßnahmeplänen müssen Krisenpläne, vor der Krise für die Krise, erstellt sein ($KM_{1,WVUKP,}$, $KM_{1,KatKP}$) [BBK, 2016; DVGW W 1020, 2018]. Deren Inhalt muss allen Beteiligten bekannt sein ($KM_{1,KPI}$) [Doe und Whitman, 2011]. Zudem müssen Kontaktdaten von allen Verantwortlichen und sonstigen Beteiligten vorliegen ($KM_{1,Kontakt}$). Sensible Einrichtungen müssen bekannt und berücksichtigt sein ($KM_{1,vSensE}$ und $KM_{1,eSensE}$) [BBK, 2008; Doe und Whitman, 2011]. Weitere Einrichtungen wie Getränkefirmen und Brauereien können bei der Krisenbewältigung möglicherweise unterstützen, wenn dies vor der Krise besprochen wurde ($KM_{1,SonstE}$) [BBK, 2016; Bross, Wienand et al., 2019].

Zur Ersatz- oder Notwasserversorgung wird eine gewisse technische Ausstattung benötigt. Diese Ressourcen zur Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung des Wassers sollten für die Krisensituation vorgehalten werden. Neben den Ressourcen ($KM_{2,R}$) kann noch weiteres Material, z. B. Notstromaggregate oder Druckerhöhungsanlagen ($KM_{2,M}$) benötigt werden [BBK, 2015a].

Die Umsetzung der technischen und organisatorischen Maßnahmen des Krisenmanagements in Schadensereignissen wird durch Übungen geprüft und verinnerlicht [Curnin und Heumüller, 2016]. Der Teilindikator KM_3 *Übung* berücksichtigt durch die Einzelindikatoren $KM_{3,besÜ}$ sowie $KM_{3,Ü}$ ob diese Übung in Form einer Besprechung oder auch in Form einer praktischen Übung durchgeführt wird.

Krisenkommunikation stellt einen bedeutenden Bestandteil des Notfall- und Krisenmanagements dar und verlangt genauso wie das Notfallmanagement klare Strukturen und vorbereitete Strategien [BMI, 2014]. Die vorzubereitenden Materialien wie z. B. Kontaktdaten oder Formulare werden im Teilindikator KM_4 *Krisenkommunikation* durch den Einzelindikator $KM_{4,Kom}$ erfasst.

5.3.2.5 Hauptindikator Evaluierung

Die Evaluierung bezieht sich auf alle Phasen des Risiko- und Krisenmanagement. Somit umfasst die Evaluierung sowohl die Prüfung von in der Vorplanung festgelegten Punkten, die Kontrolle der Aktualität der Informationen zu bestehenden Risiken, die Überprüfung der umgesetzten vorbeugenden Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit und die Analyse des Krisenmanagements. Der Hauptindikator Evaluierung (E) setzt sich aus der gewichteten Summe der vier Teilindikatoren zusammen. Diese erfassen, in wie weit die vier Hauptindikatoren *Vorplanung* (E_1), *Risikoanalyse* (E_2), *vorbeugende Maßnahmen* (E_3) sowie *Krisenmanagement* (E_4) evaluiert und regelmäßig aktualisiert werden. Die Evaluierung der einzelnen Aspekte der vier Schritte (als Teilindikatoren der Hauptindikatoren VP, RA, VM sowie KM abgebildet) wird durch die Berücksichtigung dieser als Einzelindikatoren umgesetzt.

5.3.3 Datenauswahl und -akquisition

Die in Abschnitt 5.3.2 aufgezeigten Indikatoren sind für die quantitative Erfassung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung erforderlich. Somit werden Daten benötigt die sowohl eine Überprüfung der Anwendbarkeit und Aussagekraft des NVP als auch die Ermittlung des Status quo in Deutschland ermöglichen.

Die benötigten Informationen können jedoch nicht aus öffentlich zugänglichen Daten ermittelt werden, da diese unternehmensspezifisch und durch eine gewisse Sicherheitsrelevanz gekennzeichnet sind. Eine gezielte Erhebung ist somit notwendig.

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit und Aussagekraft des NVP wurden alle Indikatoren anhand eines Fragebogens für ein reales WVU als Fallbeispiel erhoben. Das Fallbeispiel ist in Abschnitt 5.4 charakterisiert.

Zur Beurteilung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung in Deutschland wurde ein bestehender Datensatz einer bundesweiten Befragung der Landkreise und kreisfreien Städte zur Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung analysiert. Der Datensatz wurde 2015 mittels eines Fragebogens im Rahmen des Forschungsprojekts NoWa I erhoben, um einen allgemeinen, überregionalen Überblick über den aktuellen Stand der Notfallplanung in den Kommunen zu erhalten. Die Daten bestehen aus 360 einzelnen Datensätzen, welche Daten von bundesweit verteilten Kommunen, kreisfreien Städten sowie Landkreisen mit einer Bevölkerung von rund 39 Millionen Einwohnern enthalten.

Jeder Datensatz beinhaltet Informationen zu 37 Fragen bezüglich verschiedenen Aspekten aus den Bereichen der Notfallvorsorgeplanung und der vorhandenen Wasserversorgungssysteme. Die Fragen und Antwortmöglichkeiten des im Rahmen des Forschungsprojekts NoWa I entwickelten Fragebogens sind in der Tabelle E.4 im Anhang aufgeführt.

Für die Ermittlung des Status quo wurden 21 relevante Einzelindikatoren aus dem Erhebungsbogen mit 37 Fragen identifiziert und im NVP berücksichtigt. Die Zuordnung der Fragen des NoWa I Erhebungsbogens zu den fünf Hauptindikatoren und ihren Teilindikatoren ist in der Tabelle E.4 aufgeführt. Insgesamt werden die Daten elf Teilindikatoren, der insgesamt 19 Teilindikatoren des entwickelten NNVP, zugeordnet.

Eine nachträgliche Datenerhebung bzw. Datenergänzung konnte im Rahmen der Dissertation nicht umgesetzt werden, da die Datenerhebung im Rahmen des NoWa I Projekts mit Zuarbeit des BMI sowie den Innenministerien der Länder erfolgte und eine Zusatzerhebung eines repräsentativen Datensatzes nicht wiederholt werden konnte. Somit umfasst die Ermittlung des Status quo nicht alle identifizierten Indikatoren.

5.3.4 Analyse und Imputation fehlender Daten

Fehlende Daten beeinträchtigen die Entwicklung und Auswertung von Verbundindikatoren und können zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen [OECD, 2008]. Für den Umgang mit fehlenden Daten werden drei allgemeine Methoden angewandt:

(i) Fallelimination
(ii) einzelne Imputation
(iii) multiple Imputation

Bei der Fallelimination werden ganze Datensätze, bei denen einzelne oder mehrere Daten fehlen, vollständig von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Folglich sind in der Regel die Standardfehler einer reduzierten Stichprobe größer, da weniger Datensätze mit weniger Informationen verwendet werden [OECD, 2008]. Nach Little und Rubin (2002) ist die Fallelimination nicht durchzuführen, wenn eine Variable weniger als 5 % fehlende Werte aufweist. Die Fallelimination wird in der vorliegenden Dissertation nur angewandt, wenn die für die Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung zwingend notwendigen Daten (z. B. Zuordnung des Datensatzes zu Kommune oder WVU) nicht vorliegen.

Die einzelne bzw. multiple Imputation haben gemein, dass die fehlenden Werte durch plausible Werte ersetzt werden. Die einzelne Imputation wird z. B. durch eine Mittelwert- oder Mediansubstitution durchgeführt [OECD, 2008]. Bei der multiplen Imputation werden für die fehlenden Werte Schätzwerte eingesetzt, die durch die Verteilung verschiedener Prädiktoren vorhergesagt werden [Little und Rubin, 2002]. Der Vorteil der einzelnen sowie der multiplen Imputation im Vergleich zur Fallelimination ist, dass die Anzahl der betrachteten Datensätze nicht reduziert wird. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass das Ergebnis durch die Imputation beeinflusst werden kann. Der Datensatz, der zur Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung genutzt wurde, wurde an einigen Stellen mittels einzelner bzw. multipler Imputation ergänzt. Hierzu wurden die vorhandenen Daten betrachtet und für die fehlenden Werte Schätzwerte eingesetzt. Der Datensatz des Fallbeispiels war vollständig und benötigte keine Ergänzung.

5.3.5 Normalisierung

Um die Indikatoren verschiedener Kommunen oder die einzelnen Teilindikatoren miteinander vergleichen zu können, ist ein Normalisierungsprozess erforderlich. Dies gilt insbesondere, wenn sich die Datensätze in ihren Maßeinheiten unterscheiden [OECD, 2008]. Hierzu ist zunächst eine geeignete Normalisierungsmethode auszuwählen. Die häufig angewandten Normalisierungsmethoden „Ranking“, „Standardisierung“ (oder z-scores) sowie die „Min-Max-Normalisierung“ unterscheiden sich unter anderem in ihrer Robustheit gegenüber Ausreißern. Die Ranking-Methode vernachlässigt Ausreißerwerte und ist für absolute Bewertungen ungeeignet [OECD, 2008]. Die Standardisierung beinhaltet Ausreißer, erzeugt aber auch negative Ausgabewerte, die in weiteren Schritten wie der Aggregation zu Komplikationen führen können [Malczewski und Rinner, 2015]. Die lineare Min-Max Normalisierung erzeugt Werte von Null bis Eins und schließt zugleich Ausreißer ein. Daten wie z. B. die Einwohnerzahl der Kommune wurden mittels der Min-Max Normalisierung anhand der in Gleichung 5.28 dargestellten Formel transformiert. Die qualitativen Rohdaten wurden in quantitative Daten übertragen um eine bessere Vergleichbarkeit der Kommunen zu erhalten.

Die angewandte Übersetzung der Antwortmöglichkeiten in Zahlenwerte ist in der Tabelle 5.2 aufgezeigt. Die Fragen mit *Ja-Nein* bzw. *Ja-teilweise-Nein* Antwortmöglichkeiten wurden in eine [0,1] Skala umgerechnet. Likert Skalen mit einer vorgegebenen Antwortskala wurden ebenfalls in eine [0,1] Skala transformiert. Die Tabellen E.4 und E.6 im Anhang zeigen die Antwortmöglichkeiten der betrachteten Fragen sowie die entsprechenden zugehörigen Zahlenwerte. Die Antwortmöglichkeit *n.b.* (nicht bekannt) wurde der Antwortmöglichkeit *Nein* gleichgesetzt.

$$v_n = \frac{v_i - v_{min}}{v_{max} - v_{min}} \tag{5.28}$$

Tabelle 5.2: Übersicht der Normierung der Antwortmöglichkeiten des Erhebungsbogen

Fragentyp	Antwortmöglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert
Ja-Nein Frage	Ja	1
	Nein	0
Ja-teilweise-Nein Frage	Ja	1
	teilweise	0,5
	Nein	0
Frage mit Likert-Skala 1 bis 5	Likert Skala 1	0
	Likert Skala 2	0,25
	Likert Skala 3	0,5
	Likert Skala 4	0,75
	Likert Skala 5	1

5.3.6 Gewichtung

Die einzelnen Indikatoren fließen mit einer unterschiedlichen Gewichtung in den Verbundindikator ein (Gleichung 5.29). Für den NVP wird die gewichtete Summe aus den fünf Hauptindikatoren, wie in der Gleichung 5.30 aufgezeigt, bestimmt. Die Ermittlung der fünf Hauptindikatoren ist im Abschnitt 5.3.3 erläutert.

$$\mathrm{VI} = \sum_{j=1}^{m} x_\mathrm{j} X_\mathrm{j} \tag{5.29}$$

$$\mathrm{NVP} = x_\mathrm{VP} \cdot \mathrm{VP} + x_\mathrm{RA} \cdot \mathrm{RA} + x_\mathrm{VM} \cdot \mathrm{VM} + x_\mathrm{KM} \cdot \mathrm{KM} + x_\mathrm{E} \cdot \mathrm{E} \tag{5.30}$$

Die fünf Hauptindikatoren des NVP setzen sich aus zwei bis fünf Teilindikatoren zusammen. Die Gleichung 5.31 zeigt, dass jeder Hauptindikator aus der gewichteten Summe der Teilindikatoren ermittelt wird.

$$X_\mathrm{j} = \sum_{i=1}^{n} z_\mathrm{i} Z_\mathrm{i} \tag{5.31}$$

Wie von Asadzadeh et al. (2017) beschrieben, gibt es mehrere Möglichkeiten der Ermittlung der Gewichtung von Verbundindikatoren. Für den NVP werden in dieser Dissertation die Ergebnisse eines statistischen und eines expertenbasierten Gewichtungsansatzes verglichen. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Ansätzen besteht darin, wie die Indikatorgewichte abgeleitet werden. Da die Gewichtung der Haupt- und Teilindikatoren das Ergebnis des NVP maßgeblich beeinflusst, wird der Verbundindikator bei beiden Gewichtungsansätzen mit identischen Haupt- und Teilindikatoren ermittelt.

Bei einer gleichverteilten Gewichtung von Hauptindikatoren gehen diese zu gleichen Teilen in den Verbundindikator ein. Durch die unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Summanden (Hauptindikatoren bzw. Teilindikatoren) wird ihnen eine differenzierte Bedeutung für den Verbundindikator zugeordnet.

Zur Ermittlung der expertenbasierten Gewichtung wurden die Gewichte aus Expertenmeinungen abgeleitet. Im Rahmen eines Budgetallokationsansatzes wurden vierzehn Experten mit unterschiedlichem Fachhintergrund gebeten, in einem Fragebogen die Haupt- und Teilindikatoren mit einer Likertskala anhand ihrer Relevanz für eine zielführende Notfallvorsorgeplanung zu bewerten. Der von den Experten ausgefüllte Fragebogen findet sich im Anhang im Abschnitt E.1.1. Zudem sind die Experten anhand ihrer Tätigkeit (Tabelle E.1), ihrer Ausbildung (Tabelle E.2) sowie ihrer Berufserfahrung (Tabelle E.3) charakterisiert.

Die durch die Gleichverteilung sowie durch die Expertenmeinungen abgeleiteten Gewichtungen der Hauptindikatoren sind in der Tabelle 5.3 aufgeführt. Weitere Ergebnisse der Expertenbefragung sind im Kapitel 6.3.1 erläutert.

Tabelle 5.3: Übersicht der Gewichtungsfaktoren der Hauptindikatoren mit einer gleichverteilten Gewichtung und einer Gewichtung nach Expertenmeinung

		Gewichtung	
	Hauptindikator	Gleichverteilung x_j	Expertenmeinung x_j
VP	Vorplanung	0,20	0,22
RA	Risikoanalyse	0,20	0,20
VM	Vorbeugende Maßnahmen	0,20	0,21
KM	Krisenmanagement	0,20	0,20
E	Evaluierung	0,20	0,17

5.3.7 Visualisierung der Ergebnisse

Die Visualisierung der Ergebnisse der Verbund- und Hauptindikatoren erfolgt in einer anonymisierten Darstellung mittels *Treemap*-Diagrammen. Die Farbe der Rechtecke repräsentiert den Wert des Indikators. Durch verschieden große Rechtecke wird die Anzahl der Einwohner des Landkreises oder der kreisfreien Stadt bzw. der Gemeinde oder kreiszugehörigen Stadt (E_i) im Verhältnis zu den Einwohnern des gesamten Datensatzes (E_{ges})

dargestellt (Abbildung 5.21). Somit entspricht jedes Rechteck einer Kommune, die in den jeweiligen Diagrammen immer an derselben Stelle liegt. Die Auswertung der Datensätze erfolgt dadurch in weitgehend anonymisierter Form. Zudem werden die Möglichkeiten, Rückschlüsse auf einzelne Kommunen zu ziehen durch die folgende Darstellung minimiert.

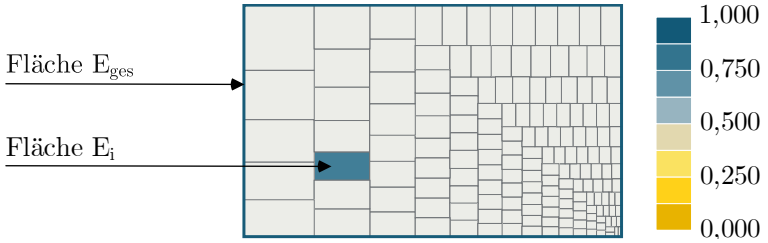


Abbildung 5.21: Erläuterung der grafischen Darstellung der Analyse des Stands der Notfallvorsorgeplanung durch *Treemap*-Diagramme

5.4 Validierung sowie Überprüfung der Praxistauglichkeit des entwickelten Verfahren anhand eines Fallbeispiels

Die aufgezeigten Methoden des Verfahrens zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung werden an einem Fallbeispiel validiert und auf Praxistauglichkeit überprüft. Es handelt sich bei dem Fallbeispiel um ein reales WVU , welches insgesamt 230 000 Einwohner in 120 Gemeinden und Stadtteilen versorgt. Insgesamt werden durch das WVU jährlich circa 10 Millionen m^3 Wasser abgegeben.

Die Anwendung des Modells NOTWASSER erfolgt für einen Ausschnitt des Versorgungsgebiets. Dieser umfasst sechs Gemeinden, die durch dieselben Gewinnungsanlagen in Gemeinde C versorgt werden (dargestellt in Abbildung 5.22). Weitere Charakteristika des Versorgungsgebiets sind in Tabelle 5.4 aufgeführt.

Die tägliche einwohnerspezifische Wasserabgabe entspricht im Fallbeispiel einer Wassermenge von 112 l/(P·d). Im Modell NOTWASSER wird diese jedoch gemäß DVGW W 410 (2008) in Höhe von 120 l/(P·d) angenommen, um eine Einheitlichkeit zu gewährleisten sowie eine Beeinträchtigung der Übertragbarkeit der Ergebnisse zu vermeiden.

Das WVU verfügt über begrenzte Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung vor. Im betrachteten Teilversorgungsgebiet bestehen zwei Notbrunnen auf dem Gelände des Wasserwerks. Die maximale Entnahmemenge aus den Notbrunnen beträgt je 24 m^3/d. Des Weiteren verfügt das WVU über drei mobile Speicherbehälter mit je 1 m^3 Fassungsvermögen. Die Behälter können zum Transport sowie zur zentralen oder dezentralen Speicherung eingesetzt werden. Zusätzlich kann über die regionale THW-Gruppe eine mobile Aufbereitungsanlage (UF-15) bezogen werden. Diese hat eine Aufbereitungskapazität von 15 m^3/h.

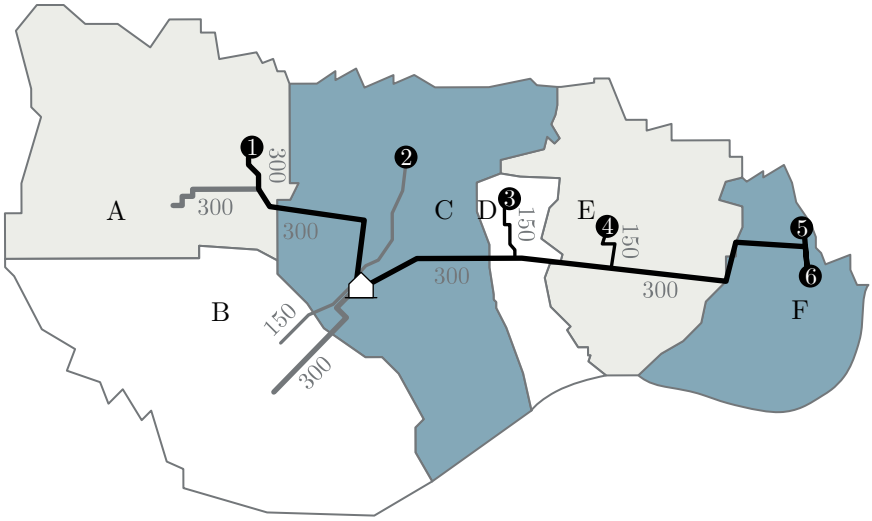


Abbildung 5.22: Teilversorgungsgebiet des Fallbeispiels

Tabelle 5.4: Charakterisika der Wasserabgabe der Gemeinden des Fallbeispiels und Kapazität der Hochbehälter

Gemeinde bzw. Stadtteil	Anzahl Einwohner	tägliche Abgabe [m^3/d]	Hochbehälter Abbildung 5.22	Kapazität des Hochbehälters [m^3]
A	2 884	312	1	1 500
B	3 099	356	–	–
C	4 030	477	2	255
D	575	62	3	85
E	2 311	235	4	150
F	7 737	1 033	5	300
			6	1 460
Summe	20 636	2 475		3 750

Der Status quo der Notfallvorsorgeplanungen wurde für das WVU in Zusammenarbeit mit der Katastrophenschutzbehörde des Kreises erhoben. Hierzu wurde der im Anhang in Tabelle E.6 aufgeführte Erhebungsbogen zur Ermittlung des vollständigen Indikatorensatzes durch das WVU und die zugehörige Katastrophenschutzbehörde ausgefüllt. Die Ermittlung des Indikators erfolgte gemäß der im Abschnitt 5.3 aufgeführten Methodik.

6 Ergebnisse

Das vorliegende sechste Kapitel widmet sich den Ergebnissen und ist hierzu in drei Abschnitte unterteilt (Abbildung 6.1). In Abschnitt 6.1 wird zunächst das Vorgehen zur Identifikation der geeigneten Versorgungsarten dargestellt. Hierzu werden die durchzuführende Systemanalyse erläutert sowie weitere ressourcenspezifische Anforderungen dargelegt, die ergänzend zu den dargestellten Grundlagen im Rahmen dieser Dissertation erarbeitet wurden. Anschließend werden in Abschnitt 6.2 die Ergebnisse der System Dynamics Modellierung zur Steuerung und Bewertung des Umgangs mit begrenzten Ressourcen dargelegt. Hiermit wird anhand verschiedener Notsituationen der effektive Ressourceneinsatz für das Fallbeispiel untersucht (Abschnitt 6.2.1). Zudem wird aufgezeigt, inwiefern das Bevorratungsverhalten der Bevölkerung die Wasserversorgungsunternehmen in Notsituationen entlasten kann (Abschnitt 6.2.2) und welche Auswirkungen der Notfallverlauf auf die fehlende Wassermenge haben kann (Abschnitt 6.2.3). Abschnitt 6.3 widmet sich der Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen anhand der Ergebnisse des Notfallvorsorgeplanungsindikators. Hierbei wird zunächst in Abschnitt 6.3.1 auf die Ergebnisse der betrachteten Verfahren zur Gewichtung der Haupt- und Teilindikatoren eingegangen bevor anschließend die Ergebnisse der Anwendung des Indikatorensystems auf das Fallbeispiel (Abschnitt 6.3.2) sowie auf einen für Deutschland repräsentativen Datensatz (Abschnitt 6.3.3.1 und 6.3.3.2) dargelegt werden.

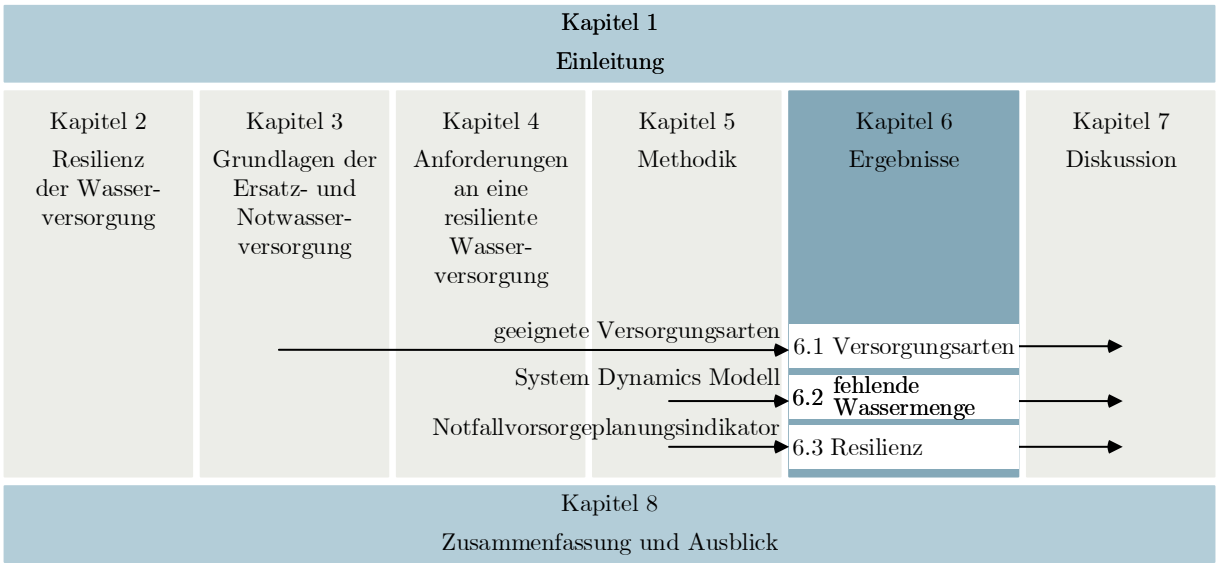


Abbildung 6.1: Aufbau des Ergebniskapitels und Einordnung der Inhalte in die Dissertation

6.1 Versorgungsarten der Ersatz- und Notwasserversorgung

Insgesamt 19 Versorgungsarten können für die Ersatz- oder Notwasserversorgung zum Einsatz kommen. Inwiefern diese geeignet sind, hängt davon ab ob die beeinträchtigten Teilprozesse ersetzt werden können. Zusätzlich beeinflussen weitere Faktoren (z. B. Einspeisestellen) die Eingrenzung der geeigneten Versorgungsarten. Im Folgenden werden daher die hier entwickelte Systemanalyse zur Ermittlung der geeigneten Versorgungsarten erläutert (Abschnitt 6.1.1) und die ressourcenspezifischen Anforderungen dargelegt (Abschnitt 6.1.2). Diese Anforderungen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts NoWa II erarbeitet und in einem Stakeholder-Workshop verifiziert.

6.1.1 Systemanalyse zur Ermittlung der geeigneten Versorgungsarten

Um die geeigneten Versorgungsarten ermitteln zu können, baut die Notfallvorsorgeplanung auf der systematischen Analyse der beeinträchtigten Teilprozesse durch Ableitung von spezifischen Notsituationen auf. Je nach Ausmaß des Schadensereignisses oder in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten sollte eine Kombination aus mehreren Versorgungsarten in Erwägung gezogen werden. Im Einzelfall können geeignete und priorisierte Versorgungsarten je nach örtlichen Gegebenheiten von der Empfehlung abweichen. Weitere Voraussetzungen und Hinweise zu den entsprechenden Versorgungsarten finden sich im Abschnitt 6.1.2. Die Klassifizierung der Versorgungsarten gemäß Abschnitt 3.3.2 veranschaulicht den Ressourcenbedarf jeder Versorgungsart und adressiert somit bereits die Forschungsfrage 1.1. Die Systemanalyse ermöglicht folglich die Beantwortung der Forschungsfrage 1.2.

FF 1.2 Welche Versorgungsarten können abhängig vom jeweiligen Schadensereignis zum Einsatz kommen?

In der Systemanalyse wird die verbliebene Funktionstüchtigkeit der Teilprozesse der Wasserversorgung betrachtet (Abbildung 6.2). Hierdurch lässt sich prinzipiell ermitteln, welche Versorgungsarten für diese Notsituation in Frage kommen, da hier bereits die Auswirkungen auf die Funktionstüchtigkeit betrachtet wurden.

Dabei ist zuerst zu prüfen, ob die tägliche Wassermenge aus den eigenen Gewinnungsanlagen ($Q_{d,1}$) den leitungsungebundenen Wasserbedarf gemäß 1. WasSV ($Q_{d,WasSV}$) decken kann. Ist dies der Fall, so ist zu klären, ob die Wassermenge aus den eigenen Gewinnungsanlagen, die die geltenden Qualitätsanforderungen erfüllt ($Q_{d,1A}$), mindestens dem mittleren täglichen Wasserbedarf der Normalversorgung $Q_{d,m}$ entspricht. Abhängig von der Funktionstüchtigkeit des Leitungsnetzes und der Speicherbehälter gleichen die Gegebenheiten den Notsituationen N_1 bis N_3.

N_1 stellt dabei z. B. ein Ereignis mit einem zu überbrückenden Netzabschnitt dar, wohingegen in N_3 das Leitungsnetz nicht mehr funktionstüchtig ist. Die sich daraus ergebenden zu priorisierenden Versorgungsarten sind in der Tabelle 6.1 aufgezeigt. In diesen Notsituationen soll primär das Wasser aus den eigenen Gewinnungsanlagen genutzt werden. Die Arten der Verteilung und Abgabe variieren zwischen den Notsituationen.

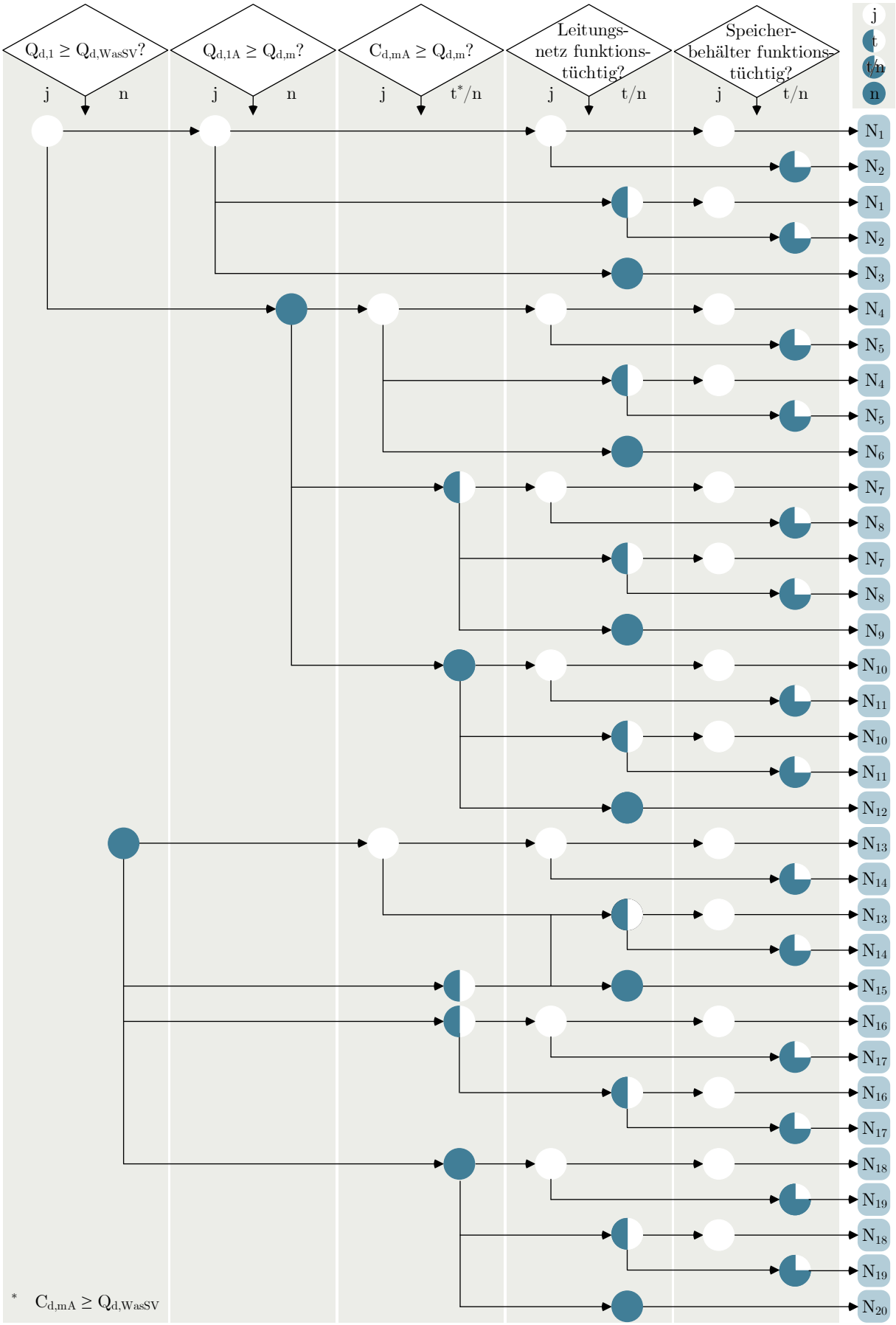


Abbildung 6.2: Fließschema der Systemanalyse zur Ermittlung der charakteristischen Notsituation des WVU

Kann mit der aufbereiteten Wassermenge $Q_{d,1A}$ der Bedarf in Höhe von $Q_{d,m}$ nicht gedeckt werden, so ist zu überprüfen ob ausreichend mobile Aufbereitungskapazitäten ($C_{mA,di}$) zur Deckung von $Q_{d,m}$ vorhanden sind. Ist dies erfüllt, so wird abhängig von der Funktionstüchtigkeit des Leitungsnetzes und der Speicherbehälter von den Notsituationen N_4 bis N_6 ausgegangen. In diesen Notsituationen ist Wasser, welches durch ein anderes WVU bereitgestellt wird, die zu bevorzugende Wasserart (Tabelle 6.1). Durch die vorhandenen Kapazitäten der mobilen Aufbereitung kann zudem Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen sowie Oberflächenwasser für eine leitungsgebundene Versorgung verwendet werden. Da das Wasser aus den eigenen Gewinnungsanlagen in diesen Notsituationen nicht für die leitungsgebundene Versorgung ausreicht oder nur Teile des Versorgungsgebiets damit versorgt werden können, sind die leitungsungebundenen Versorgungsarten mit dieser Wasserart am wenigsten zu priorisieren.

In den Notsituationen N_7 bis N_9 reichen die mobilen Aufbereitungskapazitäten ($C_{mA,di}$) nicht zur vollständigen Deckung von $Q_{d,m}$. Dies hat zur Folge, dass zur leitungsgebundenen Versorgung nur Wasser eines anderen Versorgungsunternehmens genutzt werden kann (Tabelle 6.2 und 6.3). Das Wasser aus den eigenen Gewinnungsanlagen, aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen sowie Oberflächenwasser kann nur zur leitungsungebundenen Versorgung verwendet werden, wenn es den geltenden Qualitätsanforderungen entspricht.

Steht keine mobile Aufbereitungsanlage zur Verfügung, so ergibt die Systemanalyse abhängig von der Funktionstüchtigkeit des Leitungsnetzes und der Speicherbehälter die Notsituationen N_{10} bis N_{12}. Zu priorisieren ist hierbei eine leitungsgebundene Versorgung mit dem Wasser eines anderen Versorgungsunternehmens. Zudem kann mit dem Wasser aus den eigenen Gewinnungsanlagen leitungsungebunden versorgt werden.

Kann der leitungsungebundene Bedarf, der sich aus den Wassermengen gemäß 1. WasSV ergibt ($Q_{d,WasSV}$), nicht aus den eigenen Gewinnungsanlagen gedeckt werden, ist im nächsten Schritt zu prüfen, ob Aufbereitungskapazitäten ($C_{mA,di}$) zur Deckung von $Q_{d,m}$ zur Verfügung stehen. Für den Fall, dass ausreichend Wasser aufbereitet werden kann, werden, abhängig von der Funktionstüchtigkeit des Leitungsnetzes und der Speicherbehälter, die Notsituationen N_{13} bis N_{15} betrachtet. In diesen Notsituationen ist das Wasser eines anderen Versorgungsunternehmens vor dem aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen sowie Oberflächenwasser zu priorisieren (Tabelle 6.3).

Ist die mobile Aufbereitungskapazität ($C_{mA,di}$) nicht ausreichend, um den Bedarf in Höhe von $Q_{d,m}$ zu decken, jedoch ausreichend zur Deckung des Bedarfs gemäß 1. WasSV, so ergeben sich die Notsituationen N_{16} bis N_{17}. In diesen Notsituationen ist eine leitungsgebundene Versorgung mit Wasser eines anderen Versorgungsunternehmens zu priorisieren (Tabelle 6.4). Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen sowie Oberflächenwasser kann aufgrund der vorhandenen Aufbereitungskapazitäten nur für eine leitungsungebundene Versorgung verwendet werden.

Kann der leitungsungebundene Wasserbedarf nach der 1. WasSV ($Q_{d,WasSV}$) mit der Aufbereitungskapazität ($C_{mA,di}$) nicht gedeckt werden, wird gemäß der Systemanalyse von den Notsituationen N_{18} bis N_{20} ausgegangen. In diesen Notsituationen kann die Versorgung ausschließlich durch Wasser eines anderen Versorgungsunternehmens erfolgen (Tabelle 6.4).

Tabelle 6.1: Erster Teil der Notsituationen, der als geeignet identifizierten Versorgungsarten und der benötigten Ressourcen

Notsituation	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
eigene Gewinnung	A_1	A_1	A_1	D_1	D_1
anderer Versorger				A_1	A_1
leitungsunabh. Brunnen				B_1	B_1
Oberflächenwasser				C_1	C_1
Verbindungsleitung				A_2	A_2
mobile Leitungen	A_2	A_2	A_2	$D_2A_2{}^*B_2C_2$	$D_2A_2{}^*B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^*$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter	A_3			$A_3B_3C_3$	
Einspeisung in Leitungsnetz	$A_3{}^*$	A_3		$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$	$A_3B_3C_3$
direkte Abgabe	$A_3{}^{**}$	$A_3{}^*$	A_3	$D_3A_3{}^{**}B_3{}^{**}C_3{}^{**}$	$D_3A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der jeweiligen Versorgungsart; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	Alternativen der Wasserverteilung und -abgabe

Tabelle 6.2: Zweiter Teil der Notsituationen, der als geeignet identifizierten Versorgungsarten und der benötigten Ressourcen

Notsituation	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}
eigene Gewinnung	D_1	B_1	B_1	A_1	B_1
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	B_1	A_1
leitungsunabh. Brunnen	B_1	C_1	C_1	C_1	
Oberflächenwasser	C_1	D_1	D_1	D_1	
Verbindungsleitung		A_2	A_2		A_2
mobile Leitungen	$D_2A_2B_2C_2$	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$A_2B_2C_2D_2$	$B_2A_2{}^*$
Tankwagen	$D_2{}^*A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}$
Abfüllanlage	$D_2{}^{**}A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}$
Einspeisung in Hochbehälter		A_3			A_3
Einspeisung in Leitungsnetz		$A_3{}^*$	A_3		$A_3{}^*$
direkte Abgabe	$D_3A_3B_3C_3$	$B_3A_3{}^{**}C_3D_3$	$B_3A_3{}^*C_3D_3$	$A_3B_3C_3D_3$	$B_3A_3{}^{**}$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der jeweiligen Versorgungsart; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	Alternativen der Wasserverteilung und -abgabe

Tabelle 6.3: Dritter Teil der Notsituationen, der als geeignet identifizierten Versorgungsarten und der benötigten Ressourcen

Notsituation	N_{11}	N_{12}	N_{13}	N_{14}	N_{15}
eigene Gewinnung	B_1	A_1			
anderer Versorger	A_1	B_1	A_1	A_1	A_1
leitungsunabh. Brunnen			B_1	B_1	B_1
Oberflächenwasser			C_1	C_1	C_1
Verbindungsleitung	A_2		A_2	A_2	
mobile Leitungen	$B_2A_2{}^*$	A_2B_2	$A_2{}^*B_2C_2$	$A_2{}^*B_2C_2$	$A_2B_2C_2$
Tankwagen	$B_2{}^*A_2{}^{**}$	$A_2{}^*B_2{}^*$	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter			$A_3B_3C_3$		
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3		$A_3{}^*B_3C_3$	$A_3B_3C_3$	
direkte Abgabe	$B_3A_3{}^*$	A_3B_3	$A_3{}^{**}B_3{}^*C_3{}^*$	$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$	$A_3B_3C_3$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der jeweiligen Versorgungsart; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	Alternativen der Wasserverteilung und -abgabe

Tabelle 6.4: Vierter Teil der Notsituationen, der als geeignet identifizierten Versorgungsarten und der benötigten Ressourcen

Notsituation	N_{16}	N_{17}	N_{18}	N_{19}	N_{20}
eigene Gewinnung					
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
leitungsunabh. Brunnen	B_1	B_1			
Oberflächenwasser	C_1	C_1			
Verbindungsleitung	A_2	A_2	A_2	A_2	
mobile Leitungen	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}$	A_2
Tankwagen	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}$	$A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter	A_3		A_3		
Einspeisung in Leitungsnetz	$A_3{}^{*}$	A_3	$A_3{}^{*}$	A_3	
direkte Abgabe	$A_3{}^{**}B_3C_3$	$A_3{}^{*}B_3C_3$	$A_3{}^{**}$	$A_3{}^{*}$	A_3

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der jeweiligen Versorgungsart; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	Alternativen der Wasserverteilung und -abgabe

6.1.2 Anforderungen an Ressourcen und Voraussetzungen für deren Einsatz zur Ersatz- und Notwasserversorgung

Zusätzlich zu den in Kapitel 3 aufgeführten Grundlagen der Ersatz- und Notwasserversorgung wurden im Rahmen des Forschungsprojekts NoWa II ergänzende Inhalte erarbeitet. Die im Folgenden aufgeführten Anforderungen an die aufgezeigten Ressourcen und Voraussetzungen für deren Einsatz sind somit als Ergänzung zu sehen und bei der Planung von Maßnahmen zur Ersatz- und Notwasserversorgung zu berücksichtigen.

FF 1.3 Was sind Anforderungen an Ressourcen sowie Voraussetzungen für deren Einsatz?

Die Anforderungen an Ressourcen sowie die Voraussetzungen für deren Einsatz werden im Folgenden anhand der Teilprozesse und Anlagenteile aufgezeigt, die diese Ressourcen ersetzen sollen.

Gewinnung und Aufbereitung

Für die vier Gewinnungsarten (Wasser aus eigenen Gewinnungsanlagen, Wasser eines anderen Versorgungsunternehmens, Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen sowie Oberflächenwasser) gilt ergänzend zu den in Abschnitt 3.2.1 dargestellten Aspekten gleichermaßen, dass Material zur Förderung des Wassers in ausreichender Form vorhanden sein muss. Dies umfasst den ausschließlichen Einsatz von trinkwassergeeigneten, mobilen Rohrleitungen oder Schläuchen sowie Armaturen, Dichtungen und Kupplungen, die den Anforderungen der TrinkwV entsprechen.

Bei der Ersatzversorgung sind die Qualitätsanforderungen gemäß TrinkwV zu erfüllen. Bei der Notwasserversorgung gelten die Notwasserversorgungshöchstwerte für 30 Tage (NWV_{MHW30}) (Tabelle B.2 im Anhang). Entspricht das Rohwasser diesen Anforderungen nicht, so muss eine (mobile) Aufbereitungs- und Desinfektionsanlage mit ausreichender Kapazität zur Erreichung der qualitativen sowie quantitativen Schutzziele vorhanden sein.

Des Weiteren sind Maßnahmen festzulegen, falls die Grenz- bzw. Richtwerte nicht eingehalten werden können. Hierfür sind entsprechende Laboruntersuchungen erforderlich. Mit Zustimmung des Gesundheitsamts ist eine Abgabe von desinfiziertem Wasser möglich, bevor die Laborbefunde vorliegen. In diesem Fall muss die Bevölkerung darüber informiert werden, dass ein Abkochgebot in Kraft tritt. Alternativ wird das Wasser zentral desinfiziert.

Verteilung des Wassers mittels mobiler Leitungen oder Transportfahrzeuge

In Ergänzung zu den in Abschnitt 3.2.3 dargestellten Aspekten gilt für die Verteilung mittels mobiler Leitungen, dass sowohl die Gesamtlänge als auch der Durchmesser von vorhandenen Leitungen für den Anwendungsfall passend sein müssen. Die Anzahl, Einzellängen und Durchmesser der Teilstücke sowie deren Lagerort müssen bekannt sein. Für den Einsatz zur Ersatzwasserversorgung müssen die Armaturen, Dichtungen, Kupplungen und die Leitungen selbst den Anforderungen der TrinkwV entsprechen. Vor der Inbetriebnahme sind die mobilen Leitungen zu spülen und zu desinfizieren.

Die Transportfahrzeuge müssen für die Verteilung von Trinkwasser geeignet sein und die Kapazitäten zur Deckung des Wasserbedarfs ausreichen. Zudem werden für die Fahrzeuge angemessene und zugängliche Transportwege benötigt.

Einspeisung des Wassers in das Leitungsnetz oder Hochbehälter

Das Verteilnetz muss ergänzend zu den in Abschnitt 3.2.4 aufgezeigten Aspekten zur Einspeisung von Wasser noch, oder bereits wieder, mindestens teilweise funktionstüchtig sein. Je nach Netzstruktur werden für die Einspeisung Druckerhöhungsanlagen benötigt. Der Hochbehälter, in den eingespeist werden soll, muss ebenfalls funktionstüchtig sein.

Wenn es die Rahmenbedingungen erfordern, kann eine gezielte Absperrung bestimmter Bereiche des Leitungsnetzes unter Berücksichtigung wesentlicher Bedarfsträger (z. B. sensible Einrichtungen) erfolgen. Dies kann der Fall sein, wenn das Versorgungsnetz nicht vollständig funktionstüchtig ist. Des Weiteren kann eine Drosselung des Netzdrucks oder eine intermittierende Versorgung notwendig sein, wenn die Kapazitäten der Ressourcen oder Wassermengen nicht ausreichend sind. Zudem können behördliche Entscheidungen zu einer gezielten Absperrung von Netzbereichen führen. Ist eine intermittierende Versorgung vorgesehen, so sind Zeitpläne für die Versorgung zu erstellen und betroffene Verbraucher über die Veränderungen zu informieren.

Direkte Abgabe an die Verbrauchenden

Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.2.4 aufgezeigten Aspekten sind bei der direkten Abgabe folgende Aspekte für eine effektive Umsetzung zu beachten. Eine Abgabe des Wassers am Ort der Gewinnung wird in der Regel ausschließlich an bereits dezentral organisierten Gewinnungsorten umgesetzt. Dies gilt für die Gewinnung von Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen (Versorgungsart 3c) sowie Oberflächenwasser (Versorgungsart 4c).

Die Abgabe erfolgt bei einer Holversorgung über Gruppenzapfstellen oder in abgepackter Form. Gemäß Sphere Association (2018) wird pro 250 Einwohnern eine Zapfstelle benötigt, unter der Annahme einer täglichen Betriebszeit von 8 h und einem Durchfluss von 7,5 l/(Zapfstelle·min). Bei einem größeren Durchfluss reduziert sich die Anzahl der benötigten Zapfstellen.

Mittels Abfüllanlagen kann Wasser abgepackt werden, wenn es den geltenden Qualitätsanforderungen entspricht. Die Anlagen ermöglichen eine Abfüllung entweder in Flaschen oder flexible Behältnisse (Beutel), welche im Anschluss direkt an die Verbrauchenden abgegeben werden können.

Die Abgabe des abgepackten Wassers erfolgt an dezentralen Ausgabestellen. Die Wassergebinde müssen entweder zentral abgepackt und anschließend zu den dezentralen Ausgabestellen transportiert werden. Sofern mehrere Abfüllanlagen vorhanden sind, kann die Abfüllung an dezentralen Stationen erfolgen. Befüllte Gebinde sollten vorgehalten werden. Dies gilt insbesondere zum Ausgleich von Bedarfsspitzen. Für den Betrieb der Abfüllanlagen wird Personal in ausreichender Zahl benötigt, das mit der Bedienung dieser vertraut ist.

Die Lage sowie der Einzugsbereich der Ausgabestellen müssen bekannt sein und der betroffenen Bevölkerung kommuniziert werden. Da es sich um eine Holversorgung handelt, sind Behältnisse für die Ausgabe vorzuhalten. Zudem sollte der Untergrund im Umfeld der Gruppenzapfstellen z. B. durch Kunststoffplatten befestigt werden, um Schlammbildung durch austretendes Wasser zu vermeiden.

Um Bedarfsspitzen und Transportengpässe kompensieren zu können, sind sowohl zentrale als auch dezentrale Speicherorte zu empfehlen (Abbildung 6.3). Die zentrale Speicherung erfolgt am Ort der Gewinnung. Eine zusätzliche Ergänzung durch dezentral aufgestellte Speicherbehältnisse an den Abgabeorten ermöglicht die Deckung des Bedarfs auch bei schwankender Nachfrage.

Abbildung 6.3: Anordnung der Speicherbehälter bei der direkten Abgabe an die Letztverbrauchenden

Die Zuständigkeiten sowie das Vorgehen bei der Ausgabe sind zu regeln, sodass Chaos vermieden werden kann und die Ausgabe zügig und effizient durchgeführt wird. Durch zusätzliches Sicherheitspersonal können die Ausgabestellen und das Personal vor Ort geschützt werden.

6.2 Steuerung und Bewertung des Einsatzes von begrenzten Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung mittels System Dynamics Modell NOTWASSER

Das hier entwickelte SD Modell NOTWASSER dient der Steuerung und Bewertung des Einsatzes von begrenzten Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung. Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Beantwortung von drei Fragestellungen dargelegt. Die Frage nach dem effektiven Einsatz der Ressourcen zur Minimierung der fehlenden Wassermenge wird in Abschnitt 6.2.1 beleuchtet. In Abschnitt 6.2.2 die Ergebnisse der durchgeführten Studie zum Bevorratungsverhalten aufgezeigt und deren Auswirkungen auf die fehlende Wassermenge dargestellt. Abschließend werden in Abschnitt 6.2.3 werden die Auswirkungen des Notfallverlaufs auf die fehlende Wassermenge durch Einbindung in das Modell NOTWASSER erläutert.

6.2.1 Effektiver Einsatz der Ressourcen zur Reduzierung der fehlenden Wassermenge

Die Betrachtung des effektiven Einsatzes der Ressourcen erfolgt anhand des Versorgungsdefizits. Je geringer die fehlende Wassermenge, desto effektiver ist der Einsatz der Ressourcen.

Die Simulation des Modells NOTWASSER wird mit den Parametern des WVU im Fallbeispiels durchgeführt. Die vorhandenen Ressourcen des WVU bilden die Grundlage für den Vergleich der Versorgungsarten. Anhand des Modells NOTWASSER wird ermittelt, wie zusätzliche Ressourcen effektiv zur Erfüllung der jeweiligen Schutzziele eingesetzt werden sollten. In diesem Abschnitt wird ein linearer Verlauf des Ausfalls und der Wiederherstellung angenommen und die Vorratsversorgung durch die Bevölkerung vernachlässigt.

6.2.1.1 Charakterisierung der untersuchten Notsituationen sowie der Visualisierung der Modellergebnisse

Die Betrachtung des Ressourceneinsatzes erfolgt anhand der Notsituationen N_1, N_2, N_7, N_8, N_{12}, N_{16} und N_{17} (Tabelle 6.5). Diese Notsituationen wurden ausgewählt um verschiedene geeignete Versorgungsarten zu berücksichtigen und somit allgemein gütige Ergebnisse zu erhalten. In den ausgewählten Notsituationen ist mindestens eine im Fallbeispiel vorhandene Rohwasserart zur Versorgung geeignet.

Tabelle 6.5: Charakterisierung der vertiefend betrachteten Notsituationen anhand der geeigneten Versorgungsarten

	Notsituation			
	N_1 & N_2	N_7 & N_8	N_{12}	N_{16} & N_{17}
Verfügbare Rohwassermenge	$Q_{d,1} \geq Q_{d,WasSV}$	$Q_{d,1} \geq Q_{d,WasSV}$	$Q_{d,1} \geq Q_{d,WasSV}$	$Q_{d,1} < Q_{d,WasSV}$
Verfügbare Reinwassermenge	$Q_{d,1A} \geq Q_{d,m}$	$Q_{d,1A} < Q_{d,m}$	$Q_{d,1A} < Q_{d,m}$	$Q_{d,1A} < Q_{d,m}$
Mobile Aufbereitungskapazität	stationäre Aufbereitung	$C_{mA,di} \geq Q_{d,WasSV}$	$C_{mA,di} < Q_{d,m}$	$C_{mA,di} \geq Q_{d,WasSV}$
Leitungsnetz	funktionstüchtig	funktionstüchtig	nicht funktionstüchtig	funktionstüchtig
	Versorgungsarten			
Mögliche Gewinnungsart[a]	1	1, 2, 3, 4	1, 2	2, 3, 4
Leitungsgebundene Versorgungsarten[a]	1a, 1b	2a, 2b, 2c	keine	2a, 2b, 2c
Leitungsungebundene Versorgungsarten[a]	1c, 1d	1c, 1d, 2d, 2e, 3c, 3d, 3e, 4c, 4d, 4e	1c, 1d, 2d, 2e	2d, 2e, 3c, 3d, 3e, 4c, 4d, 4e

[a] gemäß Abschnitt 3.1

In den Notsituationen N_1 und N_2 sind nur Versorgungsarten mit Wasser aus den eigenen Gewinnungsanlagen geeignet . Es können jedoch sowohl leitungsgebundene als auch -ungebundene Versorgungsarten eingesetzt werden. In den Notsituationen N_7 und N_8 können alle Arten der Gewinnung zum Einsatz kommen. Es sind hierbei für die leitungsgebundene Versorgung nur Versorgungsarten mit Wasser eines anderen Versorgungsunternehmen geeignet. In der Notsituation N_{12} sind nur leitungsungebundene Versorgungsarten mit Wasser aus eigenen Gewinnungsanlagen oder eines anderen Versorgungsunternehmens

geeignet. Das Wasser aus den eigenen Gewinnungsanlagen kann in den Notsituationen N_{16} und N_{17} wiederum nicht eingesetzt werden. Für die leitungsgebundene Versorgung ist das Wasser eines anderen Versorgungsunternehmens geeignet. Dieses ist zusätzlich, ebenso wie das Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Oberflächenwasser für die leitungsungebundene Versorgung einsetzbar.

Die Ergebnisse werden durch prozentuale Darstellungen der abgegebenen Wassermenge bzw. versorgten Personen abhängig vom Ressourceneinsatz in Heatmaps sowie Balkendiagrammen visualisiert. Anhand dieser Betrachtung wird die Effektivität des Einsatzes beurteilt. Zudem werden anhand von ausgewählten Notsituationen die abgegebenen Wassermengen spezifisch nach der zum Einsatz kommenden Versorgungsart aufgezeigt. Alle Abbildungen haben gemein, dass sich die abgegebene Wassermenge (Q_{aE}) bzw. die versorgten Personen (P_v) auf die zur Normalversorgung benötigte Wassermenge (Q_{bE}) bzw. die gesamte Bevölkerung (P_{ges}) beziehen. Die zur Normalversorgung benötigte Wassermenge entspricht der Fläche zwischen der Leistungskurve während des Notfalls und dem mittleren täglichen Wasserbedarf ($Q_{d,m}$) (Abbildung 6.4). Im Fallbeispiel entspricht P_{ges} 20 636 Einwohnern und Q_{bE} bei linearem Verlauf des Ausfalls und der Wiederherstellung 17 505 m^3.

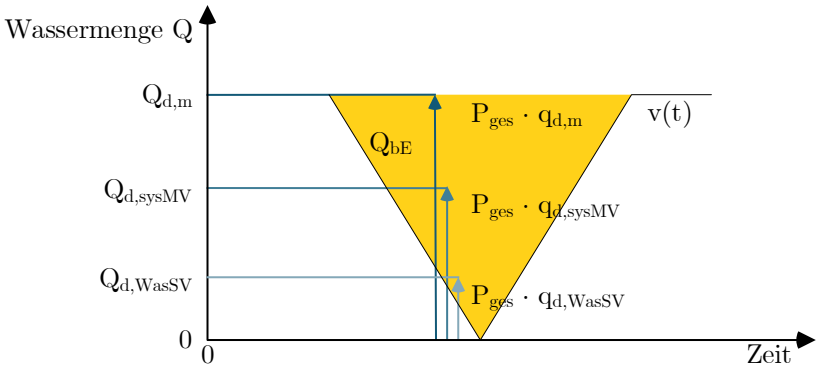


Abbildung 6.4: Zur Normalversorgung und zur Erfüllung der Schutzziele benötigte Wassermenge

Die Heatmaps (z. B. Abbildung 6.8) zeigen durch die farbliche Übersicht, welche Möglichkeit des Ressourceneinsatzes in welcher Notsituation zu welchem Ergebnis führt. Die Balkendiagramme ermöglichen den Vergleich der durch die aufgezeigten Versorgungsarten bereitgestellten Wassermenge. Um die Unterschiede der vorhandenen Ressourcen sowie der insgesamt benötigten Ressourcen zur Erfüllung der quantitativen Schutzziele aufzuzeigen, wurde eine logarithmische Skala für die Ordinate gewählt.

6.2.1.2 Einsatz der vorhandenen Ressourcen

Die bei dem WVU im Fallbeispiel vorhandenen Ressourcen (Tabelle 6.7) umfassen Gewinnungskapazitäten aus den eigenen Gewinnungsanlagen sowie aus zwei leitungsunabhängigen Brunnen. Diese verfügen jeweils über eine Gewinnungskapazität von 24 m^3/h. Zur Aufbereitung kann auf eine mobile Aufbereitungsanlage mit einer Kapazität von 15 m^3/h zugegriffen werden. Zudem sind drei transportable Speicherbehältnisse mit je 1 m^3 Fassungsvermögen

vorhanden. Die transportablen Behältnisse können sowohl für die Speicherung als auch für die Verteilung mit anschließender leitungsgebundener oder -ungebundener Abgabe eingesetzt werden. Diese Behälter können anhand von 20 verschiedenen Möglichkeiten des Ressourceneinsatzes eingesetzt werden. Der Einsatz der Behälter wird im Folgenden anhand von 18 ausgewählten Möglichkeiten des Ressourceneinsatzes untersucht (Tabelle 6.6), bei denen eine Differenzierung im Modell abgebildet wird.

Tabelle 6.6: Möglichkeiten des Einsatzes der vorhandenen drei Behälter und Ableitung von Behältereinsatzkombinationen

Behälter-einsatz-kombination	Anteil der Behälter eingesetzt als			
	Transport-kapazitäten	zentraler Rohwasser-speicher	zentraler Reinwasser-speicher	dezentraler Reinwasser-speicher
B_1	0 %	100 %	0 %	0 %
B_2	0 %	0 %	100 %	0 %
B_3	0 %	0 %	0 %	100 %
B_4	0 %	66,6 %	33,3 %	0 %
B_5	0 %	66,6 %	0 %	33,3 %
B_6	0 %	33,3 %	33,3 %	33,3 %
B_7	0 %	0 %	66,6 %	33,3 %
B_8	0 %	0 %	33,3 %	66,6 %
B_9	100 %*	0 %	0 %	0 %
B_{10}	66,6 %*	33,3 %	0 %	0 %
B_{11}	66,6 %*	0 %	33,3 %	0 %
B_{12}	66,6 %*	0 %	0 %	33,3 %
B_{13}	33,3 %*	66,6 %	0 %	0 %
B_{14}	33,3 %*	0 %	66,6 %	0 %
B_{15}	33,3 %*	0 %	0 %	66,6 %
B_{16}	33,3 %*	33,3 %	33,3 %	0 %
B_{17}	33,3 %*	0 %	33,3 %	33,3 %
B_{18}	33,3 %*	33,3 %	0 %	33,3 %

* Das transportable Speicherbehältnis wird auf ein Transportfahrzeug geladen und damit von Gewinnungs- bzw. Speicherort zur Einspeise- oder Abgabestelle gefahren

Da im betrachteten Fallbeispiel weder ein anderes WVU noch Oberflächengewässer vorhanden sind, liegt der Schwerpunkt der Betrachtung auf Versorgungsarten bei denen Wasser aus eigenen Gewinnungsanlagen oder leitungsunabhängigen Brunnen mittels mobilen Leitungen oder Transportfahrzeugen verteilt wird (Versorgungsart 1a, 1b, 3a oder 3b) oder dieses direkt bzw. in abgefüllter Form an den Verbraucher abgeben wird (Versorgungsart 1c, 1d, 3c, 3d oder 3e).

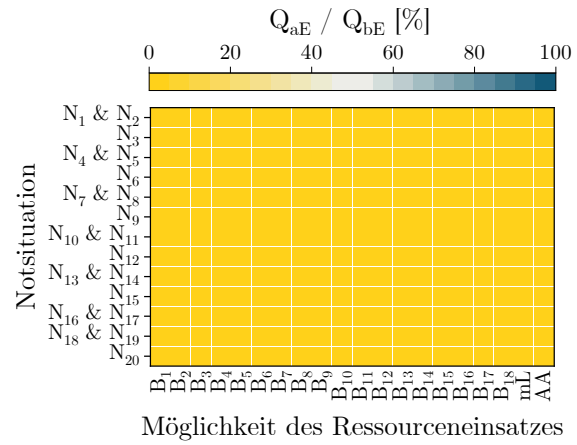
FF 2.1: Welche Wassermengen können beim Einsatz des vorhandenen Ressourcenbestandes an die Verbraucher abgegeben werden?

Bei dem Einsatz aller vorhandenen Behälter für die Verteilung können im Fallbeispiel maximal 45 m^3/d an die Verbrauchenden abgegeben werden. Der Anteil der abgegebenen Wassermenge liegt im Vergleich zur Normalversorgung benötigten Wassermenge im einstelligen Prozentbereich (Abbildung 6.5(a)). Dennoch können durch den Einsatz der vorhandenen Ressourcen mittels dieser Einsatzmöglichkeit (B_9) bereits einige wenige Personen versorgt werden (b).

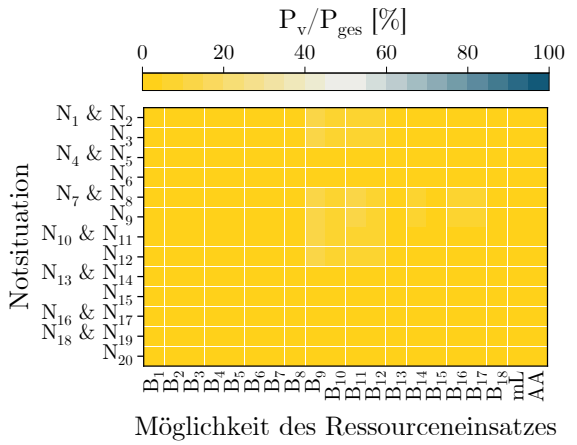
In den Notsituationen N_1 und N_2 kann durch den Einsatz der vorhandenen Ressourcen mit der Einsatzmöglichkeit B_9 bis zu 3 % der benötigten Wassermenge abgegeben werden (c). Dies gilt ebenfalls für die Notsituationen N_7 und N_8 (d) sowie N_{12} (e).

In den Notsituationen N_{16} und N_{17} ist die Versorgung mit Wasser aus eigenen Gewinnungsanlagen nicht geeignet. Aufgrund der begrenzten mobilen Aufbereitungskapazitäten können nur circa 0,3 % der zur Normalversorgung benötigten Wassermenge durch eine Kombination der Versorgungsarten 3c und 3d bei Einsatz der Ressourcen nach Möglichkeit B_{14} abgegeben werden (f). Dazu werden ein Drittel der Behälter für den Transport und zwei Drittel für die zentrale Reinwasserspeicherung eingesetzt.

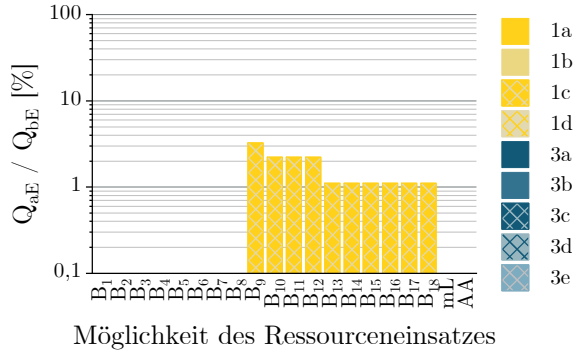
Die vorhandenen Ressourcen ermöglichen somit nur eine geringfügige Versorgung. Lediglich ein Bruchteil der Bevölkerung kann leitungsungebunden versorgt werden. Eine leitungsgebundene Versorgung ist mit den vorhandenen Ressourcen nicht möglich.



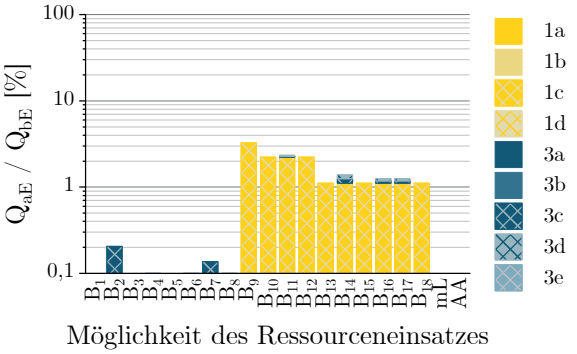
(a) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge



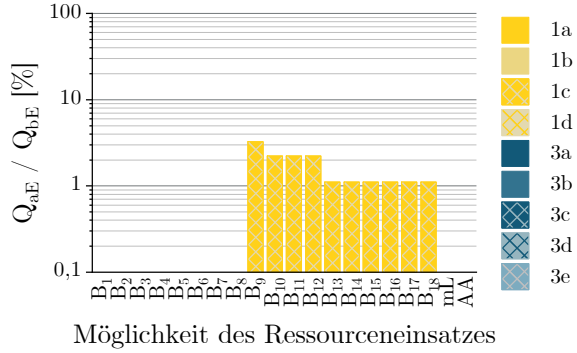
(b) Versorgte Personen im Verhältnis zu gesamter Bevölkerung



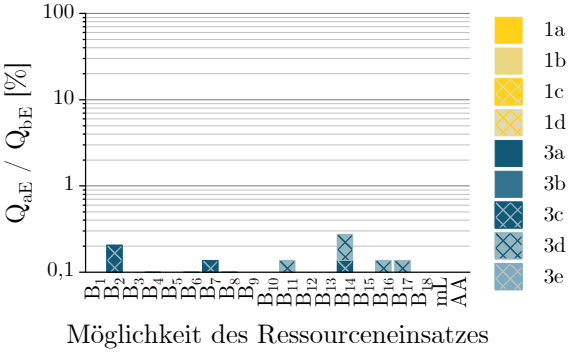
(c) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_1 und N_2



(d) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_7 und N_8



(e) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_{12}



(f) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_{16} und N_{17}

Abbildung 6.5: Einsatz der vorhandenen Kapazitäten zur Aufbereitung (15 m^3/h) sowie der Behältnisse zum Transport oder zur Speicherung (3 m^3)

6.2.1.3 Benötigte Ressourcen zur Erfüllung der quantitativen Schutzziele

Die vorhandenen Ressourcen sind zur Erfüllung der quantitativen Schutzziele nicht ausreichen. Der Einsatz zusätzlicher Ressourcen wird somit im Folgenden zur Beantwortung der aufgezeigten Forschungsfrage untersucht.

FF 2.2: Welche zusätzlichen Ressourcenkapazitäten werden für die Erfüllung von Schutzzielen benötigt?

Zur Erfüllung der Schutzziele werden die benötigten Ressourcen anhand der fehlenden Wassermenge zum Zeitpunkt des vollständigen Ausfalls ermittelt (Abbildung 6.4). Somit basieren die benötigten Kapazitäten auf der Anzahl der Einwohner, die zum Zeitpunkt des maximalen Ausfalls versorgt werden müssen, multipliziert mit dem spezifischen leitungsgebundenen oder -ungebundenen Bedarf pro Person gemäß Abschnitt 4.2. Die in Tabelle 6.7 aufgezeigten Kapazitäten werden als Summe der jeweiligen Versorgungsarten im Bezug auf die Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung in jeder Notsituation benötigt.

Tabelle 6.7: Im Fallbeispiel vorhandene und zur Erfüllung von quantitativen Schutzzielen benötigte Kapazitäten ($P_{ges} = 20\,636$ Einwohner)

			quantitatives Schutzziel		
			$Q_{d,WasSV}$	$Q_{d,sysMV}$	$Q_{d,m}$
		einwohnerbezogenes Schutzziel	15 l/(E·d)	50 l/(E·d)	120 l/(E·d)
		Benötigte Kapazität	310 m^3/d	1 032 m^3/d	2 497 m^3/d
		Vorhandene Kapazitäten	Eingesetzte Ressourcen zur Erfüllung des quantitativen Schutzziels		
mobile Aufbereitungsanlagen	$C_{mA,di}$[a]	225 m^3/d	450 m^3/d	1 125 m^3/d	2 700 m^3/d
	$n_{mA,i}$	1 mA	2 mA	5 mA	12 mA
Transportbehältnisse	$C_{Td,i}$[b]	45 m^3/d[c]	315 m^3/d[c]	1 035 m^3/d[c]	2 520 m^3/d[c]
	$n_{T,i}$	3 T	21 T	69 T	168 T
mobile Leitungen	$Q_{d,mL}$[d]	–	315 m^3/d[e]	1 035 m^3/d[e]	2 520 m^3/d[e]
	$n_{mL,i}$	–	6 mobL	20 mobL	48 mobL
Abfüllanlagen	$C_{AAd,i}$[f]	–	315 m^3/d[e]	1 050 m^3/d[e]	2 520 m^3/d[e]
	$n_{AA,i}$	–	3 AA	10 AA	24 AA

[a] $c_{d,mA} = 225\,m^3/(mA \cdot d)$
[b] $c_{Td,i} = 15\,m^3/(T \cdot d)$
[c] Möglichkeit des Ressourceneinsatzes B_9
[d] $q_{d,mL} = 52{,}5\,m^3/(mobL \cdot d)$
[e] Zusätzlich drei bereits vorhandene Behältnisse mit je 1 m^3 Fassungsvermögen, einsetzbar als Speicherbehältnis oder zum Transport (1 h je Fahrt, 15 h/d tägliche Betriebsdauer)
[f] $c_{AAd,i} = 105\,m^3/(AA \cdot d)$

Für die Betrachtung der notwendigen, zusätzlichen Ressourcen werden die in Tabelle 6.7 aufgezeigten Ressourcenkapazitäten berücksichtigt. Um einen Vergleich zwischen mobilen Leitungen, Transportfahrzeugen und Abfüllanlagen zu ermöglichen, werden einheitliche tägliche Kapazitäten der Ressourcen betrachtet. Die spezifischen Kapazitäten

sind entsprechend der vorhanden Ressourcen angenommen. Hieraus ergibt sich eine marginale Differenz zwischen der betrachteten Ressourcenkapazität und der zur Erfüllung des jeweiligen Schutzziels benötigten Wassermenge.

Die prozentuale Aufteilung der zusätzlichen Behälter orientiert sich an der Aufteilung der vorhandenen Ressourcen gemäß Tabelle 6.6. Bei der Betrachtung des Einsatzes von mobilen Leitungen sowie Abfüllanlagen wird angenommen, dass im Fallbeispiel die vorhandenen drei Behälter eingesetzt werden können.

Erfüllung der quantitativen Schutzziele der leitungsungebundenen Versorgung durch Einsatz von zusätzlichen Ressourcen

Zur Bereitstellung der Wassermenge zur Erfüllung des quantitativen Schutzziels der leitungsungebundenen Versorgung, werden Gewinnungs-, Aufbereitungs- und Verteilkapazitäten von 310 m^3/d benötigt (Tabelle 6.7). Die vorhandenen Gewinnungskapazitäten entsprechen dieser Anforderung bereits. Im Bereich der Aufbereitungs- und Verteilkapazitäten müssen jedoch hierzu zusätzliche Ressourcen generiert werden. Die betrachteten Kapazitäten sind in Tabelle 6.7 aufgezeigt.

Die bereitstellbare Wassermenge sowie der Anteil versorgten Personen bei einer Erhöhung der Aufbereitungskapazitäten sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Die abgegebene Wassermenge entspricht in einigen Notsituationen circa 10 % der zur Normalversorgung benötigten Wassermenge (a). Dennoch können in diesen Notsituationen alle Einwohner durch die leitungsungebundene Abgabe versorgt werden (b). In den Notsituationen N_{13} bis N_{20} ist hier keine Versorgung möglich, da die benötigten Gewinnungskapazitäten eines anderen Versorgungsunternehmen nicht zur Verfügung stehen.

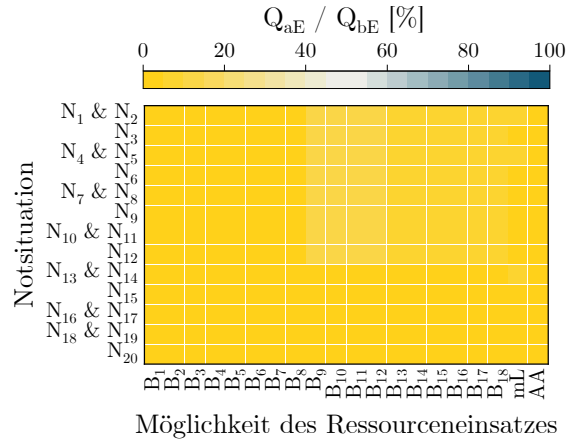
In den Notsituationen N_1 und N_2 kann durch die Versorgungsarten 1b und 1c bei einem Einsatz aller Behältnisse für den Transport (B_9) mehr als 10 % der zur Normalversorgung benötigten Wassermenge bereitgestellt werden (c). Dies ist ebenfalls in den Notsituationen N_7 und N_8 möglich (d). Hier ist die Versorgungsart 1c am geeignetsten. Dies gilt auch in der Notsituation N_{12} (e).

Die abgegebene Wassermenge reduziert sich in den Notsituationen N_{16} und N_{17} auf circa 2 % der zur Normalversorgung benötigten Wassermenge (f). In diesen Notsituationen kann das Wasser aus den eigenen Gewinnungsanlagen nicht genutzt werden. Aufgrund der begrenzten Kapazitäten der mobilen Aufbereitungsanlagen sind hier somit für das Fallbeispiel ausschließlich leitungsungebundene Versorgungsarten geeignet.

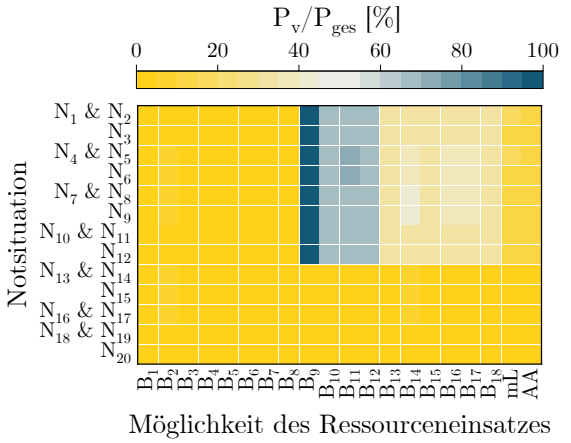
Bei der Versorgung mit Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen sind zentrale Reinwasserspeicher zur Entkoppelung des Gewinnungs- und Aufbereitungsprozesses von der Verteilung notwendig. Dies ist im Modell NOTWASSER berücksichtigt. Somit werden für diese Versorgungsarten ein Teil der Behälter zur Speicherung benötigt und die Möglichkeit des Ressourceneinsatzes B_9 ist folglich nicht geeignet. Wird nur ein Anteil der Behälter zum Transport eingesetzt, reduziert sich jedoch die verfügbare Verteilungskapazität. Die Auswirkungen zeigen sich im Vergleich der in (f) dargestellten Ergebnisse mit denen der Abbildungen (c) – (e). Beim Einsatz von einem Drittel der Behälter für den Transport und zwei Drittel der Behälter für die zentrale Rohwasserspeicherung (B_{14}) kann durch die Kom-

bination von Versorgungsart 3c und 3d circa 2 % der im Fallbeispiel zur Normalversorgung benötigten Wassermenge abgegeben werden.

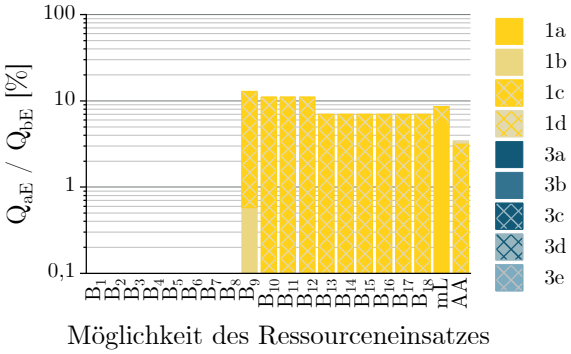
Die Erhöhung der vorhandenen Ressourcen auf die siebenfache Kapazität der Behälter ermöglicht im Fallbeispiel die leitungsungebundene Versorgung der gesamten Bevölkerung in den Notsituationen N_1 bis N_{12}. Der Einsatz von mobilen Leitungen mit den entsprechenden Kapazitäten führt hingegen nicht zu diesem Ergebnis. Mobile Leitungen kommen bei leitungsgebundenen Versorgungsarten zum Einsatz und ermöglichen im Fallbeispiel lediglich eine Teilversorgung der Bevölkerung.



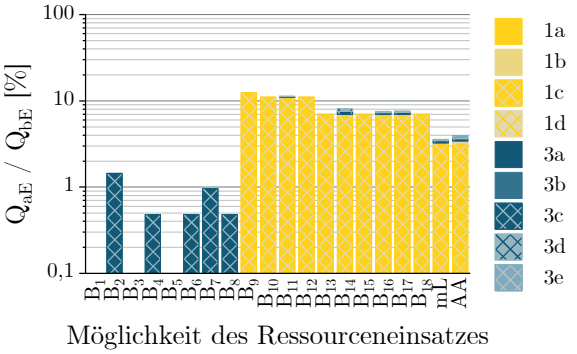
(a) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge



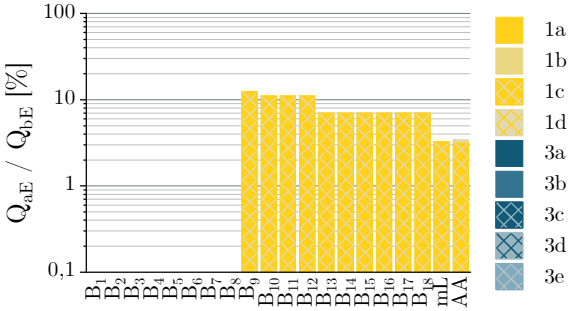
(b) Versorgte Personen im Verhältnis zu gesamter Bevölkerung



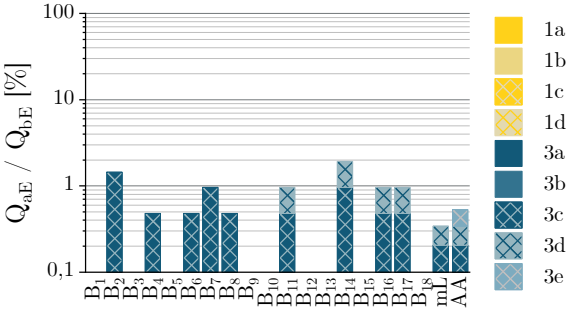
(c) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_1 und N_2



(d) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_7 und N_8



(e) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_{12}



(f) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_{16} und N_{17}

Abbildung 6.6: Einsatz von zusätzlichen Kapazitäten zur Erfüllung der quantitativen Schutzziele der leitungsungebundenen Versorgung

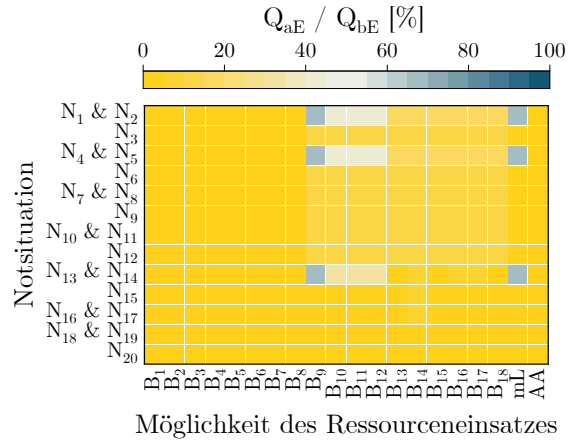
Erfüllung der quantitativen Schutzziele der systemabhängigen Mindestwassermenge durch Einsatz von zusätzlichen Ressourcen

Die in Tabelle 6.7 aufgezeigten Kapazitäten werden zur Bereitstellung der Wassermenge zur Erfüllung der quantitativen Schutzziele der systemabhängigen Mindestwassermenge benötigt. Die Ergebnisse gehen aus Abbildung 6.7 hervor.

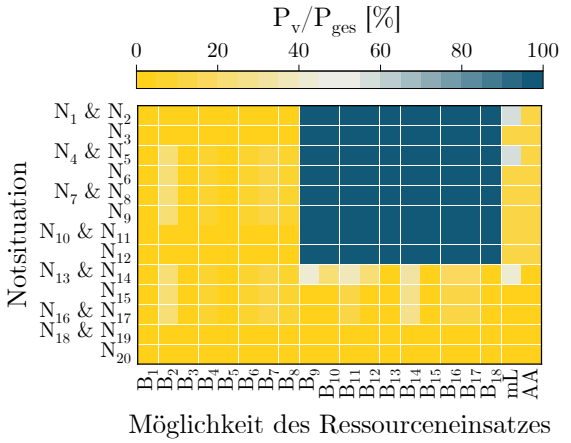
Die zusätzlichen Ressourcen führen zu einer abgegeben Wassermenge in Höhe von fast 70 % der zur Normalversorgung benötigten Wassermenge (a). Die gesamten Einwohner können versorgt werden (c). Die Versorgung erfolgt je nach Notsituation durch eine leitungsgebundene oder -ungebundene Abgabe.

In den Notsituationen N_1 und N_2 kann die leitungsgebundene Versorgung durch die Versorgungsarten 1a oder 1b erfolgen (c). In den Notsituationen N_7, N_8, N_{12}, N_{16} und N_{17} reduziert sich die abgegebene Wassermenge auf circa 10 % der zur Normalversorgung benötigten Menge (d) - (f). In diesen Notsituationen kann mit den betrachteten Versorgungsarten keine leitungsgebundene Versorgung erfolgen. Hierzu werden Gewinnungskapazitäten eines anderen Versorgungsunternehmen benötigt.

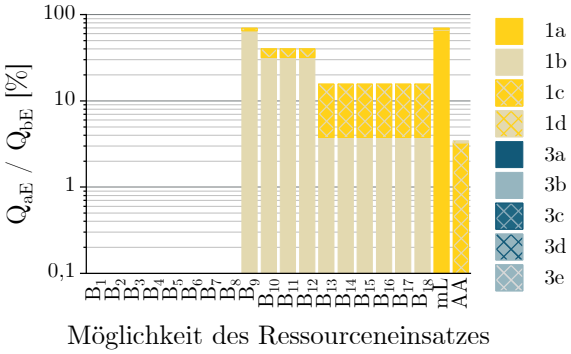
Zur Erfüllung des quantitativen Schutzziels der systemabhängigen Mindestwassermenge werden circa die dreifachen Kapazitäten im Vergleich zur Mindestwassermenge nach der 1. WasSV benötigt. Dennoch sind die zusätzlichen Kapazitäten aufgrund der begrenzten Eignung von leitungsgebundenen Versorgungsarten in einigen Notsituationen obsolet.



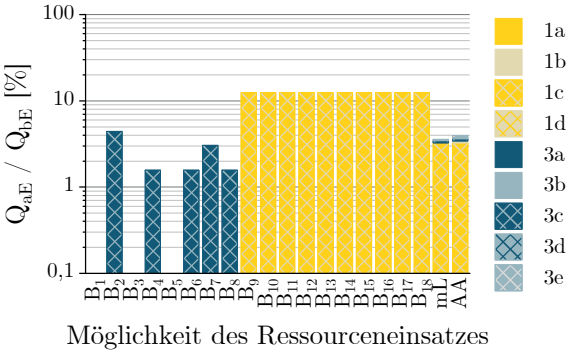
(a) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge



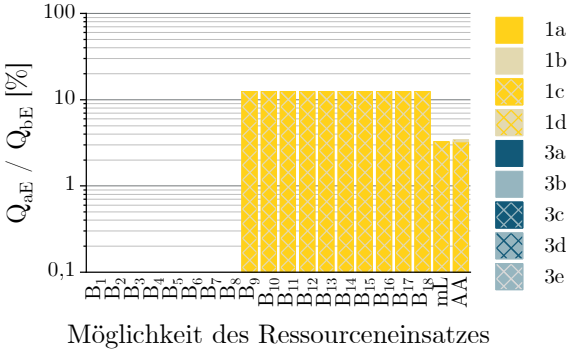
(b) Versorgte Personen im Verhältnis zu gesamter Bevölkerung



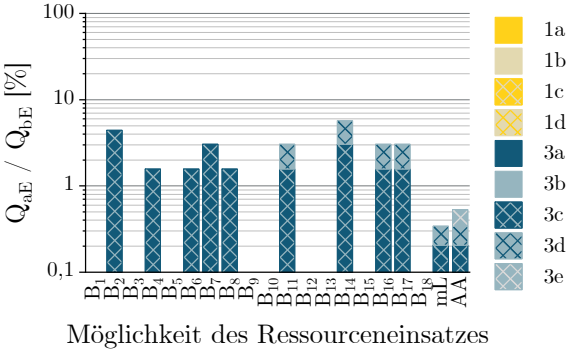
(c) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_1 und N_2



(d) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_7 und N_8



(e) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_{12}



(f) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_{16} und N_{17}

Abbildung 6.7: Einsatz von zusätzlichen Kapazitäten zur Erfüllung der quantitativen Schutzziele der systemabhängigen Mindestwassermenge

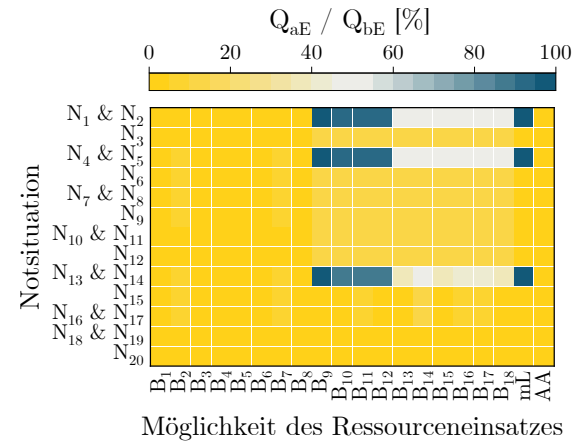
Erfüllung der quantitativen Schutzziele der Normalversorgung durch Einsatz von zusätzlichen Ressourcen

Um Wassermenge zur Erfüllung der quantitativen Schutzziele der Normalversorgung bereitzustellen, werden Gewinnungs-, Aufbereitungs- und Verteilkapazitäten von $2\,497\,\mathrm{m}^3/\mathrm{d}$ benötigt (Tabelle 6.7). Die vorhandenen Kapazitäten aus den eigenen Gewinnungsanlagen entsprechen dieser Anforderung. Die Gewinnungskapazitäten der vorhanden Notbrunnen sind nicht ausreichend, jedoch können auch keine zusätzlichen Brunnen erschlossen werden. Ergänzende Ressourcen werden zudem im Bereich der Aufbereitungs- und Verteilkapazitäten benötigt (Tabelle 6.7).

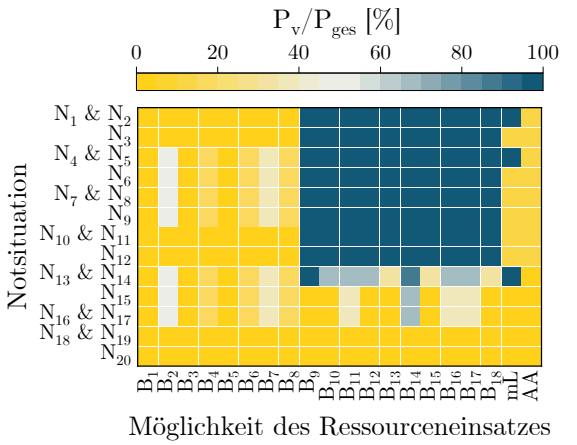
In einigen Notsituationen (z. B. N_1 und N_2) ist bei diesem Ressourceneinsatz die vollständige Abgabe der zur Normalversorgung benötigten Wassermenge möglich (a). Dies gilt jedoch nicht in allen Notsituationen. In diesen Situationen ist entweder keine leitungsgebundene Versorgung möglich und somit kann per se nur eine geringere Wassermenge bereitgestellt werden oder es eignen sich nur Versorgungsarten, die mit Wasser eines anderen Versorgers das betrachtete Schutzziel erfüllen können.

Im Vergleich zu den vorherigen Betrachtungen kann mit diesen zusätzlichen Ressourcen auch in den Notsituationen N_{13} und N_{14} die gesamte Bevölkerung mindestens leitungsungebunden versorgt werden (b).

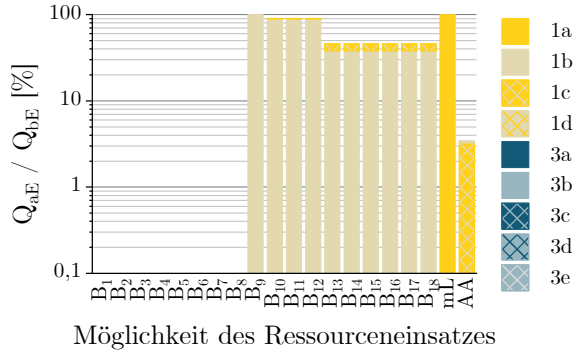
In den Notsituationen N_7 und N_8 ist keine leitungsgebundene Versorgung mit Wasser aus eigenen Gewinnungsanlagen oder durch Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen möglich. Somit entspricht die hier abgegebene Wassermenge mit nur circa 10 % der zur Normalversorgung benötigten Wassermenge, dem Schutzziel der leitungsungebundenen Mindestversorgung. In den Notsituationen N_{16} und N_{17} ist die Erfüllung des Schutzziels der leitungsungebundenen Mindestversorgung nicht möglich (f), da allein die Kapazitäten der Notbrunnen des Fallbeispiels hierfür nicht ausreichend sind. Die eigenen Gewinnungsanlagen sind jedoch in diesen Notsituationen nicht geeignet.



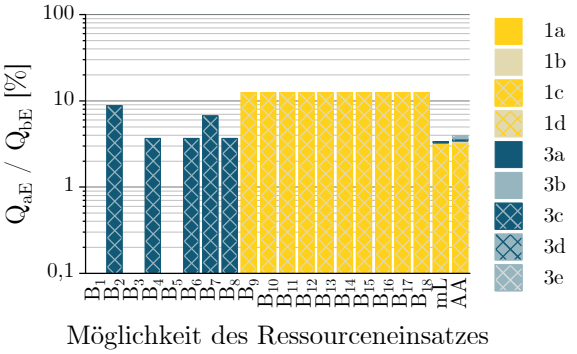
(a) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge



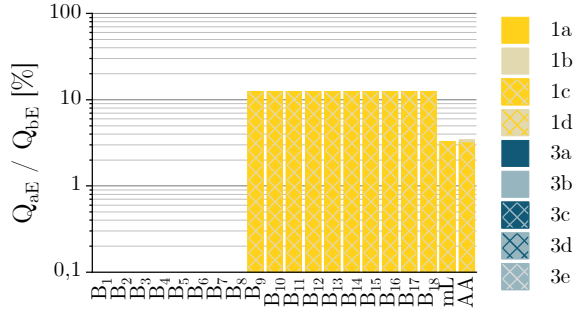
(b) Versorgte Personen im Verhältnis zu gesamter Bevölkerung



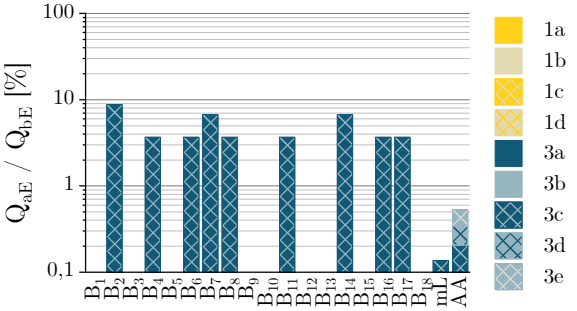
(c) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_1 und N_2



(d) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_7 und N_8



(e) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_{12}



(f) Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge für die Notsituation N_{16} und N_{17}

Abbildung 6.8: Einsatz von zusätzlichen Kapazitäten zur Erfüllung der quantitativen Schutzziele der Normalversorgung

6.2.1.4 Übergreifende Erkenntnisse zum effektiven Einsatz von vorhandenen und zusätzlichen Ressourcen

Die Einsatzmöglichkeiten der Ressourcen sind primär von der jeweiligen Notsituation und den ersetzbaren Teilprozessen abhängig. Dennoch lassen sich einige Erkenntnisse aus den betrachteten Ressourcenbeständen ableiten und verallgemeinern.

FF 2.3: Welche Versorgungsart eignet sich bei welchem Ressourcenbestand?

Im Allgemeinen eignen sich leitungsgebundene Versorgungsarten wenn der Ressourcenbestand mindestens die Bereitstellung der systemabhängigen Mindestwassermenge ermöglicht. Sind diese Kapazitäten vorhanden, so können sowohl Versorgungsarten mit Einspeisung in das Versorgungsnetz oder den Hochbehälter durch mobile Leitungen als auch durch Transportfahrzeuge geeignet sein. Für die Verwendung von mobilen Leitungen ist hierbei zusätzlich eine gewisse Speicherkapazität notwendig, um Differenzen zwischen der Wassergewinnung und -abgabe auszugleichen. Beim Einsatz von transportablen Behältern ist dies, bei der Einspeisung mittels Transportfahrzeugen, nicht zwingend notwendig. Leitungsgebundene Versorgungsarten sind aus hygienischer und technischer Sicht zu priorisieren.

Leitungsungebundene Versorgungsarten eignen sich insbesondere bei einem geringeren Ressourcenbestand, da die benötigte Wassermenge hierbei geringer ist als bei der leitungsgebundenen Abgabe. Bei der leitungsungebundenen Versorgung eignen sich insbesondere die Versorgungsarten mit dezentraler Abgabe durch Transportfahrzeuge, sofern diese vorhanden sind. Hierbei kann bei minimalen Ressourcenkapazitäten die größte Wassermenge bereitgestellt werden, wenn alle transportablen Behälter zur Verteilung eingesetzt werden. Weitere Behälterkapazitäten erhöhen, durch den Einsatz als Speicher, die Flexibilität durch den Ausgleich zwischen Gewinnung und Abgabe.

Ausreichende Gewinnungskapazitäten sind zur Sicherstellung der Versorgung in allen Notsituationen essentiell. Eine Einschränkung dieser Kapazitäten sowie der verfügbaren Wasserarten kann zur Vollversorgung in einigen Notsituationen ausreichen und dennoch zur Unterversorgung bei anderen Gegebenheiten führen. Die Ergebnisse des Fallbeispiels verdeutlichen, dass insbesondere Lieferverflechtungen mit anderen WVU zur Erhöhung der Resilienz des Wasserversorgungssystems unumgänglich sind.

6.2.2 Einfluss des Bevorratungsverhaltens der Bevölkerung auf die fehlende Wassermenge und zu versorgenden Einwohner

An der hier durchgeführten Befragung zur Erhebung des Bevorratungsverhaltens mit Schwerpunkt der bevorrateten Wassermenge nahmen insgesamt 2 196 Personen teil. Die Daten wurden auf Mehrfacheinreichungen und fehlende Daten geprüft. In die Analyse wurden 2 171 Personen einbezogen.

Das Durchschnittsalter der Personen aus den analysierten Datensätzen betrug 40,5 Jahre (SD = 13,6). Ein Vergleich des Stichprobenprofils und der deutschen Zensusdaten hinsichtlich Geschlecht und Alter der Befragten ist in Abbildung 6.9 dargestellt. Es wurden Personen aus allen sechzehn deutschen Bundesländern erfasst.

Circa 75 % der befragten Personen haben einen Vorrat für mindestens einen Tag (Abbildung 6.10). Hierbei wird ein Konsum von 2 l/P·d angenommen [BMI, 2016]. Folglich sind rund 25 % der Personen bei einer Beeinträchtigung der zentralen Wasserversorgung unmittelbar auf fremde Hilfe angewiesen. Ein Vorrat für 3 Tage ist bei weniger als 40 % der befragten Personen vorhanden. Nur circa 20 % der befragten Personen haben den gemäß BMI (2016) für 5 Tage vorgeschriebenen Vorrat in Höhe von 10 l Wasser.

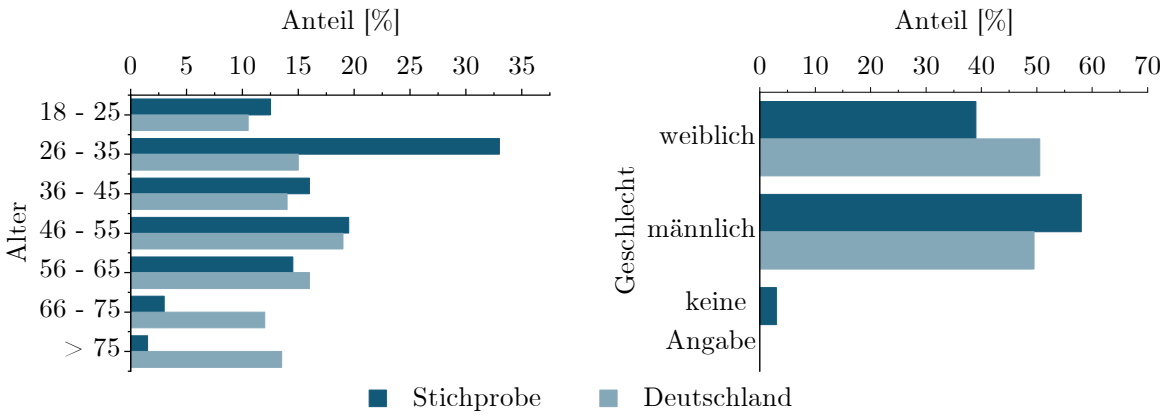


Abbildung 6.9: Vergleich der betrachteten Stichprobe mit den deutschen Zensusdaten gemäß Destatis (2018a,b)

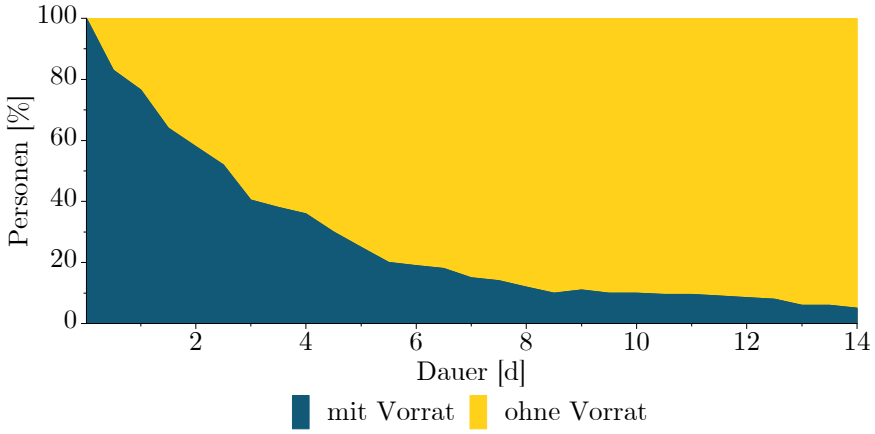
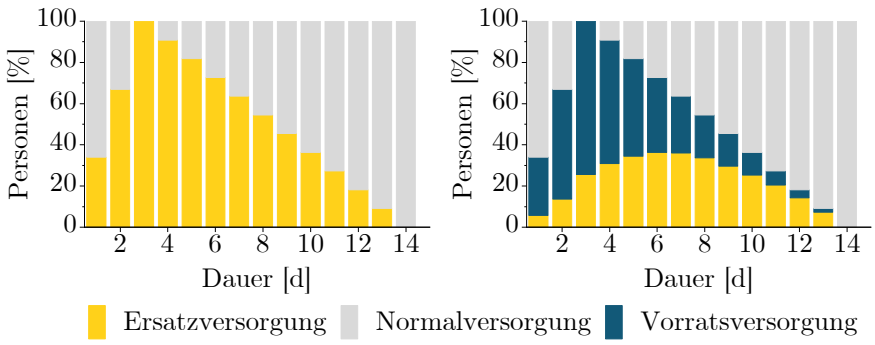


Abbildung 6.10: Anteil Personen, die Wasservorrat gelagert haben

FF 2.4: Wie beeinflusst das Bevorratungsverhalten der Bevölkerung die fehlende Wassermenge?

Die Vorratshaltung der Bevölkerung beeinflusst die Anzahl der durch das WVU zu versorgenden Personen (Abbildung 6.11). Unter der Annahme, dass die Einwohner zuerst auf den eigenen Vorrat zurückgreifen, bevor sie die Versorgung des WVU in Anspruch nehmen, sind durch das WVU nur maximal 36 % der Einwohner zu versorgen (b). Zudem flacht für das WVU der Verlauf des Notfalls ab. Die bereitzustellende Wassermenge ist mit Berücksichtigung der Vorratsversorgung um mehr als 55 % geringer als wenn diese nicht berücksichtigt wird bzw. kein Wasser bevorratet wird. Hierbei wird angenommen, dass das aufgezeigte Bevorratungsverhalten auf die gesamte Bevölkerung übertragbar ist und dieser Vorrat in der Bevölkerung zum Eintritt der Beeinträchtigung entsprechend vorhanden ist.

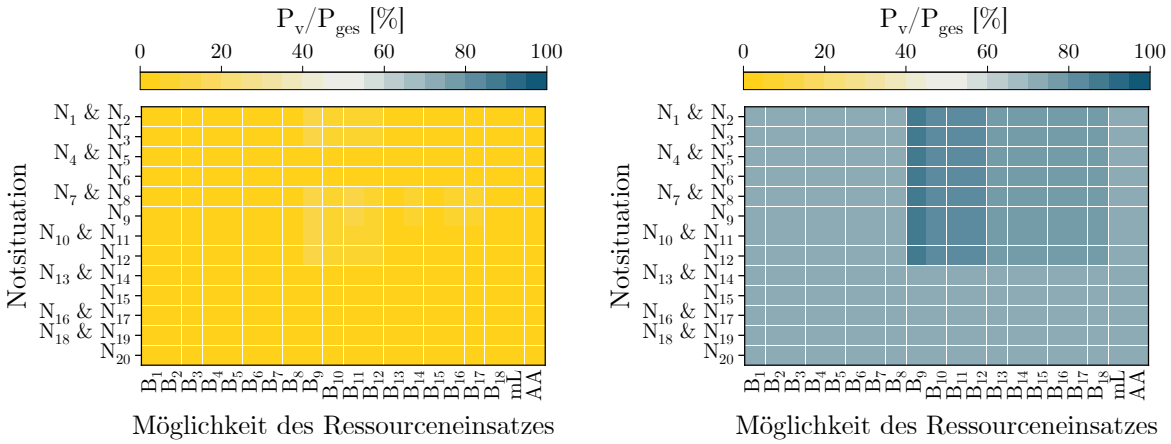


(a) keine Berücksichtigung des Vorrats in der Bevölkerung

(b) Berücksichtigung des Vorrats in der Bevölkerung

Abbildung 6.11: Anteil Personen abhängig von Art der Versorgung

Die vorhandenen Ressourcen reichen im Fallbeispiel nur für die Versorgung eines geringen Anteils der Bevölkerung (Abbildung 6.12(a)). Die Berücksichtigung der Vorratsversorgung führt in den Notsituationen N_1 bis N_{12} zu einem Versorgungsanteil von über 85 % ((b)). Da in den Notsituationen N_{13} bis N_{20}, wie in Abschnitt 6.2.1.2 aufgeführt, mit den vorhandenen Ressourcen im Fallbeispiel keine Ersatz- oder Notwasserversorgung möglich ist, ist der Anteil der versorgten Personen von 70 % allein auf die Vorratsversorgung zurückzuführen.



(a) ohne Berücksichtigung der Vorratsversorgung der Bevölkerung

(b) mit Berücksichtigung der Vorratsversorgung der Bevölkerung

Abbildung 6.12: Versorgte Personen im Verhältnis zu gesamter Bevölkerung unter Berücksichtigung der Vorratsversorgung der Bevölkerung

6.2.3 Einfluss des Notfallverlaufs auf die fehlende Wassermenge

Bei der Betrachtung des Resilienzdreiecks gemäß Ayyub (2014) und Tierney und Bruneau (2007) wird von einem linearen Verlauf des Ausfalls und der Wiederherstellung ausgegangen. Dennoch kann der zeitliche Verlauf eines Notfalls kann variieren [Attoh-Okine et al., 2009]. Zum Vergleich der unterschiedlichen Verläufe eines Ausfalls sowie der anschließenden Wiederherstellung (Abschnitt 6.2.3) werden im Folgenden die fehlenden Wassermengen

verglichen. Diese werden anhand der Fläche zwischen dem Ausfall- bzw. Wiederherstellungsverlauf und der im Normalfall bereitgestellten Wassermenge $Q_{d,m}$ ermittelt und dargestellt. Es handelt sich somit um eine Variation der Wassermenge, die zur Normalversorgung benötigt wird (Q_{bE}).

Zunächst werden hierzu die Flächen verschiedener Verläufe in einer verallgemeinerten Form verglichen. Anschließend erfolgt ein Vergleich der fehlenden Wassermenge in Abhängigkeit des Notfallverlaufs für das Fallbeispiel. Zum Abschluss werden die Auswirkungen auf die Effektivität des Ressourceneinsatzes anhand der Modellergebnisse verglichen.

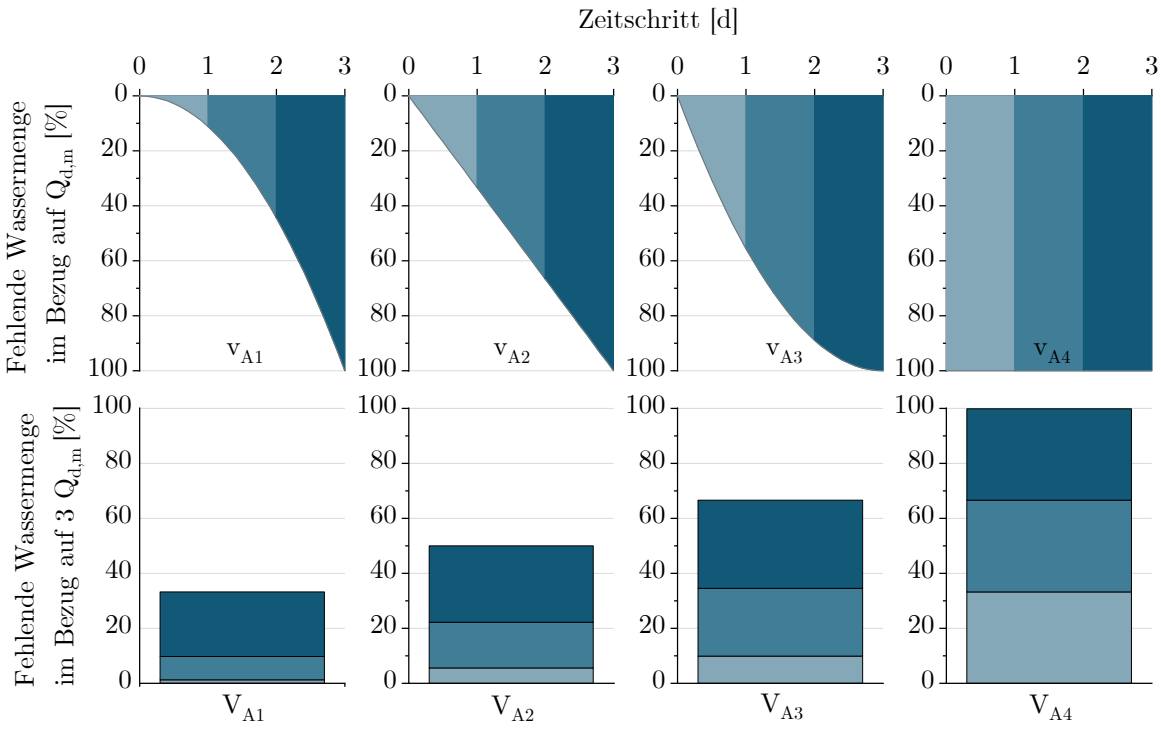
FF 2.5: Wie beeinflusst der Notfallverlauf die fehlende Wassermenge?

Der angenommene Notfall erstreckt sich über eine Dauer von 14 Tagen. Für die Phase des Ausfalls wird eine Dauer von 3 Tagen angenommen, sodass sich der prozentuale Anteil der fehlenden Wassermenge auf $3\,Q_{d,m}$ bezieht. Ab dem vierten Tag erfolgt die Wiederherstellung. Somit werden für die Betrachtung eines 14-tägigen Notfalls für die Wiederherstellung 11 Tage angenommen. Daraus resultiert der Vergleich der prozentual fehlenden Wassermenge mit 11 $Q_{d,m}$. Die möglichen Ursachen der jeweiligen Verläufe sind in Abschnitt 6.2.3 dargelegt.

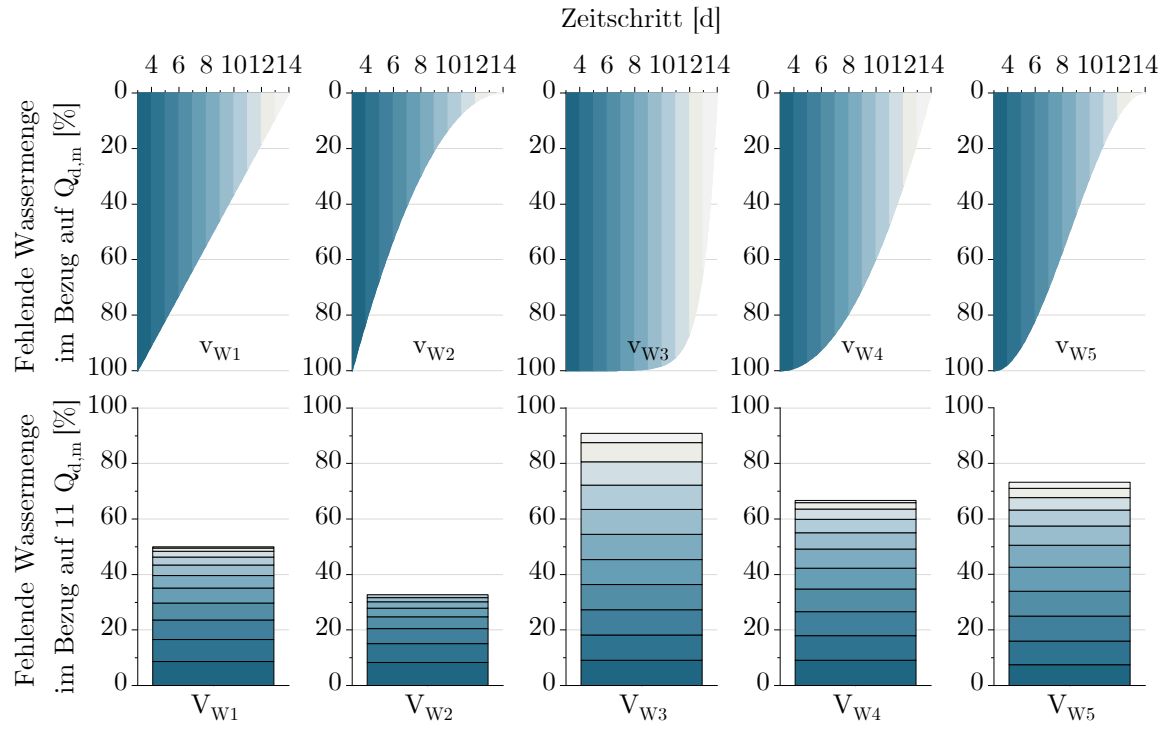
Ein linearer Verlauf (v_{A2}) des Ausfalls führt zu einer fehlenden Wassermenge in Höhe von 50 % (Abbildung 6.13(a)). Ein abrupter Ausfall der Wasserversorgung (v_{A4}) führt dahingegen zu einer 100%-igen fehlenden Wassermenge bezogen auf $Q_{d,m}$. Dieser abrupte Verlauf kann z. B. durch einen Leitungsbruch einer Hauptleitung ausgelöst werden, wenn keine Speicherkapazitäten im dahinterliegenden Netz vorhanden sind.

Im Fall eines verzögerten Ausfalls (v_{A1}) reduziert sich die fehlende Wassermenge um mehr als 60 % im Vergleich zu v_{A4} auf circa 35 %. Diese Verzögerung kann z. B. aufgrund von umgesetzten betrieblichen Maßnahmen zur Druckminderung hervorgerufen werden.

Der Verlauf der Wiederherstellung hat aufgrund seiner Dauer von 11 Tagen eine größere Bedeutung für die fehlende Wassermenge als der angenommene Verlauf des Ausfalls. Die anteilig fehlende Wassermenge variiert je nach Verlauf der Wiederherstellung. Der Verlauf v_{W2} führt zu einer prozentual fehlenden Wassermenge, die circa einem Drittel der prozentual fehlenden Wassermenge des Verlaufs v_{W3} entspricht (Abbildung 6.13(b)). Ein linearer Verlauf (v_{W1}) der Wiederherstellung führt zu einer fehlenden Wassermenge in Höhe von 50 %.



(a) Unterschiedlicher Verlauf des Ausfalls



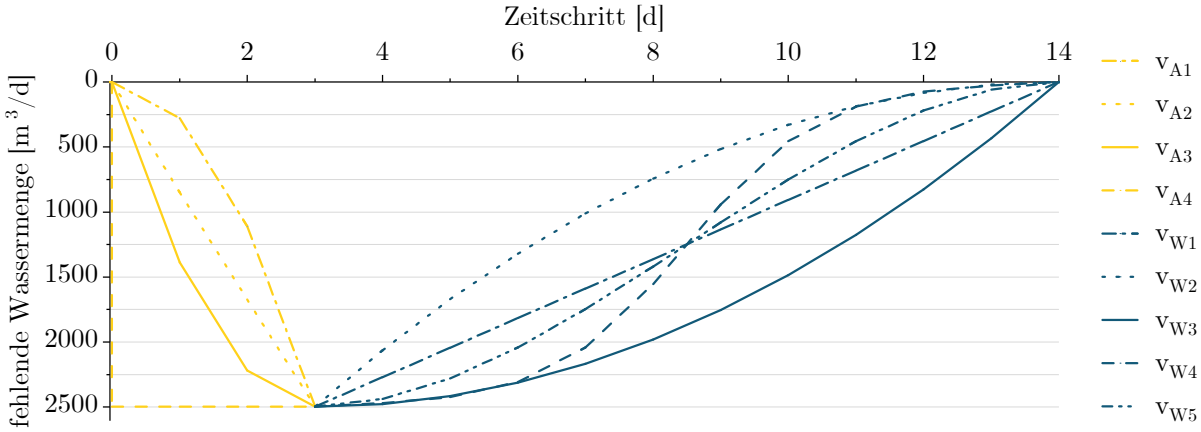
(b) Unterschiedlicher Verlauf der Wiederherstellung

Abbildung 6.13: Vergleich der fehlenden Wassermenge bei unterschiedlichen Verläufen des Notfalls v(t)

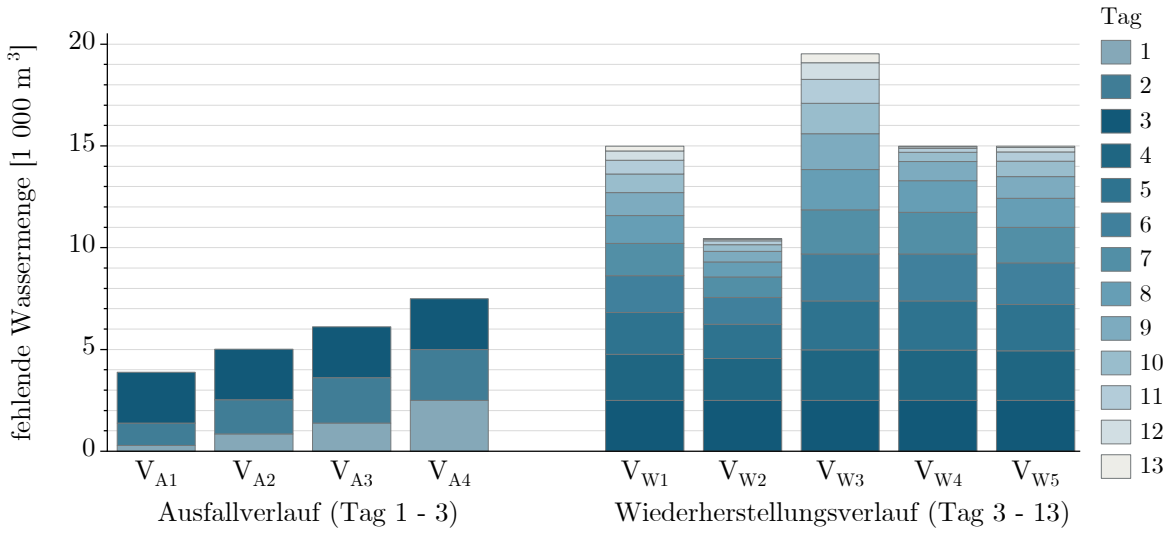
Die Auswirkungen des Notfallverlaufs auf die fehlenden Wassermenge gehen für das Fallbeispiel aus Abbildung 6.14 hervor. Der Ausfall verläuft ebenfalls über drei Tage,

sodass an Tag 3 bei allen Ausfallverläufen 100 % von $Q_{d,m}$ fehlen. Dies entspricht für das Fallbeispiel circa 2 500 m³/d (a). Ausgehend von diesem Punkt wird innerhalb von 11 Tagen der Normalzustand wiederhergestellt.

Bei einem verzögerten Ausfallverlauf (v_{A1}) entspricht die fehlende Wassermenge innerhalb von drei Tagen circa 4 000 m³, wohingegen in diesem Zeitraum bei einem abrupten Ausfall (v_{A4}) 7 500 m³ Wasser fehlen (b). Mit Bezug auf die Wiederherstellung beläuft sich die fehlende Wassermenge bei einer zügigen Wiederherstellung (v_{W2}) auf etwas mehr als 10 000 m³. Dies entspricht mit 5 000 m³ Wasser weniger der Hälfte der fehlenden Wassermenge bei einem linearen Verlauf (v_{W1}). Bei einem schleppenden Wiederherstellungsverlauf (v_{W3}) entspricht die Wassermenge in diesem Zeitraum auf 19 500 m³. Die Differenz zur fehlenden Wassermenge bei einem linearen Verlauf beläuft sich auf 4 500 m³. Es fehlen somit zusätzlich circa 30 % Wasser.



(a) Auswirkung des Notfallverlaufs die fehlende Wassermenge in Bezug auf $Q_{d,m}$



(b) Auswirkung des Notfallverlaufs auf die fehlende Wassermenge über die Dauer des Ausfalls bzw. der Wiederherstellung

Abbildung 6.14: Vergleich der fehlenden Wassermenge bei unterschiedlichen Verläufen des Notfalls für das Fallbeispiel

Die Untersuchungen der Auswirkungen verschiedener Ausfall- und Wiederherstellungsverläufe auf die Effektivität des Ressourceneinsatzes beziehen sich im Folgenden exemplarisch auf die Erfüllung des quantitativen Schutzziels der systemabhängigen Mindestwassermenge (Abbildung 6.15). Die Betrachtung der Auswirkungen erfolgt erneut getrennt für die verschiedenen Verläufe des Ausfalls und der Wiederherstellung.

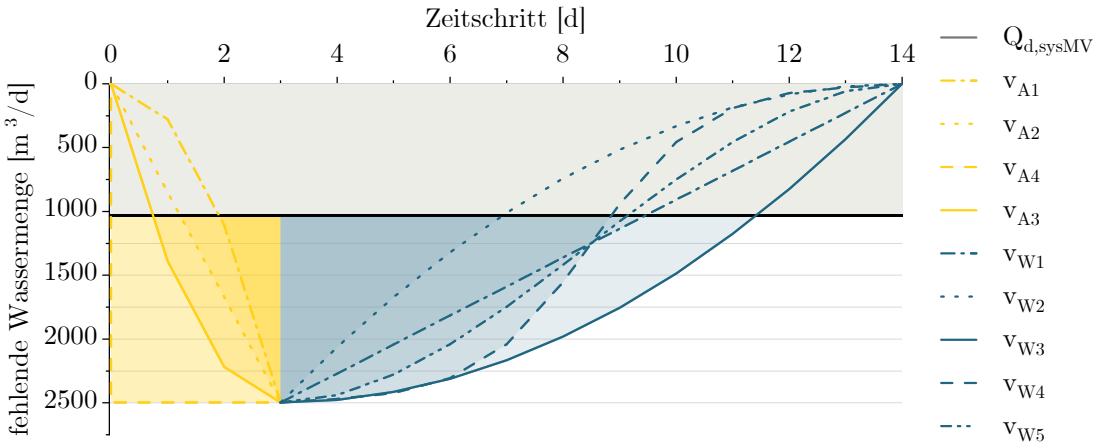
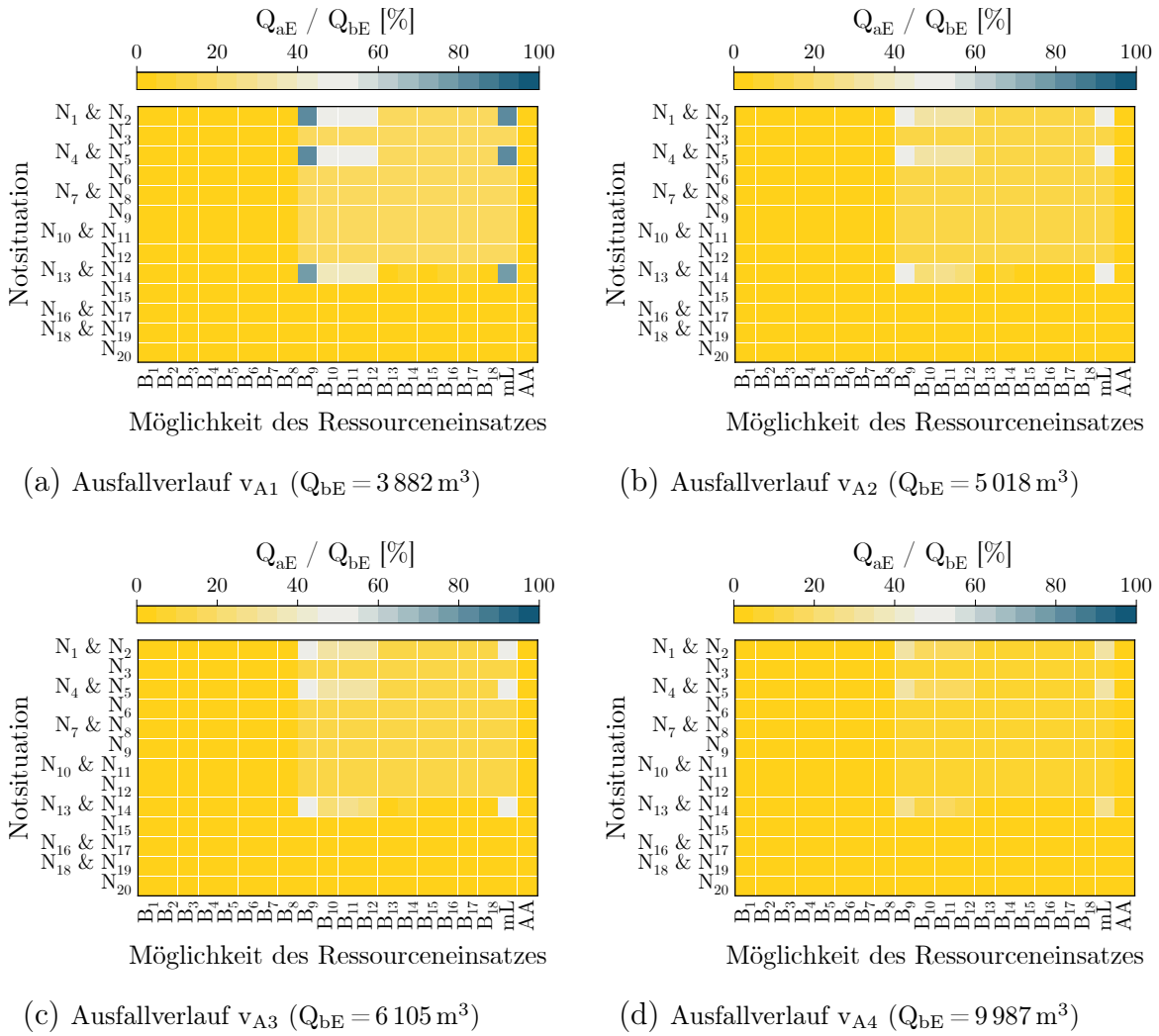


Abbildung 6.15: Berücksichtigtes quantitatives Schutzziel bei Vergleich der Auswirkungen der variierenden Ausfall- und Wiederherstellungsverläufe

Die zur Normalversorgung benötigte bzw. fehlende Wassermenge beeinflusst die Effektivität des Ressourceneinsatzes. Da diese Wassermenge bei einem verzögerten Ausfallverlauf (v_{A1}) um circa 40 % geringer ist als bei einem abrupten Ausfall (v_{A4}), ist der Ressourceneinsatz hier effektiver. Mit den betrachteten Ressourcen können somit bei einem verzögerten Ausfall rund 80 % der zur Normalversorgung benötigten Wassermenge (Q_{bE}) bereitgestellt werden (Abbildung 6.16(a)). Bei einem abrupten Ausfall reduziert sich dieser Anteil auf circa 30 % (d).

Die zur Normalversorgung benötigte Wassermenge liegt bei den betrachteten Wiederherstellungsverläufen zwischen circa 10 500 und 19 500 m^3 Wasser. Aus diesen Unterschieden ergibt sich eine variierende Effektivität des Ressourceneinsatzes. Der Anteil der abgegebenen zur benötigten Wassermenge entspricht bei einer zügigen Wiederherstellung (v_{W2}) circa 90 % (Abbildung 6.17(b)), wohingegen dieser Anteil bei einer schleppenden Wiederherstellung (v_{W3}) sich auf 48 % fast halbiert (c).



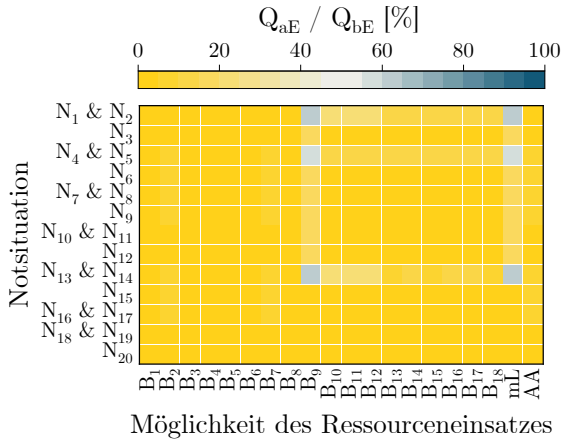
(a) Ausfallverlauf v_{A1} ($Q_{bE} = 3\,882\,m^3$)

(b) Ausfallverlauf v_{A2} ($Q_{bE} = 5\,018\,m^3$)

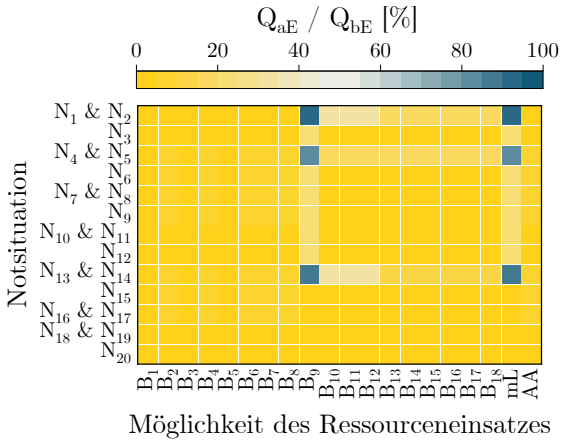
(c) Ausfallverlauf v_{A3} ($Q_{bE} = 6\,105\,m^3$)

(d) Ausfallverlauf v_{A4} ($Q_{bE} = 9\,987\,m^3$)

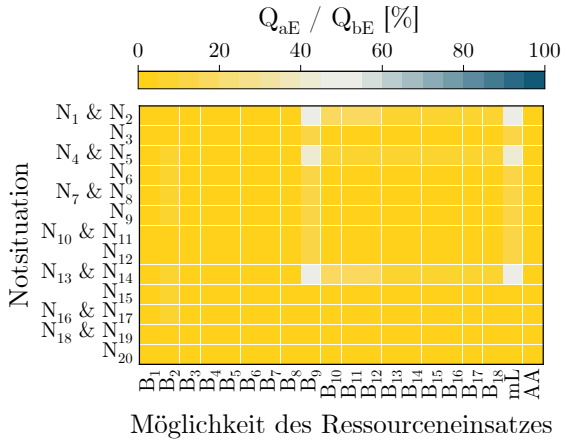
Abbildung 6.16: Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge bei variierendem Ausfallverlauf



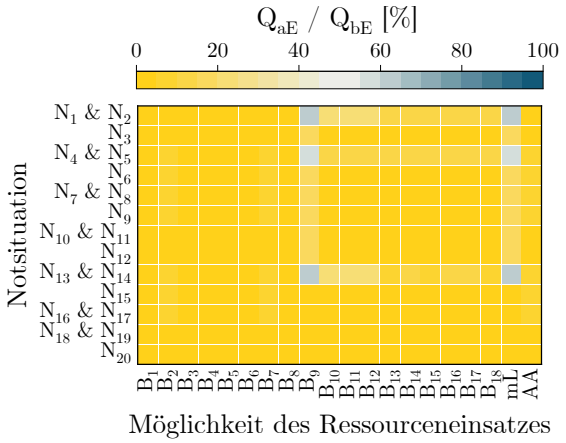
(a) Ausfallverlauf v_{w1} ($Q_{bE} = 14\,982\,m^3$)



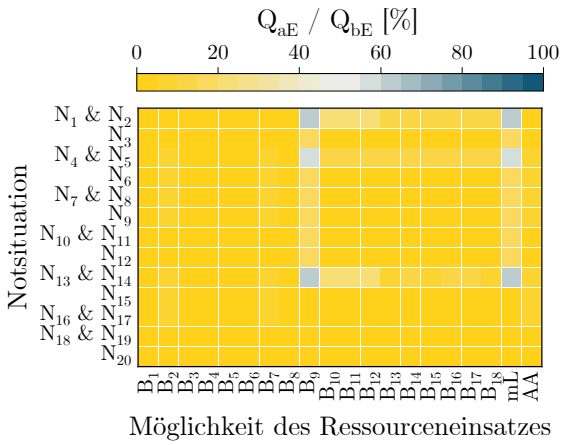
(b) Ausfallverlauf v_{w2} ($Q_{bE} = 10\,441\,m^3$)



(c) Ausfallverlauf v_{w3} ($Q_{bE} = 19\,521\,m^3$)



(d) Ausfallverlauf v_{w4} ($Q_{bE} = 14\,981\,m^3$)



(e) Ausfallverlauf v_{w5} ($Q_{bE} = 14\,981\,m^3$)

Abbildung 6.17: Abgegebene im Verhältnis zu benötigter Wassermenge bei variierendem Wiederherstellungsverlauf

6.3 Anwendung des Notfallvorsorgeplanungsindikators zur Ermittlung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung

Die Forschungsfrage 3.1 wurde durch die Identifizierung des repräsentativen Indikatorensatzes in Abschnitt 5.3.2 beantwortet. Dieser bildet die Basis zur Beleuchtung der weiteren Forschungsfragen.

FF 3.2: Wie kann der Status quo der Notfallvorsorgeplanung quantitativ erfasst werden?

Der hier entwickelte Notfallvorsorgeplanungsindikator dient der quantitativen Erfassung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung und somit der Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen. Bei der Entwicklung des Indikatorensystems wurden zwei Gewichtungsansätze berücksichtigt um die Auswirkungen der Gewichtung auf das Indikatorenergebnis untersuchen zu können. Die Ergebnisse der beiden Gewichtungsansätze werden zunächst in Abschnitt 6.3.1 aufgezeigt. Anschließend werden die Differenzen der beiden Notfallvorsorgeplanungsindikatoren mit unterschiedlicher Gewichtung für das Fallbeispiel dargelegt und anhand dessen die Anwendbarkeit und Aussagekraft des Indikatorensystems überprüft (Abschnitt 6.3.2). Zur Beantwortung der Forschungsfrage bzgl. des Status quo der Notfallvorsorgeplanung in Deutschland werden die Indikatoren anhand eines deutschlandweiten Datensatzes aus dem Forschungsprojekt NoWa I ermittelt (Abschnitt 6.3.3.1 und 6.3.3.2).

6.3.1 Ermittlung der Gewichtung der Haupt- und Teilindikatoren

Die Notfallvorsorgeplanung umfasst die fünf Prozessschritte Vorplanung, Risikoanalyse, vorbeugende Maßnahmen, Krisenmanagement sowie Evaluierung. Bei einer Gleichverteilung entspricht die Gewichtung der fünf Prozessschritte je 20 % bzw. $x_j = 0{,}2$. Die Gewichte, die nach Expertenmeinungen die Relevanz der Prozessschritte wiedergibt, liegen zwischen 17 und 22 % (Abbildung 6.18). Der Mittelwert der expertenbasierten Gewichtung des Prozessschritts *Vorplanung* ist mit 0,22 der höchste Wert und der Mittelwert der expertenbasierten Gewichtung des Prozessschritts *Evaluation* mit 0,17 der niedrigste Wert der fünf Gewichtungen. Die Expertenmeinung bzgl. der Gewichtung des Prozessschritts *Evaluation* variiert bei den betrachteten Prozessschritte am Stärksten. Dies zeigt sich durch die Differenz des 25 und 75 Perzentils (Größe der Box). Der Prozessschritt *Vorplanung* hat nach Meinung der Experten eine höhere Gewichtung als bei der gleich verteilten Gewichtung. Die Prozessschritte *Risikoanalyse* und *Evaluation* sind jeweils geringer gewichtet als bei der gleich verteilten Gewichtung. Der Unterschied der Mittelwerte der expertenbasierten Gewichtungen ist statistisch signifikant ($p < 0{,}05$).

Für den Prozessschritt *Risikoanalyse* wurden vier Teilindikatoren identifiziert. Hieraus resultiert bei einer Gleichverteilung der Gewichtung für die vier Teilindikatoren je eine

Gewichtung von 25 % bzw. $z_i = 0{,}25$. Die auf der Expertenmeinung basierenden Gewichtungsfaktoren für die Teilindikatoren des Prozessschritts *Risikoanalyse* sind in der Abbildung 6.19 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die vier Gewichtungsfaktoren z_i durch die Expertenmeinung nicht gleich verteilt sind und somit mindestens teilweise von einer Gewichtung mit $z_i = 0{,}25$ verschieden sind. Die Mittelwerte der expertenbasierten Gewichtung variieren zwischen 0,26 (*Vulnerabilitätsanalyse*) und 0,24 (*Risikovergleich und -bewertung*). Der Unterschied der Mittelwerte ist jedoch nicht statistisch signifikant ($p \gg 0{,}05$).

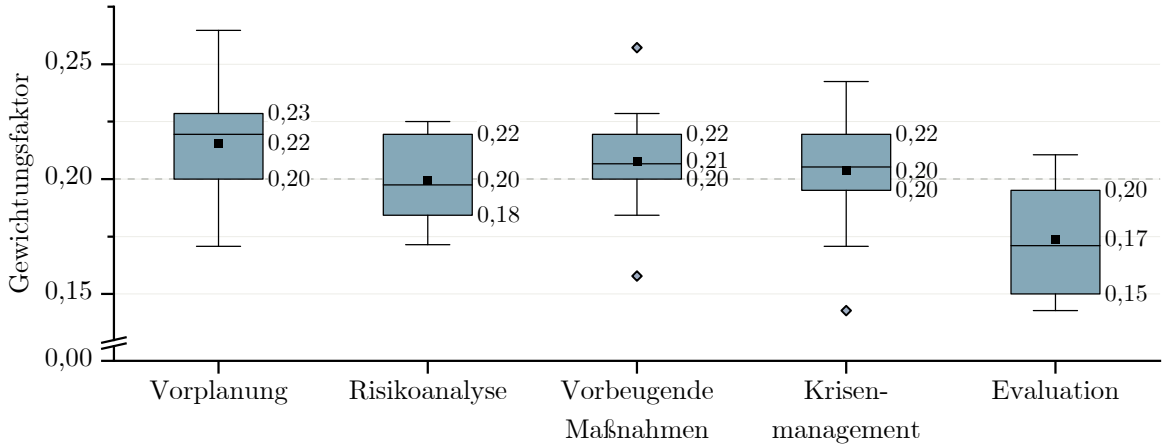


Abbildung 6.18: Gewichtung der fünf Phasen der Notfallvorsorgeplanung durch die Experten ($n = 14$) [Bross, Wienand et al., 2020a]

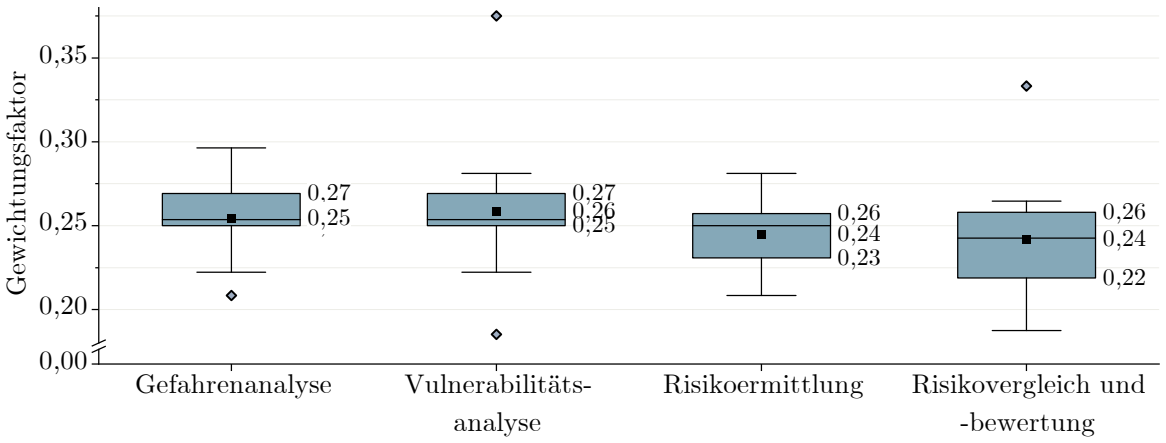


Abbildung 6.19: Gewichtung für Schritte der Risikoanalyse nach Meinung der Experten ($n = 14$)

Der Prozessschritt *Vorbeugende Maßnahmen* wird durch fünf Teilindikatoren abgebildet. Bei einer gleich verteilten Gewichtung ergibt sich für jeden Teilindikator der vorbeugenden Maßnahmen somit eine Gewichtung von 20 % bzw. $z_i = 0{,}2$. Nach Meinung der Experten sind Maßnahmen aus dem Bereich Redundanz in der Gewinnung bzw. Speicherung sowie aus dem Bereich des Leitungsbaus und Maßnahmen im Verteilungssystems wie z. B. Netzausbau oder Vermaschungen mit $z_i = 0{,}21$ etwas höher gewichtet als die Maßnahmen

zur Umsetzung von Lieferverflechtungen mit anderen Versorgern oder allgemeinen Maßnahmen wie z. B. Instandhaltung oder Objektschutz. Die Abbildung 6.20 zeigt, dass nach Meinung der Experten Maßnahmen aus dem Bereich Fernüberwachung und Leitsysteme die geringste Bedeutung in der Phase der vorbeugenden Maßnahmen zukommt und diese somit mit einem Mittelwert von $z_i = 0{,}18$ die geringste Teilindikatorengewichtung für den Hauptindikator vorbeugende Maßnahmen haben. Der Unterschied der Mittelwerte der expertenbasierten Gewichtungen ist statistisch nicht signifikant ($p \gg 0{,}05$).

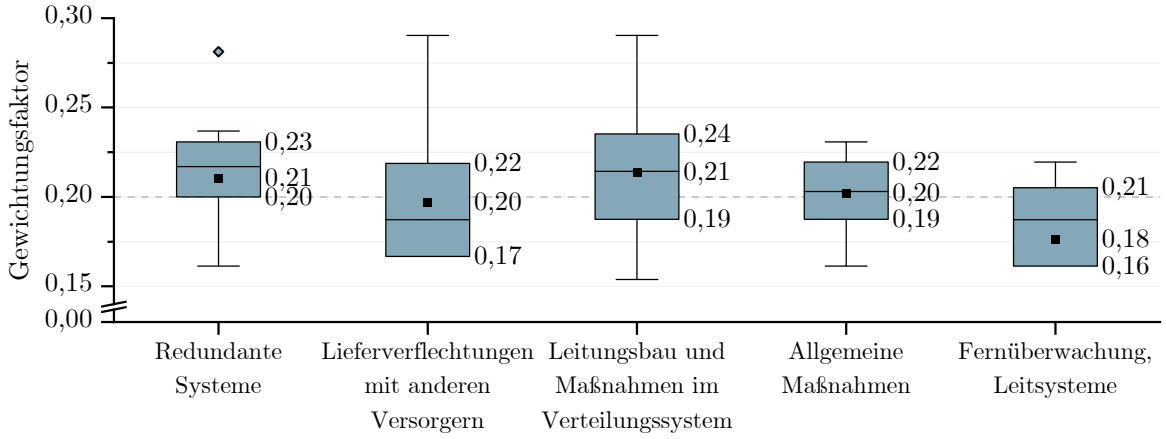


Abbildung 6.20: Gewichtung der Bereiche der vorbeugenden Maßnahmen nach Meinung der Experten (n = 14)

Der Prozessschritt *Krisenmanagement* umfasst vier Teilindikatoren. Die Gewichtung der vier Teilindikatoren bei einer gleich verteilten Gewichtung entspricht somit $z_i = 0{,}25$. Die auf der Expertenmeinung basierten Gewichtungsfaktoren für die Teilindikatoren des Prozessschritts *Krisenmanagement* ergeben sich wie in der Abbildung 6.21 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die vier Teilindikatoren nach Meinung der Experten mit einer Gewichtung zwischen $z_i = 0{,}24$ (*Simulation und Übung*) und $z_i = 0{,}27$ (*Organisation und Koordination*) in den Hauptindikator einfließen. Der Unterschied der Mittelwerte der expertenbasierten Gewichtungen ist statistisch signifikant ($p<0{,}05$).

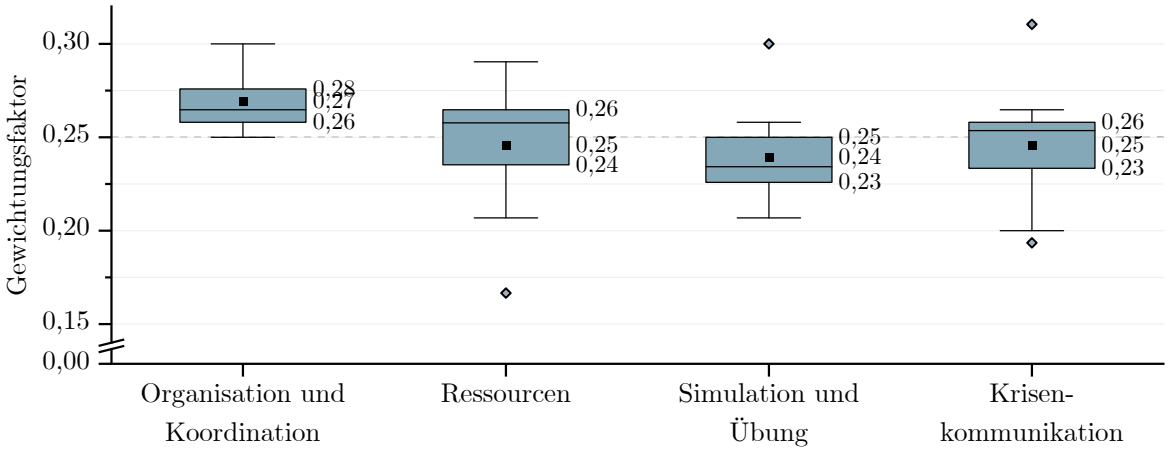
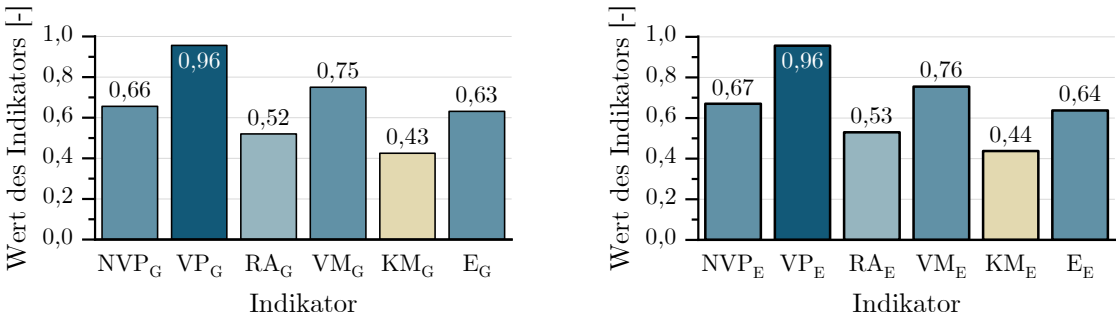


Abbildung 6.21: Gewichtung der Bereiche des Krisenmanagements nach Meinung der Experten (n = 14)

6.3.2 Überprüfung der Anwendbarkeit und Aussagekraft des Notfallvorsorgeplanungsindikators anhand des Fallbeispiels

Zur Ermittlung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung wurde aus den in Abschnitt 5.3.2 aufgeführten Indikatoren ein Erhebungsbogen erstellt. Dieser wurde durch das WVU und die zuständige Katastrophenschutzbehörde aus dem Fallbeispiel ausgefüllt und die Daten ausgewertet.

Für das Fallbeispiel ergibt sich ein NVP_G in Höhe von 0,66 und ein NVP_E in Höhe von 0,67 (Abbildung 6.22). Der Hauptindikator VP entspricht mit einem Wert von 0,96 dem höchsten Ergebnis der fünf Hauptindikatoren. Der niedrigste Wert wird bei dem Hauptindikator KM mit 0,43 bzw. 0,44 erzielt. Dies bedeutet, dass im Bereich der Vorplanung nahezu alle Aspekte im Unternehmen und Landkreis implementiert wurden, im Bereich des vorbeugenden Krisenmanagements jedoch noch Aspekte nicht praktiziert werden.



(a) Gleichverteilte Gewichtung der Haupt- und Teilindikatoren

(b) Expertenbasierte Gewichtung der Haupt- und Teilindikatoren

Abbildung 6.22: Ergebnisse des NVP und der Hauptindikatoren für das Fallbeispiel anhand der unterschiedlichen Gewichtung [Bross, Wienand et al., 2020a]

Die hier entwickelte Methodik zur Erfassung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung ist in der Praxis anwendbar. Durch den Erhebungsbogen werden die relevanten Aspekte zur Beurteilung des Status quo und zur Ableitung von Handlungsbedarf erfasst. Die quantitativen Ergebnisse ermöglichen zudem den Vergleich zwischen Kommunen sowie die Priorisierung von geplanten Maßnahmen zur Adressierung des Handlungsbedarfs.

6.3.3 Status quo der Notfallvorsorgeplanung

Der Status quo wird anhand eines Datensatzes ermittelt, der im Rahmen des Forschungsprojekts NoWa I erhoben wurde. Im Folgenden wird diese Datengrundlage charakterisiert (Abschnitt 6.3.3.1) und anschließend die Ergebnisse dargestellt (Abschnitt 6.3.3.2).

6.3.3.1 Datengrundlage für die Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung

Zur Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung wurden insgesamt 360 Datensätze analysiert und ausgewertet. Diese umfassen 194 Datensätze aus

Landkreisen oder kreisfreien Städten sowie 166 Datensätze auf Gemeindeebene. Die Datensätze der Landkreise und kreisfreien Städte wurden getrennt von den Datensätzen auf Gemeindeebene ausgewertet, um die Wahrnehmung der unterschiedlichen Verantwortlichkeiten zu untersuchen. Die Datensätze sind jeweils nach der Anzahl der erfassten Einwohner in vier Gruppen mit annähernd gleicher Größe unterteilt. Hiermit wird untersucht ob Unterschiede bzgl. des Vorbereitungsstands anhand der Größe der Kommune zu erkennen sind.

Auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte ergibt sich eine Einteilung der Datensätze, wie sie in der Tabelle 6.8 aufgeführt ist. Von den betrachteten 194 Datensätzen repräsentieren etwa ein Viertel Landkreise und kreisfreie Städte mit weniger als 100 000 Einwohnern. Ebenso etwa ein Viertel der betrachteten Datensätze stammt aus Landkreisen und kreisfreien Städten mit mehr als 250 000 Einwohnern. Das auf den Erhebungsbögen verzeichnete Aufgabengebiet der Absender ist ebenfalls in der Tabelle 6.8 dargestellt. Unter dem Begriff Verwaltung werden Absender aus den Landratsämtern, Gemeinde-, Stadt- und Kreisverwaltungen, Tiefbauämtern und Verwaltungsgemeinschaften zusammengefasst, für die eine Zuordnung zu den oben genannten Aufgabengebieten nicht möglich war. Die Hälfte der Erhebungsbögen wurde auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte durch Funktionsträger aus dem Bereich des Brand- und Katastrophenschutzes, die im Rahmen einer Notfallvorsorgeplanung wichtige Akteure darstellen, ausgefüllt. Zudem wurden 12 % der Erhebungsbögen von mehreren Absendern bearbeitet (z. B. WVU und Katastrophenschutzbehörde).

Tabelle 6.8: Größe der Gemeinden und kreiszugehörigen Städte bzw. Landkreise und kreisfreien Städte sowie Tätigkeitsbereich der Absender der Erhebungsbögen

Einwohner	Anteil der Erhebungsbögen					
	WVU	Verwaltung	Katastrophen-schutz	Gesund-heitsamt	mehrere Absender	Zeilen-summe
Gemeinden und kreiszugehörige Städte (n=166)						
bis 3 000	7 %	20 %	0 %	0 %	0 %	27 %
3 000 bis 5 000	4 %	16 %	0 %	0 %	0 %	20 %
5 000 bis 10 000	11 %	14 %	0 %	0 %	0 %	25 %
mehr als 10 000	19 %	3 %	0 %	3 %	3 %	28 %
Spaltensumme	41 %	53 %	3 %	0 %	3 %	100 %
Landkreise und kreisfreie Städte (n=194)						
bis 100 000	0 %	6 %	10 %	3 %	4 %	23 %
100 000 bis 150 000	0 %	7 %	12 %	4 %	2 %	25 %
150 000 bis 250 000	2 %	5 %	18 %	1 %	4 %	30 %
mehr als 250 000	2 %	1 %	11 %	6 %	2 %	22 %
Spaltensumme	4 %	19 %	51 %	14 %	12 %	100 %

Etwa 30 % der Datensätze stammen aus Städten und Gemeinden, die mehr als 10 000 Einwohner haben, jedoch nicht den Status einer kreisfreien Stadt haben (Tabelle 6.8). Cir-

ca 70 % der Datensätze repräsentieren kleine Gemeinden und Städte mit weniger als 10 000 Einwohnern. Die Absender der Erhebungsbögen, welche auf Ebene der Gemeinden und Städte bearbeitet wurden, arbeiten primär für die Wasserversorgungsunternehmen (41 %) sowie im Bereich der Stadtverwaltung (3 %). Auf Ebene der Gemeinden und kreiszugehörigen Städte wurde kein Erhebungsbogen aus dem Gesundheitsamt übermittelt, da Gesundheitsämter (sowie der Katastrophenschutz) in der Regel auf behördlicher Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte angeordnet sind. Datensätze die durch Personen aus dem Bereich des Katastrophenschutzes zugeordnet wurden, entsprechen einem Sonderfall oder das Ausfüllen wurde an den Landkreis übergeben.

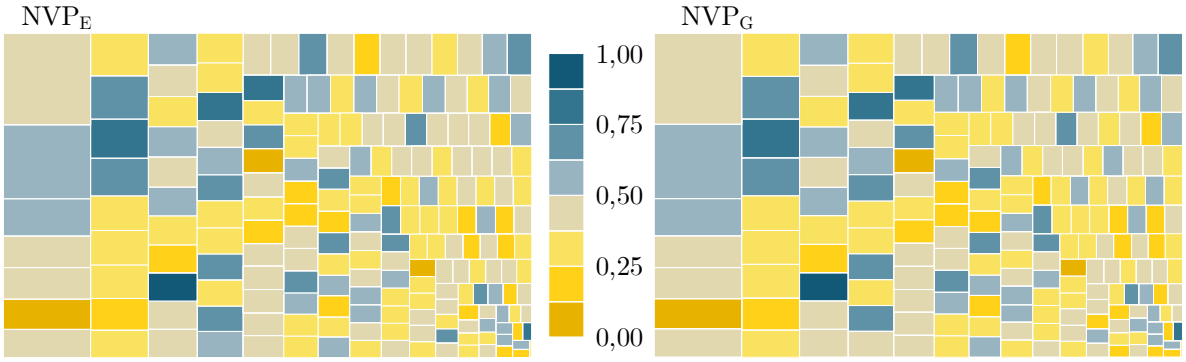
6.3.3.2 Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung in Deutschland

Zur Ermittlung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung der Landkreise und kreisfreien Städte sowie der Gemeinden und kreiszugehörigen Städten wurden der Verbundindikator NVP und die Hauptindikatoren VP, RA, VM, KM und E auf Basis der dargestellten Datensätze ermittelt. Hierzu werden im Folgenden die Ergebnisse der Notfallvorsorgeplanungsindikatoren mit Gewichtung nach Expertenmeinung (NVP_E) und mit einer gleich verteilten Gewichtung (NVP_G) sowie der Teilindikatoren dargelegt.

FF 3.3: Wie ist der Status quo der Notfallvorsorge in der Wasserversorgung in Deutschland zu beurteilen und wo besteht Handlungsbedarf?

Die Ergebnisse des NVP_E und NVP_G variieren für die Landkreise und kreisfreien Städte in wenigen Fällen (Abbildung 6.23). Der Mittelwert des NVP_E sowie des NVP_G ist gleich 0,42 (Tabelle 6.9). Die geringen Unterschiede in der Gewichtung zeigen nur einen geringen Effekt im Ergebnis. Diese Unterschiede sind zudem statistisch nicht signifikant ($p \gg 0{,}05$).

Die teilnehmenden Landkreise und kreisfreien Städte weisen einen unterschiedlichen Vorbereitungsstand auf. Landkreise und kreisfreie Städte mit mehr Einwohnern erzielen einen höheren NVP (Abbildung 6.24). Die Spannweite des NVP nimmt mit zunehmender Einwohnerzahl zu, sodass bei den größten Landkreisen und kreisfreien Städte der Unterschied im Stand der Notfallvorsorgeplanung innerhalb einer Größengruppe am größten ist. Die Unterschiede der Mittelwerte nach Größe der Landkreise und kreisfreien Städte sind in beiden Fällen signifikant ($p < 0{,}05$).

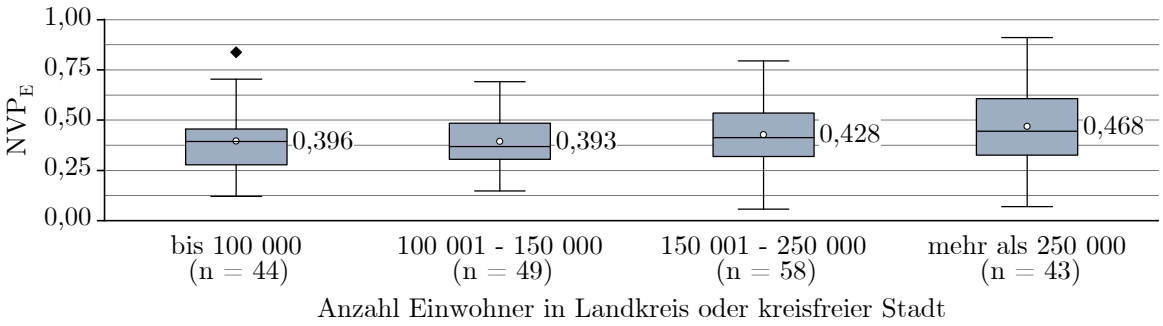


(a) Expertenbasierte Gewichtung (b) Gleichgewichtete Gewichtung

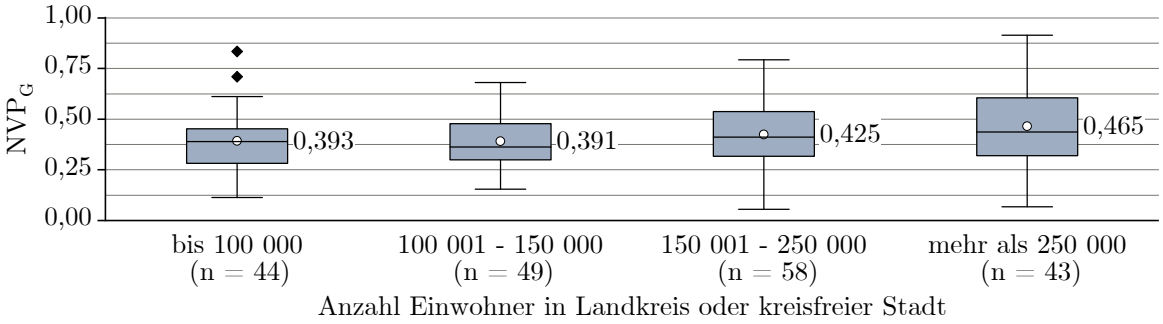
Abbildung 6.23: Notfallvorsorgeplanungsindikator nach Größe der Landkreise und kreisfreien Städte [Bross, Wienand et al., 2020a]

Tabelle 6.9: Ergebnisse des Notfallvorsorgeplanungsindikator mit expertenbasierter und gleichverteilter Gewichtung sowie der Hauptindikatoren der fünf Schritte [Bross, Wienand et al., 2020a]

		Mittelwert des Indikators	
	Indikator	Landkreise und kreisfreie Städte	Gemeinden und kreiszugehörige Städte
NVP	NVP$_E$	0,42	0,32
	NVP$_G$	0,42	0,32
Hauptindikator	VP	0,43	0,30
	RA	0,16	0,14
	VM	0,57	0,39
	KM	0,55	0,43
	E	0,38	0,31



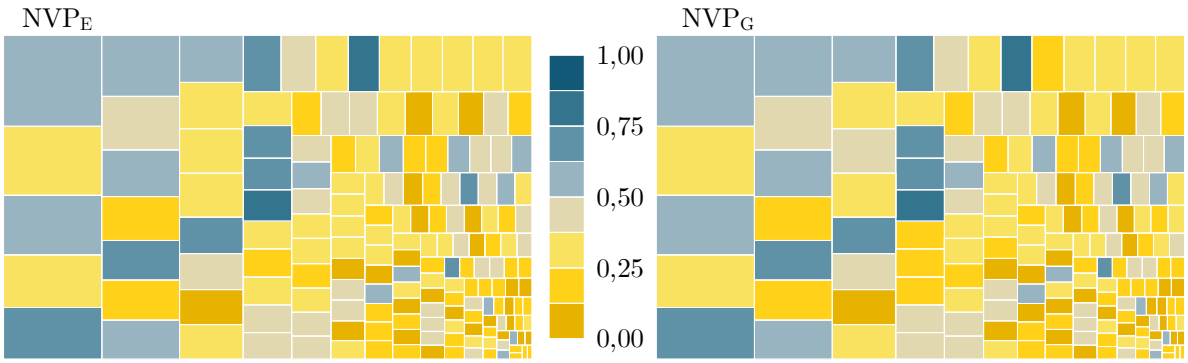
(a) Expertenbasierte Gewichtung der Hauptindikatoren



(b) Gleichverteilte Gewichtung der Hauptindikatoren

Abbildung 6.24: Notfallvorsorgeplanungsindikator nach Größe der Landkreise oder kreisfreien Städte [Bross, Wienand et al., 2020a]

Die Mittelwerte des NVP_E und NVP_G liegen für die betrachteten Gemeinden und kreiszugehörigen Städte bei 0,32. In einigen Gemeinden und kreiszugehörigen Städten wurden somit bereits gewisse Aspekte der Notfallvorsorgeplanung umgesetzt. Diese Umsetzungen stehen jedoch insgesamt noch am Anfang. Unterschiede zwischen dem NVP_E und NVP_G sind nur in wenigen Fällen zu erkennen (Abbildung 6.25), weisen jedoch keine statistische Signifikanz auf ($p \gg 0{,}05$).

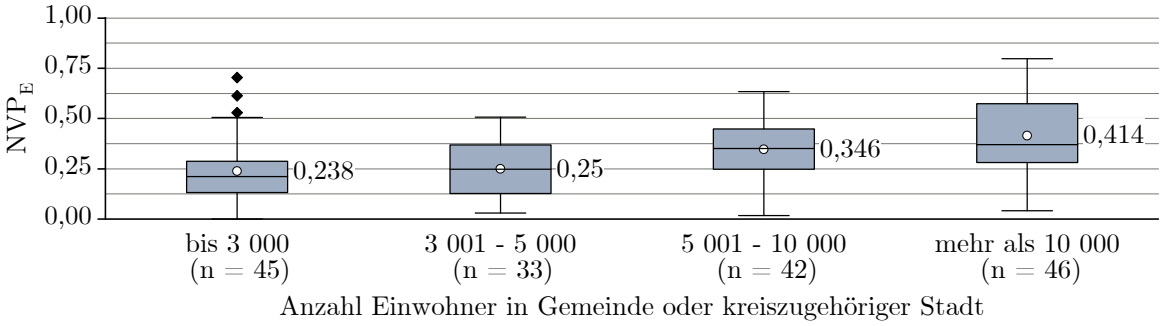


(a) Expertenbasierte Gewichtung (b) Gleichgewichtete Gewichtung

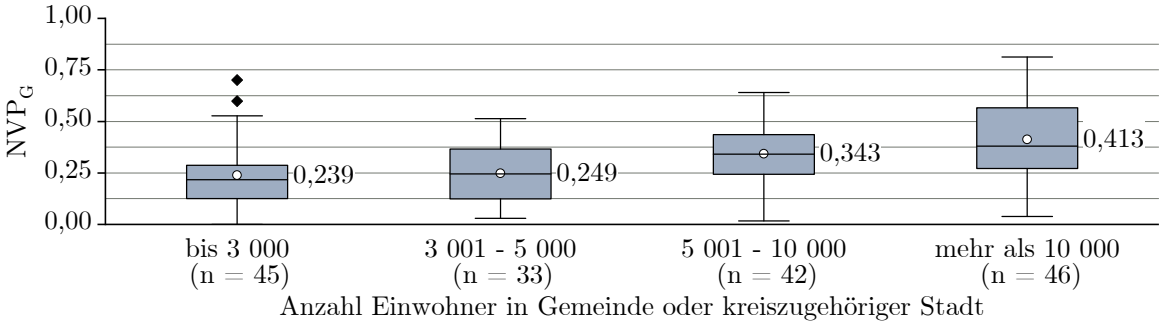
Abbildung 6.25: Notfallvorsorgeplanungsindikator nach Größe der Gemeinden [Bross, Wienand et al., 2020a]

Gemeinden mit zunehmender Einwohnerzahl erzielen höhere Ergebnisse im NVP_E sowie im NVP_G (Abbildung 6.26). Die Unterschiede der Mittelwerte nach Anzahl der Einwohner

sind signifikant ($p < 0{,}05$). Die Spannweite des NVP_E nimmt jedoch nicht mit zunehmender Einwohnerzahl in der Gemeinde zu, wie dies auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte zu erkennen ist.



(a) Expertenbasierte Gewichtung der Hauptindikatoren



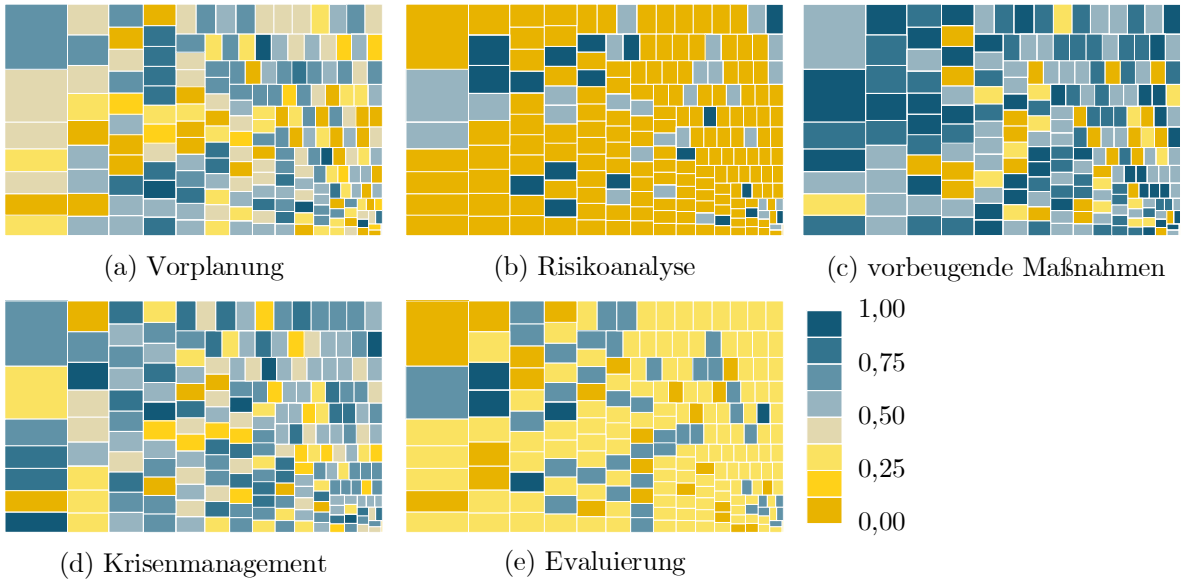
(b) Gleichverteilte Gewichtung der Hauptindikatoren

Abbildung 6.26: Notfallvorsorgeplanungsindikator nach Größe der Gemeinden oder kreiszugehörigen Städte [Bross, Wienand et al., 2020a]

Das Ergebnis der fünf Hauptindikatoren mit gleichverteilter Gewichtung variiert für die betrachteten Landkreise und kreisfreien Städte (Abbildung 6.27). Es erfolgte keine Betrachtung der unterschiedlichen Gewichtungen auf Ebene der Teilindikatoren, da die analysierten Datensätze nicht alle Teilindikatoren umfassten (Abschnitt 5.3.4).

Die Ergebnisse der Hauptindikatoren *vorbeugende Maßnahmen* und *Krisenmanagement* liegen höher als die anderen Hauptindikatoren (Tabelle 6.9). Die Analyse des Hauptindikators *Risikoanalyse* zeigt das niedrigste Ergebnis und macht deutlich, dass dieser Prozessschritt wenig oder unzureichend praktiziert wird.

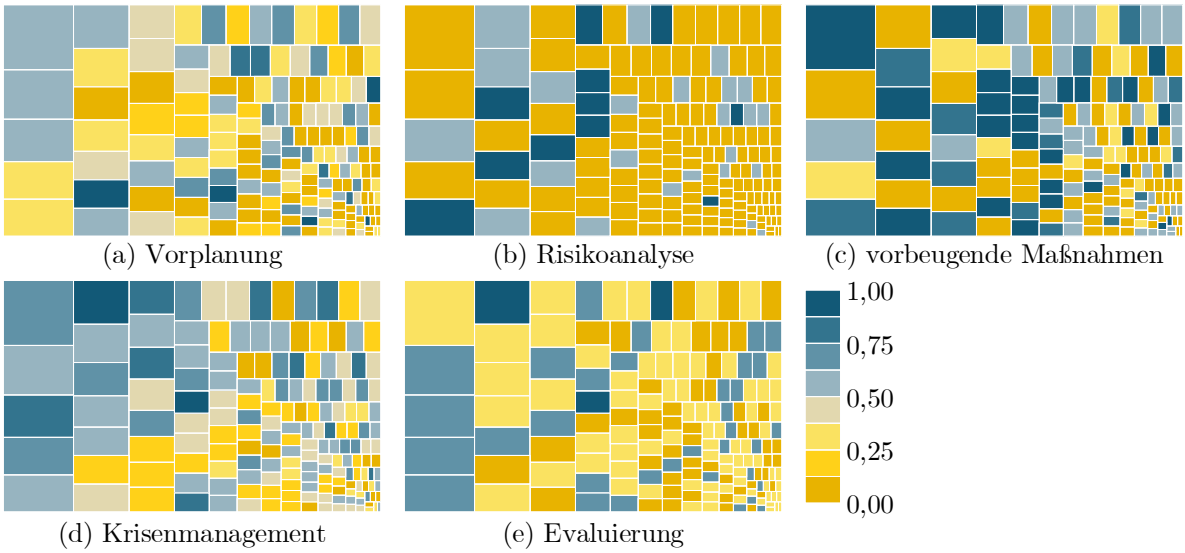
Die Ergebnisse der fünf Hauptindikatoren variieren ebenfalls stark in den Gemeinden und kreiszugehörigen Städten (Abbildung 6.28). Der Hauptindikator *Risikoanalyse* weist mit einem Wert von 0,14 das niedrigste Ergebnis auf. Die Ergebnisse der anderen vier Hauptindikatoren liegen zwischen 0,30 und 0,43. Die Mittelwerte der Hauptindikatoren sind niedriger als die Mittelwerte der Landkreise und kreisfreien Städte (Tabelle 6.9).



(a) Vorplanung (b) Risikoanalyse (c) vorbeugende Maßnahmen

(d) Krisenmanagement (e) Evaluierung

Abbildung 6.27: Hauptindikatoren nach Größe der Landkreise und kreisfreien Städte [Bross, Wienand et al., 2020b]



(a) Vorplanung (b) Risikoanalyse (c) vorbeugende Maßnahmen

(d) Krisenmanagement (e) Evaluierung

Abbildung 6.28: Hauptindikatoren nach Größe der Gemeinden und kreiszugehörigen Städte [Bross, Wienand et al., 2020b]

7 Diskussion

Die Erkenntnisse der vorliegenden Dissertation werden in diesem siebten Kapitel diskutiert. Es untergliedert sich hierzu in vier Abschnitte. In Abschnitt 7.1 werden die Ergebnisse der Identifikation von geeigneten Versorgungsarten der Ersatz- und Notwasserversorgung diskutiert. Hierbei werden diese den Grundlagen der Ersatz- und Notwasserversorgung gegenübergestellt. Die Diskussion der Ergebnisse des System Dynamics Modells zur Bewertung und Steuerung des Umgangs mit begrenzten Ressourcen erfolgt in Abschnitt 7.2. Dafür werden der Einfluss des Bevorratungsverhaltens der Bevölkerung und des Notfallverlaufs auf die fehlende Wassermenge erörtert und die Effektivität des Ressourceneinsatzes und der Versorgungsarten interpretiert. Abschnitt 7.3 umfasst die Diskussion der Ergebnisse des Indikatorensystems zur Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung. Diesbezüglich werden die Anwendbarkeit des Indikatorensystems anhand des betrachteten Fallbeispiels und der Status quo der Notfallvorsorgeplanung in Deutschland erörtert. Abschließend widmet sich Abschnitt 7.4 der Diskussion des hier entwickelten Verfahrens zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen. Dazu wird dieses Verfahren den in Abschnitt 2.3 erläuterten Verfahren gegenübergestellt. Alle Abschnitte diskutieren zum einen die angewandte Methodik und zum anderen die gewonnen Erkenntnisse sowie deren Relevanz zur Beantwortung der Forschungsfragen (Abbildung 7.1).

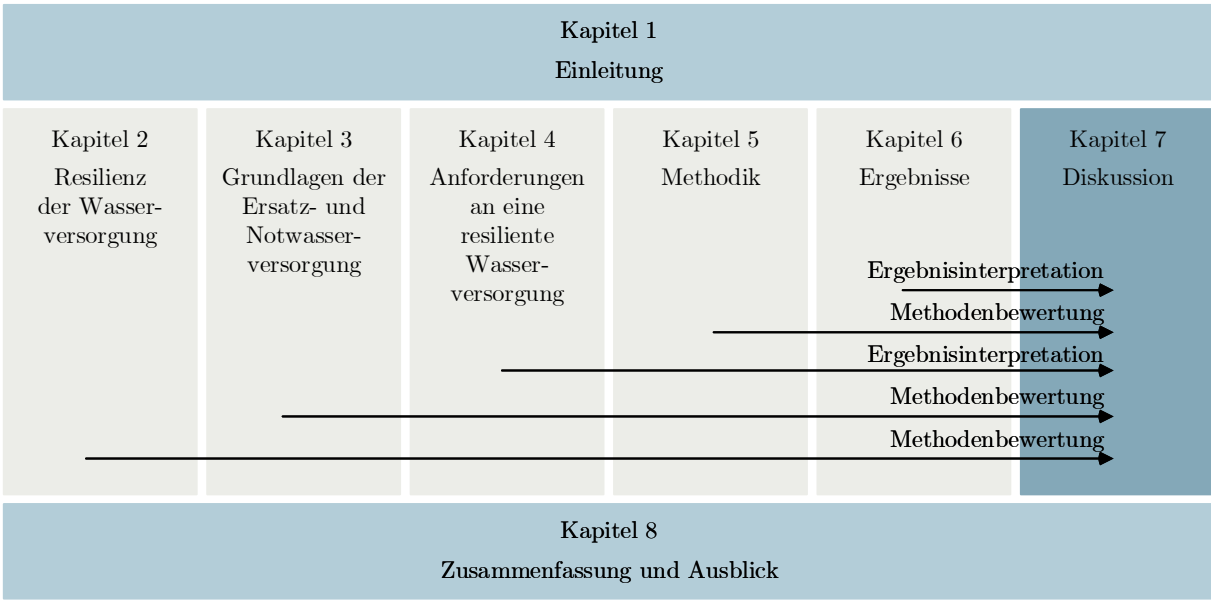


Abbildung 7.1: Aufbau des Diskussionskapitels und Einordnung der Inhalte in die Dissertation

7.1 Versorgungsarten der Ersatz- und Notwasserversorgung

Wird die normale, leitungsgebundene Wasserversorgung beeinträchtigt, alternative Versorgungsarten benötigt. Zur Beantwortung der Forschungsfragen zeigt diese Dissertation unter welchen Rahmenbedingungen die jeweiligen Versorgungsarten zum Einsatz kommen können. Die benötigten Ressourcen werden aufgezeigt und die Anforderungen an diese Ressourcen erläutert. Ergänzend werden die Voraussetzungen für den Einsatz der einzelnen Versorgungsarten dargestellt.

FF 1.1: Welche Ressourcen werden für die verschiedenen Versorgungsarten benötigt?

Ressourcen entsprechen in dieser Dissertation der technischen Ausstattung, die zur Ersatz- oder Notwasserversorgung benötigt wird und Versorgungsarten einer Kombination dieser Ressourcen, zur Substitution von beeinträchtigten Teilprozessen der Normalversorgung. Die maßgeblichen Ressourcen, die bei der Ersatz- und Notwasserversorgung zum Einsatz kommen, sind mobile Leitungen, Transportbehältnisse bzw. -fahrzeuge sowie Abfüllanlagen. Zusätzlich werden in Abhängigkeit der verwendeten Wasserqualität mobile Aufbereitungsanlagen benötigt. Die eingesetzten Ressourcen sind für die klassifizierten Versorgungsarten in dieser Dissertation zusammenfassend aufgezeigt.

Die vorgestellte Klassifizierung unterteilt die Versorgungsarten anhand der Wasserart, der für die Verteilung eingesetzten Ressourcen sowie der Art der Abgabe. Darüber hinaus sind die Versorgungsarten durch die Art der Abgabe als leitungsgebunden sowie leitungsungebunden differenziert.

FF 1.2: Welche Versorgungsarten können abhängig vom jeweiligen Schadensereignis zum Einsatz kommen?

Für die Identifikation von geeigneten Versorgungsarten ist die Ermittlung der Funktionstüchtigkeit von Teilprozessen notwendig, da die betrachteten Versorgungsarten zur Ersetzung ebendieser Teilprozesse dienen. Die entwickelte Systemanalyse dient somit dem Ziel der Identifikation der für die jeweils betrachtete Notsituation geeigneten Versorgungsarten. Hierzu wird anhand einer semiquantitativen Analyse schrittweise überprüft, welche Teilprozesse zu ersetzen sind. Die Systemanalyse stellt folglich eine Weiterentwicklung der Vulnerabilitätsanalyse nach BBK (2013a,b, 2016) und Bross, Wienand et al. (2019) dar.

Ein Schadensereignis entspricht in dieser Dissertation einer Kombination von funktionstüchtigen und zu ersetzenden Teilprozessen. Die Funktionstüchtigkeit der Anlagenteile ist die Grundlage für die Identifikation der anwendbaren Versorgungsarten sowie deren Priorisierung, sodass mit dem Ergebnis der Vulnerabilitätsanalyse die geeigneten und empfohlenen Versorgungsarten identifiziert werden können. Die vollständige Betrachtung aller 179 Schadensereignisse (Tabelle C.1 bis Tabelle C.30 im Anhang) sowie der jeweils anwendbaren Versorgungsarten zeigt, dass die Schadensereignisse sich in 20 Notsituationen gruppieren lassen. In einer Notsituation werden jeweils dieselben Versorgungsarten mit

derselben Priorisierung angewandt. Diese 20 Notsituationen sind daher in den Tabellen 6.1 bis 6.4 vertiefend aufgeführt.

Die Identifizierung der entsprechenden Notsituation erfolgt anhand der entwickelten Systemanalyse (Abbildung 6.2). Hierbei wird im Vergleich zu der in Bross, Wienand et al. (2019) aufgezeigten Systemanalyse detaillierter betrachtet, welche Wassermengen zur Verfügung stehen und welche Anlagenteile funktionstüchtig sind. Die dort aufgezeigte Analyse hat den Vorteil, dass die Anzahl der verschiedenen Szenarien, die zu betrachten sind, geringer ist. Hieraus ist eine Ermittlung der möglichen Versorgungsarten schneller umsetzbar. Vorteilhaft an der in dieser Dissertation entwickelten Systemanalyse ist jedoch, dass die Ermittlung der geeigneten Versorgungsarten über die Betrachtung von Notsituationen bei gleichem Aufwand präziser als in Bross, Wienand et al. (2019) stattfindet.

Die dargestellten Ergebnisse ermöglichen die weitgehende Beantwortung der Frage nach Einsatzmöglichkeiten der Versorgungsarten. Um diese Forschungsfrage in Abhängigkeit vom jeweiligen Schadensereignis eindeutig klären zu können, sind weitere Untersuchungen anhand von zusätzlichen Fallbeispielen empfehlenswert.

FF 1.3: Was sind die Anforderungen an Ressourcen sowie Voraussetzungen für deren Einsatz?

Die aufgezeigten Anforderungen an Ressourcen sowie Voraussetzungen für deren Einsatz basieren auf den zu ersetzenden Teilprozessen der Wasserversorgung. Hierbei können jedoch nur einige zwingende Anforderungen und Voraussetzungen ausgeführt werden, da die konkreten Auswirkungen von gleichen Szenarien (z. B. Hochwasser, Stromausfall) bei unterschiedlichen WVU verschieden ausfallen können. Bei allen Versorgungsarten werden weitere Materialien (z. B. Druckerhöhungsanlagen) in Abhängigkeit der Struktur des Wasserversorgungssystems benötigt. Diese sind jedoch für den Einzelfall zu bestimmen und finden in dieser Dissertation daher keine Berücksichtigung.

Zwingende Anforderungen an den Einsatz von leitungsgebundenen Versorgungsarten sind die mindestens teilweise Funktionstüchtigkeit des Verteilnetzes sowie die Bereitstellung der systemabhängigen Mindestwassermenge. Diese Wassermenge ist erforderlich, um hygienische und technische Probleme zu vermeiden, die durch den Eintrag von Verunreinigungen, Unterdruck sowie durch eine Differenz zwischen Wasserbedarf und eingespeister Wassermenge entstehen. Diese Menge hängt jedoch von verschiedenen Faktoren ab, wie z. B. der Struktur des Versorgungsnetzes, dem Versorgungsdruck oder der Möglichkeit einer zeitweiligen Trennung von Teilbereichen des Netzes [Bross, Krause et al., 2019]. Um die systemabhängige Mindestwassermenge in Abhängigkeit von den auftretenden Störungen (z. B. Luft in Rohrleitungen, Unterdruck) zu bestimmen, muss für das betrachtete Versorgungsnetz eine hydraulische Rohrnetzmodellierung durchgeführt werden.

Bei der leitungsungebundenen Versorgung ist zu beachten, dass der logistische Aufwand höher ist als bei der normalen Wasserversorgung. Insbesondere die direkte Abgabe des Wassers erfordert einen hohen Personal- und Materialeinsatz [Smadi et al., 2018]. Darüber hinaus sind die benötigten Ressourcen wie mobile Aufbereitungsanlagen, Wassertransportfahrzeuge und mobile Leitungen häufig nur in begrenzten Mengen oder gar nicht verfügbar.

Um den erhöhten Aufwand bewältigen zu können, sind daher eine umfassende Vorplanung und eine zielgerichtete Beschaffung von Ressourcen notwendig.

Diese Dissertation beantwortet die aufgeführte Forschungsfrage und liefert einen wissenschaftlichen Beitrag zur Umsetzungsplanung der Ersatz- und Notwasserversorgung durch die Erarbeitung der Anforderungen an den Einsatz der Versorgungsarten und der Systemanalyse zur Identifikation der Anwendbarkeit von Versorgungsarten. Damit geht diese Dissertation über die in der Literatur (insbesondere in DIN 2001-3 (2015)) veröffentlichten Aspekten der Wasserversorgung in Notsituationen hinaus. Dennoch besteht Forschungsbedarf insbesondere in dem Einsatz einer Kombination von leitungsgebundenen und -ungebundenen Versorgungsarten und deren Umsetzung in der Netzsteuerung. Dies umfasst die Strategien zur Bewirtschaftung des Netzes bei eingeschränkter Verfügbarkeit von Wasser, d. h. wenn mehr als der leitungsungebundene Bedarf verfügbar ist, aber weniger als die systemabhängige Mindestwassermenge.

7.2 Modell zur Bewertung und Steuerung des Umgangs mit begrenzten Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung

Zur Ermittlung eines effektiven Einsatzes von Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung wurde das System Dynamics Modell NOTWASSER entwickelt. Anhand des Modells wurden die bereitstellbaren Wassermengen mit verschiedenen Ressourcenkapazitäten ermittelt und hieraus die Effektivität des Einsatzes beurteilt. Zudem wurde anhand des Modells NOTWASSER der Einfluss des Bevorratungsverhaltens sowie die Auswirkungen des Notfallverlaufs auf die fehlende und bereitzustellende Wassermenge bestimmt.

Simulationsmodelle sind stets eine starke Vereinfachung der Realität. Sie stellen nur einen Ausschnitt dieser dar und können den realen Systemen nur angenähert werden [Wolstenholme, 1999]. Das Ziel der Modellierung dynamischer Systeme ist, ihr Systemverhalten und die Gründe für dieses Verhalten zu verstehen und erklären zu können, indem die Zusammenhänge zwischen zahlreichen Ursache-Wirkungsbeziehungen erkannt werden [Bossel, 2004]. System Dynamics Modelle eignen sich insbesondere zur Behandlung komplexer Fragestellungen [Milling, 1974], da das zu untersuchende System vereinfacht strukturiert und die existierenden Zusammenhänge sowie Abhängigkeiten transparent dargestellt werden [Hillenbrand, 2009]. Somit sind System Dynamics Modelle durch Klarheit und Verständlichkeit geprägt [Meadows, 1980].

Das System Dynamics Modell NOTWASSER stellt eine Ergänzung zu den graphentheoretischen Verfahren, insbesondere den hydraulischen Modellen zur Untersuchung der Vulnerabilitäten des Versorgungsnetzes durch das *n-1*-Prinzip, dar. Das Modell NOTWASSER ermöglicht die Darstellung von direkten und indirekten Zusammenhängen zwischen den Parametern Wasserbedarf, Gewinnung, Verteilung und Wasserabgabe mithilfe vielfältiger Rückkopplungskreise. Die dynamischen Entwicklungen durch Beeinträchtigungen der Normalversorgung können mithilfe dieser Prozesse simuliert und analysiert werden. Unter

Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten besteht der Modellzweck nicht in der exakten Prognose des Wasserbedarfs bzw. -verbrauchs oder der Nachbildung historischer bzw. zukünftiger Verläufe, sondern dem Vergleich mehrerer Möglichkeiten als transparente Entscheidungsgrundlage.

Der Output des Modells NOTWASSER dient nicht der quantitativen Prognose spezieller Variablen, da in SD Modellen vorwiegend nicht-lineare Feedback-Strukturen existieren. Vielmehr können durch den Output qualitative Verhaltenseigenschaften erkannt werden, um mögliche Einflussfaktoren und Trends zu identifizieren [Wolstenholme, 1994].

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde das Modell NOTWASSER auf das Fallbeispiel (Abschnitt 5.4) angewandt.

FF 2.1: Welche Wassermengen können beim Einsatz des vorhandenen Ressourcenbestandes an die Verbraucher abgegeben werden?

Die vorhandenen Ressourcen des Fallbeispiels ermöglichen in Abhängigkeit des Ressourceneinsatzes eine Bereitstellung von bis zu $45\,\mathrm{m^3/d}$. Die derzeit verfügbaren Ressourcen reichen somit nicht aus, um die quantitativen Mindestwassermengen für eine leitungsgebundene Wasserversorgung bereitzustellen.

Die Effektivität des Ressourceneinsatzes kann im Modell jedoch durch die fehlende Wassermenge differenziert abgebildet werden. Die abgegebene Wassermenge ist am höchsten, wenn die drei vorhandenen Behälter für den Transport eingesetzt werden. Dennoch ermöglichen diese nur eine geringfügige Versorgung, da nur ein kleiner Teil der Einwohner versorgt werden kann. Trotz maximaler Effektivität der eingesetzten Ressourcen sind weitere Ressourcen im Fallbeispiel notwendig.

Die Forschungsfrage bzgl. der abgegebenen Wassermenge kann für das Fallbeispiel beantwortet werden. Eine Übertragung auf andere Wasserversorgungssysteme ist jedoch nicht möglich. Dennoch zeigt die Anwendung des Modells NOTWASSER, dass die bereitstellbare Wassermenge mit dem Modell abgeschätzt werden kann und verschiedene Varianten des Ressourceneinsatzes verglichen werden können.

FF 2.2: Welche zusätzlichen Ressourcenkapazitäten werden für die Erfüllung von Schutzzielen benötigt?

Die quantitativen Schutzziele werden durch den einwohnerbezogenen spezifischen Wasserbedarf und die Anzahl der zu versorgenden Einwohner bestimmt. Der einwohnerbezogene spezifische Wasserbedarf variiert je nach Art der Versorgung. Die einwohnerspezifische leitungsunabhängige Mindestwassermenge entspricht gemäß 1. WasSV $15\,\mathrm{L/(P{\cdot}d)}$. Die systemabhängige Mindestwassermenge wird mit $50\,\mathrm{L/(P{\cdot}d)}$ angenommen und orientiert sich somit an den Vorgaben nach BMI (2016). Die einwohnerspezifische Wassermenge zur Normalversorgung $q_{d,m}$ beläuft sich nach DVGW W 410 (2008) auf $120\,\mathrm{L/(P{\cdot}d)}$.

Die vorhandenen Ressourcen genügen nicht zur Bereitstellung der leitungsungebundenen Mindestwassermenge. Bei einer Erhöhung der vorhandenen Kapazitäten von $45\,\mathrm{m^3/d}$ auf $315\,\mathrm{m^3/d}$ durch den Einsatz von 21 anstatt 3 Behältern können die 20 636 Einwohner mit je $15\,\mathrm{L/(P{\cdot}d)}$ Trinkwasser versorgt werden. Zur Bereitstellung der systemabhängigen

Mindestwassermenge werden im Fallbeispiel Kapazitäten in Höhe von 1 035 m^3/d benötigt. Hierfür werden im Modell exemplarisch 69 Behältnisse mit je 1 m^3 Fassungsvermögen betrachtet. Zur Bereitstellung von $Q_{d,m}$ sind im Fallbeispiel Transportkapazitäten in Höhe von 2 520 m^3/d nötig.

Die bereitstellbare Wassermenge ist bei gleichem Ressourcenbestand für das Fallbeispiel am höchsten, wenn die Verteilung durch transportable Behälter erfolgt. Da durch diese Behälter größere Distanzen als mit mobilen Leitungen überbrückt werden können, sind diese sowohl für die leitungsgebundene als auch für die leitungsungebundene Versorgung einsetzbar. Zudem sind für die Verteilung mit mobilen Leitungen ergänzende Speicherbehälter nötig, um die Differenz zwischen Gewinnung und Abgabe auszugleichen. Dennoch sind ressourcenübergreifend bereits für die Erfüllung des niedrigsten Schutzziels umfangreiche Kapazitäten notwendig. Dies betont den erheblichen logistischen Aufwand der Ersatz- und Notwasserversorgung. Da die Vorhaltung der benötigten Ressourcen weiterhin mit einem erheblichen finanziellen Aufwand einhergeht, wird die Relevanz der Aufrechterhaltung der leitungsgebundenen Versorgung hervorgehoben. Dieser logistische und finanzielle Aufwand ist für Wasserversorgungsunternehmen nicht ohne Weiteres tragbar.

Im Fallbeispiel sind keine Einrichtungen des Gesundheitswesens vorhanden. Dennoch werden Personen in diesen Einrichtungen im Modell NOTWASSER, zusammengefasst als Patienten, berücksichtigt. Die Abhängigkeit dieser Personengruppe von der zentralen Wasserversorgung ist in Bezug auf einen Ausfall dieser u. a. aufgrund des gesundheitlichen Zustands erhöht. Sie können sich nicht durch die direkte Abgabe in Form einer Holversorgung selbst versorgen und sind auf Hilfe durch andere Personen angewiesen.

Für den mittleren patientenbezogenen Wasserbedarf werden in der Literatur vielfältige Werte angegeben. Die Modellannahmen in Höhe 150 L/(Pat·d) basieren auf den geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen (1. WasSV). Dennoch zeigt die Vielfalt der veröffentlichten Werte (z. B. González et al. (2018), Murakawa (2013) und Welter et al. (2013)), dass zur Beurteilung des komplexen Wasserbedarfs von Einrichtungen des Gesundheits- und Pflegesektors und ihren Patienten weitere Forschungsarbeiten erforderlich sind.

Die Ergebnisse basieren auf der Berücksichtigung der quantitativen Anforderungen gemäß Abschnitt 4.2. Für eine zielgerichtete Ersatz- und Notwasserversorgung ist die Kenntnis eines differenzierten, verbraucherspezifischen Wasserbedarfs erforderlich. Die quantitativen Anforderungen für verschiedene Systemzustände und Verbrauchergruppen basieren jedoch vorwiegend auf Literatur, die im Kontext der humanitären Hilfe erarbeitet wurde sowie auf Werten die in über 50 Jahre alten Gesetzestexten niedergeschrieben sind. Die Einschätzung des Wasserbedarfs unter normalen Bedingungen berücksichtigt den durchschnittlichen Versorgungsbedarf, der als Mittelwert aus dem Wasserverbrauch zahlreicher Verbrauchergruppen berechnet wird. Am Beispiel von Deutschland kann der Wasserverbrauch pro Person nach Nutzungsarten wie Trink- und Kochwasser, Hygiene und Gebäudereinigung aufgeschlüsselt werden. Zusätzlich wird nach verschiedenen Nutzergruppen (z. B. Einwohner, Patienten) oder Spitzenzeiten differenziert. Um die Planung der leitungsgebundenen Ersatz- oder Notwasserversorgung zu erleichtern, sollten detailliertere Auswertungen vorgenommen werden. Forschungsbedarf besteht somit im Bereich der

verbraucherspezifischen Ermittlung des Wasserbedarfs, für die leitungsgebundene und -ungebundene Versorgung in Notsituationen.

Die Ergebnisse des Fallbeispiels geben durch das Modell NOTWASSER die Antwort auf die betrachtete Forschungsfrage. Es zeigt sich hierbei jedoch, dass für die Festlegung von quantitativen Schutzzielen anhand des verbraucherspezifischen Wasserbedarfs insbesondere im Bereich der Einrichtungen des Gesundheits- und Pflegesektors, Forschungsbedarf besteht.

FF 2.3: Welche Versorgungsart eignet sich bei welchem Ressourcenbestand?

Bezogen auf das Fallbeispiel können durch die Wasserversorgung aus eigenen Gewinnungsanlagen, bei der das Wasser mit Transportfahrzeugen direkt an die Verbrauchenden abgegeben wird (Versorgungsart 1c), je nach Notsituation, rund 3 % der benötigten Wassermenge bereitgestellt werden. Bei einer Erhöhung der Ressourcen zur Erfüllung der quantitativen Schutzziele der leitungsungebundenen Versorgung ist weiterhin die Versorgungsart 1c diejenige, mit der die größten Wassermengen bereitgestellt werden. Die betrachteten zusätzlichen Ressourcen ermöglichen eine teilweise leitungsgebundene Versorgung durch die Versorgungsart 1b. Bei der Erhöhung der Ressourcen zur Erfüllung der quantitativen Schutzziele der systemabhängigen Mindestwassermenge ist die Versorgungsart 1b die am geeignetsten. Durch diese leitungsgebundene Versorgungsart können knapp 70 % der benötigten Wassermenge bereitgestellt werden. Dies ist ebenfalls bei entsprechenden Kapazitäten der mobilen Leitungen mit Versorgungsart 1a in einigen Notsituationen möglich.

Bei einem Ressourcenbestand der nicht den benötigten Kapazitäten zur Erfüllung des Schutzziels der systemabhängigen Mindestwassermenge entspricht, eignen sich ausschließlich leitungsungebundene Versorgungsarten. Sind die Kapazitäten zur Erfüllung des Schutzziels ausreichend, so können zudem leitungsgebundene Versorgungsarten geeignet sein.

Ein entscheidender Einflussfaktor für die Eignung von Versorgungsarten ist neben dem Ressourcenbestand die betrachtete Notsituation. Die 20 definierten Notsituationen entsprechen insgesamt 179 Schadensereignissen, die alle denkbaren Beeinträchtigungen der Teilprozesse und deren Kombinationen abbilden. Die Ergebnisse des Fallbeispiels machen deutlich, dass bei der Ressourcenbeschaffung die Einsatzmöglichkeiten der Ressource berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus ist jedoch bei der Generierung von zusätzlichen Ressourcen auf eine ausgeprägte Verfügbarkeit von diversen Wasserressourcen zu achten. Die Relevanz von Lieferverflechtungen mit anderen WVU als beidseitige Rückfallebene wird hierbei deutlich.

Die abschließende Beantwortung der Forschungsfrage ist aufgrund der aufgezeigten Einflussfaktoren nicht möglich. Insbesondere zur vertiefenden Betrachtung der Eignung von leitungsgebundenen Versorgungsarten bei einem bestimmten Ressourcenbestand sollte das Modell NOTWASSER um ein hydraulisches Modell ergänzt werden. Hier besteht in der Umsetzungsplanung der Ersatz- und Notwasserversorgung weiterer Forschungsbedarf.

FF 2.4: Wie beeinflusst das Bevorratungsverhalten der Bevölkerung die fehlende Wassermenge?

In Anbetracht der begrenzten Ressourcen sind bei der Ersatz- und Notwasserversorgung stets Priorisierungsentscheidungen zu treffen. Dies umfasst neben technischen Entscheidungen auch die Fragestellung der Priorisierung von Verbrauchergruppen. Ist die Versorgung von Personen in Einrichtungen des Gesundheits- und Pflegesektors zu priorisieren oder sollten möglichst viele Personen mit geringeren Wassermengen versorgt werden? Hierbei knüpft die Frage an, inwiefern die Bevölkerung für sich selbst zu sorgen hat und inwieweit sie hierzu in der Lage ist.

Um den Einfluss des Bevorratungsverhaltens der Bevölkerung auf die durch das WVU bereitzustellende Wassermenge zu untersuchen, wurde eine Erhebung durchgeführt. Da diese zur Unterstützung der quantitativen Szenarienbildung dient, wurde sie in Form einer Onlineerhebung veranlasst. Ein Fragebogen wurde über Mailinglisten und per Schneeballprinzip an 2 171 Personen aus allen 16 Bundesländern Deutschlands verteilt. In Ergänzung mit anderen Studien wurde festgestellt, inwiefern das ermittelte Bevorratungsverhalten durch Selbstschutz die WVU in Notsituationen entlastet.

Die Anzahl der Personen, die durch ein WVU versorgt werden muss, kann sich durch die private Bevorratung von Wasser innerhalb der Bevölkerung um über 70 % verringern. Hierbei wird jedoch angenommen, dass die sich selbstversorgenden Personen mit 2 L/(P·d) Wasser auskommen. Für die Versorgung der restlichen Einwohner wird von einer Mindestwassermenge von 15 L/(P·d) für die leitungsungebundene Versorgung ausgegangen.

Jeder Einwohner muss zumindest in den ersten 72 Stunden nach einem Schadensereignis teilweise oder vollständig autark sein [Basolo et al., 2008; Kohn et al., 2012; Murti et al., 2014; Russell et al., 1995; SVGW W VN 300, 2007]. Im betrachteten Datensatz ist dies nur bei circa 40 % der Bevölkerung der Fall. Gründe für die geringen Vorräte können in dem Vertrauen der Bevölkerung in die Zuverlässigkeit der zentralen Wasserversorgung und in der Nutzung von Trinkwasser aus dem Leitungsnetz anstatt in abgepackter Form liegen. Hierbei stehen die WVU und die Behörden vor dem Dilemma zwischen der Reduzierung des Konsums von Flaschengetränken zugunsten von Leitungswasser, um die Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren sowie die Versorgung des Wasserverteilungsnetzes zu sichern, und der völligen Abhängigkeit der Bevölkerung von einem funktionierenden Wasserversorgungssystem.

Die Bevölkerung in Deutschland ist auf längere Ausfälle der Wasserversorgung nicht ausreichend vorbereitet. Die durchschnittliche private Vorsorge entspricht nicht den Mindestempfehlungen gemäß BBK (2005). Sandholz et al. (2019), die im Jahr 2017 Erhebungen in zwei verschiedenen Landkreisen durchführten, zeigen zudem deutliche Unterschiede im Bevorratungsverhalten zwischen der Stadt- und Landbevölkerung auf. Das Bevorratungsverhalten in der Landbevölkerung ist stärker ausgeprägt als in der Stadt. Zudem haben Single- und Studierendenhaushalte einen geringeren Vorrat als Senioren und Familien [Sandholz et al., 2019].

Die Ergebnisse geben eine Antwort auf die Frage dem Einfluss des Bevorratungsverhaltens der Bevölkerung auf die in einem Notfall fehlende Wassermenge. Durch die differenzierte Betrachtung von Personengruppen wird jedoch deutlich, dass die Vorratshaltung und der Versorgungsbedarf der Bevölkerung variiert. Um in Notsituationen den Bedarf besser einschätzen und darauf reagieren zu können, bedarf es einer Berücksichtigung von verschiedenen Auswirkungen einer Beeinträchtigung der Wasserversorgung in der Bevölkerung. Kinder und ältere Personen benötigen in der Regel Unterstützung bei der Holversorgung. Kleinere Haushalte sind insbesondere in dichter besiedelten Gebieten bei der Planung der Ersatz- und Notwasserversorgung, aufgrund von Platzmangel für die private Bevorratung, zu berücksichtigen.

FF 2.5: Wie beeinflusst der Notfallverlauf die fehlende Wassermenge?

Im Modell NOTWASSER wird durch die Anwendung eines Notfallverlaufs in Form einer Leistungskurve die Basis für die Beurteilung der Resilienz als Wiederstandsfähigkeit geschaffen. Durch die Betrachtung der fehlenden Wassermenge wird somit eine leistungsbasierte Resilienzkurve in Anlehnung an Bruneau et al. (2003), Cimellaro et al. (2007), McDaniels et al. (2008) und Zobel (2010) angewandt. Diese wird gemäß Ayyub (2014) sowie Tierney und Bruneau (2007) durch die Fläche zwischen der Leistungskurve ohne Störereignis und der Resilienzkurve berechnet. Die Leistungskurve ohne Störereignis entspricht hier $Q_{d,m}$. Attoh-Okine et al. (2009) erläuterten, dass diverse Einflussfaktoren zu einer Veränderung des Notfallverlaufs führen können. Die Auswirkungen des Notfallverlaufs auf die fehlende Wassermenge zur Beurteilung der Fläche zwischen den Leistungskurven wurde daher näher betrachtet.

Durch einen verzögerten Ausfallverlauf v_{A1} im Vergleich zum abrupten Ausfallverlauf v_{A4} kann die fehlende Wassermenge in diesem Zeitraum um mehr als 60 % reduziert werden. Der zügige Wiederherstellungsverlauf v_{W2} führt zu einer fehlenden Wassermenge die um circa 66 % geringer ist als die des schleppenden Wiederherstellungsverlaufs v_{W3}. Das Modell NOTWASSER zeigt anhand des Fallbeispiels den erheblichen Einfluss des Notfallverlaufs auf die fehlende Wassermenge und die Effektivität des Ressourceneinsatzes.

Das Modell NOTWASSER liefert Ergebnisse zur Beantwortung der aufgezeigten Forschungsfrage und betont die Relevanz der differenzierten Betrachtung eines Notfallverlaufs. Die von Ayyub (2014) sowie Tierney und Bruneau (2007) vorgeschlagene Betrachtung des Resilienzdreiecks durch Ermittlung der Fläche des Dreiecks zum Zeitpunkt des Schadenseintritts, des Notfalls und der vollständigen Wiederherstellung ist im Bezug auf die fehlende Wassermenge nicht zielführend. Für die Betrachtung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen hat zudem die Beurteilung der Systemfunktionalität durch die minimale Leistung nach einem Schadensereignis gemäß Cimellaro et al. (2016) sowie Sharifi und Yamagata (2016a) keine ausreichende Aussagekraft.

In vergangenen Notsituationen wurde die fehlende Wassermenge nicht erhoben oder diese nicht in der Literatur veröffentlicht. Die betrachteten Verläufe orientieren sich an Fallbeispielen und dem theoretischen Verlauf bei simulierten Schadensereignissen (z. B. Deuerlein et al. (2018) und Sophocleous et al. (2018)). Zur ex post quantitativen

Beurteilung der Resilienz Notsituation stellt die Erhebung der fehlenden Wassermenge eine relevante Größe dar. In Bezug auf Methoden zur Erhebung dieser Menge besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf.

7.3 Verbundindikator zur Analyse des Status quo der Notfallvorsorgeplanung

Um Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen effektiv planen und umsetzen zu können, ist die Beurteilung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung erforderlich. Zur Beurteilung dessen wurde der Notfallvorsorgeplanungsindikator entwickelt. Dieser umfasst die präventiven Maßnahmen, die Festlegung von Verantwortlichkeiten und Ressourcen sowie die Planungen des Krisenmanagements. Der NVP wurde anhand des Fallbeispiels auf seine Anwendbarkeit und Aussagekraft geprüft. Die Ermittlung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung wurde mittels eines für Deutschland repräsentativen Datensatz des Forschungsprojekts NoWa I umgesetzt.

FF 3.1: Welche Schritte muss eine effektive Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung umfassen?

Um bei außergewöhnlichen Beeinträchtigungen widerstandsfähig zu sein, müssen WVU vorausschauend planen. Eine effektive Notfallvorsorgeplanung umfasst hierbei vorbeugende und absichernde Maßnahmen zur Risikominimierung sowie reaktive und wiederherstellende Maßnahmen des Krisenmanagements. Konkrete Maßnahmen werden in den fünf Prozessschritten des Risiko- und Krisenmanagements beschrieben. Hierbei werden im Rahmen der Vorplanung die Grundlagen geschaffen, indem das Bewusstsein für die mögliche Beeinträchtigungen erhöht wird sowie die Verantwortlichkeiten der beteiligten Akteure bzw. Institutionen festgelegt werden. Durch eine Risikoanalyse werden mittels Szenarien die Auswirkungen von verschiedenen Gefährdungen auf das Wasserversorgungssystem betrachtet und deren Relevanz für das System bestimmt. Zur Minderung von Risiken werden vorbeugende Maßnahmen umgesetzt. Restrisiken werden durch das Krisenmanagement adressiert, indem eine Struktur zur Bewältigung von Krisen geschaffen wird. Zur Gewährleistung der Aktualität und Effektivität von Maßnahmen sind die einzelnen Prozessschritte regelmäßig zu evaluieren und ggf. zu aktualisieren.

Abbildung 7.2 zeigt die Auswirkungen einer Umsetzung der Prozessschritte des Risiko- und Krisenmanagements auf die Resilienzkurve. Die Prozessschritte *Vorplanung* (VP), *Risikoanalyse* (RA) und *vorbeugende Maßnahmen* (VM) dienen der Vermeidung von Schadensereignissen sowie der Vorbeugung des Leistungsverlusts. Diese Ziele werden erreicht, indem die Systemkenntnis erhöht wird, Schwachstellen adressiert oder behoben und unvermeidbare Risiken erkannt werden. Der Prozessschritt des *Krisenmanagements* (KM) dient zusammen mit den *vorbeugenden Maßnahmen* einer schnellen Absicherung sowie der effektiven Wiederherstellung. Die Reaktion auf den Leistungsverlust wird durch das

Zusammenspiel der vier Prozessschritte verbessert, da hierbei alle Aspekte des Risiko- und Krisenmanagements erforderlich sind. Durch den fünften Prozessschritt wird die Aktualität aller Maßnahmen sichergestellt. Zur Verringerung des Leistungsabfalls und Erhöhung der Resilienz ist somit eine effektive Notfallvorsorgeplanung mit Umsetzung aller Prozessschritte des Risiko- und Krisenmanagements notwendig.

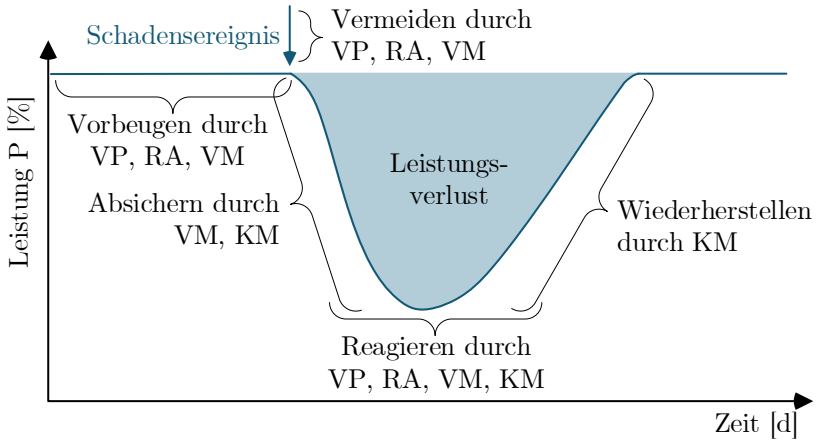


Abbildung 7.2: Beeinflussung der Resilienz durch Verbesserung des Risiko- und Krisenmanagements

FF 3.2: Wie kann der Status quo der Notfallvorsorge quantitativ erfasst werden?

Der entwickelte Verbundindikator ermöglicht die Beurteilung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung. Die eingeflossenen Haupt- und Teilindikatoren basieren auf aktuellen wissenschaftlichen Veröffentlichungen (z. B. AWWA (2018), AWWA G440 (2017), BBK (2016) und Bross, Wienand et al. (2019)), sodass sie den derzeitigen Stand der Forschung zur Notfallvorsorgeplanung aufgreifen. Die Entwicklung und Anwendung des Verbundindikators basiert auf zwei Hauptmotivationen. Der Indikator kann als ein Instrument zur Selbsteinschätzung der Notfallvorsorgeplanung und der Resilienz dienen, indem gezielte Fragen zur Ermittlung des Indikators gestellt werden. Die Selbsteinschätzung kann von Wasserversorgungsunternehmen, regionalen oder nationalen Behörden sowie Kommunen genutzt werden, die ihre Präventionsmaßnahmen verbessern wollen. Das Ergebnis des Indikators kann zudem ein Bewusstsein für die Relevanz der Notfallvorsorgeplanung schaffen und Handlungsbedarf aufzeigen.

Darüber hinaus dient der Indikator lokalen und regionalen Behörden und nationalen sowie internationalen Organisationen, da dieser einen konsistenten Vergleich zwischen verschiedenen Kommunen erlaubt, z. B. im Zuge von Benchmarking Prozessen. Die Ergebnisse sollen diese Einrichtungen dabei unterstützen, Entscheidungen z. B. über die Zuteilung von Ressourcen zu treffen sowie diese transparenter und einheitlicher zu gestalten.

Die betrachtete Forschungsfrage lässt sich somit durch den Notfallvorsorgeplanungsindikator beantworten. Durch das Fallbeispiel wurde die Anwendbarkeit und Aussagekraft überprüft. Eine ergänzende Erhebung mit verschiedenen WVU wäre zur Sicherstellung der Anwendbarkeit bei größeren sowie kleineren Unternehmen empfehlenswert, da hier strukturelle und organisatorische Unterschiede vorliegen.

FF 3.3: Wie ist der Status quo der Notfallvorsorge in der Wasserversorgung in Deutschland zu beurteilen und wo besteht Handlungsbedarf?

Die Ergebnisse des Verbundindikators zeigen ein sehr heterogenes Bild bzgl. des Umsetzungsstands der Notfallvorsorgeplanung in der deutschen Wasserversorgung. Die Heterogenität des Notfallvorsorgeplanungsindikators besteht sowohl in den Kreisen, kreisfreien Städten als auch auf Gemeindeebene. Zudem sind die Ergebnisse der fünf Prozessschritte sehr divers. Einige Aspekte der Notfallvorsorgeplanung wurden somit bereits umgesetzt. Dennoch ist die Umsetzung in einigen Landkreisen und kreisfreien Städten sowie Gemeinden und kreiszugehörigen Städten noch unzureichend.

Die Unterscheidung der Landkreise und kreisfreien Städte bzw. Gemeinden nach ihren Einwohnerzahlen zeigt, dass in beiden Fällen größere Kommunen im Durchschnitt eine bessere Notfallvorsorgeplanung vorweisen als kleinere. Dennoch sind in beiden Gruppen Ausreißer in beide Richtungen enthalten. Die ausgereiftere Notfallvorsorgeplanung in größeren Kommunen kann zum einen durch die in der Regel umfangreichere Personalausstattung oder strukturelle Bedingungen begründet sein. Zum anderen obliegt die Wasserversorgung in größeren Kommunen auch oft größeren Versorgungsunternehmen, die sich dieser Aufgabe häufig aufgrund der Unternehmensstruktur intensiver widmen.

Die Erhebung der einzelnen fünf Prozessschritte des Risiko- und Krisenmanagements zeigt, dass die Aspekte der Schritte *Vorbeugende Maßnahmen* und *Krisenmanagement* im Vergleich weiter umgesetzt sind, jedoch noch Handlungsbedarf besteht. Aus dem niedrigen Ergebnis des Hauptindikators *Risikoanalyse* (Landkreise und kreisfreie Städte: 0,16; Gemeinden und kreiszugehörige Städte: 0,14) kann abgeleitet werden, dass die Grundlagen zur Identifikation von notwendigen vorbeugenden Maßnahmen fehlen und das entsprechende Krisenmanagement nicht zielgerichtet geplant ist. Einhergehend mit den Auswertungen in Krause und Bross (2017) zeigen die Ergebnisse, dass zusätzliche Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung generiert werden müssen. Dies ist insbesondere in Regionen der Fall, die aufgrund ihrer Bevölkerungsstruktur und geographischen Lage in der Vergangenheit keine Ressourcen beschafft oder errichtet haben.

Die Analyse zum Status quo der Notfallvorsorgeplanung für das Fallbeispiel zeigt, dass bereits einige Maßnahmen umgesetzt wurden. Insbesondere in der Vorplanung und den vorbeugenden Maßnahmen ist ein fortgeschrittener Umsetzungsstand zu erkennen. Da der Status quo der Risikoanalyse jedoch noch verbesserungswürdig ist, stellt sich die Frage inwiefern die vorbeugenden Maßnahmen zielgerichtet identifiziert und umgesetzt wurden. Daher ist die Evaluierung der vorbeugenden Maßnahmen im Anschluss an die vollständige Umsetzung der Risikoanalyse notwendig. Weiterer Handlungsbedarf besteht

im Bereich des Krisenmanagements. Dieser Prozessschritt weist im Fallbeispiel den geringsten Umsetzungsstand auf. Da die Maßnahmen des Krisenmanagements jedoch auf der Risikoanalyse und den vorbeugenden Maßnahmen basieren, ist die Umsetzung der einzelnen Prozessschritte nacheinander zwingend erforderlich. Hierbei gilt es dennoch weiterhin die einzelnen Prozessschritte regelmäßig zu evaluieren und zu aktualisieren.

Die Ermittlung des Notfallvorsorgeplanungsindikator erfolgte mit zwei Gewichtungsmethoden. Eine gleichverteilte Gewichtung von Indikatoren ist in der Literatur die Standardannahme (z. B. Islam et al. (2013), Lazarus (2011)). Werden gleiche Gewichtungen verwendet, werden die Indikatoren entweder so konstruiert, dass jede Variable oder jeder Zweig einer Hierarchieebene gleich gewichtet wurde. Zur Ermittlung des NVP wurde die Gleichgewichtung auf jeder Hierarchieebene vorgenommen. Des Weiteren wurde eine Gewichtung der Haupt- und Teilindikatoren auf Grundlage der Erfahrung von Experten angewandt. Es wurde hier jedoch keine strenge partizipatorische Methode durchgeführt bei der alle einfließenden Gewichtungen auf Expertenmeinung basierten [Asadzadeh et al., 2017]. Diese wurde nur für die Gewichtung der Haupt- und Teilindikatoren, jedoch nicht für die Einzelindikatoren verwendet. Für die Einzelindikatoren wurde eine Aggregation auf jeder Ebene durch arithmetische Mittel angewandt. Durch die unterschiedliche Anzahl der Teil- und Einzelindikatoren kommt ihnen trotz scheinbarer Gleichgewichtung ein unterschiedliches Gewicht zu [Beccari, 2016]. Dies gilt ebenfalls für den ausgewerteten Datensatz des NoWa I Projekts und muss bei der Ableitung von Handlungsbedarf berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse zeigen mit den beiden verschiedenen Gewichtungsmethoden, sowohl für den Datensatz des NoWa I Projekts als auch des Fallbeispiels, nur geringe Unterschiede. Dies verdeutlicht, dass die Meinungen der Experten die Relevanz aller fünf Prozessschritte des Risiko- und Krisenmanagements nach BMI (2011) und BBK (2016) bestätigt. Zur Erhöhung der Akzeptanz des Indikators sowie zur Vereinfachung der Ermittlung wird daher die Anwendung der Gewichtung durch statistisch gleichverteilte Gewichte empfohlen.

Die Visualisierung der Indikatorergebnisse erfolgt in der Regel durch Tabellen oder geographische Karten (z. B. Khazai et al. (2013), Lazarus (2011)). Beccari (2016) hat die Kommunikation der Indikatorergebnisse an die politischen Entscheidungsträger als eine zentrale Herausforderung hervorgehoben. Bei der Visualisierung der Ergebnisse ist die Berücksichtigung der Zielgruppe äußerst wichtig, da diese das Indikatorensystem anwenden und dessen Ergebnisse heranziehen sollen. Zur Darstellung der Ergebnisse des NVP wurde ein neuartiger Ansatz gewählt, in dem die Relevanz jedes einzelnen Datensatzes für das Gesamtbild anonymisiert in Treemap-Diagrammen aufgezeigt werden kann (Abschnitt 5.3.7). Die Darstellung ermöglicht den Vergleich von verschiedenen Datensätzen sowie der Ergebnisse der Hauptindikatoren für jeden Datensatz, da die Position der Datensätze im Diagramm durch die Definition über die Einwohnerzahl einheitlich ist.

Der scheinbare Mangel sowohl an Validierung als auch an Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen ist eine Herausforderung, wenn es darum geht, den Nutzen und die Aussagekraft einzelner Verbundindikatoren zu beurteilen [Beccari, 2016]. Zudem kann die

Vielfalt der bereits veröffentlichten Vorgehen (auszugsweise aufgezeigt in Abschnitt 2.3) und deren begrenzte Übereinstimmung bei der Messung von Aspekten der Resilienz und Notfallvorsorge ein Hindernis für die stärkere Anwendung des NVP darstellen. Eine ergänzend durchgeführte Literaturanalyse zeigt, dass viele Veröffentlichungen zu Indikatorensystemen im Katastrophenmanagementkontext nicht genügend Details enthalten, um die dort aufgezeigten Methodiken auf andere Datensätze anzuwenden, geschweige denn, eine Reproduktion zu ermöglichen. Diese Aussage wird von Beccari (2016) im Kontext von Vulnerabilitätsindikatoren bestätigt. Durch die transparente Darstellung des Verfahrens zur Ermittlung des NVP, ist dieser auf andere Datensätze anwendbar.

Des Weiteren können Indikatorenmethoden aufgrund einer zu starken Vereinfachung komplexer Konzepte, wie das der Resilienz, und die Verwendung schwer verständlicher Aggregationsverfahren ihren Nutzen für die politischen Entscheidungsträger verringern oder sogar zu einer nachteiligen Entscheidungsfindung führen [Balica, 2012]. Obwohl es sich bei der Beantwortung der Fragen zur Ermittlung des NVP um eine checklistenbasierte Selbstbewertung handelt, könnte der Umfang der Fragen dazu führen, dass den einzelnen Antworten wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird. Das Ergebnis des Fallbeispiels zeigt, dass das Verfahren anwendbar und der Selbstbewertungsbogen mit 74 Fragen (Tabelle E.6) angemessen ist. Eine kürzere Frageliste würde zu einem weniger aussagekräftigen Ergebnis führen.

Der Notfallvorsorgeplanungsindikator ermöglicht einen quantitativen Vergleich zwischen Kommunen oder WVU sowie den fünf abgebildeten Prozessschritten und die Identifikation von Handlungsbedarf. Dieser besteht in der deutschen Wasserversorgung insbesondere in der Durchführung von Risikoanalysen. Bereits getätigte vorbeugende Maßnahmen sind im Anschluss an die Durchführung einer Risikoanalyse auf deren Angemessenheit zu überprüfen. In Ermangelung einheitlicher Benchmarks kann die betrachtete Forschungsfrage nicht gänzlich beantwortet werden. Schwellenwerte für eine ausreichende oder verbesserungswürdige Notfallvorsorgeplanung sind zu definieren. Dies ist jedoch nicht allein durch die Wissenschaft möglich, sondern erfordert insbesondere einen Diskurs zwischen den Aufgabenträgern und politischen Entscheidern.

7.4 Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen in Notsituationen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung

Die vielfältigen Auswirkungen der Corona-Pandemie in 2020 auf die Gesellschaft und somit auch auf die WVU zeigen, dass der Umfang solcher außergewöhnlicher Schadensereignisse nicht vollständig vorhersehbar ist. Dennoch werden Wasserversorgungssysteme nur dann resilient, wenn sie auf unvorhersehbare Ereignisse bestmöglich vorbereitet sind. Eine zwingende Voraussetzung zur Erhöhung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen und zur Reduktion ihrer Vulnerabilität ist hierbei die Kenntnis und Beurteilung des Status quo sowie des bestehenden Handlungsbedarfs.

Wie kann die Resilienz von Wasserversorgungssystemen vor dem Eintreten eines Notfalls beurteilt werden, um die Notfallvorsorge effektiv planen zu können?

Die Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen erfolgt in dieser Dissertation durch die Betrachtung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung. Bei der Entwicklung eines Indikatorensystems hierfür zeigte sich, dass bei einigen Aspekten der Notfallvorsorgeplanung insbesondere, der Identifikation von geeigneten Versorgungsarten und der anschließenden Steuerung des Ressourceneinsatzes, Forschungslücken bestehen. Daher wurden als Bestandteil des entwickelten Verfahrens Methoden erarbeitet, die hierzu eine wissenschaftliche Grundlage bieten und eine Beurteilung der Effektivität der betrachteten Maßnahmen ermöglichen.

Des Weiteren besteht in der Literatur der weitgehende Konsens, dass Resilienz kein *Check-the-Box*-Ansatz ist, sondern mit der systemischen Leistung zusammenhängt [Cork, 2010]. Die Leistung von Wasserversorgungssystemen in Notsituation kann objektiv jedoch nur durch Übungen a priori eingeschätzt oder nach realen Notsituationen ex post beurteilt werden. Dennoch bietet das entwickelte Verfahren die Möglichkeit mit marginalem Aufwand einen Überblick über die bereits umgesetzten Maßnahmen sowie die noch offenen Aspekte des Risiko- und Krisenmanagements zu erhalten. Ein konsistenter Vergleich des Status quo von verschiedenen Wasserversorgungsunternehmen oder Kommunen ist durch die Beurteilung der Resilienz auf Basis von durchgeführten Übungen sowie ex post Ereignisanalysen nicht oder nur mit erheblichem Aufwand möglich.

Unabhängig davon, ob es mehrere Bestandteile gibt, die zur Überwindung der aufgezeigten Herausforderungen erforderlich sind, besteht ein wichtiger Bestandteil darin, vorauszusehen, wie eine Systemreaktion aussehen könnte [Herrera, 2017]. Da Simulationen die Möglichkeit eröffnen, die Reaktionen eines Systems zu evaluieren und zu analysieren sowie die Rahmenbedingungen zu variieren, eignet sich der Einsatz von Methoden wie der System Dynamics Modellierung. Sie dienen als Werkzeug zur Abschätzung einer möglichen Systemreaktion auf Störungen sowie der Steuerung des entsprechenden Ressourceneinsatzes [Duveneck und Scheller, 2016; Masys et al., 2014; Schattka et al., 2016].

Die Summe der entwickelten Methoden beantwortet die übergreifende Forschungsfrage dieser Dissertation. Allein die Verwendung von Simulationen reicht nicht zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen aus, da die reine Bewertung der Resilienz durch den qualitativen Vergleich der simulierten Reaktionen auf unterschiedliche Störungen schwierig ist und zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen führen kann. Darüber hinaus werden insbesondere die vorbeugenden Aspekte des Risiko- und Krisenmanagements nicht berücksichtigt. Die Ergänzung der Simulation durch den Notfallvorsorgeplanungsindikator ermöglicht die Beurteilung der Resilienz. Zudem unterstützt der Indikator bei Entscheidungen mit gesellschaftlichen und volkswirtschaftlichen Auswirkungen sowie der Priorisierung von Investitionen und Maßnahmen der Notfallvorsorgeplanung. Abschließend ist eine Quantifizierung der Resilienz somit nicht nur für die Entscheidungsfindung möglich, sondern auch notwendig, um diskutieren zu können, was Resilienz in der und für die Praxis bedeutet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Eine – auch in Notsituationen – zuverlässige Wasserversorgung ist eine Grundbedingung für ein stabiles Gesellschaftssystem. Ausfälle der Trinkwasserversorgung führen aufgrund der hohen Abhängigkeit der Bevölkerung von der zentralen Wasserversorgung schnell zu Versorgungsengpässen. Da die Funktionalität von Wasserversorgungssystemen durch Naturgefahren oder vom Menschen verursachte Gefährdungen beeinträchtigt werden kann, wurde die Erhöhung der Resilienz Kritischer Infrastrukturen zu einem der sieben globalen Kernziele des Sendai Rahmenwerk für Katastrophenvorsorge 2015 - 2030 definiert. Hierzu sind das Verständnis, die Analyse sowie die Quantifizierung der Resilienz durch Wasserversorgungsunternehmen, Behörden, Entscheidungstragende sowie andere beteiligte Institutionen erforderlich.

Die Wasserversorgung in Notsituationen mit Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung wurde bislang kaum erforscht. Bestehende Verfahren zur Beurteilung der Resilienz im Sinne der Widerstandsfähigkeit von Wasserversorgungssystemen basieren bisher primär auf dem *n-1*-Prinzip. Die vorliegende Arbeit befasst sich im Schwerpunkt mit der Beurteilung der Resilienz durch die Ermittlung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung und mit der Steuerung von begrenzten Ressourcen zur Ersatz- und Notwasserversorgung. Die damit verbundenen Forschungsfragen sind im Kapitel 1 dargestellt. Die Quantifizierung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen eröffnet die Möglichkeit, den Handlungsbedarf zu identifizieren, um die Wasserversorgung in Deutschland auch in verschiedenen Notsituationen sicherzustellen.

8.1 Zusammenfassung der Arbeit

Die wesentlichen Merkmale des entwickelten Verfahrens sowie die gewonnenen Ergebnisse zu den verschiedenen Teilaspekten dieser Arbeit werden im Folgenden zusammenfassend aufgezeigt. Die Reihenfolge orientiert sich dabei am Aufbau der Arbeit.

Notfallvorsorgeplanung als Beurteilungsgrundlage der Resilienz

Eine effektive Notfallvorsorgeplanung zeichnet sich u.a. dadurch aus, dass die Planungen vorausschauend durchgeführt und die festgelegten Maßnahmen in Notsituationen zielgerichtet umgesetzt werden können. Dabei werden die fünf Prozessschritte des Risiko- und Krisenmanagements berücksichtigt. Aus den Prozessschritten *Vorplanung* und *Risikoanalyse* werden vorbeugende Maßnahmen zur Risikominimierung abgeleitet. Den Restrisiken wird durch Krisenmanagement begegnet. Zur Gewährleistung der kontinuierlichen Wasserversorgung sind dabei die Möglichkeiten der Ersatz- und Notwasserversorgung zu

betrachten. Hierbei gilt es insbesondere, die geeigneten Versorgungsarten zu identifizieren und den entsprechenden Ressourceneinsatz zu steuern.

Identifikation von geeigneten Versorgungsarten

Aufbauend auf den für die Ersatz- und Notwasserversorgung charakteristischen Möglichkeiten der Wassergewinnung, Verteilung und Abgabe wurden in dieser Dissertation 19 Versorgungsarten klassifiziert. Die anschließende Identifikation der geeigneten Versorgungsarten erfolgte anhand der Betrachtung von beeinträchtigten Teilprozessen des Wasserversorgungssystems und der Ableitung von kennzeichnenden Notsituationen durch eine Systemanalyse. Ergänzend wurde aufgezeigt, wodurch Teilprozesse ersetzt werden können und welche Ressourcen hierzu benötigt werden. Die spezifischen Anforderungen an diese Ressourcen sowie die Voraussetzungen für deren Einsatz wurden dargelegt. Hierbei wurden für die leitungsgebundene und -ungebundene Versorgung relevante Umsetzungshinweise aufgeführt sowie spezifische Anforderungen für den Einsatz der Versorgungsarten erläutert. Die Praxisrelevanz und -tauglichkeit wurde in Expertenworkshops überprüft.

Effektiver Einsatz von begrenzten Ressourcen

Als weiteres Kriterium für die Eignung von Versorgungsarten wurden die verfügbaren Ressourcenkapazitäten identifiziert. Durch die Anwendung des entwickelten System Dynamics Modells NOTWASSER auf das Fallbeispiel konnte der effektive Einsatz von Ressourcen und die Ableitung der jeweils idealen Versorgungsarten exemplarisch aufgezeigt werden. Die Ergebnisse der Analyse des Fallbeispiels verdeutlichen, dass Ressourcen, die sowohl für die leitungsgebundene als auch für die -ungebundene Versorgung eingesetzt werden können, zu priorisieren sind. Hierbei handelt es sich insbesondere um transportable Behälter zur Verteilung und Speicherung von Wasser.

Bevorratung in der Bevölkerung entlastet Wasserversorgungsunternehmen

Zur Sicherung der Wasserversorgung in Notsituation ist eine gewisse Selbsthilfefähigkeit der Bevölkerung durch Versorgung aus eigenen Vorräten als Ergänzung zu den Maßnahmen von Wasserversorgungsunternehmen unerlässlich. Die durchgeführte Befragung zeigte, dass weniger als die Hälfte der befragten Personen einen Wasservorrat für drei Tage lagert. Die Übertragung der Ergebnisse auf die gesamte Bevölkerung legt nahe, dass die durch Ersatz- oder Notwasserversorgung bereitzustellende Wassermenge durch die private Vorratsversorgung um circa 55 % verringert werden kann.

Abhängigkeit des Ressourcenbedarfs vom Notfallverlauf

Die Untersuchungen zum Einfluss des Notfallverlaufs auf die fehlende Wassermenge verdeutlicht, dass erhebliche Unterschiede zwischen einem abrupten und einem verzögerten Ausfall bestehen. Dies gilt ebenso für den Unterschied der zügigen und einer eher schleppenden Wiederherstellung. Um die fehlende Wassermenge zur Entlastung von Wasserversorgungsunternehmen zu reduzieren, sind daher die Auswirkungen von Schadensereignissen zu vermindern um den Ausfallverlauf abzudämpfen und zielgerichtete reaktive Maßnahmen zu planen um die Wiederherstellung zu beschleunigen.

Status quo der Notfallvorsorgeplanung verdeutlicht Handlungsbedarf

Der Status quo der Notfallvorsorgeplanung in Deutschland wurde mithilfe des vorgestellten Verbundindikators ermittelt. Die Datengrundlage des Indikatorensystems bildet das Fallbeispiel eines Wasserversorgungsunternehmens sowie eine für Deutschland repräsentative Erhebung des Forschungsprojekts NoWa I. Daraus geht hervor, dass für die Notfallvorsorgeplanung in der deutschen Wasserversorgung noch Handlungsbedarf besteht. Die Teilprozesse der Notfallvorsorgeplanung, darunter Risikoanalysen, werden nur selten oder unzureichend durchgeführt. Im Bereich der Vorplanung sind hingegen bereits zahlreiche Wasserversorgungsunternehmen und Kommunen gut aufgestellt, ebenso werden vorbeugende Maßnahmen umgesetzt. Die regelmäßige Evaluierung dieser Maßnahmen ist verbesserungswürdig. Somit besteht Handlungsbedarf auf mehreren Ebenen.

8.2 Ausblick

Diese Dissertation verdeutlicht, dass die Resilienz von Wasserversorgungssystemen durch Betrachtung des Status quo der Notfallvorsorgeplanung beurteilt werden kann. Vor dem Hintergrund der Datenverfügbarkeit sollten die Ergebnisse jedoch nur sehr behutsam verallgemeinert werden. Somit ergibt sich ein Potential für zukünftige Studien, die darauf abzielen können, den identifizierten heterogenen Handlungsbedarf mit einem verbesserten Datensatz zu bekräftigen.

Der vorgestellte Notfallvorsorgeplanungsindikator sollte durch ein übertragbares Übungskonzept a priori überprüft werden. Hierbei sollte die Umsetzung der Ersatz- bzw. Notwasserversorgung jedoch nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch geübt werden.

Die vorgestellten Ergebnisse werfen weiterführende Fragen bezüglich des spezifischen Wasserbedarfs von Verbrauchergruppen auf. Insbesondere der Wasserbedarf von Patienten in Gesundheits- oder Pflegeeinrichtungen mit Berücksichtigung von lebensnotwendigen, wasserabhängigen Prozessen ist zu betrachten. In diesem Zusammenhang wäre es des Weiteren zu untersuchen, welche Faktoren die systemabhängige Mindestwassermenge beeinflussen und wie diese vereinfacht ermittelt werden kann.

Überdies zeigt diese Dissertation, dass auf vielen Ebenen Handlungsbedarf zur Erhöhung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen besteht. Für zielgerichtete Maßnahmen ist ein Wandel von der Notfallbewältigung zur Notfallvorsorge unerlässlich. Hierbei ist die Auseinandersetzung mit verschiedenen Risiken erforderlich, um zu entscheiden, wie sich Wasserversorgungsunternehmen sowie die Gesellschaft auf jene Risiken vorbereiten sollen. Diese Aufgabe ist jedoch nicht allein durch eine ingenieurwissenschaftliche Betrachtung zu lösen, sondern erfordert einen transdisziplinären Diskurs.

Literaturverzeichnis

Abel, N., Cumming, D. H. und Anderies, J. M. (2006). *Collapse and Reorganization in Social-Ecological Systems: Questions, Some Ideas, and Policy Implications*. Ecology and Society 11.1, S. 17. DOI: 10.5751/ES-01593-110117.

Abokifa, A. A., Haddad, K., Lo, C. S. und Biswas, P. (2017). *Detection of Cyber Physical Attacks on Water Distribution Systems via Principal Component Analysis and Artificial Neural Networks*. In: *World Environmental and Water Resources Congress 2017*. Hrsg. von EWRI. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, S. 676–691. ISBN: 9780784480625. DOI: 10.1061/9780784480625.063.

Adams, J. (1999). *Managing Water Supply and Sanitation in Emergencies*. An Oxfam Publication.

Adger, W. N. (2000). *Social and ecological resilience: are they related?*. Progress in Human Geography 24.3, S. 347–364. ISSN: 0309-1325. DOI: 10.1191/030913200701540465.

Adger, W. N. (2006). *Vulnerability*. Global Environmental Change 16.3, S. 268–281. ISSN: 09593780. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.

Ahuja, R. K., Magnanti, T. L. und Orlin, J. B. (1993). *Network flows: Theory, algorithms, and applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. ISBN: 9780136175490.

Albert, R., Jeong, H. und Barabasi, A.-L. (2000). *Error and attack tolerance of complex networks*. Nature 406.6794, S. 378–382. DOI: 10.1038/35019019.

American Water Works Association (2018). *M19 Emergency Planning for Water and Wastewater Utilities, Fifth Edition*. 5. Auflage. Denver, CO: American Water Works Association. ISBN: 978-1-62576-279-5.

Asadzadeh, A., Kötter, T., Salehi, P. und Birkmann, J. (2017). *Operationalizing a concept: The systematic review of composite indicator building for measuring community disaster resilience*. International Journal of Disaster Risk Reduction 25, S. 147–162. ISSN: 22124209. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2017.09.015.

Asefa, T., Clayton, J., Adams, A. und Anderson, D. (2014). *Performance evaluation of a water resources system under varying climatic conditions: Reliability, Resilience, Vulnerability and beyond*. Journal of Hydrology 508, S. 53–65. ISSN: 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.043.

Attoh-Okine, N. O., Cooper, A. T. und Mensah, S. A. (2009). *Formulation of Resilience Index of Urban Infrastructure Using Belief Functions*. IEEE Systems Journal 3.2, S. 147–153. ISSN: 1932-8184. DOI: 10.1109/JSYST.2009.2019148.

AWWA (2011). *Planning for an Emergency Drinking Water Supply*. American Water Works Association, U.S. Environmental Protection Agency's National Homeland Security Research Center.

AWWA G430 (2015). *Security Practices for Operation and Management*. ISBN: 978-162-5760-432.

AWWA G440 (2017). *Emergency Preparedness Practices*. ISBN: 978-162-5762-443.

AWWA J100 (2010). *Risk and Resilience Management of Water and Wastewater Systems*. ISBN: 978-158-3217-887.

Ayyub, B. M. (2014). *Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making*. Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis 34.2, S. 340–355. DOI: 10.1111/risa.12093.

Bagheri, A., Darijani, M., Asgary, A. und Morid, S. (2010). *Crisis in Urban Water Systems during the Reconstruction Period: A System Dynamics Analysis of Alternative Policies after the 2003 Earthquake in Bam-Iran*. Water Resources Management 24.11, S. 2567–2596. DOI: 10.1007/s11269-009-9568-1.

Balica, S. (2012). *Approaches of understanding developments of vulnerability indices for natural disasters*. Journal of Environmental Engineering 11.5, S. 963–974. DOI: 10.30638/eemj.2012.120.

Balut, A., Brodziak, R., Bylka, J. und Zakrezewski, P. (2018). *Battle of Post-Disaster Response and Restauration (BPDRR)*. WDSA / CCWI Joint Conference 1.

Baños, R., Reca, J., Martínez, J., Gil, C. und Márquez, A. L. (2011). *Resilience Indexes for Water Distribution Network Design: A Performance Analysis Under Demand Uncertainty*. Water Resources Management 25.10, S. 2351–2366. ISSN: 0920-4741. DOI: 10.1007/s11269âĂŞ011âĂŞ9812âĂŞ3.

Barlas, Y. (1996). *Formal aspects of model validity and validation in system dynamics*. System Dynamics Review 12.3, S. 183–210. ISSN: 08837066. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4.

Barlas, Y. und Carpenter, S. (1990). *Philosophical roots of model validation: Two paradigms*. System Dynamics Review 6.2, S. 148–166. ISSN: 08837066. DOI: 10.1002/sdr.4260060203.

Basolo, V., Steinberg, L. J., Burby, R. J., Levine, J., Cruz, A. M. und Huang, C. (2008). *The Effects of Confidence in Government and Information on Perceived and Actual Preparedness for Disasters*. Environment and Behavior 41.3, S. 338–364. DOI: 10.1177/0013916508317222.

Baur, A., Fritsch, P., Hoch, W., Merkl, G., Rautenberg, J., Weiß, M. und Wricke, B. (2019). *Mutschmann/Stimmelmayr Taschenbuch der Wasserversorgung*. 17. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3658232214. DOI: 10.1007/978-3-658-23222-1. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-23222-1.

BBK (2005). *Vorsorgemaßnahmen zur Sicherstellung der Trinkwasser-Notversorgung: Merkblatt für die vereinfachte Planung wasserwirtschaftlicher Vorsorgemaßnahmen zur Trinkwasser-Notversorgung nach dem Gesetz über die Sicherstellung von Leistungen auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft für Zwecke der Verteidigung (Wassersicherstellungsgesetz – WasSG)*. September. BBK; Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.

BBK (2008). *Schutz Kritischer Infrastruktur: Risikomanagement im Krankenhaus*. Bd. 2. Praxis im Bevölkerungsschutz. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.

BBK (2009a). *Drinking Water - Emergency Supply*. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.

BBK (2009b). *Trinkwasser – Notversorgung: Leistungspotenziale im Bevölkerungsschutz*. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.

BBK (2011). *BBK-Glossar, Ausgewählte zentrale Begriffe des Bevölkerungsschutzes*. Bd. 8. Praxis im Bevölkerungsschutz. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. ISBN: 978-3-939347-38-5.

BBK (2013a). *Abschätzung der Verwundbarkeit gegenüber Hitzewellen und Starkregen*. Bd. 11. Praxis im Bevölkerungsschutz. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. ISBN: 978-3-939347-55-2.

BBK (2013b). *Abschätzung der Verwundbarkeit gegenüber Hochwasserereignissen auf kommunaler Ebene*. Bd. 4. Praxis im Bevölkerungsschutz. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. ISBN: 978-3-939347-24-8.

BBK (2014). *Katastrophenalarm: Ratgeber für Notfallvorsorge und richtiges Handeln in Notsituationen*. 2., unveränderte Auflage. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. ISBN: 978-3-939347-54-5.

BBK (2015a). *Leitfaden für die Planung , die Einrichtung und den Betrieb einer Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden*. April 2015. Bd. 13. Praxis im Bevölkerungsschutz. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. ISBN: 3-939347-63-9.

BBK (2015b). *Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz: Ein Stresstest für die Allgemeine Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz*. Selbstverlag.

BBK (2016). *Sicherheit der Trinkwasserversorgung: Teil 1: Risikoanalyse: Grundlagen und Handlungsempfehlungen für Aufgabenträger der Wasserversorgung in den Kommunen*. Bd. 15. Praxis im Bevölkerungsschutz. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe.

BBK (2019). *BBK-Glossar, Ausgewählte zentrale Begriffe des Bevölkerungsschutzes*. 2. Auflage. Bd. 8. Praxis im Bevölkerungsschutz. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. ISBN: 978-3-939347-38-5.

Beccari, B. (2016). *A Comparative Analysis of Disaster Risk, Vulnerability and Resilience Composite Indicators*. PLoS currents 8. DOI: 10.1371/currents.dis.453df025e34b682e9737f95070f9b970.

Birkmann, J. (2007). *Risk and vulnerability indicators at different scales:Applicability, usefulness and policy implications*. Environmental Hazards 7.1, S. 20–31. ISSN: 17477891. DOI: 10.1016/j.envhaz.2007.04.002.

Birkmann, J. (2008). *Globaler Umweltwandel, Naturgefahren, Vulnerabilität und Katastrophenresilienz*. Raumforschung und Raumordnung 66.1, S. 5–22. DOI: 10.1007/BF03184043.

Birkmann, J. (2013). *Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies and to enhance adaptation: Conceptual frameworks and definitions*. In: *Measuring Vulnerability to Natural Hazards. Towards disaster resilient societies.* Hrsg. von J. Birkmann. Tokyo/New York: United Nations University Press, S. 9–79. ISBN: 9789280812022.

Blackmore, J. M. und Plant, R. A. J. (2008). *Risk and Resilience to Enhance Sustainability with Application to Urban Water Systems*. Journal of Water Resources Planning and Management 134.3, S. 224–233. ISSN: 0733-9496. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:3(224).

BMI (2009). *Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastruktur (KRITIS-Strategie)*. Selbstverlag.

BMI (2011). *Schutz Kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement · Leitfaden für Unternehmen und Behörden*. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat.

BMI (2014). *Leitfaden Krisenkommunikation*. 5. Auflage. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat.

BMI (2015). *Rundschreiben zur Aktualisierung der Qualitätsstandards in der Trinkwassernotversorgung in den Ausführungsbestimmungen des WasSG vom 14.04.2015*. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat.

BMI (2016). *Konzeption Zivile Verteidigung (KZV)*. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat.

Boin, A. und McConnell, A. (2007). *Preparing for Critical Infrastructure Breakdowns: The Limits of Crisis Management and the Need for Resilience*. Journal of Contingencies and Crisis Management 15.1, S. 50–59.

Bollin, C. und Hidajat, R. (2006). *Community-Basded Risk Index: Pilot Implementation in Indonesia*. In: *Measuring Vulnerability to Natural Hazards. Towards disaster resilient societies.* Hrsg. von J. Birkmann. Tokyo/New York: United Nations University Press, S. 271–289. ISBN: 9789280812022.

Bossel, H. (2004). *Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Norderstedt: Books on Demand. ISBN: 3833409843.

Boyle, D. B. (1980). *Interagency Connections: Insurance Against Interruptions in Supply*. Journal - American Water Works Association 72.4, S. 192–195. ISSN: 0003150X. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1980.tb04495.x.

Braubach, A. (2011). *Vulnerabilität der kritischen Infrastruktur Wasserversorgung gegenüber Naturkatastrophen: Auswirkungen des Augusthochwassers 2002 auf die Wasserversorgung und das Infektionsgeschehen der Bevölkerung in Sachsen und Sachsen-Anhalt*. Bd. 12. Forschung im Bevölkerungsschutz. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. ISBN: 978-3-939347-30-9.

Bross, L., Bäumer, J., Voggenreiter, I., Wienand, I. und Fekete, A. (2020). *Public Health without Water? Emergency Water Supply and Minimum Supply Standards of Hospitals in High-income Countries Using the Example of Germany and Austria*. Water Policy. Angenommen am 06.12.2020. ISSN: 1366-7017.

Bross, L. und Krause, S. (2017). *Preventing Secondary Disasters Through Providing Emergency Water Supply.* In: *World Environmental and Water Resources Congress 2017.* Hrsg. von American Society of Civil Engineering.

Bross, L., Krause, S., Wannewitz, M., Stock, E., Sandholz, S. und Wienand, I. (2019). *Insecure Security: Emergency Water Supply and Minimum Standards in Countries with a High Supply Reliability.* Water 11.4, S. 732. ISSN: 2073-4441. DOI: 10.3390/w11040732.

Bross, L., Wienand, I. und Krause, S. (2019). *Sicherheit der Trinkwasserversorgung: Teil 2: Notfallvorsorgeplanung: Grundlagen und Handlungsempfehlungen für Aufgabenträger der Wasserversorgung in den Kommunen.* Hrsg. von Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. Bd. 15. Praxis im Bevölkerungsschutz.

Bross, L., Wienand, I. und Krause, S. (2020a). *Batten Down the Hatches — Assessing the Status of Emergency Preparedness Planning in the German Water Supply Sector with Statistical and Expert-Based Weighting.* Sustainability 12.17, S. 7177. DOI: 10.3390/su12177177.

Bross, L., Wienand, I. und Krause, S. (2020b). *Stand der Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung in Deutschland.* GWF 09, S. 40–51.

Bruijne, M. de und van Eeten, M. (2007). *Systems that Should Have Failed: Critical Infrastructure Protection in an Institutionally Fragmented Environment.* Journal of Contingencies and Crisis Management 15.1, S. 18–29. ISSN: 09660879. DOI: 10.1111/j.1468-5973.2007.00501.x.

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A. und Winterfeldt, D. von (2003). *A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities.* Earthquake Spectra 19.4, S. 733–752. ISSN: 8755-2930. DOI: 10.1193/1.1623497.

Callaway, D. S., Newman, M. E., Strogatz, S. H. und Watts, D. J. (2000). *Network robustness and fragility: percolation on random graphs.* Physical review letters 85.25, S. 5468–5471. ISSN: 0031-9007. DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.5468.

Chen, W.-K. (1990). *Theory of nets: Flows in networks.* A Wiley-interscience publication. New York: Wiley. ISBN: 0471851485.

Chmielewski, H., Guidotti, R., McAllister, T. und Gardoni, P. (2016). *Response of Water Systems under Extreme Events: A Comprehensive Approach to Modeling Water System Resilience.* In: *World Environmental and Water Resources Congress 2016.* Hrsg. von C. S. Pathak und D. R. Reinhart. Reston: American Society of Civil Engineers, S. 475–486. ISBN: 9780784479865. DOI: 10.1061/9780784479865.050.

Cimellaro, G. P., Tinebra, A., Renschler, C. und Fragiadakis, M. (2016). *New Resilience Index for Urban Water Distribution Networks.* Journal of Structural Engineering 142.8, S. C4015014. ISSN: 0733-9445. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001433.

Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M. und Bruneau, M. (2007). *MCEER's vision on the seismic resilience of health care facilities.* ANIDIS 2007, S. 8.

Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M. und Bruneau, M. (2010). *Framework for analytical quantification of disaster resilience*. Engineering Structures 32.11, S. 3639–3649. ISSN: 01410296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.08.008.

Clarke, B. A., Crompton, J. L. und Luff, R. (2004). *A physico-chemical water treatment system for relief agencies*. Water Management 157.4, S. 211–216. ISSN: 1741-7589. DOI: 10.1680/wama.157.4.211.56748.

Coaffee, J. (2008). *Risk, resilience, and environmentally sustainable cities*. Energy Policy 36.12, S. 4633–4638. ISSN: 03014215. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.048.

Collins, M., Carlson, J. und Petit, F. (2011). *Community resilience: measuring a community's ability to withstand*. In: *Disaster Management and Human Health Risk II*. Hrsg. von C. A. Brebbia, A. Kassab und E. A. Divo. WIT Transactions on the Built Environment. WIT PressSouthampton, UK, S. 111–123. DOI: 10.2495/DMAN110111.

Cork, S. (2010). *Policy Implications*. In: *Resilience and Transformation: Preparing Australia for Uncertain Futures*. Hrsg. von S. Cork. CSIRO PUBLISHING, S. 5–22. ISBN: 9780643102149.

Curnin, S. (2018). *Collaboration in disasters: A cultural challenge for the utilities sector*. Utilities Policy 54, S. 78–85. ISSN: 09571787. DOI: 10.1016/j.jup.2018.08.002.

Curnin, S. und Heumüller, E. (2016). *Evaluating emergency management capability of a water utility: A pilot study using exercise metrics*. Utilities Policy 39, S. 36–40. ISSN: 09571787. DOI: 10.1016/j.jup.2016.01.003.

Cutter, S. L., Boruff, B. J. und Shirley, W. L. (2003). *Social Vulnerability to Environmental Hazards**. Social Science Quarterly 84.2, S. 242–261. ISSN: 0038-4941. DOI: 10.1111/1540-6237.8402002.

De Buck, E., Borra, V., De Weerdt, E., Vande Veegaete, A. und Vandekerckhove, P. (2015). *A systematic review of the amount of water per person per day needed to prevent morbidity and mortality in (post-)disaster settings*. PloS one 10.5. ISSN: 1932-6203. DOI: 10.1371/journal.pone.0126395.

Destatis (2018a). *Altersstruktur der Bevölkerung Deutschlands*. URL: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1351/umfrage/altersstruktur-der-bevoelkerung-deutschlands/.

Destatis (2018b). *Entwicklung der Gesamtbevölkerung nach Geschlecht*. URL: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/161868/umfrage/entwicklung-der-gesamtbevoelkerung-nach-geschlecht-seit-1995/.

Dettenkofer, M., Kuemmerer, K., Mueller, W., Schuster, A., Muehlich, M., Scherrer, M. und Daschner, F. A. (2000). *Environmental Auditing in Hospitals: First Results in a University Hospital*. Environmental Management 25.1, S. 105–113. ISSN: 0364-152X. DOI: 10.1007/s002679910008.

Deuerlein, J., Gilbert, D., Abraham, E. und Piller, O. (2018). *A Greedy Scheduling of Post-Disaster Response and Restoration using Pressure-Driven Models and Graph Segment Analysis*. WDSA / CCWI Joint Conference 1.

DHS (2015). *Homeland Security Presidential Directive 7: Critical Infrastructure Identification, Prioritization, and Protection.* URL: https://www.dhs.gov/homeland-security-presidential-directive-7.

Diestel, R. (2017). *Graphentheorie.* 5. Auflage. Lehrbuch. Berlin: Springer Spektrum. ISBN: 978-3-662-53633-9. URL: http://www.springer.com/.

Dikau, R. und Pohl, J. (2007). *"Hazards": Naturgefahren und Naturrisiken.* In: *Geographie:* Hrsg. von H. Gebhardt, R. Glaser, U. Radtke und P. Reuber. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl., S. 1029–1076. ISBN: 978-3827415431.

DIN 2000 (2017). *Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen.*

DIN 2001-1 (2019). *Trinkwasserversorgung aus Kleinanlagen und nicht ortsfesten Anlagen - Teil 1: Kleinanlagen - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Anlagen.*

DIN 2001-3 (2015). *Trinkwasserversorgung aus Kleinanlagen und nicht ortsfesten Anlagen - Teil 3: Nicht ortsfeste Anlagen zur Ersatz- und Notwasserversorgung – Leitsätze für Anforderungen an das abgegebene Wasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Anlagen.*

DIN 4046 (1983). *Wasserversorgung; Begriffe; Technische Regel des DVGW.*

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.*

DIN ISO 31000 (2018). *Risikomanagement: Leitlinien.*

DIN SPEC 91390 (2019). *Integriertes Risikomanagement für den Schutz der Bevölkerung.*

Dinh, L. T., Pasman, H., Gao, X. und Mannan, M. S. (2012). *Resilience engineering of industrial processes: Principles and contributing factors.* Journal of Loss Prevention in the Process Industries 25.2, S. 233–241. ISSN: 09504230. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.09.003.

Doe, S. R. K. und Whitman, B. E. (2011). *Security and emergency management for water systems.* First edition. Exton, Pennsylvania: Bentley Institute Press. ISBN: 9781934493069.

Duchek, S. (2014). *Growth in the Face of Crisis: The Role of Organizational Resilience Capabilities.* Academy of Management Proceedings 2014.1, S. 13487. ISSN: 0065-0668. DOI: 10.5465/ambpp.2014.225.

Dueñas-Osorio, L., Craig, J. I., Goodno, B. J. und Bostrom, A. (2007). *Interdependent Response of Networked Systems.* Journal of Infrastructure Systems 13.3, S. 185–194. ISSN: 1076-0342. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2007)13:3(185).

Duveneck, M. J. und Scheller, R. M. (2016). *Measuring and managing resistance and resilience under climate change in northern Great Lake forests (USA).* Landscape Ecology 31.3, S. 669–686. ISSN: 0921-2973. DOI: 10.1007/s10980-015-0273-6.

DVGW (2017). *Information Wasser Nr.82: Veränderungen des Wasserbedarfs: Empfehlungen für die systematische Identifizierung des Anpassungsbedarfs und der Anpassungsmöglichkeiten bestehender Wasserversorgungssysteme*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches.

DVGW W 1020 (2018). *Empfehlungen und Hinweise für den Fall von Abweichungen von Anforderungen der Trinkwasserverordnung; Maßnahmeplan und Handlungsplan*.

DVGW W 1050 (2012). *Objektschutz von Wasserversorgungsanlagen*.

DVGW W 202 (2010). *Technische Regeln Wasseraufbereitung (TRWA): Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung*.

DVGW W 399 (2014). *Ungeplante Versorgungsunterbrechungen/-störungen: Erfassung und Berechnung*.

DVGW W 400-1 (2015). *Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) - Teil 1: Planung*.

DVGW W 410 (2008). *Wasserbedarf - Kennwerte und Einflussgrößen*.

EPA (2007). *Effective Risk and Crisis Communication during Water Security Emergencies: Summary Report of EPA Sponsored Message Mapping Workshops*. United States Environmental Protection Agency.

Fekete, A. (2018). *Urban Disaster Resilience and Critical Infrastructure: Urbane Katastrophen-Resilienz und Kritische Infrastruktur*. Würzburg. ISBN: 978-3-946573-13-5.

FEMA (2004). *Food and Water in an Emergency*. Federal Emergency Management Agency. DOI: 10.1002/047147844X.wr2172.

Forrester, J. W. (1972). *Grundsätze einer Systemtheorie: (Principles of systems)*. Wiesbaden: Gabler. ISBN: 3409313311.

Forrester, J. W. (1973a). *Industrial dynamics*. Cambridge, MA: Mit Press. ISBN: 0262560011.

Forrester, J. W. (1973b). *Urban dynamics*. 4. printing. Cambridge, MA: Mit Press. ISBN: 0262060264.

Forrester, J. W. (1987). *Lessons from system dynamics modeling*. System Dynamics Review 3.2, S. 136–149. ISSN: 08837066. DOI: 10.1002/sdr.4260030205.

Forrester, J. W. (1994). *System dynamics, systems thinking, and soft OR*. System Dynamics Review 10.2-3, S. 245–256. ISSN: 08837066. DOI: 10.1002/sdr.4260100211.

Forrester, J. M., Birkmann, J., Abeling, T., Karanci, N., Pelling, M., Fordham, M., Deeming, H. und Kruse, S. (2012). *Building Resilience Amongst Communities in Europe: Systematization of Different Concepts, Quality Criteria, and Indicators*. CRED, Louvain.

Fowler, H. J., Kilsby, C. G. und O'Connell, P. E. (2003). *Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system*. Water Resources Research 39.8, S. 39. ISSN: 00431397. DOI: 10.1029/2002WR001778.

Gay, L. F. und Sinha, S. K. (2013). *Resilience of civil infrastructure systems: literature review for improved asset management*. International Journal of Critical Infrastructures 9.4, S. 330. ISSN: 1475-3219. DOI: 10.1504/IJCIS.2013.058172.

Gheorghe, A. V., Masera, M., Vries, L. de, Weijnen, M. und Kroger, W. (2007). *Critical infrastructures: the need for international risk governance*. International Journal of Critical Infrastructures 3.1/2, S. 3. ISSN: 1475-3219. DOI: 10.1504/IJCIS.2007.011543.

Glassop, L. (2007). *The Three R's of Resilience: Redundancy, Requisite Variety and Resources*. In: *Building and sustaining resilience in complex organizations*. Hrsg. von R. Kay und K. A. Richardson. Mansfield, MA: ISCE Pub, S. 19–34. ISBN: 0979168848.

Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, A. und Madani, K. (2013). *Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can Backfire*. Journal of Hydrology 491, S. 23–39. ISSN: 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.03.021.

González, A., García-Sanz-Calcedo, J. und Salgado, D. (2018). *Quantitative Determination of Potable Cold Water Consumption in German Hospitals*. Sustainability 10.4, S. 932. DOI: 10.3390/su10040932.

Gopalakrishnan, K. und Peeta, S. (2010). *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems: Simulation, Modeling, and Intelligent Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 9783642114045. DOI: 10.1007/978-3-642-11405-2. URL: http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10383007.

Grigg, N. S. (2003). *Water Utility Security: Multiple Hazards and Multiple Barriers*. Journal of Infrastructure Systems 9.2, S. 81–88. ISSN: 1076-0342. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2003)9:2(81).

Grombach, P., Haberer, K. und Merkl, G. (2000). *Handbuch der Wasserversorgungstechnik*. 3., völlig überarb. Aufl. München: Oldenbourg-Industrieverl. ISBN: 9783486263947.

Haakh, F. und Merkel, W. (2020). *Die Wasserversorgung im COVID-19 Krisenmanagement: Systemanalyse und Szenarienplanung*. energie | wasser-praxis 71.6 & 7, S. 34–41.

Hashimoto, T., Stedinger, J. R. und Loucks, D. P. (1982). *Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation*. Water Resources Research 18.1, S. 14–20. ISSN: 00431397. DOI: 10.1029/WR018i001p00014.

Herrera, H. (2017). *From Metaphor to Practice: Operationalizing the Analysis of Resilience Using System Dynamics Modelling*. Systems Research and Behavioral Science 34.4, S. 444–462. ISSN: 10927026. DOI: 10.1002/sres.2468.

Heyen, B. (2013). *Zielnetzplanung als Instrument zur systematischen Umgestaltung der Versorgungsnetze*. In: *Tagungsband*. Hrsg. von Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.

Hillenbrand, T. (2009). *Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme: Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss-, 2009*. Bd. 134. Schriftenreihe SWW Karlsruhe. Karlsruhe: Verl. Siedlungswasserwirtschaft. ISBN: 9783981146172.

Hoch, W. (1999). *Planungsgrundsätze für das Bemessen von Wasserverteilungsnetzen unter Berücksichtigung der Löschwasserversorgung*. In: *Wassertransport und -verteilung*. Hrsg. von R. Sattler und W. Hirner. DVGW Lehr- und Handbuch Wasserversorgung. München: Oldenbourg, S. 85–123. ISBN: 9783486262193.

Holling, C. S. (1973). *Resilience and Stability of Ecological Systems*. Annual Review of Ecology and Systematics 4.1, S. 1–23. DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245.

Holling, C. S. (1978). *Adaptive environmental assessment and management*. Caldwell, NJ: Blackburn Press. ISBN: 9781932846072.

Holling, C. S. (1987). *Simplifying the complex: The paradigms of ecological function and structure*. European Journal of Operational Research 30.2, S. 139–146. ISSN: 03772217. DOI: 10.1016/0377-2217(87)90091-9.

Holling, C. S. und Meffe, G. K. (1996). *Command and Control and the Pathology of Natural Resource Management*. Conservation Biology 10.2, S. 328–337. ISSN: 0888-8892. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1996.10020328.x.

House, S. und Reed, B. (2004). *Emergency Water Sources: Guidelines for selection and treatment*. Third edition. Loughborough University, UK: Water, Engineering and Development Centre. DOI: 10.4337/9781782549666.00019.

Hübl, J., Heiser, M., Braito, S., Tscharner, S., Kuntner, K., Schraml, K., Falkensteiner, M. und Rabanser, E. (2017). *Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Rottal-Inn 2016: Band 1: Ergebnisdokumentation*. Bd. 180. IAN Report.

Islam, M. S., Swapan, M. S. H. und Haque, S. M. (2013). *Disaster risk index: How far should it take account of local attributes?*. International Journal of Disaster Risk Reduction 3, S. 76–87. ISSN: 22124209. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2012.10.001.

Jain, S. und McLean, C. R. (2009). *Recommended practices for homeland security modeling and simulation*. In: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. Hrsg. von M. D. Rossetti. Piscataway, NJ: IEEE, S. 2879–2890. ISBN: 978-1-4244-5770-0. DOI: 10.1109/WSC.2009.5429236.

Joerin, J., Shaw, R., Takeuchi, Y. und Krishnamurthy, R. (2014). *The adoption of a climate disaster resilience index in Chennai, India*. Disasters 38.3, S. 540–561. ISSN: 03613666. DOI: 10.1111/disa.12058.

Kalberlah, F., Hassauer, M., Schuhmacher-Wolz, U., Konietzka, R. und Wienand, I. (2018). *Maßnahmenhöchstwerte für die Versorgung mit Not(trink)wasser*. In: *Handbuch Trinkwasser aktuell*. Hrsg. von H. Dieter, I. Chorus, W. Krüger und B. Mendel. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

Kallaos, J., Mainguy, G. und Wyckmans, A. (2014). *Considering Resilience: Steps Towards an Assessment Framework*. Journal of Land Use, Mobility and Environment 7.1, S. 5–28. DOI: 10.6092/1970-9870/2290.

Karger, R. und Hoffmann, F. (2013). *Wasserversorgung: Gewinnung - Aufbereitung - Speicherung - Verteilung*. 14. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 9783834813800. DOI: 10.1007/978-3-8348-2096-9.

Khazai, B., Merz, M., Schulz, C. und Borst, D. (2013). *An integrated indicator framework for spatial assessment of industrial and social vulnerability to indirect disaster losses*. Natural Hazards 67.2, S. 145–167. DOI: 10.1007/s11069-013-0551-z.

Klingel, P. (2018). *Modellierung von Wasserverteilungssystemen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-21270-4.

Kohn, S., Eaton, J. L., Feroz, S., Bainbridge, A. A., Hoolachan, J. und Barnett, D. J. (2012). *Personal disaster preparedness: An integrative review of the literature*. Disaster Medicine and Public Health Preparedness 6.3, S. 217–231. ISSN: 1935-7893. DOI: 10.1001/dmp.2012.47.

Krause, S. und Bross, L. (2017). *Stand der Notfallvorsorgeplanung in Deutschland*. In: *Tagungsband zum 9. Seminar Wasserversorgung*. Hrsg. von S. Krause und C. Schaum. Aachen: Shaker Verlag. ISBN: 978-3-8440-5468-2.

Latora, V. und Marchiori, M. (2001). *Efficient behavior of small-world networks*. Physical review letters 87.19, S. 198701. ISSN: 0031-9007. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.198701.

Lauwe, P. und Mayer, J. (2017). *Risikoanalyseverfahren und Schutzzieldefinition*. In: *Bevölkerungsschutz*. Hrsg. von H. Karutz, W. Geier und T. Mitschke. Berlin, Heidelberg und s.l.: Springer Berlin Heidelberg, S. 132–138. ISBN: 978-3-662-44634-8.

Lazarus, N. W. (2011). *Coping capacities and rural livelihoods: Challenges to community risk management in Southern Sri Lanka*. Applied Geography 31.1, S. 20–34. ISSN: 01436228. DOI: 10.1016/j.apgeog.2010.03.012.

Lenz, S. (2009). *Vulnerabilität Kritischer Infrastrukturen*. Bd. 4. Forschung im Bevölkerungsschutz. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. ISBN: 978-3-939347-11-8. URL: http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/PublikationenForschung/FiB_Band4.pdf?__blob=publicationFile.

Li, Y. und Lence, B. J. (2007). *Estimating resilience for water resources systems*. Water Resources Research 43.7, S. 75. ISSN: 00431397. DOI: 10.1029/2006WR005636.

Little, R. J. und Rubin, D. B. (2002). *Statistical analysis with missing data*. Second edition. Wiley series in probability and statistics. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience. ISBN: 9780471183860. URL: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=838162.

Ludwig, A. (2002). *Substance-Flow Water/Waste Water Management in European Hospitals—Water Saving Strategies and Strategies for Reducing Waste Water Pollution; Project LIFE99 ENV/D/000455*. URL: http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE99_ENV_D_000455_LAYMAN.pdf.

Malczewski, J. und Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. Advances in geographic information science. New York: Springer. ISBN: 978-3-540-74756-7.

Marzi, S., Mysiak, J., Essenfelder, A. H., Amadio, M., Giove, S. und Fekete, A. (2019). *Constructing a comprehensive disaster resilience index: The case of Italy*. PloS one 14.9, e0221585. ISSN: 1932-6203. DOI: 10.1371/journal.pone.0221585.

Masys, A. J., Ray-Bennett, N., Shiroshita, H. und Jackson, P. (2014). *High Impact/Low Frequency Extreme Events: Enabling Reflection and Resilience in a Hyper-connected World*. Procedia Economics and Finance 18, S. 772–779. ISSN: 22125671. DOI: 10.1016/S2212-5671(14)01001-6.

Matisziw, T. C., Murray, A. T. und Grubesic, T. H. (2009). *Exploring the vulnerability of network infrastructure to disruption*. The Annals of Regional Science 43.2, S. 307–321. ISSN: 0570-1864. DOI: 10.1007/s00168-008-0235-x.

Mays, L. W. (2004). *Water supply systems security*. McGraw-Hill professional engineering Civil engineering. New York, NY: McGraw-Hill. ISBN: 0071425314. URL: http://www.loc.gov/catdir/bios/mh042/2004049065.html.

McDaniels, T., Chang, S., Cole, D., Mikawoz, J. und Longstaff, H. (2008). *Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation*. Global Environmental Change 18.2, S. 310–318. ISSN: 09593780. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.03.001.

Meadows, D. H. (1980). *The Unavoidable A Priori*. In: *Elements of the System Dynamics Method*. Hrsg. von J. Randers, S. 23–56.

Meadows, D. H., Zahn, E., Milling, P. und Heck, H.-D. (1972). *Die Grenzen des Wachstums: Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. Bd. 1. DVA informativ. Stuttgart: Dt. Verl.-Anst. ISBN: 3421026335.

Mehlhorn, H. und Weiß, M. (1999). *Fernleitungssysteme*. In: *Wassertransport und -verteilung*. Hrsg. von R. Sattler und W. Hirner. DVGW Lehr- und Handbuch Wasserversorgung. München: Oldenbourg, S. 123–169. ISBN: 9783486262193.

Mendonça, D. und Wallace, W. A. (2006a). *Adaptive Capacity: Electric Power Restoration in New York City following the 11 September 2001 Attacks*. Proceedings of the 2nd Symposium on Resilience Engineering.

Mendonça, D. und Wallace, W. A. (2006b). *Impacts of the 2001 World Trade Center Attack on New York City Critical Infrastructures*. Journal of Infrastructure Systems 12.4, S. 260–270. ISSN: 1076-0342. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2006)12:4(260).

Mileti, D. und Noji, E. K. (1999). *Disasters by Design*. Washington, D.C.: Joseph Henry Press. ISBN: 978-0-309-26173-9. DOI: 10.17226/5782.

Milling, P. (1974). *Der technische Fortschritt beim Produktionsprozeß: Ein dynamisches Modell für innovative Industrieunternehmen*. Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN: 9783409392921. DOI: 10.1007/978-3-322-83859-9. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-83859-9.

Mirchi, A., Madani, K., Watkins, D. und Ahmad, S. (2012). *Synthesis of System Dynamics Tools for Holistic Conceptualization of Water Resources Problems*. Water Resources Management 26.9, S. 2421–2442. ISSN: 0920-4741. DOI: 10.1007/s11269-012-0024-2.

Morley, K. und Riordan, R. (2006). *Utilities helping Utilities: An Action Plan for Mutial Aid and Assistance Networks for Water and Wastewater Utilities*. American Water Works Association.

Murakawa, M. (2013). *Anesthesia department preparedness for a multiple-casualty incident: Lessons learned from the Fukushima earthquake and the Japanese nuclear power disaster*. Anesthesiology clinics 31.1, S. 117–125. ISSN: 1932-2275. DOI: 10.1016/j.anclin.2012.11.007.

Murti, M., Bayleyegn, T., Stanbury, M., Flanders, W. D., Yard, E., Nyaku, M. und Wolkin, A. (2014). *Household emergency preparedness by housing type from a community assessment for public health emergency response (CASPER), Michigan*. Disaster Medicine and Public Health Preparedness 8.1, S. 12–19. ISSN: 1935-7893. DOI: 10.1017/dmp.2013.111.

Nelson, D. R., Adger, W. N. und Brown, K. (2007). *Adaptation to Environmental Change: Contributions of a Resilience Framework*. Annual Review of Environment and Resources 32.1, S. 395–419. ISSN: 1543-5938. DOI: 10.1146/annurev.energy.32.051807.090348.

Neunteufel, R., Richard, L., Perfler, R., Tuschel, S., Mader, K. und Haas, E. (2010). *Studie Wasserverbrauch und Wasserbedarf: Teil 1: Literaturstudie zum Wasserverbrauch - Einflussfaktoren, Entwicklung und Prognosen*.

Nghiem, L. D., Morgan, B., Donner, E. und Short, M. D. (2020). *The COVID-19 pandemic: Considerations for the waste and wastewater services sector*. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 1, S. 100006. ISSN: 26660164. DOI: 10.1016/j.cscee.2020.100006.

Niemeyer, G. (1977). *Kybernetische System- und Modelltheorie: System dynamics*. Systemstudium Wirtschaftsinformatik. München: Vahlen. ISBN: 3800605813.

OECD (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. Organisation for Economic Co-operation and Development.

OECD (2019). *Good Governance for Critical Infrastructure Resilience*. OECD Reviews of Risk Management Policies. Paris: OECD Publishing. ISBN: 9264988521.

Ostfeld, A., Kogan, D. und Shamir, U. (2002). *Reliability simulation of water distribution systems – single and multiquality*. Urban Water 4.1, S. 53–61. ISSN: 14620758. DOI: 10.1016/S1462-0758(01)00055-3.

ÖVGW W 74 (2017). *Trinkwassernotversorgung, Krisenvorsorgeplanung in der Trinkwasserversorgung*. Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.

Ozger, S. S. und Mays, L. W. (2003). *A semi-pressure-driven approach to reliability assessment of water distribution networks*. In: *Proceedings of the 30th IAHR Congress*. Hrsg. von IAHR.

Pagano, A., Pluchinotta, I., Giordano, R. und Vurro, M. (2017). *Drinking water supply in resilient cities: Notes from L'Aquila earthquake case study*. Sustainable Cities and Society 28, S. 435–449. ISSN: 22106707. DOI: 10.1016/j.scs.2016.09.005.

Parra, S., Krause, S., Angermair, G. und Obermeyer, B. (2019). *Systematische Anpassungsplanung kommunaler Wasserversorgungsnetze: Teil 1: Technische Bewertung von Wasserversorgungsnetzen unter Berücksichtigung der Kriterien Betrieb, Zustand und Versorgungssicherheit.*. GWF 06, S. 89–98.

Paton, D. und Johnston, D. (2006). *Disaster Resilience: An Integrated Approach*. Springfield: Charles C Thomas. ISBN: 9780398076634. URL: http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=564163.

Pearce, A. R. und Vanegas, J. A. (2002). *Defining sustainability for built environment systems: an operational framework*. International Journal of Environmental Technology and Management 2.1/2/3, S. 94. ISSN: 1466-2132. DOI: 10.1504/IJETM.2002.000780.

Pelling, M. (2006). *Measuring urban vulnerability to natural disaster risk: Benchmarks for sustainability*. Open House International 31.1, S. 125–132.

Petermann, T., Bradke, H., Lüllmann, A., Poetzsch, M. und Riehm, U. (2011). *Was bei einem Blackout geschieht: Folgen eines langandauernden und großflächigen Stromausfalls*. 2. Aufl. Bd. 33. Studien des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin: Nomos. DOI: 10.5771/9783845270210.

Phan, T. D., Smart, J. C., Sahin, O., Capon, S. J. und Hadwen, W. L. (2018). *Assessment of the vulnerability of a coastal freshwater system to climatic and non-climatic changes: A system dynamics approach*. Journal of Cleaner Production 183, S. 940–955. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.169.

Prasad, T. D. und Park, N.-S. (2004). *Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management 130.1, S. 73–82. ISSN: 0733-9496. DOI: 10.1061/(ASCE)0733âĂŞ9496(2004)130:1(73).

Prokopf, C. (2020). *Handeln vor der Katastrophe als politische Herausforderung: Mehr Vorsorge durch die Governance von Risiken*. 1. Auflage. Bd. Band 13. Sicherheit und Gesellschaft. Baden-Baden: Nomos. ISBN: 978-3-8487-6489-1.

Prud'homme, A. M. (2008). *Business continuity in the supply chain: Planning for disruptive events*. ISBN: 0549620826.

Qiao, J., Jeong, D., Lawley, M., Richard, J.-P. P., Abraham, D. M. und Yih, Y. (2007). *Allocating security resources to a water supply network*. IIE Transactions 39.1, S. 95–109. ISSN: 0740-817X. DOI: 10.1080/07408170600865400.

Quarantelli, E. L. (1998). *What is a disaster? Perspectives on the question*. London: Routledge. ISBN: 0415178991. URL: http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0649/97030849-d.html.

Reed, B. und Shaw, R. (1995). *Emergency water supply: Technical Brief No. 44*. Waterlines 13.4.

Reed, B. und Reed, B. (2011). *How much water is needed in emergencies*. Technical notes on drinking-water, sanitation and hygiene in emergencies.

Reller, A. (2000). *Greener hospitals: Improving environmental performance*. Augsburg: Wiss.-Zentrum Umwelt, Univ. ISBN: 3-00-012582-5.

Richardson, G. P. (2011). *Reflections on the foundations of system dynamics*. System Dynamics Review 27.3, S. 219–243. ISSN: 08837066. DOI: 10.1002/sdr.462.

Rose, A. (2004). *Defining and measuring economic resilience to disasters*. Disaster Prevention and Management: An International Journal 13.4, S. 307–314. ISSN: 0965-3562. DOI: 10.1108/09653560410556528.

Russell, L. A., Goltz, J. D. und Bourque, L. B. (1995). *Preparedness and Hazard Mitigation Actions before and after Two Earthquakes*. Environment and Behavior 27, S. 744–770.

Safiullin, N. und Safiullin, N. (2018). *Static and dynamic models in economics*. Journal of Physics: Conference Series 1015, S. 032117. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032117.

Sahin, O., Siems, R., Richards, R. G., Helfer, F. und Stewart, R. A. (2017). *Examining the potential for energy-positive bulk-water infrastructure to provide long-term urban water security: A systems approach*. Journal of Cleaner Production 143, S. 557–566. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.074.

Sandholz, S., Wannewitz, M., Krist, L. und Garschagen, M. (2019). *Stand der Vorbereitung der Bevölkerung auf längere KRITIS-Ausfälle*. In: *Wege zu einem Mindestversorgungskonzept*. Hrsg. von A. Fekete, F. Neisser, K. Tzavella und C. Hetkämper. Köln: Technische Hochschule Köln, Institut für Rettungsingenieurwesen und Gefahrenabwehr, Projekt KIRMin, S. 29–31. ISBN: 978-3-946573-14-2.

Sargent, R. G. (2013). *Verification and validation of simulation models*. Journal of Simulation 7.1, S. 12–24. ISSN: 1747-7778. DOI: 10.1057/jos.2012.20.

Schattka, M., Puchkova, A. und McFarlane, D. (2016). *Framework for Simulation-based Performance Assessment and Resilience Improvement*. IFAC-PapersOnLine 49.12, S. 289–294. ISSN: 24058963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.619.

Schauser, I., Otto, S., Schneiderbauer, S., Harvey, A., Hodgson, N., Robrecht, H., Morchain, D., Schrander, J.-J., Khovanskaia, M., Celikyilmaz-Aydemir, G., Prutsch, A. und McCallum, S. (2010). *Urban Regions: Vulnerabilities, Vulnerability Assessments by Indicators and Adaptation Options for Climate Change Impacts*. Bilthoven: European Topic Center on Air and Climate Change.

Schlicht, H. (1999). *Instandhaltung von Wasserverteilungsnetzen*. In: *Wassertransport und -verteilung*. Hrsg. von R. Sattler und W. Hirner. DVGW Lehr- und Handbuch Wasserversorgung. München: Oldenbourg, S. 373–403. ISBN: 9783486262193.

Schwaninger, M. und Groesser, S. (2011). *System Dynamics Modeling: Validation for Quality Assurance*. In: *Complex Systems in Finance and Econometrics*. Hrsg. von R. A. Meyers. Springer, New York, NY, S. 767–781. ISBN: 978-1-4419-7701-7.

Sharifi, A. (2016). *A critical review of selected tools for assessing community resilience*. Ecological Indicators 69, S. 629–647. ISSN: 1470160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.05.023.

Sharifi, A. und Yamagata, Y. (2016a). *On the suitability of assessment tools for guiding communities towards disaster resilience*. International Journal of Disaster Risk Reduction 18, S. 115–124. ISSN: 22124209. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2016.06.006.

Sharifi, A. und Yamagata, Y. (2016b). *Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 60, S. 1654–1677. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.028.

Shin, S., Lee, S., Judi, D., Parvania, M., Goharian, E., McPherson, T. und Burian, S. (2018). *A Systematic Review of Quantitative Resilience Measures for Water Infrastructure Systems*. Water 10.2, S. 164. ISSN: 2073-4441. DOI: 10.3390/w10020164.

Smadi, H., Al Theeb, N. und Bawa'neh, H. (2018). *Logistics system for drinking water distribution in post disaster humanitarian relief, Al-Za'atari camp*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management 8.4, S. 477–496. ISSN: 2042-6747. DOI: 10.1108/JHLSCM-12-2017-0072.

Soares, R. d. P. und Secchi, A. R. (2012). *Structural analysis for static and dynamic models*. Mathematical and Computer Modelling 55.3-4, S. 1051–1067. ISSN: 08957177. DOI: 10.1016/j.mcm.2011.09.030.

Sophocleous, S., Nikoloudi, E., Mahmoud, H., Woodward, K. und Romano, M. (2018). *Simulation-Based Framework for the Restoration of Earthquake-Damaged Water Distribution Networks using a Genetic Algorithm*. WDSA / CCWI Joint Conference 1.

Sowby, R. B. (2020). *Emergency preparedness after COVID-19: A review of policy statements for the U.S. water sector*. Utilities Policy, S. 101058. ISSN: 09571787. DOI: 10.1016/j.jup.2020.101058.

Spellman, F. R. (2007). *Water Infrastructure Protection and Homeland Security*. Lanham: Government Institutes. ISBN: 9780865874183. URL: http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1318564.

Sphere Association (2018). *The Sphere Handbook: Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response*. fourth edition. Geneva, Switzerland. ISBN: 978-1-908176-707. URL: www.spherestandards.org/handbook.

Srdjevic, B., Medeiros, Y. D. P. und Faria, A. S. (2004). *An Objective Multi-Criteria Evaluation of Water Management Scenarios*. Water Resources Management 18.1, S. 35–54. ISSN: 0920-4741. DOI: 10.1023/B:WARM.0000015348.88832.52.

States, S. (2010). *Security and emergency planning for water and wastewater utilities*. Denver, Colo: American Water Works Association. ISBN: 9781583217450. URL: http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10522347.

Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: McGraw Hill Higher Education. ISBN: 9780072311358.

Sueddeutsche Zeitung (2016). *Der Bach, der den Tod brachte, wird zum neuen Zentrum von Simbach*. URL: https://www.sueddeutsche.de/bayern/nach-dem-hochwasser-der-bach-der-tod-und-verderben-brachte-wird-zum-neuen-zentrum-1.3412272.

SVGW W VN 300 (2007). *Wegleitung für die Planung und Realisierung der Trinkwasserversorgung in Notlagen (TWN)*. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.

System Dynamics Applications (2005). *Verification: System Dynamics Pitfalls and Pointers*. URL: http://www.systemdynamicsapplications.com/tips/verifimdashmaszbalanytestiofsistemdinamimodel.htm.

TAB (2010). *Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften - am Beispiel eines großräumigen Ausfalls der Stromversorgung: Arbeitsbericht Nr.141*. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag.

Thimet, J. und Krause, S. (2017). *Trinkwasserversorgung: Pflichtaufgabe jeder Gemeinde*. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Bd. 2. Praxisreihe des Bayerischen Gemeindetags. Wiesbaden: Kommunal- und Schul-Verlag Wiesbaden. ISBN: 978-3-8293-1310-0.

THW (2016). *THW sichert Notversorgung mit Trinkwasser in Simbach: Presse-Information*. Bonn. URL: https://www.thw.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Dokumente/Presse/Pressemitteilungen/2016/06/download_006_trinkwasser_simbach.pdf.

THW (2018). *Weltwassertag: THW sichert Trinkwasserversorgung: Presse-Information*. Bonn. URL: https://www.thw.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Dokumente/Presse/Pressemitteilungen/2018/03/download_002_pm_weltwassertag.pdf?__blob=publicationFile.

Tierney, K. und Bruneau, M. (2007). *Conceptualizing and measuring resilience*. TR News 250, S. 14–17.

Ulrich, H., Dyllick, T. und Probst, G. J. B. (1984). *Management: Hrsg. von Thomas Dyllick u. Gilbert J. B. Probst*. Bd. 13. (Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmungsführung. Bern & Stuttgart: Haupt. ISBN: 325803446x.

UNDRR (2004). *Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives: Volume II Annexes*. 2004 ver. New York und Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

UNDRR (2009). *Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

UNDRR (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDDR): United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

UNDRR (2017). *Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

UNHCR (1992). *Water Manual for Refugee Situations*. Geneva, Switzerland: UN High Commissioner for Refugees.

USACE (2008). *Emergency Support Function #3 (ESF #3) Pocket Guide*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers.

USAID (2005). *Field Operations Guide: For Disaster Assessment and Response*. U.S. Agency for International Development.

VDI 3807-2 (2016). *Characteristic consumption values for buildings: Characteristic heating-energy, electrical-energy and water consumption values*.

VDT (2008). *Smithfield Design and Construction Standards; Department of Transportation*. Smithfield, VA, USA. URL: https://smithfield.municipalcodeonline.com/book?type=construction#name=PART_I_DESIGN_STANDARDS.

Vugrin, E. D., Warren, D. E., Ehlen, M. A. und Camphouse, R. C. (2010). *A Framework for Assessing the Resilience of Infrastructure and Economic Systems*. In: *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems*. Hrsg. von K. Gopalakrishnan und S. Peeta. Bd. 24. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 77–116. ISBN: 978-3-642-11404-5. DOI: 10.1007/978-3-642-11405-2_3.

Wagner, J. M., Shamir, U. und Marks, D. H. (1988). *Water Distribution Reliability: Simulation Methods*. Journal of Water Resources Planning and Management 114.3, S. 276–294. ISSN: 0733-9496. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(276).

Walton, B. (2020). *Water Utilities' Biggest Coronavirus Concern Is Staffing*. URL: https://www.circleofblue.org/2020/world/water-utilities-biggest-coronavirus-concern-is-staffing/.

Weick, K. E. und Sutcliffe, K. M. (2007). *Managing the unexpected: Resilient performance in an age of uncertainty*. 2nd ed. Bd. v.8. J-B US non-Franchise Leadership. San Francisco: Jossey-Bass. ISBN: 9780470178591. URL: http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10296261.

Welter, G., Bieber, S., Bonnaffon, H. und Freundberg, S. (2011). *Emergency water supply planning for the national capital region*. Journal of Emergency Management 9.6, S. 17–28.

Welter, G., Socher, M., Needham, P., Bieber, S. und Bonnaffon, H. (2010). *Cross-sector emergency planning for water supply utilities and healthcare facilities*. Journal of the American Water Works Association 102.1, S. 68–78.

Welter, G., Socher, M., Needham, P., Bieber, S. und Bonnaffon, H. (2013). *Cross-sector emergency planning for water supply utilities and healthcare facilities*. Journal of healthcare risk management: the journal of the American Society for Healthcare Risk Management 32.4, S. 5–14. DOI: 10.1002/jhrm.21105.

West, C. T. und Lenze, D. G. (1994). *Modeling the Regional Impact of Natural Disaster and Recovery: A General Framework and an Application to Hurricane Andrew*. International Regional Science Review 17.2, S. 121–150. ISSN: 0160-0176. DOI: 10.1177/016001769401700201.

WHO (2002). *Environmental health in emergencies and disasters: a practical guide*. World Health Organization. ISBN: 92 4 154541 0.

Williams, P. R., Nolan, M. und Panda, A. (2014). *Disaster Resilience Scorecard for Cities*.

Wochenblatt (2016). *Die städtische Wasserversorgung in Simbach funktioniert nur eingeschränkt*. URL: https://www.wochenblatt.de/news-stream/pfarrkirchen-rottal-inn/artikel/151097/die-staedtische-wasserversorgung-in-simbach-funktioniert-nur-eingeschraenkt (besucht am 15. 05. 2020).

Wolstenholme, E. F. (1994). *System enquiry: A system dynamics approach*. Reprinted. Chichester: Wiley. ISBN: 9780471927839.

Wolstenholme, E. F. (1999). *Qualitative vs quantitative modelling: the evolving balance*. Journal of the Operational Research Society 50.4, S. 422–428. ISSN: 0160-5682. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600700.

WSDH (2009). *Water System Design Manual; Division of Environmental Health*. Olympia, WA, USA,

Yates, J. und Sanjeevi, S. (2012). *Assessing the impact of vulnerability modeling in the protection of critical infrastructure*. Journal of Geographical Systems 14.4, S. 415–435. ISSN: 1435-5930. DOI: 10.1007/s10109-012-0161-4.

Zhang, Q., Zheng, F., Diao, K., Ulanicki, B. und Huang, Y. (2018). *Solving the battle of post-disaster response and restauration (BPDRR) problem with the aid of multi-phase optimization framework*. WDSA / CCWI Joint Conference 1.

Zhuang, B., Lansey, K. und Kang, D. (2013). *Resilience/Availability Analysis of Municipal Water Distribution System Incorporating Adaptive Pump Operation*. Journal of

Hydraulic Engineering 139.5, S. 527–537. ISSN: 0733-9429. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000676.

Zobel, C. W. (2010). *Comparative Visualization of Predicted Disaster Resilience*. Proceedings of the 7th International ISCRAM Conference.

Abkürzungsverzeichnis

1. WasSV	Erste Wassersicherstellungsverordnung
AVBWasserV	Verordnung über allgemeine Bedingungen zur Versorgung mit Wasser
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
CLD	Causal-Loop-Diagramm
DRK	Deutsches Rotes Kreuz
E	Evaluierung
GG	Grundgesetz
IfSG	Infektionsschutzgesetz - Gesetz zur Verhütung und Bekämpfung von Infektionskrankheiten beim Menschen
KM	Krisenmanagement
KZV	Konzeption Zivile Verteidigung; siehe auch BMI (2016)
n.b.	nicht bekannt
NoWa I	Forschungsprojekt „Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung - Kapazitäten und Ressourcen“
NoWa II	Forschungsprojekt „Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung - Notfallvorsorgekonzepte“
NVP	Notfallvorsorgeplanungsindikator
$\mathbf{NVP_E}$	Notfallvorsorgeplanungsindikator ermittelt mit einer auf Expertenmeinung basierten Gewichtung
$\mathbf{NVP_G}$	Notfallvorsorgeplanungsindikator ermittelt mit einer statistisch gleichverteilten Gewichtung
$\mathbf{NWV_{MHW30}}$	Notwasserversorgungshöchstwerte für eine Versorgungsdauer von 30 Tagen
RA	Risikoanalyse
SD	System Dynamics
SoVI	Index der sozialen Verwundbarkeit (engl. *Social Vulnerability Index*)
THW	Technisches Hilfswerk
TrinkwV	Trinkwasserverordnung - Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch
UN	Vereinte Nationen (engl. *United Nations*)
Vensim®	Ventana Simulation Environment, System Dynamics Softwareprogramm von Ventanta Systems, Inc.

VM	Vorbeugende Maßnahmen
VP	Vorplanung
WasSiG	Wassersicherstellungsgesetz - Gesetz über die Sicherstellung von Leistungen auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft für Zwecke der Verteidigung
WHG	Wasserhaushaltsgesetz - Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts
WVU	Wasserversorgungsunternehmen
ZMZ	Zivil-Militärische Zusammenarbeit
ZSKG	Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz

Symbolverzeichnis

$A_{VL,i}$	Fläche des Rohrquerschnitts der Verbindungsleitung [m^2]
$A_{mL,i}$	Fläche des Rohrquerschnitts der mobilen Leitung [m^2]
$C_{AAd,i}$	Tägliche Abfüllkapazität [m^3/d]
$C_{Ad,i}$	Tägliche Aufbereitungskapazität [m^3/d]
$C_{Gd,i}$	Tägliche Gewinnungskapazität [m^3/d]
$C_{Td,i}$	Tägliche Transportkapazität [m^3/d]
$C_{mA,di}$	Tägliche Kapazität der mobilen Aufbereitungsanlagen [$m^3/(mA \cdot d)$]
E	Anzahl Einwohner [E]
P_0	Leistung im Normalbetrieb [%]
P_{ges}	Gesamte Bevölkerung [P]
P_t	Leistungskurve [%]
P_v	Versorgte Personen [P]
Q_{VL}	Durchfluss einer Verbindungsleitung [m^3/s]
Q_{aE}	Durch Ersatzversorgung abgegebene Wassermenge [m^3]
Q_{bE}	Durch Ersatzversorgung benötigte Wassermenge [m^3]
$Q_{d,1A}$	Tägliche Wassermenge aus den eigenen Gewinnungsanlagen, die den geltenden Qualitätsanforderungen entspricht [m^3/d]
$Q_{d,1}$	Tägliche Wassermenge aus den eigenen Gewinnungsanlagen [m^3/d]
$Q_{d,WasSV}$	Täglicher leitungsungebundener Wasserbedarf gemäß 1. WasSV [m^3/d]
$Q_{d,mL}$	Täglicher Durchfluss durch mobile Leitung [m^3/d]
$Q_{d,max}$	Spitzentagesbedarf [m^3/d]
$Q_{d,m}$	Mittlerer täglicher Wasserbedarf [m^3/d]
$Q_{d,sysMV}$	Täglicher leitungsgebundener Wasserbedarf ermittelt durch systemabhängige Mindestwassermenge [m^3/d]
$V_{T,i}$	Fassungsvermögen eines Transportfahrzeugs oder transportablen Behälters [m^3]
$c_{AAd,i}$	Spezifische stündliche Kapazität einer Abfüllanlage [$m^3/(AA \cdot d)$]
$c_{Ah,i}$	Spezifische stündliche Kapazität einer Aufbereitungsanlage [$m^3/(A \cdot d)$]
$c_{Gd,i}$	Spezifische tägliche Kapazität einer Gewinnungsanlage [$m^3/(G \cdot d)$]
$c_{Td,i}$	Spezifische tägliche Transportkapazität [$m^3/(T \cdot d)$]
$c_{d,mA}$	Spezifische tägliche Kapazität der mobilen Aufbereitungsanlagen [$m^3/(mA \cdot d)$]
f_d	Tagesspitzenfaktor [-]

$n_{A,i}$	Anzahl Aufbereitungsanlagen [A]
$n_{AA,i}$	Anzahl Abfüllanlagen [AA]
$n_{G,i}$	Anzahl Gewinnungsanlagen [G]
$n_{T,i}$	Anzahl der Transportfahrzeuge [T]
$n_{mA,i}$	Anzahl mobile Aufbereitungsanlagen [mA]
$n_{mL,i}$	Anzahl der mobilen Leitungen [mobL]
$q_{d,mL}$	Spezifischer täglicher Durchfluss durch eine mobile Leitung [$m^3/(mobL \cdot d)$]
$q_{d,m}$	Mittlerer einwohnerbezogener Tagesbedarf [$l/(P \cdot d)$]
$t_{AAd,i}$	Tägliche Betriebsdauer einer Abfüllanlage [h/d]
$t_{Ad,i}$	Tägliche Betriebsdauer einer Aufbereitungsanlage [h/d]
t_A	Zeitpunkt des Ausfalls [d]
t_S	Zeitpunkt des Schadensereignisses [d]
$t_{T,i}$	Dauer einer Tour [h]
$t_{Td,i}$	Tägliche Betriebsdauer eines Transportfahrzeugs [h/d]
t_W	Zeitpunkt der Wiederherstellung [d]
$t_{mLd,i}$	Tägliche Betriebsdauer der mobilen Leitung [h/d]
$v_{VL,i}$	Fließgeschwindigkeit in Verbindungsleitung [m/s]
$v_{mL,i}$	Fließgeschwindigkeit in mobiler Leitung [m/s]

Anhangverzeichnis

A Rechtliche Rahmenbedingungen und Verantwortlichkeiten bei der Wasserversorgung in Notsituationen 170

B Ergänzende quantitative und qualitative Anforderungen an die Wasserversorgung in Notsituationen 171

C Schadensereignisanalyse zur Identifikation von geeigneten Versorgungsarten 172

D Programmtechnische Umsetzung des Modells NOTWASSER 203
D.1 Gleichungen des SD Modells NOTWASSER 203
D.2 Datengrundlage zur Ermittlung des Bevorratungsverhaltens der deutschen Bevölkerung 238

E Indikatorsystem zur Analyse des Status Quo der Notfallvorsorgeplanung 240
E.1 Expertenbasierte Gewichtung 241
E.1.1 Fragebogen zur Ermittlung der expertenbasierten Gewichtung . . . 241
E.1.2 Charakterisierung befragte Experten 248
E.2 Erhebungsbogen des NoWa I Forschungsprojekts 249
E.3 Ermittlung des Notfallvorsorgeplanungsindikators anhand des NoWa I Datensatzes 256
E.4 Differenz der Notfallvorsorgeplanungsindikatoren zwischen expertenbasierter und gleichverteilter Gewichtung 259
E.5 Erhebungsbogen zur Ermittlung des vollständigen Notfallvorsorgeplanungsindikators 260
E.6 Gleichungen zur Ermittlung des vollständigen Notfallplanungsindikators . 272

A Rechtliche Rahmenbedingungen und Verantwortlichkeiten bei der Wasserversorgung in Notsituationen

Tabelle A.1: Erläuterungen zur Differenzierung der Akteure und Entscheider anhand des Schadensausmaßes gemäß Bross, Wienand et al. (2019)

	Normalzustand mit Störung
Ausmaß	Versorgungsunterbrechung kleiner Gebiete (z. B. einzelner Straßenzug) oder Überschreitung Grenzwerte TrinkwV (ohne Gesundheitsgefährdung)
Akteur	WVU
Entscheider	Gesundheitsamt
	Notfall/Krise
Ausmaß	Versorgungsunterbrechung (z. B. Ort/Ortsteil) oder Überschreitung Grenzwerte TrinkwV (mit Gesundheitsgefährdung)
Akteur	WVU, Gesundheitsamt, Katastrophenschutzbehörden, THW, Feuerwehr, Private Dienstleister
Entscheider	Gesundheitsamt, Kreisleitstelle
	Katastrophenfall
Ausmaß	Großflächiger Ausfall oder Unterbrechung der Trinkwasserversorgung (Große Anzahl von betroffenen Personen)
Akteur	WVU, Gesundheitsamt, Katastrophenschutzbehörden, THW, Feuerwehr, Private Dienstleister
Entscheider	Verwaltungsstab (Krisenstab)

B Ergänzende quantitative und qualitative Anforderungen an die Wasserversorgung in Notsituationen

Tabelle B.1: Qualitative Mindestversorgungsstandards für die Wasserversorgung in Notsituationen gemäß Sphere Association (2018)

Parameter	Mindestversorgungsstandard
Fäkalcoliforme	0 in 100 ml
Trübung	<5 NTU
Chlorgehalt	≈0,5 mg/l

Tabelle B.2: Gegenüberstellung der Grenzwerte der TrinkwV für die Trinkwasser- bzw. Ersatzwasserversorgung und der Notwasserversorgungshöchstwerte für 30 Tage NWV_{MHW30} für die Notwasserversorgung

Substanz	Grenzwerte der TrinkwV für die Trinkwasser- bzw. Ersatzwasserversorgung mg/l	Notwasserversorgungs-höchstwert NWV_{MHW30} mg/l
Aluminium	0,2	1
Ammonium	0,5	35
Antimon	0,005	0,5
Arsen	0,01	0,01
Benzol	0,001	4
Blei	0,01	0,01
Bor	1	55
Cadmium	0,003	0,38
Chlorid	250	600
Chrom	0,05	2,3
CKW 1,1,1-Trichlorethan	–	20

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle B.2

Substanz	Grenzwerte der TrinkwV für die Trinkwasser- bzw. Ersatzwasserversorgung mg/l	Notwasserversorgungs-höchstwert NWV_{MHW30} mg/l
1,2-Dichlorethan	0,003	350
Dichlormethan	–	10
Tetrachlorethen	0,01 (Summe von Tetrachlorethen	5
Trichlorethen	und Trichlorethen)	0,11
Cyanid	0,05	1,9
Fluoride	1,5	1,5
Kupfer	2	2
Mangan	0,05	0,2
Nickel	0,02	0,42
Nitrat	50	50
Nitrit	0,5	3
Pflanzenschutzmittel	0,0005	1,75
Quecksilber	0,001	0,06
Selen	0,01	0,25
Sulfat	250	500
Trihalomethane	0,050	
Chloroform		15
Bromoform		15
Bromdichlormethan		15
Chlordibrommethan		15
Uran	0,01	0,09
Zink	kein Grenzwert	5

C Schadensereignisanalyse zur Identifikation von geeigneten Versorgungsarten

Tabelle C.1: Schadensereignisse 1-6

Schadensereignis	SE_1	SE_2	SE_3	SE_4	SE_5	SE_6
Notsituation	N_2	N_2	N_1	N_3	N_1	N_7
Gewinnung	j	j	j	j	j	j
Aufbereitung	j	j	j	j	t	t
Verteilung	j	j	t	n	j	j
Speicherung	t	n	j	j	j	j
mobile Aufbereitung					j	t
eigene Gewinnung	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	B_1
anderer Versorger						A_1
Brunnen						C_1
Oberflächenwasser						D_1
Verbindungsleitung						A_2
mobile Leitungen	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	$B_2A_2{}^*C_2D_2$
Tankwagen	$A_2{}^*$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$
Abfüllanlage			$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$		$B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter			A_3		A_3	A_3
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3	$A_3{}^*$		$A_3{}^*$	$A_3{}^*$
direkte Abgabe			$A_3{}^{**}$	A_3		$B_3C_3D_3$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.2: Schadensereignisse 7-12

Schadensereignis	SE_7	SE_8	SE_9	SE_{10}	SE_{11}	SE_{12}
Notsituation	N_{10}	N_1	N_7	N_{18}	N_4	N_7
Gewinnung	j	j	j	j	t	t
Aufbereitung	t	n	n	n	j	j
Verteilung	j	j	j	j	j	j
Speicherung	j	j	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	n	j	t	n	j	t
eigene Gewinnung	B_1	A_1	B_1		D_1	B_1
anderer Versorger	A_1		A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen			C_1		B_1	C_1
Oberflächenwasser			D_1		C_1	D_1
Verbindungsleitung	A_2		A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$B_2A_2^*$	A_2	$B_2A_2^*C_2D_2$	A_2^*	$D_2A_2^*B_2C_2$	$B_2A_2^*C_2D_2$
Tankwagen	$B_2^*A_2^{**}$	A_2^*	$B_2^*A_2^{**}C_2^*D_2^*$	A_2^{**}	$D_2^*A_2^{**}B_2^*C_2^*$	$B_2^*A_2^{**}C_2^*D_2^*$
Abfüllanlage	B_2^{**}		$B_2^{**}C_2^{**}D_2^{**}$		D_2^{**}	$B_2^{**}A_2^{***}C_2^{**}D_2^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter	A_3	A_3	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$	A_3
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3^*	A_3^*	A_3^*	A_3^*	$A_3^*B_3^*C_3^*$	A_3^*
direkte Abgabe	B_3		$B_3C_3D_3$		D_3	$B_3A_3^*C_3D_3$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
A_1^*, A_1^{**}, A_1^{***}	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.3: Schadensereignisse 13-18

Schadensereignis	SE_{13}	SE_{14}	SE_{15}	SE_{16}	SE_{17}	SE_{18}
Notsituation	N_{10}	N_{13}	N_{16}	N_{18}	N_2	N_2
Gewinnung	t	n	n	n	j	j
Aufbereitung	j	j	j	j	j	j
Verteilung	j	j	j	j	t	t
Speicherung	j	j	j	j	t	n
mobile Aufbereitung	n	j	t	n		
eigene Gewinnung	B_1				A_1	A_1
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1		
Brunnen		B_1	B_1			
Oberflächenwasser		C_1	C_1			
Verbindungsleitung	A_2	A_2	A_2	A_2		
mobile Leitungen	$B_2A_2^*$	$A_2^*B_2C_2$	$A_2^*B_2C_2$	A_2^*	A_2	A_2
Tankwagen	$B_2^*A_2^{**}$	$A_2^{**}B_2^*C_2^*$	$A_2^{**}B_2^*C_2^*$	A_2^{**}	A_2^*	A_2^*
Abfüllanlage	B_2^{**}		$B_2^{**}C_2^{**}$		A_2^{**}	A_2^{**}
Einspeisung in Hochbehälter	A_3	$A_3B_3C_3$	A_3	A_3		
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3^*	$A_3^*B_3^*C_3^*$	A_3^*	A_3^*	A_3	A_3
direkte Abgabe	B_3		B_3C_3		A_3^*	A_3^*

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
A_1^*, A_1^{**}, A_1^{***}	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.4: Schadensereignisse 19-24

Schadensereignis	SE_{19}	SE_{20}	SE_{21}	SE_{22}	SE_{23}	SE_{24}
Notsituation	N_3	N_3	N_1	N_8	N_{11}	N_2
Gewinnung	j	j	j	j	j	j
Aufbereitung	j	j	t	t	t	t
Verteilung	n	n	j	j	j	j
Speicherung	t	n	t	t	t	n
mobile Aufbereitung			j	t	n	j
eigene Gewinnung	A_1	A_1	A_1	B_1	B_1	A_1
anderer Versorger				A_1	A_1	
Brunnen				C_1		
Oberflächenwasser				D_1		
Verbindungsleitung				A_2	A_2	
mobile Leitungen	A_2	A_2	A_2	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$B_2A_2{}^*$	A_2
Tankwagen	$A_2{}^*$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}$	$A_2{}^*$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$		$B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}$	
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz			A_3	A_3	A_3	A_3
direkte Abgabe	A_3	A_3		$B_3C_3D_3$	B_3	

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.5: Schadensereignisse 25-30

Schadensereignis	SE_{25}	SE_{26}	SE_{27}	SE_{28}	SE_{29}	SE_{30}
Notsituation	N_8	N_{11}	N_1	N_8	N_{19}	N_2
Gewinnung	j	j	j	j	j	j
Aufbereitung	t	t	n	n	n	n
Verteilung	j	j	j	j	j	j
Speicherung	n	n	t	t	t	n
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	B_1	B_1	A_1	B_1		A_1
anderer Versorger	A_1	A_1		A_1	A_1	
Brunnen	C_1			C_1		
Oberflächenwasser	D_1			D_1		
Verbindungsleitung	A_2	A_2		A_2	A_2	
mobile Leitungen	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$B_2A_2{}^*$	A_2	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$A_2{}^*$	A_2
Tankwagen	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}$	$A_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^*$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}$		$B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$		
Einspeisung in Hochbehälter				A_3		
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3	A_3	$A_3{}^*$	A_3	A_3
direkte Abgabe	$B_3C_3D_3$	B_3		$B_3C_3D_3$		

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.6: Schadensereignisse 31-36

Schadensereignis	SE_{31}	SE_{32}	SE_{33}	SE_{34}	SE_{35}	SE_{36}
Notsituation	N_8	N_{19}	N_5	N_8	N_{11}	N_5
Gewinnung	j	j	t	t	t	t
Aufbereitung	n	n	j	j	j	j
Verteilung	j	j	j	j	j	j
Speicherung	n	n	t	t	t	n
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	B_1		D_1	B_1	B_1	D_1
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	C_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	D_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$A_2{}^*$	$D_2A_2{}^*B_2C_2$	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$B_2A_2{}^*$	$D_2A_2{}^*B_2C_2$
Tankwagen	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^{**}$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$		$D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}$	$D_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter				A_3		
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$	$A_3{}^*$	A_3	$A_3B_3C_3$
direkte Abgabe	$B_3C_3D_3$		D_3	$B_3A_3{}^*C_3D_3$	B_3	D_3

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.7: Schadensereignisse 37-42

Schadensereignis	SE_{37}	SE_{38}	SE_{39}	SE_{40}	SE_{41}	SE_{42}
Notsituation	N_8	N_{11}	N_{14}	N_{17}	N_{19}	N_{14}
Gewinnung	t	t	n	n	n	n
Aufbereitung	j	j	j	j	j	j
Verteilung	j	j	j	j	j	j
Speicherung	n	n	t	t	t	n
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	B_1	B_1				
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	C_1		B_1	B_1		B_1
Oberflächenwasser	D_1		C_1	C_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$B_2A_2^*C_2D_2$	$B_2A_2^*$	$A_2^*B_2C_2$	$A_2^*B_2C_2$	A_2^*	$A_2^*B_2C_2$
Tankwagen	$B_2^*A_2^{**}C_2^*D_2^*$	$B_2^*A_2^{**}$	$A_2^{**}B_2^*C_2^*$	$A_2^{**}B_2^*C_2^*$	A_2^{**}	$A_2^{**}B_2^*C_2^*$
Abfüllanlage	$B_2^{**}C_2^{**}D_2^{**}$	B_2^{**}		$B_2^{**}C_2^{**}$		
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$
direkte Abgabe	$B_3C_3D_3$	B_3		B_3C_3		

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
A_1^*, A_1^{**}, A_1^{***}	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.8: Schadensereignisse 43-48

Schadensereignis	SE_{43}	SE_{44}	SE_{45}	SE_{46}	SE_{47}	SE_{48}
Notsituation	N_{17}	N_{19}	N_1	N_7	N_{10}	N_3
Gewinnung	n	n	j	j	j	j
Aufbereitung	j	j	t	t	t	t
Verteilung	j	j	t	t	t	n
Speicherung	n	n	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung			A_1	B_1	B_1	A_1
anderer Versorger	A_1	A_1		A_1	A_1	
Brunnen	B_1			C_1		
Oberflächenwasser	C_1			D_1		
Verbindungsleitung	A_2	A_2		A_2	A_2	
mobile Leitungen	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}$	A_2	$B_2A_2{}^{*}C_2D_2$	$B_2A_2{}^{*}$	A_2
Tankwagen	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{*}$	$B_2{}^{*}A_2{}^{**}C_2{}^{*}D_2{}^{*}$	$B_2{}^{*}A_2{}^{**}$	$A_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}$		$A_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter			A_3	A_3	A_3	
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3	$A_3{}^{*}$	$A_3{}^{*}$	$A_3{}^{*}$	
direkte Abgabe	B_3C_3		$A_3{}^{**}$	$B_3A_3{}^{**}C_3D_3$	$B_3A_3{}^{**}$	A_3

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.9: Schadensereignisse 49-54

Schadensereignis	SE_{49}	SE_{50}	SE_{51}	SE_{52}	SE_{53}	SE_{54}
Notsituation	N_9	N_{12}	N_1	N_7	N_{18}	N_3
Gewinnung	j	j	j	j	j	j
Aufbereitung	t	t	n	n	n	n
Verteilung	n	n	t	t	t	n
Speicherung	j	j	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	A_1	A_1	A_1	B_1		A_1
anderer Versorger	B_1	B_1		A_1	A_1	
Brunnen	C_1			C_1		
Oberflächenwasser	D_1			D_1		
Verbindungsleitung				A_2	A_2	
mobile Leitungen	$A_2B_2C_2D_2$	A_2B_2	A_2	$B_2A_2{}^{*}C_2D_2$	$A_2{}^{*}$	A_2
Tankwagen	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}D_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}$	$B_2{}^{*}A_2{}^{**}C_2{}^{*}D_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter			A_3	A_3	A_3	
Einspeisung in Leitungsnetz			$A_3{}^{*}$	$A_3{}^{*}$	$A_3{}^{*}$	
direkte Abgabe	$A_3B_3C_3D_3$	A_3B_3	$A_3{}^{**}$	$B_3A_3{}^{**}C_3D_3$	$A_3{}^{**}$	A_3

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.10: Schadensereignisse 55-60

Schadensereignis	SE_{55}	SE_{56}	SE_{57}	SE_{58}	SE_{59}	SE_{60}
Notsituation	N_9	N_{20}	N_4	N_7	N_{10}	N_6
Gewinnung	j	j	t	t	t	t
Aufbereitung	n	n	j	j	j	j
Verteilung	n	n	t	t	t	n
Speicherung	j	j	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	A_1		D_1	B_1	B_1	D_1
anderer Versorger	B_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	C_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	D_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung			A_2	A_2	A_2	
mobile Leitungen	$A_2B_2C_2D_2$	A_2	$D_2A_2{}^*B_2C_2$	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$B_2A_2{}^*$	$D_2A_2B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^*$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}$	$D_2{}^*A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter			$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	
Einspeisung in Leitungsnetz			$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$	$A_3{}^*$	$A_3{}^*$	
direkte Abgabe	$A_3B_3C_3D_3$	A_3	$D_3A_3{}^{**}B_3{}^{**}C_3{}^{**}$	$B_3A_3{}^{**}C_3D_3$	$B_3A_3{}^{**}$	$D_3A_3B_3C_3$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.11: Schadensereignisse 61-66

Schadensereignis	SE_{61}	SE_{62}	SE_{63}	SE_{64}	SE_{65}	SE_{66}
Notsituation	N_9	N_{12}	N_{13}	N_{16}	N_{18}	N_{15}
Gewinnung	t	t	n	n	n	n
Aufbereitung	j	j	j	j	j	j
Verteilung	n	n	t	t	t	n
Speicherung	j	j	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	A_1	A_1				
anderer Versorger	B_1	B_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	C_1		B_1	B_1		B_1
Oberflächenwasser	D_1		C_1	C_1		C_1
Verbindungsleitung			A_2	A_2	A_2	
mobile Leitungen	$A_2B_2C_2D_2$	A_2B_2	$A_2{}^*B_2C_2$	$A_2{}^*B_2C_2$	$A_2{}^*$	$A_2B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*$	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter			$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	
Einspeisung in Leitungsnetz			$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$	$A_3{}^*$	$A_3{}^*$	
direkte Abgabe	$A_3B_3C_3D_3$	A_3B_3	$A_3{}^{**}B_3{}^{**}C_3{}^{**}$	$A_3{}^{**}B_3C_3$	$A_3{}^{**}$	$A_3B_3C_3$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.12: Schadensereignisse 67-72

Schadensereignis	SE_{67}	SE_{68}	SE_{69}	SE_{70}	SE_{71}	SE_{72}
Notsituation	N_{15}	N_{20}	N_4	N_7	N_{10}	N_4
Gewinnung	n	n	t	t	t	t
Aufbereitung	j	j	t	t	t	n
Verteilung	n	n	j	j	j	j
Speicherung	j	j	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung			D_1	B_1	B_1	D_1
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	B_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	C_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung			A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$A_2B_2C_2$	A_2	$D_2A_2{}^*B_2C_2$	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$B_2A_2{}^*$	$D_2A_2{}^*B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^*$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}$	$D_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter			$A_3B_3C_3$	A_3		$A_3B_3C_3$
Einspeisung in Leitungsnetz			$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$	$A_3{}^*$	A_3	$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$
direkte Abgabe	$A_3B_3C_3$	A_3	D_3	$B_3C_3D_3$	B_3	D_3

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.13: Schadensereignisse 73-78

Schadensereignis	SE_{73}	SE_{74}	SE_{75}	SE_{76}	SE_{77}	SE_{78}
Notsituation	N_7	N_{18}	N_{13}	N_{16}	N_{18}	N_{13}
Gewinnung	t	t	n	n	n	n
Aufbereitung	n	n	t	t	t	n
Verteilung	j	j	j	j	j	j
Speicherung	j	j	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	B_1					
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	C_1		B_1	B_1		B_1
Oberflächenwasser	D_1		C_1	C_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*B_2C_2$	$A_2{}^*B_2C_2$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*B_2C_2$
Tankwagen	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$			$B_2{}^{**}C_2{}^{**}$		
Einspeisung in Hochbehälter	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$
Einspeisung in Leitungsnetz	$A_3{}^*$	$A_3{}^*$	$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$	$A_3{}^*$	$A_3{}^*$	$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$
direkte Abgabe	$B_3C_3D_3$			B_3C_3		

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.14: Schadensereignisse 79-84

Schadensereignis	SE_{79}	SE_{80}	SE_{81}	SE_{82}	SE_{83}	SE_{84}
Notsituation	N_{16}	N_{18}	N_2	N_8	N_{11}	N_2
Gewinnung	n	n	j	j	j	j
Aufbereitung	n	n	t	t	t	t
Verteilung	j	j	t	t	t	t
Speicherung	j	j	t	t	t	n
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung			A_1	B_1	B_1	A_1
anderer Versorger	A_1	A_1		A_1	A_1	
Brunnen	B_1			C_1		
Oberflächenwasser	C_1			D_1		
Verbindungsleitung	A_2	A_2		A_2	A_2	
mobile Leitungen	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}$	A_2	$B_2A_2{}^{*}C_2D_2$	$B_2A_2{}^{*}$	A_2
Tankwagen	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{*}$	$B_2{}^{*}A_2{}^{**}C_2{}^{*}D_2{}^{*}$	$B_2{}^{*}A_2{}^{**}$	$A_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}$		$A_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter	A_3	A_3				
Einspeisung in Leitungsnetz	$A_3{}^{*}$	$A_3{}^{*}$	A_3	A_3	A_3	A_3
direkte Abgabe	B_3C_3		$A_3{}^{*}$	$B_3A_3{}^{*}C_3D_3$	$B_3A_3{}^{*}$	$A_3{}^{*}$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.15: Schadensereignisse 85-90

Schadensereignis	SE_{85}	SE_{86}	SE_{87}	SE_{88}	SE_{89}	SE_{90}
Notsituation	N_8	N_{11}	N_3	N_9	N_{12}	N_2
Gewinnung	j	j	j	j	j	j
Aufbereitung	t	t	t	t	t	n
Verteilung	t	t	n	n	n	t
Speicherung	n	n	t	t	t	t
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	B_1	B_1	A_1	A_1	A_1	A_1
anderer Versorger	A_1	A_1		B_1	B_1	
Brunnen	C_1			C_1		
Oberflächenwasser	D_1			D_1		
Verbindungsleitung	A_2	A_2				
mobile Leitungen	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$B_2A_2{}^*$	A_2	$A_2B_2C_2D_2$	A_2B_2	A_2
Tankwagen	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*$	$A_2{}^*$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3				A_3
direkte Abgabe	$B_3A_3{}^*C_3D_3$	$B_3A_3{}^*$	A_3	$A_3B_3C_3D_3$	A_3B_3	$A_3{}^*$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.16: Schadensereignisse 91-96

Schadensereignis	SE_{91}	SE_{92}	SE_{93}	SE_{94}	SE_{95}	SE_{96}
Notsituation	N_8	N_{19}	N_3	N_9	N_{12}	N_3
Gewinnung	j	j	j	j	j	j
Aufbereitung	n	n	t	t	t	n
Verteilung	t	t	n	n	n	n
Speicherung	t	t	n	n	n	t
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	B_1		A_1	A_1	A_1	A_1
anderer Versorger	A_1	A_1		B_1	B_1	
Brunnen	C_1			C_1		
Oberflächenwasser	D_1			D_1		
Verbindungsleitung	A_2	A_2				
mobile Leitungen	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$A_2{}^*$	A_2	$A_2B_2C_2D_2$	A_2B_2	A_2
Tankwagen	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*$	$A_2{}^*$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3				
direkte Abgabe	$B_3A_3{}^*C_3D_3$	$A_3{}^*$	A_3	$A_3B_3C_3D_3$	A_3B_3	A_3

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.17: Schadensereignisse 97-102

Schadensereignis	SE_{97}	SE_{98}	SE_{99}	SE_{100}	SE_{101}	SE_{102}
Notsituation	N_9	N_{20}	N_2	N_8	N_{19}	N_3
Gewinnung	j	j	j	j	j	j
Aufbereitung	n	n	n	n	n	n
Verteilung	n	n	t	t	t	n
Speicherung	t	t	n	n	n	n
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	A_1		A_1	B_1		A_1
anderer Versorger	B_1	A_1		A_1	A_1	
Brunnen	C_1			C_1		
Oberflächenwasser	D_1			D_1		
Verbindungsleitung				A_2	A_2	
mobile Leitungen	$A_2B_2C_2D_2$	A_2	A_2	$B_2A_2{}^{*}C_2D_2$	$A_2{}^{*}$	A_2
Tankwagen	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}D_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}$	$B_2{}^{*}A_2{}^{**}C_2{}^{*}D_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz			A_3	A_3	A_3	
direkte Abgabe	$A_3B_3C_3D_3$	A_3	$A_3{}^{*}$	$B_3A_3{}^{*}C_3D_3$	$A_3{}^{*}$	A_3

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.18: Schadensereignisse 103-108

Schadensereignis	SE_{103}	SE_{104}	SE_{105}	SE_{106}	SE_{107}	SE_{108}
Notsituation	N_9	N_{20}	N_5	N_8	N_{11}	N_5
Gewinnung	j	j	t	t	t	t
Aufbereitung	n	n	j	j	j	j
Verteilung	n	n	t	t	t	t
Speicherung	n	n	t	t	t	n
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	A_1		D_1	B_1	B_1	D_1
anderer Versorger	B_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	C_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	D_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung			A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$A_2B_2C_2D_2$	A_2	$D_2A_2{}^*B_2C_2$	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$B_2A_2{}^*$	$D_2A_2{}^*B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^*$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz			$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$
direkte Abgabe	$A_3B_3C_3D_3$	A_3	$D_3A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$	$B_3A_3{}^*C_3D_3$	$B_3A_3{}^*$	$D_3A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.19: Schadensereignisse 109-114

Schadensereignis	SE_{109}	SE_{110}	SE_{111}	SE_{112}	SE_{113}	SE_{114}
Notsituation	N_8	N_{11}	N_6	N_9	N_{12}	N_{14}
Gewinnung	t	t	t	t	t	n
Aufbereitung	j	j	j	j	j	j
Verteilung	t	t	n	n	n	t
Speicherung	n	n	t	t	t	t
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	B_1	B_1	D_1	A_1	A_1	
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	B_1	B_1	A_1
Brunnen	C_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	D_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2				A_2
mobile Leitungen	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$B_2A_2{}^*$	$D_2A_2{}^*B_2C_2$	$A_2B_2C_2D_2$	A_2B_2	$A_2{}^*B_2C_2$
Tankwagen	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*$	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3				$A_3B_3C_3$
direkte Abgabe	$B_3A_3{}^*C_3D_3$	$B_3A_3{}^*$	$D_3A_3B_3C_3$	$A_3B_3C_3D_3$	A_3B_3	$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.20: Schadensereignisse 115-120

Schadensereignis	SE_{115}	SE_{116}	SE_{117}	SE_{118}	SE_{119}	SE_{120}
Notsituation	N_{17}	N_{19}	N_6	N_9	N_{12}	N_{15}
Gewinnung	n	n	t	t	t	n
Aufbereitung	j	j	j	j	j	j
Verteilung	t	t	n	n	n	n
Speicherung	t	t	n	n	n	t
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung			D_1	A_1	A_1	
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	B_1	B_1	A_1
Brunnen	B_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	C_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2				
mobile Leitungen	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}$	$D_2A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2B_2C_2D_2$	A_2B_2	$A_2B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$D_2{}^{*}A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}D_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3				
direkte Abgabe	$A_3{}^{*}B_3C_3$	$A_3{}^{*}$	$D_3A_3B_3C_3$	$A_3B_3C_3D_3$	A_3B_3	$A_3B_3C_3$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.21: Schadensereignisse 121-126

Schadensereignis	SE_{121}	SE_{122}	SE_{123}	SE_{124}	SE_{125}	SE_{126}
Notsituation	N_{15}	N_{20}	N_{14}	N_{17}	N_{19}	N_{15}
Gewinnung	n	n	n	n	n	n
Aufbereitung	j	j	j	j	j	j
Verteilung	n	n	t	t	t	n
Speicherung	t	t	n	n	n	n
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung						
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	B_1		B_1	B_1		B_1
Oberflächenwasser	C_1		C_1	C_1		C_1
Verbindungsleitung			A_2	A_2	A_2	
mobile Leitungen	$A_2B_2C_2$	A_2	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}$	$A_2B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz			$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	
direkte Abgabe	$A_3B_3C_3$	A_3	$A_3{}^{*}B_3{}^{*}C_3{}^{*}$	$A_3{}^{*}B_3C_3$	$A_3{}^{*}$	$A_3B_3C_3$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.22: Schadensereignisse 127-132

Schadensereignis	SE_{127}	SE_{128}	SE_{129}	SE_{130}	SE_{131}	SE_{132}
Notsituation	N_{15}	N_{20}	N_5	N_8	N_{11}	N_5
Gewinnung	n	n	t	t	t	t
Aufbereitung	j	j	t	t	t	t
Verteilung	n	n	j	j	j	j
Speicherung	n	n	t	t	t	n
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung			D_1	B_1	B_1	D_1
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	B_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	C_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung			A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$A_2B_2C_2$	A_2	$D_2A_2{}^*B_2C_2$	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$B_2A_2{}^*$	$D_2A_2{}^*B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^*$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}$	$D_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz			$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$
direkte Abgabe	$A_3B_3C_3$	A_3	D_3	$B_3C_3D_3$	B_3	D_3

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.23: Schadensereignisse 133-138

Schadensereignis	SE_{133}	SE_{134}	SE_{135}	SE_{136}	SE_{137}	SE_{138}
Notsituation	N_8	N_{11}	N_5	N_8	N_{19}	N_{14}
Gewinnung	t	t	t	t	t	n
Aufbereitung	t	t	n	n	n	t
Verteilung	j	j	j	j	j	j
Speicherung	n	n	t	t	t	t
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	B_1	B_1	D_1	B_1		
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	C_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	D_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$B_2A_2^*C_2D_2$	$B_2A_2^*$	$D_2A_2^*B_2C_2$	$B_2A_2^*C_2D_2$	A_2^*	$A_2^*B_2C_2$
Tankwagen	$B_2^*A_2^{**}C_2^*D_2^*$	$B_2^*A_2^{**}$	$D_2^*A_2^{**}B_2^*C_2^*$	$B_2^*A_2^{**}C_2^*D_2^*$	A_2^{**}	$A_2^{**}B_2^*C_2^*$
Abfüllanlage	$B_2^{**}C_2^{**}D_2^{**}$	B_2^{**}	D_2^{**}	$B_2^{**}C_2^{**}D_2^{**}$		
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$
direkte Abgabe	$B_3C_3D_3$	B_3	$D_3B_3^*C_3^*$	$B_3C_3D_3$		

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
A_1^*, A_1^{**}, A_1^{***}	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.24: Schadensereignisse 139-144

Schadensereignis	SE_{139}	SE_{140}	SE_{141}	SE_{142}	SE_{143}	SE_{144}
Notsituation	N_{17}	N_{19}	N_5	N_8	N_{19}	N_{14}
Gewinnung	n	n	t	t	t	n
Aufbereitung	t	t	n	n	n	n
Verteilung	j	j	j	j	j	j
Speicherung	t	t	n	n	n	t
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung			D_1	B_1		
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	B_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	C_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$A_2{}^*B_2C_2$	$A_2{}^*$	$D_2A_2{}^*B_2C_2$	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^{**}$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}$		$D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$		
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$
direkte Abgabe	B_3C_3		$D_3B_3{}^*C_3{}^*$	$B_3C_3D_3$		

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.25: Schadensereignisse 145-150

Schadensereignis	SE_{145}	SE_{146}	SE_{147}	SE_{148}	SE_{149}	SE_{150}
Notsituation	N_{17}	N_{19}	N_{14}	N_{17}	N_{19}	N_{14}
Gewinnung	n	n	n	n	n	n
Aufbereitung	n	n	t	t	t	n
Verteilung	j	j	j	j	j	j
Speicherung	t	t	n	n	n	n
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung						
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	B_1		B_1	B_1		B_1
Oberflächenwasser	C_1		C_1	C_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}$			$B_2{}^{**}C_2{}^{**}$		
Einspeisung in Hochbehälter						
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$
direkte Abgabe	B_3C_3			B_3C_3		

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.26: Schadensereignisse 151-156

Schadensereignis	SE_{151}	SE_{152}	SE_{153}	SE_{154}	SE_{155}	SE_{156}
Notsituation	N_{17}	N_{19}	N_4	N_7	N_{10}	N_6
Gewinnung	n	n	t	t	t	t
Aufbereitung	n	n	t	t	t	t
Verteilung	j	j	t	t	t	n
Speicherung	n	n	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung			D_1	B_1	B_1	D_1
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	B_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	C_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	
mobile Leitungen	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}$	$D_2A_2{}^{*}B_2C_2$	$B_2A_2{}^{*}C_2D_2$	$B_2A_2{}^{*}$	$D_2A_2B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$D_2{}^{*}A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$B_2{}^{*}A_2{}^{**}C_2{}^{*}D_2{}^{*}$	$B_2{}^{*}A_2{}^{**}$	$D_2{}^{*}A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$B_2{}^{**}C_2{}^{**}$		$D_2{}^{**}A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter			$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	
Einspeisung in Leitungsnetz	A_3	A_3	$A_3{}^{*}B_3{}^{*}C_3{}^{*}$	$A_3{}^{*}$	$A_3{}^{*}$	
direkte Abgabe	B_3C_3		$D_3A_3{}^{*}B_3{}^{*}C_3{}^{**}$	$B_3A_3{}^{*}C_3D_3$	$B_3A_3{}^{**}$	$D_3A_3B_3C_3$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.27: Schadensereignisse 157-162

Schadensereignis	SE_{157}	SE_{158}	SE_{159}	SE_{160}	SE_{161}	SE_{162}
Notsituation	N_9	N_{12}	N_4	N_7	N_{18}	N_{13}
Gewinnung	t	t	t	t	t	n
Aufbereitung	t	t	n	n	n	t
Verteilung	n	n	t	t	t	t
Speicherung	j	j	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung	A_1	A_1	D_1	B_1		
anderer Versorger	B_1	B_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	C_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	D_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung			A_2	A_2	A_2	A_2
mobile Leitungen	$A_2B_2C_2D_2$	A_2B_2	$D_2A_2{}^*B_2C_2$	$B_2A_2{}^*C_2D_2$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*$	$D_2{}^*A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$	$B_2{}^*A_2{}^{**}C_2{}^*D_2{}^*$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^*C_2{}^*$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$B_2{}^{**}A_2{}^{***}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}$	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter			$A_3B_3C_3$	A_3	A_3	$A_3B_3C_3$
Einspeisung in Leitungsnetz			$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$	$A_3{}^*$	$A_3{}^*$	$A_3{}^*B_3{}^*C_3{}^*$
direkte Abgabe	$A_3B_3C_3D_3$	A_3B_3	$D_3A_3{}^{**}B_3{}^{**}C_3{}^{**}$	$B_3A_3{}^{**}C_3D_3$	$A_3{}^{**}$	$A_3{}^{**}B_3{}^{**}C_3{}^{**}$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.28: Schadensereignisse 163-168

Schadensereignis	SE_{163}	SE_{164}	SE_{165}	SE_{166}	SE_{167}	SE_{168}
Notsituation	N_{16}	N_{18}	N_6	N_9	N_{20}	N_{13}
Gewinnung	n	n	t	t	t	n
Aufbereitung	t	t	n	n	n	n
Verteilung	t	t	n	n	n	t
Speicherung	j	j	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung			D_1	A_1		
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	B_1	A_1	A_1
Brunnen	B_1		B_1	C_1		B_1
Oberflächenwasser	C_1		C_1	D_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2				A_2
mobile Leitungen	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}$	$D_2A_2B_2C_2$	$A_2B_2C_2D_2$	A_2	$A_2{}^{*}B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$D_2{}^{*}A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}D_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}$	$D_2{}^{**}A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}D_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter	A_3	A_3				
Einspeisung in Leitungsnetz	$A_3{}^{*}$	$A_3{}^{*}$				$A_3B_3C_3$
direkte Abgabe	$A_3{}^{**}B_3C_3$	$A_3{}^{**}$	$D_3A_3B_3C_3$	$A_3B_3C_3D_3$	A_3	$A_3{}^{*}B_3{}^{*}C_3{}^{*}$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.29: Schadensereignisse 169-174

Schadensereignis	SE_{169}	SE_{170}	SE_{171}	SE_{172}	SE_{173}	SE_{174}
Notsituation	N_{16}	N_{18}	N_{15}	N_{15}	N_{20}	N_{15}
Gewinnung	n	n	n	n	n	n
Aufbereitung	n	n	t	t	t	n
Verteilung	t	t	n	n	n	n
Speicherung	j	j	j	j	j	j
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n	j
eigene Gewinnung						
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	B_1		B_1	B_1		B_1
Oberflächenwasser	C_1		C_1	C_1		C_1
Verbindungsleitung	A_2	A_2				
mobile Leitungen	$A_2{}^{*}B_2C_2$	$A_2{}^{*}$	$A_2B_2C_2$	$A_2B_2C_2$	A_2	$A_2B_2C_2$
Tankwagen	$A_2{}^{**}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}$	$A_2{}^{*}B_2{}^{*}C_2{}^{*}$
Abfüllanlage	$A_2{}^{***}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{***}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter	A_3					
Einspeisung in Leitungsnetz	$A_3{}^{*}$	A_3				
direkte Abgabe	$A_3{}^{**}B_3C_3$	$A_3{}^{*}$	$A_3B_3C_3$	$A_3B_3C_3$	A_3	$A_3B_3C_3$

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^{*}$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

Tabelle C.30: Schadensereignisse 175-179

Schadensereignis	SE_{175}	SE_{176}	SE_{177}	SE_{178}	SE_{179}
Notsituation	N_{15}	N_{20}	N_{15}	N_{15}	N_{20}
Gewinnung	n	n	n	n	n
Aufbereitung	n	n	n	n	n
Verteilung	n	n	n	n	n
Speicherung	j	j	n	n	n
mobile Aufbereitung	t	n	j	t	n
eigene Gewinnung					
anderer Versorger	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
Brunnen	B_1		B_1	B_1	
Oberflächenwasser	C_1		C_1	C_1	
Verbindungsleitung					
mobile Leitungen	$A_2B_2C_2$	A_2	$A_2B_2C_2$	$A_2B_2C_2$	A_2
Tankwagen	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^*B_2{}^*C_2{}^*$	$A_2{}^*$
Abfüllanlage	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}B_2{}^{**}C_2{}^{**}$	$A_2{}^{**}$
Einspeisung in Hochbehälter					
Einspeisung in Leitungsnetz					
direkte Abgabe	$A_3B_3C_3$	A_3	$A_3B_3C_3$	$A_3B_3C_3$	A_3

A, B, C, D	verschiedene Wasserarten, die alternativ eingesetzt werden können; A hat Priorität vor B, B hat Priorität vor C, C hat Priorität vor D
A_1, A_2, A_3	aufeinander folgende Bestandteile der Versorgungsarten; 1 Gewinnung, 2 Verteilung, 3 Abgabe
$A_1{}^*$, $A_1{}^{**}$, $A_1{}^{***}$	alternative Bestandteile der Versorgungsarten

D Programmtechnische Umsetzung des Modells NOTWASSER

D.1 Gleichungen des SD Modells NOTWASSER

Die gewonnene Wassermenge ist von den verfügbaren Gewinnungskapazitäten dieser Wasserart, dem Bedarf dieser Versorgungsart und dem generellen Bedarf der Ersatzversorgung abhängig. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung D.1 exemplarisch für die Gewinnung der Versorgungsart 1a aufgezeigt.

1a gewonnene Wassermenge
= IF THEN ELSE (Wasserbedarf Ersatzversorgung vorhanden $>$ 0,
MIN (1a leitungsgebundener Bedarf,
1a verfügbare Kapazitäten gewonnenes Wasser),
0)
Units: m^3/Day (D.1)

Die Zustandsvariable der Rohwasserspeicherung ist von den Flussvariablen *Gewinnung Zufluss Rohwasserspeicher* und *Entnahme Rohwasserspeicher* abhängig (exemplarisch in Gleichung D.2). Diese Flussvariablen sind von den in Gleichung D.3 bis Gleichung D.6 dargestellten Hilfsvariablen abhängig. Die zentrale Rohwasserspeicherung ist in den Gleichungen exemplarisch für die Versorgungsart 3a aufgezeigt. Diese ist Bestandteil der Versorgungsarten 3a, 3b, 3c, 3d, 3e, 4a, 4b, 4c, 4d und 4e im Modell NOTWASSER (siehe Abbildung D.10 bis D.19).

3a Rohwasserspeicher
= 3a Gewinnung Zufluss Rohwasserspeicher
– 3a Entnahme Rohwasserspeicher
Units: m^3 (D.2)

3a Gewinnung Zufluss Rohwasserspeicher
= IF THEN ELSE (3a Rohwasserspeicher
> 3a Kapazität des Rohwasserspeichers,
0,
MIN (3a gewonnene Wassermenge – 3a Aufbereitung aus Gewinnung,
3a freie Kapazität Rohwasserspeicher / Zeitschritt)) (D.3)
Units: m^3/Day

3a Entnahme Rohwasserspeicher
= IF THEN ELSE (3a Rohwasserspeicher / Zeitschritt
– 3a Aufbereitung aus Speicher < 0
3a Rohwasserspeicher / Zeitschritt,
3a Aufbereitung aus Speicher) (D.4)
Units: m^3/Day

3a Aufbereitung aus Gewinnung
= IF THEN ELSE (MIN (3a gewonnene Wassermenge,
3a verfügbare Kapazität mobile Aufbereitung)
> 3a freie Kapazität zentraler Reinwasserspeicher / Zeitschritt
MIN (3a gewonnene Wassermenge,
3a freie Kapazität zentraler Reinwasserspeicher / Zeitschritt
MIN (3a gewonnene Wassermenge,
3a verfügbare Kapazität mobile Aufbereitung)) (D.5)
Units: m^3/Day

3a Aufbereitung aus Speicher
= IF THEN ELSE (3a freie Kapazität zentraler Reinwasserspeicher
/ Zeitschritt
> MIN (3a verfügbare Kapazität mobile Aufbereitung
– 3a Aufbereitung aus Gewinnung,
3a Rohwasserspeicher / Zeitschritt),
MIN (3a Rohwasserspeicher / Zeitschritt,
3a freie Kapazität zentraler Reinwasserspeicher / Zeitschritt),
MIN (3a verfügbare Kapazität mobile Aufbereitung
– 3a Aufbereitung aus Gewinnung,
3a Rohwasserspeicher / Zeitschritt)) (D.6)
Units: m^3/Day

Die Zustandsvariable der zentralen Reinwasserspeicherung ist von den Flussvariablen *aufbereitetes Wasser Zufluss zentraler Reinwasserspeicher* und *Entnahme Reinwasser aus zentralem Reinwasserspeicher* abhängig (exemplarisch in Gleichung D.7). Diese Flussvariablen sind von den in Gleichung D.8 bis Gleichung D.13 dargestellten Hilfsvariablen abhängig. Die zentrale Reinwasserspeicherung ist in den folgenden Gleichungen exemplarisch für die Versorgungsart 1a aufgezeigt (Abbildung D.1). Sie ist Bestandteil aller Versorgungsarten außer der Versorgungsart 2a (Abbildung D.1 bis D.3 sowie Abbildung D.6 bis D.19).

1a zentraler Reinwasserspeicher
= INTEG (1a Zufluss zentraler Reinwasserspeicher
– 1a Entnahme Reinwasser aus zentralem Reinwasserspeicher,
0) (D.7)
Units: m^3

1a Kapazität des zentralen Reinwasserspeichers
= 1a Lookup Kapazität des zentralen Reinwasserspeichers
(Time/Zeitschritt) (D.8)
Units: m^3

1a freie Kapazität zentraler Reinwasserspeicher
= IF THEN ELSE (1a Kapazität des zentralen Reinwasserspeichers
-1a zentraler Reinwasserspeicher
+1a Entnahme Reinwasser aus zentralem Speicher * Zeitschritt >0,
1a Kapazität des zentralen Reinwasserspeichers
-1a zentraler Reinwasserspeicher
+1a Entnahme Reinwasser aus zentralem Speicher * Zeitschritt, 0) (D.9)
Units: m^3

1a Entnahme Reinwasser aus zentralem Speicher
= IF THEN ELSE (1a verfügbare Kapazitäten Verteilung
> 1a zentraler Reinwasserspeicher / Zeitschritt,
MIN (1a zentraler Reinwasserspeicher/Zeitschritt,
1a leitungsgebundener Bedarf),
MIN(1a verfügbare Kapazitäten Verteilung,
1a leitungsgebundener Bedarf) (D.10)
Units: m^3/Day

1a Verteilung und Einspeisung aus Gewinnung
= IF THEN ELSE (1a leitungsgebundener Bedarf > 0,
MIN(1a gewonnene Wassermenge,
1a verfügbare Kapazitäten Verteilung),
0) (D.11)
Units: m^3/Day

1a Verteilung und Einspeisung aus zentralem Reinwasserspeicher
= IF THEN ELSE (1a leitungsgebundener Bedarf
– 1a Verteilung und Einspeisung aus Gewinnung > 0,
1a Entnahme Reinwasser aus zentralem Speicher,
0) (D.12)
Units: m^3/Day

1a leitungsgebundener Verbrauch
= 1a Verteilung und Einspeisung aus Gewinnung
+ 1a Verteilung und Einspeisung aus zentralem Reinwasserspeicher (D.13)
Units: m^3/Day

Die Zustandsvariable der dezentralen Reinwasserspeicherung ist von den Flussvariablen *verteiltes Wasser Zufluss dezentraler Reinwasserspeicher* und *Entnahme Reinwasser aus dezentralem Reinwasserspeicher* abhängig (exemplarisch in Gleichung D.14). Diese Flussvariablen sind von den in Gleichung D.15 bis D.20 dargestellten Hilfsvariablen abhängig. Die dezentrale Reinwasserspeicherung wird im folgenden exemplarisch für die Versorgungsart 1c aufgezeigt (Abbildung D.2). Sie ist zudem Bestandteil der Abbildung der Versorgungsarten 2d (Abbildung D.8), 3d (Abbildung D.13) sowie 4d (Abbildung D.18).

1c dezentraler Reinwasserspeicher
= INTEG (1c verteiltes Wasser Zufluss dezentraler Reinwasserspeicher
– 1c Entnahme Reinwasser dezentraler Speicher,
0) (D.14)
Units: m^3

Abbildung D.1: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 1a, bei der das Wasser aus eigener Gewinnungsanlage über mobile Leitungen in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter eingespeist wird

1c verteiltes Wasser Zufluss dezentraler Reinwasserspeicher
= IF THEN ELSE (1c dezentraler Reinwasserspeicher
> 1c Kapazität des dezentralen Reinwasserspeichers,
0,
MIN (1c Verteilung und Speicher,
1c freie Kapazität des dezentralen Reinwasserspeichers / Zeitschritt) (D.15)
Units: m^3/Day

1c Verteilung und Speicher
= IF THEN ELSE (1c Entnahme Reinwasser aus zentralem Speicher
– 1c Verteilung und Verbrauch > 0,
1c Entnahme Reinwasser aus zentralem Speicher
– 1c Verteilung und Verbrauch
0) (D.16)
Units: m^3/Day

1c Verteilung und Verbrauch
= IF THEN ELSE (1c leitungsungebundener Bedarf
– 1c Verteilung und Verbrauch aus Gewinnung > 0,
MIN (1c Entnahme Reinwasser aus zentralem Speicher,
1c leitungsungebundener Bedarf
– 1c Verteilung und Verbrauch aus Gewinnung)
0) (D.17)
Units: m^3/Day

1c Verteilung und Verbrauch aus Gewinnung
= IF THEN ELSE (1c leitungsungebundener Bedarf > 0,
MIN (1c gewonnene Wassermenge,
1c verfügbare Kapazitäten Transport
0) (D.18)
Units: m^3/Day

1c Entnahme Reinwasser dezentraler Speicher
= IF THEN ELSE (1c leitungsungebundener Bedarf
– 1c Verteilung und Verbrauch > 0,
MIN (1c dezentraler Reinwasserspeicher / Zeitschritt,
1c leitungsungebundener Bedarf
– 1c Verteilung und Verbrauch),
0)
Units: m^3/Day (D.19)

1c leitungsungebundener Verbrauch
= 1c Entnahme Reinwasser dezentraler Speicher
+ 1c Verteilung und Verbrauch
+ 1c Verteilung und Verbrauch aus Gewinnung
Units: m^3/Day (D.20)

Die Zustandsvariable des abgefüllten Wassers ist von den Flussvariablen *Zufluss abgefülltes Wasser* und *Abgabe abgefülltes Wasser* abhängig (exemplarisch in Gleichung D.21). Diese Flussvariablen sind von den in Gleichung D.22 bis D.23 dargestellten Hilfsvariablen abhängig und exemplarisch für die Versorgungsart 1d aufgezeigt. Diese sind zudem Bestandteil der Abbildung der Versorgungsarten 2e (Abbildung D.9), 3e (Abbildung D.14) sowie 4e (Abbildung D.19).

1d abgefülltes Wasser
= MAX (1d Zufluss abgefülltes Wasser
– 1d Abgabe abgefülltes Wasser,
0)
Units: m^3 (D.21)

1d Zufluss abgefülltes Wasser
= IF THEN ELSE (1d Entnahme Reinwasser aus zentralem Speicher
> 0,
1d Entnahme Reinwasser aus zentralem Speicher,
0)
Units: m^3/Day (D.22)

Abbildung D.2: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 1c bei der das Wasser aus eigener Gewinnungsanlage über Transportfahrzeuge gefördert und zu einem dezentralen Abgabeort transportiert wird

1d Abgabe abgepacktes Wasser
= IF THEN ELSE (1d abgefülltes Wasser / Zeitschritt
> 1d leitungsungebundener Bedarf
1d leitungsungebundener Bedarf,
1d abgefülltes Wasser / Zeitschritt,
Units: m^3/Day (D.23)

1d Entnahme Reinwasser dezentraler Speicher
= MAX (1d abgepacktes Wasser Zunahme
– 1d Abgabe abgepacktes Wasser
– 1c Verteilung und Verbrauch > 0,
MIN (1c dezentraler Reinwasserspeicher / Zeitschritt,
1c leitungsungebundener Bedarf
– 1c Verteilung und Verbrauch),
0)
Units: m^3/Day (D.24)

Bei der Versorgungsart 2a erfolgt die Einspeisung über eine Verbindungsleitung (Gleichung D.25 sowie Abbildung D.4).

2a Einspeisung über Verbindungsleitung aus Gewinnung
= IF THEN ELSE (2a leitungsgebundener Bedarf > 0,
MIN(2a gewonnene Wassermenge,
2a Kapazität Verbindungsleitung),
0)
Units: m^3/Day (D.25)

Abbildung D.3: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 1d bei der das Wasser aus eigener Gewinnungsanlage in einer Abfüllanlage abgepackt hat

Abbildung D.4: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 2a bei der das Wasser eines anderen Versorgers über Verbindungsleitungen in das funktionstüchtige Leitungsnetz eingespeist wird

Die Ermittlung der verfügbaren Reinwassermenge erfolgt durch Gleichung D.26. Der Abgleich mit den Kapazitäten zur Verteilung (Gleichung D.27) dient der Ermittlung der bereitstellbaren Wassermenge.

Minimum verfügbares Reinwasser
= IF THEN ELSE (MIN (1 Wasser aus eigener Gewinnungsanlage
+ 2 Wasser eines anderen Versorgers
+ mobile Aufbereitung,
1 Wasser aus eigener Gewinnungsanlage
+ 2 Wasser eines anderen Versorgers
+ 3 Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen und Quellen
+ 4 Oberflächenwasser) > 0,
MIN (1 Wasser aus eigener Gewinnungsanlage (D.26)
+ 2 Wasser eines anderen Versorgers
+ mobile Aufbereitung,
1 Wasser aus eigener Gewinnungsanlage
+ 2 Wasser eines anderen Versorgers
+ 3 Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen und Quellen
+ 4 Oberflächenwasser),
0)
Units: m^3/Day

Gleichung D.27 dient zur Ermittlung der minimalen Wassermenge, die verteilt werden kann.

Minimum Kapazität Gewinnung Verteilung
= IF THEN ELSE (MIN (Minimum verfügbares Reinwasser,
Tägliche Kapazität der Versorgung mit Transportfahrzeugen
+ mobile Leitungen > 0,
MIN (Minimum verfügbares Reinwasser, (D.27)
Tägliche Kapazität der Versorgung mit Transportfahrzeugen
+ mobile Leitungen,
0)
Units: m^3/Day

Abbildung D.5: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 1b bei der das Wasser aus eigener Gewinnungsanlage über Transportfahrzeuge in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter eingespeist wird

Abbildung D.6: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 2b bei der das Wasser eines anderen Versorgers über mobile Leitungen in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter eingespeist wird

Abbildung D.7: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 2c bei der das Wasser eines anderen Versorgers über Transportfahrzeuge in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter eingespeist wird

Abbildung D.8: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 2d bei der das Wasser eines anderen Versorgers über Transportfahrzeuge gefördert und zu einem dezentralen Abgabeort transportiert wird

Abbildung D.9: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 2e bei der das Wasser eines anderen Versorgers in einer Abfüllanlage abgepackt hat

Abbildung D.10: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 3a bei der das Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen über mobile Leitungen in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter eingespeist wird

Abbildung D.11: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 3b bei der das Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen über mobile Leitungen in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter eingespeist wird

Abbildung D.12: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 3c bei der das Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen über Transportfahrzeuge in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter eingespeist wird

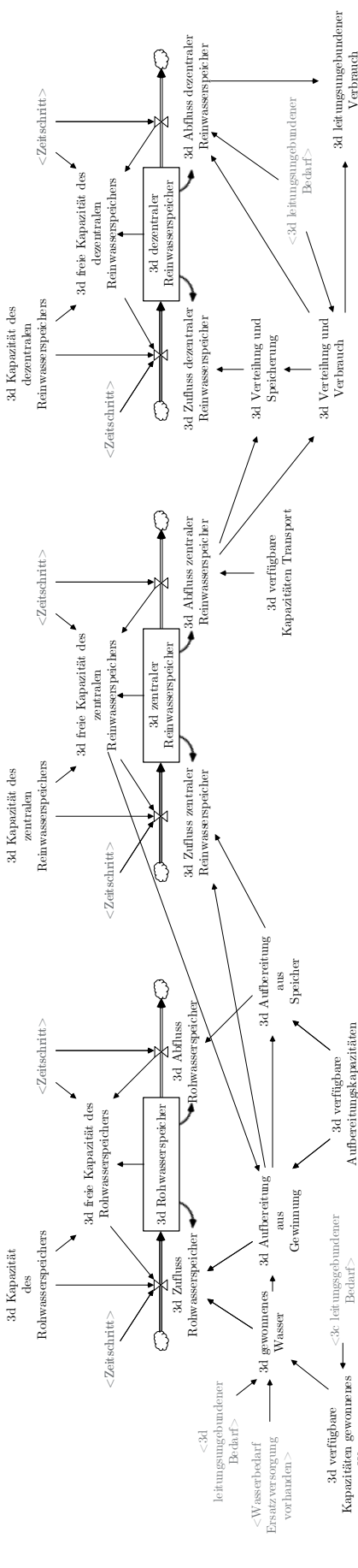


Abbildung D.13: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 3d bei der das Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen über Transportfahrzeuge gefördert und zu einem dezentralen Abgabeort transportiert wird

Abbildung D.14: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 3e bei der das Wasser aus leitungsunabhängigen Brunnen oder Quellen in einer Abfüllanlage abgepackt hat

Abbildung D.15: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 4a bei der Oberflächenwasser über mobile Leitungen in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter eingespeist wird

Abbildung D.16: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 4b bei der Oberflächenwasser über mobile Leitungen in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter eingespeist wird

Abbildung D.17: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 4c bei der Oberflächenwasser über Transportfahrzeuge in das Leitungsnetz oder Speicherbehälter eingespeist wird

Abbildung D.18: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 4d bei der Oberflächenwasser über Transportfahrzeuge gefördert und zu einem dezentralen Abgabeort transportiert wird

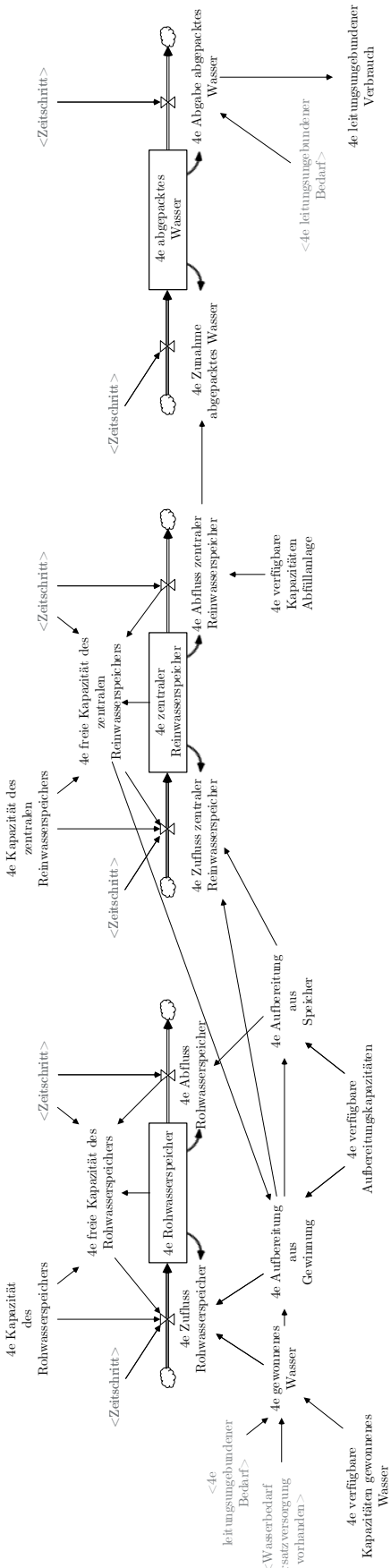


Abbildung D.19: Hilfs- und Zustandsvariablen zur Abbildung der Versorgungsart 4e bei der Oberflächenwasser in einer Abfüllanlage abgepackt hat

Durch die bereitstellbare Wassermenge wird mit Gleichung D.28 ermittelt, für wie viele Personen mehr als die systemabhängige Mindestwassermenge bereitgestellt werden kann und diese somit uneingeschränkt leitungsgebunden versorgt werden können. Hierbei wird im ersten Schritt abgeglichen, ob die gesamte Bevölkerung leitungsgebunden versorgt werden kann. Im zweiten Schritt wird die Wassermenge, die darüber hinaus bereitgestellt werden kann, auf die maximale Personenanteil verteilt.

Personen Kriterium für leitungsgebundene Versorgung erfüllt
= IF THEN ELSE
(MIN ((Minimum Kapazität Gewinnung Verteilung
– min. spez. Menge zur Aufrechterhaltung des Leitungssystems
· Bevölkerung Gesamt)
/(spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Person
– min. spez. Menge zur Aufrechterhaltung des Leitungssystems),
Bevölkerung Gesamt) $>$ 0,
MIN ((Minimum Kapazität Gewinnung Verteilung
– min. spez. Menge zur Aufrechterhaltung des Leitungssystems
· Bevölkerung Gesamt)
/(spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Person
– min. spez. Menge zur Aufrechterhaltung des Leitungssystems),
Bevölkerung Gesamt)
0)
Units: P (D.28)

Die im Normalfall bereitgestellte Wassermenge wird durch Gleichung D.29 berechnet.

Bereitgestellte Wassermenge im Normalfall
= spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Person
· Bevölkerung Gesamt
+ spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Patient
· Patienten Gesamt
Units: m^3/Day (D.29)

Die mit normaler Versorgung bereitgestellte Wassermenge wird durch Gleichung D.30 ermittelt.

Bereitgestellte Wassermenge mit normaler Versorgung
= IF THEN ELSE(Notfallverlauf
· bereitgestellte Wassermenge im Normalfall
$<$ bereitgestellte Wassermenge im Normalfall,
Notfallverlauf
· bereitgestellte Wassermenge im Normalfall
bereitgestellte Wassermenge im Normalfall
Units: m^3/Day (D.30)

Der einwohnerspezifische Wasserbedarf wird im Modell für zwei Fälle ermittelt. Kann mehr als die systemabhängige Mindestwassermenge für alle Einwohner bereitgestellt werden, so wird mit der Gleichung D.31 angestrebt, für die maximal mögliche Anzahl der Einwohner den einwohnerspezifischen Wasserbedarf in Höhe von $q_{d,m}$ bereitzustellen. Ist dies nicht der Fall so wird die systemabhängige Mindestwassermenge als einwohnerspezifischer leitungsgebundener Wasserbedarf angenommen.

Kriterienabhängiger spezifischer Bedarf pro Person
= IF THEN ELSE(Bevölkerung Gesamt
> Personen Kriterium für leitungsgebundene Versorgung erfüllt,
spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Person,
min. spez. Menge zur Aufrechterhaltung des Leitungssystems (D.31)
Units: m^3/Day

Der Wasserbedarf der leitungsgebundenen Ersatzversorgung wird durch Gleichung D.32 berechnet.

leitungsgebundener Bedarf Ersatzversorgung gesamt
= IF THEN ELSE
(Personen Kriterium für leitungsgebundene Versorgung erfüllt
> 0,
MIN(unversorgte Personen mit normaler Versorgung,
Anzahl Personen Kriterium für leitungsgebundene Versorgung erfüllt)
· spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Person
+ (unversorgte Personen mit normaler Versorgung
– Personen Kriterium für leitungsgebundene Versorgung erfüllt)
· Kriterienabhängiger spezifischer Bedarf pro Person
+ unversorgte Patienten mit normaler Versorgung
· spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Patient,
0) (D.32)
Units: m^3/Day

Der Wasserbedarf der leitungsungebundenen Ersatzversorgung wird durch Gleichung D.33 berechnet.

leitungsungebundener Bedarf Ersatzversorgung gesamt
= IF THEN ELSE(0
< Personen Kriterium für leitungsgebundene Versorgung erfüllt,
unversorgte Personen mit normaler Versorgung
– leitungsgebunden versorgte Bevölkerung Ersatzversorgung)
· spezifischer leitungsungebundener Bedarf pro Person
+ (unversorgte Patienten mit normaler Versorgung
– leitungsgebunden versorgte Patienten Ersatzversorgung)
· spezifischer leitungsungebundener Bedarf pro Patient,
unversorgte Personen mit normaler Versorgung
· spezifischer leitungsungebundener Bedarf pro Person
+ unversorgte Patienten mit normaler Versorgung
· spezifischer leitungsungebundener Bedarf pro Patient) (D.33)
Units: m^3/Day

Die Anzahl der Personen, welche durch die normale Versorgung versorgt werden wird durch Gleichung D.34 berechnet.

versorgte Personen durch normale Versorgung
= IF THEN ELSE
(bereitgestellte Wassermenge mit normaler Versorgung
leitungsgebundener Wasserbedarf für gesamte Bevölkerung,
bereitgestellte Wassermenge mit normaler Versorgung
/spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Person,
leitungsgebundener Wasserbedarf für gesamte Bevölkerung
/spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Person) (D.34)
Units: P

Die für die Patienten verfügbare Wassermenge mittels normaler Versorgung wird durch Gleichung D.35 ermittelt.

normale Versorgung verfügbare Wassermenge für Patienten
= IF THEN ELSE
(bereitgestellte Wassermenge mit normaler Versorgung
– leitungsgebundener Wasserbedarf für gesamte Bevölkerung
> 0,
bereitgestellte Wassermenge mit normaler Versorgung
– leitungsgebundener Wasserbedarf für gesamte Bevölkerung,
0) (D.35)
Units: m^3/Day

Gleichung D.36 dient zur Berechnung der Anzahl der Patienten, die durch die normale Versorgung versorgt sind.

versorgte Patienten durch normale Versorgung
= IF THEN ELSE
(normale Versorgung verfügbare Wassermenge für Patienten
< leitungsgebundener Wasserbedarf für alle Patienten
normale Versorgung verfügbare Wassermenge für Patienten
/spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Patient
leitungsgebundener Wasserbedarf für alle Patienten
/spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Patient) (D.36)
Units: *Pat*

Die Anzahl der Einwohner, die leitungsgebunden versorgt werden, wird durch Gleichung D.37 berechnet.

leitungsgebunden versorgte Bevölkerung Ersatzversorgung
= IF THEN ELSE (leitungsgebundene Abgabe
/ Kriterienabhängiger spezifischer Bedarf pro Person
< unversorgte Personen mit normaler Versorgung,
leitungsgebundene Abgabe
/ Kriterienabhängiger spezifischer Bedarf pro Person,
unversorgte Personen mit normaler Versorgung) (D.37)
Units: *P*

Gleichung D.38 dient zur Ermittlung der Wassermenge, die für die leitungsgebundene Versorgung von Patienten zur Verfügung steht.

leitungsgebundene Ersatzversorgung verfügbare Wassermenge für Patienten
= IF THEN ELSE(leitungsgebundene Abgabe
– leitungsgebunden versorgte Bevölkerung Ersatzversorgung
· Kriterienabhängiger spezifischer Bedarf pro Person
> 0,
leitungsgebundene Abgabe
– leitungsgebunden versorgte Bevölkerung Ersatzversorgung
· Kriterienabhängiger spezifischer Bedarf pro Person,
0) (D.38)
Units: m^3/Day

Die Anzahl der leitungsgebunden versorgten Patienten wird durch Gleichung D.39 errechnet.

leitungsgebunden versorgte Patienten Ersatzversorgung
= IF THEN ELSE
(leitungsgebundene Ersatzversorgung verfügbare Wassermenge für Patienten
/ spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Patient
< unversorgte Patienten mit normaler Versorgung
leitungsgebundene Ersatzversorgung verfügbare Wassermenge für Patienten
/ spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Patient,
unversorgte Patienten mit normaler Versorgung
Units: *Pat* (D.39)

Die Anzahl der Einwohner, welche leitungsungebunden versorgt werden wird anhand Gleichung D.40 ermittelt.

leitungsungebunden versorgte Bevölkerung Ersatzversorgung
= IF THEN ELSE (leitungsungebundene Abgabe
/ spezifischer leitungsungebundener Bedarf pro Person
< (unversorgte Personen mit normaler Versorgung
– leitungsgebunden versorgte Bevölkerung Ersatzversorgung)
leitungsungebundene Abgabe
/ spezifischer leitungsungebundener Bedarf pro Person,
(unversorgte Personen mit normaler Versorgung
– leitungsgebunden versorgte Bevölkerung Ersatzversorgung))
Units: *P* (D.40)

Die Wassermenge, welche für die leitungsungebundene Versorgung der Patienten verfügbar ist, wird durch Gleichung D.41 errechnet.

leitungsungebundene Ersatzversorgung verfügbare Wassermenge für Patienten
= IF THEN ELSE(leitungsungebundene Abgabe
– leitungsungebunden versorgte Bevölkerung Ersatzversorgung
· spezifischer leitungsungebundener Bedarf pro Person,
> 0,
leitungsungebundene Abgabe
– leitungsungebunden versorgte Bevölkerung Ersatzversorgung
· spezifischer leitungsungebundener Bedarf pro Person,
0)
Units: m^3/Day (D.41)

Die Anzahl der leitungsungebunden versorgten Patienten wird anhand Gleichung D.42 ermittelt.

leitungsungebunden versorgte Patienten Ersatzversorgung
= IF THEN ELSE
(leitungsungebundene Ersatzversorgung verfügbare Wassermenge für Patienten
/ spezifischer leitungsungebundener Bedarf pro Patient
< unversorgte Patienten mit normaler Versorgung
– leitungsgebunden versorgte Patienten Ersatzversorgung
leitungsgebundene Ersatzversorgung verfügbare Wassermenge für Patienten
/ spezifischer leitungsgebundener Bedarf pro Patient,
unversorgte Patienten mit normaler Versorgung
– leitungsgebunden versorgte Patienten Ersatzversorgung
Units: *Pat*

(D.42)

Die Priorisierung von Versorgungsarten wird durch die in Abbildung D.20 dargestellte Hierarchie abgebildet. Gleichung D.43 zeigt die Ermittlung der Wassermenge, die zusätzlich zu der mit Versorgungsart 1a bereitgestellten Wassermenge benötigt wird. Die Priorisierung wird im Modell NOTWASSER anhand der in der Notsituation entsprechenden Eignung umgesetzt (Tabelle 6.1 bis 6.4).

1a zusätzlich benötigte Menge
= leitungsgebundener Bedarf Ersatzversorgung gesamt
– 1a leitungsgebundene Abgabe
Units: m^3/Day

(D.43)

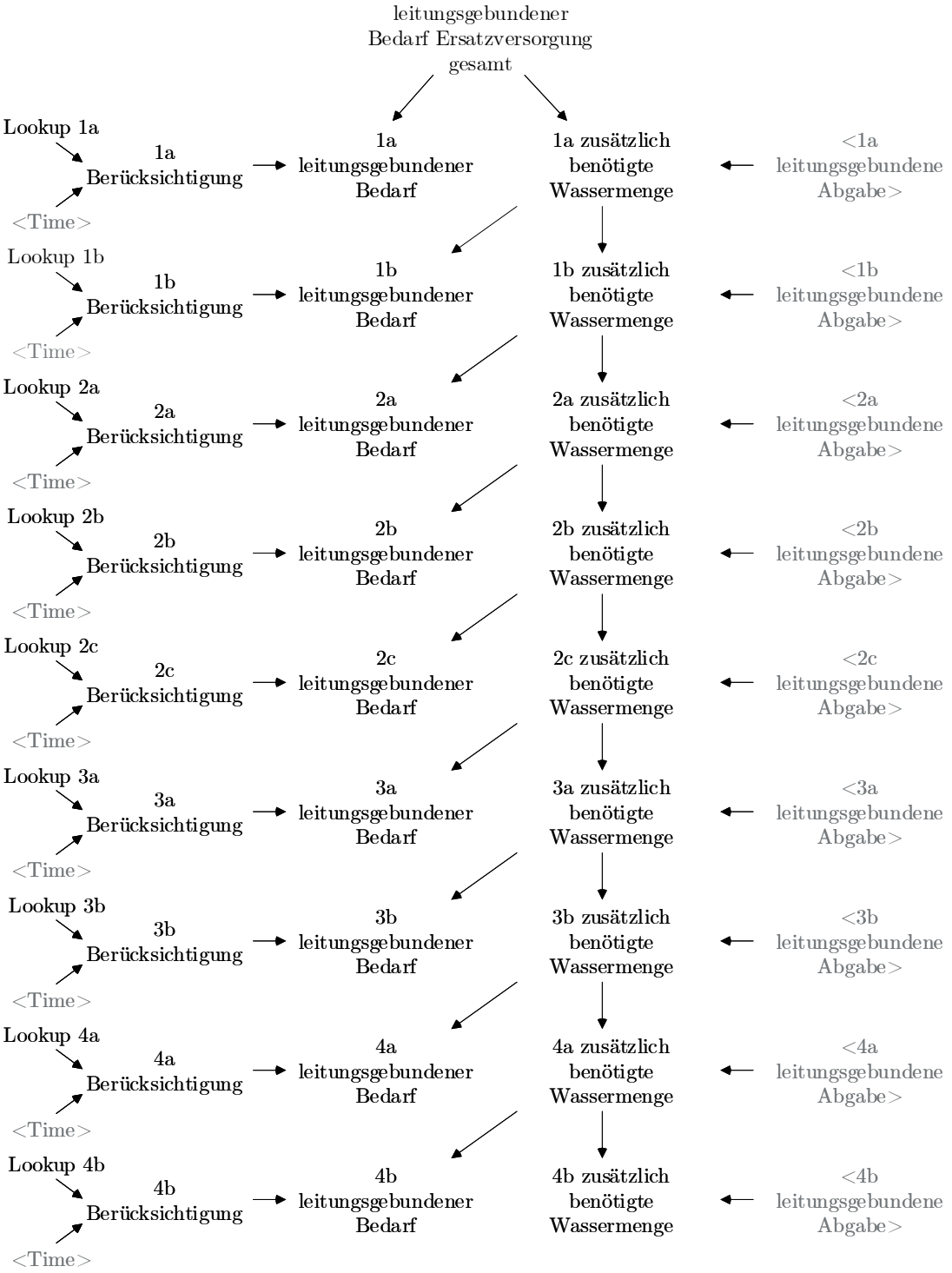


Abbildung D.20: Hilfsvariablen zur Abbildung des leitungsgebundenen Ersatzversorgungsbedarf im SD-Model NOTWASSER

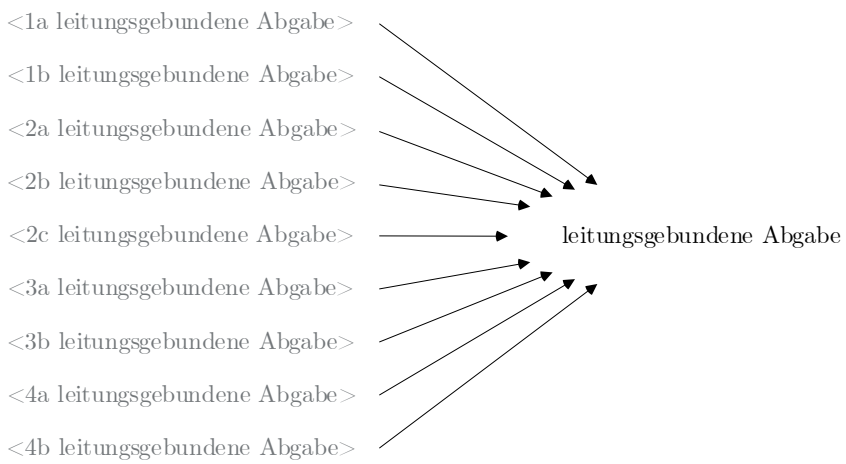


Abbildung D.21: Hilfsvariablen zur Abbildung der Gesamtabgabe durch leitungsgebundene Ersatzversorgung

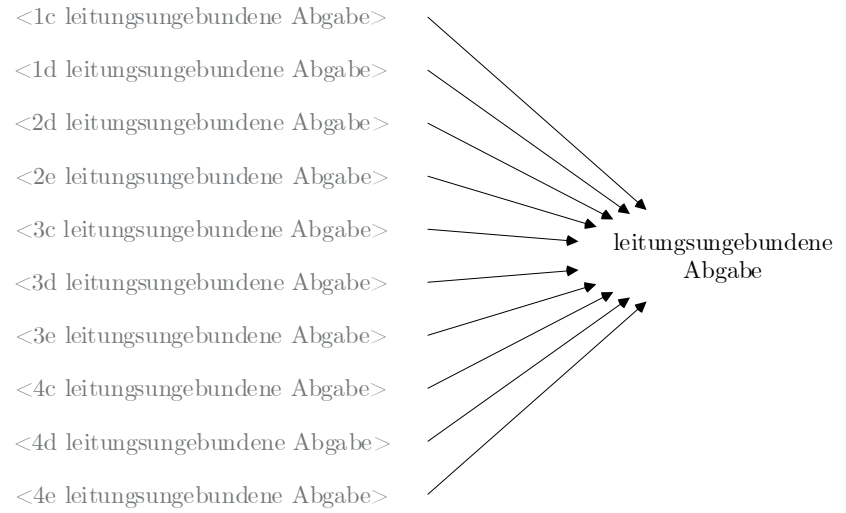


Abbildung D.22: Hilfsvariablen zur Abbildung der Gesamtabgabe durch leitungsungebundene Ersatzversorgung

D.2 Datengrundlage zur Ermittlung des Bevorratungsverhaltens der deutschen Bevölkerung

SWA Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik

Universität der Bundeswehr München

Befragung zum Bevorratungsverhalten

Die Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik an der Universität der Bundeswehr München beschäftigt sich mit verschiedenen Aspekten der Sicherung der öffentlichen Trinkwasserversorgung, beispielsweise mit der Trinkwasserversorgung im Notfall. Diese Befragung dient der Erfassung des Stands der Eigenbevorratung der deutschen Bevölkerung und soll zur Verbesserung der Kommunikation des behördlichen Schutzkonzeptes dienen.

In Deutschland zeichnet sich die Wasserversorgung durch konstant hohe Qualität und Zuverlässigkeit aus. Die Versorgung mit Trinkwasser muss jedoch auch in Ausnahmefällen gewährleistet sein. Wasserversorgungsunternehmen und Behörden des Katastrophenschutzes haben die Aufgabe, Ausfälle der Trinkwasserversorgung zu verhindern bzw. deren Auswirkungen zu minimieren.

Das Beantworten der Fragen sollte nicht länger als 5 Minuten dauern. Wir erheben keine personenbezogene Informationen wie Ihren Namen oder Ihre E-Mail-Adresse. Wir werden alle Daten selbstverständlich vertraulich behandeln. Weiterhin werden die Ergebnisse dieser Studie nur für wissenschaftliche Zwecke verwendet. die Ergebnisse dieser Studie nur für wissenschaftliche Zwecke verwendet.

Für Ihre Teilnahme danken wir Ihnen herzlichst.

Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Krause und Lisa Broß

Nähere Informationen und Kontaktmöglichkeiten finden Sie unter www.unibw.de/ifw/swa

Vorratshaltung

1. Wie viel Liter abgepacktes Wasser (in Flaschen o.ä. Behältnissen) haben Sie im Moment in Ihrem Haushalt verfügbar?
   _____Liter Trinkwasser

Wie viel Liter sonstige Getränke haben Sie im Moment in Ihrem Haushalt vorrätig?

2. Saft und andere alkoholfreie Getränke
   _____Liter Saft und andere alkoholfreie Getränke
3. Bier
   _____Liter Bier
4. Wein
   _____Liter Wein

Weshalb bevorraten Sie?

		trifft voll und ganz zu	trifft teilweise zu	teils-teils	trifft nur wenig zu	trifft überhaupt nicht zu
5.	Ich möchte nicht täglich einkaufen gehen	☐	☐	☐	☐	☐
6.	Ich möchte z.B. bei Krankheit oder schlechtem Wetter nicht einkaufen gehen müssen	☐	☐	☐	☐	☐
7.	Ich möchte flexibel sein, wenn überraschend Besuch kommt	☐	☐	☐	☐	☐
8.	Ich kaufe bei Sonderangeboten gezielt größere Mengen ein	☐	☐	☐	☐	☐
9.	Ich bevorrate bewusst, um in einem Krisenfall (z.B. Hochwasser, Stromausfall, etc.) für einen gewissen Zeitraum gerüstet zu sein	☐	☐	☐	☐	☐
10.	Ich bevorrate keine Getränke	☐	☐	☐	☐	☐
11.	Ich trinke Leitungswasser	☐	☐	☐	☐	☐

Abbildung D.23: Erste Seite des Erhebungsbogens zur Ermittlung des Bevorratungsverhaltens der deutschen Bevölkerung

Befragung zum Bevorratungsverhalten Seite 2

Die Bundesregierung empfielt für einen Zeitraum von 14 Tagen Trinkwasser und Lebensmittel auf Vorrat zu halten. In Bezug auf Trinkwasser bedeutet dies, dass pro Person 28 Liter Trinkwasser im Haushalt verfügbar sein sollen.

12. Ist Ihnen diese Empfehlung bekannt?
    a ☐ Ja b ☐ Nein
13. Wenn ja, woher?

    _____

Transport von Wasser

14. Sind leere Wassereimer (bis zu 10 Liter, auch Putzeimer) in Ihrem Haushalt vorhanden?
    a ☐ Ja b ☐ Nein
15. Wenn leere Wassereimer (bis zu 10 Liter, auch Putzeimer) vorhanden sind, wie viele haben Sie in Ihrem Haushalt?

    _____Anzahl Wassereimer
16. Sind leere Wasserkanister (bis zu 10 Liter) in Ihrem Haushalt vorhanden?
    a ☐ Ja b ☐ Nein
17. Wenn leere Wasserkanister (bis zu 10 Liter) vorhanden sind, wie viele haben Sie in Ihrem Haushalt?

    _____Anzahl Kanister
18. Wie weit würden Sie im Bedarfsfall 15 Liter Getränke (15 kg), im Rucksack oder einer Tasche, jedoch ohne Hilfsmittel (Auto, Karren, ÖPNV, etc.) nach Hause tragen?
    a ☐ Weniger als 100 Meter e ☐ 400 Meter i ☐ 1500 Meter
    b ☐ 100 Meter f ☐ 500 Meter j ☐ 2000 Meter oder mehr
    c ☐ 200 Meter g ☐ 750 Meter
    d ☐ 300 Meter h ☐ 1000 Meter

Ausfall der Wasserversorgung

Für wie wahrscheinlich halten Sie einen…

	sehr wahrscheinlich	eher wahrscheinlich	neutral	eher unwahrscheinlich	sehr unwahrscheinlic
19. …mehrtägigen Ausfall der Wasserversorgung?	☐	☐	☐	☐	☐
20. …mehrtägigen Ausfall der Stromversorgung?	☐	☐	☐	☐	☐

21. Stellen Sie sich vor, Sie müssten mit den Getränken, die Sie derzeit zu Hause haben, auskommen. Für wie viele Tage könnten alle Haushaltsmitglieder mit den vorhandenen Getränken bei gewohntem Verbrauch versorgt werden?
    1 ☐ keinen Tag 4 ☐ 4 - 5 Tage 7 ☐ 10 - 14 Tage
    2 ☐ 1 Tag 5 ☐ 6 - 7 Tage 8 ☐ 15 - 21 Tage
    3 ☐ 2 - 3 Tage 6 ☐ 8 - 9 Tage 9 ☐ mehr als 21 Tage

Wohnsituation

22. Wie viele Personen leben in Ihrem Haushalt?

    _____Anzahl Personen
23. Wie viele davon sind 5 Jahre oder jünger?

    _____Anzahl Personen 5 Jahre oder jünger
24. Wie viele davon sind 17 Jahre oder jünger?

    _____Anzahl Personen 17 Jahre oder jünger
25. Wie viele davon sind 65 Jahre oder älter?

    _____Anzahl Personen 65 Jahre oder älter
26. In welcher Art von Wohnhaus wohnen Sie?
    a ☐ Ein- oder Zweifamilienhaus b ☐ Mehrfamilienhaus
27. Wenn Sie in einem Mehrfamilienhaus wohnen, wie viele Parteien wohnen mit Ihnen im Haus?
    a ☐ 4 oder weniger Parteien b ☐ 4 bis 10 Parteien c ☐ mehr als 10 Parteien
28. Wenn Sie in einem Mehrfamilienhaus wohnen, in welchem Stockwerk wohnen Sie?
    1 ☐ Untergeschoss 5 ☐ 3. Etage 9 ☐ 7. Etage
    2 ☐ Erdgeschoss 6 ☐ 4. Etage 10 ☐ 8. Etage
    3 ☐ 1. Etage 7 ☐ 5. Etage 11 ☐ 9. Etage
    4 ☐ 2. Etage 8 ☐ 6. Etage 12 ☐ 10. Etage oder höher
29. Steht Ihnen ein Kellerraum oder Abstellraum zur Verfügung?
    a ☐ Ja b ☐ Nein

Abbildung D.24: Zweite Seite des Erhebungsbogens zur Ermittlung des Bevorratungsverhaltens der deutschen Bevölkerung

Befragung zum Bevorratungsverhalten Seite 3

30. Wie würden Sie Ihre Wohnsiedlung beschreiben?

a ☐ vorwiegend Ein- und Zweifamilienhäuser b ☐ vorwiegend Mehrfamilienhäuser

Allgemeine Angaben

31. Sind Sie beruflich oder ehrenamtlich in der Versorgungswirtschaft (bspw. Trinkwasserversorgung) oder Katastrophenschutz tätig?

a ☐ Ja b ☐ Nein

32. Geburtsjahr

_____Jahr

33. Geschlecht

a ☐ Weiblich b ☐ Männlich c ☐ Keine Angabe

34. Postleitzahl

_____Postleitzahl

Abbildung D.25: Dritte Seite des Erhebungsbogens zur Ermittlung des Bevorratungsverhaltens der deutschen Bevölkerung

E Indikatorsystem zur Analyse des Status Quo der Notfallvorsorgeplanung

E.1 Expertenbasierte Gewichtung

E.1.1 Fragebogen zur Ermittlung der expertenbasierten Gewichtung

Entwicklung eines Indikators zur Bewertung der Notfallvorsorgeplanung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung“ (NoWa) wurde auf Basis des vom Bundesministerium des Inneren (BMI) entwickelten Konzeptes für Risiko- und Krisenmanagement zum Schutz von KRITIS sowie des Leitfaden „Sicherheit in der Trinkwasserversorgung – Teil 1: Risikoanalyse“ des Bundesamts für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) ein umfassender Fragebogen entwickelt. Dieser Fragebogen diente der Erfassung des Standes der Notfallvorsorgeplanung deutscher Kommunen. Im Zeitraum der Befragung von Januar bis Juni 2016 nahmen insgesamt 360 Kommunen an der Befragung teil. Die Ergebnisse der Befragung finden sich im Bericht „Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung – Ressourcen und Kapazitäten – Auswertung der Erhebungsbögen“, welcher durch die Uni BW für das BMI und BBK erstellt wurde.

Neben der statistischen Auswertung einzelner Merkmale entwickeln wir einen Indikator zur Ermittlung des Stands der Vorsorgeplanung durch Aggregation und Gewichtung mehrerer Kriterien. Dieser Indikator dient als Kennzahl zur Bewertung der Notfallvorsorgeplanung, mit dem die Auswertung der Befragung erweitert und die Aussagekraft verstärkt wird.

Aufgrund Ihres Expertenwissens im Bereich der Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung möchten wir Sie gerne in die Entwicklung dieses Bewertungssystems einbinden und bitten Sie, den dazu entwickelten Bewertungsbogen auszufüllen. Dieses Vorgehen ist in der empirischen Forschung zur Ermittlung von Indikatorsystemen eine erprobte Methode und wird als „Experteninterview“ bezeichnet.

Sie werden im Folgenden nach Ihrer Einschätzung der Wichtigkeit einzelner Phasen und Elemente der Notfallvorsorgeplanung gefragt. Ihre Antworten bilden, gemeinsam mit den Antworten von weiteren Experten, die Grundlage des Bewertungssystems und dienen der Gewichtung einzelner Phasen und Elemente.

Für Ihre Teilnahme danken wir Ihnen herzlichst.

Lisa Broß und Steffen Krause

Phasen der Notfallvorsorgeplanung

Das Bewertungssystem legt zugrunde, dass Notfallvorsorgeplanung in fünf Phasen unterteilt werden kann, welche im BMI Leitfaden erläutert werden. Im Rahmen des Projekts „NoWa“ wurde die erste Phase durch den Aspekt der Bewusstseinsbildung für einen Ausfall der Wasserversorgung ergänzt.

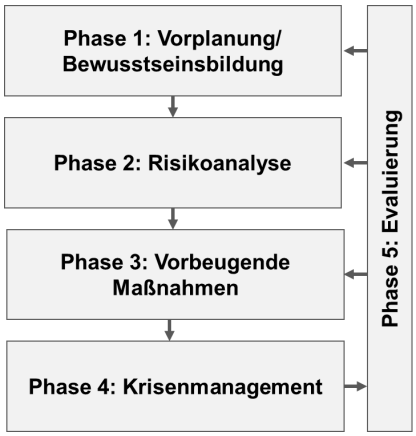


Abbildung 1: Fünf Phasen der Notfallvorsorgeplanung (eigene Darstellung, BMI 2011)

Erläuterungen zu den fünf Phasen der Notfallvorsorgeplanung

Phase 1 – Vorplanung / Bewusstseinsbildung

Eine gründliche Vorplanung bildet die Basis für eine erfolgreiche Etablierung eines Risiko- und Krisenmanagements. Im Vorfeld des Auf- oder Ausbaus eines Risiko- und Krisenmanagements sollten grundsätzliche Festlegungen getätigt werden. Hierzu zählen die Festlegung von Zuständigkeiten, die Festlegung strategischer Schutzziele sowie die Schaffung eines Risikobewusstseins.

Phase 2 – Risikoanalyse

Eine Risikoanalyse strukturiert und objektiviert die Sammlung von Informationen zu bestehenden und potenziellen Risiken für die Wasserversorgung. Die Risikoanalyse betrachtet Gründe und Ursachen von Risiken, untersucht die möglichen Auswirkungen und bestimmt den Rahmen, in dem diese Konsequenzen auftreten können. Die Risikoanalyse bildet die Grundlage zum effektiven und effizienten Umgang mit begrenzten Ressourcen durch den Vergleich der verschiedenen ermittelten Risiken von Prozessen und Komponenten der Wasserversorgung.

Phase 3 – Vorbeugende Maßnahmen

Vorbeugende Maßnahmen tragen zur Minderung von Risiken für kritische Prozesse bei. Sie helfen dabei, operative Schutzziele zu erreichen und damit die Schwelle für Ereignisse mit Krisenpotenzial in der Einrichtung anzuheben. Hierdurch kann die Anzahl krisenhafter Ereignisse minimiert, beziehungsweise die Intensität auftretender Ereignisse reduziert werden.

Abbildung E.2: Zweite Seite des Erhebungsbogens zur Ermittlung der Expertengewichtung

Phase 4 – Krisenmanagement

Das Krisenmanagement liefert einen maßgeblichen Beitrag zum Schutz von Einrichtungen und damit zum Schutz von Kritischen Infrastrukturen und der Bevölkerung. Wechselwirkungen bestehen zum Risikomanagement, da nicht alle Risiken durch risikomindernde Maßnahmen reduziert werden können und immer ein Restrisiko bestehen bleibt. Das Krisenmanagement bietet deshalb eine Struktur zur Bewältigung von Krisen, die trotz Prävention nicht verhindert werden können.

Phase 5 – Evaluierung

Die Evaluierung bezieht sich auf alle Phasen, also sowohl auf die Prüfung von in der Vorplanung festgelegten Punkten, die Prüfung der Aktualität der Informationen zu bestehenden Risiken, die Prüfung der umgesetzten vorbeugenden Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit sowie die Prüfung des Krisenmanagements. Sie sollte regelmäßig erfolgen, vorzugsweise jährlich.

Wie wichtig sind die einzelnen Phasen Ihrer Erfahrung nach?

Wie wichtig?	Nicht wichtig								Sehr wichtig
Phase	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Phase 1: Vorplanung/ Bewusstseinsbildung	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Phase 2: Risikoanalyse	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Phase 3: Vorbeugende Maßnahmen	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Phase 4: Krisenmanagement	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Phase 5: Evaluierung	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Gibt es nach Ihrer Erfahrung eine Phase die ausschlaggebend für eine wirksame Notfallvorsorgeplanung ist?

Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Keine Phase deutlich wichtiger
○	○	○	○	○	○

SWA

3

Abbildung E.3: Dritte Seite des Erhebungsbogens zur Ermittlung der Expertengewichtung

Risikoanalyse

Die Risikoanalyse gemäß der BBK Leitfaden Sicherheit in der Trinkwasserversorgung: Teil I gliedert sich in vier Schritte (siehe Abbildung 2).

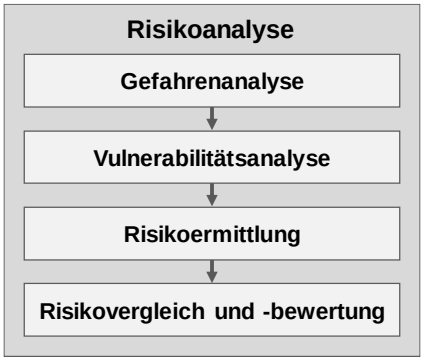


Abbildung 2: Ablauf einer Risikoanalyse (eigene Darstellung, BBK 2016)

Schritt 1 – Gefahrenanalyse: In der Regel sind für die Wasserversorgung eines Untersuchungsgebietes verschiedene potenzielle Gefahren relevant. Da es nicht möglich und auch nicht nötig ist, für alle Gefahren sofort und gleichzeitig eine Risikoanalyse durchzuführen ist zu überprüfen, welche Gefahren/Bedrohungen für das Untersuchungsgebiet vorliegen.

Schritt 2 – Vulnerabilitätsanalyse: Mit Hilfe der Vulnerabilitätsanalyse ist es möglich, die Verwundbarkeit der Trinkwasserversorgung gegenüber den beschriebenen Gefahren zu ermitteln. Im Mittelpunkt steht die mögliche funktionelle Beeinträchtigung einzelner technischer Komponenten der Wasserversorgung.

Schritt 3 – Risikoermittlung: Die Verbindung relevanter Gefahren- und Verwundbarkeitsinformationen führt zur Risikoermittlung für die betrachteten Risikoelemente.

Schritt 4 – Risikovergleich und – bewertung: Die Ergebnisse der Risikoermittlung können dann miteinander verglichen und bewertet werden.

Wie wichtig sind die einzelnen Schritte Ihrer Erfahrung nach?

Wie wichtig?	Nicht wichtig								Sehr wichtig
Schritt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Schritt 1: Gefahrenanalyse	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Schritt 2: Vulnerabilitätsanalyse	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Schritt 3: Risikoermittlung	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Schritt 4: Risikovergleich und -bewertung	○	○	○	○	○	○	○	○	○

SWA

4

Abbildung E.4: Vierte Seite des Erhebungsbogens zur Ermittlung der Expertengewichtung

Expertenfragebogen

Vorbeugende Maßnahmen

Vorbeugende Maßnahmen tragen zur Minderung von Risiken für die Versorgungsicherheit bzw. zu einer Härtung der Wasserversorgung bei. Bitte bewerten Sie im Folgenden welche vorbeugenden Maßnahmen von Wasserversorgungsunternehmen durchgeführt werden sollen.

	Nicht notwendig								Zwingend erforderlich
Maßnahme	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Redundante Systeme (Gewinnung, Speicherung)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Lieferverflechtungen mit anderen Versorgern	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Leitungsbau und Maßnahmen im Verteilungsnetz (Vermaschung, Ringleitungen, Netzausbau)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Allgemeine Maßnahmen (Erneuerung, Instandhaltung, Objektschutz)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Fernüberwachung, Leitsysteme	○	○	○	○	○	○	○	○	○

SWA

5

Abbildung E.5: Fünfte Seite des Erhebungsbogens zur Ermittlung der Expertengewichtung

Krisenmanagement

Wenn die vorbeugenden Maßnahmen nicht ausreichen, sollte ein Krisenmanagement zur Bewältigung der Situation vorhanden sein. Krisenmanagement lässt sich dabei in vier Teilbereiche unterteilen (siehe Abbildung 3).

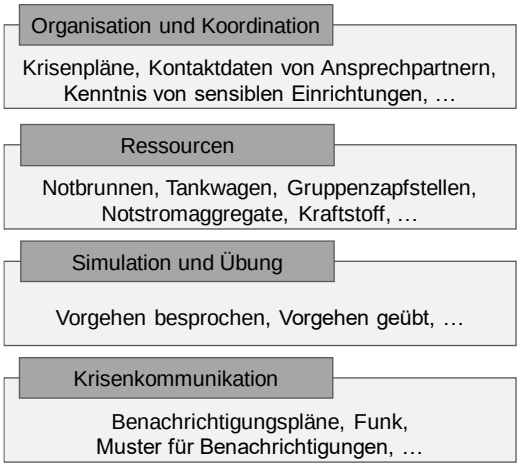


Abbildung 3: Teilbereiche des Krisenmanagements

Wie wichtig sind die einzelnen Teilbereiche des Krisenmanagements Ihrer Erfahrung nach?

Wie wichtig?	Nicht wichtig								Sehr wichtig
Teilbereich	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Organisation und Koordination	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ressourcen	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Simulation und Übung	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Krisenkommunikation	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung E.6: Sechste Seite des Erhebungsbogens zur Ermittlung der Expertengewichtung

Evaluation

Die fünfte Phase der Notfallvorsorgeplanung stellt eine kontinuierliche Evaluation und ggf. Überarbeitung, Aktualisierung sowie Ergänzung der einzelnen Phasen dar. Bitte bewerten Sie im Folgenden, wie wichtig die folgenden Aspekte sind.

Wie wichtig?	Nicht wichtig 1	2	3	4	5	6	7	8	Sehr wichtig 9
Aktualisierung Risikoanalyse	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Aktualisierung Krisenpläne	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Überprüfung Erreichbarkeit von Ansprechpartnern	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Übungsevaluation und -wiederholung	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Abgleich Ressourcen und Bedarf	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Allgemeine Angaben

Berufliche Tätigkeit

WVU	Kommune	Land	Bund	Brand- und Katastrophenschutz	Sonstiges
○	○	○	○	○	○

Ausbildung (mehrere Angaben möglich)

Bauingenieurwesen	Ingenieur-wissenschaften	Umwelt-wissenschaften	Natur-wissenschaften
○	○	○	○

Geistes-wissenschaften	Wirtschafts-wissenschaften	Wasserversorgung	Sonstiges
○	○	○	○

Berufserfahrung

< 3 Jahre	3 – 5 Jahre	5 – 10 Jahre	10 – 20 Jahre	> 20 Jahre
○	○	○	○	○

Ich habe Interesse an dem Ergebnis der Experteninterviews sowie den anschließend ermittelten Indikatoren und möchte diese zugesendet bekommen

Ja, an folgende Email Adresse		Nein
○	_____	○

Vielen Dank für Ihre Unterstützung!

SWA

7

Abbildung E.7: Siebte Seite des Erhebungsbogens zur Ermittlung der Expertengewichtung

E.1.2 Charakterisierung befragte Experten

Tabelle E.1: Übersicht der Institution der befragten Experten

	Anzahl
WVU	4
Kommune	3[a]
Land	3[a]
Bund	1
Brand- und Katastrophenschutz	2 bzw. 5[a]
Sonstiges	1
Summe	14

[a] Zwei Experten geben an im Bereich des Brand- und Katastrophenschutzes innerhalb einer Kommune und ein Experte beim Brand- und Katastrophenschutz auf Landesebene tätig zu Sein

Tabelle E.2: Übersicht der Ausbildung der befragten Experten

	Anzahl
Bauingenieurwesen	3[ab]
Ingenieurwissenschaften	2
Umweltwissenschaften	1
Naturwissenschaften	3
Geisteswissenschaften	0
Wirtschaftswissenschaften	1[a]
Wasserversorgung	1 bzw. 2[b]
Sonstiges	1
Summe	14

[a] Ein Experte mit Ausbildung im Bereich Bauingenieurwesen und Wirtschaftswissenschaften

[b] Ein Experte mit Ausbildung im Bereich Bauingenieurwesen und Wasserversorgung

Tabelle E.3: Übersicht der Berufserfahrung der befragten Experten in Jahren

	Anzahl
weniger als 3 Jahre	0
3 bis 5 Jahre	1
5 bis 10 Jahre	1
10 bis 20 Jahre	4
mehr als 20 Jahre	8
Summe	14

E.2 Erhebungsbogen des NoWa I Forschungsprojekts

Tabelle E.4: Erhebungsbogen des Forschungsprojekts NoWa I zur Ermittlung des Standes der Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung in Deutschland

Frage ID	Frage des Erhebungsbogens	Antwort-möglichkeiten	Indikator
	Fragen zur Notfallplanung		
1	Anzahl der Einwohner in der Kommune (Kreis / kreisfreie Stadt)	Freitext	–
2	Anzahl der Wasserversorgungsunternehmen in der Kommune	Freitext	–
3	Haben Sie für Ihre Kommune eine Risikoanalyse für den Bereich der Wasserversorgung durchgeführt?	Ja, Nein, n.b.	RA
4	Haben Sie dabei eine der folgenden Arbeitshilfen genutzt?		
	BMI - Schutz Kritischer Infrastrukturen Risiko und Krisenmanagement	Ja, Nein, n.b.	–
	BBK - Methode für die Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz	Ja, Nein, n.b.	–
	DVGW-Arbeitsblatt W 1001 „Risikomanagement im Normalbetrieb“	Ja, Nein, n.b.	–
	DVGW-Arbeitsblatt W 1002 „Organisation und Management im Krisenfall“	Ja, Nein, n.b.	–

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.4

Frage ID	Frage des Erhebungsbogens	Antwort-möglichkeiten	Indikator
5	Ist festgelegt, wann, von wem und wie die Risikoanalyse aktualisiert wird?	Ja, Nein, n.b.	$E_{2,\text{Risikoanalyse}}$
6	Sind nach Ihrer Ansicht Störungen, Ausfälle, Qualitätsmängel in der Trinkwasserversorgung denkbar?	Ja, Nein, n.b.	$VP_{1,\text{Störung}}$
7	Welche außergewöhnlichen Ereignisse, stellen aus Ihrer Sicht Gefährdungen für die Wasserversorgung dar? (1 = äußerst bedeutsam bis 5 = nicht bedeutsam)		$VP_{1,\text{Quanti}}$
	Naturgefahren	1; 2; 3; 4; 5	$VP_{1,\text{Naturgefahren}}$
	Unfälle	1; 2; 3; 4; 5	$VP_{1,\text{Unfälle}}$
	Unglücksfälle	1; 2; 3; 4; 5	$VP_{1,\text{Unglücksfälle}}$
	Anschläge	1; 2; 3; 4; 5	$VP_{1,\text{Anschläge}}$
8	Sind Ausfälle/Qualitätsmängel in der Trinkwasserversorgung in der Vergangenheit schon einmal aufgetreten?	Ja, Nein, n.b.	$RA_{1,\text{PastG}}$
9	Existiert eine Bewertung von Auswirkungen potenzieller Risiken auf die Wasserversorgung im Gebiet der Kommune?	Ja, Nein, n.b.	$RA_{3,\text{Ausmaß}}$
10	Werden von dem/den Wasserversorgungsunternehmen (WVU) Krisenpläne erarbeitet?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	$KM_{1,\text{WVUKP}}$
11	Sind Ihnen diese Pläne inhaltlich bekannt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	$KM_{1,\text{KPI}}$
12	Wurden in Ihrem Kreis/ in Ihrer kreisfreien Stadt in der Vergangenheit Maßnahmen zur Erhöhung der Versorgungssicherheit getroffen?	Ja, Nein, n.b.	VM_5
13	Sind die Kontaktdaten folgender Ansprechpartner bekannt?		$KM_{1,\text{Kontakt}}$
	WVU	Ja, Nein	$KM_{1,\text{WVU}}$
	Krisenstab / Katastrophenschutz	Ja, Nein	$KM_{1,\text{KatSchutz}}$
	Hauptverwaltungsbeamte (HVB)	Ja, Nein	$KM_{1,\text{HVB}}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.4

Frage ID	Frage des Erhebungsbogens	Antwort-möglichkeiten	Indikator
	Einsatzorganisationen: Feuerwehr	Ja, Nein	$KM_{1,Feuerwehr}$
	THW	Ja, Nein	$KM_{1,THW}$
	DRK	Ja, Nein	$KM_{1,DRK}$
	ZMZ (Bundeswehr)	Ja, Nein	$KM_{1,ZMZ}$
	Landeskommando (Bundeswehr)	Ja, Nein	$KM_{1,LK}$
	Sonstige Behörden (z.B. Gesundheit, Umwelt, Polizei)	Ja, Nein	$KM_{1,Sonst}$
	Presse	Ja, Nein	$KM_{1,Presse}$
14	Wird die Erreichbarkeit der o.g. Ansprechpartner regelmäßig überprüft?	Ja, Nein, n.b.	$E_{4,Kontakt}$
15	Wurde das Zusammenspiel der beteiligten Behörden und Organisationen für den Krisenfall/Katastrophenfall in der Wasserversorgung ...		
	besprochen?	Ja, Nein, n.b.	$KM_{3,besÜ}$
	geübt?	Ja, Nein, n.b.	$KM_{3,Ü}$
	Erfolgt eine Übung regelmäßig?	Ja, Nein, n.b.	$E_{4,Ü}$
	Wer ist hieran beteiligt?	Freitext	–
16	Sind Notbrunnen (gem. WasSG) im Kreis/in der kreisfreien Stadt vorhanden?	Ja, Nein, n.b.	$KM_{2,NB}$
	Falls ja, wie viele?	Freitext	–
17	Liegen Ihnen Informationen zur Lage, Leistungsfähigkeit und Wasserqualität der Notbrunnen vor?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	$KM_{2,NBInfo}$
	Falls ja, wer?	Freitext	–
18	Ist Ihnen bekannt, wer im Ereignisfall die Notbrunnen betreiben würde?	Ja, Nein, n.b.	$KM_{2,NBBetreiber}$
19	Gibt es Handlungsvorgaben zum Betrieb der Notbrunnen?	Ja, Nein, n.b.	$KM_{2,NBBetrieb}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.4

Frage ID	Frage des Erhebungsbogens	Antwort-möglichkeiten	Indikator
20	Ist der Zugriff auf folgende Ausrüstung für einen Krisenfall in der Wasserversorgung sichergestellt?		
	Kommunikationsmittel (Funk, Benachrichtigungspläne, ...)	Ja, Nein, n.b.	$KM_{4,Kom}$
	Betriebsmittel (Kraftstoffe für Kfz und Notstromgeneratoren)	Ja, Nein, n.b.	$KM_{2,Betriebsmittel}$
	Transportkapazität (für Wasserbehälter, Aufbereitungsanlagen)	Ja, Nein, n.b.	$KM_{2,Transportkap}$
	Trinkwasseraufbereitungsanlagen, Gruppenzapfstellen	Ja, Nein, n.b.	$KM_{2,Zapfstellen}$
	Fragen zur Wasserversorgung		
21	Anzahl der versorgten Einwohner (im Kreis / kreisfreien Stadt)	Freitext	–
22	Anzahl der genutzten Wassergewinnungsanlagen	Freitext	–
	davon Grundwasser	Freitext	–
	Oberflächenwasser	Freitext	–
	Quellwasser	Freitext	–
	Sonstige	Freitext	–
23	Erfolgt eine Aufbereitung des Wassers?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	–
	Wenn ja/teilweise, welche Art der Aufbereitung?	Freitext	–
24	Anzahl der vorhandenen Trinkwasserspeicher?	Freitext	–
	Verfügbares Speichervolumen gesamt $[m^3]$?	Freitext	–
25	Sind Ihnen der/die Maßnahmepläne nach §16 Abs. 5 TrinkwV des/der WVU bekannt?	Ja, teilweise, Nein	–

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.4

Frage ID	Frage des Erhebungsbogens	Antwort-möglichkeiten	Indikator
26	Ist im Maßnahmeplan des/der Unternehmen festgelegt, wie im Krisen- oder Katastrophenfall (nicht bei Störungen des Normalbetriebs) vorzugehen ist?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	–
27	Sind Telefonnummer, Standort und Kapazität folgender Einrichtungen in ihrem Kreis/in ihrer kreisfreien Stadt erfasst?		KM_{sonstE}
	Brauerei/Getränkehersteller		$KM_{1,Brauerei}$
	Telefonnummer	Ja, Nein	$KM_{1,TBrauerei}$
	Standort	Ja, Nein	$KM_{1,SBrauerei}$
	Kapazität	Ja, Nein	$KM_{1,KBrauerei}$
	Getränkeversorger (Getränkemarkt)		$KM_{1,Getränke}$
	Telefonnummer	Ja, Nein	$KM_{1,TGetränke}$
	Standort	Ja, Nein	$KM_{1,SGetränke}$
	Kapazität	Ja, Nein	$KM_{1,KGetränke}$
	Spediteure		$KM_{1,Spediteur}$
	Telefonnummer	Ja, Nein	$KM_{1,TSpediteur}$
	Standort	Ja, Nein	$KM_{1,SSpediteur}$
	Kapazität	Ja, Nein	$KM_{1,KSpediteur}$
	benachbarte Versorger		$KM_{1,WVU}$
	Telefonnummer	Ja, Nein	$KM_{1,TWVU}$
	Standort	Ja, Nein	$KM_{1,SWVU}$
	Kapazität	Ja, Nein	$KM_{1,KWVU}$
28	Sind besondere Sensible Einrichtungen vorhanden und erfasst?	Ja, Nein, n.b.	$KM_{1,sensibleE}$
	Krankenhaus	Ja, Nein, n.b.	$KM_{1,KH}$
	Altenheim/Pflegeeinrichtung	Ja, Nein, n.b.	$KM_{1,AH}$
	Kindergarten/Schule	Ja, Nein, n.b.	$KM_{1,KiGa}$
	Sonstige (z.B. Dialysezentren)	Ja, Nein, n.b.	–

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.4

Frage ID	Frage des Erhebungsbogens	Antwort-möglichkeiten	Indikator
29	Ist die Wasserversorgung im Kreis/in der kreisfreien Stadt redundant aufgestellt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	$VM_{1,Redundanz}$
30	Gibt es Lieferungsverflechungen mit anderen WVU außerhalb des Kreises/ der kreisfreien Stadt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	$VM_{2,aWVU}$
31	Welche mobilen Ressourcen sind für die Ersatzversorgung der Bevölkerung im Krisenfall verfügbar		$KM_{2,R}$
	mobile Aufbereitungsanlagen	Ja, teilweise, Nein, n.b.	$KM_{2,mobAufbereitung}$
	Wasserbehälter zum Transport mit Fahrzeugen Dritter	Ja, teilweise, Nein, n.b.	$KM_{2,Behälter}$
	Wasserwagen	Ja, teilweise, Nein, n.b.	$KM_{2,Wasserwagen}$
	fliegende Leitungen zu Nachbarversorgern	Ja, teilweise, Nein, n.b.	$KM_{2,mobLeitungen}$
	Sonstige	Freitext	–
32	Kann bei Stromausfall die öffentliche Wasserversorgung durch das/-die WVU Selbst aufrechterhalten werden?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	–
	Wenn ja, wie lange ist dies möglich	Freitext	–
	Stehen eigene Notstromaggregate zur Verfügung	Ja, Nein, n.b.	$KM_{2,Notstrom}$
	Falls nein: Sind Notstromaggregate folgender Organisationen eingeplant?		
	benachbarte Versorger	Ja, Nein, n.b.	–
	THW	Ja, Nein, n.b.	—
	Feuerwehr	Ja, Nein, n.b.	–
	Sonstige	Freitext	–
33	Kann mikrobiologisch belastetes Rohwasser mit eigenen Anlagen aufbereitet werden?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	–
	Wenn ja, wie?		

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.4

Frage ID	Frage des Erhebungsbogens	Antwort-möglichkeiten	Indikator
	Partikelentfernung durch Schnellfilter oder Ultrafiltration	Ja, Nein, n.b.	–
	Desinfektion mit Chlor, UV etc.	Ja, Nein, n.b.	–
	Sonstige	Freitext	–
34	Welchen Bedarf Sehen Sie zukünftig für die Notfallvorsorgeplanung in der Wasserversorgung?	Freitext	–
35	Welche Investitionen halten Sie im Rahmen der Ersatz- oder Notversorgung für angeraten? (1 = zwingend notwendig bis 5 = bedingt notwendig)		–
	Mobile Aufbereitungsanlagen	1; 2; 3; 4; 5	–
	Transportbehälter	1; 2; 3; 4; 5	–
	feste Verbundleitungen	1; 2; 3; 4; 5	–
	mobile Leitungen	1; 2; 3; 4; 5	–
	Wassertransportfahrzeuge	1; 2; 3; 4; 5	–
	Notbrunnen	1; 2; 3; 4; 5	–
	mobile Notstromaggregate	1; 2; 3; 4; 5	–
	Sonstige: Freitext	1; 2; 3; 4; 5	–
36	Hätten Sie sich bei der Notfallvorsorgeplanung mehr Unterstützung gewünscht	Ja, Nein	–
	Wenn ja, von wem?	Freitext	–
37	Fühlen Sie sich insgesamt auf einen möglichen Versorgungsausfall gut vorbereitet?	Ja, Nein	–

E.3 Ermittlung des Notfallvorsorgeplanungsindikators anhand des NoWa I Datensatzes

Gleichung E.1 zeigt die Ermittlung des Hauptindikators VP aus den Teilindikatoren VP_1 und VP_2.

$$\mathrm{VP} = \mathrm{VP}_1 \cdot z_{\mathrm{VP}_1} + \mathrm{VP}_2 \cdot z_{\mathrm{VP}_2} \tag{E.1}$$

Gleichung E.2 zeigt die Ermittlung des Hauptindikators VP aus dem Teilindikatoren VP_1 aus den NoWa I Daten.

$$\begin{aligned}
\mathrm{VP} &= \mathrm{VP}_1 \cdot z_{\mathrm{VP}_1} + \underbrace{\underbrace{\mathrm{VP}_2}_{=0} \cdot z_{\mathrm{VP}_2}}_{=0} \\
&= \frac{1}{2}(\mathrm{VP}_{1,\mathrm{Störung}} + \mathrm{VP}_{1,\mathrm{Quanti}}) \\
&= \frac{1}{2}(\mathrm{VP}_1,\mathrm{Störung} + \frac{\mathrm{VP}_{1,\mathrm{Naturgefahren}} + \mathrm{VP}_{1,\mathrm{Unfälle}} + \mathrm{VP}_{1,\mathrm{Unglücksfälle}} + \mathrm{VP}_{1,\mathrm{Anschläge}}}{n}) \\
z_{\mathrm{VP}_1} &= 1 - \underbrace{z_{\mathrm{VP}_2}}_{=0} = 1
\end{aligned} \tag{E.2}$$

Gleichung E.3 zeigt die Ermittlung des Hauptindikators RA aus den Teilindikatoren RA_1, RA_2, RA_3 und RA_4.

$$\begin{aligned}
\mathrm{RA} &= \mathrm{RA}_{\mathrm{RA}} \cdot \left(\mathrm{RA}_1 \cdot z_{\mathrm{RA}_1} + \underbrace{\mathrm{RA}_2}_{=0} \cdot z_{\mathrm{RA}_2} + \mathrm{RA}_3 \cdot z_{\mathrm{RA}_3} + \underbrace{\mathrm{RA}_4}_{=0} \cdot z_{\mathrm{RA}_4} \right) \\
&= \mathrm{RA}_{\mathrm{RA}} \cdot (\mathrm{RA}_{1,\mathrm{PastG}} \cdot z_{\mathrm{RA}_1} + \mathrm{RA}_{3,\mathrm{Ausmaß}} \cdot w_{\mathrm{RA}_3})
\end{aligned} \tag{E.3}$$

Gleichung E.4 zeigt die Ermittlung des Hauptindikators VM aus den Teilindikatoren VM_1, VM_2, VM_3, VM_4 und VM_5.

$$\begin{aligned}
\mathrm{VM} &= \mathrm{VM}_1 \cdot z_{\mathrm{VM}_1} + \mathrm{VM}_2 \cdot z_{\mathrm{VM}_2} + \underbrace{\mathrm{VM}_3}_{=0} \cdot z_{\mathrm{VM}_3} + \underbrace{\mathrm{VM}_4}_{=0} \cdot z_{\mathrm{VM}_4} + \mathrm{VM}_5 \cdot z_{\mathrm{VM}_5} \\
&= \mathrm{VM}_{1,\mathrm{Redundanz}} \cdot z_{\mathrm{VM}_1} + \mathrm{VM}_{2,\mathrm{aWVU}} \cdot z_{\mathrm{VM}_2} + \mathrm{VM}_5 \cdot z_{\mathrm{VM}_5}
\end{aligned} \tag{E.4}$$

Gleichung E.5 zeigt die Ermittlung Hauptindikators KM aus den Teilindikatoren KM_1, KM_2, KM_3 sowie KM_4.

$$KM = KM_1 \cdot z_{KM_1} + KM_2 \cdot z_{KM_2} + KM_3 \cdot z_{KM_3} + KM_4 \cdot z_{KM_4} \tag{E.5}$$

Gleichung E.6 zeigt die Ermittlung Teilindikators KM_1 aus den Einzelindikatoren $KM_{1,WVUKP}$, $KM_{1,KPI}$, $KM_{1,Kontakt}$, $KM_{1,sensE}$ sowie $KM_{1,sonstE}$.

$$\begin{aligned} KM_1 \quad = \quad & \tfrac{1}{4}\,(KM_{1,WVUKP} \cdot KM_{1,KPI} + KM_{1,Kontakt} + KM_{1,sensE} + KM_{1,sonstE} \\ & + \; KM_{1,sensE} + KM_{1,sonstE}) \end{aligned} \tag{E.6}$$

Gleichung E.7 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,Kontakt}$ aus den zehn Einzelindikatoren.

$$\begin{aligned} KM_{1,Kontakt} \quad = \quad & \tfrac{1}{10}\,(KM_{1,WVU} + KM_{1,KatSchutz} + KM_{1,HVB} + KM_{1,Feuerwehr} \\ & + \; KM_{1,THW} + KM_{1,DRK} + KM_{1,ZMZ} + KM_{1,LK} \\ & + \; KM_{1,Presse} + KM_{1,Sonst}) \end{aligned} \tag{E.7}$$

Gleichung E.8 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,sensibleE}$ aus den drei Einzelindikatoren.

$$KM_{1,sensibleE} \quad = \quad \tfrac{1}{3}\,(KM_{1,KH} + KM_{1,AH} + KM_{1,KiGa}) \tag{E.8}$$

Gleichung E.9 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,sonstE}$ aus den vier Einzelindikatoren.

$$KM_{1,sonstE} \quad = \quad \tfrac{1}{4}\,(KM_{1,Brauerei} + KM_{1,Getränke} + KM_{1,Spediteur} + KM_{1,WVU}) \tag{E.9}$$

Gleichung E.10 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,Brauerei}$ aus den drei Einzelindikatoren.

$$KM_{1,Brauerei} \quad = \quad \tfrac{1}{3}\,(KM_{1,TBrauerei} + KM_{1,SBrauerei} + KM_{1,KBrauerei}) \tag{E.10}$$

Gleichung E.11 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,Getränke}$ aus den drei Einzelindikatoren.

$$KM_{1,Getränke} \quad = \quad \tfrac{1}{3}\,(KM_{1,TGetränke} + KM_{1,SGetränke} + KM_{1,KGetränke}) \tag{E.11}$$

Gleichung E.12 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,Spediteur}$ aus den drei Einzelindikatoren.

$$KM_{1,Spediteur} \quad = \quad \tfrac{1}{3}\,(KM_{1,TSpediteur} + KM_{1,SSpediteur} + KM_{1,KSpediteur}) \tag{E.12}$$

Gleichung E.13 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,WVU}$ aus den drei Einzelindikatoren.

$$KM_{1,WVU} = \frac{1}{3}\left(KM_{1,TWVU} + KM_{1,SWVU} + KM_{1,KWVU}\right) \tag{E.13}$$

Gleichung E.14 zeigt die Ermittlung des Teilindikators KM_2 aus den zwei Einzelindikatoren.

$$KM_2 = \frac{1}{2}\left(KM_{2,R} + KM_{2,M}\right) \tag{E.14}$$

Gleichung E.15 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{2,R}$ aus den Einzelindikatoren.

$$\begin{aligned} KM_{2,R} = \frac{1}{5} \Big(& KM_{2,NB} \cdot \frac{KM_{2,NBInfo}+KM_{2,NBBetreiber}+KM_{2,NBBetrieb}}{3} \\ & KM_{2,mobAufbereitung} + KM_{2,Wasserwagen} + KM_{2,Transportkap} \\ & +KM_{2,Behälter} + KM_{2,mobLeitungen} \Big) \end{aligned} \tag{E.15}$$

Gleichung E.16 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{2,M}$ aus den drei Einzelindikatoren.

$$KM_{2,M} = \frac{1}{3} \quad \left(KM_{2,Notstrom} + KM_{2,Betriebsmittel} + KM_{2,Zapfstellen}\right) \tag{E.16}$$

Gleichung E.17 zeigt die Ermittlung des Teilindikators KM_3 aus den zwei Einzelindikatoren.

$$KM_3 = \frac{1}{2}\left(KM_{3,besÜ} + KM_{3,Ü}\right) \tag{E.17}$$

Gleichung E.18 zeigt die Ermittlung des Teilindikators KM_4 aus dem Einzelindikator.

$$KM_4 = KM_{4,Kom} \tag{E.18}$$

Gleichung E.19 zeigt die Ermittlung Hauptindikators E aus den Teilindikatoren E_1, E_2, E_3 und E_4.

$$\begin{aligned} E &= \underbrace{E_1}_{=0} \cdot z_{E_1} + E_2 \cdot z_{E_2} + \underbrace{E_3}_{=0} \cdot z_{E_3} + E_4 \cdot z_{E_4} \\ &= E_{2,RA} \cdot z_{E_2} + \frac{E_{4,Kontakt} + E_{4,Ü}}{2} \cdot z_{E_4} \end{aligned} \tag{E.19}$$

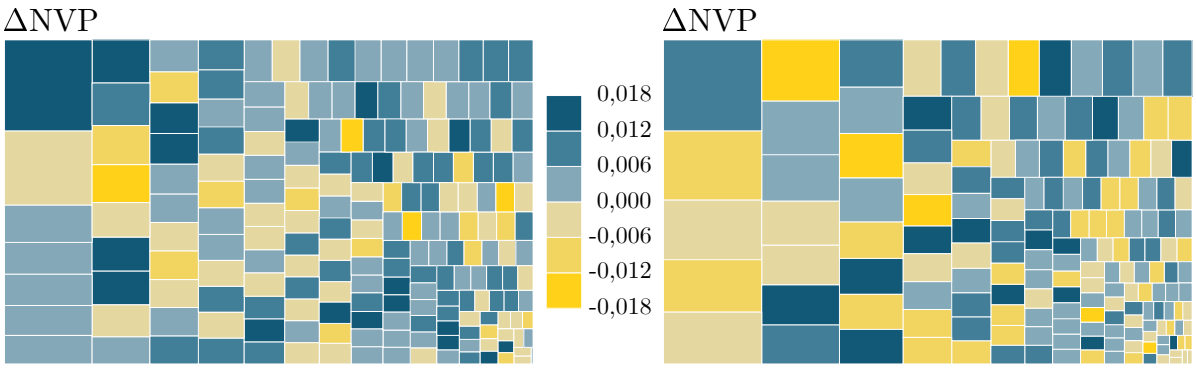
Tabelle E.5: Übersicht der für die Ermittlung des Standes der Notfallvorsorgeplanung angewandten Gewichtungsfaktoren der Haupt- und Teilindikatoren mit einer gleichverteilten Gewichtung und Gewichtung nach Expertenmeinung

Haupt-indikator		Teil-indikator	Gewichtung					
			Gleichverteilung			Expertenmeinung		
			x_j	z_i	$x_j \cdot z_i$	x_j	z_i	$x_j \cdot z_i$
VP			0,2			0,22		
	VP_1	Bewusstseinsbildung		1	0,2		1[a]	0,22
RA			0,2			0,2		
	RA_1	Gefahrenanalyse		0,5	0,1		0,5[a]	0,1
	RA_4	Risikovergleich und -bewertung		0,5	0,1		0,5[a]	0,1
VM			0,2			0,21		
	VM_1	Allgemeine Maßnahmen		0,5	0,1		0,5[a]	0,1
	VM_2	Redundante Systeme		0,5	0,1		0,5[a]	0,1
KM			0,2			0,2		
	KM_1	Organisation und Koordination		0,25	0,05		0,27	0,054
	KM_2	Ressourcen		0,25	0,05		0,25	0,050
	KM_3	Simulation		0,25	0,05		0,23	0,046
	KM_4	Krisenkommunikation		0,25	0,05		0,25	0,050
E			0,2			0,17		
	E_2	Risikoanalyse		0,5	0,1		0,5[a]	0,1
	E_4	Krisenmanagement		0,5	0,1		0,5[a]	0,1
		Summe	1		1	1		1

[a] Es fließen nicht alle Teilindikatoren der Hauptindikatoren VP, RA, VM und E in die Berechnung ein, daher wird hier eine gleichverteilte Gewichtung für die vorhandenen Teilindikatoren vorgenommen.

E.4 Differenz der Notfallvorsorgeplanungsindikatoren zwischen expertenbasierter und gleichverteilter Gewichtung

Die Abbildung E.8 zeigt die Differenzen der NVP_E und NVP_G zwischen expertenbasierter und gleichverteilter Gewichtung. Die farbliche Varianz der Rechtecke zeigt, dass die unterschiedlichen Gewichtungen die Ergebnisse der NVP_E bzw. NVP_G beeinflussen. Die blauen Rechtecke zeigen die Datensätze, bei denen der NVP_E größer ist als der NVP_G und somit das Ergebnisse bei einer expertenbasierten Gewichtung höher ausfällt als bei einer gleich verteilten Gewichtung. Umgekehrtes gilt für die Datensätze mit gelben Rechtecken. Zudem ist in der Abbildung E.8 zu erkennen, dass die Differenz von NVP_E und NVP_G im Bereich von $\pm 0{,}018$ liegt und somit bei einer Rundung des Ergebnisses auf die zweite Nachkommastelle nur in wenigen Fällen bemerkbar ist.



(a) Kreise und kreisfreie Städte

(b) Gemeinden

Abbildung E.8: Differenz der Notfallvorsorgeplanungsindikatoren NVP_E und NVP_G nach Größe der betrachteten Datensätze

E.5 Erhebungsbogen zur Ermittlung des vollständigen Notfallvorsorgeplanungsindikators

Tabelle E.6: Fragen zur Erhebung der Einzelindikatoren des Notfallvorsorgeplanungsindikators (NVP)

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
	Hauptindikator VP – Vorplanung				
	Teilindikator VP_1 – Bewusstseinsbildung				
1	Ist bekannt wie das Versorgungsgebiet nach Gemeinden bzw. Ortsteilen aufgeteilt ist?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$VP_{1,Gebiet}$
2	Entspricht die mögliche Wasserabgabemenge den definierten Schutzzielen?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$VP_{1,Abgabe}$
3	Ist die technisch maximal mögliche Abgabemenge durch die eigene Gewinnungsanlage bekannt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$VP_{1,TmAbgabe}$
4	Ist der technisch maximal mögliche Wasserbezug von anderen WVUs bekannt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016) Bross, Wienand et al. (2019)	$VP_{1,Bezug}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
5	Ist die Kapazität der eigenen Gewinnungsanlagen bekannt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$VP_{1,Kapazität}$
6	Ist bekannt welcher Teil des Versorgungsgebietes durch welche Wassergewinnung versorgt wird?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$VP_{1,Gewinnung}$
7	Ist für die einzelnen Behälter zur Wasserspeicherung Folgendes bekannt?				$VP_{1,Speicher}$
7.1	Herkunft des Wassers	Ja, teilweise, Nein	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$VP_{1,Herkunft}$
7.2	Fassungsvermögen der Speicherbehälter	Ja, teilweise, Nein	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$VP_{1,Fassung}$
7.3	max. mögliche Einspeisemenge aus den Speicherbehältern ins Netz	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$VP_{1,Einspeise}$
8	Besteht das Bewusstsein in Ihrer Kommune dass es zu quantitativen Beeinträchtigungen der Wasserversorgung kommen kann?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016) DIN EN 15975-2 (2013)	$VP_{1,Quanti}$
9	Besteht das Bewusstsein in Ihrer Kommune dass es zu qualitativen Beeinträchtigungen der Wasserversorgung kommen kann?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016) DIN EN 15975-2 (2013)	$VP_{1,Quali}$
	Teilindikator VP_2 – Festlegung von Verantwortlichkeiten				
10	Ist bekannt wer in dem/-den WVU Ansprechpartner für Notsituationen ist?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$VP_{2,WVU}$
11	Ist ein Krisenstab festgelegt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA G440 (2017), BBK (2016)	$VP_{2,Krisenstab}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
12	Ist die Aufbau- und Ablauforganisation festgelegt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016) DIN EN 15975-2 (2013)	$VP_{2,Aufbau}$
	Hauptindikator RA – Risikoanalyse				
	Teilindikator RA_1 – Gefahrenanalyse				
13	Wurde eine Gefahrenanalyse durchgeführt?	Ja, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2016)	$RA_{1,GA}$
14	Existiert eine Liste darüber, welche Gefahren bereits betrachtet wurden und welche noch kein Bestandteil der Gefahrenanalyse sind?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{1,Gliste}$
15	Stellen die folgenden außergewöhnlichen Ereignisse aus Sicht des WVU relevante Gefährdungen für die Wasserversorgung dar?				$RA_{1,Gefahr}$
15.1	Naturgefahren	Ja, teilweise, Nein	1; 0,5; 0	AWWA J100 (2010), BBK (2016)	$RA_{1,Natur}$
15.2	Unfälle (menschliches Versagen)	Ja, teilweise, Nein	1; 0,5; 0	AWWA J100 (2010), BBK (2016)	$RA_{1,Unfälle}$
15.3	Unglücksfälle (technisches Versagen)	Ja, teilweise, Nein	1; 0,5; 0	AWWA J100 (2010), BBK (2016)	$RA_{1,Unglück}$
15.4	Anschläge	Ja, teilweise, Nein	1; 0,5; 0	AWWA J100 (2010), BBK (2016)	$RA_{1,Anschläge}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
16	Beinhaltet die Gefahren-analyse Erfahrungen aus vergangenen Ereignissen?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{1,PastG}$
17	Sind in der Vergangenheit qualitative Beeinträchti-gungen der Wasserversor-gung aufgetreten, sodass Ersatzversorgungsmaßnah-men notwendig waren?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{1,PastQuali}$
18	Sind in der Vergangenheit quantitative Beeinträchti-gungen der Wasserversor-gung aufgetreten, sodass Ersatzversorgungsmaßnah-men notwendig waren?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{1,PastQuanti}$
19	Beinhaltet die Gefahren-analyse weitere potenzielle, bisher noch nicht eingetre-tene Gefahren?	Ja, Nein, n.b.	1; 0	BBK (2016)	$RA_{1,sonstG}$
20	Wurden Gefahren iden-tifiziert die prioritär zu betrachten sind?	Ja, Nein, n.b.	1; 0	AWWA (2018), BBK (2016)	$RA_{1,Gprio}$
	Teilindikator RA_2 – Vulnerabilitätsanalyse				
21	Wurde eine Vulnerabilitäts-analyse durchgeführt?	Ja, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2016)	$RA_{2,VA}$
22	Wurde die Vulnerabilitäts-analyse in Zusammenar-beit mit von WVU und KatSchutz durchgeführt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{2,Zusammen}$
23	Wurden für die Vulnera-bilitätsanalyse Szenarien identifiziert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{2,Szenarien}$
24	Sind die zu analysierenden Komponenten festgelegt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{2,Komp}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
25	Wurde überprüft welche Komponenten welchen Gefahren ausgesetzt wären (Exposition)?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{2,Expo}$
26	Wurde die Funktionsanfälligkeit der Komponenten überprüft?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{2,Funktion}$
27	Wurde die technische Ersetzbarkeit der Komponenten überprüft?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{2,techE}$
28	Wurde die organisatorische Ersetzbarkeit der Komponenten überprüft?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{2,orgE}$
	Teilindikator RA_3 – Risikoidentifikation				
29	Wurde die Risikoermittlung mit Einbindung von Fachbehörden oder Forschungseinrichtungen durchgeführt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2015b)	$RA_{3,Fach}$
30	Wurde das Schadensausmaß in den betrachteten Szenarien ermittelt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016), DIN ISO 31000 (2018)	$RA_{3,Ausmaß}$
31	Wurde die Beurteilung des Schadensausmaß mit Einbindung von Verantwortlichen des Bevölkerungsschutzes des Kreises/der kreisfreien Stadt durchgeführt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2015b)	$RA_{3,AusmaßKreis}$
32	Wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit in den betrachteten Szenarien ermittelt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016), DIN ISO 31000 (2018)	$RA_{3,Eintritt}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
33	Wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit mit Einbindung von Fachbehörden oder Forschungseinrichtungen durchgeführt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2015b)	$RA_{3,EintrittFach}$
34	Wurde die Zahl der betroffenen Einwohner in den betrachteten Szenarien ermittelt?	Ja, Nein, n.b.	1; 0	BBK (2016)	$RA_{3,Bevölkerung}$
35	Wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß auf einer Skala (bspw. gemäß BBK-Leitfaden *Sicherheit der Trinkwasserversorgung - Teil 1: Risikoanalyse*) klassifiziert?	Ja, Nein, n.b.	1; 0	BBK (2015b, 2016)	$RA_{3,Klasse}$
	Teilindikator RA_4 – Risikovergleich und -bewertung				
36	Wurden die Szenarien anhand einer Risikomatrix verglichen?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{4,Vergleich}$
37	Wurden die Szenarien anhand einer Risikomatrix priorisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$RA_{4,Bewertung}$
	Hauptindikator VM – Vorbeugende Maßnahmen				
	Teilindikator VM_1 – Strukturelle Redundanzen				
38	Sind die Gewinnungsanlagen redundant ausgelegt?	Ja, Nein, n.b.	1; 0	AWWA (2018), BBK (2016)	$VM_{1,G}$
39	Ist die Speicherung redundant ausgelegt?			AWWA (2018)	$VM_{1,S}$
39.1	quantitativ redundant?	Ja; Nein; n.b.	1; 0	BBK (2016)	$VM_{1,quantRedu}$
39.2	strukturell redundant?	Ja; Nein; n.b.	1; 0	BBK (2016)	$VM_{1,strukRedu}$
	Teilindikator VM_2 – Lieferverflechtungen				

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
40	Bestehen Lieferverflechtungen mit anderen Wasserversorgungsunternehmen?	Ja, Nein, n.b.	1; 0	AWWA (2018), BBK (2016), Boyle (1980)	$VM_{2,aWVU}$
Teilindikator VM_3 – Leitungsbau und Maßnahmen im Verteilsystem					
41	Sind die Leitungen im Versorgungssystem so angeordnet, dass die Teilgebiete auf verschiedenen Wegen versorgt werden können?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), Baur et al. (2019), Hoch (1999)	$VM_{3,Masch}$
42	Wurden Netzausbaumaßnahmen, die für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit notwendig sind, umgesetzt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	Hoch (1999)	$VM_{3,Netz}$
Teilindikator VM_4 – Fernüberwachung und Leitsysteme					
43	Ist das Versorgungssystem an ein Fernüberwachungssystem angeschlossen?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), Grombach et al. (2000) Mehlhorn und Weiß (1999)	$VM_{4,Fern}$
44	Ist das Versorgungssystem durch ein Leitsystem nach den a.a.R.d.T ausgestattet?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$VM_{4,LS}$
Teilindikator VM_5 – Allgemeine Maßnahmen					
45	Wurden Erneuerungsmaßnahmen, die für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit notwendig sind, umgesetzt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), Schlicht (1999)	$VM_{5,Neu}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
46	Wurden Instandhaltungs-maßnahmen, die zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit notwendig sind, umgesetzt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), Schlicht (1999)	$VM_{5,Instand}$
47	Wurden Objektschutz-maßnahmen, die für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit notwendig sind, umgesetzt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016) DVGW W 1050 (2012)	$VM_{5,Objekt}$
	Hauptindikator KM – Krisenmanagement				
	Teilindikator KM_1 – Organisation und Koordination				
48	Werden durch das WVU Krisenpläne zusätzlich zu den Maßnahmeplänen gemäß TrinkwV erarbeitet?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016) DVGW W 1020 (2018)	$KM_{1,WVUKP}$
49	Werden von der KatSchutz Behörde Krisenpläne für Notsituationen in der Wasserversorgung erarbeitet?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016) DVGW W 1020 (2018)	$KM_{1,KatKP}$
50	Sind Ihnen diese Pläne inhaltlich bekannt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016) Doe und Whitman (2011)	$KM_{1,KPI}$
51	Sind die Kontaktdaten folgender Ansprechpartner bekannt?				$KM_{1,Kontakt}$
51.1	WVU	Ja; Nein	1; 0	AWWA G440 (2017), AWWA (2018)	$KM_{1,WVU}$
51.2	Krisenstab/ Katastrophen-schutz	Ja; Nein	1; 0	AWWA G440 (2017), AWWA (2018),	$KM_{1,KatSchutz}$
51.3	Hauptverwaltungsbeamte (HVB)	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,HVB}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
51.4	Feuerwehr	Ja; Nein	1; 0	AWWA G440 (2017), AWWA (2018),	$KM_{1,Feuerwehr}$
51.5	THW	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,THW}$
51.6	DRK	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,DRK}$
51.7	ZMZ (Bundeswehr)	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,ZMZ}$
51.8	Landeskommando (Bundeswehr)	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,LK}$
51.9	Sonstige Behörden (z.B. Gesundheit, Umwelt, Polizei)	Ja; Nein	1; 0	AWWA G440 (2017), AWWA (2018),	$KM_{1,sonst}$
51.10	Presse	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,Presse}$
52	Sind Sensible Einrichtungen im Versorgungsgebiet vorhanden?			BBK (2016)	$KM_{1,vSensE}$
52.1	Krankenhaus	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,vKH}$
52.2	Altenheim/Pflegeeinrichtung	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,vAH}$
52.3	Kindergarten/Schule	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,vKiGa}$
52.4	Dialysezentren	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,vDialyse}$
53	Sind Sensible Einrichtungen im Versorgungsgebiet erfasst?			BBK (2016)	$KM_{1,eSensE}$
53.1	Krankenhaus	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,eKH}$
53.2	Altenheim/Pflegeeinrichtung	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,eAH}$
53.3	Kindergarten/Schule	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,eKiGa}$
53.4	Dialysezentren	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,eDialyse}$
54	Sind Telefonnummer, Standort und Kapazität folgender Einrichtungen im Kreis/in der kreisfreien Stadt erfasst?			BBK (2016) Bross, Wienand et al. (2019)	$KM_{1,sonstE}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
54.1	Brauerei/Getränkehersteller				$KM_{1,Brauerei}$
54.1.1	Telefonnummer	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,TBrauerei}$
54.1.2	Standort	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,SBrauerei}$
54.1.3	Kapazität	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,KBrauerei}$
54.2	Getränkeversorger (Getränkemarkt)				$KM_{1,Getränke}$
54.2.1	Telefonnummer	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,TGetränke}$
54.2.2	Standort	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,SGetränke}$
54.2.3	Kapazität	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,KGetränke}$
54.3	Spediteure				$KM_{1,Spediteure}$
54.3.1	Telefonnummer	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,TSpediteure}$
54.3.2	Standort	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,SSpediteure}$
54.3.3	Kapazität	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,KSpediteure}$
54.4	benachbarte Versorger			AWWA G440 (2017), AWWA (2018), Morley und Riordan (2006)	$KM_{1,WVU}$
54.4.1	Telefonnummer	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,TWVU}$
54.4.2	Standort	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,SWVU}$
54.4.3	Kapazität	Ja; Nein	1; 0		$KM_{1,KWVU}$
	Teilindikator KM_2 – Ressourcenvorhaltung				
55	Werden die zur Ersatzwasserversorgung nötigen Ressourcen (mobile Aufbereitungsanlagen, mobile Leitungen, Transportfahrzeuge) vorgehalten bzw. ist der Zugriff sichergestellt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$KM_{2,R}$
56	Werden die zur Ersatzwasserversorgung nötigen Materialien (Druckerhöhungsanlagen, Schlauchverbindungen, etc.) vorgehalten bzw. ist der Zugriff sichergestellt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$KM_{2,M}$
	Teilindikator KM_3 – Übungen				

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
57	Wurde das Zusammenspiel mit den beteiligten Behörden und Organisationen für den Krisenfall in der Wasserversorgung besprochen?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5;	AWWA G440 (2017), AWWA (2018), BBK (2016)	$KM_{3,besÜ}$
58	Wurde das Zusammenspiel mit den beteiligten Behörden und Organisationen für den Krisenfall in der Wasserversorgung geübt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA G440 (2017), AWWA (2018), BBK (2016)	$KM_{3,Ü}$
		Teilindikator KM_4 – Ausrüstung			
59	Ist der Zugriff auf Kommunikationsmittel für einen Krisenfall sichergestellt?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2016), EPA (2007)	$KM_{4,Kom}$
		Hauptindikator E – Evaluierung			
		Teilindikator E_1 – Evaluierung Vorplanung			
60	Werden die Aspekte zur Bewusstseinsbildung regelmäßig evaluiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2016)	$E_{1,VP1}$
61	Werden die Aspekte der Verantwortlichkeiten regelmäßig evaluiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2016)	$E_{1,VP2}$
		Teilindikator E_2 – Evaluierung Risikoanalyse			
62	Werden die Aspekte der Gefahrenanalyse regelmäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA G430 (2015), AWWA (2018), BBK (2016)	$E_{2,RA1}$

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
63	Werden die Aspekte der Vulnerabilitätsanalyse regelmäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilwei-se,Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2016)	$E_{2,RA2}$
64	Werden die Aspekte der Risikoidentifikation regel-mäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2016)	$E_{2,RA3}$
65	Werden die Aspekte des Risikovergleichs und -bewertung regelmäßig überprüft und ggf. aktuali-siert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2016)	$E_{2,RA4}$
	Teilindikator E_3 – Evaluierung Vorbeugende Maßnahmen				
66	Werden die nötigen struk-turellen Maßnahmen regel-mäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$E_{3,VM1}$
67	Werden die Regelungen der Lieferverflechtungen regelmäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$E_{3,VM2}$
68	Werden die nötigen Maß-nahmen im Leitungsbau regelmäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$E_{3,VM3}$
69	Werden die nötigen Maß-nahmen zur Fernüberwa-chung und der Leitsysteme regelmäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$E_{3,VM4}$
70	Werden die nöti-gen Erneuerungs-, Instandhaltungs- und Ob-jektschutzmaßnahmen regelmäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$E_{3,VM5}$
	Teilindikator E_4 – Evaluierung Krisenmanagement				

Fortsetzung auf nächster Seite

Fortsetzung von Tabelle E.6

ID	Frage zur Datenerhebung	Antwort-möglichkeiten	zugehöriger Zahlenwert	Quelle	Einzel-indikator
71	Werden die Aspekte der Organisation und Koordination des Krisenmanagements regelmäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2016)	$E_{4,KM1}$
72	Werden die Aspekte der Vorhaltung von Ressourcen und Materialien des Krisenmanagements regelmäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	BBK (2016)	$E_{4,KM2}$
73	Werden die Aspekte der Übungen des Krisenmanagements regelmäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA G440 (2017), AWWA (2018), BBK (2016)	$E_{4,KM3}$
74	Werden die Aspekte der Kommunikation des Krisenmanagements regelmäßig überprüft und ggf. aktualisiert?	Ja, teilweise, Nein, n.b.	1; 0,5; 0	AWWA (2018), BBK (2016), EPA (2007)	$E_{4,KM4}$

E.6 Gleichungen zur Ermittlung des vollständigen Notfallplanungsindikators

Die Gleichung E.20 zeigt die Ermittlung des Hauptindikators VP aus den Teilindikatoren VP_1 und VP_2.

$$VP = VP_1 \cdot w_{VP_1} + VP_2 \cdot w_{VP_2} \tag{E.20}$$

Die Gleichung E.21 zeigt die Ermittlung des Teilindikators VP_1 aus den neun Einzelindikatoren.

$$\begin{aligned} VP_1 = \frac{1}{9} \cdot (&VP_{1,\text{Gebiet}} + VP_{1,\text{Abgabe}} + VP_{1,\text{TmAbgabe}} + VP_{1,\text{Bezug}} + VP_{1,\text{Kapazität}} \\ &+ VP_{1,\text{Gewinnung}} + VP_{1,\text{Speicher}} VP_{1,\text{Quanti}} + VP_{1,\text{Quali}}) \end{aligned} \tag{E.21}$$

Die Gleichung E.22 zeigt die Ermittlung des Teilindikators VP_2 aus den drei Einzelindikatoren.

$$VP_2 = \frac{1}{3} \cdot (VP_{2,WVU} + VP_{2,Krisenstab} + VP_{2,Aufbau}) \tag{E.22}$$

Die Gleichung E.23 zeigt die Ermittlung des Hauptindikators Risikoanalyse (RA) aus den Teilindikatoren RA_1, RA_2, RA_3 und RA_4.

$$RA = RA_1 \cdot w_{RA_1} + RA_2 \cdot w_{RA_2} + RA_3 \cdot w_{RA_3} + RA_4 \cdot w_{RA_4} \tag{E.23}$$

Die Gleichung E.24 zeigt die Ermittlung des Teilindikators RA_1 aus den acht Einzelindikatoren.

$$\begin{aligned} RA_1 = \frac{1}{8} \cdot (&RA_{1,GA} + RA_{1,Gliste} + RA_{1,Gefahr} + RA_{1,PastG} \\ &+ RA_{1,PastQuali} + RA_{1,PastQuanti} + RA_{1,sonstG} + RA_{1,Gprio}) \end{aligned} \tag{E.24}$$

Die Gleichung E.25 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $RA_{1,Gefahr}$ aus den vier Einzelindikatoren.

$$RA_{1,Gefahr} = \frac{1}{4} \cdot (RA_{1,Natur} + RA_{1,Unfälle} + RA_{1,Unglück} + RA_{1,Anschläge}) \tag{E.25}$$

Die Gleichung E.26 zeigt die Ermittlung des Teilindikators RA_2 aus den acht Einzelindikatoren.

$$\begin{aligned} RA_2 = \frac{1}{8} \cdot (&RA_{2,VA} + RA_{2,Zusammen} + RA_{2,Szenarien} + RA_{2,Komp} \\ &+ RA_{2,Expo} + RA_{2,Funktion} + RA_{2,techE} + RA_{2,orgE}) \end{aligned} \tag{E.26}$$

Die Gleichung E.27 zeigt die Ermittlung des Teilindikators RA_3 aus den sieben Einzelindikatoren.

$$\begin{aligned} RA_3 = \frac{1}{7} \cdot (&RA_{3,Fach} + RA_{3,Ausmaß} + RA_{3,AusmaßKreis} + RA_{3,Eintritt} \\ &+ RA_{3,EintrittFach} + RA_{3,Bevölkerung} + RA_{3,Klasse} \end{aligned} \tag{E.27}$$

Die Gleichung E.28 zeigt die Ermittlung des Teilindikators RA_4 aus den zwei Einzelindikatoren.

$$RA_4 = \frac{1}{2} \cdot (RA_{4,Vergleich} + RA_{4,Bwertung}) \tag{E.28}$$

Die Gleichung E.29 zeigt die Ermittlung des Hauptindikators Vorbeugende Maßnahmen (VM) aus den Teilindikatoren VM_1, VM_2, VM_3, VM_4 und VM_5.

$$\begin{aligned} VM = &VM_1 \cdot w_{VM_1} + VM_2 \cdot w_{VM_2} + VM_3 \cdot w_{VM_3} \\ &+ .VM_4 \cdot w_{VM_4} + VM_5 \cdot w_{VM_5} \end{aligned} \tag{E.29}$$

Die Gleichung E.30 zeigt die Ermittlung des Teilindikators VM_1 aus den zwei Einzelindikatoren.

$$VM_1 = \frac{1}{2} \cdot (VM_{1,G} + VM_{1,S}) \tag{E.30}$$

Die Gleichung E.31 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $VM_{1,S}$ aus den zwei Einzelindikatoren.

$$VM_{1,S} = \frac{1}{2} \cdot (VM_{1,quantRedu} + VM_{1,strukRedu}) \tag{E.31}$$

Die Gleichung E.32 zeigt die Ermittlung des Teilindikators VM_1 aus dem Einzelindikator $VM_{2,aWVU}$.

$$VM_2 = VM_{2,aWVU} \tag{E.32}$$

Die Gleichung E.33 zeigt die Ermittlung des Teilindikators VM_3 aus den zwei Einzelindikatoren.

$$VM_3 = \frac{1}{2} \cdot (VM_{3,Masch} + VM_{3,Netz}) \tag{E.33}$$

Die Gleichung E.34 zeigt die Ermittlung des Teilindikators VM_4 aus den zwei Einzelindikatoren.

$$VM_4 = \frac{1}{2} \cdot (VM_{4,Fern} + VM_{4,LS}) \tag{E.34}$$

Die Gleichung E.35 zeigt die Ermittlung des Teilindikators VM_5 aus den drei Einzelindikatoren.

$$VM_5 = \frac{1}{3} \cdot (VM_{5,Neu} + VM_{5,Instand} + VM_{4,Objekt}) \tag{E.35}$$

Die Gleichung E.36 zeigt die Ermittlung des Hauptindikators KM aus den Teilindikatoren KM_1, KM_2, KM_3 und KM_4.

$$KM = KM_1 \cdot w_{KM_1} + KM_2 \cdot w_{KM_2} + KM_3 \cdot w_{KM_3} + KM_4 \cdot w_{KM_4} \tag{E.36}$$

Die Gleichung E.37 zeigt die Ermittlung des Teilindikators KM_1 aus den sieben Einzelindikatoren.

$$\begin{aligned} KM_1 = \frac{1}{7} \cdot (&KM_{1,WVUKP} + KM_{1,KatKP} + KM_{1,KPI} + KM_{1,Kontakt} \\ &+ KM_{1,vSensE} + KM_{1,eSensE} + KM_{1,sonstE}) \end{aligned} \tag{E.37}$$

Die Gleichung E.38 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,Kontakt}$ aus den zehn Einzelindikatoren.

$$\begin{aligned} KM_{1,Kontakt} = \frac{1}{10} \cdot (&KM_{1,WVU} + KM_{1,KatSchutz} + KM_{1,HVB} + KM_{1,Feuerwehr} \\ &+ KM_{1,THW} + KM_{1,DRK} + KM_{1,ZMZ} + KM_{1,LK} \\ &+ KM_{1,sonst} + KM_{1,Presse}) \end{aligned} \tag{E.38}$$

Die Gleichung E.39 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,vSensE}$ aus den vier Einzelindikatoren.

$$KM_{1,vSensE} = \frac{1}{4} \cdot (KM_{1,vKH} + KM_{1,vAH} + KM_{1,vKiGa} + KM_{1,vDialyse}) \tag{E.39}$$

Die Gleichung E.39 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,vSensE}$ aus den vier Einzelindikatoren.

$$KM_{1,eSensE} = \frac{1}{4} \cdot (KM_{1,eKH} + KM_{1,eAH} + KM_{1,eKiGa} + KM_{1,eDialyse}) \tag{E.40}$$

Die Gleichung E.41 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,sonstE}$ aus den vier Einzelindikatoren.

$$KM_{1,sonstE} = \frac{1}{4} \cdot (KM_{1,Brauerei} + KM_{1,Getränke} + KM_{1,Spediteure} + KM_{1,WVU}) \tag{E.41}$$

Die Gleichung E.42 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,Brauerei}$ aus den drei Einzelindikatoren.

$$KM_{1,Brauerei} = \frac{1}{3} \cdot (KM_{1,TBrauerei} + KM_{1,SBrauerei} + KM_{1,KBrauerei}) \tag{E.42}$$

Die Gleichung E.43 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,Getränke}$ aus den drei Einzelindikatoren.

$$KM_{1,Getränke} = \frac{1}{3} \cdot (KM_{1,TGetränke} + KM_{1,SGetränke} + KM_{1,KGetränke}) \tag{E.43}$$

Die Gleichung E.44 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,Spediteure}$ aus den drei Einzelindikatoren.

$$KM_{1,Spediteure} = \frac{1}{3} \cdot (KM_{1,TSpediteure} + KM_{1,SSpediteure} + KM_{1,KSpediteure}) \tag{E.44}$$

Die Gleichung E.45 zeigt die Ermittlung des Einzelindikators $KM_{1,WVU}$ aus den drei Einzelindikatoren.

$$KM_{1,WVU} = \frac{1}{3} \cdot (KM_{1,TWVU} + KM_{1,SWVU} + KM_{1,KWVU}) \tag{E.45}$$

Die Gleichung E.46 zeigt die Ermittlung des Teilindikators KM_2 aus den zwei Einzelindikatoren.

$$KM_2 = \frac{1}{2} \cdot (KM_{2,R} + KM_{2,M}) \tag{E.46}$$

Die Gleichung E.47 zeigt die Ermittlung des Teilindikators KM_3 aus den zwei Einzelindikatoren.

$$KM_3 = \frac{1}{2} \cdot (KM_{3,besÜ} + KM_{3,Ü}) \tag{E.47}$$

Die Gleichung E.48 zeigt die Ermittlung des Teilindikators KM_4 aus dem Einzelindikator $KM_{4,Kom}$.

$$KM_4 = \frac{1}{1} \cdot (KM_{4,Kom}) \tag{E.48}$$

Gleichung E.49 zeigt die Ermittlung des Hauptindikators E aus den Teilindikatoren E_1, E_2, E_3 und E_4.

$$E = E_1 \cdot w_{E_1} + E_2 \cdot w_{E_2} + E_3 \cdot w_{E_3} + E_4 \cdot w_{E_4} \tag{E.49}$$

Gleichung E.50 zeigt die Ermittlung des Teilindikators E_1 aus den zwei Einzelindikatoren.

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot (E_{1,VP1} + E_{1,VP2}) \tag{E.50}$$

Gleichung E.51 zeigt die Ermittlung des Teilindikators E_2 aus den vier Einzelindikatoren.

$$E_2 = \frac{1}{4} \cdot (E_{2,RA1} + E_{2,RA2} + E_{2,RA3} + E_{2,RA4}) \tag{E.51}$$

Gleichung E.52 zeigt die Ermittlung des Teilindikators E_3 aus den fünf Einzelindikatoren.

$$E_3 = \frac{1}{5} \cdot (E_{3,VM1} + E_{3,VM2} + E_{3,VM3} + E_{3,VM4} + E_{3,VM5}) \tag{E.52}$$

Gleichung E.53 zeigt die Ermittlung des Teilindikators E_4 aus den vier Einzelindikatoren.

$$E_4 = \frac{1}{4} \cdot (E_{4,KM1} + E_{4,KM2} + E_{4,KM3} + E_{4,KM4}) \tag{E.53}$$

Mitteilungen / Institut für Wasserwesen

Heft 1	Darstellung des Instituts für Wasserwesen an der Hochschule der Bundeswehr München, 1978	*vergriffen*
Heft 2	Ansprachen und Vorträge anlässlich der Inbetriebnahme der Laboratorien des Instituts für Wasserwesen an der Hochschule der Bundeswehr München, 1979	*vergriffen*
Heft 3	Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1980	
Heft 4	Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1980	
Heft 5	Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1981	
Heft 6	Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1982	*vergriffen*
Heft 7	Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1982	*vergriffen*
Heft 8	Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1983	*vergriffen*
Heft 9	Koch, K. Physikalisch-chemische Messung von Geruchsemissionen auf kommunalen Kläranlagen, 1983	*vergriffen*
Heft 10	Vogel, G. Instationäre Strömung von Wasser-Feststoff-Gemischen in Druckrohrleitungen, 1983	
Heft 11	Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen, 1983	
Heft 12	Schrimpf, W. und Steinle, E. Untersuchung an horizontal durchströmten Sandfängen zur Verbesserung der Sandabscheidung und Vorreinigung kommunaler Abwässer, 1984	*vergriffen*
Heft 13	Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1984	*vergriffen*
Heft 14	Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1985	*vergriffen*
Heft 15	Koplitz-Weißgerber, G. Bewirtschaftung von Bewässerungssystemen in semiariden Regionen, 1985	
Heft 16	Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1986	
Heft 17	Keser, G. Der Einfluss der hydrologischen Unsicherheit auf die Versorgung durch Wasserkraftspeicher, 1986	
Heft 18	Färber, K. Stochastische Modelle zur Simulation des Transportes nicht kohäsiver Sedimente in offenen Gerinnen, 1987	
Heft 19	Vetter, M. Der Transport suspendierter Feststoffe in offenen Gerinnen, 1987	*vergriffen*
Heft 20	Schrimpf, W. Ein Beitrag zur Berechnung der Sedimentation von Feststoffen in horizontal durchströmten Sandfängen, 1987	

Heft 21 Färber, K.
Stochastische Modelle der Bewegung suspendierter Partikel in turbulenter Strömung, 1987

Heft 22 Steinle, E.
Untersuchungen zur Energiebilanz konventioneller beheizter Faulbehälter - Konsequenzen für die Bemessung von Faulgasspeichern sowie Faulraumheizungen, 1987

Heft 23 Hoffmann, H.
Die Leistungsfähigkeit von Belebungsverfahren in Kaskadenschaltung, 1987

Heft 24 Kaiser, K. und Teichmann, H. *vergriffen*
Vergleichende Geruchsmessungen auf Abwasserreinigungsanlagen, 1987

Heft 25 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1987

Heft 26 Vetter, M.
Gesamttransport von Sedimenten in offenen Gerinnen, 1988

Heft 27 Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen, 1988

Heft 28 Grußadressen und Vorträge anlässlich der 10-Jahres-Feier des Instituts für Wasserwesen (1978 - 1989), 1988

Heft 29 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1989

Heft 30 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1989

Heft 31 Montaño Vargas, J. L.
Prognose von Niederschlagsfeldern, 1989

Heft 32 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1989

Heft 33 Bever, J. G.
Die Monodeponie als eine Möglichkeit zur Entsorgung von kommunalem Klärschlamm, 1989

Heft 34 Niekamp, O.
Der Betrieb von Speichersystemen mit Überleitung unter Berücksichtigung von Nutzungsänderungen, 1989

Heft 35 Øverland, H.
Einfluss der Landnutzung auf Hochwasserabfluss und Schwebstofftransport, 1990

Heft 36 Patt, H. *vergriffen*
Hydromechanische Untersuchungen an einem belüfteten Sandfang, 1990

Heft 37 Stein, A.
Ein Beitrag zur Bemessung belüfteter Sandfänge kommunaler Kläranlagen, 1990

Hefte 38 Beiträge der 5. Wissenschaftlichen Tagung „Hydrologie und Wasserwirtschaft“: 38a/38b Folgen anthropogener Einflüsse auf den Wasserhaushalt und die Wasserbewirtschaftung, 1990

Heft 39 Zottmann, W. L. M. *vergriffen*
Zur Entstehung von Riffeln und Dünen, 1991

Heft 40 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1992

Heft 41 Norgauer, U.
Untersuchung der Abhängigkeit des Wirkungsgrades der Schlammfaulung von der Durchmischung im Faulbehälter, 1992

Heft 42 Vetter, M.
Ein Beitrag zur Berechnung des Feststofftransports in offenen Gerinnen, 1992

Heft 43 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1992

Heft 44 Hagen, N.
Steuerung von Speichern unter dem Aspekt der Wassergüte, 1992

Heft 45 Kleeberg, H.-B. und Øverland, H.
Möglichkeiten der Abflußmodellierung unter Nutzung von Geoinformationssystemen, 1993

Heft 46 Urbaniak, S.
Phosphorelimination durch Vor-, Simultan- und Nachfällung mit Kalk bei Abwasser mit geringer Säurekapazität, 1993

Heft 47 Hagen, N. und Kleeberg, H.-B. *vergriffen*
Möglichkeiten der Modellierung des großräumigen Stofftransportes auf Landflächen Güte- Simulationsmodelle für stehende Gewässer - Eine Literaturanalyse, 1993

Heft 48 Bechteler, W., Broich, K., Hartmann, S., Kulisch, H., Nuji, M., Otto, A. J.
Simulationsmodelle zur Berechnung von Dammbrüchen und 1- bzw. 2-dimensionaler Ausbreitung der Flutwelle im Gelände, 1993

Heft 49 Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen 1988 - 1993, 1993

Heft 50 Sattel, H. *vergriffen*
Wandschubspannung an umströmten Körpern, 1994

Heft 51 Geitz, M.
Einfluss der räumlichen Niederschlagsvariabilität auf Ergebnisse von Niederschlag-Abfluss- Berechnungen, 1994

Heft 52 Patt, H.
Der naturnahe Gewässerausbau - Grundlagen und Anwendungen, 1995

Heft 53 Mayer, O. *vergriffen*
Auslegung und Simulation photovoltaischer Wechselstrompumpensysteme, 1995

Heft 54 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1995

Heft 55 Kleeberg, H.-B. und Niekamp, O.
Vorstudie zur Formulierung von Forschungen zur Verfügbarkeit von Wasser, 1995

Heft 56 Tagungsband Klimaänderung und Wasserwirtschaft
- Internationales Symposium 27./28. November 1995 im Europäischen Patentamt München, 1996

Heft 57 Baier, V.
Bestimmung und Beschreibung der Form von Schwebstoffpartikeln mittels Unterwasservideomikroskop und digitaler Bildverarbeitung, 1996

Heft 58 Bechteler, W., Vollmers, H.-J., Wieprecht, S.
DFG - Rundgespräch Geschiebe am 7./8. 12. 1995 in Würzburg, 1996

Heft 59 Tasdemir, A.
Experimentelle und numerische Ermittlung der freien Wasseroberfläche, 1997

Heft 60 Hartmann, S.
Entwicklung einer Strategie zur in situ-Ermittlung der kritischen Erosionsgeschwindigkeit, 1997

Heft 61 Broich, K.
Computergestützte Analyse des Dammerosionsbruchs, 1998

Heft 62 Nujic, M.
Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen, 1998

Heft 63 Shen, Z.
Veränderung des Geschiebetransports durch naturnahe Sohleneinbauten, 1998

Heft 64 Urbaniak, S.
Belastungsschwankungen und ihre Auswirkungen auf die Leistung von Abwasserreinigungsanlagen, 1998

Heft 65 Tätigkeitsbericht des Instituts für Wasserwesen 1993 -1998, 1998

Heft 66 Festveranstaltung 20 Jahre Institut für Wasserwesen
Ehrendoktorwürde Prof. Dr.-Ing. Habil. J. Giesecke, 1999

Heft 67 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1999

Heft 68 Vorträge aus dem Wasserwirtschaftlichen Kolloquium, 1999

Heft 69 Günthert, F. W. und Osswald, M.
Minimierung des Schlammanfalls auf Kläranlagen durch Desintegration - Bestandsaufnahme auf großtechnischen Anlagen, 1999

Heft 70 Kleeberg, H.-B. und Mayer, U.
Hydrologische Extreme - Gefährdungspotentiale in Fließgewässern durch Trockenperioden, 1999

Heft 71[1] Hügel, T.
Abflussberechnung mit Hilfe Neuronaler Netze, 2000
ISBN 3-486-26499-0

Heft 72[1] Schmid, A.
Das Phänomen der „biologischen Resonanz“:
Basis zur Optimierung biologischer Reinigungsstufen, 2000
ISBN 3-486-26444-3

Heft 73[1] Mück, R.
Räumliche und zeitliche Verteilung von Starkregen und deren Wahrscheinlichkeiten, 2000
ISBN 3-486-26500-8

Heft 74[1] Bechteler, W. und Günthert, F. W.
Zerstörungsfreie Dichtheitsprüfung von Grundstücksentwässerungsleitungen, 2001
ISBN 3-486-26517-2

Heft 75[1] Wieprecht, S.
Entstehung und Verhalten von Transportkörpern bei groben Sohlenmaterial, 2001
ISBN 3-486-26518-0

Heft 76[1] Günthert, F. W., Eder, B., Krause, S., Herb, S., Hagmeyer, G.
Einsatz von Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung von trübstoffhaltigem und mikrobiologisch belastetem Karst-, Grund- und Quellwässern, 2001
ISBN 3-486-26519-9

Heft 77[1] Günthert, F. W., Narr, N., Reicherter, E.
Beiträge zum Bau von Abwasserleitungen: Zeitaufwand, Kosten und Verlegeverfahren, 2001
ISBN 3-486-26520-2

Heft 78[1] Günthert, F. W. et al.
Feststoffabtrennung auf Kläranlagen: Theorie und Praxis, 2001
ISBN 3-486-26525-3

Heft 79[1] Kulisch, H.
Ausbreitung von Dammbruchwellen im physikalischen Modell, 2002
ISBN 3-486-26

Heft 80[1] Krause, S.
Huminstoffe im Sickerwasser von Klärschlamm-Monodeponien, 2002
ISBN 3-486-26538-5

Heft 81[1] Farshi Haghro, D.
Two-Dimensional Simulation of Sediment Transport on Unstructured Mesh, 2003
ISBN 3-486-26557-1

Heft 82[1] Dick, T.
Variabilität hydrologischer Regressionsmodelle, 2003
ISBN 3-486-26540-7

Heft 83[1] Maurer, M.
Zuverlässigkeit von Berechnungen des Feststofftransports, 2003
ISBN 3-486-26558-X

Heft 84[1] Reicherter, E.
Untersuchungen zu Kennzahlen als Grundlage für Kostenbetrachtungen in der Abwasserentsorgung, 2003
ISBN 3-486-26553-9

Heft 85 Festveranstaltung zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Bechteler und Prof. Dr.-Ing. Hans-B. Kleeberg *vergriffen*

Heft 86[1] Vestner, R.
Leistung und CBS-Bemessung der vorgeschalteten Denitrifikation unter erhöhter Sauerstofflimitierung für Tropfkörper-Anlagen, 2003
ISBN 3-486-26554-7

Heft 87[1] Walther, G.
In-situ-Versuche zu Planung und Bau von Ver- und Entsorgungsleitungen mit dem Pflugverfahren, 2003
ISBN 3-486-26562-8

Heft 88[1] Vogel, S.
Ansätze zur Bemessung rauer Rampen in aufgelöster Bauweise, 2003
ISBN 3-486-26563-6

Heft 89 Bofinger, A. *vergriffen*
Das stationäre Transportgleichgewicht natürlicher geschiebeführender Fließgewässer - Empfindlichkeit hydromechanischer Parameter in eindimensionalen Modellen, 2003

Heft 90 Günthert, F. W.
Einführung und Umsetzung der getrennten Abwassergebühr, 2004

Heft 91[1] Komaei, S.
A Robust Implicit Shallow Water Equations Solver on Unstructured Grid, 2004
ISBN 3-486-63072-5

Heft 92[1] Eder, B
Untersuchungen zur Verbesserung des Stoffstrommanagements auf Kläranlagen - Auslegungsansätze von Ultraschallanlagen zur Klärschlammbehandlung, 2004
ISBN 3-486-63071-7

Heft 93[1] Günthert, F. W. und Krause, S.
Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung, 2004
ISBN 3-486-63067-9

Heft 94[1] Khedr, A. M.
Socio-Economic Assessment of Water Supply in Rural Egypt, 2006
ISBN 3-8356-3121-7, ISBN 978-3-8356-3121-2

Heft 95 Wolf, M. *vergriffen*
Untersuchung zu Sanierungsstrategien von Abwasserkanalnetzen und deren Auswirkungen auf Wertentwicklung und Abwassergebühren, 2006

Heft 96[1] Goebel, H.
Entwicklung einer Benchmarking - Methode für die Verbesserung der Gewässerstrukturen von Fließgewässern, 2006
ISBN 3-8356-3111-X, ISBN 978-3-8356-3111-3

Heft 97[1] Rapp-Fiegle, S.
Ermittlung von Leitkennzahlen als Grundlage zur Optimierung siedlungswasserwirtschaftlicher Prozesse, 2006
ISBN 3-8356-3110-1, ISBN 978-3-8356-3110-6

Heft 98[1] Günthert, F. W.
Tagungsband zu den Seminaren Wirtschaftliches Handeln in Bayerischen Kommunen und Mikrobiologische Probleme bei Schlammseparation und Schlammbehandlung, 2007
ISBN 978-3-8356-3136-6

Heft 99[2] Yörük, A.
Unsicherheiten bei der hydrodynamischen Modellierung von Überschwemmungsgebieten, 2009
ISBN 978-3-8322-8723-8

Heft 100[1] Disse, M., Kalk, M., Rieger, W.
Tagungsband zum Seminar Wasserrückhalt in der Fläche - Möglichkeiten und Grenzen des dezentralen Hochwasserschutzes, 2008
ISBN 978-3-8356-3173-1

Heft 101[2] Schönherr, F.
Halbtechnische Untersuchungen zum Einfluss des pH-Wertes auf die Nitrifikation beim Belebungsverfahren in Abhängigkeit des Kohlensäuresystems, 2009
ISBN 978-3-8322-8888-4

Heft 102[2] Günthert, F. W. und Obermayer, A.
Tagungsband zum Kanalseminar: Grundstücksentwässerungsanlagen, Fremdwasser und Überflutung, 2009
ISBN 978-3-8322-8628-6

Heft 103[2] Cvaci, D.
Zustandserfassung und Bewertung von Grundstücksentwässerungsanlagen unter Einbeziehung einer optimierten organisatorischen Vorgehensweise, 2009
ISBN 978-3-8322-8658-3

Heft 104[2] Hirschbeck (geb. Schwarz), C.
Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von belüfteten Sandfängen auf Kläranlagen, 2010
ISBN 978-3-8322-9093-1

Heft 105[2] Günthert, F. W., Obermayer, A., Krause, S.
Charakterisierung von Rohwässern bezüglich ihrer Eignung für die Aufbereitung mit Membranverfahren, 2010
ISBN 978-3-8322-9243-0

Heft 106[2] Schütter, J.
Wissensmanagement in der Wasserwirtschaft - am Beispiel der Planung und Umsetzung des integrierten Hochwasserschutzkonzeptes Obere Iller, 2010
ISBN 978-3-8322-9249-2

Heft 107[2] Heinisch, T.
Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Anpassung an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft, 2010
ISBN 978-3-8322-9519-6

Heft 108[2] Putzar, B., Marques, W., Fernandes, E., Malcherek, A.
An Integrated Modeling System for the Patos Lagoon in Brazil - Final Project Report, 2010
ISBN 978-3-8322-9244-7

Heft 109 Günthert, F. W., Disse, M., Malcherek, A.
Tagungsband zum Institutsseminar, Oktober 2010
Risiko und Sicherheit in der Wasserwirtschaft, 2010

Heft 110[2] Günthert, F. W., Krause, S., Obermayer, A.
Tagungsband zum Seminar Wasserversorgung, 2010
ISBN 978-3-8322-9563-9

Heft 111[2] Malcherek, A. und Cha, H.
Zur Rheologie von Flüssigschlicken: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Ansätze - Projektbericht, 2011
ISBN 978-3-8440-0136-5

Heft 112[2] Günthert, F. W., Krause, S., Platschek, C.
Tagungsband zum 3. Seminar Wasserversorgung, 2011
ISBN 978-3- 8440-0387-1

Heft 113[2] Pakosch, S.
Development of a fuzzy rule based expert system for flood forecasts within the meso-scale Upper Main basin, 2011
ISBN 978-3- 8440-0611-7

Heft 114[2] Schaardt, V.
Vergleich hydrologischer und hydrodynamischer Modelle und Konsequenzen für die praktische Anwendung, 2012
ISBN 978-3- 8440-1208-8

Heft 115[2] Wehr, D.
An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics, 2012
ISBN 978-3- 8440-0860-9

Heft 116[2] Rieger, W.
Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen, 2012
ISBN 978-3- 8440-1209-5

Heft 117[2] Günthert, F. W., Krause, S., Platschek, C.
Tagungsband zum 4. Seminar Wasserversorgung, 2012
ISBN 978-3- 8440-1294-1

Heft 118[2] Winter, F.
Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung und -konzentration auf verschlämmungsgefährdeten landwirtschaftlichen Nutzflächen, 2013
ISBN 978-3- 8440-2242-1

Heft 119 Günthert, F. W. und Schlederer, S.
Tagungsband zum 1. Abfallwirtschaftlichen Seminar: Kommunale biogene Reststoffe als regionale Energieträger, 2013

Heft 120[2] Günthert, F. W. und Krause, S.
Tagungsband zum 5. Seminar Wasserversorgung, 2013
ISBN 978-3-8440-2179-0

Heft 121[2] Walter, W. K.
Recommendations for Small Water Supply Systems in Newly Industrialized Countries on the Example of Assessment in the State of Minas Gerais, Brazil, 2013
ISBN 978-3-8440-2238-4

Heft 122[2] Günthert, F. W., Krause, S., Platschek, C.
Tagungsband zum 6. Seminar Wasserversorgung, 2014
ISBN 978-3-8440-2986-4

Heft 123[2] Krause, S.
Tagungsband zum 7. Seminar Wasserversorgung, 2015
ISBN: 978-3-8440-3806-4

Heft 124[2] Platschek, C.
Technische und organisatorische Strukturuntersuchung von kleinen Wasserversorgungsunternehmen zur Ableitung von unterstützenden Handlungsempfehlungen, 2015
ISBN 978-3-8440-4021-0

Heft 125[2] Baselt, I.
Die Steffturbine - Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu einer Kleinwasserkraftanlage mit Bindegliedfunktion zwischen ober- und unterschlächtiger Wirkungsweise, 2016
ISBN 978-3-8440-4387-7

Heft 126[2] Krause, S.
Tagungsband zum 8. Seminar Wasserversorgung, 2016
ISBN 978-3-8440-4719-6

Heft 127[2] Krause, S. und Schaum, C.
Tagungsband zum 9. Seminar Wasserversorgung, 2017
ISBN 978-3-8440-5468-2

Heft 128[2] Krause, S. und Schaum, C.
Tagungsband zum 10. Seminar Wasserversorgung, 2018
ISBN 978-3-8440-5468-2

Heft 129[2] Putzar, B.
Simulating Large-Scale Morphodynamics of a Tidally Dominated Mixed Energy Coast Fundamentals - Applications - Limits
ISBN: 978-3- 8440-6240-3

Heft 130[3] Schaum, C., et al.
Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung
Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU)
ISBN: 978-3-943207-45-3

Heft 131[2] Chmiel, O.
Zur Interaktion der Turbulenz und der Schwebstoffkonzentration in Oberflächengewässern
ISBN: 978-3-8440-7471-0

Heft 132[3] Parra, S.
Verfahren zur Bewertung von Trinkwassernetzen als Grundlage der Anpassungsplanung
ISBN 978-3-943207-46-0

Heft 133[3] Broß, L.
Wasserversorgung in Notsituationen
Verfahren zur Beurteilung der Resilienz von Wasserversorgungssystemen unter Berücksichtigung der Ersatz- und Notwasserversorgung
ISBN 978-3-943297-51-4

[1] Oldenbourg Industrieverlag GmbH
Rosenheimer Straße 145
81671 München

[2] Shaker Verlag GmbH
Am Langen Graben 15a
52353 Düren

[3] Universität der Bundeswehr München AtheneForschung Open-Access-Publikation

www.unibw.de/wasserwesen

ISBN 978-3-943207-51-4