

TEXTE

143/2024

Abschlussbericht

Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit – Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland (WADKlim)

von:

Ulf Stein, Jenny Tröltzsch, Rodrigo Vidaurre, Hannes Schritt, Benedict Bueb, Johanna Reineke
Ecologic Institut, Berlin

Martina Flörke, Thorben Uschan
Ruhr Universität Bochum, Bochum

Frank Herrmann, Stefan Kollet, Niklas Wagner, Ian McNamara
Forschungszentrum Jülich, Institut für Bio- und Geowissenschaften, Agrosphäre (IBG 3), Jülich

Tom Guggenberger, Matthias Barjenbruch
Technische Universität Berlin, Berlin

Thomas Dworak, Guido Schmidt
Fresh Thoughts Consulting, Wien

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 143/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3720 48 278 0

FB001492

Abschlussbericht

Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit – Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland (WADKlim)

von

Ulf Stein, Jenny Tröltzsch, Rodrigo Vidaurre, Hannes Schritt,
Benedict Bueb, Johanna Reineke
Ecologic Institut, Berlin

Martina Flörke, Thorben Uschan
Ruhr-Universität Bochum, Bochum

Frank Herrmann, Stefan Kollet, Niklas Wagner, Ian McNamara
Forschungszentrum Jülich, Institut für Bio- und Geowissenschaften, Agrosphäre (IBG-3), Jülich

Tom Guggenberger, Matthias Barjenbruch
Technische Universität Berlin, Berlin

Thomas Dworak, Guido Schmidt
Fresh Thoughts Consulting, Wien

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Ecologic Institut
Pfalzburger Str. 43/44
10717 Berlin

Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150
44801 Bochum

Forschungszentrum Jülich GmbH
Wilhelm-Johnen-Straße
52428 Jülich

Technische Universität Berlin
Straße des 17. Juni 135
10623 Berlin

Fresh Thoughts Consulting GmbH
Hütteldorfer Straße 215/29
1140 Wien, Österreich

Abschlussdatum:

April 2024

Redaktion:

Fachgebiet II 2.1 Übergreifende Angelegenheiten Wasser und Boden
Bernd Kirschbaum, Corinna Baumgarten, Manuela Helmecke

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit - Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland (WADKlim)

Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist damit zu rechnen, dass es in Deutschland aufgrund steigender Temperaturen und veränderter Niederschlagsverhältnisse zunehmend zu Trockenzeiten kommt, Bodenfeuchte und Grundwasserspiegel langfristig abnehmen, und die Wasserverfügbarkeit gemindert wird. Dieser Bericht fasst die Ergebnisse des WADKlim-Projektes zusammen, das die Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit sowie die Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland untersucht hat. Das Projekt schafft einen Überblick über die gegenwärtige Wasserverfügbarkeit in Deutschland, sowie deren mögliche zukünftigen Entwicklung unter Klimawandelbedingungen. Weiterhin analysiert das Vorhaben aktuelle und zukünftige Wassernutzungskonflikte in Deutschland und entwickelt Lösungsstrategien und Maßnahmen, die zum vorausschauenden Umgang und zur Vermeidung von Nutzungskonflikten beitragen können. Zudem werden die Möglichkeiten, Chancen und Risiken der Wasserwiederverwendung zur Bewässerung im urbanen Raum dargestellt und bewertet.

Abstract: Drought and Water Use Conflicts in Germany (WADKlim)

Against the background of climate change, it is to be expected that Germany will increasingly experience dry periods due to rising temperatures and changing precipitation patterns, that soil moisture and groundwater levels will decrease in the long term, and that water availability will be reduced. This report presents the results of the WADKlim project, which investigated the impact of climate change on water availability and adaptation to drought in Germany. The project provides an overview of the current water availability in Germany, as well as its future development under climate change conditions. Furthermore, the project analyses current and future water use conflicts in Germany and develops solution strategies and measures that can contribute to the anticipatory handling and avoidance of use conflicts. In addition, the possibilities, opportunities, and risks of water reuse for irrigation in urban areas are presented and evaluated.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	17
Abkürzungsverzeichnis	19
Zusammenfassung	21
Summary	33
1 Einleitung	44
2 Aktuelle und zukünftige Entwicklungen des Wasserdargebotes und der Grundwasserverfügbarkeit	46
2.1 Überblick über die Studienlage zur Entwicklung des Wasserdargebotes in Deutschland	47
2.1.1 Struktureller Überblick über die Studien	48
2.1.2 Zusammenfassung	49
2.1.3 Fazit	50
2.2 Überblick über die Studienlage zur Entwicklung des Bodenwasserhaushaltes und der Grundwasserverfügbarkeit in Deutschland	50
2.3 Analyse von Wasser-Bilanz-Risiko-Gebieten hinsichtlich der Auswirkungen von meteorologischer Trockenheit auf den Bodenwasserhaushalt und das Grundwasser	55
2.3.1 Konzept und notwendige Datenbasis	55
2.3.2 Simulationsmethodik	57
2.3.2.1 Simulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA	57
2.3.2.2 Simulationen mit der Modellplattform TSMP	61
2.3.2.3 Berechnungen mit dem Modell WaterGAP3	64
2.3.3 Methodik für statistische Analysen	65
2.3.3.1 Trend- und Verteilungsanalysen	65
2.3.3.2 Methodik zur Berechnung von Wassernutzungs- und Wassergewinnungsindizes	66
2.3.3.3 Indizes zur Charakterisierung von Dürreperioden	68
2.3.3.4 Konzept der Minimumdekaden	70
2.3.4 Klimaprojektionen als Basis für die Entwicklung von Zukunftsszenarien	71
2.3.5 Wassernutzungsdaten für Deutschland	72
2.3.5.1 Wassernutzung und -gewinnung auf Basis von Daten der statistischen Ämter	72
2.3.5.2 Bestimmung der tatsächlich bewässerten Flächen und Bewässerungsmengen in der Landwirtschaft	79
2.3.6 Entwicklung von Szenarien (Projektionen) für eine zukünftige Wassernutzung	83
2.3.6.1 Szenarien (Projektionen) für eine zukünftige sektorale Wassernutzung	83

2.3.6.2	Szenarien (Projektionen) für einen zukünftigen Bewässerungsbedarf	87
2.3.7	Räumliche und zeitliche Variabilität von meteorologischen Dürreindizes in Vergangenheit und Gegenwart (1961 bis 2020).....	92
2.3.8	Räumliche und zeitliche Variabilität der projizierten meteorologischen Dürreindizes (1971 bis 2100)	94
2.3.9	Ergebnisse aus den Simulationen des Wasserhaushalts mit dem Modell mGROWA (1961 bis 2020)	99
2.3.10	Ergebnisse aus den Szenarien (Projektionen) des Wasserhaushalts mit dem Modell mGROWA (1971 bis 2100)	107
2.3.11	Ergebnisse aus den Simulationen der Grundwasserdynamik mit TSMP/ ParFlow (1961 bis 2020)	115
2.3.12	Ergebnisse aus den Szenarien (Projektionen) der Grundwasserdynamik TSMP/ ParFlow (1971 bis 2100)	121
2.3.13	„Status quo “ - Wassergewinnungsindizes in der Gegenwart und jüngeren Vergangenheit.....	130
2.3.14	Skizze für die Nutzung von Szenarien (Projektionen) als Stresstest	136
2.3.15	Skizze einer Methodik zur Darstellung von Wasser-Bilanz-Risiko-Gebieten (WBRG) in Deutschland	146
2.3.16	Kurze Synthese und Schlussfolgerungen	153
3	Umgang mit Nutzungskonflikten.....	156
3.1	Wasserbezogene Nutzungskonflikte in Deutschland - Ein Überblick	156
3.2	Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten	160
3.2.1	Einleitung	160
3.2.2	Aufbau des Maßnahmenkatalogs „Reduzierung Wassernutzungskonflikte “	160
3.2.3	Recherchestrategie für den Maßnahmenkatalog „Reduzierung Wassernutzungskonflikte “	164
3.2.3.1	Auswahl der Literaturquellen	164
3.2.3.2	Vorgehensweise und Suchbegriffe	165
3.2.4	Überblick - Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten	166
3.3	Wasserversorgungskonzepte zur langfristigen Sicherstellung der Wasserversorgung	180
3.3.1	Methodik der WVK	181
3.3.2	Maßnahmen.....	184
3.3.3	Vorrang von Wassernutzungen	185
3.3.4	Diskussion und offene Fragen.....	186
3.4	Entwicklung eines Konzepts für die Initiierung von regionalen Wasserbeiräten	188

3.4.1	Vorgehensweise.....	188
3.4.2	Ergebnisse: Auswertung vorhandener Austauschgremien.....	191
3.4.3	Ergebnisse: Empfehlungen zur Initiierung von Wasserbeiräten.....	196
3.4.4	Ergebnisse: Auswertung der Fallstudien.....	199
3.4.4.1	Landkreis Gifhorn.....	199
3.4.4.2	Mitteldeutsches bzw. Lausitzer Revier, Sachsen	200
3.5	Analyse des Potenzials von Wasserrückhalt in der Landschaft	201
3.5.1	Einleitung	201
3.5.2	Vorgehensweise.....	201
3.5.2.1	Aufbau des Maßnahmenkatalogs.....	203
3.5.3	Zusammenfassung	208
3.6	Ableitung von Regeln zur Entscheidungsfindung und Priorisierung von Nutzungen bei wasserbezogenen Nutzungskonflikten - konzeptionelle Beiträge	210
3.6.1	Einleitung	210
3.6.2	Vorgehensweise.....	211
3.6.3	Hauptmerkmale ausgewählter Priorisierungsansätze.....	211
3.6.3.1	Spanien	211
3.6.3.2	Frankreich	214
3.6.3.3	Die Niederlande	216
3.6.4	Regeln zur Entscheidungsfindung und Priorisierung von Nutzungen bei wasserbezogenen Nutzungskonflikten - Empfehlungen für Deutschland.....	218
3.6.4.1	Kontext in Deutschland.....	218
3.6.4.2	Herstellung von Transparenz in der Priorisierung / Dürreplanung	221
3.6.4.3	Empfehlungen für ein System zur Priorisierung von Nutzungen bei wasserbezogenen Nutzungskonflikten (inkl. Trennung zwei Handlungsebenen).....	222
3.6.4.4	Offene Fragen bzw. Vorbedingungen für die Aufstellung von Priorisierungsregeln..	224
4	Leitplanken für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung im urbanen Raum	227
4.1	Analyse des Potenzials der Wasserwiederverwendung in deutschen Stadtgebieten.....	227
4.1.1	Stakeholderbefragung	227
4.1.2	Grundlagen und Definitionen des Potenzials der urbanen Wasserwiederverwendung.....	230
4.1.3	Ermittlung der Bewässerungsmengen.....	231
4.1.4	Ermittlung der urbanen Grünflächen	233
4.1.5	Ermittlung des Stadtgrößen-spezifischen Abwasseranfalls	233
4.1.6	Ermittlung des städtischen Oberflächenabflusses.....	235

4.1.7	Zusammenfassung und Bewertung der entwickelten Ansätze	235
4.1.8	Diskussion der Ergebnisse zum Potenzial der Wasserwiederverwendung für Bewässerung im urbanen Raum	238
4.2	Erkenntnisse aus bestehenden technischen Lösungen für die Wasserwiederverwendung zur urbanen Bewässerung.....	241
4.2.1	Einleitung und Übersicht zur Best-Practice	241
4.2.2	Ablaufqualitäten	243
4.2.3	Kosteneinsparpotenziale	243
4.2.4	Verteilungssystem / Infrastruktur.....	246
4.2.5	Zusammenfassung	247
4.3	Bewertungsmatrix für die Umsetzung eines Wasserwiederverwendungsprojekts.....	247
4.3.1	Grundlagen der Bewertungsmatrix	247
4.3.2	Detaillierte Beschreibung der Kategorien der Bewertungsmatrix.....	248
4.3.2.1	Bewässerungsbedürftigkeit	248
4.3.2.2	Abwasser- und technische Spezifikationen	249
4.3.3	Spezifikationen des urbanen Grüns.....	250
4.3.3.1	Infrastrukturelle Anbindung	254
4.3.4	Zusammenfassung	255
4.4	Entwicklung eines Risikomanagementansatzes für Wasserwiederverwendung im städtischen Raum.....	260
4.4.1	Analyse der gesetzlichen Vorgaben zum Risikomanagementplan (nach EU-VO 2020/741)	260
4.4.2	Risikomanagement für den urbanen Raum - Diskussion der Übertragbarkeit von Elementen der EU-Reuse Verordnung 2020/741	287
4.5	Empfehlungen für den Einsatz von aufbereitetem Abwasser in Stadtgebieten.....	287
5	WADKlim-Handlungsempfehlungen.....	290
5.1	Einleitung	290
5.2	Retrospektive und aktuelle Wasserverfügbarkeit und -nutzung in Deutschland.....	290
5.2.1	Erkenntnisse aus WADKlim.....	290
5.2.2	Herausforderungen.....	291
5.2.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	293
5.3	Klimawandel und Szenarien der Wasserverfügbarkeit und -nutzung in Deutschland	294
5.3.1	Erkenntnisse aus WADKlim.....	294
5.3.2	Herausforderungen.....	294
5.3.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	295

5.4	Mögliche wasserbezogene Nutzungskonflikte	295
5.4.1	Erkenntnisse aus WADKlim	295
5.4.2	Herausforderungen.....	296
5.4.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	296
5.5	Lösungsansätze für Wassernutzungskonflikte in Deutschland	297
5.5.1	Erkenntnisse aus WADKlim	297
5.5.2	Herausforderungen.....	298
5.5.3	Weiterer Forschungsbedarf	298
5.6	Beispielhafte Ansätze zur Minderung von Wasserknappheit und Dürre in Deutschland ..	299
5.6.1	Wasserwiederverwendung im urbanen Raum	299
5.6.1.1	Erkenntnisse aus WADKlim	299
5.6.1.2	Herausforderungen.....	299
5.6.1.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	300
5.6.2	Wasserbeiräte.....	302
5.6.2.1	Erkenntnisse aus WADKlim.....	302
5.6.2.2	Herausforderungen.....	302
5.6.2.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	302
5.6.3	Wasserversorgungskonzepte (WVK).....	304
5.6.3.1	Erkenntnisse aus WADKlim.....	304
5.6.3.2	Herausforderungen.....	304
5.6.3.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	305
5.6.4	Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche	307
5.6.4.1	Erkenntnisse aus WADKlim	307
5.6.4.2	Herausforderungen.....	307
5.6.4.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	308
5.6.5	Ableitung von Regeln zur Entscheidungsfindung und Priorisierung von Nutzungen bei wasserbezogenen Nutzungskonflikten	308
5.6.5.1	Erkenntnisse aus WADKlim	308
5.6.5.2	Herausforderungen.....	309
5.6.5.3	Weiterer Forschungsbedarf.....	310
5.7	Fazit - Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.....	310
5.7.1	Beitrag zur Nationalen Wasserstrategie	311
5.7.2	Beitrag zum Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz	313
5.7.3	Beitrag zur Deutschen Anpassungsstrategie	314

6	Referenzen	315
6.1	Kapitel 1: Einleitung	315
6.2	Kapitel 2: Aktuelle und zukünftige Entwicklungen des Wasserdargebotes und der Grundwasserverfügbarkeit	315
6.3	Kapitel 3: Umgang mit Nutzungskonflikten	324
6.4	Kapitel 4: Leitplanken für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung im urbanen Raum	326

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schema und Überblick zu den Modellen, Daten, Analysen, Indizes und Szenarien, die im Projekt WADKlim zu Erkenntnissen führen.	57
Abbildung 2:	Modellkonzept des Wasserhaushaltsmodells mGROWA.	59
Abbildung 3:	Entscheidungsbaum in der mGROWA-Abflusseparation zur Bestimmung der für die Berechnung der Grundwasserneubildung (GWNB) und einzelner Direktabflusskomponenten relevanten Standorteigenschaften.	60
Abbildung 4:	Standorteigenschaften in der Abflusseparation mit mGROWA.	60
Abbildung 5:	Evaluierung des Gesamtabflusses und der Grundwasserneubildung (1981-2010) in 80 Einzugsgebieten.	61
Abbildung 6:	Schema der Komponenten ParFlow-CLM in der terrestrischen Modellplattform TSMP.	62
Abbildung 7:	Modell-Framework WaterGAP3.	64
Abbildung 8:	Exemplarische Zeitreihendarstellung zum SPEI-12 für die NUTS-3-Region Kreisfreie Stadt Brandenburg an der Havel. Die 1. Zeile zeigt, die im Jahresverlauf akkumulierte klimatische Wasserbilanz (P-ET0). Die 2. Zeile zeigt die Zeitreihe der Monatssummen von P-ET0 und zur Veranschaulichung ein 12-monatiges laufendes Mittel. Die 3. Zeile zeigt den aus dieser Zeitreihe berechneten SPEI-12. Bezugsperiode (grau Schattierung) für die dahinterliegende Statistik ist die Periode 1971 - 2000.	70
Abbildung 9:	Zeitliche Entwicklung der öffentlichen Wassergewinnung (alle Quellen) und Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung im Zeitraum von 1991 bis 2019. Die Datenerfassung durch das Statistische Bundesamt erfolgt alle drei Jahre.	73
Abbildung 10:	Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung nach Wasserarten im Jahr 2019.	74
Abbildung 11:	Darstellung für NUTS-3-Regionen: (A1) Differenz aus Wasserabgabe und Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung, (A2) Prozentualer Anteil der nicht an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossenen Bevölkerung im Jahr 2019.	74
Abbildung 12:	Wassergewinnung der nichtöffentlichen Wasserversorgung nach Wasserarten 2019 (nur Eigengewinnung).	76
Abbildung 13:	Zeitliche Entwicklung der Wassergewinnung (alle Quellen) und des Wassereinsatzes (WE) der nichtöffentlichen Wasserversorgung im Zeitraum von 1991 bis 2019. Die Datenerfassung durch das Statistische Bundesamt erfolgt alle drei Jahre.	76
Abbildung 14:	Wassereinsatz in nichtöffentlichen Betrieben nach Verwendungszweck 2019 (nur Einfachnutzung).	77
Abbildung 15:	Anteil der öffentlichen Wassergewinnung an der gesamten Wassergewinnung aus dem Grundwasser (A1) und aus allen Gewinnungsquellen (A2) im Jahr 2019.	78

Abbildung 16:	Infografik zu Datengrundlagen und Methodik für die Abschätzung der tatsächlichen Wassermengen in der Feldbewässerung in Vergangenheit und Gegenwart.	80
Abbildung 17:	Für die NUTS-3-Regionen ermittelte tatsächliche Bewässerungsmengen.....	82
Abbildung 18:	Prognostizierte Bevölkerungsentwicklungen bis 2070.....	84
Abbildung 19:	Prognostizierte Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung zum Letztgebrauch.	85
Abbildung 20:	Prognostizierte Wasserabgabe der nichtöffentlichen Wasserversorgung (Industriesektor).	87
Abbildung 21:	Infografik zu Datengrundlagen und Methodik für die Abschätzung von projizierten tatsächlichen Bewässerungsmengen im Rahmen der Entwicklung von Szenarien zur zukünftigen Wassernutzung.	88
Abbildung 22:	Für die Bewässerung in den NUTS-3-Regionen ausgestattete Flächen im Jahr 2100. (BS-Bewässerungsszenario; BL- Baseline)	90
Abbildung 23:	Mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf in den NUTS-3-Regionen und den 15 Szenarien in der 30-Jahre-Periode 2001-2030. (BS-Bewässerungsszenario; BL-Baseline). Die Prozentwerte oben links zeigen die Veränderung in Deutschland im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 der entsprechenden Klimaprojektion.	91
Abbildung 24:	Mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf in den NUTS-3-Regionen und den 15 Szenarien in der 30-Jahre-Periode 2061-2090. (BS-Bewässerungsszenario; BL-Baseline). Die Prozentwerte oben links zeigen die Veränderung in Deutschland im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 der entsprechenden Klimaprojektion.	92
Abbildung 25:	Anzahl der Monate im hydrologischen Jahr, die gemäß SPEI-12 für 1961 bis 2020 als extrem trocken (SPEI-12 kleiner - 2) eingestuft wurden.....	93
Abbildung 26:	Anzahl der Monate im hydrologischen Jahr, die gemäß SPEI-12 für 1961 bis 2020 als sehr trocken (SPEI-12 kleiner -1,5) eingestuft wurden.	94
Abbildung 27:	Anzahl der Monate im hydrologischen Jahr, die für die Projektion R26-E12-RCA von 1971 bis 2100 als extrem trocken (SPEI-12 kleiner - 2) eingestuft wurden.	96
Abbildung 28:	Anzahl der Monate im hydrologischen Jahr, die für die Projektion R85-CA2-CLM von 1971 bis 2100 als extrem trocken (SPEI-12 kleiner - 2) eingestuft wurden.	97
Abbildung 29:	Anzahl der Monate im hydrologischen Jahr, die für die Projektion R85-MI5-CLM von 1971 bis 2100 als extrem trocken (SPEI-12 kleiner - 2) eingestuft wurden.	98
Abbildung 30:	Auf Basis der mGROWA-Simulation berechnete langjährige mittlere Grundwasserneubildung (GWNB) in der Periode 1961-1990 und die mittleren Abweichungen gegenüber der langjährigen mittleren GWNB in den 3 einzelnen Dekaden dieser Periode. Die Abweichungen im Bereich -5 bis 5 mm/a deuten auf eine praktisch unveränderte GWNB hin.....	100
Abbildung 31:	Auf Basis der mGROWA-Simulation berechnete langjährige mittlere Grundwasserneubildung (GWNB) in der Periode 1991-2020 und die mittleren Abweichungen gegenüber der langjährigen mittleren GWNB in den 3 einzelnen Dekaden dieser Periode. Die Abweichungen im Bereich -5 bis 5 mm/a deuten auf eine praktisch unveränderte GWNB hin.....	101

Abbildung 32:	Auf Basis der mGROWA-Simulation berechnete langjährige mittlere Grundwasserneubildung (GWNB) in den Zeitspannen 1981-2000 und 2001-2020, die Veränderungen zwischen beiden Zeitspannen und die Wahrscheinlichkeit für die Alternativhypothese im Mann-Whitney-Wilcoxon-Test, die eine Information hinsichtlich einer signifikanten Veränderung des Grundwasserneubildungsregimes liefert.	103
Abbildung 33:	Ergebnisse der Analyse mit dem Mann-Kendall-Test auf monotone Trends in den Zeitreihen der Grundwasserneubildung (GWNB) für die Perioden 1961-1990 (oben) und 1991-2020 (unten).	104
Abbildung 34:	Beginn der Minimumdekade und Defizit der Grundwasserneubildung (GWNB) in der jeweiligen Minimumdekade im Vergleich zum Mittelwert 1971-2000.	105
Abbildung 35:	Mittlere Anzahl der Tage mit einem Bodenfeuchtedefizit über 60 % im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober).	107
Abbildung 36:	Minimumdekaden der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung (GWNB). Projektion basierend auf R26-E12-RAC und mGROWA.	109
Abbildung 37:	Minimumdekaden der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung (GWNB). Projektion basierend auf R85-CA2-CLM und mGROWA.	109
Abbildung 38:	Minimumdekaden der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung (GWNB). Projektion basierend auf R85-MI5-CLM und mGROWA.	110
Abbildung 39:	Zeitliche Muster der Grundwasserneubildung (GWNB) aggregiert auf die gesamte Bundesrepublik Deutschland aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RCA (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und mGROWA.	111
Abbildung 40:	Zeitliche Muster der Grundwasserneubildung (GWNB) aggregiert auf die NUTS-3-Region Ludwigslust-Parchim (Mecklenburg-Vorpommern) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RCA (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und mGROWA.	112
Abbildung 41:	Zeitliche Muster der Grundwasserneubildung (GWNB) aggregiert auf die NUTS-3-Region Weimar (Thüringen) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RCA (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und mGROWA.	113
Abbildung 42:	Zeitliche Muster der Grundwasserneubildung (GWNB) aggregiert auf die NUTS-3-Region Garmisch-Partenkirchen (Bayern) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RCA (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und mGROWA.	114
Abbildung 43:	Ergebnisse der Analyse mit dem Mann-Kendall-Test (MKT) auf monotone Trends in den Zeitreihen des Grundwasserflurabstandes (GWFA) für die Perioden 1961-1990 (oben) und 1991-2020 (unten).	117
Abbildung 44:	Mit ParFlow-Standalone (PF-S) simulierte Veränderung des FUWS (in Millimeter Wassersäule) in Bezug auf den mittleren Füllstand von 1971-2000, aggregiert für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. (ugsc - underground storage change, Änderung im FUWS). Die Spannbreite der Legende ist auch für die Darstellung in individuellen Grundwasserkörpern gedacht, die hier jedoch nicht gezeigt werden.	118

Abbildung 45:	Ergebnisse der Analyse mit dem Mann-Kendall-Test (MKT) auf monotone Trends in den Zeitreihen des Füllstandes der unterirdischen Wasserspeicher (FUWS) im Oktober für die Perioden 1981-2000 (oben) und 2001-2020 (unten).	120
Abbildung 46:	Beginn der Minimumdekade und Defizit des Füllstandes der unterirdischen Wasserspeicher (FUWS) im Oktober in der jeweiligen Minimumdekade im Vergleich zum Mittelwert 1971-2000.....	121
Abbildung 47:	Beginn der Minimumdekade und Defizit des FUWS im Oktober in der Projektion basierend auf R26-E12-RCA.....	124
Abbildung 48:	Beginn der Minimumdekade und Defizit des FUWS im Oktober in der Projektion basierend auf R85-CA2-CLM.....	125
Abbildung 49:	Beginn der Minimumdekade und Defizit des FUWS im Oktober in der Projektion basierend auf R85-MI5-CLM.....	125
Abbildung 50:	Anomalien der unterirdischen Wasserspeicher (ugsc) aggregiert auf die gesamte Bundesrepublik Deutschland aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RAC (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und ParFlow. Für weitere Erläuterungen zum Abbildungstyp siehe Abbildung 44.	126
Abbildung 51:	Anomalien der unterirdischen Wasserspeicher (ugsc) aggregiert auf die NUTS-3-Fläche Ludwigslust-Parchim (Mecklenburg-Vorpommern) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RAC (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und ParFlow. Für weitere Erläuterungen zum Abbildungstyp siehe Abbildung 44.....	127
Abbildung 52:	Anomalien der unterirdischen Wasserspeicher (ugsc) aggregiert auf die NUTS-3-Fläche Weimar (Thüringen) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RAC (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und ParFlow. Für weitere Erläuterungen zum Abbildungstyp siehe Abbildung 44.	128
Abbildung 53:	Anomalien der unterirdischen Wasserspeicher (ugsc) aggregiert auf die NUTS-3-Fläche Garmisch-Partenkirchen (Bayern) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RAC (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und ParFlow. Für weitere Erläuterungen zum Abbildungstyp siehe Abbildung 44.....	129
Abbildung 54:	Wassergewinnungsindex (WGI) in Deutschland im Jahr 2016 berechnet auf Basis des mit den Modellen mGROWA und ParFlow bilanzierten Gesamtabflusses (gesamtes Wasserdargebot) der Periode 1991-2020.	131
Abbildung 55:	Wassergewinnungsindex (WGI) in Deutschland im Jahr 2019 berechnet auf Basis des mit den Modellen mGROWA und ParFlow bilanzierten Gesamtabflusses (gesamtes Wasserdargebot) der Periode 1991-2020.	131
Abbildung 56:	Wassergewinnungsindex (WGI) in Deutschland im Jahr 2019 berechnet auf Basis des mit den Modellen mGROWA und ParFlow bilanzierten Gesamtabflusses (gesamtes Wasserdargebot) im Jahr 2019.	133
Abbildung 57:	Grundwassergewinnungsindex (GWGI) bezogen auf die Grundwasserneubildung 1991-2020 sowie die Grundwassergewinnung für öffentliche Wasserversorgung (ÖWV) und für Einwohner, die nicht an die ÖWV angeschlossen sind (EWV) im Jahr 2019.	134

Abbildung 58:	Grundwassergewinnungsindex (GWGI) bezogen auf die Grundwasserneubildung in der Minimumdekade sowie die Grundwassergewinnung für öffentliche Wasserversorgung (ÖWV) und für Einwohner, die nicht an die ÖWV angeschlossen sind (EWV) im Jahr 2019.....	135
Abbildung 59:	Grundwassergewinnungsindex (GWGI) bezogen auf die Grundwasserneubildung 1991-2020 sowie die Grundwassergewinnung für nicht-öffentliche Wasserversorgung (NÖWV) und aggregiert über ÖWV, EWV, und NÖWV im Jahr 2019.....	135
Abbildung 60:	Grundwassergewinnungsindex (GWGI) bezogen auf die Grundwasserneubildung in der Minimumdekade sowie die Grundwassergewinnung für nicht-öffentliche Wasserversorgung (NÖWV) und aggregiert über ÖWV, EWV, und NÖWV im Jahr 2019.....	136
Abbildung 61:	Zukunftsszenarien zum Grundwassernutzungsindex (GWNI), mit Wassernutzung im Jahr 2020, mittlere Grundwasserneubildung und mittlerer tatsächlicher Bewässerungsbedarf in der Periode 2001-2030. (S1 - Szenario 1 zur Wassernutzung; BS -Bewässerungsszenario; BL - Baseline).....	138
Abbildung 62:	Zukunftsszenarien zum Grundwassernutzungsindex (GWNI), mit Wassernutzung im Jahr 2070, mittlere Grundwasserneubildung und mittlerer tatsächlicher Bewässerungsbedarf in der Periode 2061-2090. (S1 - Szenario 1 zur Wassernutzung; BS -Bewässerungsszenario; BL - Baseline).....	139
Abbildung 63:	Zukunftsszenarien zum Grundwassernutzungsindex (GWNI), mit Wassernutzung im Jahr 2070, Grundwasserneubildung in der Minimumdekade und mittlerer tatsächlicher Bewässerungsbedarf in der Periode 2061-2090. (S1 - Szenario 1 zur Wassernutzung; BS -Bewässerungsszenario; BL - Baseline).....	140
Abbildung 64:	Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWNI) in Abbildung 60 für den Schwellenwert 0,2.....	141
Abbildung 65:	Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWNI) in Abbildung 60 für den Schwellenwert 0,4.....	142
Abbildung 66:	Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWNI) in Abbildung 61 für den Schwellenwert 0,2.....	143
Abbildung 67:	Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWNI) in Abbildung 61 für den Schwellenwert 0,4.....	144
Abbildung 68:	Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWNI) in Abbildung 62 für den Schwellenwert 0,2.....	145
Abbildung 69:	Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWNI) in Abbildung 62 für den Schwellenwert 0,4.....	146
Abbildung 70:	Punktevergabe in den einzelnen GWT entsprechend der Vorgaben in Tabelle 7.	151
Abbildung 71:	Sukzessive Aufsummierung der Punkte aus Abbildung 70, d.h. rechts unten ist die Punktsomme über alle GWT dargestellt.	152
Abbildung 72:	Häufigkeit der in Medien berichteten WNK im Zeitraum von 2015 bis 2022.	157
Abbildung 73:	Räumliche Verteilung der Häufigkeit der berichteten WNK auf Ebene von NUTS-3-Regionen im gesamten Recherchezeitraum (A1) und im Jahr 2022 (A2).....	158

Abbildung 74:	Räumliche Verteilung der Konfliktarten (A1) und der in WNK involvierten Akteure (A2) auf Ebene von NUTS-2-Regionen im Jahr 2022.	159
Abbildung 75:	Gesamtabbildung Mindmap mit Ergebnissen der Recherche von wissenschaftlicher und „grauer“ Literatur - Detaildarstellung	167
Abbildung 76:	Anzahl Maßnahmen im Maßnahmenkatalog (n=62) nach Art der Maßnahme ...	168
Abbildung 77:	Anzahl Maßnahmen im Maßnahmenkatalog (n=62) nach involvierten Sektoren (federführend & beteiligt)	169
Abbildung 78:	Überblick Maßnahmen nach Bezugsraum (links) und Umsetzungszeitrahmen (rechts).....	169
Abbildung 79:	Methodisches Vorgehen zur Analyse von Wasserbeiräten.....	188
Abbildung 80:	Schritte zur Initiierung eines Wasserbeirats	196
Abbildung 81:	Struktur des Katalogs für Maßnahmen in der Fläche.....	207
Abbildung 82:	Wirkungen der Maßnahmen auf den Wasserhaushalt (n=69).....	208
Abbildung 83:	Wirkungen der Maßnahmen auf weitere Schutzziele (n=69).	209
Abbildung 84:	Umfrage zur Bereitschaft zur Nutzung von recyceltem Wasser: „Wie hoch ist Ihrerseits die Bereitschaft recyceltes Wasser (z.B. Klar- oder Grauwasser) anstatt Trinkwasser für qualitativ entsprechende Nutzungen (z.B. Bewässerung von Grünflächen, Löschwasser, Toilettenspülwasser) zu verwenden?“	228
Abbildung 85:	Umfrage zu den Verwendungszwecken von recyceltem Wasser: „Können Sie sich vorstellen, dass recyceltes Wasser mit der für die jeweilige Nutzung erforderlichen Qualität für folgende Verwendungszwecke verwendet wird?“	229
Abbildung 86:	Beispiele für Verteilungssystemen für die Bewässerung urbaner Grünflächen mit aufbereitetem Wasser, links mit Warnhinweis auf dem Rohr, rechts separate Warnung (McCann et al., 2018; Madrid, 2023).....	246
Abbildung 87:	Entnahmestelle auf einem Park in Alicante mit violetter Rohrleitung und Warnhinweisen (Morote et al., 2019). Violette Warnschild auf einem dem „ Campo Golf La Moraleja “ in Madrid (Madrid, 2023)	247
Abbildung 88:	Systemgrenzen der urbanen Wasserwiederverwendung gemäß angepasstem Risikomanagementplan	264
Abbildung 89:	Darstellung der Richtlinien und Verordnungen in einem nach den Leitlinien zur Anwendung der Verordnung 2020/741 (2022/C 298/01, 2022).....	278
Abbildung 90:	Bewertungsmatrix zur semi-qualitativen Risikobewertung (WHO, 2016)	282
Abbildung 91:	SWOT-Analyse Wasserwiederverwendung im urbanen Raum	301
Abbildung 92:	SWOT-Analyse Wasserbeiräte.....	303
Abbildung 93:	SWOT-Analyse Wasserversorgungskonzepte.....	306

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick über die Eigenschaften der Representative Concentration Pathways (RCP).	55
Tabelle 2:	Für die Simulationen mit mGROWA genutzte Geo-Datenbestände.	58
Tabelle 3:	Für die Simulationen mit TSMP genutzte Geo-Datenbestände.	63
Tabelle 4:	Für die Bereitstellung von Szenarien im Rahmen des Projektes WADKlim ausgewählte Klimaprojektionen.....	72
Tabelle 5:	Zusätzliche frei verfügbare Datenquellen für die Abschätzung der tatsächlichen Wassermengen in der Feldbewässerung.	81
Tabelle 6:	Szenarien für das zukünftige Wachstum der bewässerten Ackerfläche in der Landwirtschaft.	89
Tabelle 7:	Exemplarische Grundwasserthemen (GWT) zur Skizzierung von Grundwasser-Bilanz-Risiko-Gebieten (GWBRG) auf NUTS-3-Niveau.....	149
Tabelle 8:	Suchbegriffe für Identifikation von relevanten Berichten und Artikeln für den Maßnahmenkatalog	165
Tabelle 9:	Auswahl von potenziellen aus nationaler und internationaler Literatur entnommenen Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten	170
Tabelle 10:	Übersicht untersuchte intersektorale Koordinationsgremien	189
Tabelle 11:	Funktionen der untersuchten Austauschgremien.....	194
Tabelle 12:	Formalisierungsmöglichkeiten	198
Tabelle 13:	Auswahl der spezifischen Maßnahmen für die UTE „Madre de las Marismas“, Einzugsgebiet des Guadalquivir.....	213
Tabelle 14:	Zusammenfassung spanisches Dürremanagementsystem	214
Tabelle 15:	Auszug aus der Tabelle der Mindestmaßnahmen zur Wasserverbrauchsbeschränkung aus dem nationalen Leitfaden für Frankreich.	215
Tabelle 16:	Zusammenfassung französisches Dürremanagementsystem	216
Tabelle 17:	Die Verdrängungsreihe (Art. 2.1, niederländische Wasserverordnung)	217
Tabelle 18:	Zusammenfassung niederländisches Dürremanagementsystem	217
Tabelle 19:	Monatlicher Bewässerungsbedarf für Park- und Grünflächen nach ÖWAV 407(2016)	231
Tabelle 20:	Jahres-Bewässerungsbedarf für Golfplätze (DIN 18035-2, 2020)	231
Tabelle 21:	Theoretische Bewässerungsbedarfe aus der gemittelten, saisonalen KWB Deutschlands von 1991-2020 (März bis August) nach Junghans (2022).	232
Tabelle 22:	Ermitteltes theoretisches jährliches Abwasseraufkommen je Stadtgröße aus dem Berichtsjahr 2018.....	234
Tabelle 23:	Übersicht der fünf Ansätze inkl. der drei gewählten Stadtgrößen.....	235
Tabelle 24:	Theoretisches Potenzial der Wasserwiederverwendung zur Bewässerung des urbanen Grüns relativ zur Anzahl der jeweiligen Stadtgröße	237
Tabelle 25:	Erreichte Zielwerte der untersuchten Aufbereitungsanlagen inkl. der Aufbereitungstechniken und Einhaltung der untersuchten Rechtsvorschriften	

	(siehe Tabelle 35 und Tabelle 36) bzgl. der Wasserwiederverwendung für die Bewässerung urbaner Grünanlagen	244
Tabelle 26:	Bepunktung Flächennutzung.....	252
Tabelle 27:	Bepunktung Zugangsberechtigte Personen	252
Tabelle 28:	Bepunktung Zugangsbeschränkungen/ -zeiten	252
Tabelle 29:	Bepunktung Bewässerungssystem	253
Tabelle 30:	1. Teil Bewertungsmatrix: Bewässerungsbedürftigkeit, vgl. Kapitel 4.3.1	256
Tabelle 31:	2. Teil Bewertungsmatrix: Abwasser & technische Spezifikationen, vgl. Kapitel 4.3.2.2	257
Tabelle 32:	3. Teil Bewertungsmatrix: Spezifikationen des urbanen Grüns, vgl. Kapitel 4.3.2.3	258
Tabelle 33:	4. Teil Bewertungsmatrix: Infrastrukturelle Anbindung, vgl. Kapitel 4.3.2.4	259
Tabelle 34:	Übersicht häufig im Abwasser befindlicher pathogener Krankheitserreger nach (ISO 20426, 2018)	268
Tabelle 35:	Vorgaben zu mikrobiellen Parametern aus EU-Ländern und den USA und Normen für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung urbaner Grünflächen (Parks, Friedhöfe, Straßenbegleitgrün, Golfplätze) sowie Güteklasse A der EU-VO 2020/741 für landwirtschaftliche Bewässerung.....	270
Tabelle 36:	Vorgaben zu chemischen Parametern aus EU-Ländern für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung urbaner Grünflächen (Parks, Friedhöfe, Straßenbegleitgrün) sowie Güteklasse A der EU-VO 2020/741 für landwirtschaftliche Bewässerung.....	271
Tabelle 37:	Mittlere Schwermetallkonzentrationen im Kläranlagenablauf für Deutschland für Kläranlagen ab 50 Einwohner*innen (Destatis, 2022)	274
Tabelle 38:	Übersicht der tolerablen wöchentlichen oberen Aufnahmemengen je kg Körpergewicht bestimmter Schwermetalle nach 1) (Überschär, 2022); 2) (BfR, 2013); 3) (BfR, 2021).....	274
Tabelle 39:	Vergleich der zulässigen Schwermetallfracht auf Böden nach BBodSchV mit den theoretischen Schwermetallfrachten aus ausbereitetem Klarwasser, errechnet aus der durchschnittlichen Bewässerungsmenge von 390 l/m ² ·a und der durchschnittlichen Klarwasserkonzentration.....	275
Tabelle 40:	Grenzwerte nach BBodSchV, Anhang II, für die verschiedenen Wirkungspfade .	276
Tabelle 41:	Betroffene Umweltkompartimente und ihre Expositionspfade	281

Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
BayWG	Bayerisches Wassergesetz
BbgWG	Brandenburgisches Wassergesetz
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BFI	Baseflow-Index
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUV	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BOWAB	BODenWasserBilanzierung
BremWG	Bremisches Wassergesetz
BStatG	Bundesstatistikgesetz
BÜK	Bodenübersichtskarte
BWG	Berliner Wassergesetz
BXHWRP	BeiXiaoHe Water Reclamation Plant
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECLWRF	Edward C. Little Water Recycling Facility
GCM	General Circulation Model
GRoW	Globale Ressource Wasser (BMBF Fördermaßnahme)
GWGI	Grundwassergewinnungsindex
GWNB	Grundwasserneubildung
GWNI	Grundwassernutzungsindex
GWP	Global Water Partnership
GWT	Grundwasserthemen
HÜK	Hydrogeologische Übersichtskarte
HWG	Hessisches Wassergesetz
HWRF	Honouliuli Water Recycling Facility
JZWRP	Ji Zhuangzi wastewater reclamation plant
KBE	Koloniebildende Einheiten
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgruppe Wasser
LF	Landwirtschaftlich genutzte Fläche
LWaG	Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern
LWG	Landeswassergesetz NRW
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NGWRP	New Goreangab Water Reclamation Plant
NRW	Nordrhein-Westfalen

NUTS	Nomenclature of Territorial Units for Statistics
NWG	Niedersächsisches Wassergesetz
NWS	Nationale Wasserstrategie
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
PDG	Partielle Differentialgleichungen
QHWRP	QingHe Water Reclamation Plant
RCM	Regional climate models
RCP	Representative Concentration Pathway
RG	Reifegruppe
SächsWG	Sächsisches Wassergesetz
SciELO	Scientific Electronic Library Online
SGI	Standardisierter Grundwasser Index
SIWI	Stockholm International Water Institute
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
SWG	Saarländisches Wassergesetz
SWWTSRS	Solair wastewater treatment, storage and reuse system
ThürWG	Thüringer Wassergesetz
TOC	Total Organic Carbon
TSMP	Terrestrial Systems Modelling Platform
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
UN ISDR	UN International Strategy for Disaster Reduction
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification
UNDP	United Nations Development Programme
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction
WADKlim	Projekt „Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit / Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland“
WasSiG	Wassersicherstellungsgesetz
WBRG	Wasser-Bilanz-Risiko-Gebiet
WG LSA	Wassergesetz für das Land Sachsen-Anhalt (WG LSA)
WGI	Wassergewinnungsindex
WHO	World Health Organization
WNI	Wassernutzungsindex
WNK	Wasserbezogene Nutzungskonflikte
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WVK	Wasserversorgungskonzepte
WVU	Wasserversorgungsunternehmen

Zusammenfassung

Der Klimawandel und seine Folgen sind bereits jetzt in Deutschland spürbar und lassen sich durch die Beobachtungen vieler Institutionen eindeutig belegen. Die Klimavariabilität und der Klimawandel haben einen direkten Einfluss auf den Wasserhaushalt. Mit dem voranschreitenden Klimawandel wird sich das erneuerbare und nutzbare Wasserdargebot in Deutschland zunehmend verändern. Die Auswirkungen des Klimawandels durch vermehrt auftretende Hitzeperioden und Dürren führen auch in Deutschland zu Niedrigwasserständen, regionaler Wasserknappheit und Wassernutzungskonflikten. Die zunehmende Anzahl von Wassernutzungskonflikten verdeutlicht die Notwendigkeit die heutige Situation und die zu erwartenden Entwicklungen der Wasserverfügbarkeit in den nächsten Jahren detaillierter zu analysieren. Um die relevanten Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen und damit zusammenhängende zukünftige ökologische, wirtschaftliche und soziale Schäden zu mindern, müssen verstärkt Anpassungsmaßnahmen „nachgesteuert“ und neue Handlungsoptionen überprüft werden. In diesem Zusammenhang ist die zukünftige Entwicklung des Wasserdargebots auf regionaler Ebene von bedeutender Rolle. Es besteht die Notwendigkeit, Handlungsoptionen auf verschiedenen Ebenen zu analysieren, um mit potenziellen Wassernutzungskonflikten in Deutschland umzugehen und diese zu vermeiden.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) zusammen mit dem Umweltbundesamt (UBA) das Projekt „Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit / Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland“ (WADKlim) initiiert. Im Vorhaben sollten die Auswirkungen von Trockenheit und Dürre auf die Wasserverfügbarkeit, den Bodenwasserhaushalt und das Grundwasser in Deutschland untersucht und mögliche Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen für die Wasserbewirtschaftung entwickelt werden. Damit liefert WADKlim einen Beitrag für die in der *Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel* und in der *Nationalen Wasserstrategie* formulierten Zielstellungen.

WADKlim in Kürze

Das Umweltbundesamt (UBA)-Projekt „Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit – Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland“ (WADKlim) erforscht die Auswirkungen von Trockenheit und Dürre auf das Wasserdargebot, den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserverfügbarkeit in Deutschland. Das Projekt schafft einen **Überblick über die gegenwärtige Wasserverfügbarkeit in Deutschland**, sowie deren **zukünftigen Entwicklung** unter Klimawandelbedingungen. Weiterhin analysiert das Vorhaben aktuelle und zukünftige **Wassernutzungskonflikte in Deutschland** und entwickelt **Lösungsstrategien und Maßnahmen**, die zum vorausschauenden Umgang und zur Vermeidung von Nutzungskonflikten beitragen können. Zudem werden die Möglichkeiten, Chancen und Risiken der **Wasserwiederverwendung zur Bewässerung im urbanen Raum** dargestellt und bewertet.

Aktuelle und zukünftige Entwicklungen des Wasserdargebotes und der Grundwasser- verfügbarkeit

Autor*innen: Herrmann, F., Flörke, M., Kollet, S., Uschan, T., McNamara, I., Wagner, N.

In den vergangenen beiden Dekaden sind in Deutschland eine große Anzahl von Studien zum Einfluss des Klimawandels auf die aktuelle und zukünftige Entwicklung des terrestrischen Wasserhaushalts durchgeführt worden. Ein erster Fokus im Rahmen des Projektes WADKlim lag

deshalb darauf, diese Studien auszuwerten und daraus deutschlandweite Erkenntnisse zur gegenwärtigen Situation und zu den möglichen zukünftigen Veränderungen abzuleiten. Als Ergebnis dieser Auswertung ist die Notwendigkeit deutlich geworden, eine nationale Studie mit einer flächendeckend einheitlichen Methodik zur Bewertung der aktuellen und zukünftigen Entwicklungen des Wasserdargebotes und der Grundwasserverfügbarkeit durchzuführen, sowie die bestehenden Wissenslücken weiter zu füllen. Zu diesem Zweck wurde eine Modellierungs- und Analysemethodik entwickelt, mit deren Hilfe weitere Erkenntnisse über die Auswirkung des Klimawandels auf den terrestrischen Wasserhaushalt gewonnen werden können. Mit Hilfe dieser Methodik wurde eine Vielzahl von Erkenntnissen zum regionalen Wasserhaushalt sowie zu den noch bestehenden Unsicherheiten und Herausforderungen bei der wissenschaftlichen Bewertung der Veränderungen gesammelt und dokumentiert. Diese Dokumentation erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Dies liegt in der Komplexität des Klimawandels und seinen Ausprägungen begründet. In Kapitel 2 werden daher ausgewählte Themen mit engem Bezug zum Spannungsfeld Klimawandel, Wasserhaushalt und Wasserknappheit behandelt, deren intensive Betrachtung im Hinblick auf ein dauerhaft nachhaltiges (Grund)Wasserressourcenmanagement sinnvoll erscheint.

Inhaltlich umfasst das Kapitel 2 einen Überblick zur Studienlage in Deutschland, Beschreibungen zu den verwendeten Modellen und statistischen Analysemethoden, Beschreibungen zu den Datenbeständen, die für Status-quo-Betrachtungen und die Entwicklung von Szenarien relevant sind, exemplarische Ergebnisse aus den Modellen für Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, die Skizze eines Stresstests mit Bezug zum Grundwasserdargebot sowie ein Konzept zur Darstellung von sogenannten Wasser-Bilanz-Risiko-Gebieten. Aus hydroklimatologischer und wasserwirtschaftlicher Sicht wurden Analysen zur Wassernutzung und Wassergewinnung, zur raumzeitlichen Variabilität von meteorologischen Dürreindizes, der Grundwasserneubildung, des Grundwasserflurabstandes und des unterirdischen Wasserspeichers, zum theoretischen und tatsächlichen Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft sowie zu Wassernutzungs- und -gewinnungsindizes durchgeführt. An dieser Stelle kann bereits eine wesentliche Erkenntnis skizziert werden: Nur umfassende und sektorenübergreifende Analysen der genannten wasserwirtschaftlich relevanten Größen liefern ein realistisches Bild der aktuellen und möglichen zukünftigen Herausforderung, die der Klimawandel für die Wasserbewirtschaftung darstellt. Nur so können viele Fragen dazu beantwortet werden, beispielsweise ob Veränderungen, wenn sie statistisch signifikant, auch wasserwirtschaftlich relevant sind. Die in Kapitel 2 dargestellten Ergebnisse sind ein Beitrag zur bundesweiten Informationsbasis, auf deren Grundlage auch politisch-administrative Entscheidungen getroffen werden können.

Die Analyse zur Studienlage mit Bezug zur Entwicklung des Wasserdargebotes zeigt, dass bisher kein deutschlandweiter signifikanter Trend einer Ab- oder Zunahme des mittleren Abflusses in den Gewässern bezogen auf das Gesamtjahr erkennbar ist (Kapitel 2.1). Eine getrennte Betrachtung der Abflüsse für das hydrologische Winter- (November bis April) und Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) resultiert in der Beobachtung eines signifikant abnehmenden Trends der mittleren Abflüsse im Sommerhalbjahr. Dieser abnehmende Trend setzt sich im 21. Jahrhundert fort und kann dann je nach Klimaszenario noch deutlicher ausgeprägt sein. Die Literaturstudie zum Wasserdargebot hat zudem verdeutlicht, dass es in der Vergangenheit immer wieder einzelne Jahre mit einer Häufung von Niedrigwassertagen gegeben hat (z.B. in den Jahren 1971-1974, 1996, 2003). Flächendeckende Informationen zum Bodenfeuchtezustand in Deutschland werden täglich mit dem Dürremonitor abgebildet (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, UFZ) sowie vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung gestellt (Kapitel 2.2). Studien zur Grundwasserneubildung und deren Entwicklung in Deutschland lassen erkennen, dass zukünftig

insbesondere für die östlichen Bundesländer mit einer Abnahme zu rechnen ist, während für andere Regionen Zunahmen prognostiziert werden (z.B. Hessen, Süddeutschland). Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Studien auf Dateninput verschiedener Klimamodelle basieren und die Grundwasserneubildung mit unterschiedlichen Methoden und Modellen berechnet wurde (Kapitel 2.2). Nur wenige Studien existieren zur Bewertung der Grundwasserressourcen in Deutschland. Ausgedehnte Grundwasserdürren wurden in den 1970er Jahren, aber auch in den 2010er Jahren festgestellt. Insbesondere die Jahre 2018 und 2019 weisen starke Grundwasserdürren auf, wie sie vergleichsweise vor über 40 Jahren auftraten. Insgesamt zeigt sich im Süden und Westen Deutschlands ein Trend zu einem häufigeren Auftreten und länger anhaltender Dauer von Grundwasserdürren im Sommer, während es im Osten und in der Mitte Deutschlands eine Entwicklung mit schwächer ausgeprägten Grundwasserdürren gibt. Im Winter ist in der Mitte und im Osten Deutschlands ein signifikanter Trend hin zu weniger, bzw. zu schwächeren Grundwasserdürren erkennbar. Aufgrund des zukünftigen Klimawandels kann regional mit Grundwasserspiegelabnahmen gerechnet werden, von besonderer Bedeutung ist hier jedoch die Abfolge mehrerer trockener Jahre, die zu extrem niedrigen Grundwasserspiegeln führen kann.

Die Wassergewinnung und anschließende Nutzung haben aus wasserwirtschaftlicher Sicht einen entscheidenden Einfluss auf die Bewirtschaftung der Wasserressourcen. Zudem unterliegen Wassergewinnung und -nutzung klimatischen Bedingungen, z.B. Bewässerungslandwirtschaft oder die Befüllung von Schwimmbädern. Erst durch die Gegenüberstellung von Wassergewinnung und vorhandener Wasserressource können Problembereiche bzw. Regionen erkannt und entsprechende Maßnahmen für ein nachhaltiges Wassermanagement implementiert werden. Grundlage der Daten zur Wassergewinnung und -nutzung für die Jahre 1991 bis 2019 sind die Statistiken der Wasserwirtschaft der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, die in einem dreijährigen Turnus für den öffentlichen und nichtöffentlichen (betrieblichen) Bereich erhoben werden (Kapitel 2.3.5.1). Mit der Erhebung für das Jahr 2019 erfolgte erstmalig die Datenaufnahme in einem besonders trockenen Jahr. Der Einsatz von Bewässerungswasser wird jedoch nur rudimentär abgebildet. Die Projektion der zukünftigen Wassernutzung bis zum Jahr 2070 erfolgte im Projekt WADKlim für die öffentliche und nichtöffentliche Wasserversorgung mit dem Modell WaterGAP3. Zugrunde gelegt wurden drei Szenarien, die ein Spektrum möglicher Zukünfte skizzieren. Die Simulation der zukünftigen öffentlichen Wasserversorgung basiert maßgeblich auf der Bevölkerungsentwicklung, während die Wassernutzung der produzierenden Industrie und zur thermischen Stromerzeugung durch die Bruttowertschöpfung, Stromproduktion und Technologie geprägt ist. Die Wassernutzungsszenarien für den öffentlichen und nichtöffentlichen Bereich in Deutschland bilden sowohl eine Abnahme als auch eine Zunahme der zukünftigen Wassernutzung im Vergleich zum Jahr 2019 ab (Kapitel 2.3.6.1). Die statistischen Daten sowie die Modellergebnisse zur Wassergewinnung und -nutzung wurden in WADKlim auf der räumlichen Gebietseinheit NUTS-3 (entspricht in Deutschland den Kreisen und kreisfreien Städten) verwendet.

Neben der Wassergewinnung für die öffentliche Wasserversorgung und für gewerblich-industrielle Zwecke sowie zur Stromerzeugung ist die Gewinnung im Rahmen der landwirtschaftlichen Bewässerung zunehmend von Bedeutung. Vielfach erfolgt diese Gewinnung aus den regional jeweils unterschiedlich produktiven Grundwasserleitern. Im Hinblick auf die Bilanzierung in Wassernutzungsindizes und die erwartete stärkere Zunahme des Bewässerungsbedarfs ist eine Quantifizierung der tatsächlich für die Bewässerung gewonnenen Wassermengen von großer Bedeutung. Die diesbezüglich in Deutschland vorhandenen statistischen Informationsbestände (z.B. von Destatis) können meist nicht ausreichend genau georeferenziert werden, weshalb im Rahmen des Projektes WADKlim die Bewässerungswassermengen modellgestützt mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA (Kapitel 2.3.2) gewonnen wurden. Insgesamt wurde für die acht

sehr häufig angebauten Feldfrüchte Weizen, Wintergerste, Roggen, Raps, Kartoffel Reifegruppe (RG) 3, Frühkartoffel RG 1, Zuckerrübe und Mais für die Zeit von 1961 bis 2020 der theoretische Bewässerungsbedarf in täglicher Auflösung simuliert (Kapitel 2.3.5.2). Diese Simulationsergebnisse wurden mit räumlichen Daten zur Verteilung der Feldfrüchte (im Jahr 2019, aus Fernerkundungsdaten) und statistischen Daten zur Größe der für eine Bewässerung technisch ausgestatteten Landwirtschaftsflächen zu einer Karte der tatsächlichen Bewässerungsmengen verrechnet. Diese Karte stellt eine räumlich differenzierte Komponente der Wassernutzung dar und kann für räumliche Analysen und die Berechnung regionaler Wassernutzungsindizes verwendet werden. Aufbauend auf dieser Status-quo-Analyse wurden vier Szenarien zum zukünftigen Wachstum der für die Bewässerung ausgestatteten Flächen entwickelt (Kapitel 2.3.6.2). Diese Szenarien wurden anschließend mit dem bis 2100 projizierten Bewässerungsbedarf für die acht Feldfrüchte kombiniert (drei Klimaprojektionen mit ausgeprägten Dürreperioden, Kapitel 2.3.4). Damit stehen erstmals für Deutschland flächendeckende räumlich und zeitlich hochaufgelöste Projektionen des Bewässerungsbedarfs in der Landwirtschaft für weiterführende Analysen zum Wasserhaushalt zur Verfügung.

Grundwasser ist in Deutschland die dominierende Quelle für die Wasserversorgung verschiedener Sektoren. Aus diesem Grund ist die raumzeitliche Quantifizierung der Grundwasserneubildung, des Grundwasserdargebots und der Füllstände der unterirdischen Wasserspeicher von herausragender Bedeutung. Im Projekt WADKlim wurden die genannten hydrologischen Größen mit den Modellen mGROWA und ParFlow (Teil von TSMP, Kapitel 2.3.2) für die Zeit von 1961 bis 2020 auf Basis von beobachteten Klimadaten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung simuliert. Die Ergebnisse wurden dann mit statistischen Verfahren (Kapitel 2.3.3) analysiert, um signifikante und für die Wasserbewirtschaftung relevante Veränderungen regional differenziert zu identifizieren (Kapitel 2.3.9 u. 2.3.11). Beispielsweise haben sich in den vergangenen 20 Jahren die Verteilung und die Mittelwerte der jährlichen Grundwasserneubildung insbesondere im Westen und Süden Deutschlands signifikant verändert, sodass für viele Regionen sogenannte Minimumdekaden der Grundwasserneubildung vorlagen. Solche länger anhaltenden Phasen von Grundwasserdürre haben sich auch im Füllstand der unterirdischen Wasserspeicher widergespiegelt, wobei die Grundwasserkörper in Abhängigkeit von den regional variierenden hydrogeologischen Gesteinseigenschaften unterschiedlich starken Veränderungen unterworfen waren. Um die in zukünftigen ausgeprägten Trockenphasen mögliche Absenkung der Grundwasserneubildung und damit des Füllstandes der unterirdischen Wasserspeicher abzuschätzen, wurden drei Projektionen bis zum Jahr 2100 durchgeführt (Kapitel 2.3.10 u. 2.3.12). Auch in der Zukunft wird die Grundwasserbewirtschaftung mit wiederkehrenden Minimumdekaden der Grundwasserneubildung konfrontiert sein, für die sie schon heute Maßnahmen zur Anpassung an ein dann reduziertes Grundwasserdargebot einleiten kann. Die Projektionen zeigen jedoch auch, dass auf mehrjährige Trockenphasen auch wieder Zeiträume mit längerfristig überdurchschnittlichen Niederschlägen folgen, die sich positiv auf die Grundwasserneubildung und den Füllstand der unterirdischen Wasserspeicher auswirken.

In WADKlim wurden erstmals für die NUTS-3-Regionen Deutschlands Wassergewinnungsindizes mit einer flächendeckend einheitlichen Methodik berechnet und analysiert (Kapitel 2.3.13). Aufgrund der in Deutschland dazu verfügbaren Datenbasis, bestehen derzeit noch Einschränkungen für solche Analysen. Einschränkungen bestehen seitens fehlender Geo-Referenzierungen der Wassergewinnung und der sektoralen Wassernutzung in den offiziellen Statistiken sowie den nicht erfassten mengenmäßigen Wassertransfers über die Fernleitungssysteme. Auf Basis der vorhandenen Statistikdaten sowie den Simulationsergebnissen der Modelle mGROWA und ParFlow konnten mehrere spezielle Wassergewinnungsindizes berechnet werden. Diese beziehen sich auf die gesamte Wassernutzung und den Gesamtabfluss (gesamtes Wasserdargebot)

sowie auf die Wassergewinnung aus Grundwasser und die Grundwasserneubildung. Zusätzlich wurden diese speziellen Wassergewinnungsindizes für verschiedene Jahre und Zeiträume berechnet, z.B. für die Minimumdekaden der Grundwasserneubildung. Aus den Simulationsergebnissen und produzierten Karten können wichtige Erkenntnisse zur zeitlich und regional variablen Ausprägung der Wassergewinnungsindizes gewonnen werden. Wichtige Rückschlüsse hinsichtlich der regionalen Sensitivität der Wassergewinnungsindizes können in zukünftige Detailstudien zu möglichen Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel einfließen.

Die durchgeführten Simulationen (1961 bis 2020) und Projektionen (bis 2100), die aufbereiteten statistischen Datenbestände zur Wassergewinnung und -nutzung sowie die entwickelten Szenarien für die öffentliche und nichtöffentliche Wasserversorgung können auch gemeinsam im Rahmen räumlich differenzierter Stresstests analysiert werden. Stresstests liefern wichtige Erkenntnisse zum potenziellen Einfluss des Klimawandels auf das zukünftige Wasserdargebot und die damit verbundenen möglichen mengenmäßigen Limitierungen der Wassernutzung. Mit dem in Kapitel 2.3.14 skizzierten Stresstest sollte ganz speziell die Frage beantwortet werden, in welchen NUTS-3-Regionen zukünftig in Minimumdekaden der Grundwasserneubildung die Grundwassernutzungsindizes potenziell über die Schwellenwerte von 0,2 oder 0,4 ansteigen könnten und somit Anzeichen für Wasserknappheit oder schwere Wasserknappheit liefern würden. Diese Entwicklung ist in starkem Maße von der Veränderung des tatsächlichen Bewässerungsbedarfes in der Landwirtschaft abhängig, und dieser wiederum vom Wachstum der tatsächlich bewässerten Flächen sowie von zunehmender Temperatur und Trockenheit in der Vegetationsperiode (abgebildet durch Klimaprojektionen). In mehreren Regionen Deutschlands wird zukünftig das Wachstum der tatsächlich mit Grundwasser bewässerten Flächen limitiert werden müssen, damit auch in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts in überdurchschnittlich trockenen Dekaden die öffentliche Wasserversorgung aus Grundwasser sichergestellt werden kann und dabei keine Wasserknappheit auftritt. Dies wird beispielsweise häufig der Fall sein in den NUTS-3-Regionen im Oberrheingraben, im westlichen Nordrhein-Westfalen, im südöstlichen Niedersachsen, im mitteldeutschen Trockengebiet sowie in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern.

Im Rahmen des Projektes WADKlim konnte der Einfluss von Klimavariabilität und -wandel auf den Grundwasserhaushalt als räumlich und zeitlich stark heterogen identifiziert und dargestellt werden. Dies ist auf die regionale Überlagerung von klimatischen Gegebenheiten und Veränderungen mit den landesweit stark diversen hydrogeologischen Gebietseigenschaften zurückzuführen. Die Kombination dieser Überlagerung, mit der ebenfalls räumlich stark variierenden tatsächlichen Gewinnung von Grundwasser für die Nutzung in verschiedenen Sektoren, erlaubt Rückschlüsse auf die räumlich unterschiedliche Ausprägung der Herausforderungen, vor der die Grundwasserbewirtschaftung gegenwärtig steht. Um die räumlich unterschiedliche Ausprägung der Herausforderungen als sogenannte Wasser-Bilanz-Risiko-Gebiete (WBRG) darzustellen (Kapitel 2.3.15), wurden zehn Grundwasserthemen auf Basis der Simulationsergebnisse und Analysen festgelegt. Beispiele für Grundwasserthemen sind die durch Signifikanztests nachgewiesenen zeitlichen Veränderungen im Füllstand der unterirdischen Wasserspeicher oder die Grundwassergewinnungsindizes in der Minimumdekade der Grundwasserneubildung im Zusammenhang mit Schwellenwerten für Wasserknappheit. Auf der NUTS-3-Ebene wurden den einzelnen Grundwasserthemen Punkte nach einem vorgegebenen System zugeordnet. Durch Darstellung und Aufsummieren der Punkte wurden die Regionen als Hotspots sichtbar, in denen aufgrund der Veränderungen in den letzten Jahrzehnten seit dem Jahr 2000 die Grundwasserbewirtschaftung mit einer klimatologischen Gefährdung der Grundwassergewinnung konfrontiert ist und sich deshalb schon jetzt an veränderte Rahmenbedingungen anpassen muss. Den Punktesum-

men können zusätzlich auch relative Risikoklassen (gering, moderat, hoch, sehr hoch) zugeordnet werden. Außerdem ist das System zur Identifizierung von WBRGs thematisch erweiterbar (z.B. um Themen zur Grundwassergüte), modelloffen und auf andere klimarelevante Themen übertragbar.

Umgang mit Nutzungskonflikten

Autor*innen: Vidaurre, R., Stein, U., Tröltzsch, J., Bueb, B., Schritt, H., Flörke, M., Uschan, T., Dworak, T.

Wasserbezogene Nutzungskonflikte (WNK) entstehen durch ein Ungleichgewicht zwischen Wasserbedarf und Wasserdargebot und beeinflussen u.a. die Verfügbarkeit, Verteilung und Verwendung von Wasserressourcen. Derartige Konflikte werden bisher vorwiegend mit semi-ariden bis ariden Klimabedingungen in Verbindung gebracht. Jedoch führten die in den letzten Jahren vermehrt auftretenden Hitzewellen und Dürren auch in Deutschland zu regionaler Wasserknappheit und damit verbundenen Konflikten. Im WADKlim-Projekt wurde ein regionalisierter Überblick über das Auftreten von WNK in Deutschland geschaffen. Hierzu wurde eine systematische Medienrecherche durchgeführt. Überregionale und insbesondere regionale Medien ermöglichten eine detaillierte Analyse betroffener Akteure sowie die räumliche Zuordnung der WNK auf die Gebietseinheit von NUTS-2 und NUTS-3.

Aus dem Zeitraum von 1950 bis Ende 2022 wurden insgesamt 358 WNK in Deutschland zusammengetragen und analysiert. In den Jahren vor 2015 wurden vereinzelte WNK berichtet, mit Ausnahme der Jahre 2003 und 2006, die durch sommerliche Hitzewellen charakterisiert waren. Seit 2015 stieg die Anzahl der berichteten WNK, besonders markant von 2018 bis 2022, in denen Deutschlandweit 47 bis 117 WNK berichtet wurden (die Jahre 2018 bis 2020 und 2022 waren durch hohe sommerliche Temperaturen und Trockenheit geprägt). Obwohl 2022 ähnliche klimatische Bedingungen wie 2018 aufweist, ist in diesem Jahr die Häufigkeit berichteter WNK größer. Es kann davon ausgegangen werden, dass spätestens seit 2022 eine stärkere mediale Sensibilisierung für das Thema WNK in Deutschland vorhanden ist.

Die räumliche Verteilung der WNK zeigte, dass sie regional differenziert auftreten. Die meisten WNK wurden im Nordosten entlang der polnischen Grenze, von der Oberlausitz bis in die Uckermark sowie im Spreewald, in Mitteldeutschland, am Niederrhein, im Rhein-Main-Gebiet und im Schwarzwald berichtet. Die Ursachen für WNK im Jahr 2022 waren hauptsächlich unzureichende Mengen von Oberflächen- und Grundwasser (75%), beeinträchtigte Trinkwasserversorgung (11%) und Infrastrukturprobleme, Verteilungskonflikte sowie Wasserpreiskonflikte (3%). Unzureichende Wasserqualität wurde nur in 4% der Fälle berichtet. Privatverbraucher*innen waren am stärksten betroffen (34%), gefolgt von Ökosystemen (31%), Wasserversorgungsunternehmen und Landwirtschaft (je 14%). Trotz der Dominanz von Wasserknappheit in Oberflächengewässern als Konfliktursache, waren die Sektoren Schifffahrt und Industrie (z.B. Kühlwassernutzung) nur zu 6% beteiligt. Industriebezogene WNK traten hauptsächlich entlang des Mittel- und Niederrheins sowie in Brandenburg und Berlin auf.

Zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten bestehen eine Vielzahl von Maßnahmen. Im Vorhaben wurde ein **Überblick zu Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten**, die im deutschen Kontext sinnvoll sein könnten, erstellt. Die Maßnahmen wurden in einer Analyse wissenschaftlicher wie grauer Literatur identifiziert. Hierbei wurden vorrangig Maßnahmen recherchiert und analysiert, die bei Nutzungskonflikten aufgrund verringerter Wasserverfügbarkeit anwendbar sind. In dem Maßnahmenkatalog „Reduzierung Wassernutzungskonflikte“ wurden 62 Maßnahmen aufgenommen, jede Maßnahme des Katalogs wird beschrieben und eine Reihe von Deskriptoren und analytischen Kategorien für sie bewertet.

Deskriptoren Maßnahmenkatalog „Reduzierung Wassernutzungskonflikte“

- | | |
|---|---|
| 1. Auswirkungen auf Wasserqualität, -quantität und Flächenbedarf | 6. Mögliche Zielkonflikte |
| 2. Ebene der Umsetzung | 7. Art der Maßnahmen |
| 3. Involvierte Sektoren | 8. Art der Maßnahme - Bezugszeitraum |
| 4. Hauptverantwortliche Institution bzw. Akteur (Maßnahmenträger) | 9. Zeitrahmen der Umsetzung |
| 5. Zu beteiligende Institutionen bzw. Akteure | 10. Kosten |
| | 11. Potenzielle Hindernisse/Herausforderungen |

Der Katalog soll sowohl als systematische Aufstellung als auch als Entscheidungshilfe für die Auswahl von Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten dienen.

Aufbauend auf der Analyse der Wassernutzungskonflikte in Deutschland und des Maßnahmenkatalogs „Reduzierung Wassernutzungskonflikte“ wurden im Projekt einige Instrumente gesondert untersucht, die als Lösungsansätze gelten, diese Konflikte zu mindern oder zu vermeiden. Es handelt sich dabei um: (1) Wasserversorgungskonzepte, (2) regionale Wasserbeiräte, (3) Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche und (4) Ansätze zur Priorisierung von Wassernutzungen.

Wasserversorgungskonzepte (WVK) sind auch bekannt als Leitbild, Masterplan oder Zukunftskonzept Wasserversorgung, wie auch als Konzept zur Anpassung an den Klimawandel, und haben das Ziel, die Wasserversorgung aktuell und zukünftig zu sichern und die nachhaltige Nutzung lokaler Wasserressourcen zu fördern. In Deutschland wurden WVK entwickelt oder aktualisiert, um auf die Herausforderungen des Klimawandels, insbesondere auf trockene Jahre wie z.B. 2018, zu reagieren. Die Entwicklung und Umsetzung erfolgten oft aufgrund politischer Beschlüsse.

In WADKlim wurden 27 WVK analysiert, davon 17 für Bundesländer, 3 für Regierungsbezirke und 7 für Landkreise und kreisfreie Städte. Einige Bundesländer, darunter Nordrhein-Westfalen, Saarland, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein, hatten bis April 2023 (noch) keine landesweiten WVK. In Bremen und in Baden-Württemberg befinden sich WVK in der Entwicklungsphase, im Saarland sollte ein WVK im ersten Quartal 2023 fertiggestellt sein.

Die Bewertung der Wasserversorgungssicherheit in den WVK fokussiert auf das Grundwasser und erfolgt oft als Bilanzbetrachtung, wobei das Wasserdargebot dem Wasserbedarf gegenübergestellt wird. Während das zukünftige Wasserdargebot mit Modellen simuliert wird, um den Einfluss des Klimawandels auf das zukünftige Wasserdargebot zu berücksichtigen, werden zukünftige Wasserbedarfe mittels demographischer Entwicklung und der Pro-Kopf-Wassernutzung abgeleitet. Die zukünftige Entwicklung der industriellen Wassernutzung stellte sich als schwierig heraus und wird nur in wenigen WVK berücksichtigt.

Zur langfristigen Sicherung der Wasserversorgung und zur Etablierung einer nachhaltigen Wasserbewirtschaftung werden in den WVK vielfältige Maßnahmen beschrieben, die in vier Kategorien unterteilt werden können: *Anpassung von Infrastruktur, Erhöhung des verfügbaren Wasserdargebots, regulatorische Maßnahmen und Schließen von Datenlücken*. Beispiele für Maßnahmen sind der Ausbau von Wasserversorgungsnetzen (z.B. Fernleitungsnetze), die Bildung von

Versorgungsverbänden, die Reduzierung von Flächenversiegelung, die Förderung der Niederschlagswasserversickerung, die Ausweitung von Trinkwasservorranggebieten, Schaffung finanzieller Anreize und Unterstützung zur Umsetzung von Maßnahmen sowie das Schließen von Datenlücken und Schaffung einer verbesserten Datenbasis. Allerdings weisen die Maßnahmen in etwa zwei Drittel der WVK einen allgemeinen und eher unkonkreten Charakter auf. Insgesamt sind die untersuchten WVK in Struktur und Inhalten sehr heterogen, was auf einen fehlenden bundeseinheitlichen Standard und eine inhomogene Datenlage zurückzuführen ist.

Im Wasserhaushaltsgesetz des Bundes ist die öffentliche Wasserversorgung als eine Aufgabe der Daseinsvorsorge definiert. Hierbei genießt diese eine Vorrangstellung gegenüber anderen Wassernutzungen. Obwohl die Priorisierung der Wassernutzung bei Wassermangel ein wichtiger Aspekt ist, enthält die Mehrheit der WVK keine konkreten Angaben zur Priorisierung. In WVK, in denen Aussagen zur Priorisierung getroffen werden, wird der öffentlichen Wasserversorgung die höchste Priorität eingeräumt.

Die verschiedenen Trockenheitsereignisse der letzten Jahre zeigen, dass vermehrter Austausch zwischen Akteuren verschiedener Sektoren notwendig ist, um die Fragen des Wassermanagements zu behandeln. Problemlagen und Ursachen sind regional- und lokalspezifisch, Maßnahmen müssen gemeinsam auf der relevanten Ebene diskutiert und umgesetzt werden.

Wasserbeiräte können dazu dienen, Vertreter*innen wasserrelevanter Sektoren zusammenzubringen und durch einen intersektoralen Austausch zur Vermeidung von Wassernutzungskonflikten beizutragen.

Wasserbeiräte wurden im Projekt als Gremien definiert, welche die Koordination zwischen verschiedenen wassernutzenden Sektoren stärken. Sie dienen dem Austausch und der Zusammenarbeit zu regionalen Wasserbedarfen und können die Vereinbarung strategischer Ziele oder Maßnahmen unterstützen und regionale Wasserverteilungen empfehlen. Es wird davon ausgegangen, dass dadurch ein Ausgleich zwischen den Interessen von wassernutzenden Sektoren unterstützt wird und letztlich Wassernutzungskonflikte vermieden oder gemindert werden können. Wasserbeiräte haben eine beratende Funktion und unterstützen die Entscheidungsprozesse der Wasserbehörden. Sie sind auf lokaler oder regionaler Ebene angelegt. Darunter fallen u.a. Wassertische, Wasserforen oder Wassernetzwerke.

Die Analyse von Wasserbeiräten basierte auf der Untersuchung bestehender Beiräte und deren Ausgestaltungsvarianten. Darauf aufbauend wurden Empfehlungen und Vorschläge für die Initiierung von Wasserbeiräten erarbeitet, welche in drei regionalen Fallstudien in Stakeholderworkshops hinsichtlich ihrer Praxisrelevanz diskutiert wurden. Die erarbeitete Abfolge für die Initiierung von Wasserbeiräten enthält als Grundvoraussetzung das Vorhandensein eines Akteurs („Kümmerers“), der die Initiierung des Beirats hauptverantwortlich vorantreibt. Im Beirat sollte gemeinsam ein Verständnis zu bestehenden bzw. potenziellen Konflikten in der Region entwickelt werden, aufbauend auf den verschiedenen Informationen bzw. Daten der verschiedenen Akteure. In einem nächsten Schritt sollten die grundsätzliche thematische und zeitliche Ausrichtung bzw. die Hauptaufgaben des Gremiums festgelegt werden. Ebenfalls werden die relevanten Stakeholder, eine mögliche Formalisierung und geeignete Austauschformate diskutiert und festgelegt.

Die durchgeführten Fallstudien haben gezeigt, dass in vielen Regionen bereits Austauschgremien vorhanden sind, welche Wasserfragen (mit)abdecken, d.h. neue Beiräte müssten auf bestehenden Strukturen aufbauen bzw. diese sinnvoll ergänzen. Bei den Diskussionen wurde deutlich, dass ein Austausch zu verschiedenen wasserwirtschaftlichen Fragen sektorenübergreifender Relevanz gewünscht ist. Wichtig ist, die Aufgabenbereiche des Beirats im Vorfeld genau abzu-

grenzen. Aufgrund der wiederkehrenden Herausforderungen, die mit einem verringerten Wasserdargebot einhergehen, wird die Einrichtung eines auf Dauer angelegten Gremiums empfohlen. Zusätzlich sollten ad-hoc Abstimmungen ermöglicht werden. Verschiedene weitere Aufgaben eines Wasserbeirats wurden diskutiert, u.a. die Wissensbasis und das Verständnis schaffen für die Abwägung unterschiedlicher Interessen und Aufgaben – beide Aspekte sind zentral für den Erfolg.

Bei projektbasierten Formaten sollte frühzeitig an einer Verstetigung gearbeitet werden, so dass eine Perspektive für eine langfristige Zusammenarbeit besteht. Ein Kümmerer für den Prozess wurde als zentral eingestuft. Ebenso wurde der Nutzen eines externen Moderators erwähnt. Die Notwendigkeit ausreichender finanzieller Ressourcen, u.a. über den Haushalt oder Anschubfinanzierung, zur Organisation des Beirats wurde angesprochen. Ebenfalls wurde die Anerkennung für die Mitarbeit in Austauschgremien als Herausforderung erwähnt.

In WADKlim wurde zudem ein **Maßnahmenkatalog „Wasserrückhalt in der Landschaft“** mit einer vereinfachten Analyse von Wirkungen und Kosten von Maßnahmen zum Rückhalt von Wasser in der Landschaft erstellt. Grundsätzlich kommen eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen in Frage, die den Landschaftswasserhaushalt verbessern oder die Resilienz der Landökosysteme gegenüber den Extremereignissen Trockenheit und Hochwasser stärken können. Der erstellte Maßnahmenkatalog soll Akteuren eine Entscheidungsgrundlage zur Umsetzung von Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche bieten. Unter Maßnahmen zum Wasserrückhalt verstehen die Autor*innen Maßnahmen der Landschaftsgestaltung und des Bodenschutzes sowie technische Maßnahmen, welche die Wasserspeicher- und Rückhaltefähigkeit in der Fläche verbessern, um das Wasserdargebot für Trockenzeiten zu erhöhen.

Der entwickelte Katalog umfasst 69 Maßnahmen zur Erhöhung des Wasserrückhalts in der Landschaft sowie ihre Wirkungen für den Wasserhaushalt und andere Schutzziele. Die Auswertung zeigt, dass die meisten Maßnahmen positive oder sehr positive Wirkungen auf die verschiedenen Ziele für den lokalen Wasserhaushalt, u.a. Abflussverzögerung, Wasserrückhalt in Böden, Grundwasserneubildung oder Wasserdargebot in Trockenzeiten haben. Die Maßnahmen haben auch positive oder sehr positive Wirkungen auf andere Schutzziele, wie den Klimaschutz, die Biodiversität, die Boden- und die Wasserqualität. 90 Prozent der Maßnahmen zum Wasserrückhalt, die den Hochwasserschutz zum Ziel haben, zeigen auch positive Auswirkungen auf andere Schutzziele.

Sechs besonders empfehlenswerte Maßnahmen wurden identifiziert, die einen positiven Effekt sowohl auf den Hochwasserschutz als auch auf das Wasserdargebot in Trockenzeiten, geringe Kosten für Bau und Planung, Transaktionen und Flächenbereitstellung und eine kurzfristige Wirkung zeigen.

Besonders empfehlenswerte Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche

- ▶ Reaktivierung von Binneneinzugsgebieten (Landwirtschaft, naturbasierte Lösung)
- ▶ Anlage von Sedimentauffangteichen (Forstwirtschaft, naturbasierte Lösung)
- ▶ Angepasste Auswahl der Kulturen und der Fruchtfolge zum besseren Wasserrückhalt (Landwirtschaft, Bewirtschaftung)
- ▶ Flächen hangparallel bewirtschaften (Landwirtschaft, Bewirtschaftung)
- ▶ Etablierung von Pufferstreifen/Ackerrandstreifen (Landwirtschaft und Wasserwirtschaft, naturbasierte Lösung)
- ▶ Verschluss, Rückbau oder Steuerung von Drainagen oder Entwässerungsgräben (Wasserwirtschaft und Landwirtschaft, Bewirtschaftung)

Der Katalog kann als systematische Aufstellung und Entscheidungshilfe für die Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen zur Erhöhung des Wasserrückhalts in der Landschaft dienen. Er kann auch als Grundlage für weitere Forschungs- und Modellierungsarbeiten genutzt werden, um die räumliche Dimension und die kumulativen Effekte der Maßnahmen zu untersuchen.

Der vierte, vertieft betrachtete Lösungsansatz bezieht sich auf **Regeln zur Entscheidungsfindung und Priorisierung von Nutzungen** bei wasserbezogenen Nutzungskonflikten. Es sollten erste konzeptionelle Beiträge für die in der Nationalen Wasserstrategie angekündigte, bundesweit abgestimmte Leitlinie entwickelt werden, welche einen einheitlichen Orientierungsrahmen für lokal oder regional zu treffende Priorisierungsentscheidungen schaffen soll.

Eine Recherche zu weltweit bestehenden Priorisierungsansätzen zeigte beispielsweise, dass Nutzungspriorisierungen in 15 der 27 EU-Mitgliedsstaaten etabliert wurden (Stand erste Hälfte 2023). Dabei gibt es große Unterschiede in der Anzahl der priorisierten Nutzungen: In Deutschland wird lediglich eine einzelne Nutzung (Trinkwasserversorgung) vor allen weiteren priorisiert. In den anderen EU-Mitgliedsstaaten werden oft vier bis fünf Nutzungen in einer Priorisierungsreihenfolge definiert. Es gibt auch Beispiele mit bis zu neun Nutzungen. Zudem zeigt die Analyse, dass Nutzungspriorisierungen auf zwei zeitlichen Ebenen definiert werden. Zum einen erfolgt eine Priorisierung im Ereignis- bzw. Dürrefall (also einen i.d.R. über einigen Wochen oder Monate sich beschränkenden Zeitraum) und zum anderen eine langfristige Priorisierung als Teil einer strategischen Planung (hierunter fallen sowohl eine Priorisierung bei der Erteilung von neuen Wasserrechten als auch die nachträgliche Anpassung bestehender Wasserrechte). In manchen der analysierten Länder gilt die gleiche Reihenfolge für Priorisierungen im Dürrefall und die langfristige Priorisierung, in anderen werden die beiden zeitlichen Ebenen getrennt gehandhabt und nach verschiedenen Logiken priorisiert.

Internationale Beispiele für beide Priorisierungsarten zeigen differenzierte und unterschiedlich strukturierte Umsetzungen des Subsidiaritätsprinzips, die für Deutschland von Interesse sein können. Mehrere europäische Mitgliedsstaaten folgen dem Ansatz, einen auf nationaler Ebene vorgegebenen Priorisierungsrahmen festzulegen, welcher Rahmenbedingungen für die regionalen Abwägung vorgibt. Auf der regionalen Ebene (bzw. auf der Ebene der Flusseinzugsgebiete) entscheiden die jeweiligen Umsetzungsbehörden (bspw. die Provinzen) innerhalb des vorgegebenen Rahmens, welche Nutzungen in ihrer Region prioritär sind. Die Priorisierung erfolgt oft aufgrund ökonomischer Kriterien, bspw. mit einer Priorisierung der in der Region wichtigsten Wirtschaftszweige. Zudem gibt es interessante Beispiele für Vorgaben zu einer unterschiedlichen Priorisierung ein und derselben Nutzung je nachdem, ob durch die Dürre irreversible Schäden zu befürchten sind (z.B. für die Ökosysteme) oder aber ob die Versorgungssicherheit in Frage steht (Trinkwasser- und Energieversorgung).

Auch in der konkreten Maßnahmenplanung für den Dürrefall, welche i.d.R. in der Verantwortung lokaler Behörden liegt, findet das Subsidiaritätsprinzip Anwendung. In manchen Ländern erhalten die lokalen Umsetzungsbehörden von der regionalen Ebene einen Orientierungsrahmen mit Prinzipien und Bedingungen, welche z.B. die Mindestmaßnahmen zur Wasserverbrauchsbeschränkung im Dürrefall definiert und die für die gesamte Region gelten. Die lokalen Umsetzungsbehörden haben bei der Entwicklung der konkreten Maßnahmen allerdings Spielräume und dürfen dabei auch zu strengeren Maßnahmen greifen. Zudem können lokale Behörden beispielsweise festlegen, welche Akteure innerhalb einer Nutzungsklasse priorisiert werden sollten (z.B. Bewässerung von Dauerkulturen vor der von einjährigen Kulturen in der Landwirtschaft). Dieser lokal-spezifische Spielraum kann allerdings auch zu bedeutenden Problemen hinsichtlich der Transparenz der Entscheidungsfindung führen.

Die Umsetzung einer Priorisierung von Wassernutzungen stünde in Deutschland allerdings vor bedeutenden Herausforderungen. Fehlende Daten zu Wasserrechten und tatsächlichen Wasserentnahmen stellen ein wichtiges Hindernis dar. Zudem ist die Kontrolle illegaler Wassernutzung entscheidend. Auch die Analysen der Dürremanagementansätze in Europa zeigen den Bedarf nach verbesserten Kontrollsystemen, vermehrter Kontrolle von Entnahmemengen und die Reduzierung der Belastungen der Gewässer durch die Entnahmen.

Leitplanken für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung im urbanen Raum

Autoren: Barjenbruch, M., Guggenberger, T., Schritt, H.

Wasserwiederverwendung ist die Nutzung von Wasser, das aus behandeltem Abwasser gewonnen wurde und für seinen Verwendungszweck die angemessene Qualität besitzt (unter Berücksichtigung der Gesundheits- und Umweltrisiken und der lokalen und EU-Gesetzgebung). Die Wasserwiederverwendung eignet sich für Anwendungszwecke, für die keine Trinkwasserqualität benötigt wird. Im Rahmen des WADKlim-Vorhabens wurde das Potenzial der Wasserwiederverwendung für die Bewässerung im urbanen Raum in Deutschland untersucht, sowie technische Bedingungen und risikominimierende Maßnahmen für einen sicheren Umgang mit aufbereitetem Wasser benannt. Als urbane Grünfläche wurden Sportplätze, Friedhöfe, Park- und Grünanlagen, Golfplätze, Kleingärten, Straßenbegleitgrün und Straßenbäume betrachtet.

Da es bundesweit keine gesicherten statistischen Angaben zu den urbanen Grünflächen gibt, wurden die Flächen mit fünf verschiedenen Ansätzen bestimmt und gemittelt. Ebenfalls liegen keine Angaben über die Bepflanzung und den tatsächlichen Bewässerungsbedarf vor. Daher wurde der Bewässerungsbedarf aus der klimatischen Wasserbilanz für trockene und normale Jahre sowie sehr trockene Jahre (Zeitraum 1991-2020) unter Annahmen eines Grasbewuchses berechnet. Damit ergibt sich ein theoretischer Bewässerungsbedarf für urbanes Grün von 414,62 Mio. m³ in normalen Jahren, 719,19 Mio. m³ in trockenen Jahren und 1.358,89 Mio. m³ in sehr trockenen Jahren. Das Gesamtabwasseraufkommen in allen deutschen Städten wurde mit 7,040 Mrd. m³/a berechnet und entspricht damit 78 % des gesamtdeutschen Abwasseraufkommens von 9,05 Mrd. m³/a (DESTATIS, 2021). Somit könnte in Mittel- und Großstädten der ermittelte Bewässerungsbedarf mit folgenden Anteilen des Jahresabwasseraufkommens gedeckt werden: mit ca. 5% des Jahresabwasseraufkommens in normalen Jahren, ca. 9% in trockenen Jahren und ca. 15% in sehr trockenen Jahren. In Kleinstädten werden 5% in normalen Jahren, 10% in trockenen Jahren und sogar 19% des Jahresabwasseraufkommens in sehr trockenen Jahren benötigt.

Mittels einer Best-Practice-Übersicht von bestehenden Wasserwiederverwendungssystemen für die urbane Bewässerung wurden technische Lösungen als Orientierung für die Umsetzung zusammengetragen und bewertet. Darüber hinaus wurde unter Einbeziehung von Stakeholdern ein Risikomanagement-Ansatz entwickelt, um mögliche Gefahren optimal einschätzen zu können. Darauf aufbauend wurden Handlungsempfehlungen für Politik und Entscheidungsträger*innen zur Wasserwiederverwendung in urbanen Räumen erarbeitet.

Die weltweiten Best-Practice-Studien zur Wasserwiederverwendung für die Bewässerung urbaner Grünanlagen, die bereits über Dekaden betrieben werden, haben gezeigt, dass oft die Aufbereitung von kommunalem Abwasser durch einen drei-stufigen Klärprozess inkl. umfassender Nitrifikation / Denitrifikation mit anschließender Sand- oder Tuchfiltration und Desinfektion eingesetzt werden, um die bestehende internationalen Qualitätsanforderungen für urbane Wasserwiederverwendung zu erreichen.

Das notwendige Aufbereitungsverfahren sollte immer nach Kenntnis der Abwasserzusammensetzung und dem geplanten Einsatzort und -zweck und den damit einhergehenden Risiken für

Umwelt und Gesundheit geplant werden. Auch wenn die zusätzliche Aufbereitung durch Filtration und Desinfektion in vielen Fällen ausreicht, kann eine erfolgreiche und sichere Wasserwiederverwendung nach einer individuellen Planung am Einsatzort auch weitergehende Technologien verlangen.

Um Verantwortungsträger*innen bei ihrem Entscheidungsprozess zur Umsetzung eines möglichen Wasserwiederverwendungsprojekts im Vorfeld zu unterstützen, wurde eine Bewertungsmatrix im Rahmen dieses Vorhabens mit vier Hauptkategorien erstellt. Diese berücksichtigt die Bewässerungsbedürftigkeit, abwasserbezogene Gegebenheiten (Herkunft des Abwassers, Klär-/Aufbereitungstechnik), die Spezifikationen des urbanen Grüns (Flächennutzung, Zugangsberechtigungen, Bewässerungssystem) sowie die infrastrukturelle Anbindung.

Anschließend wurde ein Risikomanagementansatz für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung urbaner Grünflächen erarbeitet. Als Basis diente das Risikomanagement mit den wesentlichen Kernelemente der EU-Verordnung zur landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung (EU-Verordnung 2020/741), wobei für die Bewässerung im urbanen Raum nicht übertragbare Vorgaben angepasst bzw. zusätzliche Anforderungen für den urbanen Raum entwickelt wurden.

Theoretisch kann das aufbereitete Wasser eine geeignete und mengenmäßig ausreichende Ressource für die urbane Bewässerung in Deutschland darstellen. Für eine konkrete Abschätzung des Potenzials fehlen bisher noch zuverlässige Daten zu den Grünflächen und deren tatsächlichen Bewässerungsbedarfen sowie eine umfassendere Risikobewertung. Zu beachten ist die zusätzlich erforderliche Aufbereitung bestehend aus mindestens Filtration und Desinfektion. Gesundheitsrisiken, mögliche Auswirkungen auf den Mindestabfluss, auf Böden und Grundwasser sind im Rahmen standortspezifischer Risikomanagementpläne zu berücksichtigen. Eine mögliche Herausforderung stellt auch die Verteilung des Wassers dar, für welche zwischen dem Bau eines Verteilnetz oder dem Transport per LKW abzuwägen ist. Mit Blick auf die zu erwartenden Kosten und den bisher fehlenden Rechtsrahmen wird die Implementierung einer Wasserwiederverwendung für den urbanen Raum voraussichtlich nur bei entsprechendem Bewässerungsbedarf/-druck und partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Abwasserentsorgern und den entsprechenden Betreibern der Grünflächen realisiert werden können.

Handlungsempfehlungen

In Kapitel 5 des Abschlussberichtes werden Handlungsempfehlungen ausgesprochen, die sich auf den Umgang mit der aktuellen und zukünftigen Wasserverfügbarkeit und -nutzung sowie wasserbezogenen Nutzungskonflikten in Deutschland beziehen, inklusive einer Aufzählung beispielhafter Ansätze zur Minderung von Wasserknappheit und Dürre. In den einzelnen Unterkapiteln sind jeweils zuerst die gewonnen Erkenntnisse aus dem WADKlim Projekt kurz zusammengefasst, die Herausforderungen, die damit einhergehen und abschließend weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

Summary

Climate change and its consequences are already noticeable in Germany and can be clearly evidenced by the observations of many institutions. Climate variability and change directly influence the water cycle. With advancing climate change, renewable and usable water resources in Germany will increasingly alter. The impacts of climate change, manifested through more frequent heatwaves and droughts, also lead to low water levels, regional water scarcity, and water use conflicts in Germany. The increasing number of water use conflicts underscores the need for a more detailed analysis of the current situation and expected developments in water availability in the coming years. In order to limit the relevant impacts of climate change and mitigate associated future ecological, economic, and social damages, adaptation measures need to be strengthened and new courses of action examined. In this context, the future development of water resources at the regional level is of significant importance. There is a need to analyze options for action at various levels to address and avoid potential water use conflicts in Germany.

Against this background, the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety, and Consumer Protection (BMUV) together with the Federal Environment Agency (UBA) initiated the project "Impact of Climate Change on Water Availability / Adaptation to Drought in Germany" (WADKlim). The project aimed to investigate the effects of drought on water availability, soil water balance, and groundwater in Germany, and to develop possible solutions and recommendations for water management. Thus, WADKlim contributes to the objectives formulated in the *German Adaptation Strategy to Climate Change* and in the *National Water Strategy*.

WADKlim in a nutshell

The Federal Environment Agency (UBA) project "Impact of Climate Change on Water Availability - Adaptation to Drought in Germany" (WADKlim) investigates the effects of drought on water supply, soil water balance, and groundwater availability in Germany. The project provides an **overview of current water availability in Germany**, as well as its **future development** under climate change conditions. Furthermore, the project analyzes current and future **water use conflicts in Germany** and develops **solution and measures** that can contribute to proactive management and avoidance of conflicts in use. Additionally, the project presents and evaluates the possibilities, opportunities, and risks of **water reuse for irrigation in urban areas**.

Current and Future Developments of Water Supply and Groundwater Availability

Authors: Herrmann, F., Flörke, M., Kollet, S., Uschan, T., McNamara, I., Wagner, N.

Over the past two decades, a large number of studies have been conducted in the Federal Republic of Germany on the influence of climate change on the current and future development of terrestrial water balance. Therefore, an initial focus of the WADKlim project was to evaluate these studies and derive nationwide insights into the current situation and possible future changes. As a result of this evaluation, the need became apparent to conduct a national study with a comprehensive and uniform methodology for assessing the current and future developments of water supply and groundwater availability, as well as to fill existing knowledge gaps. For this purpose, a modeling and analysis methodology was developed to gain further insights into the impact of climate change on the terrestrial water balance. Using this methodology, a multitude of insights into regional water balance as well as remaining uncertainties and challenges in the scientific

assessment of changes were collected and documented. This documentation does not claim to be exhaustive, which is justified by the complexity of climate change and its manifestations. Therefore, Chapter 2 addresses selected topics closely related to the interplay of climate change, water balance, and water scarcity, whose intensive examination appears sensible for a sustainable (ground)water resources management.

Chapter 2 includes an overview of the study situation in Germany, descriptions of the models and statistical analysis methods used, descriptions of the datasets relevant for status quo assessments and scenario development, exemplary results from the models for the past, present, and future, a sketch of a stress test related to groundwater supply, and a concept for depicting so-called water balance risk areas. From a hydroclimatological and water management perspective, analyses were conducted on water use and extraction, spatiotemporal variability of meteorological drought indices, groundwater recharge, groundwater level fluctuations, and underground water storage, as well as theoretical and actual irrigation requirements in agriculture and water use and extraction indices. At this point, a significant finding can already be outlined: only comprehensive and cross-sectoral analyses of the mentioned water-relevant parameters provide a realistic picture of the current and possible future challenges posed by climate change for water management. Only in this way can many questions be answered, such as whether statistically significant changes are also relevant in terms of water management. The results presented in Chapter 2 contribute to the nationwide information basis, upon which political-administrative decisions can be made.

The analysis of the study situation regarding the development of water supply shows that there is currently no nationwide significant trend of decrease or increase in mean river discharge throughout the year (Chapter 2.1). However, a separate examination of river discharge for the hydrological winter (November to April) and summer half-year (May to October) reveals a significantly decreasing trend in mean river discharge during the summer half-year. This decreasing trend continues into the 21st century and may become even more pronounced depending on the climate scenario. The literature review on water supply has also highlighted that in the past, there have been individual years with a clustering of low-flow days (e.g., in the years 1971-1974, 1996, 2003). Comprehensive information on soil moisture conditions in Germany is provided daily through the Drought Monitor (Helmholtz Centre for Environmental Research, UFZ) and by the German Meteorological Service (DWD) (Chapter 2.2). Studies on groundwater recharge and its development in Germany indicate that, in the future, a decrease can be expected especially for the eastern federal states, while increases are forecasted for other regions (e.g., Hesse, southern Germany). However, it should be noted that the studies are based on input data from various climate models and groundwater recharge was calculated using different methods and models (Chapter 2.2). Only a few studies exist for assessing groundwater resources in Germany. Extensive groundwater droughts were observed in the 1970s, as well as in the 2010s. Particularly, the years 2018 and 2019 exhibit severe groundwater droughts reminiscent of those occurring over 40 years ago. Overall, a trend towards more frequent and longer-lasting groundwater droughts in summer is observed in southern and western Germany, while in the east and center of Germany, there is a trend towards less frequent or weaker groundwater droughts. In winter, a significant trend towards fewer or weaker groundwater droughts is noticeable in the center and east of Germany. Due to future climate change, regional decreases in groundwater levels can be expected, but the sequence of multiple dry years is of particular importance, as it can lead to extremely low groundwater levels.

Water extraction and subsequent use have a crucial influence on water resource management from a water management perspective. Furthermore, water extraction and use are subject to cli-

matic conditions, such as agricultural irrigation or the filling of swimming pools. Only by comparing water extraction with available water resources can problem areas or regions be identified, and appropriate measures for sustainable water management implemented. The data on water extraction and use for the years 1991 to 2019 are based on the statistics of water management from the Federal and State Statistical Offices, which are collected every three years for the public and non-public (industrial) sectors (Chapter 2.3.5.1). The data collection for the year 2019 was carried out for the first time in a particularly dry year. However, the use of irrigation water is only rudimentarily reflected. The projection of future water use until 2070 in the WADKlim project was conducted for public and non-public water supply using the WaterGAP3 model. Three scenarios were used to outline a spectrum of possible futures. The simulation of future public water supply is mainly based on population development, while water use in the manufacturing industry and for thermal power generation is influenced by gross value added, electricity production, and technology. The water use scenarios for the public and non-public sectors in Germany reflect both a decrease and an increase in future water use compared to 2019 (Chapter 2.3.6.1). The statistical data as well as the model results on water extraction and use were used in WADKlim at the spatial unit level of NUTS-3 (equivalent to districts and district-free cities) regions.

In addition to water extraction for public water supply and for commercial-industrial purposes as well as for power generation, extraction for agricultural irrigation is increasingly important. Often, this extraction is carried out from regionally different productive aquifers. With regard to the balancing in water use indices and the expected increase in irrigation demand, quantifying the actual water volumes obtained for irrigation is of great importance. The statistical information available in Germany (e.g., from Destatis) regarding this matter can often not be sufficiently accurately georeferenced. Therefore, within the framework of the WADKlim project, irrigation water quantities were obtained through model-assisted simulation using the mGROWA water balance model (Chapter 2.3.2). In total, the theoretical irrigation demand for the eight most frequently grown crops, such as wheat, winter barley, rye, rapeseed, potato maturity group (MG) 3, early potato MG 1, sugar beet, and maize, was simulated on a daily basis from 1961 to 2020 (Chapter 2.3.5.2). These simulation results were reconciled with spatial data on crop distribution (in 2019, from remote sensing data) and statistical data on the size of agriculturally equipped land areas for irrigation to create a map of actual irrigation volumes. This map represents a spatially differentiated component of water use and can be used for spatial analyses and the calculation of regional water use indices. Based on this status quo analysis, four scenarios for the future expansion of equipped irrigation areas were developed (Chapter 2.3.6.2). These scenarios were then combined with projected irrigation demand for the eight crops until 2100 (three climate projections with pronounced drought periods, Chapter 2.3.4). Thus, for the first time, spatially and temporally highly resolved projections of irrigation demand in agriculture for Germany are available for further water balance analyses.

Groundwater is the dominant source for water supply in various sectors in Germany. Therefore, the spatiotemporal quantification of groundwater recharge, groundwater availability, and underground water storage levels is of outstanding importance. In the WADKlim project, these hydrological variables were simulated with the mGROWA and ParFlow models (part of TSMP, Chapter 2.3.2) for the period from 1961 to 2020 based on observed climate data at high spatial and temporal resolutions. The results were then analyzed using statistical methods (Chapter 2.3.3) to identify significant changes regionally and differentiated for water management (Chapters 2.3.9 and 2.3.11). For example, over the past 20 years, the distribution and means of annual groundwater recharge have significantly changed, especially in western and southern Germany, resulting in many regions experiencing so-called minimum decades of groundwater recharge.

Such prolonged periods of groundwater drought have also been reflected in the filling levels of underground water storage, with groundwater bodies undergoing varying degrees of change depending on regional hydrogeological rock properties. To estimate the potential decrease in groundwater recharge and thus the filling level of underground water storage in future pronounced dry periods, three projections until 2100 were conducted (Chapters 2.3.10 and 2.3.12). Also in the future, groundwater management will be confronted with recurring minimum decades of groundwater recharge, for which adaptation measures to a then reduced groundwater supply can be initiated today. However, the projections also show that multiple-year dry periods will be followed by periods with long-term above-average rainfall, which will have a positive impact on groundwater recharge and the filling level of underground water storage.

In WADKlim, water extraction indices were calculated and analyzed for the NUTS-3 regions of Germany for the first time using a comprehensive and uniform methodology (Chapter 2.3.13). Due to the current data basis available in Germany, there are still limitations for such analyses. Limitations arise from the lack of georeferencing of water extraction and sectoral water use in official statistics, as well as unrecorded quantitative water transfers via pipeline systems. Based on the available statistical data and the simulation results of the mGROWA and ParFlow models, several specific water extraction indices could be calculated. These indices relate to total water use and total runoff (total water supply) as well as water extraction from groundwater and groundwater recharge. Additionally, these specific water extraction indices were calculated for different years and periods, such as for the minimum decades of groundwater recharge. Important insights into the temporal and regional variability of water extraction indices can be gained from the simulation results and produced maps. Important conclusions regarding the regional sensitivity of water extraction indices can be incorporated into future detailed studies on possible adaptation measures to climate change.

The conducted simulations (1961 to 2020) and projections (until 2100), the prepared statistical databases on water extraction and use, and the developed scenarios for public and non-public water supply can also be analyzed together in the context of spatially differentiated stress tests. Stress tests provide important insights into the potential impact of climate change on future water supply and the associated possible quantitative limitations of water use. The stress test outlined in Chapter 2.3.14 specifically aimed to answer the question of which NUTS-3 regions could potentially see an increase in groundwater use indices above the thresholds of 0.2 or 0.4 during minimum decades of groundwater recharge in the future, thus indicating water scarcity or severe water scarcity. This development is strongly dependent on the change in actual irrigation demand in agriculture, which in turn depends on the growth of irrigated areas and increasing temperature and drought during the growing season (reflected by climate projections). In several regions of Germany, the growth of actually irrigated areas will need to be limited in the future to ensure public water supply from groundwater can be guaranteed even in the second half of the 21st century during periods of exceptionally dry decades without water scarcity occurring. This will frequently be the case in the NUTS-3 regions in the Upper Rhine Valley, western North Rhine-Westphalia, southeastern Lower Saxony, the central German dry area, as well as in Brandenburg and Mecklenburg-Western Pomerania.

As part of the WADKlim project, the influence of climate variability and change on the groundwater balance was identified and visualised as highly heterogeneous in terms of space and time. This is due to the regional superimposition of climatic conditions and changes with the highly diverse hydrogeological area characteristics across the country. The combination of this overlay with the actual extraction of groundwater for use in different sectors, which also varies greatly from region to region, allows conclusions to be drawn about the spatially varying nature of the challenges currently facing groundwater management. In order to illustrate the spatially varying

nature of the challenges as so-called water balance risk areas (WBRA) (Chapter 2.3.15), ten groundwater topics were defined on the basis of the simulation results and analyses. Examples of groundwater topics are the temporal changes in the filling level of underground water reservoirs, which have been proven by significance tests, or the groundwater extraction indices in the minimum decade of groundwater recharge in connection with threshold values for water scarcity. At the NUTS 3 level, points were assigned to the individual groundwater topics according to a predefined system. By displaying and adding up the points, the regions became visible as hotspots in which groundwater management is confronted with a climatological threat to groundwater extraction due to the changes in recent decades since the year 2000 and must therefore already adapt to changed framework conditions. The point totals can also be assigned to relative risk classes (low, moderate, high, very high). Furthermore, the system for identifying WBRA can be extended thematically (e.g. to include groundwater quality issues), is open to modelling and can be transferred to other climate-relevant issues.

Handling Water Use Conflicts

Authors: Vidaurre, R., Stein, U., Tröltzsch, J., Bueb, B., Schritt, H., Flörke, M., Uschan, T., Dworak, T.

Water-related usage conflicts (WUC) arise from an imbalance between water demand and water availability, affecting the availability, distribution, and use of water resources. Such conflicts have traditionally been associated with semi-arid to arid climatic conditions. However, in recent years, increasing heatwaves and droughts in Germany have also led to regional water scarcity and associated conflicts. The WADKlim project created a regional overview of the occurrence of WUC in Germany. A systematic media search was conducted for this purpose. National and particularly regional media allowed for a detailed analysis of affected stakeholders and the spatial allocation of WUC to the NUTS-2 and NUTS-3 geographical units.

A total of 358 WUC in Germany were compiled and analyzed from the period between 1950 and the end of 2022. In the years before 2015, isolated WUC were reported, except for the years 2003 and 2006, which were characterized by summer heatwaves. Since 2015, the number of reported WUC has increased significantly, particularly from 2018 to 2022, during which 47 to 117 WUC were reported nationwide (the years 2018 to 2020 and 2022 were characterized by high summer temperatures and drought). Although 2022 exhibits similar climatic conditions to 2018, the frequency of reported WUC is higher this year. It can be assumed that there has been a stronger media awareness of WUC in Germany since at least 2022.

The spatial distribution of WUC showed regional differentiation. Most WUC were reported in the northeast along the Polish border, from Upper Lusatia to the Uckermark, as well as in the Spree-wald, in central Germany, along the Lower Rhine, in the Rhine-Main area, and in the Black Forest. The main causes of WUC in 2022 were mainly inadequate quantities of surface water and groundwater (75%), impaired drinking water supply (11%), and infrastructure problems, distribution conflicts, and water price conflicts (3%). Inadequate water quality was reported in only 4% of cases. Private consumers were the most affected (34%), followed by ecosystems (31%), water supply companies, and agriculture (each 14%). Despite the dominance of water scarcity in surface waters as a conflict cause, the sectors of shipping and industry (e.g., cooling water use) were only involved in 6% of cases. Industry-related WUC occurred mainly along the Middle and Lower Rhine as well as in Brandenburg and Berlin. To avoid and reduce water use conflicts, a variety of measures exist. An **overview of measures to avoid and reduce water use conflicts** that could be meaningful in the German context was created in the project. The measures were identified through an analysis of scientific and gray literature. Priority was given to measures that are applicable in cases of reduced water availability. The "Reducing Water Use Conflicts"

measure catalog includes 62 measures, each described, and a set of descriptors and analytical categories evaluated for them.

Descriptors of the catalogue of measures "Reduction of water use conflicts"

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1. Impact on water quality, quantity and land requirements | 6. Possible conflicting objectives |
| 2. Level of implementation | 7. Type of measures |
| 3. Sectors involved | 8. Type of measure - reference period |
| 4. Main institution or actor responsible (organiser of measure) | 9. Time frame for implementation |
| 5. Institutions or actors to be involved | 10. Costs |
| | 11. Potential obstacles/challenges |

The catalogue is intended to serve both as a systematic list and as a decision-making aid for the selection of measures to prevent and reduce water use conflicts.

Based on the analysis of water use conflicts in Germany and the catalogue of measures "Reduction of water use conflicts", the project separately examined a number of instruments that are considered to be possible solutions for reducing or avoiding these conflicts. These are: (1) water supply concepts, (2) regional water advisory councils, (3) measures for water retention in the area and (4) approaches for prioritising water uses.

Water supply concepts (WSC) are also known as mission statements, master plans or future concepts for water supply, as well as concepts for adapting to climate change, and aim to secure the current and future water supply and promote the sustainable use of local water resources. In Germany, WSCs have been developed or updated to respond to the challenges of climate change, particularly dry years such as 2018. The development and implementation were often based on political decisions.

In WADKlim, 27 WSCs were analysed, 17 of them for federal states, 3 for administrative districts and 7 for rural districts and district-free cities. Some federal states, including North Rhine-Westphalia, Saarland, Saxony-Anhalt and Schleswig-Holstein, did not (yet) have a state-wide WAC until April 2023. In Bremen and Baden-Württemberg, WSCs are in the development phase; in Saarland, a WSC should be completed in the first quarter of 2023.

The assessment of water supply security in the WSC focusses on groundwater and is often carried out as a balance analysis, whereby the water supply is compared with the water demand. While future water supply is simulated using models in order to take into account the influence of climate change on future water supply, future water demand is derived using demographic trends and per capita water use. The future development of industrial water use proved to be difficult and is only taken into account in a few WSCs.

In order to secure the water supply in the long term and to establish sustainable water management, a wide range of measures are described in the WSC, which can be divided into four categories: *adapting infrastructure, increasing the available water supply, regulatory measures and closing of data gaps*. Examples of measures include the expansion of water supply networks (e.g. long-distance pipeline networks), the formation of supply networks, the reduction of land sealing, the promotion of rainwater infiltration, the expansion of drinking water priority areas, the creation of financial incentives and support for the implementation of measures as well as the closing of data gaps and the creation of an improved database. However, the measures in around two thirds of the WSC are general and rather vague in nature. Overall, the structure and content

of the WSCs analysed are very heterogeneous, which is due to the lack of a uniform national standard and an inhomogeneous data situation.

The Federal Water Resources Act defines public water supply as a task of general interest. It is prioritised over other water uses. Although the prioritisation of water use in the event of water shortages is an important aspect, the majority of the WSC do not contain any specific information on prioritisation. In WSCs that do make statements on prioritisation, public water supply is given the highest priority.

The various drought events in recent years show that increased dialogue between stakeholders from different sectors is necessary in order to address water management issues. Problems and causes are regionally and locally specific, and measures must be discussed and implemented jointly at the relevant level. **Water advisory councils** can serve to bring together representatives of water-relevant sectors and contribute to the avoidance of water use conflicts through an intersectoral exchange.

Water advisory councils were defined in the project as bodies that strengthen coordination between different water-using sectors. They serve the exchange and cooperation on regional water needs and can support the agreement of strategic goals or measures and recommend regional water allocations. It is assumed that this will support a balance between the interests of water-using sectors and ultimately avoid or minimise water use conflicts. Water advisory councils have an advisory function and support the decision-making processes of the water authorities. They are organised at local or regional level. These include water tables, water forums and water networks.

The analysis of water advisory councils was based on an examination of existing advisory councils and their organisational variants. Based on this, recommendations and proposals for the initiation of water advisory councils were developed, which were discussed in three regional case studies in stakeholder workshops with regard to their practical relevance. The sequence developed for the initiation of water advisory councils contains the basic prerequisite of the existence of an actor ("carer") who is primarily responsible for driving forward the initiation of the advisory council. The advisory board should jointly develop an understanding of existing or potential conflicts in the region, building on the various pieces of information and data from the different stakeholders. In a next step, the basic thematic and temporal orientation and the main tasks of the committee should be defined. The relevant stakeholders, a possible formalisation and suitable exchange formats are also discussed and defined.

The case studies carried out have shown that many regions already have exchange committees that (co-)cover water issues, i.e. new advisory boards would have to build on existing structures or complement them in a meaningful way. During the discussions, it became clear that an exchange on various water management issues of cross-sectoral relevance is desired. It is important to precisely define the areas of responsibility of the advisory board in advance. Due to the recurring challenges associated with a reduced water supply, the establishment of a permanent committee is recommended. In addition, ad-hoc consultations should be made possible. Various other tasks of a water advisory board were discussed, including creating a knowledge base and understanding for balancing different interests and tasks - both aspects are key to success.

In the case of project-based formats, work should be done at an early stage to ensure continuity so that there is a perspective for long-term cooperation. A mentor for the process was categorised as central. The benefits of an external moderator were also mentioned. The need for sufficient financial resources, e.g. via the budget or start-up funding, to organise the advisory board

was mentioned. Recognising participation in exchange committees was also mentioned as a challenge.

Additionally, in WADKlim, a **catalog of measures** titled "**Water Retention in the Landscape**" was created, providing a simplified analysis of the effects and costs of measures for retaining water in the landscape. A variety of different measures are generally suitable for improving landscape water balance or enhancing the resilience of land ecosystems to extreme events such as droughts and floods. The developed catalog of measures aims to provide stakeholders with a decision-making basis for implementing water retention measures in the area. The authors understand measures for water retention to include landscape design and soil protection measures, as well as technical measures that enhance water storage and retention capacity in the landscape to increase water availability during dry periods.

The developed catalog encompasses 69 measures to increase water retention in the landscape and their effects on water balance and other protection goals. The evaluation shows that most measures have positive or very positive effects on various objectives for local water balance, such as delaying runoff, retaining water in soils, groundwater recharge, or water availability in dry periods. The measures also have positive or very positive effects on other protection goals, such as climate protection, biodiversity, soil, and water quality. Ninety percent of measures for water retention aimed at flood protection also show positive effects on other protection goals.

Six particularly recommended measures were identified, showing a positive effect on both flood protection and water availability in dry periods, low costs for construction and planning, transactions, and land provision, and short-term effects.

Especially recommended measures for water retention in the landscape

- ▶ Reactivation of inland catchment areas (agriculture, nature-based solution)
- ▶ Construction of sediment retention ponds (forestry, nature-based solution)
- ▶ Adapted selection of crops and crop rotation for better water retention (agriculture, management)
- ▶ Cultivation of areas parallel to the slope (agriculture, management)
- ▶ Establishment of buffer strips/field margin strips (agriculture and water management, nature-based solution)
- ▶ Closure, dismantling, or control of drains or drainage ditches (water management and agriculture, management)

The catalog can serve as a systematic overview and decision-making aid for the selection and implementation of measures to increase water retention in the landscape. It can also be used as a basis for further research and modeling work to examine the spatial dimension and cumulative effects of the measures.

The fourth, more deeply examined solution approach relates to **rules for decision-making and prioritization of uses** in water-related usage conflicts. Initial conceptual contributions should be developed for the nationally coordinated guideline announced in the National Water Strategy, which is intended to create a uniform framework for prioritization decisions to be made locally or regionally.

A search for globally existing prioritization approaches showed, for example, that prioritizations of uses have been established in 15 of the 27 EU member states (as of the first half of 2023). There are significant differences in the number of prioritized uses: In Germany, only a single use

(drinking water supply) is prioritized above all others. In other EU member states, four to five uses are often defined in a prioritization sequence. There are also examples with up to nine uses. Moreover, the analysis shows that use prioritizations are defined on two temporal levels. On the one hand, prioritization occurs in the event of a drought (usually over a period of several weeks or months), and on the other hand, long-term prioritization as part of strategic planning (including prioritization in the granting of new water rights or the subsequent adjustment of existing water rights). In some of the analyzed countries, the same sequence applies to prioritizations in the event of a drought and long-term prioritization, while in others, the two temporal levels are handled separately and prioritized according to different logics.

International examples of both prioritization types show differentiated and differently structured implementations of the subsidiarity principle, which may be of interest to Germany. Several European member states follow the approach of establishing a nationally prescribed prioritization framework, which provides framework conditions for regional deliberations. At the regional level (or at the level of river basins), the respective implementation authorities (such as the provinces) decide within the given framework which uses are a priority in their region. Prioritization often occurs based on economic criteria, such as prioritizing the most important economic sectors in the region. There are also interesting examples of requirements for different prioritization of the same use depending on whether irreversible damage is expected from the drought (e.g., for ecosystems) or whether supply security is at stake (drinking water and energy supply).

Furthermore, in the concrete planning of measures for the event of a drought, which is usually the responsibility of local authorities, the subsidiarity principle is applied. In some countries, local implementation authorities receive guidance from the regional level with principles and conditions, which define, for example, the minimum measures for water consumption restrictions in the event of a drought and apply to the entire region. Local implementation authorities have leeway in developing specific measures and may also implement stricter measures. Moreover, local authorities can determine which actors within a usage class should be prioritized (e.g., irrigation of perennial crops before annual crops in agriculture). However, this locally specific leeway can also lead to significant problems regarding the transparency of decision-making.

However, the implementation of prioritization of water uses in Germany would face significant challenges. Lack of data on water rights and actual water withdrawals is a significant obstacle. Additionally, controlling illegal water use is crucial. The analyses of drought management approaches in Europe also indicate the need for improved control systems, increased monitoring of withdrawal volumes, and the reduction of pressures on water bodies due to withdrawals.

Guidelines for Water Reuse for Irrigation in Urban Areas

Authors: Barjenbruch, M., Guggenberger, T., Schritt, H.

Water reuse is the utilization of water derived from treated wastewater that possesses the appropriate quality for its intended use (taking into account health and environmental risks and local and EU legislation). Water reuse is suitable for purposes where drinking water quality is not required. Within the WADKlim project, the potential of water reuse for irrigation in urban areas in Germany was examined, and technical conditions and risk-reducing measures for safe handling of treated water were identified. Urban green spaces such as sports fields, cemeteries, parks, golf courses, allotment gardens, roadside greenery, and street trees were considered.

Since there are no reliable statistical data nationwide on urban green spaces, the areas were determined and averaged using five different approaches. Similarly, there is no information available on the vegetation and actual irrigation requirements. Therefore, the irrigation requirement was calculated based on the climatic water balance for dry and normal years as well as very dry years (period 1991-2020) assuming grass cover. This results in a theoretical irrigation requirement for urban greenery of 414.62 million m³ in normal years, 719.19 million m³ in dry years, and 1,358.89 million m³ in very dry years. The total wastewater volume in all German cities was calculated to be 7.040 billion m³/year, which corresponds to 78% of the total German wastewater volume of 9.05 billion m³/year (DESTATIS, 2021). Thus, in medium and large cities, the determined irrigation requirement could be covered with the following proportions of annual wastewater volume: approximately 5% of the annual wastewater volume in normal years, about 9% in dry years, and about 15% in very dry years. In small towns, 5% is needed in normal years, 10% in dry years, and even 19% of the annual wastewater volume in very dry years.

By means of a best-practice overview of existing water reuse systems for urban irrigation, technical solutions were compiled and evaluated as a guide for implementation. In addition, a risk management approach was developed involving stakeholders to adequately assess potential hazards. Based on this, recommendations for policy makers and decision-makers regarding water reuse in urban areas were developed.

Global best-practice studies on water reuse for the irrigation of urban green spaces, which have been conducted for decades, have shown that municipal wastewater treatment through a three-stage purification process including comprehensive nitrification/denitrification followed by sand or cloth filtration and disinfection is often used to meet existing international quality requirements for urban water reuse.

The necessary treatment process should always be planned based on knowledge of wastewater composition and the planned location and purpose of use, as well as the associated environmental and health risks. Although additional treatment through filtration and disinfection is sufficient in many cases, successful and safe water reuse may require further technologies after individual site planning.

To support decision-makers in their decision-making process for the implementation of a potential water reuse project, an assessment matrix was created within this project with four main categories. This considers the irrigation requirement, wastewater-related conditions (origin of wastewater, treatment technology), specifications of urban greenery (land use, access permissions, irrigation system), and infrastructural connection.

Subsequently, a risk management approach for water reuse for irrigation of urban green spaces was developed. The risk management with the essential core elements of the EU Regulation on agricultural water reuse (EU Regulation 2020/741) served as a basis, with non-transferable requirements adjusted for irrigation in urban areas or additional requirements developed for urban areas.

Theoretically, treated water can represent a suitable and quantitatively sufficient resource for urban irrigation in Germany. However, reliable data on green areas and their actual irrigation requirements, as well as a more comprehensive risk assessment, are still lacking for a concrete estimation of the potential. Additional treatment consisting of at least filtration and disinfection is required. Health risks, potential impacts on minimum discharge, soil, and groundwater must be considered within site-specific risk management plans. Another challenge is the distribution of water, for which a choice must be made between building a distribution network or transporting it by truck. Considering the expected costs and the current lack of legal framework, the

implementation of water reuse for urban areas is likely to be realized only with sufficient irrigation demand/pressure and partnership collaboration between wastewater disposers and the corresponding operators of green spaces.

Policy Recommendations

In Chapter 5 of the final report, recommendations are made concerning the management of current and future water availability and usage as well as water-related usage conflicts in Germany, including a list of exemplary approaches to mitigating water scarcity and drought. Each subchapter first summarizes the findings from the WADKlim project, the associated challenges, and finally identifies further research needs.

1 Einleitung

Der Klimawandel und seine Folgen sind bereits jetzt in Deutschland spürbar und lassen sich durch die Beobachtungen vieler Institutionen eindeutig belegen. Die Klimavariabilität und der Klimawandel haben einen direkten Einfluss auf den Wasserhaushalt. Steigende Temperaturen, die daraus resultierende potenzielle Verdunstung und ein verändertes Niederschlagsregime und damit verbundene Extreme wirken sich direkt auf das gesamte Wasserdargebot und die Grundwasserverfügbarkeit aus. Mit dem voranschreitenden Klimawandel wird sich das erneuerbare und nutzbare Wasserdargebot in Deutschland zunehmend verändern.

Die Jahre 2018 bis 2020 sowie das Jahr 2022 gehören zu den fünf wärmsten Jahren seit Beginn der flächendeckenden Wetteraufzeichnung im Jahr 1881 (Imbery et al., 2023) und waren durch Trockenheit geprägt. Langanhaltende Trockenperioden haben zu ausgeprägten Niedrigwasserständen in Flüssen geführt. Bereits ohne die Daten aus den Jahren 2018 und 2019 beschreibt der Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel einen signifikanten Trend in der Zunahme von Niedrigwassertagen im Sommer (Umweltbundesamt, 2019). Das Grundwasser reagiert deutlich zeitverzögert auf ein sich veränderndes Niederschlags- und Temperaturregime. Die Kombination aus geringerer Grundwasserneubildung (GWNB) und intensiver Grundwassernutzung hat in vielen Regionen zu fallenden Grundwasserspiegeln geführt.

Dabei können sinkende Grundwasserspiegel und länger anhaltende Niedrigwasserperioden bei gleichbleibender oder steigender Wassergewinnung Nutzungskonflikte zwischen der Versorgung von Haushalten, Industrie, Landwirtschaft und aquatischen Ökosystemen hervorrufen oder bereits bestehende Nutzungskonflikte verschärfen. Solche wasserbezogenen Nutzungskonflikte (WNK) betreffen sowohl die Verfügbarkeit als auch die Verteilung und Verwendung von Wasserressourcen. Insbesondere in urbanen Räumen ist das Bewusstsein gewachsen, dass in trockenen Sommermonaten Wasser knapp werden kann und deshalb ein effektiver Wassereinsatz und die Wasserwiederverwendung Ziele der urbanen Transformation sein müssen.

Bisher werden WNK vorwiegend aus Regionen mit semiaridem bis aridem Klima berichtet, wie bspw. aus der Provinz Almería (Spanien), in der eine auf Gewächshäusern basierende intensive Landwirtschaft zu einer Übernutzung des Grundwassers führt (Luis Caparrós-Martínez et al., 2020). Die Auswirkungen des Klimawandels durch vermehrt auftretende Hitzewellen und Dürren führen jedoch auch in Deutschland zu Niedrigwasserständen, regionaler Wasserknappheit und somit zu WNK (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2020). Je nach Ausprägung werden die WNK in der Bevölkerung unterschiedlich stark wahrgenommen. Es ist jedoch erkennbar, dass das Interesse der Öffentlichkeit und der Medien an WNK in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat.

Die zunehmende Anzahl von WNK verdeutlicht die Notwendigkeit die heutige Situation und die zu erwartenden Entwicklungen der Wasserverfügbarkeit in den nächsten Jahren detaillierter zu analysieren. Um die relevanten Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen und damit zusammenhängende zukünftige ökologische, wirtschaftliche und soziale Schäden zu mindern, müssen verstärkt Anpassungsmaßnahmen „nachgesteuert“ und neue Handlungsoptionen überprüft werden. In diesem Zusammenhang ist die zukünftige Entwicklung des Wasserdargebots auf regionaler Ebene von bedeutender Rolle. Es besteht die Notwendigkeit, Handlungsoptionen auf verschiedenen Ebenen zu analysieren, um mit potenziellen Wassernutzungskonflikten in Deutschland umzugehen und diese zu vermeiden.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) zusammen mit dem Umweltbundesamt (UBA) das Projekt „Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit / Anpassung an Trockenheit und

Dürre in Deutschland“ (WADKlim) initiiert. Im Vorhaben sollten die Auswirkungen von Trockenheit und Dürre auf die Wasserverfügbarkeit, den Bodenwasserhaushalt und das Grundwasser in Deutschland untersucht und mögliche Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen für die Wasserbewirtschaftung entwickelt werden. Damit liefert WADKlim einen Beitrag für die in der *Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel* und in der *Nationalen Wasserstrategie* formulierten Zielstellungen.

WADKlim in Kürze

Das Umweltbundesamt (UBA)-Projekt „Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit – Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland“ (WADKlim) erforscht die Auswirkungen von Trockenheit und Dürre auf Flüsse und Seen, das Wasserdargebot, den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserverfügbarkeit in Deutschland. Das Projekt schafft einen **Überblick über die gegenwärtige Wasserverfügbarkeit in Deutschland**, sowie deren **zukünftigen Entwicklung** unter Klimawandelbedingungen. Weiterhin analysiert das Vorhaben aktuelle und zukünftige **Wassernutzungskonflikte in Deutschland** und entwickelt **Lösungsstrategien und Maßnahmen**, die zum vorausschauenden Umgang und zur Vermeidung von Nutzungskonflikten beitragen können. Zudem werden die Möglichkeiten, Chancen und Risiken der **Wasserwiederverwendung zur Bewässerung im urbanen Raum** dargestellt und bewertet.

In diesem Abschlussbericht werden die Ergebnisse des WADKlim Vorhabens beschrieben. **Kapitel 2** stellt die bundesweite Analyse der heutigen und zukünftigen Wasserverfügbarkeit in Deutschland dar. In **Kapitel 3** wird ein Überblick zu möglichen Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten aufbereitet (Kap. 3.2). Darüber hinaus werden einzelne Instrumente im Detail näher untersucht: Wasserversorgungskonzepte (Kap. 3.3), Wasserbeiräte (Kap. 3.4) sowie Wasserrückhalt in der Fläche (Kap. 3.5). In **Kapitel 4** sind Ergebnisse zur Analyse des Potenzials der Wasserwiederverwendung in deutschen Städten und der Entwicklung eines Risikomanagementansatzes für Wasserwiederverwendung im urbanen Raum enthalten. Weiterhin werden in **Kapitel 5** die im Projekt entwickelten Handlungsempfehlungen für alle abgedeckten Themen erläutert.

2 Aktuelle und zukünftige Entwicklungen des Wasserdargebotes und der Grundwasserverfügbarkeit

Autor*innen: Hermann, F., Flörke, M., Uschan, T., McNamara, I., Kollet, S., Wagner, N.,

In den vergangenen beiden Dekaden ist in der Bundesrepublik Deutschland eine sehr große Anzahl an Studien zum Einfluss des Klimawandels auf die aktuelle und zukünftige Entwicklung des terrestrischen Wasserhaushalts durchgeführt worden. Zur Vorbereitung auf die anstehenden Arbeiten in WADKlim, insbesondere zur Bewertung der Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit unter dem Aspekt der Anpassung an Trockenheit und Dürre, wurde eine Übersichtsarbeit durchgeführt. Hierfür wurden thematisch passende Berichte, wissenschaftliche Artikel und sonstige Beiträge (nachfolgend als Studien bezeichnet) der Jahre 1995 bis 2023 recherchiert, katalogisiert und kategorisiert.

Da die Ergebnisse der Studien nicht immer ohne entsprechendes fachspezifisches Hintergrundwissen konsistent vergleichbar sind – weil bspw. das Wasserdargebot auf Basis unterschiedlicher Modellansätze bestimmt oder das Untersuchungsgebiet unterschiedlich gewählt wurde – ist eine statistische Auswertung der erfassten Studien nicht realisierbar. Aus diesem Grund werden mit der Übersichtsarbeit die wesentlichen Aussagen zu den genutzten Methodiken, Modellen, Eingangsdaten und Ergebnissen beschrieben und zur Verfügung gestellt. Zur Abfrage detaillierter quantitativer Werte muss die jeweilige Studie herangezogen und eine eigenständige Bewertung und Einordnung der Ergebnisse durchgeführt werden. Die Übersicht der Studien liegt diesem Bericht als digitaler Anhang bei¹. Die Übersicht enthält darüber hinaus die bibliografischen Informationen zu den Studien. Angesichts der Vielzahl an Studien zur Entwicklung des Wasserhaushaltes in Deutschland hat diese Übersichtsarbeit keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie dient vielmehr der Möglichkeit zur Erweiterung durch weitere Nutzende.

Zur Bewertung der aktuellen und zukünftigen Entwicklung des Wasserdargebotes und der Grundwasserverfügbarkeit kommt in WADKlim eine flächendeckend einheitliche Modellierungs- und Analysemethodik zum Einsatz, durch die weitere Erkenntnisse über die Auswirkungen des Klimawandels auf den terrestrischen Wasserhaushalt gewonnen werden können. Aktuelle und mögliche zukünftige Herausforderungen für die Wasserwirtschaft aufgrund von Klimawandel und soziökonomischer Entwicklungen werden durch sektorübergreifende Analysen und Bestimmung wasserwirtschaftlich relevanter Größen herausgearbeitet. Inhaltlich umfasst das Kapitel 2 den Überblick zur Studienlage in Deutschland zum Thema Wasserdargebot (Kapitel 2.1) und zum Thema Bodenwasser und Grundwasserverfügbarkeit (Kapitel 2.2). Eine Beschreibung der verwendeten Modelle und statistischen Analysemethoden, Beschreibungen zu den Datenbeständen, die für Status-quo-Betrachtungen und die Entwicklung von Szenarien relevant sind, exemplarische Ergebnisse aus den Modellen für Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, die Skizze eines Stresstests mit Bezug zum Grundwasserdargebot sowie ein Konzept zur Darstellung von sogenannten Wasser-Bilanz-Risiko-Gebieten werden umfassend in Kapitel 2.3 ausgeführt.

¹ Der Anhang ist unter folgendem Link abrufbar: www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/extremereignisse/niedrigwassertrockenheit.

2.1 Überblick über die Studienlage zur Entwicklung des Wasserdargebotes in Deutschland

Autor*innen: Uschan, T., Flörke, M.

Die Ergebnisse der betrachteten Studien beruhen überwiegend auf Modellsimulationen. Zu den am häufigsten eingesetzten Modellen zählen hierbei u. a. ArcEGMO, verschiedene Varianten von GROWA, HBV, LARSIM, RhineFlow und SWIM. Einige der Studien sind aber auch rein messdatenbasiert (z. B. Fangmann et al., 2013; Werner et al., 2008), bzw. stellen Diskussionen des Standes der Wissenschaft dar (z. B. Merz et al., 2012). In den Studien werden verschiedene räumliche Ebenen betrachtet, die wie folgt zusammengefasst werden können:

Europäische Ebene: Meist Ergebnisse von durch die Europäische Kommission geförderten Projekten, die von großen Forschungsverbänden durchgeführt werden. Aufgrund des großen Stellenwerts der Ressource Wasser sowie der Ländergrenzen überschreitenden Eigenschaft gibt es hierzu eine Vielzahl an Studien, die mit unterschiedlichsten Methoden und Modellen die zukünftige Wasserverfügbarkeit in Europa untersuchen (z. B. Dezi et al., 2018; Feyen et al., 2020; Hagemann & Jacob, 2007; Liu et al., 2018; Sordo-Ward et al., 2019). Eine neuere Studie von Rakovec et al. (2022) analysierte bspw. Dürreereignisse der letzten 250 Jahre in Europa. Dabei wurde die Dürre von 2018 bis 2020 als neuer Benchmark hinsichtlich des Ausmaßes und der Intensität identifiziert.

Diese großräumig angelegten modellbasierten Studien bewerten die Auswirkungen des Klimawandels auf der Ebene großflächiger (regionaler) Muster. Angetrieben von langen Zeitreihen historischer meteorologischer Daten sowie Projektionen in die (ferne) Zukunft treffen die Studien Aussagen, die Veränderungen in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft darlegen. Mit ihnen lassen sich auch zukünftige Entwicklungen des Wasserdargebotes in Deutschland, in der Regel für die großen Flusseinzugsgebiete, abschätzen. Auf kleinräumiger Skala können konkrete Aussagen zum Wasserdargebot in Deutschland jedoch nicht getroffen werden.

Bundesebene: Häufig vom Bund geförderte und von Forschungsverbänden durchgeführte Projekte, wie z. B. in Hattermann et al. (2015) sowie in Huang et al. (2015). Im Mittelpunkt dieser Studien steht meist eine grundlegende Methoden- und Modellentwicklung zur generellen Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme. Hierfür wird u. a. das Modell SWIM eingesetzt, mit dem bspw. in Huang et al. (2010) verschiedene Szenarien zur Abschätzung zukünftiger Änderungen der Abflüsse in Donau, Elbe, Ems, Rhein und Weser berechnet wurden. Aber auch messdatengetriebene Methoden werden genutzt, um die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft darzustellen zu können (u.a. in Umweltbundesamt, 2019). Eine weitere Methodik, die beobachtungs-basierte räumliche und zeitliche Informationen zum Zustand der Wasserspeicherung liefert, ist die Satellitengravimetrie. Auf Basis der Satellitengravimetrie können Speichervariationen über alle Speicherkomponenten des Wasserkreislaufes erfasst werden (z. B. Güntner et al., 2023).

In Hirschfeld (2015) wird darüber hinaus ein regionalisierter Überblick über die natürlichen Wasserflüsse wie Niederschlag und Verdunstung sowie den verschiedenen Nutzungsansprüchen von Industrie, Haushalten u. a. gegeben, um die Größenordnung der Wasserflüsse in Deutschland begreifbar zu machen. In Form einer Nutzungsbilanz werden diese anschließend ins Verhältnis gesetzt. Auf dieser Grundlage können Regionen identifiziert werden, in denen mehr Wasser genutzt wird, als vor Ort verfügbar ist.

Eine umfassende Literaturrecherche zum Thema Niedrigwasser und Dürre, insbesondere zu deren Ausmaßen, Ursachen und Auswirkungen auf den Wasserhaushalt wurde im Rahmen des

vom Umweltbundesamt beauftragten Projektes „Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien“ durchgeführt (Riedel et al., 2021). Die Autoren verschaffen mit dieser Studie einen umfassenden Überblick über das räumliche und zeitliche Auftreten von Dürreereignissen in Deutschland. Die Ergebnisse werden auf verschiedenen Skalen präsentiert. Neben einer historischen Betrachtung werden auch zukünftige Entwicklungen von Trockenheit und Dürre sowie die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und auf verschiedene Sektoren vorgestellt.

Für eine weitere ausführliche Zusammenstellung von Ergebnissen ausgesuchter Studien der Jahre 2009 bis 2013 zum Thema Folgen des Klimawandels auf die terrestrischen Ökosysteme sei an dieser Stelle auch auf die Übersichtsarbeit in Bender et al. (2017) verwiesen. In dieser werden deutschlandweit 29 Studien analysiert, die auf verschiedenen räumlichen Ebenen erstellt worden sind.

Länderebene: Diese Studien wurden meist von Ministerien und Behörden der Bundesländer in Auftrag gegeben, wie z. B. KLIWA in den süddeutschen Bundesländern oder KliBiW in Niedersachsen. Ziel vieler dieser Studien ist die Ermittlung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Ökologie von Flussgebieten, meist auf Basis von Modellergebnissen. Häufig werden die Modelle mGROWA (u.a. Herrmann, et al., 2013) und ArcEGMO (z. B. Schwarze et al., 2014) genutzt. In einigen Studien werden gemessene Abflusszeitreihen genutzt, um das Langzeitverhalten von mittleren und saisonalen Abflüssen zu untersuchen und Hochwasserabflüsse in den letzten einhundert Jahren auswerten zu können (u.a. Arbeitskreis KLIWA, 2003).

Regionale Ebene und Einzugsgebiete: Neben den bereits genannten Akteuren sind auch Landwirtschaftskammern, Wasserverbände und weitere Institutionen an Studien zum Einfluss von Klimaänderungen auf die lokale Wasserverfügbarkeit beteiligt, wie z. B. bei KLIMZUG-Nord für die Lüneburger Heide (Urban et al., 2014). Die oben für höhere Aggregationsebenen beschriebenen Studien sind häufig nicht hinreichend räumlich ausdifferenziert, sodass eine Übertragung der Ergebnisse auf die regionale Ebene nicht immer direkt erfolgen kann. Deshalb werden die Methoden und Modelle, die auf europäischer, Bundes- und Länderebene Anwendung finden, für die regionale Ebene teilweise direkt übernommen, jedoch in ihrer räumlichen Auflösung angepasst und/oder modifiziert, um verschiedene Einzugsgebiete und Regionen analysieren zu können. In den Studien auf regionaler Ebene kamen mehr als 15 verschiedene hydrologische Modelle zum Einsatz, u. a. HBV und COSERO in Nilson et al. (2014), mHM in Zink et al. (2017), NASIM in Pyka et al. (2016) und RhineFlow in Lenderink et al. (2007).

2.1.1 Struktureller Überblick über die Studien

In einem überwiegenden Anteil der Studien wurden Zukunftsprojektionen auf Basis von Modellen betrachtet, welche an Daten aus der Vergangenheit kalibriert wurden. Die Zukunftsprojektionen reichen vorwiegend bis zum Ende, teilweise auch nur bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts. Bei einigen wenigen älteren Studien liegt der Betrachtungshorizont zum Zeitpunkt der Recherche bereits in der Vergangenheit und endet im Jahr 2000 oder 2010 (z. B. Bogena et al., 2003). Studien mit besonders langem Betrachtungshorizont sind bspw. Erfurt et al. (2019) (Analyse von Dürreereignissen vom frühen 19. Jahrhundert bis 2018) sowie Schönwiese & Janoschitz (2008) und Trauth & Haupt (2022) (Analyse hydrologischer Daten aus dem letzten Jahrhundert).

In den Studien werden verschiedene globale und darauf basierende regionalisierte Klimamodelle verwendet, die bspw. auf dem statistischen Ansatz WETTREG und dem dynamischen An-

satz REMO basieren (Scherzer et al., 2010). Als Emissionsszenarien werden in den Studien sowohl SRES- (Special Report on Emissions Scenarios) als auch RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway) genutzt². Die älteren SRES-Emissionsszenarien finden sich u. a. in Bronstert et al. (2007) (Nutzung der Szenario-Familie B2), die neueren RCP- Emissionsszenarien bspw. in Hübener et al. (2017) (RCP2.6 und RCP8.5). Durch eine Kombination verschiedener Emissionsszenarien und Klimamodelle wird der Bandbreite von Unsicherheiten des zukünftigen Klimawandels Rechnung getragen.

Bei einem großen Teil der Studien sind keine genauen Angaben zur zeitlichen und räumlichen Auflösung der genutzten Modelle vorhanden. Sind diese Angaben vorhanden, beträgt die zeitliche Auflösung meistens einen Tag, bei einigen Modellen auch eine Stunde bzw. einen Monat. Die räumliche Auflösung ist sehr heterogen und reicht von 100 m (Herrmann, et al., 2013) bis hin zu Teileinzugsgebieten (Nilson et al., 2014) und darüber hinaus.

In den Studien wird primär die Ebene der Einzugsgebiete und der Bundesländer betrachtet. Studien, in denen flächendeckend das gesamte Bundesgebiet untersucht wird, sind selten. Häufig liegt der Fokus auf einer Betrachtung der fünf großen Flusseinzugsgebiete Donau, Elbe, Ems, Rhein und Weser, die etwa 90 % der Fläche Deutschlands abdecken (u.a. in Huang et al., 2010, 2015). Werden Teileinzugsgebiete untersucht, sind diese meist Teile dieser fünf Einzugsgebiete. Studien auf Ebene der Bundesländer sind vorwiegend für Bayern, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen (NRW) und Niedersachsen vorhanden. Für die ostdeutschen Bundesländer sind bisher nur wenige Studien in der Übersichtsarbeit vorhanden, bspw. Schwarze et al. (2014) für Sachsen und Krause & Hanisch (2009) für Thüringen.

2.1.2 Zusammenfassung

Insgesamt lässt sich aus den Ergebnissen der in WADKlim erfassten Studien festhalten, dass ein signifikanter Trend der Abnahme oder Zunahme des Abflusses bezogen auf das komplette Jahr nicht erkennbar ist. Bei der getrennten Betrachtung des Winter- und Sommerhalbjahres werden jedoch Trends ersichtlich: Seit den 1960er Jahren zeigt sich für das hydrologische Winterhalbjahr von Anfang November bis Ende April ein leichter Rückgang des mittleren Abflusses (statistisch nicht signifikanter Trend). Im hydrologischen Sommerhalbjahr – Anfang Mai bis Ende Oktober – lässt sich hingegen seit diesem Zeitpunkt ein signifikant abnehmender Trend des Abflusses beobachten.

Übereinstimmend findet sich in der Literatur, dass für das hydrologische Sommerhalbjahr in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts bereits ein abnehmender Trend des mittleren Abflusses zu beobachten ist. Dieser Trend nimmt für die zweite Hälfte des Jahrhunderts deutlich zu und fällt unter den verschiedenen Klimaszenarien unterschiedlich deutlich aus, ist jedoch immer vorhanden. Für das hydrologische Winterhalbjahr wird in naher Zukunft eine Zunahme des Abflusses erwartet, welche in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts stärker ausfallen kann.

Darüber hinaus wird anhand der Studien deutlich, dass es in der Vergangenheit immer wieder einzelne Jahre mit einer extremen Häufung von Niedrigwassertagen gegeben hat. In den zurückliegenden 30 Jahren traten solche Häufungen vor allem in den Jahren 1971 – 1974, 1991, 1996, 2003, 2015 und 2018 – 2020 auf. Hiervon waren vor allem die Flussgebiete Rhein, Elbe und Weser betroffen sowie weniger stark ausgeprägt auch die Donau. In den Flussgebietseinheiten von

² Die 2001 veröffentlichten SRES-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios) wurden aufgrund neuerer Erkenntnisse und einer verbesserten Vergleichbarkeit durch die RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) im 5. IPCC-Bericht (AR5) abgelöst. Es gibt vier RCP-Szenarien, die sich hinsichtlich des Strahlungsantriebes zum Ende des 21. Jahrhunderts unterscheiden (s. Tabelle 1). Im neu veröffentlichten 6. IPCC-Bericht (AR6) werden weiterentwickelte Klimamodelle und aktualisierte Emissionspfade genutzt, die aus einer Kombination von RCPs und Shared Socioeconomic Pathways (SSP) bestehen. Eine Übersicht über die aktualisierten Emissionspfade (SSP-RCP) kann O'Neill et al. (2016) entnommen werden.

Eider/Schlei, Schlei/Trave und Warnow/Peene wiesen die Wasserhaushaltsjahre 1996 und 2008 eine hohe Anzahl an Niedrigwassertagen auf. In den Projektionen verschiebt sich der Zeitpunkt der im Sommerhalbjahr einsetzenden Trockenheit immer früher ins Jahr. Im Verhältnis zu den Niedrigwassertagen im Winter nehmen diese im Sommer somit deutlich zu.

Zum Ende des 21. Jahrhunderts wird Niedrigwasser nicht nur in den Flüssen Rhein und Donau häufiger auftreten, sondern auch großräumig im Westen, Süden und in Teilbereichen des Zentrums von Deutschland. Flüsse, die ihren Ursprung in den österreichischen Alpen haben, werden ebenfalls Niedrigwassersituationen aufweisen, wenn auch weniger stark ausgeprägte. Vom Sommer bis zum späten Herbst wird es aber voraussichtlich in vielen Teilen Deutschlands anhaltende Niedrigwassersituationen geben.

Güntner et al. (2023) kommen in einer aktuellen Auswertung von Daten der Satellitengravimetrie zu dem Schluss, dass die Gesamtwasserspeicherung in Deutschland in den letzten 20 Jahren zurückgegangen ist. Der Rückgang beträgt auf Basis des dort verwendeten Datensatzes (COST-G) 0,76 km³ pro Jahr bzw. summiert über die letzten 20 Jahre 15,2 km³.

2.1.3 Fazit

In der Summe existiert eine Vielzahl von Quellen zum regionalen und lokalen Wasserdargebot sowie zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt, die mit sehr viel Fachkenntnis und Regionalwissen zum Wasserhaushalt durchgeführt wurden. Sie haben jedoch aufgrund ihrer Skala nur eine beschränkte Aussagekraft für zukünftige Entwicklungen für das gesamte Bundesgebiet. Ein direkter Vergleich der Studien ist darüber hinaus aufgrund von Inkonsistenzen hinsichtlich der verwendeten Inputdaten, Methoden, Modelle und Szenarien nicht möglich.

2.2 Überblick über die Studienlage zur Entwicklung des Bodenwasserhaushaltes und der Grundwasserverfügbarkeit in Deutschland

Autor*innen: Uschan, T., Flörke, M.

Im vorliegenden Kapitel wird der Fokus auf Studien zur Bestimmung und Bewertung der (zukünftigen) Entwicklung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserverfügbarkeit gesetzt. Die Grundwasserverfügbarkeit ist insbesondere für die öffentliche Wasserversorgung relevant, da diese das Rohwasser zur Trinkwassergewinnung deutschlandweit zu etwa 70 % aus Grund- und Quellwasser entnimmt (Statistisches Bundesamt, 2022d).

Der Bodenwasserhaushalt, bzw. der Bodenfeuchtezustand kann in Deutschland seit 2014 mit dem am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) entwickeltem Dürremonitor Deutschland abgebildet werden (Zink et al., 2016). Dieser liefert täglich flächendeckende Informationen zum Bodenfeuchtezustand auf Grundlage von Daten des Deutschen Wetterdiensts (DWD) und des am UFZ entwickelten hydrologischen Modells mHM (s. Samaniego et al., 2010). Durch Vergleich mit langjährigen Erwartungswerten wird darauf aufbauend der Bodenfeuchteindex abgeleitet. Die Informationen zum Dürrezustand des Gesamt- und des Oberbodens sowie zum pflanzenverfügbaren Wasser stehen in Form von Karten zur Verfügung³.

Auch der DWD stellt Informationen zur Bodenfeuchte und zu anderen Wasserhaushaltsgrößen in Form des Bodenfeuchteviewers⁴ zur Verfügung. Der DWD berechnet täglich die Bodenfeuchte

³ www.ufz.de/duerremonitor

⁴ www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/appl/bf_view/_node.html

unter den drei Kulturen Gras, Mais und Winterweizen in 10 cm Schichten bis in 2 m Tiefe. Basis ist das Wasserhaushaltsmodell AMBAV 2.0 (s. Herbst et al., 2021). Die Bodenfeuchte wird interaktiv und bis zu einem Jahr rückwirkend dargestellt. Für jeden Kartenpunkt kann darüber hinaus ein 30 Tage zurück in die Vergangenheit reichendes Bodenfeuchteprofil erzeugt werden.

In WADKlim wird im Gegensatz zu dem am UFZ und beim DWD betriebenen Bodenfeuchtemonitoring stärker auf die Grundwasserneubildung als auf den Bodenfeuchtezustand fokussiert. Daher werden im Nachfolgenden Auszüge der grundlegenden Erkenntnisse aus der Übersichtsarbeit zum Thema Grundwasserneubildung und Grundwasserverfügbarkeit dargestellt.

Zur Abschätzung der Grundwasserneubildung werden in Deutschland viele verschiedene Verfahren genutzt (s. Climate Service Center Germany, 2012). Häufig handelt es sich dabei um modellbasierte Verfahren. Bei den erfassten Studien werden u. a. die Modelle ArcEGMO, DANUBIA, GROWA und mGROWA sowie GWN-BW eingesetzt. Es existieren auch erste Studien, die Machine-Learning-Algorithmen nutzen, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserressourcen aufzuzeigen (z. B. Wunsch et al., 2021). Die erfassten Studien für den Zeitraum 2001 bis 2023 können analog zu Kapitel 2.1 nach den betrachteten räumlichen Ebenen zusammengefasst werden:

Bundesebene: In einer ersten Studie des BMU (2008) zum Grundwasser in Deutschland, die auf dem REMO- und dem WETTREG-Klimamodell basiert, wurden meist Zunahmen der jährlichen Grundwasserneubildung bis 2050 – im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000 – ermittelt: In Hessen bspw. um 25 % und in Süddeutschland um 10 bis 20 %. Für die östlichen Bundesländer, wie z. B. Brandenburg, wird hingegen mit einer Abnahme von bis zu 40 % gerechnet.

In einer weiteren Studie (Hellwig, 2019) wurden Grundwasserdürren für Gesamtdeutschland ermittelt und langfristige Trends des Auftretens dieser analysiert. Grundwasserdürre liegt nach dieser Studie vor, wenn die Grundwasserstände in einem Monat deutlich niedriger sind als das langjährige Mittel dieses Monats. Zur Auswertung wurde hierbei der Standardisierte Grundwasser Index (SGI) genutzt und auf Dürrekategorien aus (McKee et al., 1993) zurückgegriffen. Zur flächendeckenden Analyse der Grundwassersituation in Deutschland wurde ein einfaches MODFLOW-Grundwassermodell für das obere, ungespannte Grundwasserstockwerk entwickelt, um Grundwasserstände für den Zeitraum 1970 bis 2018 zu simulieren. Die Grundwasserneubildung wurde mit einem einfachen Bodenmodell berechnet.

Die Modellergebnisse zeigen ausgedehnte Grundwasserdürren in den 1970er Jahren, aber auch in den 2010er Jahren, besonders in den Jahren 2018 und 2019. Insbesondere diese beiden Jahre weisen starke Grundwasserdürren auf, wie sie zuletzt vor über 40 Jahren auftraten. Im betrachteten Zeitraum gibt es im Süden und Westen Deutschlands einen Trend zu einem häufigeren Auftreten und einer länger anhaltenden Dauer von Grundwasserdürren, v. a. im Sommer, während es im Osten und in der Mitte Deutschlands eine gegenteilige Entwicklung mit schwächer ausgeprägten Grundwasserdürren gibt. Im Winter besteht in diesen Gebieten ein signifikanter Trend hin zu weniger, bzw. zu schwächeren Grundwasserdürren.

Eine Zusammenstellung in Riedel et al. (2021) zeigt anhand von verschiedenen Messstellen im Bundesgebiet, dass an den betrachteten Grundwasserpegeln in den 1970er und 1990er Jahren sowie im Zeitraum seit 2003 abnehmende Grundwasserstände beobachtet werden. Geringe Grundwasserneubildungsraten wurden in den Jahren 2003 und 2014/2015 für Baden-Württemberg, Bayern, Brandenburg, Hessen, und Rheinland-Pfalz berichtet. Auch für Nordrhein-Westfalen wurden in den 1970er Jahren sowie in den Jahren seit 2003 gegenüber dem langjährigen Mittel abnehmende Sickerwassermengen an einem Großlysimeter beobachtet. Auch regional großräumig (Deutschland und europäische Nachbarstaaten) werden für die Jahre 2003, 2015

und 2018/2019 große Defizitmengen der terrestrischen Wasserspeicher beobachtet. Die Zusammenstellung zeigt jedoch insgesamt ein deutschlandweit niedriges Risiko für Grundwasserdürren, außer in Festgesteins-Grundwasserleitern (hier mittlere Vulnerabilität). Wegen meist geringer Ergiebigkeit spielen Grundwasservorkommen mit mittlerer und hoher Vulnerabilität aber bei der Trinkwasserversorgung eine untergeordnete Rolle.

Riedel et al. (2021) betrachten darüber hinaus die zukünftigen Änderungen der Grundwasserneubildung in Deutschland. Demzufolge wird für Süddeutschland eine meist stagnierende Grundwasserneubildung prognostiziert, wohingegen die Unsicherheiten für Norddeutschland noch erheblich sind. Eine Abnahme der Grundwasserneubildung auf ca. 50 % des heutigen Wertes scheint dagegen vor allem im Osten von Deutschland als gesichert angesehen werden zu können.

Bender et al. (2020) verweisen auf neue Herausforderungen für die Wasserwirtschaft. Diese werden sich vor allem für oberflächennahes Grundwasser in räumlich begrenzten Grundwasserleitern mit kleinem Speichervolumen ergeben. Diese reagieren sehr sensibel auf Dürreperioden, oftmals aber mit zeitlicher Verzögerung, so dass Grundwasserstände aus Vorjahren und die Abfolge von Nass- und Trockenjahren eine entscheidende Rolle spielen. Dies führt zu großen Ergebnisbandbreiten möglicher zukünftiger Abschätzungen von Grundwasserständen. Insbesondere wenn Sommerniederschläge abnehmen und Winterniederschläge zunehmen sollten, kann dies auch zu stärkeren Schwankungen der Grundwasserstände führen.

Länderebene: In einer länderübergreifenden Initiative von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz wurden im Rahmen des KLIWA-Projektes die Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung untersucht. Eine Auswertung von Grundwasserpegelmessreihen ergab bei Zweidrittel der Messstellen eine signifikante Abnahme der Grundwasserpegel ggü. dem mittleren Niveau. Auch die Saisonalität der Grundwasserspiegel und die Amplitude verändern sich. Auf Grundlage von WETTREG2006-Klimaszenarien und dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW wurde die zukünftige Grundwasserneubildung in dem KLIWA-Untersuchungsgebiet ermittelt. Die Ergebnisse lassen eine Nordwest-Südost-Differenzierung erkennen: Einer leichten Zunahme von ca. 15 Millimetern pro Jahr im Nordwesten (Eifel und Rheinland-Pfalz) stehen Bereiche mit geringen Abnahmen von maximal 30 Millimetern pro Jahr im Südosten, besonders am Alpenrand gegenüber. In den übrigen Gebieten sind keine eindeutigen Änderungssignale vorhanden bzw. weisen diese nur sehr geringe Abnahmen auf (Neumann & Wendel, 2012).

In Hessen zeigt eine Auswertung von Grundwassermessdaten, dass die flächengemittelte Grundwasserneubildung im trockenen Jahr 2019 40 % unter dem langjährigen Mittel der Periode 1971 bis 2000 lag. Ein Trend der Grundwasserneubildung ist für den Zeitraum 1951 bis 2019 jedoch nicht eindeutig erkennbar, einzig die Variabilität hat seit dem Jahr 2003 abgenommen. Auch die Grundwasserstände sind von der Trockenheit betroffen. Zum Jahresende 2019 waren die Grundwasserstände an ca. 35 % der Messstellen auf einem sehr niedrigen Niveau. Dies hatte in einigen Regionen, in denen die Trinkwasserversorgung aus Quellen und flachen Brunnen erfolgt, zu lokalen Versorgungsengpässen mit Trinkwasser geführt (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, 2020).

Für Nordrhein-Westfalen weisen neueste Modellergebnisse in Herrmann et al. (2021) aus statistischer Perspektive darauf hin, dass langfristig eine Grundwasserneubildung ähnlich dem Niveau der Periode 1971 bis 2000 zu erwarten ist. Eine Änderung der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts kann aus den Ergebnissen statis-

tisch nicht abgeleitet werden. Für fast alle Ensemblemitglieder aus verschiedenen Klimamodellen werden Zeiten mit Grundwasserdürre und Zeiten mit überdurchschnittlich hoher Grundwasserneubildung projiziert.

In Niedersachsen, Bremen und Nordrhein-Westfalen kamen in den betrachteten Studien ausschließlich Varianten des Modells GROWA sowie mGROWA zum Einsatz. In Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz wurde GWN-BW eingesetzt. ArcEGMO wurde in Sachsen genutzt.

Regionale Ebene und Einzugsgebiete: Auf Ebene der Einzugsgebiete ist bspw. eine aktuelle Studie des DVWG vorhanden (Boeing & Marx, 2023), in der die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wassersektor in zehn Einzugsgebieten in Deutschland (u. a. Oder, Elbe und Rhein) untersucht wurden. Hierfür wurden insgesamt 70 Klimasimulationen genutzt (21 Klimasimulationen mit RCP 2.6 und 49 mit RCP 8.5), welche das Modell mHM angetrieben haben. Durch das große Klimaensemble soll ggü. einzelnen Klimasimulationen die Unsicherheit der Ergebnisse eingeschätzt werden können. Für die in der Studie betrachteten Indikatoren wird die wahrscheinlichste Entwicklung mit dem Median über das Klimaensemble repräsentiert. Der Median der jährlichen Grundwasserneubildung nimmt der Studie nach mit zunehmender Erwärmung über 30-jährige Zeiträume zu, die absoluten Änderungen sind jedoch insgesamt klein. Regional betrachtet sind diese Änderungen prozentual jedoch teilweise groß, wie bspw. im Nordosten Deutschlands. Es wird darauf hingewiesen, dass die berechneten Änderungen mittlere Zustände abbilden und nicht den regional teilweise beobachteten langjährig (> 10 Jahre) sinkenden Grundwasserspiegeln widersprechen.

Struktur der Studien

In den erfassten Studien sind die analysierten Zeithorizonte zu etwa gleichen Teilen auf die Vergangenheit und die Zukunft bezogen. Schneider et al. (2021) und Ertl et al. (2019) analysieren bspw. den Zeitraum 1961 bis 2010, während Hennig & Hilgert (2021) bis 2050 und Herrmann et al. (2021) bis 2100 analysieren. Die Zukunftsprojektionen reichen überwiegend bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Bei den Studien werden verschiedene globale und darauf basierende regionalisierte Klimamodelle verwendet. Auch hier werden u. a. der statistische Ansatz WETTREG und der dynamische Ansatz REMO genutzt. Hinsichtlich der möglichen zukünftigen klimatischen Entwicklungen werden sowohl RCP- (z. B. Wunsch et al., 2021) als auch SRES-Emissionsszenarien (z. B. Natkhin et al., 2010) genutzt.

Die meisten der erfassten Studien sind auf Länderebene erstellt worden. Besonders häufig wird Niedersachsen (u.a. Ertl et al., 2022; Herrmann et al., 2017) gefolgt von Nordrhein-Westfalen (u.a. Bogena et al., 2003; Herrmann et al., 2021) betrachtet. Es sind jedoch auch Studien vorhanden, die regionale Gebiete betrachten, wie das nördliche Deistervorland in Linke (2010) oder Einzugsgebiete, wie z. B. das der Oberen Donau in Barthel et al. (2011) oder das der Ucker in Wegehenkel et al. (2010). Abgesehen von dem Machine-Learning-Ansatz in Wunsch et al. (2021) und einer Diskussion der Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Grundwassernutzung in Bender et al. (2017) wurde in keiner der Studien das gesamte Bundesgebiet betrachtet.

Erheblich erschwert wird die Erfassung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserressourcen in Regionen mit starkem anthropogenen Einfluss, da sich Grundwasserentnahmen deutlich schneller und direkter als klimatisch bedingte Schwankungen auf Grundwasserstände auswirken (Riedel & Weber, 2020). Nach Bender et al. (2020) führt dies dazu, dass eine über die Grundwasserneubildung hinausgehende Aussage zur zukünftigen Entwicklung der Grundwasserstände derzeit nur schwer möglich ist, v. a. wegen der großen Ergebnis-Bandbreiten bei der Modellierung regionaler Klimawerte und Niederschläge.

Tabelle 1: Überblick über die Eigenschaften der Representative Concentration Pathways (RCP).

Bezeichnung	Treibhausgaskonzentration im Jahr 2100 (ppm CO ₂ -Äquivalente)	Strahlungsantrieb im Jahr 2100 (W/m ²)	Eigenschaften
RCP2.6	ca. 490 (Maximum vor 2100, dann rückläufig)	2,6	Konsequenter Klimaschutz Starke Reduktion der Treibhausgasemissionen
RCP4.5	ca. 650 (Stabilisierung nach 2100)	4,5	Begrenzter Klimaschutz Mittlere bis geringe Verringerung der Treibhausgasemissionen
RCP6.0	ca. 850 (Stabilisierung nach 2100)	6,0	Kein Klimaschutz Zunahme der Treibhausgasemissionen
RCP8.5	ca. 1.370	8,5	Kein Klimaschutz Starke Zunahme der Treibhausgasemissionen

Quelle: van Vuuren et al. (2011)

2.3 Analyse von Wasser-Bilanz-Risiko-Gebieten hinsichtlich der Auswirkungen von meteorologischer Trockenheit auf den Bodenwasserhaushalt und das Grundwasser

Autor*innen: Herrmann, F., Flörke, M. Kollet, S., Uschan, T., McNamara, I., Wagner, N.

2.3.1 Konzept und notwendige Datenbasis

Autor*innen: Herrmann, F., Flörke, M.

Wasserknappheit und Niedrigwasser haben in den letzten Jahren Betroffenheit und Sorge in der Wasserwirtschaft sowie Industrie, Land- und Forstwirtschaft und Schifffahrt ausgelöst. Zudem wirken sie sich nachteilig auf aquatische und terrestrische Ökosysteme aus. Der Wassernutzungsindikator, der den Anteil der Wassernutzung am Wasserdargebot beschreibt, hat nach wie vor eine abnehmende Tendenz in Deutschland. Flächendeckend, d.h. das gesamte Bundesgebiet betreffend, trat seit 2004 kein Wasserstress auf. Der Schwellenwert für Wasserstress liegt bei einem Wassernutzungsindex von 20%; ist dieser überschritten, entsteht ein steigendes Risiko und Nutzungskonfliktpotenzial für die Trinkwasserversorgung, Wirtschaft und Natur.

Die Literaturrecherche hat aufgezeigt, dass derzeit keine standardisierte deutschlandweit flächendeckend einsetzbare Methodik zur Darstellung der Auswirkungen des Klimawandels auf das verfügbare (Grund)Wasserdargebot unter besonderer Berücksichtigung von Trockenheit, Dürre und Wasserknappheit existiert. Regionale und saisonale Auswirkungen des Klimawandels und der (zukünftigen) Wassernutzung auf das gesamte Wasser- und Grundwasserdargebot wurden aus einer deutschlandweiten Perspektive bislang selten betrachtet, sondern nur gesondert auf regionaler oder lokaler Ebene (s. Kap. 2.1, 2.2). Im Rahmen des Projektes WADKlim wurde die Grundwasserneubildung als Proxy, also stellvertretend für das nutzbare Grundwasserdargebot verwendet.

Das Projekt WADKlim stellt sich der Herausforderung einer deutschlandweit flächendeckenden Herangehensweise zur Analyse und Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels und veränderter Wassernutzung auf die Wasserressourcen und schafft damit die Voraussetzung für die Entwicklung konkreter Handlungsempfehlungen. Abbildung 1 verschafft einen Überblick über die Herangehensweise.

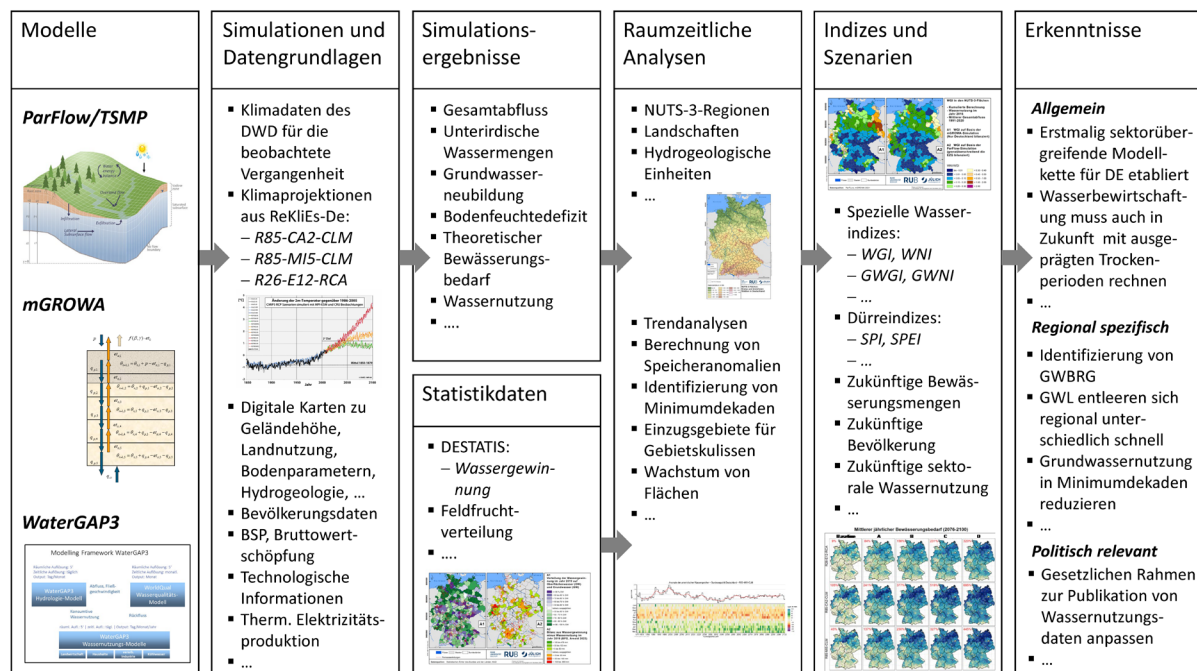
Das Modell-Ensemble bildet sich aus den Modellen Parflow/TSMP, mGROWA und WaterGAP3. Die hydrologische Komponente des Modell-Ensembles besteht aus den beiden Modellsystemen mGROWA und Parflow/TSMP. Diese beiden Modelle ergänzen sich hinsichtlich der simulierten Zielgrößen ideal (Abbildung 1, Simulationsergebnisse). Das Modell WaterGAP3 wurde zur Berechnung der zukünftigen industriellen Wassernutzung verwendet, während die Berechnung der Wassergewinnung für die öffentliche Wasserversorgung einem vereinfachten Ansatz folgte. Basierend auf historischen Daten und zukünftigen Klimaprojektionen und Szenarien erfolgte eine Vielzahl von Simulationen, die die Grundlagen für die raumzeitlichen Analysen lieferten. Die räumlichen Analysen erfolgten für verschiedene Gebietskulissen, jedoch mit einem Fokus auf NUTS-3-Regionen (Nomenclature of Territorial Units for Statistics) bei Berücksichtigung der Wassernutzung. Seitens der Wassernutzung wurden mit mGROWA gegenwärtige und zukünftige Bewässerungswasserbedarfe berechnet, da dieser Sektor zum einen besonders von Trockenheit und Dürre betroffen ist und zur Wasserknappheit beitragen kann, zum anderen liegen für diesen Sektor nur unzureichende statistische Daten zur Beschreibung der aktuellen Situation vor. Die Bestimmung von Jahres- und Dekadenwerte, Trendanalysen und die Identifizierung von Minimumdekaden deckten das zeitliche Spektrum für die wasserwirtschaftlich bedeutenden Analysen ab.

Um vergleichende Aussagen zu Trockenheit und Dürre sowie Wasserknappheit treffen zu können, wurden verschiedene wasserwirtschaftlich relevante Indizes quantifiziert und in Karten und Diagrammen raumzeitlich visualisiert. Darüber hinaus erfolgte auch eine Bewertung möglicher zukünftiger Entwicklungen von Wasserdargebot und Wassernutzung auf Basis von Klimaprojektionen und soziökonomischen Szenarien. Damit wurde eine Bandbreite möglicher Entwicklungen der öffentlichen und nichtöffentlichen sektoralen Wassernutzung für NUTS-3-Regionen in Deutschland bis zum Jahr 2070 bzw. 2100 aufgestellt.

Die Zusammenführung klimatischer, hydrologischer und wassernutzungsgetriebener Indizes liefert eine umfassende Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse und unterstützten die Ableitung von Handlungsempfehlungen. Mit der eingesetzten sektorübergreifenden Modellkette wurden erstmalig regional-spezifische Erkenntnisse gewonnen, die verdeutlichen, dass auch in Zukunft mit ausgeprägten Trockenperioden und Wasserknappheit gerechnet werden muss, die Nutzungseinschränkungen und politisches Handeln zur Anpassung erforderlich machen dürften.

Detaillierte Beschreibungen folgen in den nachfolgenden Kapiteln.

Abbildung 1: Schema und Überblick zu den Modellen, Daten, Analysen, Indizes und Szenarien, die im Projekt WADKlim zu Erkenntnissen führen.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich und Ruhr-Universität Bochum.

2.3.2 Simulationsmethodik

2.3.2.1 Simulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA

Autor*innen: Herrmann, F.

Das Modell mGROWA (Herrmann, Chen, Heidt, et al., 2013) hat sich in den vergangenen Jahren in Deutschland für die Simulation und Projektion des Wasserhaushalts auf Landes- und Flussgebietsebene etabliert (Bender et al., 2017; Herrmann et al., 2017, 2021). Im Kern verbindet mGROWA die rasterbasierte Simulation des Bodenwasserhaushalts (Evapotranspiration, Sickerwasserbewegung, Beregnungssteuerung, Abflussbildung, etc.) mit einer rasterbasierten flächendifferenzierten Separation des gebildeten Abflusses in ober- und unterirdische Komponenten inklusive Grundwasserneubildung. Die Ergebnisse finden ihre praktische Verwendung und Verwertung hauptsächlich in der (grund-)wasserwirtschaftlichen Planung auf Landesebene (Ertl et al., 2022; Herrmann et al., 2015), in Modellketten zur Bestimmung der Nährstoffbelastung in großen Flussgebieten und anderen administrativen Einheiten (Schmidt et al., 2020) und zur Bestimmung von potenzieller Bewässerungsbedürftigkeit in der Landwirtschaft (Herrmann et al., 2016).

Die Methodik und Anwendung des Modells mGROWA ist in den oben genannten Publikationen bereits ausführlich beschrieben worden. Aus diesem Grund werden im Folgenden das Modell und seine verwendete Parametrisierung nur in den Grundzügen vorgestellt. Das im Rahmen dieser Studie verwendete mGROWA-Setup basiert auf einem 100 m Raster und wurde in den vergangenen Jahren im FZJ IBG-3 erstellt und wird kontinuierlich weiterentwickelt. Im Jahresrhythmus erfolgt standardmäßig eine retrospektive Simulation der jüngeren Vergangenheit, sodass mittlerweile Simulationsergebnisse für die beiden hydrologischen Perioden 1961-1990 und 1991-2020 vollständig vorliegen. Das mGROWA-Setup wird jeweils für projektspezifische Fragestellungen präzisiert und angepasst, d.h. es variiert, weil jeweils verfügbare oder speziell geeignete Geo-Datenbestände (Kartenwerke, etc.) und Klimadaten verwendet werden. Für die im

Rahmen des Projektes WADKlim durchgeführten und dargestellten Analysen wurde aus den am FZJ IBG-3 verfügbaren Setup-Varianten diejenigen gewählt, die auf deutschlandweit einheitlich verfügbaren Datengrundlagen aufbauen (Übersicht in Tabelle 2).

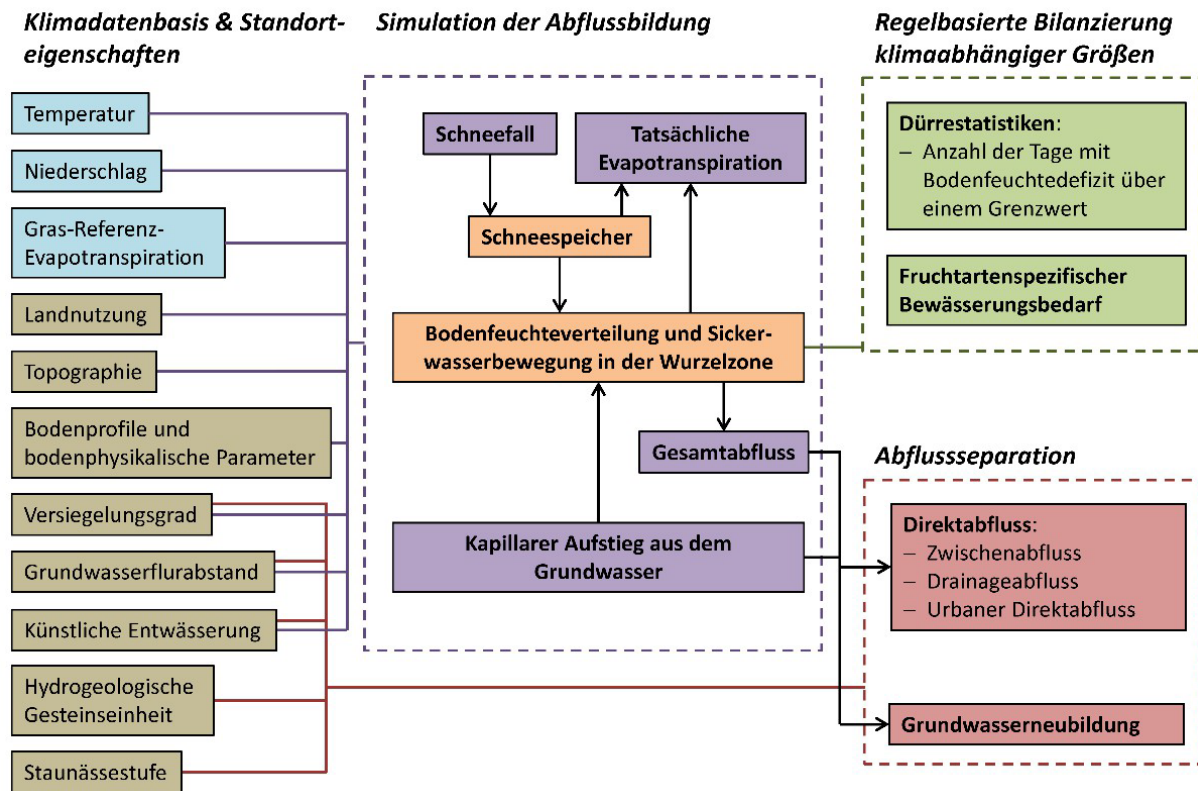
Tabelle 2: Für die Simulationen mit mGROWA genutzte Geo-Datenbestände.

Datenkategorien	Datenquellen
Klimadaten für retrospektive Simulationen: <ul style="list-style-type: none"> • Niederschlag • Potenzielle Evapotranspiration über Gras • Minimal- und Maximalwerte der Lufttemperatur • Jahresraster der Anzahl der Schneedeckentage 	Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes https://opendata.dwd.de/climate_environment/
Topographie der Geländeoberfläche	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie: Digitales Geländemodell Gitterweite 25 m (DGM 25)
Landnutzungstypen und Vegetationsverteilung	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie: Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland (LBM-DE2015)
Versiegelungsgrade künstlich versiegelter Flächen	Copernicus Land Monitoring Service: High Resolution Layer Imperviousness (2012) 20 m https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness/
Verteilung der Bodenparameter	Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe: Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200)
Verteilung hydrogeologischer Parameter und Gebietscharakterisierung	Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe: Hydrogeologische Übersichtskarte 1:200.000 (HÜK 200)

Die rasterbasierte Simulation des Wasserhaushaltes mit dem Modell mGROWA erfolgt in zwei Stufen (Abbildung 2), der Simulation der Abflussbildung in Tagesschritten folgt eine Abflusssparation in Monatsschritten. In der prozessorientierten ersten Stufe wird in Tagesschritten die tatsächliche Evapotranspiration von der Erdoberfläche, der Status des Bodenwasserspeichers und der Schneedecke sowie die Abflussbildung in Form des Gesamtabflusses flächendifferenziert berechnet. Grundlage für die Berechnungen ist dabei die allgemeine hydrologische Wasserhaushaltsgleichung. Basierend auf dem Status des Bodenwasserspeichers können Dürrestatistiken und ein fruchtartenspezifischer Bewässerungsbedarf berechnet werden. Die zweite Stufe ist empirischer Natur. In ihr wird der gebildete Gesamtabfluss in die Komponenten des Direktabflusses sowie die Grundwasserneubildung aufgeteilt.

Die Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration und der Abflussbildung erfolgt für die Oberflächentypen *Boden mit Vegetation*, *versiegelte Fläche* und *freie Wasseroberfläche* mit einer jeweils an die spezifische Wasserspeicherfähigkeit angepassten speziellen Simulationsmethodik. Für den Oberflächentyp *Boden mit Vegetation* wird die Bodenwasserdynamik mit dem als Modul integrierten Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAB (BODenWASSerBilanzierung) (Engel et al., 2012) simuliert. In diesem Simulationsteil resultieren auch die tatsächliche Evapotranspiration aus den durchwurzelten Bodenhorizonten (als 7 Modellschichten abgebildet) sowie die Sickerwasserbewegung in Abhängigkeit vom Füllstand des Bodenwasserspeichers. Dazu wird eine große Anzahl von Parametern verwendet, die aus unterschiedlichen Quellen stammen und für die mGROWA-Modellierung in einer Vielzahl von Studien zusammengestellt wurden. Des Weiteren bildet die mit dem BOWAB-Modul simulierte Bodenfeuchteverteilung eine essenzielle Grundlage für die Berechnung des theoretischen Bewässerungsbedarfs individueller Feldfrüchte.

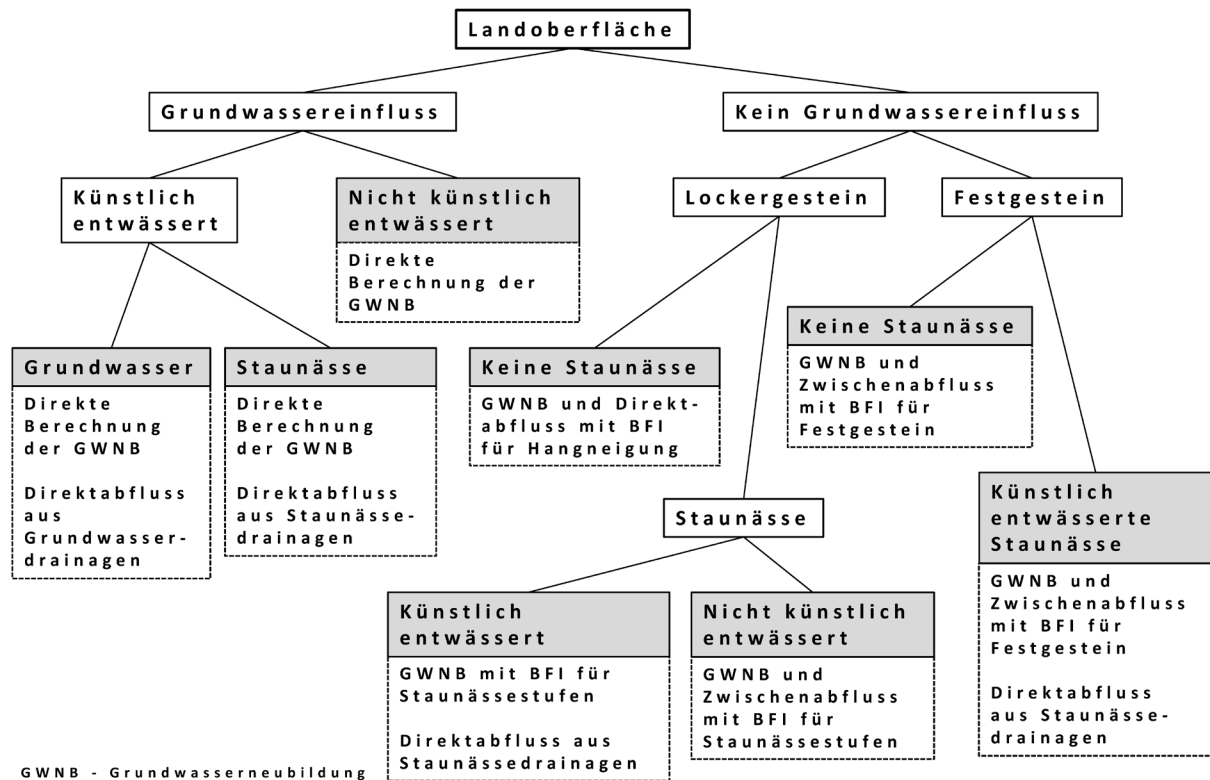
Abbildung 2: Modellkonzept des Wasserhaushaltsmodells mGROWA.



Quelle: basierend auf Herrmann (2020)..

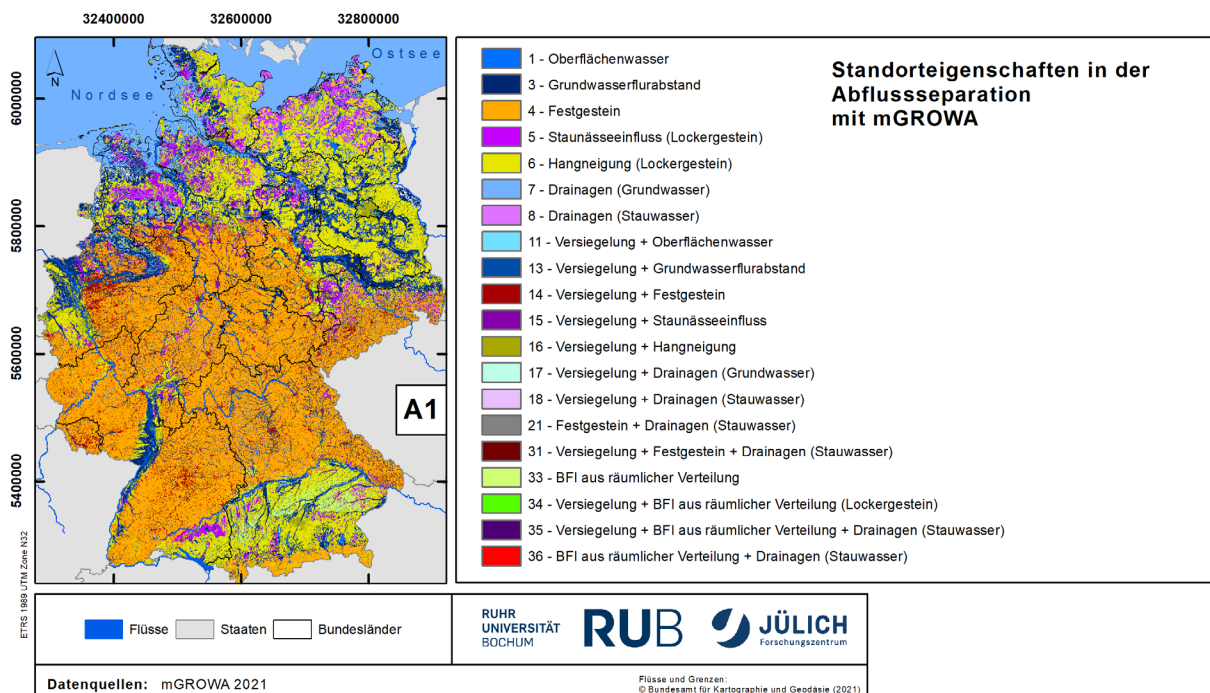
Dem Modell werden dafür zusätzlich für Fruchtarten spezifische Bewässerungsregeln und Parameter vorgegeben, die das Bewässerungsmanagement in der Praxis widerspiegeln (Details in Herrmann et al., 2016). In der empirischen zweiten Stufe der Simulation des Wasserhaushaltes mit dem Modell mGROWA erfolgt die Separation der in der ersten Stufe ermittelten Abflussbildung in die Sickerwasserrate, die Grundwasserneubildung sowie in mehrere Komponenten des Direktabflusses (Abbildung 2). Basis für diesen Verfahrensschritt ist die Identifizierung der Standorteigenschaften auf den individuellen Rasterzellen (100 mal 100 m), diesen liegen die Datengrundlagen in Abbildung 3 zugrunde. Beispielsweise werden den hydrogeologischen Einheiten im Festgesteinsbereich sogenannte Baseflow-Index-Werte (BFI-Werte) zugewiesen. Diese geben das langjährig konstante Verhältnis von Grundwasserneubildung zum Gesamtabfluss wieder. Die Abbildung 4 zeigt die räumliche Verteilung der relevanten Standorteigenschaften für ganz Deutschland. Diese Karte kann zur Interpretation der Ergebnisse des Modells mGROWA herangezogen werden.

Abbildung 3: Entscheidungsbaum in der mGROWA-Abflusseparation zur Bestimmung der für die Berechnung der Grundwasserneubildung (GWNB) und einzelner Direktabflusskomponenten relevanten Standorteigenschaften.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

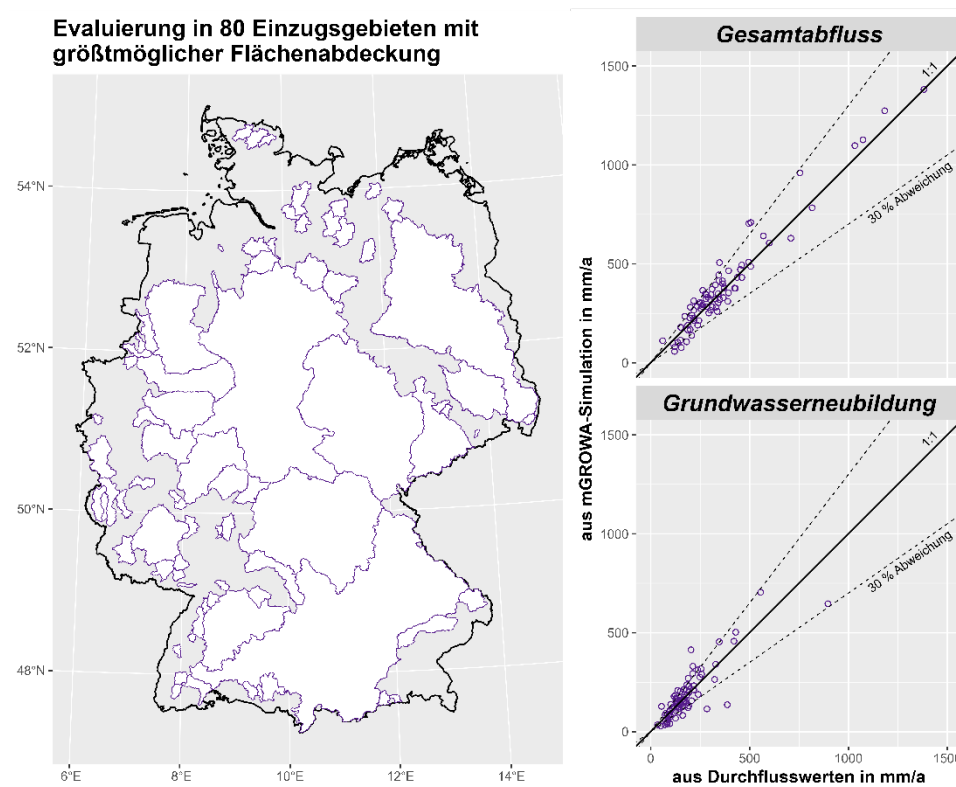
Abbildung 4: Standorteigenschaften in der Abflusseparation mit mGROWA.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Die Ergebnisse des Modells mGROWA sind in vielen Studien auf Ebene der Bundesländer umfangreich evaluiert worden. Die dabei verwendete Datenbasis und Methodik sind in den oben angegebenen Referenzen jeweils ausführlich beschrieben. Im Rahmen der Evaluierung wird im Wesentlichen für eine Gruppe geeigneter Flusseinzugsgebiete jeweils im langjährigen Mittel der modellierte Gesamtabfluss dem beobachteten Abfluss und die modellierte Grundwasserneubildung dem Basisabfluss gegenübergestellt. Der mittlere beobachtete Abfluss und der Basisabfluss werden aus den Durchflusswerten an den Gewässerpegeln der Einzugsgebiete berechnet, wobei für die Bestimmung des Basisabflusses eine Auswertung der Niedrigwasserstatistik durchgeführt wird. In Abbildung 5 ist eine exemplarische Evaluierung der Ergebnisse für die Evaluierungsperiode 1981-2010 und 80 Einzugsgebiete gezeigt, die den größtmöglichen Anteil der Landesfläche abdecken und nur geringe Gebietsanteile außerhalb Deutschlands aufweisen. Insgesamt zeigen in diesem Beispiel die modellierten Werte für den Gesamtabfluss und die Grundwasserneubildung eine gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den jeweiligen beobachteten Größen. Gleichwerte Ergebnisse wurden für das Modell mGROWA auch in den Studien auf Ebene der Bundesländer erreicht, in denen zusätzlich eine Diskussion der Unsicherheiten gegeben wird (siehe z.B. Ertl et al., 2019).

Abbildung 5: Evaluierung des Gesamtabflusses und der Grundwasserneubildung (1981-2010) in 80 Einzugsgebieten.



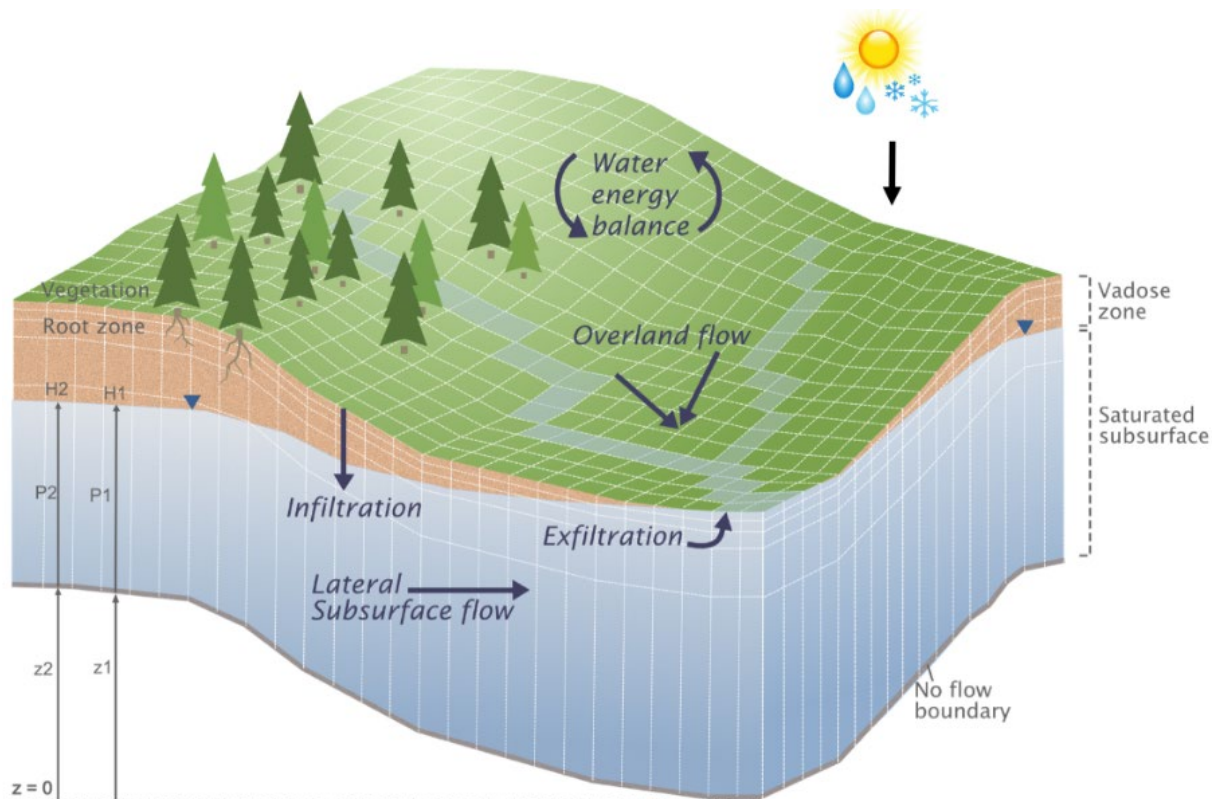
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

2.3.2.2 Simulationen mit der Modellplattform TSMP

Autoren: Kollet, S., Wagner, N.

Die wissenschaftliche Modellplattform TSMP (Terrestrial Systems Modelling Platform) wurde im Transregionalen Sonderforschungsbereich TR32 (Muster und Strukturen in Boden-Pflanzen-Atmosphären-Systemen: Erfassung, Modellierung und Datenassimilation) über mehrere Jahre entwickelt und angewendet. Seitdem hat TSMP begonnen, sich in den terrestrischen Wissenschaften zu etablieren als modular gekoppeltes terrestrisches Modellsystem vom Grundwasser über die Landoberfläche in die Atmosphäre. Kurz zusammengefasst besteht TSMP aus drei individuellen Komponentenmodellen, die durch eine parallele Softwarebibliothek (OASIS3-MCT) extern gekoppelt werden. Für die Atmosphäre wird das operationelle Wettervorhersagemodell COSMO (entwickelt und gepflegt vom Deutschen Wetterdienst) verwendet, für die Energie und Wasserbilanz der Landoberfläche das Community Land Model (CLM, in verschiedenen Versionen; entwickelt und gepflegt vom National Center for Atmospheric Research (NCAR)) und für die Hydrologie der Landoberfläche und des Untergrundes ParFlow (PF; entwickelt und gepflegt am FZJ, Princeton University, Lawrence Livermore National Laboratory). TSMP wurde erfolgreich in Klimasimulationen verwendet. In einer neuen Studie konnte gezeigt werden, dass TSMP die Wasserspeicheranomalien über Deutschland sehr gut abbildet und sich zur historischen Rekonstruktion und Vorhersage sehr gut eignet (Güntner et al., 2023). In WADKlim wird TSMP in der Konfiguration ParFlow–Standalone (PF-S) verwendet (Abbildung 6), d.h. der atmosphärische Antrieb oder in vereinfachter Form die tatsächliche Evapotranspiration und der Niederschlag werden dem Modell vorgegeben. Es kann erwartet werden, dass sich die Modellergebnisse im Vergleich zu vollständigen transienten Simulationen (Güntner et al., 2023) einschließlich der Atmosphäre weiter verbessern. Im Folgenden wird die TSMP-Konfiguration PF-S näher beschrieben.

Abbildung 6: Schema der Komponenten ParFlow-CLM in der terrestrischen Modellplattform TSMP.



Quelle: Maxwell & Condon (2016).

PF ist ein variabel gesättigtes Grundwasser-/Oberflächenwassertransportmodell, das die Umverteilung der Feuchte im Untergrund in 3D und den Oberflächenwasserabfluss in 2D berechnet

(Jones & Woodward, 2001; S. J. Kollet & Maxwell, 2006). Die gekoppelten partiellen Differentialgleichungen (PDG) werden mit einem finite Differenzen- bzw. Kontrollvolumenverfahren räumlich diskretisiert. Für die zeitliche Diskretisierung wird ein implizites Euler-Verfahren verwendet. Bei den PDG handelt es sich um die gemischte Form der Richards-Gleichung für den variabel gesättigten Grundwasserfluss und die kinematische Approximation der Flachwassergleichung für den Oberflächenabfluss. In dieser Studie wird der Austausch mit Oberflächengewässern explizit berücksichtigt und der laterale Abfluss vereinfacht als *runoff* budgetiert. Damit wird der Wassertransport in einem Kontinuum vom Grundwasser über die ungesättigte Bodenzone bis in Oberflächengewässer simuliert. Direkter ParFlow-Modelloutput sind die gesättigten und ungesättigten Wasserspeicher sowie die Druckhöhen und Saugspannungen im Grundwasserleiter, an der Landoberfläche und in der ungesättigten Zone. Abgeleitete Größen beinhalten zum Beispiel Flurabstand, Abflussraten und pflanzenverfügbares Wasser.

Für die mathematische Beschreibung der Wasserretentionskurve wird das Modell nach van Genuchten (1980) verwendet. Des Weiteren muss das Modell mit hydraulischen Leitfähigkeitsbeiwerten, der Porosität, topographischen Steigungen und Mannings-Rauhigkeiten informiert werden. Für die mathematische Schließung des Problems stehen Neumann und Dirichlet-Randbedingungen zur Verfügung. Diese werden generell in einem größtmöglichen räumlichen Abstand gesetzt, um negative Einflüsse auf die Lösung im Interessensgebiet zu vermeiden. In PF steht zusätzlich ein sogenanntes terrainfolgendes Gitter zur Verfügung, das es erlaubt, den Einfluss der Topographie auf den Wassertransport effizient zu simulieren (Maxwell, 2013). Bewässerung und Grundwasserentnahme lassen sich flexibel durch spezielle Quellen- und Senkenterme implementieren. Das nichtlineare Gleichungssystem zweiter Ordnung wird mit einem iterativen, vorkonditionierten Newton-Krylov-Verfahren gelöst (ein konjugiertes Gradientenverfahren). PF wurde von Grund auf parallel programmiert für Anwendungen in massivparallelen Supercomputerumgebungen. Dadurch lassen sich die relevanten physikalischen Prozesse mit hoher Auflösung basierend auf den grundlegenden mathematischen Gleichungen simulieren (S. J. Kollet et al., 2010). PF wurde in Vergleichsstudien mit anderen etablierten Modellsystemen anhand von Benchmarks evaluiert (Baroni et al., 2019; S. Kollet et al., 2017; Maxwell et al., 2014; Sulis et al., 2010). In Tabelle 3 sind die relevanten Datenquellen für PF-S aufgeführt.

Tabelle 3: Für die Simulationen mit TSMP genutzte Geo-Datenbestände.

Datenkategorien	Datenquellen
Klimadaten für retrospektive Simulationen: <ul style="list-style-type: none"> • Niederschlag • Aktuelle Evapotranspiration 	Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes https://opendata.dwd.de/climate_environment/
Topographie der Geländeoberfläche	Land-See-Maske: generiert mit webPEP EXTPAR tool (CLM-Community) Topographische Steigungen: <ul style="list-style-type: none"> • DEM generiert mit webPEP EXTPAR tool • adjusted DEM von MERIT - http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_Hydro/
Verteilung der Bodenparameter	Bodentextur: https://www.soilgrids.org/ <ul style="list-style-type: none"> • SoilGrids: Grundgebirge • Texturklassen: USDA • Hydraulische Parameter: Rosetta hydraulic parameters - https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/agricultural-water-efficiency-and-salinity-research-unit/docs/model/rosetta-class-average-hydraulic-parameters/
Verteilung hydrogeologischer Parameter und Gebietscharakterisierung	Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe: Hydrogeologische Übersichtskarte 1:200.000 (HÜK 200)

2.3.2.3 Berechnungen mit dem Modell WaterGAP3

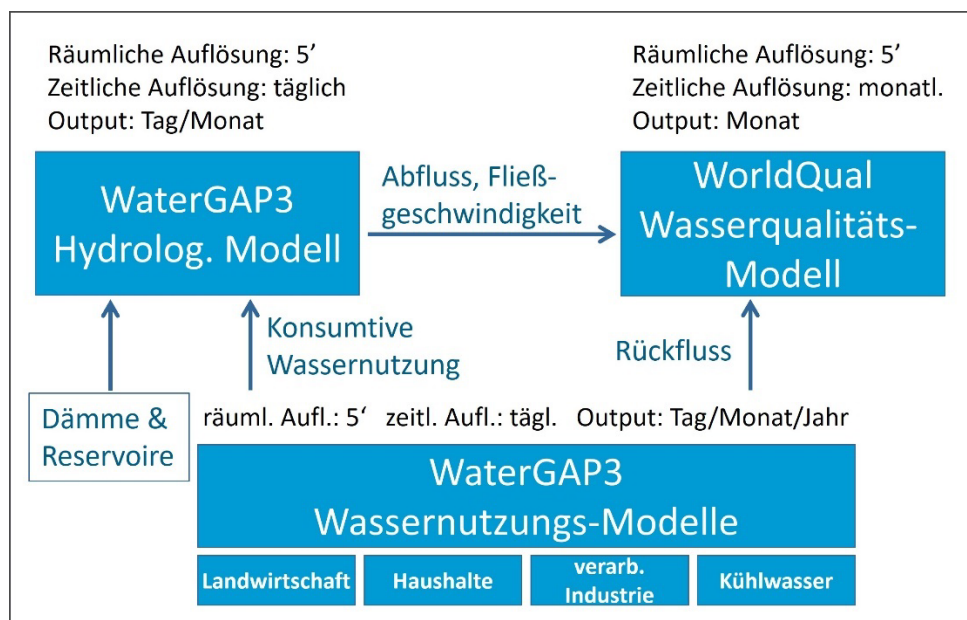
Autor*innen: Flörke, M., Uschan, T.

Zur Quantifizierung der Süßwasserressourcen und zur Berechnung der Auswirkungen des globalen Wandels auf die künftigen Wasserressourcen wurde das großskalige Wassermodell WaterGAP3 (Water - Global Assessment and Prognosis) verwendet (Eisner, 2016; Flörke et al., 2013, 2018). WaterGAP3 wurde am Center for Environmental Systems Research der Universität Kassel entwickelt und wird seit 2019 an der Ruhr-Universität Bochum weiterbetrieben und weiterentwickelt. Das Modell ist bereits in verschiedenen Szenario-Assessments zum Einsatz gekommen (u. a. Millennium Ecosystem Assessment (Alcamo et al., 2005), UNEP Global Environmental Outlook (Rothman et al., 2007), Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) WANDEL-Projekt (Flörke et al., 2021)).

WaterGAP3 besteht aus drei Hauptkomponenten: (i) einem globalen Hydrologiemodell zur Simulation des terrestrischen Wasserkreislaufs, (ii) einem globalen Wassernutzungsmodell zur Abschätzung der Wasserentnahme und des Wasserverbrauchs in den Bereichen Haushalt, thermische Stromerzeugung, verarbeitende Industrie, Bewässerungslandwirtschaft und Viehwirtschaft, sowie (iii) einem globalen Wasserqualitätsmodell zur Simulation von Schadstofffrachten und Schadstoffkonzentrationen in Oberflächengewässern (Abbildung 7). Die räumliche Auflösung des Modells ist 5 x 5 Bogenminuten (5' x 5', ca. 9 x 9 km am Äquator), die zeitliche Auflösung des Modells variiert in Abhängigkeit von den Sub-Modellen zwischen täglicher, monatlicher und jährlicher Auflösung.

Im Projekt WADKlim wurde die zukünftige Wassernutzung für die Sektoren „Thermische Stromerzeugung“ und „Verarbeitendes Gewerbe“ mit dem Wassernutzungsmodell von WaterGAP3 berechnet.

Abbildung 7: Modell-Framework WaterGAP3



Quelle: eigene Darstellung, Ruhr-Universität Bochum.

Die Bestimmung des Kühlwassereinsatzes bei der thermischen Stromerzeugung erfolgt im Modell Standort-spezifisch mit jährlichen Zeitreihen. Die Eingabedaten zu Standort, Typ und Größe der Kraftwerke basieren auf dem World Electric Power Plants Data Set (Bergesen, 2010) und werden durch Daten aus verschiedenen öffentlich zugänglichen Quellen ergänzt, z. B. durch die

Suche nach anlagenspezifischen Informationen, Berichten über den Zustand der Umwelt und nationalen Statistiken. Für jedes Kraftwerk, das Süßwasser zur Kühlung verwendet, wird die entnommene Wassermenge berechnet, indem die jährliche Stromerzeugung [MWh/Jahr] mit der Wassernutzungsintensität des Kraftwerks (pro Einheit Stromerzeugung entnommenen Wasser [m^3/MWh]) multipliziert wird. Die gesamte Wasserentnahme für die Kühlung von Wärmekraftwerken hängt hauptsächlich vom Typ des Kühlsystems, der Brennstoffquelle (Wirkungsgrad) und der installierten Kapazität ab. Verschiedene Arten von Brennstoffen (Biomasse, Abfall, Kernenergie, Erdgas, Öl, Kohle, Erdöl) und Energiequellen (Geothermie, Concentrated Solar Power, Photovoltaik) werden unterschieden und durch ihre jeweiligen Wassernutzungsintensitäten charakterisiert (Flörke et al., 2013; Terrapon-Pfaff et al., 2020). Bei den Kühlsystemen wird zwischen Kreislaufsystemen (z. B. Turmkühlung), Durchlaufsystemen und Speicherbecken unterschieden. Im Allgemeinen werden bei Durchlaufsystemen relativ große Mengen an Oberflächenwasser entnommen und nach dem Verlassen des Kondensators mit Wärmelasten an das gleiche Gewässer wieder abgegeben. Kreislaufsysteme verwenden Kühltürme, um das Wasser durch den Kontakt mit Luft zu kühlen, bevor es wieder in den Oberflächenwasserkörper eingeleitet wird. Diese Systeme erfordern eine geringere Entnahme von Oberflächenwasser, aber der Wasserverbrauch ist aufgrund von Verdunstungsverlusten höher als bei Durchlaufsystemen (Koch & Vögele, 2009). Die berechneten Kühlwassermengen werden nach Lage der Kraftwerke auf die Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS)-3-Regionen aggregiert.

Die Berechnung der Wasserentnahme des verarbeitenden Gewerbes erfolgt auf Länderbasis, d.h. für Gesamtdeutschland, und wird jährlich simuliert. Dabei wird eine spezifische strukturelle Wassernutzungsintensität des verarbeitenden Gewerbes [$\text{m}^3/(\text{USD konst. 2015})$] mit der Bruttowertschöpfung sowie einem Faktor für den technologischen Wandel zur Berücksichtigung technologischer Verbesserungen multipliziert (Flörke et al., 2013). Die Allokation der Wasserentnahme für Deutschland erfolgte zunächst auf die Rasterebene des Modells unter Berücksichtigung der städtischen Bevölkerung (abgeleitet aus den Szenarien). Von der Rasterebene wurden die Werte dann auf die NUTS-3-Regionen aggregiert.

2.3.3 Methodik für statistische Analysen

2.3.3.1 Trend- und Verteilungsanalysen

Autor*innen: Herrmann, F.

Veränderungen im Wasserhaushalt aufgrund des Klimawandels qualitativ und quantitativ zu bewerten, ist ein essenzieller Bestandteil von Klima-Impakt-Studien. Neben der Berechnung von Änderungssignalen (Differenz zwischen langjährigen Mittelwerten) auf einzelnen zukünftigen Entwicklungspfaden oder der Analyse der Verteilung der Änderungssignale in einem größeren Ensemble (Median, Perzentile) werden zunehmend auch die Veränderungen in den statistischen Verteilungen einzelner Zeitreihen und deren Trendentwicklungen untersucht, um multidekadische Regimeverschiebungen von Wasserhaushaltsgrößen zu messen und zu bewerten (Mauget, 2003).

Im Rahmen der Analysen im Projekt WADKlim wurden insgesamt zwei Methoden angewendet, die ebendiese Veränderungen messbar machen. Mit dem Mann-Whitney-Wilcoxon-Test (kurz MWWT; auch U-Test; (Mann & Whitney, 1947; Wilcoxon, 1945)) können Unterschiede in den Verteilungen einer Größe in zwei verschiedenen Perioden untersucht werden. Mit unterschiedlichen Verteilungen gehen unterschiedliche statistische Kennwerte der zentralen Tendenz (Mittelwerte, Median, etc.) und der Dispersion (Variationsbreite, Streuung, etc.) einher, d.h. sie werden sich in veränderten langjährigen Mittelwerten, Extremwerten oder interannuellen Schwankungen manifestieren. Des Weiteren kann neben einer veränderten Verteilung innerhalb einer

Zeitreihe auch ein monotoner Trend innerhalb einer diskreten Zeitspanne ausgeprägt sein. Die Zeitreihe entwickelt sich dann relativ kontinuierlich in Richtung einer Zu- oder Abnahme. Ein monotoner Trend kann mit Hilfe des Mann-Kendall-Trendtests (kurz MKT; Kendall, 1938; Mann, 1945) nachgewiesen werden.

Es handelt sich bei beiden Methoden um Hypothesentests. Diese haben explizit zum Ziel, die Wahrscheinlichkeiten für eine Nullhypothese H_0 und damit indirekt für eine Alternativhypothese H_1 zu schätzen. Wird H_0 aufgrund eines Kriteriums (Signifikanzniveau α) abgelehnt, gilt H_1 als bestätigt. Für die Anwendung im Rahmen dieser Studie lautet die H_0 im MWWT beispielsweise:

Die Verteilung der zukünftigen jährlichen Grundwasserneubildungshöhen (2071-2100) unterscheidet sich nicht signifikant von der Verteilung der jährlichen Grundwasserneubildungshöhen der Referenzperiode (1971-2000).

Entsprechend ist H_1 folgendermaßen zu formulieren:

Die Verteilung der zukünftigen jährlichen Grundwasserneubildungshöhen unterscheidet sich signifikant von der Verteilung der jährlichen Grundwasserneubildungshöhen der Referenzperiode.

Die Wahrscheinlichkeit, die H_0 (keine signifikante Änderung) fälschlicherweise zurückzuweisen, wird auf 15 % festgelegt, d.h., das Signifikanzniveau α beträgt 0,15. Dieses Signifikanzniveau wurde auch von (Pfeifer et al., 2015) für die Erstellung deutschlandweiter Klimasignalkarten festgelegt und kann derzeit als Standard für Klima-Impakt-Studien angesehen werden. Die theoretischen Aspekte und genauen Berechnungsschritte können beispielsweise (Sachs & Hedderich, 2009) entnommen werden. Es resultiert eine Wahrscheinlichkeit p unter Annahme der Nullhypothese H_0 . Ist p kleiner als α , wird H_0 abgelehnt und es wird geschlossen, dass H_1 wahrscheinlicher ist, dass demnach eine signifikante Veränderung der jeweiligen Größe vorliegt. Im MKT resultiert zusätzlich ein Wert τ , der die Richtung der monotonen Veränderung anzeigt ($\tau > 0$: Zunahme; $\tau < 0$: Abnahme).

2.3.3.2 Methodik zur Berechnung von Wassernutzungs- und Wassergewinnungsindizes

Autor*innen: Uschan, T., Flörke, M., Herrmann, F.

Für die Bewertung von Regionen im Hinblick auf nichtnachhaltige Wasserentnahmen, wird üblicherweise der Wassernutzungsindex (WNI) verwendet. Der WNI ist definiert als Quotient aus den gesamten Wasserentnahmen und dem erneuerbaren Gesamtwasserdargebot. Analog dazu kann der Grundwassernutzungsindex (GWNI) als Quotient aus den Entnahmen aus dem Grundwasser und dem erneuerbaren Grundwasserdargebot definiert werden. Werte größer 0,2 gelten im Allgemeinen als Hinweis auf Wasserknappheit, während Werte größer 0,4 auf schwere Wasserknappheit hindeuten, d. h. die Wasserentnahmen gelten als nicht nachhaltig. In der Regel werden auf nationaler Ebene zur Berechnung des WNI oder GWNI langjährige Mittelwerte des Dargebots berücksichtigt, die jedoch saisonale und regionale Wasserknappheit verbergen.

Je größer ein mit WNI oder GWNI bilanziertes Gebiet ist, desto weniger Wassertransfers in künstlichen Transportleitungen relativ zum gesamten Dargebot finden über die Gebietsgrenzen (den Bilanzraum) statt. Dies erlaubt auf nationaler Ebene eine einfache Addition aller räumlich verteilten Mengen der Wassernutzung und des Dargebotes. Je kleiner die Regionen werden, desto komplizierter gestaltet sich die Berechnung. Dies ist hauptsächlich durch die räumliche Verortung der Datenbasis zur tatsächlichen Wassernutzung und Wassergewinnung sowie die zunehmende Bedeutung von Wassertransfers in künstlichen Transportleitungen über Regionsgrenzen begründet. Wassergewinnung und Wassernutzung (Wasserabgabe an die Nutzer*in-

nen) erfolgen nicht unmittelbar am selben Ort. In Deutschland findet beispielsweise ein relevanter Transfer von Wasser über das Fernwasserleitungsnetz statt oder Wasser wird über NUTS-3-Regionsgrenzen hinweg transportiert (vgl. Abbildung 11, A1). Eine genaue räumliche Zuordnung der Transportwege und Quantifizierung der Volumenströme ist auf der derzeitigen Datenbasis nicht möglich (Details in Kap. 2.3.5.1). Für die Bilanzierung von WNI und GWNI kann beispielsweise auf die erhobenen statistischen Daten zur Wassergewinnung aus Grund- oder Oberflächengewässern oder auf die Wasserabgabe in der öffentlichen Wasserversorgung als Variable für die Wasserentnahme zurückgegriffen werden (vgl. Abbildung 9, Kap. 2.3.5.1.) Diese generelle Datenlage macht es notwendig, die Berechnung der oben eingeführten Indizes weiter zu spezifizieren. Im Rahmen des Projektes WADKlim wurde deshalb ein Berechnungskonzept gewählt, das in verschiedene Sektoren der Wasserverwendung unterscheidet und, soweit das möglich ist, die verschiedenen Quellen der Wassergewinnung auch räumlich differenziert berücksichtigt. Aus den genannten Gründen wurde eine Methodik für die Berechnung der folgenden spezifischen Indizes auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen entwickelt und auf die NUTS-3-Regionen Deutschlands angewendet:

- ▶ WGI ist der Wassergewinnungsindex, der die gesamte Wassergewinnung zum gesamten Wasserdargebot ins Verhältnis setzt. Dieser Index wurde deutschlandweit in einer kumulierten Form berechnet, d. h. für die NUTS-3-Regionen werden entsprechend der Lage in den Flussgebieten das dort gebildete plus das einströmende Wasserdargebot sowie die im jeweiligen Gesamtgebiet stattfindende Wassergewinnung bilanziert. (Ergebnisse zum WGI in Kapitel 2.3.13)
- ▶ GWGI ist der Grundwassergewinnungsindex, der theoretisch auf dem nutzbaren oder erneuerbaren Grundwasserdargebot aufsetzt. Es liegen jedoch für Deutschland weder eine flächendeckend anwendbare Methodik zur Bestimmung des nutzbaren Grundwasserdargebots vor, noch kann die Verteilung aus Regionalstudien lückenlos und konsistent zusammengesetzt werden. Aus diesem Grund basiert im Rahmen des Projektes WADKlim die Berechnung des GWGI für die NUTS-3-Regionen auf der mit mGROWA bilanzierten Grundwasserneubildung außerhalb der Grundwasserzehrgebiete (z. B. Feuchtgebiete), d.h. in den für die Grundwasserbewirtschaftung relevanten sogenannten Neubildungsgebieten. Das tatsächlich nutzbare Grundwasserdargebot würde betragsmäßig unterhalb der bilanzierten GWNB liegen. Deshalb stellt die Verwendung der GWNB eine bei der Interpretation der GWGI zu berücksichtigende Approximation dar. Beide Größen, Grundwassergewinnung und GWNB, wurden für die NUTS-3-Regionen entsprechend den unterirdischen Einzugsgebieten bilanziert. (Ergebnisse zum GWGI in Kap. 2.3.13)
- ▶ GWNI ist der Grundwassernutzungsindex, der im Rahmen des Projektes WADKlim nur für die Projektionen in die Zukunft berechnet werden konnte. Es ist mit der derzeit verfügbaren Modellierungsmethodik noch nicht möglich, die zur zukünftigen Wassernutzung zugehörige Verortung und Quantifizierung der Wassergewinnung räumlich festzulegen. Aus diesem Grund wurde der GWNI auf Basis von Szenarien und unter Verwendung der Methodik des GWGI berechnet. (Ergebnisse zum GWNI in Kap. 2.3.14)

Wie oben bereits angedeutet, muss für eine auf der regionalen Ebene räumlich aufgelöste Berechnung der Indizes, aus hydrologischer Perspektive, das zum entsprechenden Wasserdargebot beitragende Gebiet identifiziert werden. Das bedeutet, für die zu untersuchenden Flächeneinheiten muss aus den Simulationen die als Wasserdargebot angesehene Größe (z. B. der Gesamtabfluss oder die Grundwasserneubildung) über die entsprechenden Abflusspfade (z. B. Gewässernetz oder Grundwasseroberfläche) akkumuliert werden. Das dazu eingesetzte Verfahren

zur sogenannten Abflussakkumulation sollte universell auf einem Raster (einer Matrix) einsetzbar sein, um die Einbindung verschiedener Architekturen von hydrologischen Modellen zu ermöglichen. Bei diesem Ansatz resultieren die Akkumulationswege aus den Fließrichtungen, die durch hochaufgelöste Modelle der Gelände- oder Grundwasseroberfläche vorgegeben werden. Aufgrund der Größe des Modellgebietes und der sehr großen Anzahl zu bilanzierender Rasterzellen – die Analyse muss in der Auflösung des Oberflächenmodells durchgeführt werden – ist die Berechnung der Abflussakkumulation numerisch durchaus herausfordernd. Im Rahmen des Projektes WADKlim wurde deshalb der sehr leistungsfähige neue Algorithmus von Zhou et al. (2019) implementiert und für die Bilanzierung von tatsächlichen Wassermengen erweitert. Für die Abflussakkumulation zur Berechnung der Indizes werden als erstes die Raster der entsprechenden hydrologischen Größe auf das hochaufgelöste Oberflächenmodell projiziert (downscaling) und dann Zhou's Algorithmus gestartet. Es resultiert ein Raster mit den Summen der hydrologischen Größe auf den resultierenden Akkumulationswegen. Durch diese Methodik können auch für sehr kleine Einzugsgebiete, beispielsweise für Grundwasserfassungen, sicher die zum Dargebot beitragenden Flächen identifiziert und bilanziert werden.

Für die konkrete Berechnung der oben eingeführten spezifischen Indizes werden die jeweiligen Dargebots-, Nutzungs- und Gewinnungsgrößen zuerst in ein einheitliches Datenraster überführt und dann für die NUTS-3-Regionen mit dem Akkumulationsalgorithmus quantifiziert. Dabei wird die kumulierte GWNB der NUTS-3-Region zugeteilt, in der die Grundwasserströmung in die Vorflut endet. Für den WGI (kumulierte Form) werden entlang aller Randpunkte der NUTS-3-Regionen, über die ein Ausfluss im Gewässernetz stattfindet, die kumulierten Werte addiert. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Daten zur Wassernutzung und -gewinnung ebenfalls wie gerasterte hydrologische Größen zu behandeln. Das bedeutet, wenn zukünftig Gewinnungs- oder Nutzungsdaten in höherer räumlicher Auflösung vorliegen, können sie ohne zusätzlichen Entwicklungsaufwand in die Bilanzierung einbezogen werden. Diese generelle Vorgehensweise erlaubt es auch, in einer weiteren Vorstufe der Datenaufbereitung die Wassertransfers in die Berechnung einzubeziehen. Beispielsweise könnten Verschiebungen von Wassermengen abgebildet werden, die über das Fernwassernetz oder von Talsperren in urbane Gebiete transportiert werden. Damit würde eine Umrechnung von Wassergewinnungs- in Wassernutzungsindizes möglich werden. Aufgrund der fehlenden Datenbasis zu den Wassertransfers in Deutschland konnten solche Berechnungen im Rahmen des Projektes WADKlim jedoch noch nicht durchgeführt werden.

2.3.3.3 Indizes zur Charakterisierung von Dürreperioden

Autoren: McNamara, I., Herrmann, F.

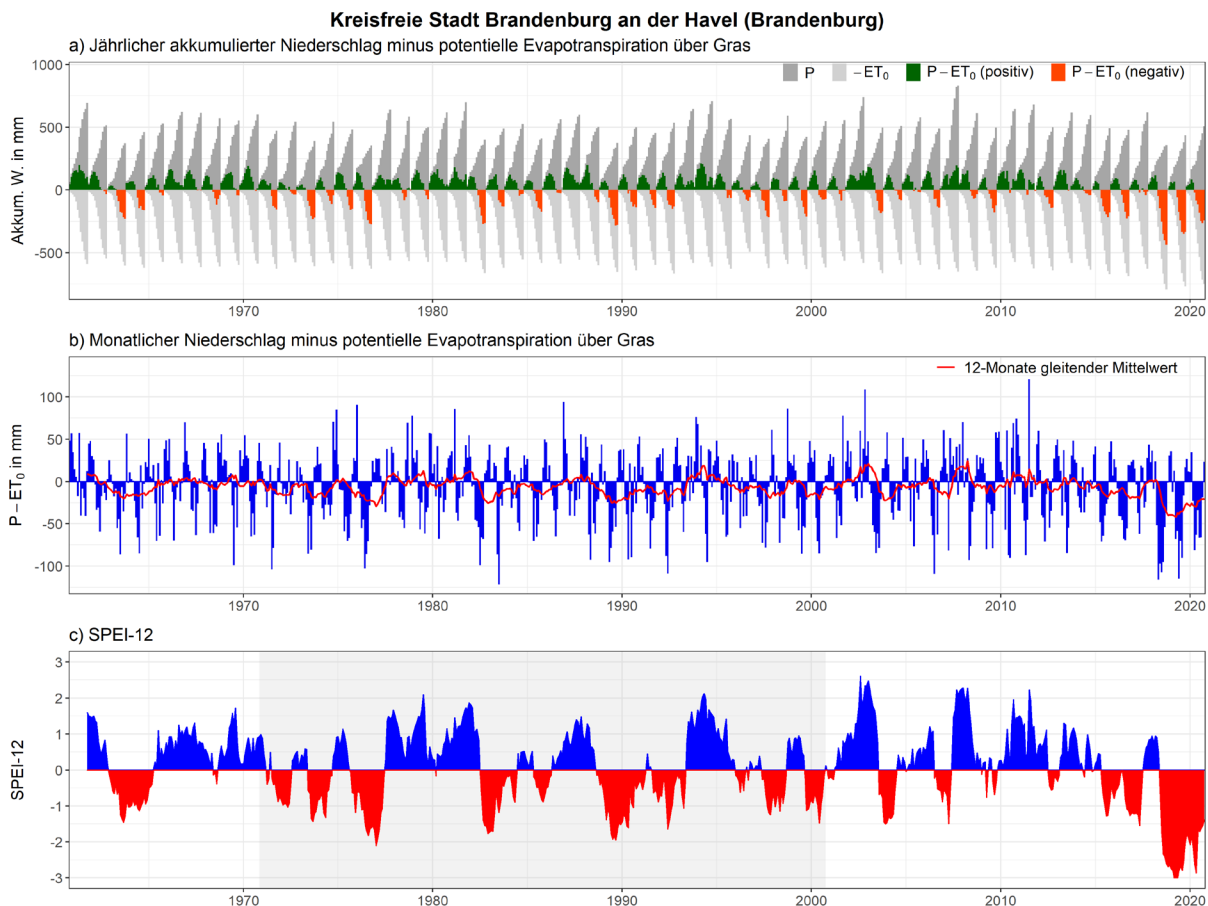
Als Informationsquelle für die Charakterisierung und Bewertung von meteorologischer Trockenheit auf verschiedenen Zeitskalen haben sich meteorologische Dürreindizes bewährt. Im Rahmen des Projektes WADKlim wurden der Standardisierte Niederschlagsindex (engl.: Standardized Precipitation Index, SPI; (McKee et al., 1993) und der Standardisierte Niederschlags-Evapotranspirationsindex (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index, SPEI; (Beguería et al., 2014; Vicente-Serrano et al., 2010)) in einer hohen räumlichen Auflösung über Deutschland berechnet. Als Datengrundlage dienten die ebenfalls für die Simulationen mit dem Modell mGROWA verwendeten klimatologischen Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

SPI und SPEI sind monatliche Indikatoren zur Bewertung von meteorologischer Dürre, wobei der SPI nur den monatlichen Niederschlag (P) als Eingangsgröße benötigt und der SPEI sowohl P als auch die monatliche potenzielle Evapotranspiration (ET₀) verwendet. Bei der Berechnung wird je nach untersuchter Zeitskala die Summe von P oder der Differenz P-ET₀ (klimatische

Wasserbilanz) in den vergangenen n Monaten gebildet, z. B. für SPEI-12 über die vergangenen 12 Monate. Die monatlich kumulierten Werte von P und $P-ET_0$ ergeben wieder eine Zeitreihe und werden dann an eine standardisierte Wahrscheinlichkeitskurve angepasst. Es resultieren SPI/SPEI-Werte, die dann jeweils ein Vielfaches der Standardabweichung vom Medianwert darstellen. Für die Definition der Wahrscheinlichkeitskurve wird ein Referenzzeitraum (hier 1971-2000) festgelegt. Da die Werte an eine standardisierte Kurve angepasst werden, ist eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Gebieten möglich. Details zur Methodik können oben genannter Originalliteratur entnommen werden. Beide Indizes können wichtige Informationen in Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels liefern. Insbesondere eignet sich SPEI für solche Studien, da die Wasserverfügbarkeit für die Vegetation nicht nur von P abhängig ist, sondern auch durch ET_0 beeinflusst wird. Diesen Zusammenhang spiegelt SPEI durch die Berücksichtigung dieser beiden zeitlich variablen und durch den Klimawandel veränderlichen Größen (Beguería et al., 2014). Die Analyse von SPI und SPEI auf verschiedenen Zeitskalen kann zu Erkenntnissen führen, wie sich meteorologische Dürre auf verschiedene Komponenten des Wasserkreislaufs auswirkt. Beispielsweise reagiert die Bodenfeuchtigkeit auf einer relativ kurzen zeitlichen Skala (1 bis 6 Monate) auf Anomalien in der klimatischen Wasserbilanz, während sich im Grundwasserspeicher und im Gebietsabfluss eher die längerfristigen meteorologischen Anomalien (12 oder 24 Monate) widerspiegeln (WMO, 2012).

Die Abbildung 8 veranschaulicht die zeitliche Entwicklung von Feucht- und Trockenperioden über den 60-Jahres-Zeitraum 1961-2020, wobei für die Berechnung die räumlichen Mittelwerte von P und ET_0 über eine exemplarische NUTS-3-Region verwendet wurden. Die Dürre in den Jahren 2018 bis 2020 ist sehr deutlich sichtbar, was auf die Kombination aus reduziertem Niederschlag und erhöhtem potenziellen Verdunstungsniveau infolge der steigenden Temperaturen zurückzuführen ist. Die Intensität und der genaue Zeitpunkt von meteorologischen Dürren variieren von Region zu Region, weshalb es wichtig ist, die Auswirkungen von Dürren in einer hohen räumlichen Auflösung zu bewerten.

Abbildung 8: Exemplarische Zeitreihendarstellung zum SPEI-12 für die NUTS-3-Region Kreisfreie Stadt Brandenburg an der Havel. Die 1. Zeile zeigt, die im Jahresverlauf akkumulierte klimatische Wasserbilanz (P-ET₀). Die 2. Zeile zeigt die Zeitreihe der Monatssummen von P-ET₀ und zur Veranschaulichung ein 12-monatiges laufendes Mittel. Die 3. Zeile zeigt den aus dieser Zeitreihe berechneten SPEI-12. Bezugsperiode (grau Schattierung) für die dahinterliegende Statistik ist die Periode 1971 – 2000.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Eine Methode zur Quantifizierung von Trockenheit in Dürrezeiten besteht darin, die Anzahl der Monate mit einem SPI- oder SPEI-Wert unter einem bestimmten Schwellenwert zu betrachten. Dabei werden die im Standardized Precipitation Index User Guide (WMO, 2012) vorgestellten Schwellenwerte verwendet, wobei ein Wert kleiner -1 als moderat trocken, kleiner -1,5 als sehr trocken und kleiner -2 als extrem trocken angesehen wird. Für die langfristige Darstellung von regional verschiedenen Dürrezeiträumen und deren jeweilige Ausprägung in Kartenform, kann dann die Anzahl der Monate mit Überschreitungen einer dieser Schwellenwerte in einzelnen Jahren verwendet werden (siehe Kapitel 2.3.7 und 2.3.8).

2.3.3.4 Konzept der Minimumdekaden

Autor: Herrmann, F.

In der langfristigen wasserwirtschaftlichen Planung zur Nutzung des Wasserdargebotes wurden im 20. Jahrhundert hauptsächlich langjährige – in sehr vielen Fällen 30-jährige – Mittelwerte verwendet. Diese wurden für sogenannte Referenzperioden berechnet, die sich häufig an klimatologischen Referenz- oder Normalperioden orientierten. In Deutschland basieren beispiels-

weise noch heute genutzte Planungsgrundlagen auf der relativ niederschlagsreichen Referenzperiode 1971-2000. Mit den stärker und häufiger werdenden Indizien für einen signifikanten Einfluss des Klimawandels auf die Wasserressourcen setzte sich dann am Beginn des 21. Jahrhunderts die Erkenntnis durch, dass solche langjährigen Mittelwerte langfristig nicht annähernd konstant bleiben würden und deshalb durch geeignete weitere Planungsgrundlagen ergänzt werden müssen (Milly et al., 2008).

Um diesen neuen Notwendigkeiten mit Bezug auf die Grundwasserneubildung als Planungsgrundlage in der Grundwasserbewirtschaftung gerecht zu werden, schlagen Fliß et al., (2021) die Bestimmung sogenannter Minimumdekaden der GWNB und die Verwendung der Mittelwerte der Jahressummen der GWNB in diesen Zeiträumen als zusätzliche Planungsgrundlage vor. Für die Bestimmung werden die entsprechenden Jahressummen der GWNB einer sehr langen Zeitreihe entlang des Zeitstrahls jeweils über eine 10-Jahre-Zeitspanne in die Zukunft gemittelt. Aus diesen 10-Jahre-Mittelwerten wird der kleinste als Mittelwert der Minimumdekade angesehen. Das erste Jahr der Minimumdekade wird ebenfalls festgehalten, um eine zeitliche Einordnung des Auftretens zu ermöglichen. Dieses Berechnungskonzept kann auch auf andere hydrologische Größen angewendet werden. Im Rahmen der Analysen im Projekt WADKlim wurde es auf die GWNB (s. Kapitel 2.3.9, 2.3.10) und auf den Füllstand der unterirdischen Wasserspeicher zum Ende des hydrologischen Jahres mit den üblicherweise geringsten Wasservorräten (Oktober) (s. Kapitel 2.3.11, 2.3.12) angewendet.

2.3.4 Klimaprojektionen als Basis für die Entwicklung von Zukunftsszenarien

Autoren: Herrmann, F., McNamara, I.

Für die Bereitstellung von Szenarien zum Einfluss des Klimawandels auf die Wasserressourcen wurden mit den Modellketten RCP-GCM-RCM-mGROWA bzw. RCP-GCM-RCM-ParFlow Projektionen für die Zeitspanne 1971 bis 2100 durchgeführt. Die Representative Concentration Pathway (RCP)-Szenarien (Moss et al., 2010) geben in den Modellketten die möglich erscheinende globale Erwärmung vor. Hinter RCP (engl. Representative Concentration Pathways) stehen Annahmen für eine zukünftig weiter veränderte Strahlungsbilanz der Erdatmosphäre, die aus steigenden Treibhausgaskonzentrationen resultiert. Die RCP-Szenarien liefern Randbedingungen für Globale Klimamodelle (GCM, General Circulation Model) welche wiederum die Randbedingungen für räumlich höher auflösende Regionale Klimamodelle (RCM, Regional Climate Model) bereitstellen. An der Schnittstelle zwischen den RCM und den Impact-Modellen mGROWA und ParFlow erfolgte eine Bias-Korrektur der simulierten täglichen Niederschlagssummen mit dem LOCI-Verfahren (Local Intensity Scaling; (Schmidli et al., 2006), die Berechnung einer täglichen Summe der potenziellen Evapotranspiration über Gras aus den simulierten atmosphärischen Zustandsgrößen und der Strahlungsbilanz, sowie ein räumliches Downscaling vom RCM-Gitter auf die verwendeten Modellraster.

Die Tabelle 4 listet die mit dem Ziel ausgewählten Klimaprojektionen (RCP-GCM-RCM), insbesondere sehr trockene Zukunftsperioden untersuchen zu können. Es war nicht das Ziel im Projekt, ein gesamtes RCP-GCM-RCM-Ensemble zu analysieren. Vielmehr wurde die Auswahl im Hinblick auf die erwartete Wirkung der Klimaänderungen in den Projektionen auf die Grundwasserressourcen getroffen, d.h. mit dem Ziel längere Phasen von Grundwasserdürre abbilden zu können. Die drei Klimaprojektionen entstammen dem EURO-CORDEX-Ensemble (Jacob et al., 2014) bzw. dem Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De; (Hübener

et al., 2017)) und sind Teil des DWD-Referenz-Ensembles v2018⁵ R85-CA2-CLM ist zusätzlich auch Teil des DWD-Kern-Ensembles v2018⁶.

Tabelle 4: Für die Bereitstellung von Szenarien im Rahmen des Projektes WADKlim ausgewählte Klimaprojektionen. RCP2.6 wird auch als „Klimaschutz-Szenario“ und RCP8.5 als „Weiter-wie-bisher-Szenario“ bezeichnet.

Szenario	Globalmodell	Lauf	Regionalmodell	Abkürzung
RCP2.6	ICHEC-EC-EARTH	12	SMHI-RCA4	R26-E12-RCA
RCP8.5	CCCMa-CanESM2	1	CCLM 4-8-17	R85-CA2-CLM
RCP8.5	MIROC-MIROC5	1	CCLM 4-8-17	R85-MI5-CLM

Einen genauen Überblick über ReKliEs-De sowie die Ableitung von Klimainformationen und Änderungssignalen aus diesen Projektionen liefern Hübener et al. (2017). Im Rahmen von WADKlim wurde R85-CA2-CLM ausgewählt, weil es im Vergleich zu ReKliEs-De deutschlandweit die stärkste Abnahme der mittleren Jahresniederschläge in der Periode 2071-2100 gegenüber 1971-2000 um ca. 80 mm/a zeigt. R85-MI5-CLM zeigt ebenfalls keine signifikante flächendeckende Zunahme der Jahresniederschläge am Ende des Jahrhunderts, im Gegensatz zu vielen anderen Projektionen in ReKliEs-De. R26-E12-RCA zeigte deutschlandweit die stärkste Abnahme der mittleren Jahresniederschläge in der Periode 2041-2070 um ca. 10 mm/a. Aufgrund der Kombination längerer Phasen unterdurchschnittlicher Niederschläge mit einem durch den Temperaturanstieg bedingten Anstieg des potenziellen Verdunstungsniveaus, war für diese drei Klimaprojektionen in Verbindung mit den Impakt-Modellen mGROWA und ParFlow die Abbildung ausgeprägter Grundwasserdürre für die Zukunft zu erwarten.

2.3.5 Wassernutzungsdaten für Deutschland

2.3.5.1 Wassernutzung und -gewinnung auf Basis von Daten der statistischen Ämter

Autor*innen: Uschan, T., Flörke, M.

Die Grundlagen der Wassernutzungsdaten bilden die Statistiken der Wasserwirtschaft der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, die getrennt für den öffentlichen und nichtöffentlichen Bereich erhoben und alle drei Jahre aktualisiert werden. Die öffentliche Wasserversorgung dient maßgeblich der Trinkwasserversorgung der Bevölkerung, die nichtöffentliche Wasserversorgung erfasst Betriebe, die pro Jahr mindestens 2.000 m³ Wasser selbst gewinnen oder mindestens 10.000 m³ Wasser als Fremdbezug beziehen.

Die Wassernutzungsdaten können der Regionaldatenbank Deutschland⁷ entnommen werden, in der diese u. a. für NUTS-3-Regionen vorliegen. Die regionale Zuordnung zu einer der 401 NUTS-3-Region⁸ in Deutschland erfolgt bei der öffentlichen Wasserversorgung nach dem Standort der

⁵ https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimaprojektionen/referenz-ensemble_tabelle.html?nn=541460; geprüft am 20.06.2023

⁶ https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtld_rcp-daten-satz_node.html; geprüft am 20.06.2023

⁷ Verfügbar unter: www.regionalstatistik.de/genesis/online

⁸ In WADKlim wird die Systematik NUTS 2016 genutzt.

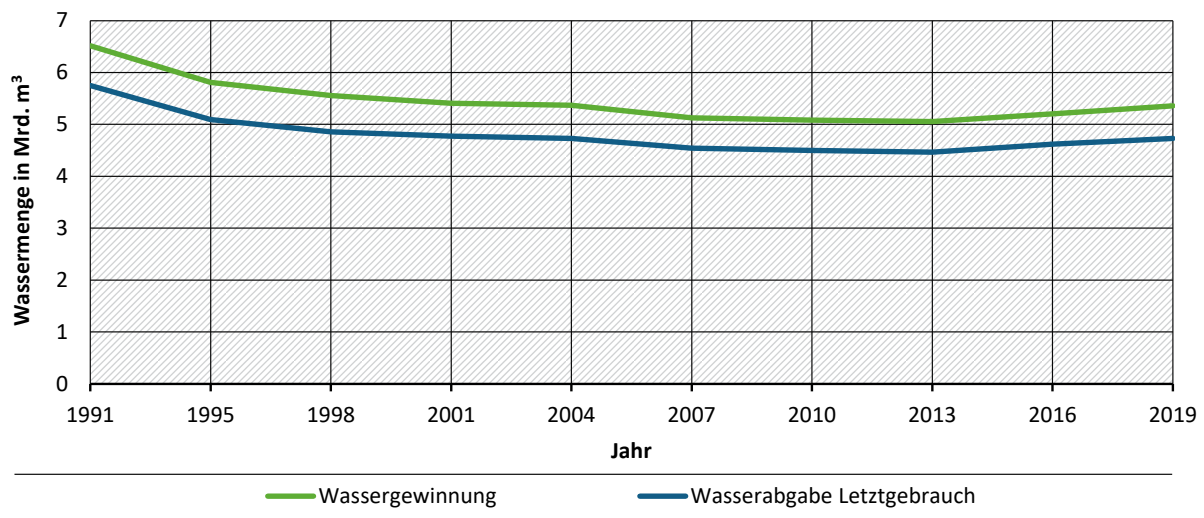
Wassergewinnungsanlage, bei der nichtöffentlichen Wasserversorgung nach dem Sitz des Betriebes. Zusätzlich werden Wassernutzungsdaten des Statistischen Bundesamtes genutzt. Die neueste zum Zeitpunkt dieser Berichtsentscheidung verfügbare Statistik bildet das Jahr 2019 ab.

Öffentliche Wasserversorgung

Im Jahr 1991 wurden in Deutschland 6,5 Mrd. m³ Wasser durch öffentliche Wasserversorgungsunternehmen (WVU) gewonnen⁹, in 2013 waren es 5,1 Mrd. m³ (Statistisches Bundesamt, 2022d). Die Reduzierung der gewonnenen Wassermengen (Abbildung 9) ist zum einen auf reduzierte Leitungsverluste und zum anderen auf geringere Pro-Kopf-Wassernutzungen durch die Bevölkerung zurückzuführen (Statistisches Bundesamt, 2022d). Seit 2013 steigt die gewonnene Wassermenge wieder leicht an und betrug im Jahr 2019 5,4 Mrd. m³.

Das gewonnene Wasser wird u. a. an Letztverbraucher – Haushalte, gewerbliche Unternehmen, sonstige Abnehmer, mit denen die öffentlichen Wasserversorgungsunternehmen die Wassermengen unmittelbar abrechnen – abgegeben. Aufgrund von Wasserwerkseigenverbräuchen, Rohrbrüchen und Messfehlern ist die Wasserabgabe an Letztverbraucher geringer (seit 1991 im Mittel um 0,6 Mrd. m³) als die Wassergewinnung. Im Jahr 2019 wurden 4,7 Mrd. m³ Wasser an die Letztverbraucher abgegeben, wobei ca. 81 % an Haushalte und Kleingewerbe (u. a. Bäckereien, Friseure, Arztpraxen) und ca. 19 % an gewerbliche und sonstige Abnehmer abgegeben wurden (Statistisches Bundesamt, 2022d).

Abbildung 9: Zeitliche Entwicklung der öffentlichen Wassergewinnung (alle Quellen) und Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung im Zeitraum von 1991 bis 2019. Die Datenerfassung durch das Statistische Bundesamt erfolgt alle drei Jahre.

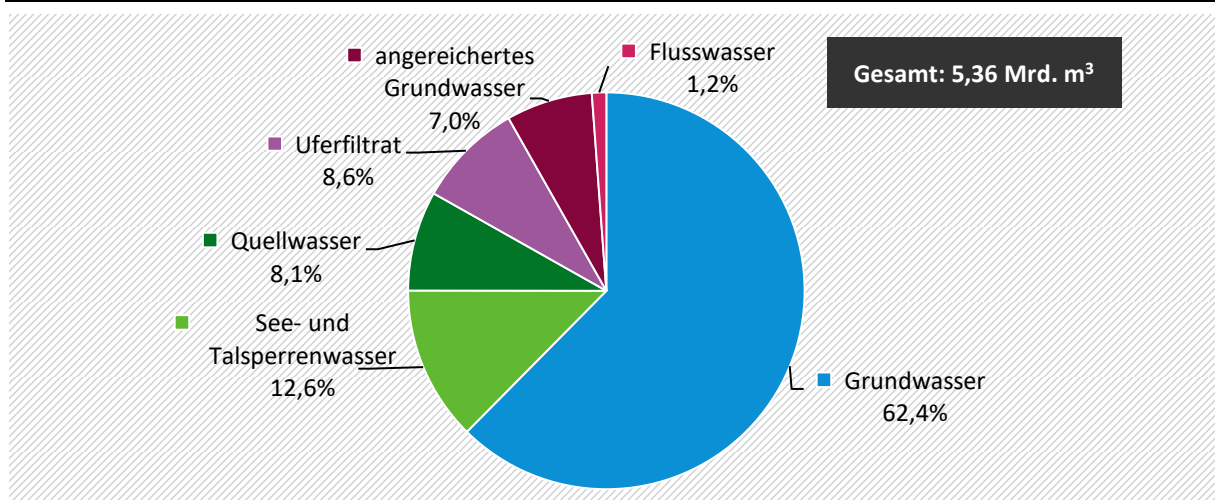


Quelle: eigene Darstellung nach Daten von Statistisches Bundesamt (2022d), Ruhr-Universität Bochum.

Die primäre Wasserquelle der öffentlichen Wasserversorgung stellt das Grundwasser dar. 2019 wurden in Deutschland 62,4 % des Wassers aus dem Grundwasser und 12,6 % aus See- und Tal-sperrenwasser gewonnen (Abbildung 10). Der prozentuale Anteil von angereichertem Grundwasser, Uferfiltrat und Quellwasser betrug je etwa 8 %. Flusswasser spielte mit 1,2 % eine untergeordnete Rolle. Die Trinkwasserversorgung aus dem Grundwasserangebot nimmt somit eine besonders bedeutende Rolle ein.

⁹ Inkludiert sind Wassermengen, die durch Direktversorger (direkte Wasserabgabe an Letztverbraucher) und Kernversorger (ausschließliche Weiterleitung von Wasser) gewonnen wurden.

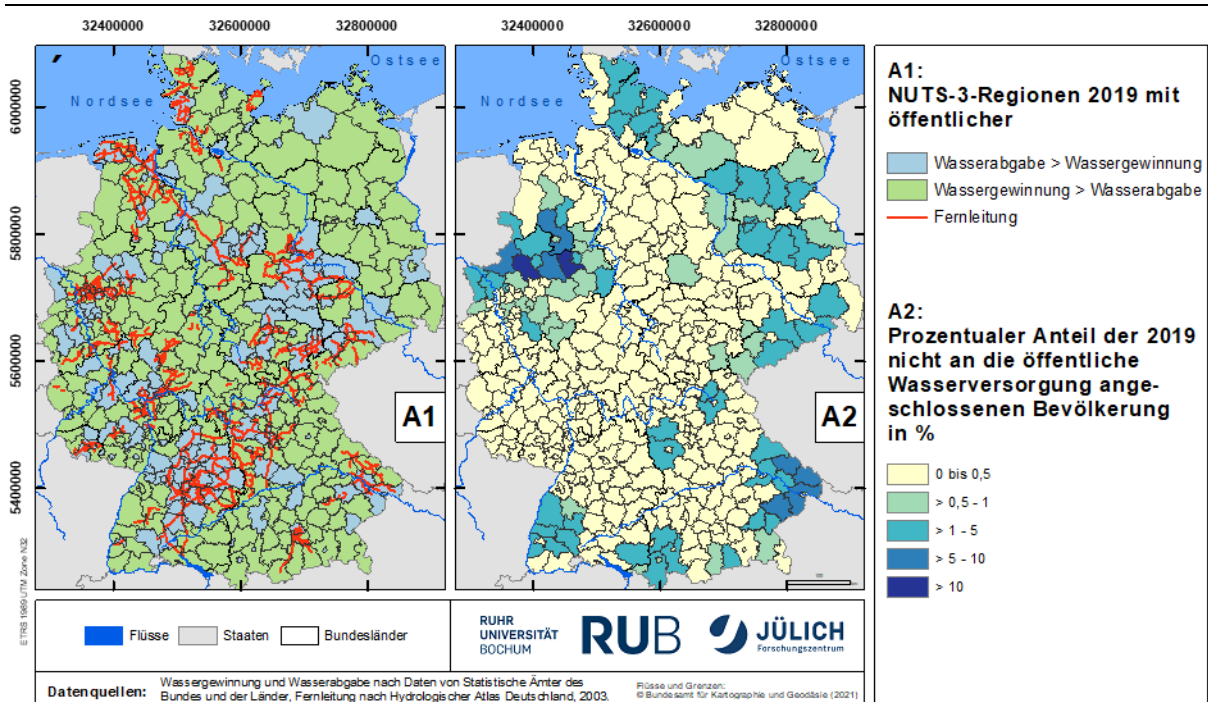
Abbildung 10: Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung nach Wasserarten im Jahr 2019.



Quelle: eigene Darstellung nach Daten von Statistisches Bundesamt (2022d), Ruhr-Universität Bochum.

Wird die Differenz aus Wassergewinnung (alle Quellen) und -abgabe an Letztverbraucher gebildet, können Regionen identifiziert werden, in denen mehr Wasser an die Letztverbraucher abgegeben als gewonnen wird (negative Bilanz). NUTS-3-Regionen mit einer negativen Bilanz sind demzufolge auf eine externe Zufuhr von Wasser aus anderen NUTS-3-Regionen angewiesen (Abbildung 11 A1).

Abbildung 11: Darstellung für NUTS-3-Regionen: (A1) Differenz aus Wasserabgabe und Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung, (A2) Prozentualer Anteil der nicht an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossenen Bevölkerung im Jahr 2019.



Quelle: eigene Darstellung nach Daten von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2003); Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2022b, 2022c), Ruhr-Universität Bochum.

In den Regionen, in denen die Wasserabgabe die -gewinnung übersteigt, muss die Wasserversorgung ganz oder teilweise durch ein (Fern)Leitungsnetz erfolgen, welches Wasser aus anderen (teilweise benachbarten) NUTS-3-Regionen liefert (hellblau eingefärbte NUTS-3-Regionen in Abbildung 11 A1). Einige dieser Regionen befinden sich bspw. in Baden-Württemberg und sind im und um den Regierungsbezirk Stuttgart lokalisiert. Auch in München, in Bereichen von Mittel- und Oberfranken, in Sachsen-Anhalt und in den Regierungsbezirken Braunschweig, Weser-Ems, Darmstadt, Koblenz sowie im Westen von Nordrhein-Westfalen sind solche NUTS-3-Regionen zu finden. Veränderungen dieser räumlichen Verteilung sind in den letzten Jahren kaum zu beobachten.

Viele Regionen, in denen die Wasserabgabe größer als die Wassergewinnung ist, werden von einer Fernleitung durchzogen. Abbildung 11 A1 gibt hierfür einen Überblick über das Fernleitungsnetz aus dem Hydrologischen Atlas für Deutschland¹⁰. Bezüglich der Fernleitungsnetze können keine Aussagen zum Versorgungsumfang, zur Ursprungsregion und zur Quelle der Wassergewinnung auf Basis der vorhandenen öffentlich zugänglichen Daten getätigt werden.

In Deutschland liegt der Anteil der Bevölkerung, die an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossen ist, seit 2010 bei über 99 %. Dieser Wert ist über die letzten Jahre stabil: 2010 und 2013 jeweils 99,3 % sowie 2016 und 2019 99,4 % (Statistisches Bundesamt, 2022d). Bei der nicht angeschlossenen Bevölkerung (ca. 488.000 Personen) handelt es sich um Haushalte, die ihr Wasser aus Haus- oder Eigenbrunnen beziehen und nicht an das öffentliche Versorgungsnetz angeschlossen sind. Im ländlichen Raum sind Hausbrunnen ein wichtiger Baustein der Wasserversorgung. Jedoch sind Hausbrunnen für qualitative Belastungen genauso wie für sinkende Grundwasserstände anfällig, die auch durch den Klimawandel beeinflusst werden. Die räumliche Verteilung der nicht angeschlossenen Bevölkerung ist in Abbildung 11 A2 dargestellt.

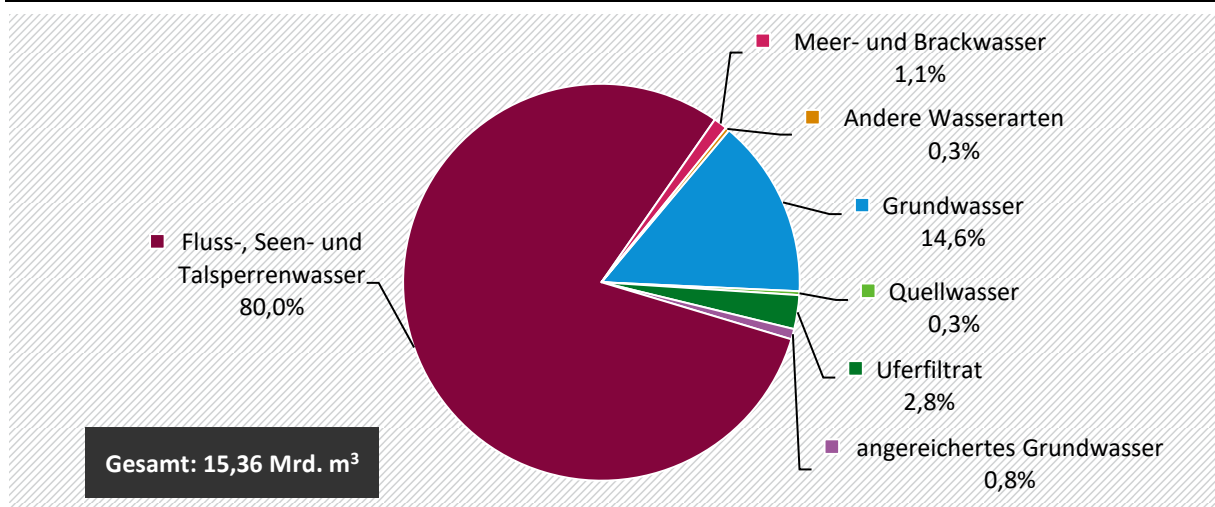
Aus Abbildung 11 A2 wird ersichtlich, dass der überwiegende Anteil der Bevölkerung in Deutschland an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossen ist. NUTS-3-Regionen mit größeren Anteilen nicht angeschlossener Bevölkerung befinden sich im Nördlichen Landrücken, Erzgebirge, Schwarzwald, Bayerischer Wald, Allgäu und in der Westfälischen Bucht. Vor allem der Nördliche Landrücken und der Bayerische Wald spiegeln ländliche Regionen mit geringer Bevölkerungsdichte wider. Die NUTS-3-Regionen mit dem größten Anteil von nicht angeschlossener Bevölkerung sind der Kreis Coesfeld (10 %) und der Kreis Gütersloh (12 %).

Nichtöffentliche Wasserversorgung

Im betrieblichen Bereich wurden im Jahr 2019 insgesamt 15,4 Mrd. m³ Wasser eigenständig gewonnen sowie 2,1 Mrd. m³ als Fremdbezug aus dem Netz der öffentlichen Wasserversorgung und von anderen Betrieben und Einrichtungen bezogen (Statistisches Bundesamt, 2022c). Im Gegensatz zur öffentlichen Wasserversorgung findet die Wassergewinnung im betrieblichen Bereich primär aus Oberflächenwasser und nur sekundär aus Grundwasser statt (Abbildung 12). 80,0 % des Wassers werden aus Fluss-, Seen-, und Talsperrenwasser und nur 14,6 % aus dem Grundwasser gewonnen. Entnahmen aus weiteren Wasserarten weisen Anteile im unteren einstelligen Prozentbereich auf.

¹⁰ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2003).

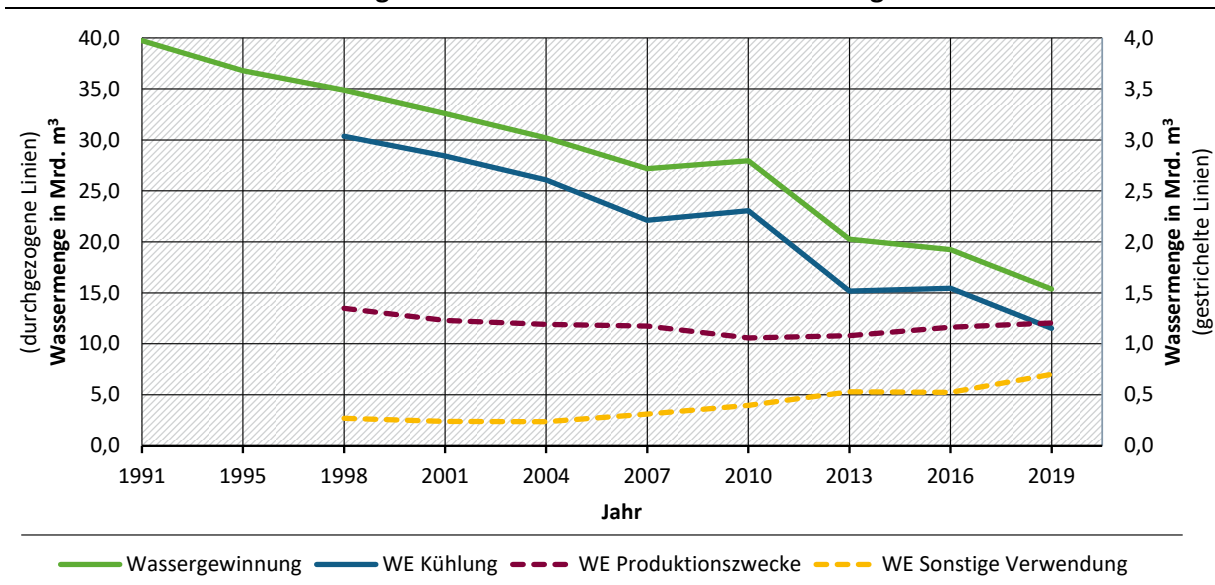
Abbildung 12: Wassergewinnung der nichtöffentlichen Wasserversorgung nach Wasserarten 2019 (nur Eigengewinnung).



Quelle: eigene Darstellung nach Daten von Statistisches Bundesamt (2022c), Ruhr-Universität Bochum.

Abbildung 13 verdeutlicht die Entwicklung der jährlichen betrieblichen Wassergewinnung im Zeitraum 1991 bis 2019. In diesem Zeitraum hat sich die Wassergewinnung der nichtöffentlichen Wasserversorgung von 39,8 Mrd. m³ auf 15,4 Mrd. m³ mehr als halbiert (Statistisches Bundesamt, 2022c). Dies ist u. a. auf eine Mehrfach- und Kreislaufnutzung des eingesetzten Wassers in betrieblichen Prozessen, insbesondere von Kühlwasser in Produktions- und Stromerzeugungsanlagen, zurückzuführen. 1991 wurden etwa 3 %, 2019 bereits etwa 12 % mehrfach genutzt (Statistisches Bundesamt, 2022c).

Abbildung 13: Zeitliche Entwicklung der Wassergewinnung (alle Quellen) und des Wassereinsatzes (WE) der nichtöffentlichen Wasserversorgung im Zeitraum von 1991 bis 2019. Die Datenerfassung durch das Statistische Bundesamt erfolgt alle drei Jahre.

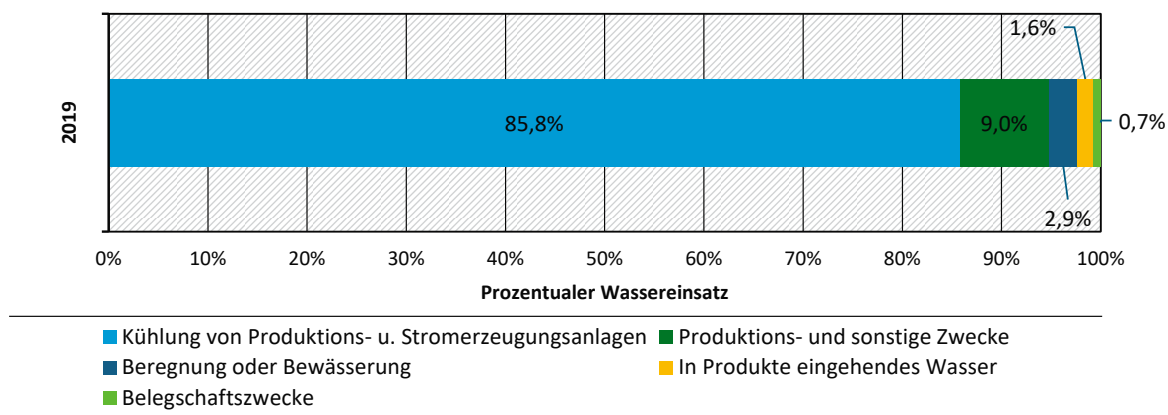


Quelle: eigene Darstellung nach Daten von Statistisches Bundesamt (2022c), Ruhr-Universität Bochum.

In Abbildung 13 ist auch der Wassereinsatz¹¹ (WE) für die drei Kategorien Kühlung, Produktionszwecke und sonstige Verwendung dargestellt. Der Anteil des Wassers zur Kühlung von Produktions- und Stromerzeugungsanlagen nimmt kontinuierlich ab. Der Wassereinsatz für Produktionszwecke (das unmittelbar mit dem Produkt in Berührung kommende Wasser) ist annähernd konstant und der Wassereinsatz zur sonstigen Verwendung leicht ansteigend.

Wird die Kategorie der sonstigen Verwendung weiter in die Unterkategorien Belegschaftszwecke, Bewässerung und in Produkte eingehendes Wasser aufgegliedert, resultiert die in Abbildung 14 für das Jahr 2019 dargestellte Verteilung.

Abbildung 14: Wassereinsatz in nichtöffentlichen Betrieben nach Verwendungszweck 2019 (nur Einfachnutzung).



Quelle: eigene Darstellung nach Daten von Statistisches Bundesamt (2022c), Ruhr-Universität Bochum.

Der Wassereinsatz zur Kühlung von Produktions- und Stromerzeugungsanlagen nahm 2019 den prozentual größten Anteil ein (85,8 %), während für Produktions- und sonstige Zwecke nur 9 % der Wassermenge eingesetzt wurden. Wasser zur Beregnung, für Belegschaftszwecke und in Produkte eingehend machte 5,2 % aus. Bei einer regionalen Betrachtung des Wassereinsatzes überwiegt in annähernd 60 % der NUTS-3-Rgionen der Wassereinsatz zur Kühlung, hier vor allem entlang von Oberflächengewässern, wie Rhein, Main und Unterelbe, aber auch in der Lausitz, in Südbayern und in Teilen Nordrhein-Westfalens.

Wird der Wassereinsatz nicht nach Verwendungszweck, sondern nach Wirtschaftszweig gegliedert, treten die Energieversorgung mit ca. 56 % und das verarbeitende Gewerbe mit ca. 35 % als Hauptwassernutzer hervor (Statistisches Bundesamt, 2022c). Die übrigen Wirtschaftsbereiche – u. a. Bergbau, Land- und Forstwirtschaft – nutzten die restlichen etwa 9 %.

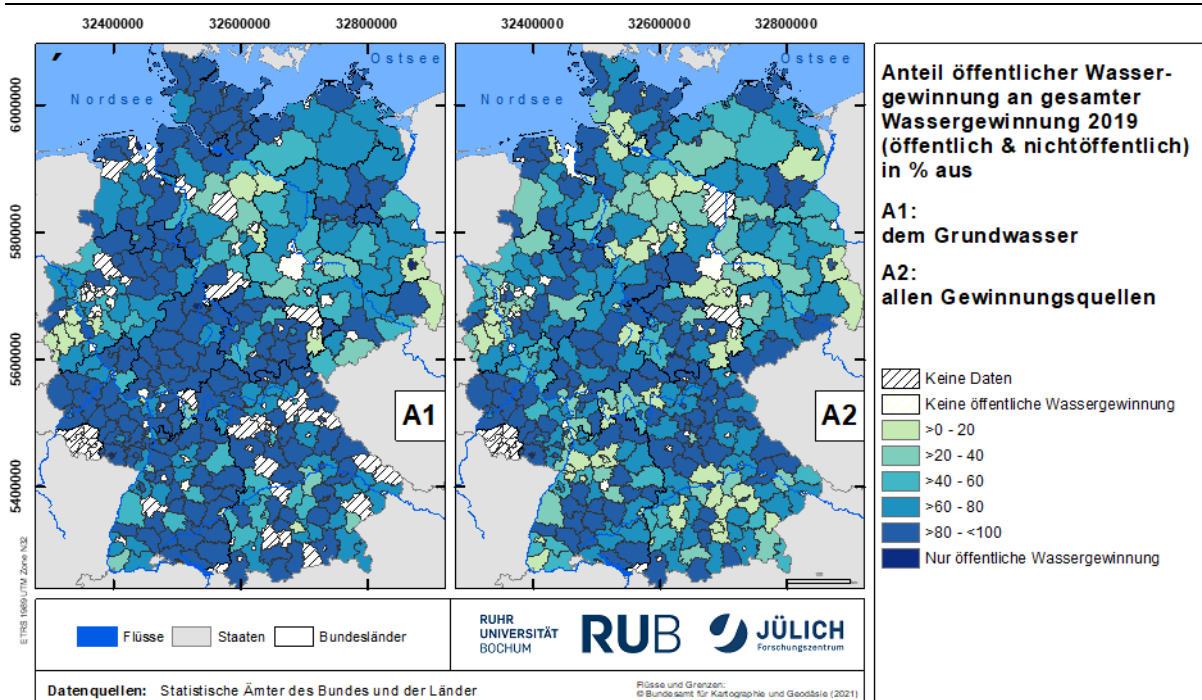
Verhältnis zwischen öffentlicher und nichtöffentlicher Wassergewinnung

Wird die Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung zur insgesamt gewonnenen Wassermenge (öffentlich und nichtöffentlich) ins Verhältnis gesetzt, können Aussagen zur räumlichen Verteilung der dominierenden Wassergewinnung getroffen werden. In Abbildung 15 ist dieses Verhältnis als prozentualer Anteil bezogen auf die öffentliche Wassergewinnung im Jahr 2019 dargestellt. Die Abbildung 15 A1 bezieht sich auf die Gewinnung aus dem Grundwasser, die Abbildung 15 A2 auf alle in der Statistik ausgewiesenen Gewinnungsquellen¹².

¹¹ Nur Einfachnutzung ohne Wieder- bzw. Weiterverwendung des Wassers für weitere Zwecke. Aufgrund geänderter Erfassungsmethodik ist eine Aufschlüsselung der drei Hauptverwendungszwecke nur bis zum Jahr 1998 möglich.

¹² Öffentliche Gewinnung aus Fluss-, Grund-, Quell-, See- und Talsperrenwasser, angereichertem Grundwasser und Uferfiltrat sowie nichtöffentliche Gewinnung zusätzlich aus Meer- und Brackwasser sowie anderen Wasserarten.

Abbildung 15: Anteil der öffentlichen Wassergewinnung an der gesamten Wassergewinnung aus dem Grundwasser (A1) und aus allen Gewinnungsquellen (A2) im Jahr 2019.



Quelle: eigene Darstellung nach Daten von Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2022a, 2022c), Ruhr-Universität Bochum.

Der Anteil der öffentlichen Wassergewinnung an der gesamten Gewinnung aus dem Grundwasser ist räumlich sehr heterogen verteilt (Abbildung 15 A1). In 269 der NUTS-3-Regionen (etwa 67 %) dominiert die öffentliche Wassergewinnung (Grenze bei >50 %) aus dem Grundwasser, während in 72 NUTS-Regionen (etwa 18 %) die nichtöffentliche Wassergewinnung überwiegt. Eine Auswertung der restlichen 60 NUTS-Regionen ist aufgrund geheim zu haltender oder fehlender Daten nicht möglich.

NUTS-3-Regionen, in denen die nichtöffentliche Wassergewinnung dominiert sind u. a.: Spree-Neiße, Görlitz, Uelzen, Greiz, Rhein-Erft-Kreis, Düren sowie die Städteregion Aachen. Viele dieser NUTS-3-Regionen sind durch eine hohe Dichte an Industriebetrieben und/oder (bewässerten) landwirtschaftlichen Flächen charakterisiert. In den ersten zwei sowie in den letzten drei genannten NUTS-3-Regionen findet darüber hinaus Braunkohlebergbau statt (Lausitzer sowie Rheinisches Braunkohlerevier). Die Grundwasserentnahmen zur langfristigen Absenkung des Grundwasserspiegels sind in diesen NUTS-3-Regionen die Erklärung für die dominierende nicht-öffentliche Wassergewinnung.

In Abbildung 15 A2 ist der Anteil der öffentlichen Wassergewinnung an der gesamten Gewinnung aus allen Gewinnungsquellen enthalten. Die Anzahl der von der öffentlichen Wassergewinnung dominierten NUTS-3-Regionen liegt bei 240 (etwa 60 %), die Anzahl der von der nichtöffentlichen Wassergewinnung dominierten NUTS-3-Regionen bei 140 (etwa 35 %). 21 NUTS-3-Regionen lassen keine Auswertung zu.

Beim Vergleich beider Abbildungen wird sichtbar, dass in vielen NUTS-3-Regionen der Anteil der öffentlichen Wassergewinnung aus dem Grundwasser überwiegt. Bei der Wassergewinnung aus allen Gewinnungsquellen tritt die nichtöffentliche Gewinnung stärker in den Vordergrund. Hier wird deutlich, dass die öffentliche Wassergewinnung primär aus dem Grundwasser und die nichtöffentliche aus Fluss-, Seen- und Talsperrenwasser erfolgt (s. a. Abbildungen 10 und 12).

Herausforderungen

Die Statistiken der Wasserwirtschaft enthalten für einige NUTS-3-Regionen aufgrund von Geheimhaltungspflichten keine Daten. Nach § 16 Abs. 1 des Bundesstatistikgesetzes (BStatG) dürfen aus verfügbaren Daten keine Rückschlüsse auf persönliche und sachliche Verhältnisse der Auskunftspflichtigen gezogen werden. Sollte ein Rückschluss möglich sein, werden einzelne Zellen in den jeweiligen Statistiken geheim gehalten und gesperrt. Um eine Umgehung der Geheimhaltung zu verhindern, werden auch Zellen gesperrt, die nicht geheimhaltungspflichtig sind, aus denen jedoch ein Rückschluss auf die geheim zu haltenden Zellen möglich wäre (z. B. mittels Differenzbildung aus einer gegebenen Summe).

Darüber hinaus führen geänderte Erfassungsgrenzen der Statistiken ebenfalls zu einer Erschwerung der Analyse. Ein Vergleich der Wassernutzung ist über den betrachteten Zeitraum nur bedingt möglich. Beispielsweise wurde bei der Erhebung der nichtöffentlichen Wasserversorgung und der nichtöffentlichen Abwasserentsorgung die Eingrenzung des Berichtskreises auf bestimmte Wirtschaftszweige aufgehoben. Seit 2007 finden sich nun alle Betriebe des nichtöffentlichen Bereiches in den Daten wieder, was vorher nicht der Fall war. Ab dem Berichtsjahr 2010 wurde darüber hinaus die Klassifikation der Wirtschaftszweige geändert, so dass ein Vergleich von einzelnen Wirtschaftszweigen mit Daten aus den Vorjahren nicht möglich ist (Statistisches Bundesamt, 2022d). Auch die Klassifikation der NUTS-3-Regionen ändert sich mit der Zeit, etwa durch Zusammenschlüsse und Trennungen von Regionen.

Des Weiteren wird in der nichtöffentlichen Wasserversorgung nach Eigengewinnung und Fremdbezug differenziert. Der Fremdbezug wird für die Berechnung von Wassernutzungsindizes nicht genutzt, da die Quellregion bzw. der Wasser liefernde Betrieb nicht ermittelt werden kann.

Obwohl relevant, kann die Wasserweiterleitung zwischen verschiedenen Wasserversorgungsunternehmen mittels Fernwasserleitungen in WADKlim nicht direkt berücksichtigt werden. Die vorliegende Datengrundlage der Länderstatistiken reicht nicht aus, um Fließrichtungen sowie Volumenströme der in Deutschland existierenden Fernwasserleitungen zu bestimmen.

2.3.5.2 Bestimmung der tatsächlich bewässerten Flächen und Bewässerungsmengen in der Landwirtschaft

Autoren: McNamara, I., Herrmann, F., Uschan, T.

Mit dem Berechnungsmodul im Wasserhaushaltsmodell mGROWA wurde für die acht Feldfrüchte Weizen, Wintergerste, Roggen, Raps, Kartoffel Reifegruppe (RG) 3, Frühkartoffel RG 1, Zuckerrübe und Mais für die Zeit von 1961 bis 2020 der Bewässerungsbedarf in täglicher Auflösung simuliert, der hier als theoretischer Bewässerungsbedarf für optimale Erträge angesehen wird. Die Steuerung der Bewässerungsgaben in Abhängigkeit von Niederschlagsmustern und feldfruchtspezifischen Regeln sind ausführlich in (Hermann et al., 2016) dargelegt. Die Simulationen wurden auf einem 200 m Raster für alle Ackerflächen des Digitalen Landbedeckungsmodells für Deutschland (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2015) durchgeführt. Die Abbildung 16 zeigt schematisch die für die Abschätzung der tatsächlichen Wassermengen in der Feldbewässerung entwickelte Methodik. In Tabelle 5 sind die zusätzlich zur Simulation verwendeten Datenquellen gegeben.

Die räumliche Verteilung des langjährigen mittleren theoretischen Bewässerungsbedarfs variiert in Abhängigkeit von dem durch die Böden bereitgestellten Wasserspeichervermögen in der Wurzelzone (Feldkapazität im Wurzelraum), dem regionalen Niederschlagsregime sowie zwischen den Feldfrüchten aufgrund ihres Wasserbedarfes in unterschiedlichen Bewässerungszeiträumen (April bis September). Inwiefern diese theoretischen Bewässerungsbedarfe tatsächlich

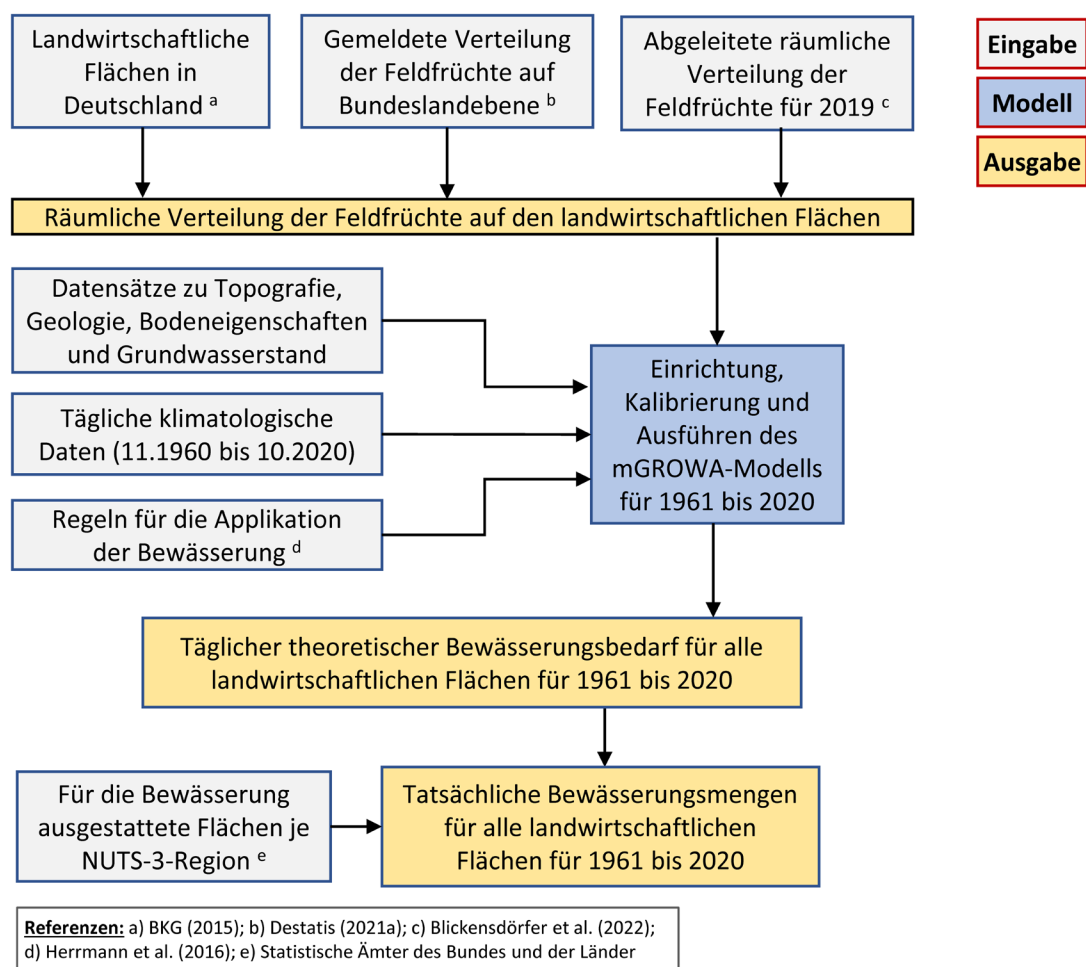
in der Praxis eingesetzt werden, kann auf Grundlage der Simulationen nicht bestimmt werden. Die Simulationen geben jedoch regional differenziert wichtige Hinweise, welche Wassermengen potenziell von der Landwirtschaft für Bewässerungszwecke nachgefragt werden könnten.

Die theoretischen Bewässerungsbedarfe der acht Feldfrüchte können noch nicht direkt in weiteren Analysen, wie z. B. zur Berechnung von Wassernutzungsindizes, verwendet werden. Zunächst müssen deshalb die Simulationsergebnisse in repräsentative Schätzungen des für die Bewässerung in den NUTS-3-Regionen tatsächlich aufzuwendenden Wassers umgerechnet werden. Dazu wurden die Simulationsergebnisse mit zwei Datensätzen kombiniert:

- ▶ der räumlichen Verteilung der Feldfrüchte und
- ▶ den für die Bewässerung ausgestatteten Flächen.

Die Abbildung 16 zeigt schematisch die für die Abschätzung der tatsächlichen Wassermengen in der Feldbewässerung entwickelte Methodik. In Tabelle 5 sind die zusätzlich zur Simulation verwendeten Datenquellen angegeben, aus denen die Informationen zur räumlichen Verteilung der Feldfrüchte und zu den für die Bewässerung ausgestatteten Flächen verwendet wurden. Zusätzliche Datenquellen sind im Anhangband, Anhang A gelistet.

Abbildung 16: Infografik zu Datengrundlagen und Methodik für die Abschätzung der tatsächlichen Wassermengen in der Feldbewässerung in Vergangenheit und Gegenwart.



Quelle: basierend auf Herrmann 2020..

Tabelle 5: Zusätzliche frei verfügbare Datenquellen für die Abschätzung der tatsächlichen Wassermengen in der Feldbewässerung.

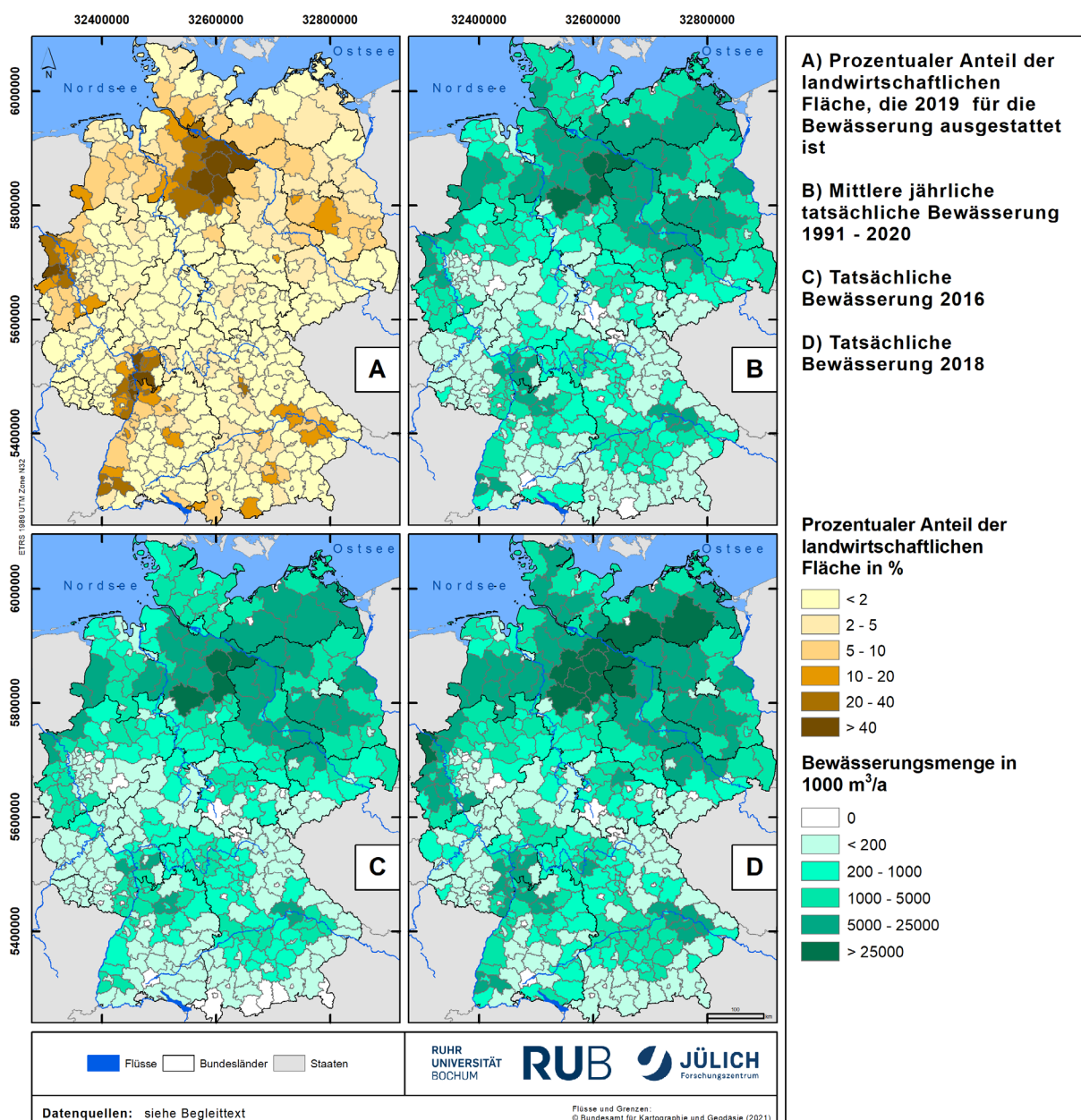
Kurzform	Quelle
BKG (2015)	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2015: Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland, Stand 2015 (LBM-DE2015)
Destatis (2021b)	Bodennutzung der Betriebe - Landwirtschaftlich genutzte Flächen - Fachserie 3 Reihe 3.1.2 - 2020. Statistisches Bundesamt (Destatis) Wiesbaden: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Publikationen/Bodennutzung/landwirtschaftliche-nutzflaeche-2030312207004.html
Blickensdörfer et al. (2022)	Datenbestand vom Thünen Institute of Forest Ecosystems beschrieben in Blickensdörfer et al. (2022).
Destatis (2011)	Bodenbearbeitung, Bewässerung, Landschaftselemente Erhebung über landwirtschaftliche Produktionsmethoden (ELPM). Statistisches Bundesamt (Destatis) Wiesbaden: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/Publikationen/Downloads-Produktionsmethoden/bodenbearbeitung-bewaesserung-2032805109004.html
Destatis (2021a)	Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben - Landwirtschaftszählung. Statistisches Bundesamt (Destatis) Wiesbaden: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/betriebe-bewaesserung-5411205209004.html

Auf der Grundlage der Informationen in Destatis (Destatis, 2021b, Tabelle 5) wurde der prozentuale Anteil des Ackerlandes in jedem Bundesland ermittelt, auf dem die acht Feldfrüchte angebaut werden. Diese acht Feldfrüchte bedecken 81,3 % der gesamten landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland. Als nächstes wurde der von Blickensdörfer et al. (2022) bereitgestellte Datensatz ausgewertet, der für 2019 eine aus Fernerkundungsdaten abgeleitete räumliche Verteilung verschiedener Fruchtarten liefert, und daraus die Anbaufläche für jede Feldfrucht in allen NUTS-3-Regionen bestimmt. Es wurde ein iterativer Berechnungsprozess angewandt, um die größtmögliche Übereinstimmung mit den Daten von Blickensdörfer et al. (2022) zu erreichen und gleichzeitig sicherzustellen, dass die räumliche Verteilung der Feldfrüchte auf der Ebene der Bundesländer mit den Statistiken für 2020 von Destatis (Destatis, 2021b) übereinstimmt. Den Acker-Rasterzellen in den NUTS-3-Regionen wurden dabei anhand der entsprechenden Prozentsätze die Feldfruchtarten und ihre jeweiligen theoretischen Bewässerungsbedarfe zugeordnet.

Um den theoretischen Bewässerungsbedarf über alle landwirtschaftlichen Flächen in tatsächliche Bewässerungsmengen umzurechnen, wurden die von den Bundesländern für NUTS-3-Regionen publizierten Daten zur Größe der für die Bewässerung ausgestatteten Flächen verwendet (im Anhangband, Anhang A). Abbildung 17 (A) zeigt den prozentualen Anteil der für die Bewässerung ausgestatteten Flächen an der gesamten landwirtschaftlichen Fläche im Jahr 2019. Die Rasterzellen in jeder NUTS-3-Region mit dem höchsten theoretischen Bewässerungsbedarf im Zeitraum von 1991 bis 2020 wurden als für die Bewässerung ausgestattet eingestuft, so dass die gesamte für die Bewässerung ausgestattete Fläche in jeder NUTS-3-Region den gemeldeten Statistiken entspricht.

Die Abbildung 17 (B) zeigt die mit dem beschriebenen Verfahren abgeschätzten mittleren jährlichen tatsächlichen Bewässerungsmengen im Zeitraum 1991-2020 in den NUTS-3-Regionen. Deutlich sichtbar werden die starken regionalen Unterschiede und der Schwerpunkt der Feldbewässerung im östlichen Teil Niedersachsens. In Abbildung 17 (C) und (D) sind zusätzlich die resultierenden tatsächlichen Bewässerungsmengen in den Jahren 2016 und 2018 dargestellt. Das Jahr 2016 wurde ausgewählt, weil dafür umfangreiche Statistiken zur Grundwassernutzung vorliegen und es deshalb als Bezugsjahr für viele weiterführende Analysen herangezogen werden kann. Im Jahr 2018 herrschte in Deutschland in vielen Teilen eine ausgeprägte Dürre. Deutlich sichtbar sind die Kontraste in den Bewässerungsmengen, die in der Summe nur durch die unterschiedlichen klimatischen Ausprägungen der beiden Jahre verursacht werden.

Abbildung 17: Für die NUTS-3-Regionen ermittelte tatsächliche Bewässerungsmengen.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

2.3.6 Entwicklung von Szenarien (Projektionen) für eine zukünftige Wassernutzung

2.3.6.1 Szenarien (Projektionen) für eine zukünftige sektorale Wassernutzung

Autor*innen: Uschan, T., Flörke, M.

Die Quantifizierung der zukünftigen Wasserentnahmen für die öffentliche und nichtöffentliche Wasserversorgung basiert auf statistischen Daten, Bevölkerungsprojektionen und Ergebnissen des Modells WaterGAP3. Die hier vorgestellten Szenarien zukünftiger Wassernutzungen enden im Jahr 2070, da regional differenzierte Projektionen (auf Ebene der Bundesländer) für Deutschland über das Jahr 2070 hinaus nicht vorliegen. Die berechneten Szenarien sind mit Unsicherheiten behaftet und stellen mögliche zukünftige Entwicklungen dar, d. h. treten getroffene Annahmen in der Zukunft nicht ein, verlieren sie ihre Aussagekraft.

Öffentliche Wasserversorgung

Da die öffentliche Wasserversorgung primär zur Trink- und Haushaltswasserversorgung der Bevölkerung dient, wird die zukünftige Wassernutzung (abgegebenes Wasser zum Letztgebrauch) auf Grundlage von Bevölkerungsszenarien und der Pro-Kopf Wassernutzung aus dem Jahr 2019 bestimmt. In dem trockenen Jahr 2019 nutzte die angeschlossene Bevölkerung täglich etwa 128 Liter Wasser pro Person, in den vier Erhebungen von 2007 bis 2016 hingegen 121 bis 123 Liter pro Person und Tag (Statistisches Bundesamt, 2022d). Da in WADKlim die regionale Entwicklung der Wassernutzung von besonderem Interesse ist, werden auch regional differenzierte Prognosen der Bevölkerungsentwicklung genutzt. Zur Ermittlung des zukünftigen Bevölkerungsstandes wurden insgesamt drei Szenarien entwickelt, mit denen eine Projektion bis zum Jahr 2070 möglich wird.

Die drei Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung basieren auf der 15. Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes bzw. auf der Weltbevölkerungsprognose 2022 der Vereinten Nationen. Da die Prognosen nur auf Ebene der Bundesländer (Statistisches Bundesamt), bzw. nur für Deutschland (Vereinte Nationen) verfügbar sind, werden die Daten regionalisiert. Die Regionalisierung erfolgt auf Basis der Bevölkerungsdichte in den NUTS-3-Regionen im Jahr 2021. Die Bevölkerungsdichte wird in der Zukunft als konstant angenommen. Eine Binnenwanderung zwischen den NUTS-3-Regionen kann methodisch bedingt nicht abgebildet werden. Die drei Szenarien werden nachfolgend erläutert und in Abbildung 18 dargestellt.

Grundlage von *Szenario 1* ist die Prognose G2-L2-W3 des Statistischen Bundesamtes. Die Prognose weist eine moderate Entwicklung der Geburtenhäufigkeit (G) und der Lebenserwartung (L) bei hohem Wanderungssaldo (W) auf. Die Geburtenrate liegt bei 1,55 Kindern je Frau, die Lebenserwartung bei Geburt im Jahr 2070 bei 84,6 Jahren bei Männern und 88,2 Jahren bei Frauen, der Wanderungssaldo bei 402.000 einwandernden Personen pro Jahr (Statistisches Bundesamt, 2022b, 2022a).

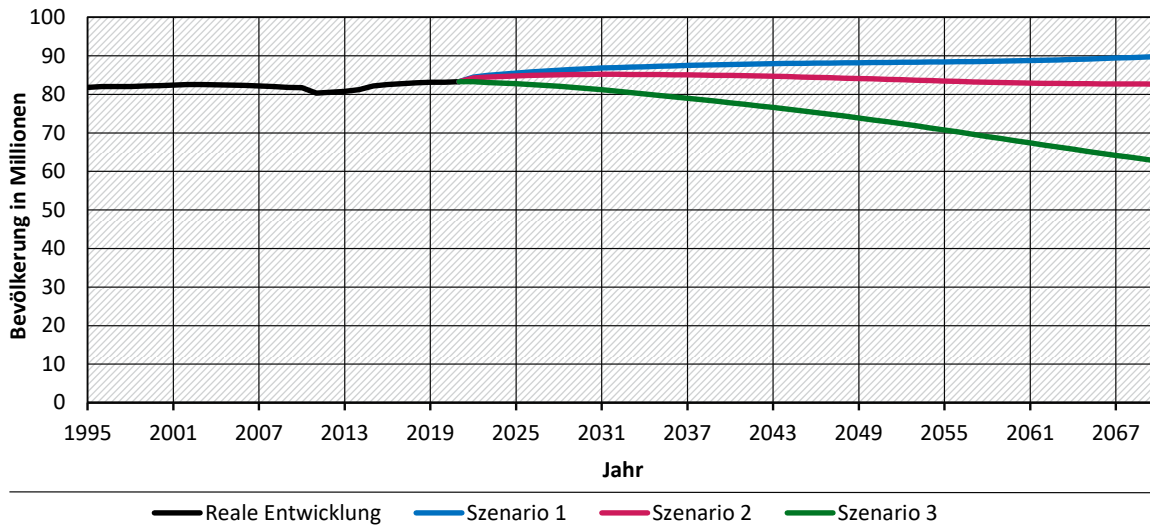
Bei *Szenario 2* wird die Prognose G2-L2-W2 des Statistischen Bundesamtes genutzt. Gegenüber der Prognose G2-L2-W3 differenziert sie sich durch ein geringeres Wanderungssaldo von 293.000 einwandernden Personen pro Jahr. Die Annahmen zur Geburtenhäufigkeit und Lebenserwartung sind identisch (Statistisches Bundesamt, 2022a)

Für das *Szenario 3* wird die Prognose *Low Fertility* der Vereinten Nationen als Basis für den gesamten Betrachtungshorizont von 2022 bis 2070 genutzt. Die Prognose zeichnet sich durch eine geringe Fertilität, eine mittlere Sterblichkeit und eine mittlere internationale Migration aus (United Nations, 2022).

In Abbildung 18 sind die reale Bevölkerungsentwicklung bis zum Jahr 2021 (ca. 83,3 Mio. Menschen) sowie die prognostizierten Bevölkerungsentwicklungen für die drei Szenarien von 2022

bis 2070 dargestellt. Die drei Szenarien spannen zukünftige Bevölkerungsentwicklungen für Deutschland auf, die im Jahr 2070 zwischen 63 Mio. (Szenario 3) und 90 Mio. Menschen (Szenario 1) liegen. Bei den Szenarien 1 und 2 kommt es zu einer Zunahme der Bevölkerung, die sich in Szenario 2 jedoch ab dem Jahr 2032 wieder in eine Abnahme wandelt (ca. 83 Mio. Menschen in 2070). Im Gegensatz dazu weist Szenario 3 von Beginn an eine starke Abnahme der Bevölkerung auf.

Abbildung 18: Prognostizierte Bevölkerungsentwicklungen bis 2070.



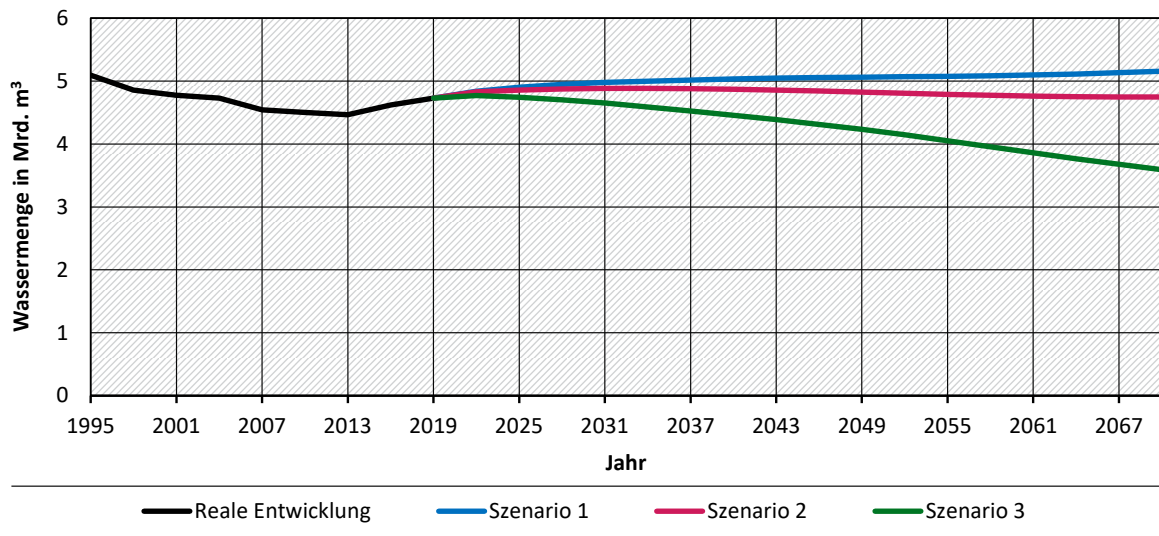
Quelle: eigene Darstellung und Berechnungen nach Datengrundlage von Statistisches Bundesamt (2022a, 2022b), United Nations (2022), Ruhr-Universität Bochum.

Die Projektionen von Destatis werden in verschiedenen Projekten genutzt, so wurde das hier verwendete Szenario G2-L2-W2 (Szenario 2) u. a. als Grundlage für die Berechnung der möglichen Entwicklung der Altersarmut in Deutschland eingesetzt (Haan et al., 2017). Dem gegenüber wurde mit der Projektion der Vereinten Nationen ein Szenario gewählt, das von einer stärkeren negativen Änderung mit der Zeit ausgeht. Auf diese Weise wird eine Variabilität an möglichen Bevölkerungsentwicklungen und somit an möglichen Wasserabgaben erzeugt.

Die Projektionen der Wassergewinnung durch die öffentliche Wasserversorgung für die einzelnen NUTS-3-Regionen werden auf Basis der drei zuvor beschriebenen Bevölkerungsszenarien berechnet. Für jede NUTS-3-Region ergibt sich die Menge des zukünftig abgegebenen Wassers aus der Multiplikation der Pro-Kopf-Wasserabgabe an Letztverbraucher für das Jahr 2019 mit dem projizierten Bevölkerungsstand. Methodisch bedingt wird die Wasserabgabe der Wassergewinnung gleichgesetzt, da nur die Wasserabgabe regional auf die Bevölkerung bezogen werden kann.

In Abbildung 19 sind die Ergebnisse für die zukünftige Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung für die drei Szenarien und das gesamte Bundesgebiet dargestellt. Die Bandbreite der projizierten Wassernutzungsdaten reicht dabei im Jahr 2070 von einem leichten Anstieg der Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung in Szenario 1 (ca. 5,2 Mrd. m³) bis zu einer deutlichen Reduzierung in Szenario 3 (3,6 Mrd. m³). Im Vergleich zum Jahr 2019 führt Szenario 2 aufgrund moderater Bevölkerungsentwicklung zu geringfügigen Veränderungen in der öffentlichen Wasserabgabe bis zum Jahr 2070 (ca. 4,7 Mrd. m³).

Abbildung 19: Prognostizierte Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung zum Letztgebrauch.



Quelle: eigene Darstellung und Berechnung nach Daten von Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2022b); Statistisches Bundesamt (2022a); United Nations, (2022), Ruhr-Universität Bochum.

Nichtöffentliche Wasserversorgung

Die Herausforderung bei der Ermittlung der zukünftigen Wassernutzung (eingesetzte Wassermenge) im Rahmen der nichtöffentlichen Wasserversorgung besteht in einer sehr inhomogenen Zusammensetzung der Wirtschaftszweige, der enthaltenen Betriebe und der damit vielfältigen Einflussfaktoren auf die Wassernutzung. In Anlehnung an die drei Bevölkerungsszenarien zur Quantifizierung der öffentlichen Wasserversorgung wurden ebenfalls drei Szenarien zur Abschätzung der nichtöffentlichen Wasserversorgung, d. h. für die Wassernutzung der produzierenden Industrie und zur Stromerzeugung, entwickelt. Dabei handelt es sich um Projektionen der thermischen Stromerzeugung und Bruttowertschöpfung, die als Haupttreiberkräfte in die Modellsimulationen einfließen. Die Abschätzungen der zukünftigen Wassernutzung zur thermischen Stromerzeugung und Verwendung in der verarbeitenden Industrie erfolgte mit dem Wassernutzungsmodell WaterGAP3 (s. Kapitel 2.3.2.3). Auch hier wird methodisch bedingt – analog zur öffentlichen Wasserversorgung – die Wassernutzung der Wassergewinnung gleichgesetzt.

Die zukünftige Elektrizitätsnachfrage wird stark durch die Entwicklung der Bevölkerung, Ausbau der Elektromobilität und Wirtschaftsleistung beeinflusst. Während eine steigende Nachfrage durch die Elektrifizierungsstrategien der Industrieländer zur Dekarbonisierung ihrer Volkswirtschaften angetrieben wird (Bauer et al., 2017), führen Effizienzsteigerungen zu einem Rückgang (UBA, 2021). Aufgrund der Energiewende ist die zukünftige Struktur der Energieversorgung – und damit auch des zukünftigen Wasserbedarfs für die Stromerzeugung – mit großer Unsicherheit behaftet. Der Atomausstieg mit dem Abschalten der letzten drei Kernkraftwerke im April 2023 sowie der Ausstieg aus der Stromgewinnung durch die Verbrennung von Kohle bis 2038 hat auch Auswirkungen auf die Wassernutzung. Die für die Stromerzeugung benötigte Wassermenge variiert je nach Erzeugungstechnologie und Kühlsystem stark. Selbst wenn man von einer raschen Dekarbonisierung des Energiesektors ausgeht, bleibt die Entwicklung des zukünftigen Wasserbedarfs für die Stromerzeugung unklar, da unterschiedliche Technologien für erneuerbare Energien und Klimaschutz auch sehr unterschiedliche Wassernutzungsintensitäten aufweisen (Jin et al., 2019).

Die simulierten Kühlwasserentnahmen zur Stromerzeugung basieren auf WaterGAP3-Ergebnissen aus dem BMBF-Projekt WANDEL (Flörke et al., 2021; Terrapon-Pfaff et al., 2020). Für WADKlim wurden die zwei Dekarbonisierungs-Szenarien ausgewählt, die bereits im Rahmen von WANDEL an die nationalen Gegebenheiten des Atom- und Kohleausstiegs angepasst wurden. Beide Szenarien zum Kühlwasserbedarf decken den Zeithorizont bis 2050 ab und wurden ihrem Trend folgend bis zum Jahr 2070 erweitert (zur Anpassung an den Zeithorizont der öffentlichen Wasserversorgung). Die zwei Szenarien zum Kühlwasserbedarf basieren auf den globalen Energieszenarien GECO | B2° C, einer Studie des Global Energy and Climate Outlook (GECO) (Kitous et al., 2017) und GP | Advanced Energy Revolution (Ad.(R)) aus einer Greenpeace-Studie (Teske et al., 2011).

Die Hauptantriebskraft für die Wassernutzung im verarbeitenden Gewerbe ist die Veränderung der Produktion von wasserintensiven Industrien (gemessen z. B. in Einheiten der Bruttowertschöpfung der Produkte, die in einer bestimmten Branche erzeugt werden). Strukturelle Veränderungen im Profil der industriellen Produktion – was und wie viel produziert wird – zeigen tiefgreifende Auswirkungen auf die gesamte Wassernutzung und den Wasserverbrauch in diesem Sektor. Zunehmende Optimierung von Produktionsprozessen, Wasserwiederverwendung und Wasserkreislaufführung reduzieren den Wasserbedarf und verringern die Abhängigkeit der industriellen Wassernutzung von Frischwasserressourcen. Die Verzahnung von Produktion und Technologien zur Effizienzsteigerung einerseits sowie andererseits geopolitische (z. B. die Entwicklungen des innerdeutschen Marktes und internationaler Märkte) und ökonomische Faktoren (z. B. Preise für Ressourcen) beeinflussen (in)direkt den Wasserbedarf und verdeutlichen, dass die Abschätzung der zukünftigen Wassernutzung mit großen Unsicherheiten behaftet ist (DECHEMA e. V., 2014).

Während Szenarien zur Stromerzeugung und der daraus resultierende Kühlwasserbedarf zur Verfügung stehen, sind langfristige Szenarien zur Entwicklung der verarbeitenden Industrie, die eine Abschätzung der zukünftigen Wassernutzung ermöglichen, nicht vorhanden. Zur Simulation zukünftiger Wassernutzung in der verarbeitenden Industrie wurden globale ökonomische Szenarien aus dem IPCC-Prozess (Intergovernmental Panel on Climate Change (O'Neill et al., 2016) und ISIMIP (Intersectoral Impact Model Intercomparison Project (Frieler et al., 2017; Hempel et al., 2013)) auf Länderebene verwendet. Hier wurden die ökonomischen Szenarien (Shared Socio-economic Pathways (O'Neill et al., 2017)) SSP1, SSP2 und SSP3 als Treiber für die Modellsimulationen herangezogen.

Das Energieszenario GP | Ad. (R) führt zu einem deutlichen Rückgang des Kühlwassereinsatzes in Deutschland bis 2050 und zu einer weiteren Abnahme darüber hinaus aufgrund deutlicher Zunahmen erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung sowie Effizienzsteigerungen. In diesem Szenario wird der Ausstieg aus der Atomkraft und Kohle zur Verstromung deutlich. Auch das Energieszenario GECO | B2° C ist durch die Abnahme der Wassergewinnung für Kühlzwecke bis zum Jahr 2040 (Ausstieg aus der Kohle zur Stromerzeugung) gekennzeichnet, erfährt dann jedoch einen erneuten Anstieg aufgrund erhöhter Stromerzeugung mit Gas-, Geothermie- und Biomassekraftwerken.

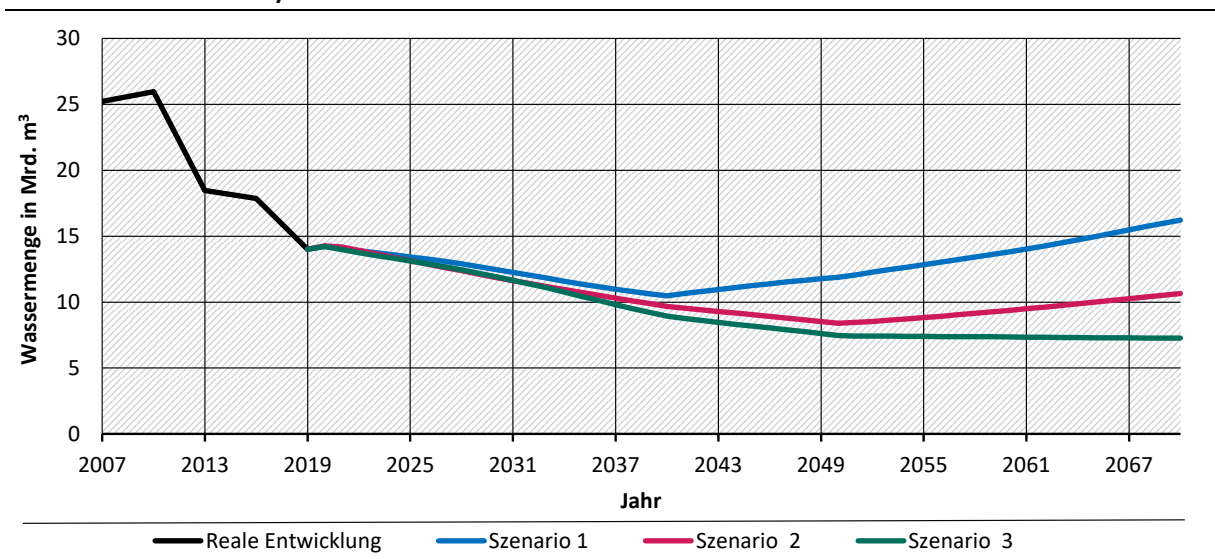
Die Modellergebnisse für die Wasserentnahmen durch die verarbeitende Industrie zeigen bis 2035 einen leichten Anstieg für die drei SSP-Szenarien (Shared Socioeconomic Pathways). Nach dem Jahr 2035 steigen die Wasserentnahmen für die SSP1 und SSP2 Szenarien, wobei das SSP1 Szenario nach 2060 weniger stark steigt als das SSP2 Szenario. Das Szenario SSP1 ist durch einen Rückgang der verarbeitenden Industrie zugunsten des Sektors gekennzeichnet, was aber hinsichtlich der Wassernutzung erst nach 2050 zum Tragen kommt. Das SSP2 Szenario zeigt eine ökonomische Dynamik, die dem historischen Trend folgt. Dies führt langfristig zu einer Zunahme der Wasserentnahme. Das SSP3 Szenario ist durch einen leichten Rückgang des

Anteils der Bruttowertschöpfung am Bruttosozialprodukt gekennzeichnet, was zum Verharren der Wasserentnahmen ab 2040 auf dem Niveau des Jahres 2019 zur Folge hat.

Zur weiteren Verwendung im Projekt werden die zuvor vorgestellten Szenarien für die Wassernutzung zur thermischen Stromerzeugung und für die verarbeitende Industrie in drei Szenarien zusammengefasst. *Szenario 1* ergibt sich aus der Kombination von SSP1 und GECO | B2° C, *Szenario 2* aus SSP2 und GP | Ad.(R) und *Szenario 3* aus SSP3 und GP | Ad.(R). Durch die Kombination der Szenarien entsteht eine Bandbreite an möglichen zukünftigen Entwicklungen der nichtöffentlichen Wasserversorgung (Industriesektor) bis zum Jahr 2070 (s. Abbildung 20). Szenario 1 zeigt eine Reduzierung der nichtöffentlichen Wassergewinnung bis 2040 und einem nachfolgenden Anstieg auf ca. 16 Mrd. m³ im Jahr 2070. Im Szenario 2 fallen die Wasserentnahmen zunächst bis zum Jahr 2050, steigen dann aber wieder bis zum Jahr 2070 auf ca. 11 Mrd. m³ an. Auch das Szenario 3 ist durch einen Rückgang der nichtöffentlichen Wassergewinnung bis 2050 gekennzeichnet, verharret aber darüber hinaus auf niedrigem Niveau (ca. 7 Mrd. m³) bis 2070.

Die Zuweisung der projizierten Wassernutzungsdaten auf die Ebene der NUTS-3-Regionen erfolgte zum einen über die Standorte der Kraftwerksanlagen und zum anderen über eine Aggregation und individuelle Anpassung (z. B. Berücksichtigung der Gigafactory Berlin-Brandenburg in der NUTS-3-Region Oder-Spree in den Szenarien-Simulationen) aus den Rasterdaten des Modells WaterGAP3.

Abbildung 20: Prognostizierte Wasserabgabe der nichtöffentlichen Wasserversorgung (Industriesektor).



Quelle: eigene Darstellung und Berechnung, Ruhr-Universität Bochum.

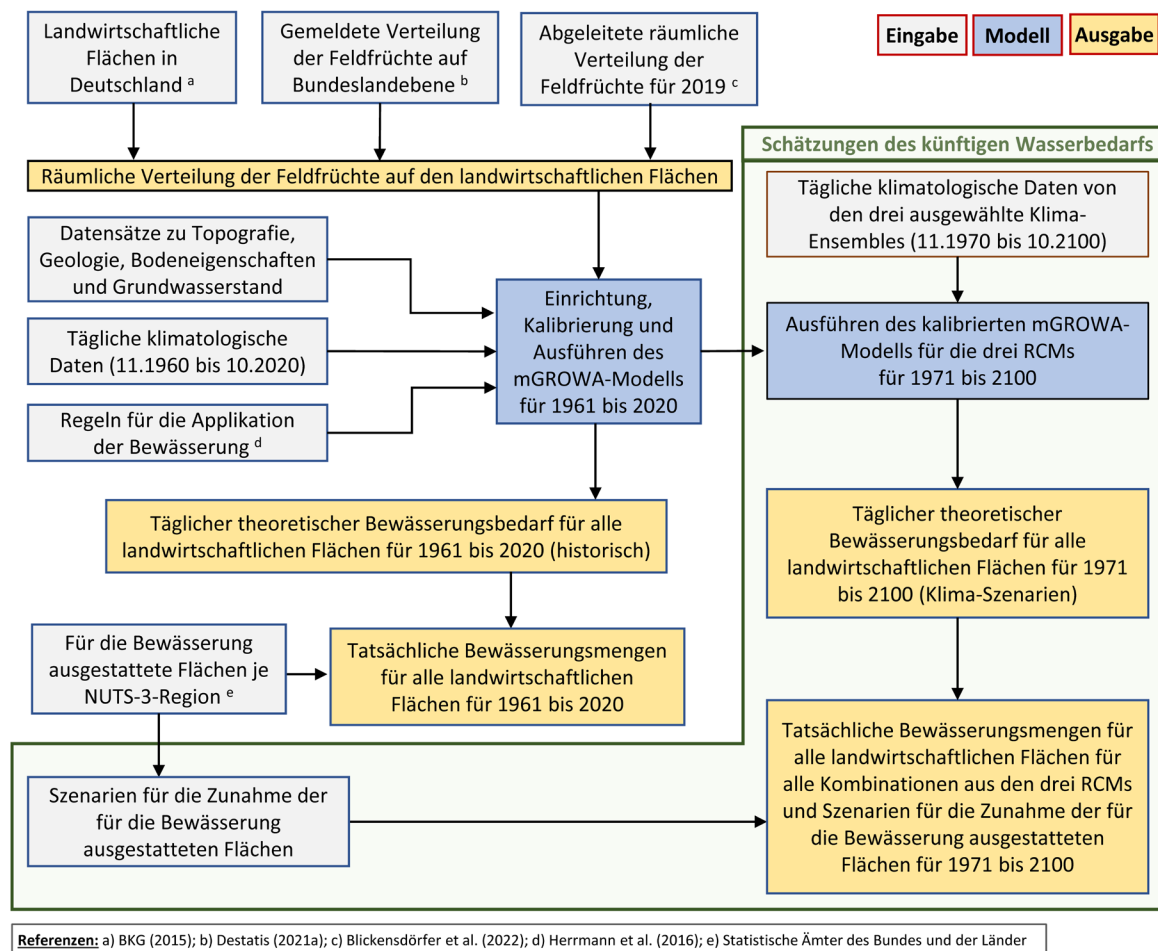
2.3.6.2 Szenarien (Projektionen) für einen zukünftigen Bewässerungsbedarf

Autoren: McNamara, I. Herrmann, F.

Die Entwicklung von Szenarien für einen zukünftigen Bewässerungsbedarf und den dann potenziell resultierenden Bewässerungswassermengen baut auf der in Kapitel 2.3.5.2 eingeführten Methodik auf. Die Abbildung 21 veranschaulicht die erweiterte Vorgehensweise sowohl für die Abschätzung der tatsächlichen Wassermengen in der Feldbewässerung in Vergangenheit und Gegenwart wie auch für die darauf aufbauende Entwicklung von Szenarien für zukünftige tatsächliche Bewässerungsmengen. Die Entwicklung dieser Szenarien basiert auf drei wesentlichen Arbeitsschritten:

- ▶ der Entwicklung von Szenarien für das Flächenwachstum der tatsächlich für die Bewässerung ausgestatteten Flächen,
- ▶ der Projektion zukünftiger theoretischer Bewässerungsbedarfe für die acht Feldfrüchte Weizen, Wintergerste, Roggen, Raps, Kartoffel Reifegruppe (RG) 3, Frühkartoffel RG 1, Zuckerrübe und Mais mit mGROWA auf Basis der Klimaprojektionen (Kapitel 2.3.4) und
- ▶ der in Kapitel 2.3.5.2 erläuterten Aggregation der Simulationsergebnisse zu tatsächlichen Bewässerungsmengen.

Abbildung 21: Infografik zu Datengrundlagen und Methodik für die Abschätzung von projizierten tatsächlichen Bewässerungsmengen im Rahmen der Entwicklung von Szenarien zur zukünftigen Wassernutzung.



Quelle: basierend auf Herrmann (2020).

Ausgangspunkt für die Szenarien zur Entwicklung der für die Bewässerung ausgestatteten Flächen sind die gemeldeten Flächen im Jahr 2019. Von 2009 bis 2019 stieg die für die Bewässerung ausgestattete Fläche in Deutschland von 639.030 ha auf 768.317 ha (Destatis, 2011, 2021a). Dies entspricht einer jährlichen Zunahme von 1,86 %. Die im Rahmen dieser Studie verwendete Methodik zur Erzeugung von Szenarien zum zukünftigen Wachstum der bewässerten Fläche und der Bewässerungswassermengen insgesamt zielt darauf, in etwa diese jährliche Wachstumsrate von 1,86 % für die Jahre 2021 bis 2100 fortzuschreiben und den Einfluss der projizierten Klimavariabilität herauszuarbeiten. Insgesamt wurden dazu die in Tabelle 6 aufgeführten fünf Szenarien definiert. Die Spalten "Wachstum – für eine Bewässerung ausgestattet

(%)" und "Wachstum - Ackerfläche (%)" geben die Parameter an, die die Wachstumsrate in den NUTS-3-Regionen definieren. Für jede NUTS-3-Region wurde die Zunahme der für eine Bewässerung ausgestatteten Fläche pro Jahr als das Maximum aus zwei Wachstumsparametern definiert:

- ▶ einem Prozentsatz (angegeben als "Wachstum – für Bewässerung ausgestattet", Spalte 2) für das Wachstum im Vergleich zum Vorjahr bezogen auf die in der NUTS-3-Region für die Bewässerung ausgestatteten Fläche und
- ▶ einem Prozentsatz (angegeben als "Wachstum – Ackerfläche", Spalte 3) für das Wachstum bezogen auf die gesamte (zeitlich konstante) Ackerfläche in der NUTS-3-Region.

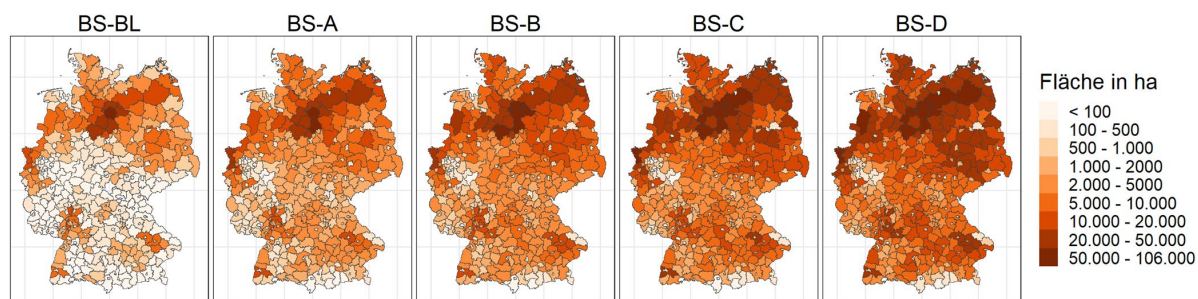
Die gewählte Vorgehensweise ist notwendig, weil gegenwärtig nicht in allen NUTS-3-Regionen für eine Bewässerung ausgestattete Flächen existieren. Eine pauschale Projektion in die Zukunft mit Hilfe einer flächendeckend konstanten Zuwachsrate wäre praktisch auf die bisherigen Schwerpunktregionen beschränkt. Durch die zusätzliche Berücksichtigung eines kleinen Wachstumsparameters bezogen auf die gesamte Ackerfläche der einzelnen NUTS-3-Regionen wird in den Szenarien ein Beginn von Bewässerungslandwirtschaft auch für die NUTS-3-Regionen initiiert, in denen sie bisher nicht praktiziert wird. Für jedes Jahr wird derjenige Wachstumsparameter ausgewählt, mit dem der größte absolute Flächenzuwachs (Maximum) für eine NUTS-3-Region erzeugt werden kann. Die gesamte Zunahme der für Bewässerung ausgestatteten Fläche in einer NUTS-3-Region ergibt sich dann aus der Addition der Ergebnisse der jährlich wirksamen Wachstumsparameter über die Zeit. Bei dieser Methode wird außerdem unterstellt, dass die gesamte Ackerfläche und die Verteilung der Feldfrüchte innerhalb jeder NUTS-3-Region für den Zeitraum 2021 bis 2100 konstant bleiben. Daher wurde in den Fällen, in denen die für die Bewässerung ausgestattete Fläche die gesamte Ackerfläche in einer NUTS-3-Region erreicht, keine weitere Zunahme der für die Bewässerung ausgestatteten Flächen zugelassen.

Tabelle 6: Szenarien für das zukünftige Wachstum der bewässerten Ackerfläche in der Landwirtschaft.

Szenario	Wachstum – für Bewässerung ausgestattet in %	Wachstum – Ackerfläche in %	Jährliche Zunahme der für Bewässerung ausgestatteten Fläche in Deutschland in %	Bewässerte Ackerfläche in Deutschland im Jahr 2100 in ha
Baseline	0	0	0	768.317
A	0,5	0,05	0,79	1.439.048
B	1,0	0,10	1,28	2.127.940
C	1,5	0,15	1,70	2.963.436
D	2,0	0,20	2,10	4.039.580

Für jedes Szenario sind in Tabelle 6 für ganz Deutschland die letztendlich resultierende mittlere jährliche Zunahme der für die Bewässerung ausgestatteten Flächen (Spalte 4) sowie die Gesamtfläche im Jahr 2100 (Spalte 5) aufgeführt. Die mittlere Zunahme der für Bewässerung ausgestatteten Flächen von 2009 bis 2019 (1,86 %) liegt zwischen den mittleren jährlichen Zuwachsraten der Szenarien C und D. Die gesamte landwirtschaftliche Fläche in Deutschland beträgt ca. 132.000 km². Im „Baseline“-Szenario verbleibt der Anteil der für die Bewässerung ausgestatteten Flächen bei 5,8 %, während er im Szenario D bis 2100 auf 30,7 % ansteigt. Die Abbildung 22 zeigt für die fünf Szenarien die für Bewässerung in den NUTS-3-Regionen ausgestatteten Flächen im Jahr 2100. Das „Baseline“-Szenario ist im Hinblick auf eine Bewertung des Anstiegs des Bewässerungsbedarfs sinnvoll, der nur durch veränderte Klimabedingungen verursacht wird.

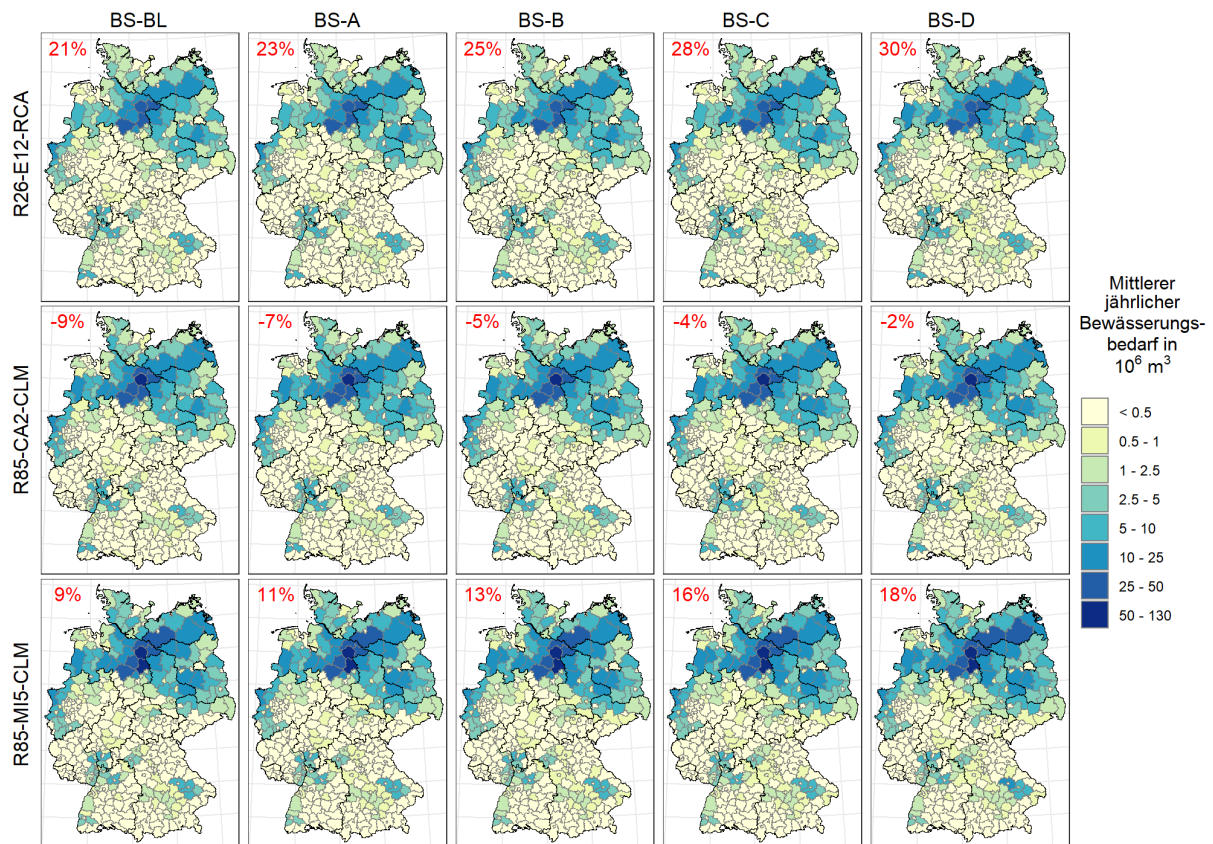
Abbildung 22: Für die Bewässerung in den NUTS-3-Regionen ausgestattete Flächen im Jahr 2100. (BS-Bewässerungsszenario; BL- Baseline)



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

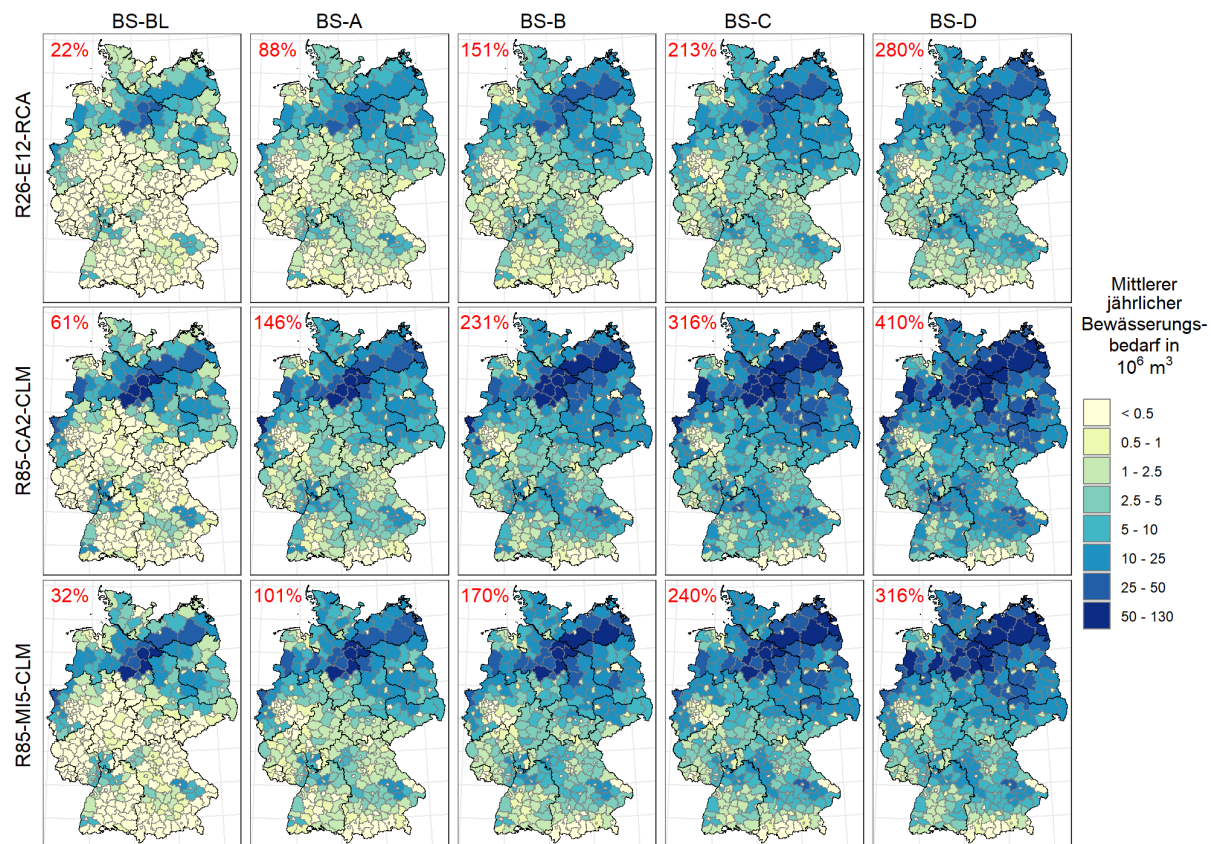
Die Projektion der zukünftigen theoretischen Bewässerungsbedarfe der acht Feldfrüchte von 1971 bis 2100 wurde ebenfalls auf Basis der drei Klimaprojektionen R26-E12-RAC, R85-CA2-CLM und R85-MI5-CLM (vgl. Kapitel 2.3.4) durchgeführt. Darauf aufbauend wurden dann für alle 15 Kombinationen der drei Klimaprojektionen und fünf Wachstumsszenarien, sowie unter der Annahme, dass die historische räumliche Verteilung der Feldfrüchte konstant verbleibt, die zukünftig möglichen jährlichen Bewässerungsmengen für jede NUTS-3-Region ermittelt. In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind die Ergebnisse für die 30-Jahre-Perioden 2001-2030 und 2061-2090 dargestellt. Die Karten illustrieren die räumliche Verteilung und Bandbreite zukünftiger Bewässerungsmengen, die aus heutiger Sicht auf den drei klimatischen Entwicklungspfaden möglich erscheinen. Die Prozentwerte oben links in jeder Darstellung zeigen die prozentuale Veränderung des mittleren jährlichen Bedarfs in Deutschland im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 in der entsprechenden Klimaprojektion. Da für den historischen Zeitraum (bis 2020) keine Veränderungen der für die Bewässerung ausgestatteten Fläche modelliert werden konnte, sind die Unterschiede von links nach rechts in Abbildung 23 (2001-2030) nur auf das Wachstum für den Zeitraum 2021-2030 zurückzuführen und deshalb nur schwach ausgeprägt. Für den Zeitraum 2061-2090 weist das R26-E12-RAC erwartungsgemäß den geringsten mittleren Bedarf auf. In den beiden RCM auf Basis des RCP8-5-Szenarios gibt es eine erhebliche Änderung der Gesamtwerte, womit der Einfluss des Klimawandels und der veränderten Klimavariabilität noch deutlicher zum Ausdruck kommt. Der Schwerpunkt der Feldbewässerung würde zukünftig in der hier vorgestellten Sammlung an Szenarien weiterhin in Norddeutschland liegen. Deutlich sichtbar würden jedoch auch in West- und Süddeutschland die derzeit noch verhältnismäßig klein ausgeprägten Cluster mit relevanter Feldbewässerung an Größe und damit Nachfrage nach Wasser für Bewässerungszwecke zulegen. Inwieweit sich diese Nachfrage aus den regionalen Wasserressourcen bedienen lässt, kann aus den Ergebnissen an dieser Stelle noch nicht geschlossen werden.

Abbildung 23: Mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf in den NUTS-3-Regionen und den 15 Szenarien in der 30-Jahre-Periode 2001–2030. (BS-Bewässerungsszenario; BL- Baseline). Die Prozentwerte oben links zeigen die Veränderung in Deutschland im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 der entsprechenden Klimaprojektion.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 24: Mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf in den NUTS-3-Regionen und den 15 Szenarien in der 30-Jahre-Periode 2061–2090. (BS-Bewässerungsszenario; BL- Baseline). Die Prozentwerte oben links zeigen die Veränderung in Deutschland im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 der entsprechenden Klimaprojektion.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

2.3.7 Räumliche und zeitliche Variabilität von meteorologischen Dürreindizes in Vergangenheit und Gegenwart (1961 bis 2020)

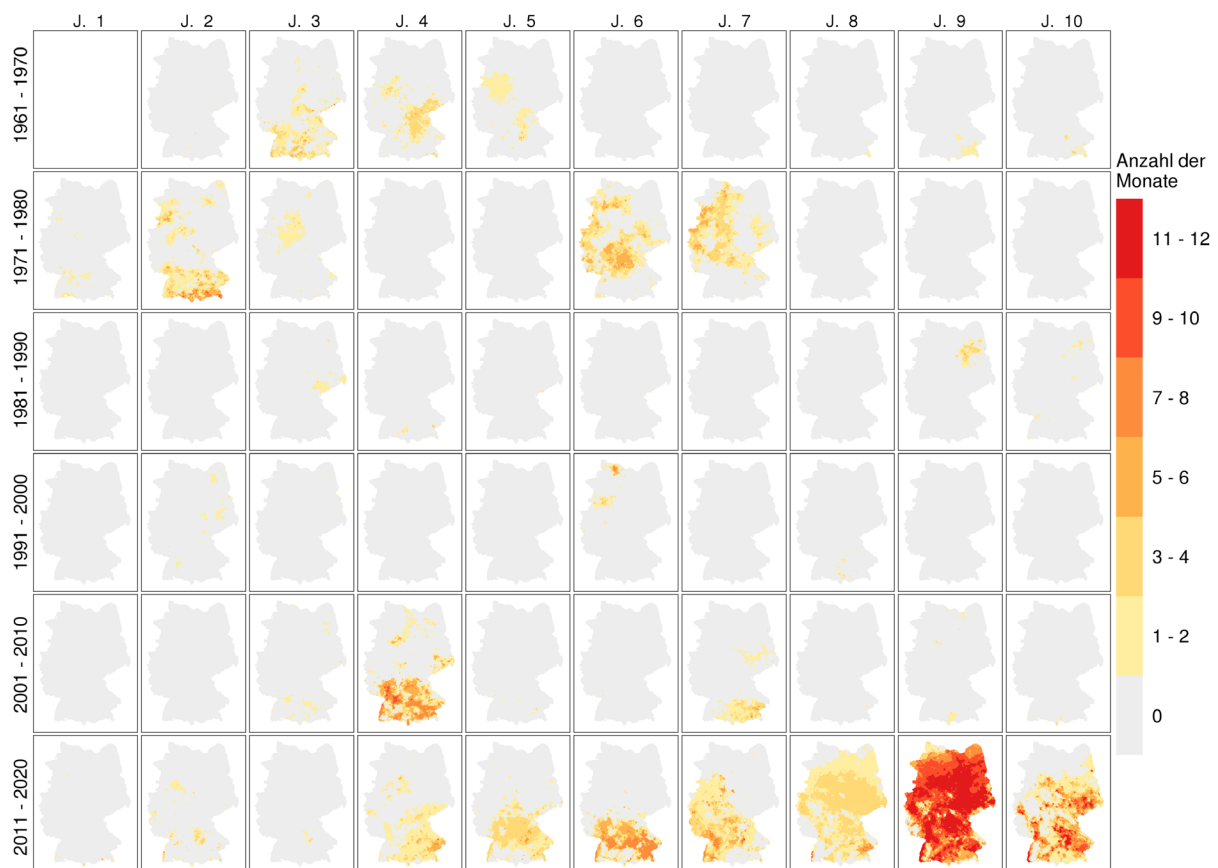
Autor*innen: McNamara, I., Herrmann, F.

Insgesamt wurden im Rahmen des Projektes WADKlim zur Charakterisierung von meteorologischer Dürre im historischen Zeitraum von 1961 bis 2020 die Dürreindizes SPI und SPEI (vgl. Kapitel 2.3.3.3) für verschiedene Zeitskalen (1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 und 24 Monate) in einer hohen räumlichen Auflösung über Deutschland berechnet. In diesem Kapitel erfolgt eine exemplarische Darstellung und Diskussion der Ergebnisse zum SPEI-12.

Die Abbildung 25 zeigt die räumliche Verbreitung der Anzahl der Monate in den hydrologischen Jahren von 1961 bis 2020, in denen der SPEI-12 mit kleiner als -2 ermittelt und deshalb die Dürre als *extrem trocken* eingestuft wurde. Darüber hinaus zeigt die Abbildung 26 die Anzahl der Monate, die mindestens als *sehr trocken* eingestuft wurden (SPEI-12 kleiner -1,5). Deutlich sichtbar variiert Dürre sowohl räumlich als auch zeitlich. Es gab seit 1961 Dekaden, in denen Dürre auf den hier dargestellten Intensitätsniveaus praktisch nur in kleinen Teilen des Landes relevant war. In Abbildung 25 werden einige Monate im Zeitraum 1961-1980 als *extrem trocken* eingestuft, jedoch nicht über die gesamte Fläche Deutschlands. In den folgenden zwei Jahrzehnten wurde der Schwellenwert von SPEI kleiner -2 nur selten unterschritten, während im Zeitraum 2014-2020 in ganz Deutschland längere Perioden extremer Trockenheit zu verzeichnen waren.

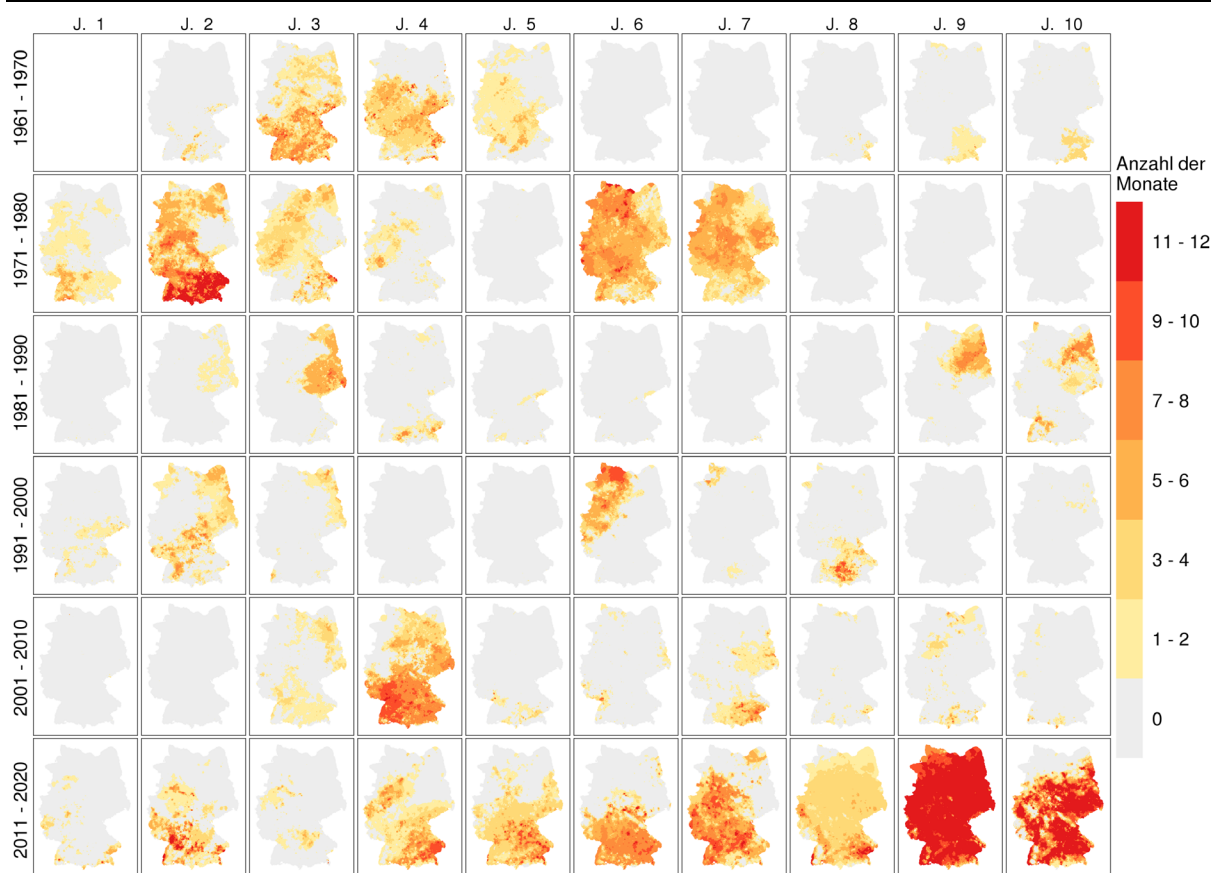
Die Abbildung 26 (*sehr trocken*) zeigt ähnliche Muster wie die Einstufung als *extrem trocken*, jedoch gibt es keinen längeren Zeitraum (> 5 Jahre), in dem kein Teil Deutschlands als *sehr trocken* eingestuft wurde. Der Kontrast zwischen diesen beiden Abbildungen verdeutlicht das Ausmaß, in dem extreme Dürre im vergangenen Jahrzehnt als Folge des Klimawandels beobachtet wurde. Aufgrund des 12-monatigen Akkumulationszeitraums, der für die Berechnung der SPEI-12 verwendet wird, spiegeln sich Dürrephasen in einigen Jahren erst im Folgejahr wider. Zum Beispiel sind die sehr trockenen Monate Mitte bis Ende 2018 erst in der Darstellung für 2019 deutlicher zu erkennen.

Abbildung 25: Anzahl der Monate im hydrologischen Jahr, die gemäß SPEI-12 für 1961 bis 2020 als extrem trocken (SPEI-12 kleiner - 2) eingestuft wurden.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 26: Anzahl der Monate im hydrologischen Jahr, die gemäß SPEI-12 für 1961 bis 2020 als sehr trocken (SPEI-12 kleiner -1,5) eingestuft wurden.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

2.3.8 Räumliche und zeitliche Variabilität der projizierten meteorologischen Dürreindizes (1971 bis 2100)

Autor*innen: McNamara, I., Herrmann, F.

Insgesamt wurden im Rahmen des Projektes WADKlim zur Charakterisierung von meteorologischer Dürre in den drei Klimaprojektionen R26-E12-RCA, R85-CA2-CLM und R85-MI5-CLM von 1971 bis 2100 die Dürreindizes SPI und SPEI (vgl. Kapitel 2.3.3.3) für verschiedene Zeitskalen (1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 und 24 Monate) in einer hohen räumlichen Auflösung über Deutschland berechnet. In diesem Kapitel erfolgt erneut nur eine exemplarische Darstellung und Diskussion der Ergebnisse zum SPEI-12. Für jede der drei Klimaprojektionen wurde der derzeit als Standard geltende historische Referenzzeitraum 1971-2000 verwendet, um individuell für die Projektionen die Wahrscheinlichkeitskurve für die Klassifizierung des SPEI festzulegen. Daher ist die Anzahl der *extrem trockenen* Jahre (SPEI-12 kleiner -2), die für jede Projektion über diesen Zeitraum in Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29 dargestellt sind, ähnlich.

Die Projektion R26-E12-RCA (Abbildung 27) weist ab 2030 eine merkliche Zunahme der als extrem trocken eingestuften Monate auf. Dieses Klimaszenario weist einen moderaten Temperaturanstieg in Verbindung mit einem stetigen Rückgang der jährlichen Niederschläge auf, wobei diese Kombination zu einer Zunahme der als extrem trocken eingestuften Perioden führt. Die Projektion R85-CA2-CLM (Abbildung 28) zeigt die stärkste Zunahme extrem trockener Dürre, die sich ab den 2030er Jahren bemerkbar macht und sich bis zu einer Situation verschärft, in der es zwischen 2081 und 2100 kein Jahr gibt, in dem nicht mindestens ein Teil des Jahres in

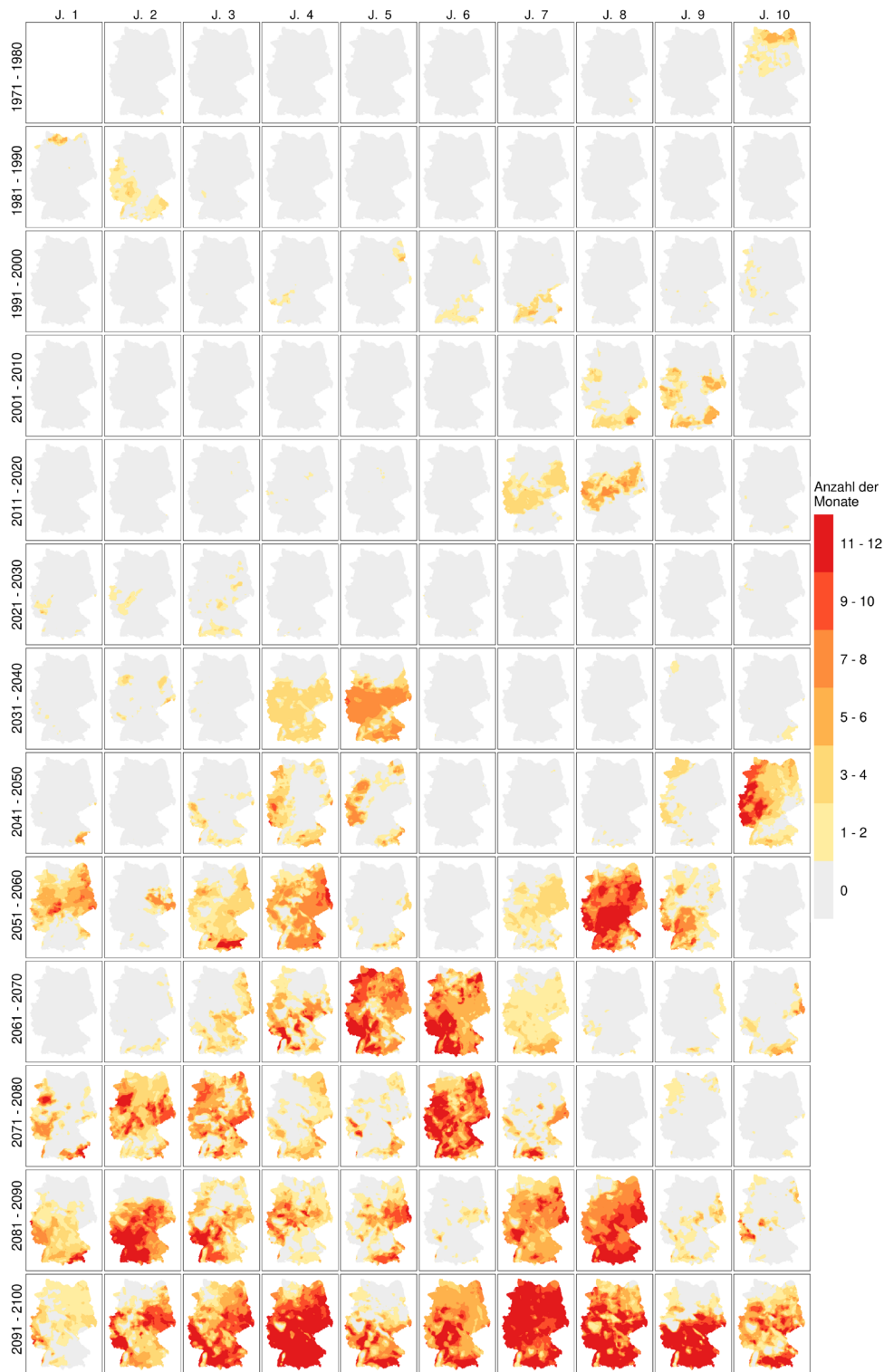
Deutschland als extrem trocken eingestuft wird. Der Grund dafür ist, dass die Projektion R85-CA2-CLM von allen bewerteten Klimaprojektionen die stärkste Abnahme der Niederschläge für 2071-2100 aufweist. Dies führt in Verbindung mit dem im Vergleich zu den RCP2.6-Szenarien stärkeren Temperaturanstieg zu einer erheblichen Zunahme von Dürreintensität und -dauer. Im Gegensatz dazu zeigt die Projektion R85-MI5-CLM (Abbildung 29) nur einen moderaten Anstieg extreme trockener Dürre im Verlauf des 21. Jahrhunderts, weil der Temperaturanstieg geringer ausfällt als bei den meisten Projektionen im RCP8.5-Szenario, und die Veränderung der jährlichen Niederschläge weniger stark ausgeprägt ist (Hübener et al., 2017).

Abbildung 27: Anzahl der Monate im hydrologischen Jahr, die für die Projektion R26-E12-RCA von 1971 bis 2100 als extrem trocken (SPEI-12 kleiner - 2) eingestuft wurden.



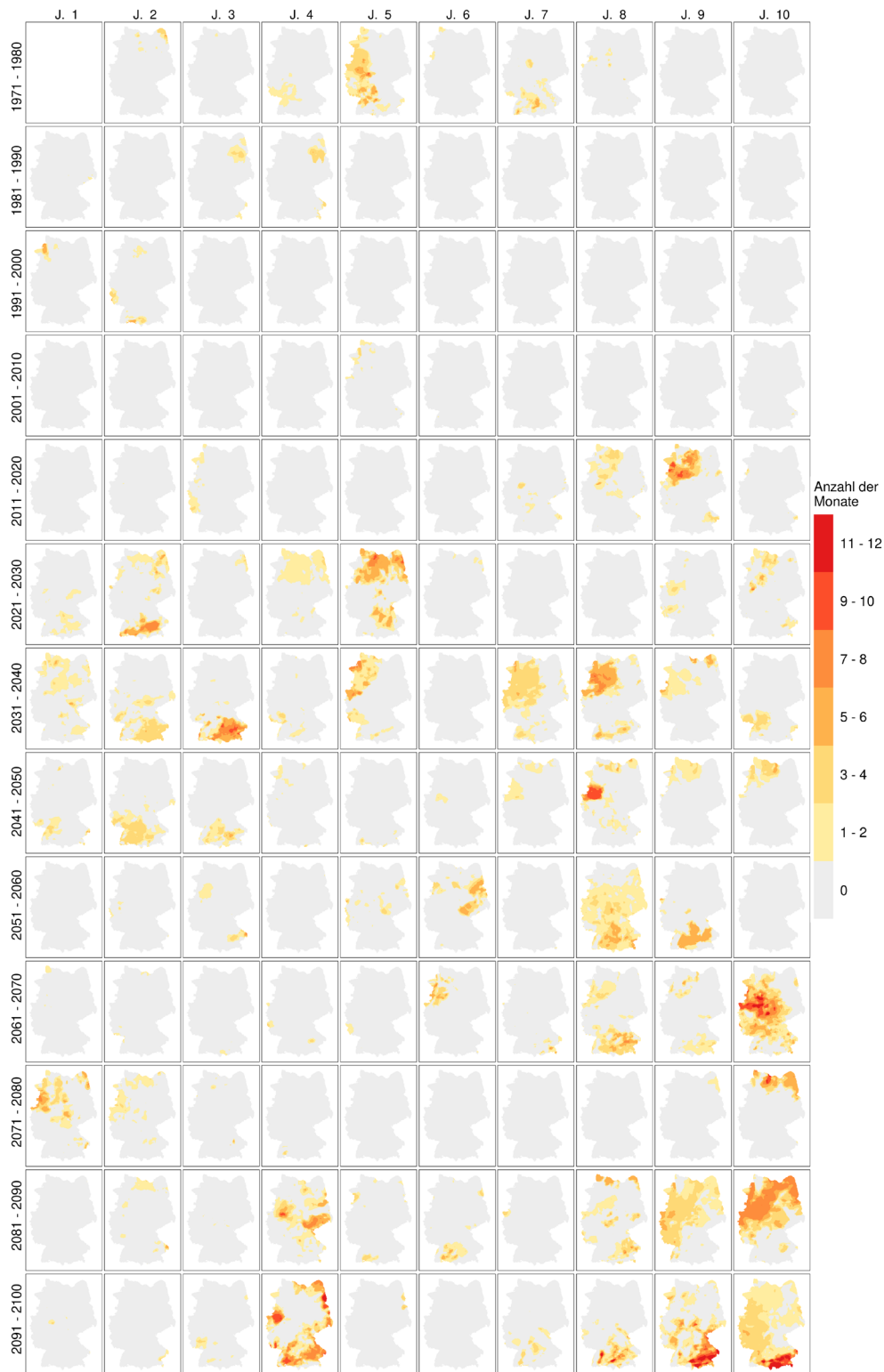
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 28: Anzahl der Monate im hydrologischen Jahr, die für die Projektion R85-CA2-CLM von 1971 bis 2100 als extrem trocken (SPEI-12 kleiner - 2) eingestuft wurden.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 29: Anzahl der Monate im hydrologischen Jahr, die für die Projektion R85-MI5-CLM von 1971 bis 2100 als extrem trocken (SPEI-12 kleiner - 2) eingestuft wurden.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

2.3.9 Ergebnisse aus den Simulationen des Wasserhaushalts mit dem Modell mGROWA (1961 bis 2020)

Autor*innen: Herrmann, F., McNamara, I.

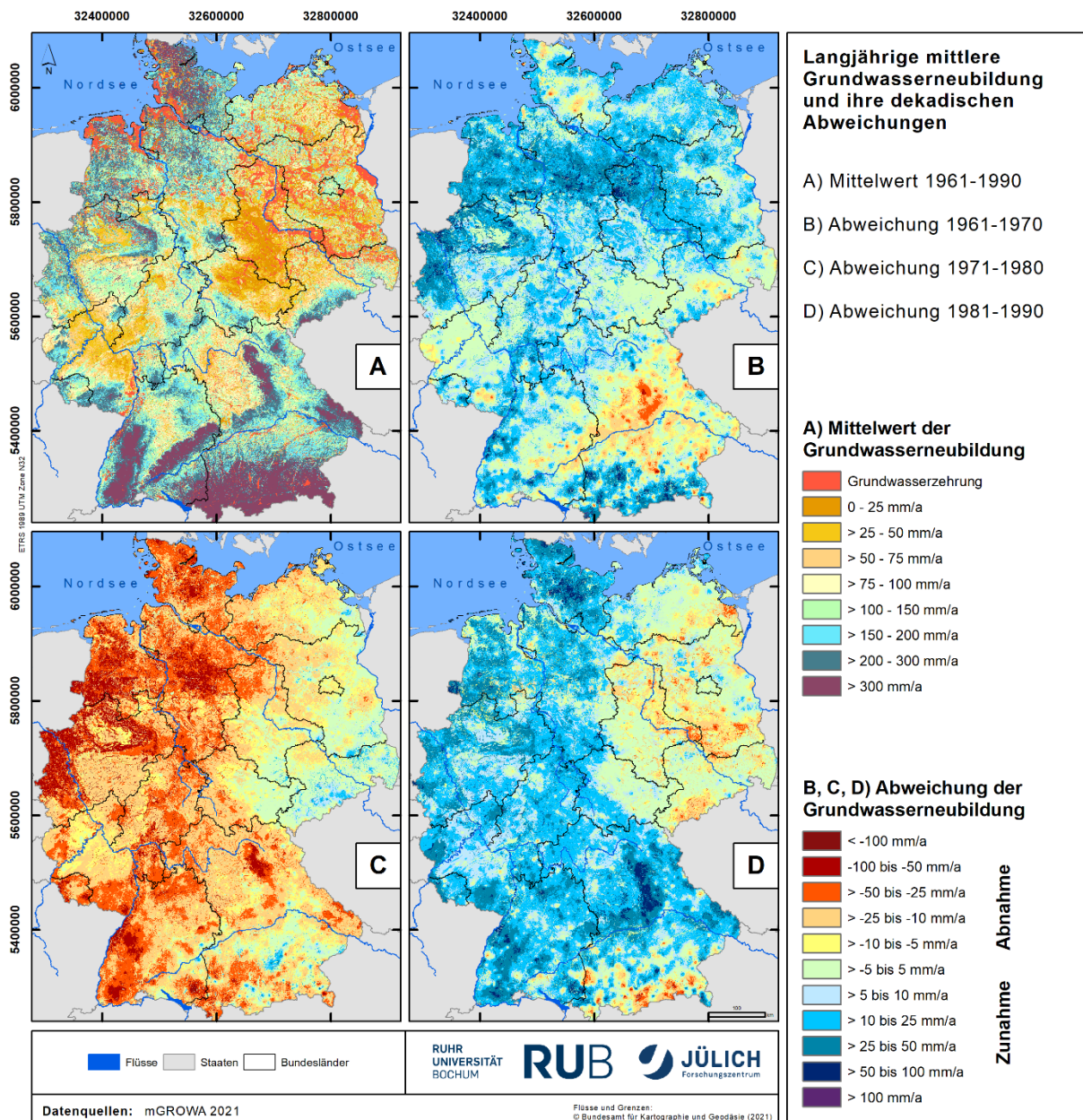
Mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA wurde eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Simulation des Wasserhaushalts (100 m Raster, Tagesschritte) in Deutschland für die Zeit von 1961 bis 2020 durchgeführt. Diese Simulation kann auf vielfältige Art und Weise verwertet werden. Im Hinblick auf die Fragestellungen im Projekt WADKlim wurde insbesondere die modellierte Grundwasserneubildung detaillierter analysiert. Aufgrund der veränderten zeitlichen Niederschlags- und Verdunstungsmuster der vergangenen Dekaden, sind auch die Veränderungen im Füllstand des Bodenwasserspeichers in den Fokus genauerer Untersuchungen gerückt, die in diesem Kapitel kurz andiskutiert werden. Des Weiteren lieferte mGROWA die theoretischen Bewässerungsbedarfe für acht Feldfrüchte, die in die im Kapitel 2.3.5.2 dokumentierten Berechnungen zu den tatsächlichen Bewässerungsmengen eingegangen sind.

Die Abbildung 30 und die Abbildung 31 zeigen die räumliche Verteilung der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in den Perioden 1961-1990 und 1991-2020 sowie die Abweichungen vom langjährigen Mittelwert in den Dekaden dieser Perioden. In der vergangenen Dekade gab es gegenüber der Periode 1991-2020 in vielen Regionen Deutschlands im Mittel eine deutlich unterdurchschnittliche GWNB. Lediglich im Norden des Landes ist die GWNB auf vergleichsweise niedrigem Niveau relativ konstant geblieben oder hat sich sogar leicht erhöht, wobei jedoch auch in diesen Gebieten auf grundwasserbeeinflussten Standorten eine durch höhere Temperaturen bedingte stärkere Grundwasserzehrung stattgefunden hat.

Betragsmäßig ist die Veränderung der GWNB von mehreren Faktoren abhängig: Einerseits können veränderte mittlere Niederschlagshöhen in sehr niederschlagsreichen Gebieten wie z. B. in Hochlagen der Mittelgebirge und im Voralpenraum das Niveau der GWNB um signifikante Beträge verändern. So ist beispielsweise im Voralpenraum das sehr hohe Niveau der GWNB leicht abgesunken, liegt jedoch im Vergleich zu Regionen im Norden oder in der Mitte Deutschlands immer noch deutlich höher. Des Weiteren beeinflusst die mit dem Klimawandel fortschreitende Erwärmung die potenzielle und tatsächliche Verdunstung. Dies führt tendenziell zu einer stärkeren Grundwasserzehrung in Gebieten mit oberflächennah anstehendem Grundwasser, wie z. B. im Urstromtal der Elbe und in den Marschregionen an der Nordseeküste. Bei diesen Standortbedingungen verdunstet in der mittleren langjährigen Wasserbilanz durch den kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser mehr Wasser, als in den Aquifer vertikal versickert. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es sich bei diesen hydraulisch als Grundwasserentlastungsgebiete bezeichneten Standorten, in denen es zu einem natürlichen Emporquellen von Grundwasser kommt, um die vorrangigen Hotspot-Regionen mit Grundwasserdürre (Grundwassermangel) handelt, in denen Probleme für die Trinkwasserversorgung auftreten können.

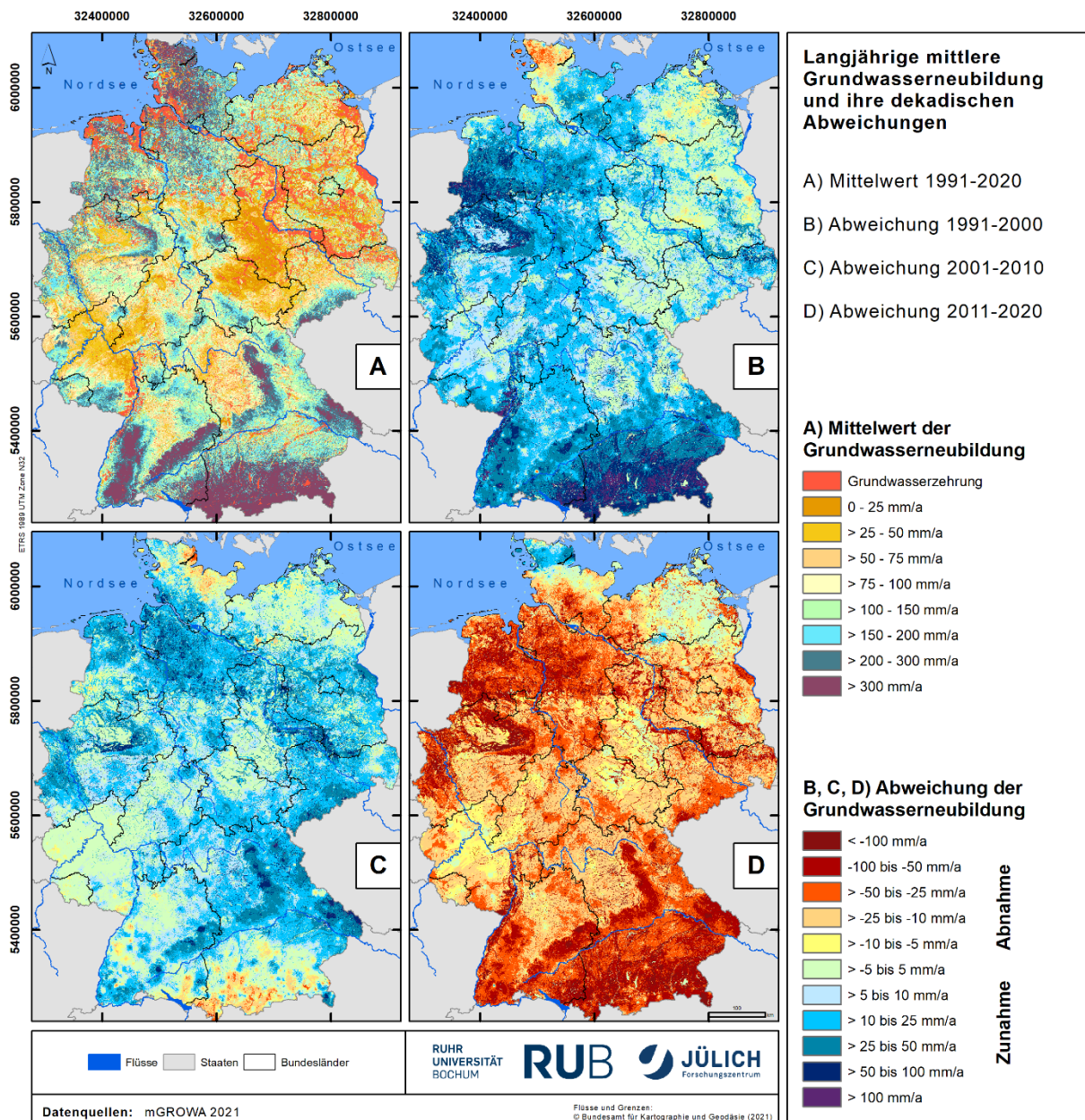
Außerdem beeinflusst die Geologie insbesondere in den Festgesteinsregionen das Niveau der GWNB. In geringdurchlässigen hydrogeologischen Einheiten können entsprechend geringe Rückgänge der GWNB resultieren, die jedoch im Vergleich zu einem relativ niedrigen Niveau eine deutliche Veränderung bedeuten, wie z. B. im Rheinischen Schiefergebirge. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die räumlich-zeitliche Klimavariabilität in den Regionen Deutschlands ein breites Spektrum an Variabilität im komplexen Prozess der GWNB hervorruft, welche schlussendlich flächendeckend nur mit entsprechend geeigneten statistischen Verfahren qualitativ und quantitativ bewertet werden kann.

Abbildung 30: Auf Basis der mGROWA-Simulation berechnete langjährige mittlere Grundwasserneubildung (GWNB) in der Periode 1961-1990 und die mittleren Abweichungen gegenüber der langjährigen mittleren GWNB in den 3 einzelnen Dekaden dieser Periode. Die Abweichungen im Bereich -5 bis 5 mm/a deuten auf eine praktisch unveränderte GWNB hin.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 31: Auf Basis der mGROWA-Simulation berechnete langjährige mittlere Grundwasserneubildung (GWNB) in der Periode 1991-2020 und die mittleren Abweichungen gegenüber der langjährigen mittleren GWNB in den 3 einzelnen Dekaden dieser Periode. Die Abweichungen im Bereich -5 bis 5 mm/a deuten auf eine praktisch unveränderte GWNB hin.



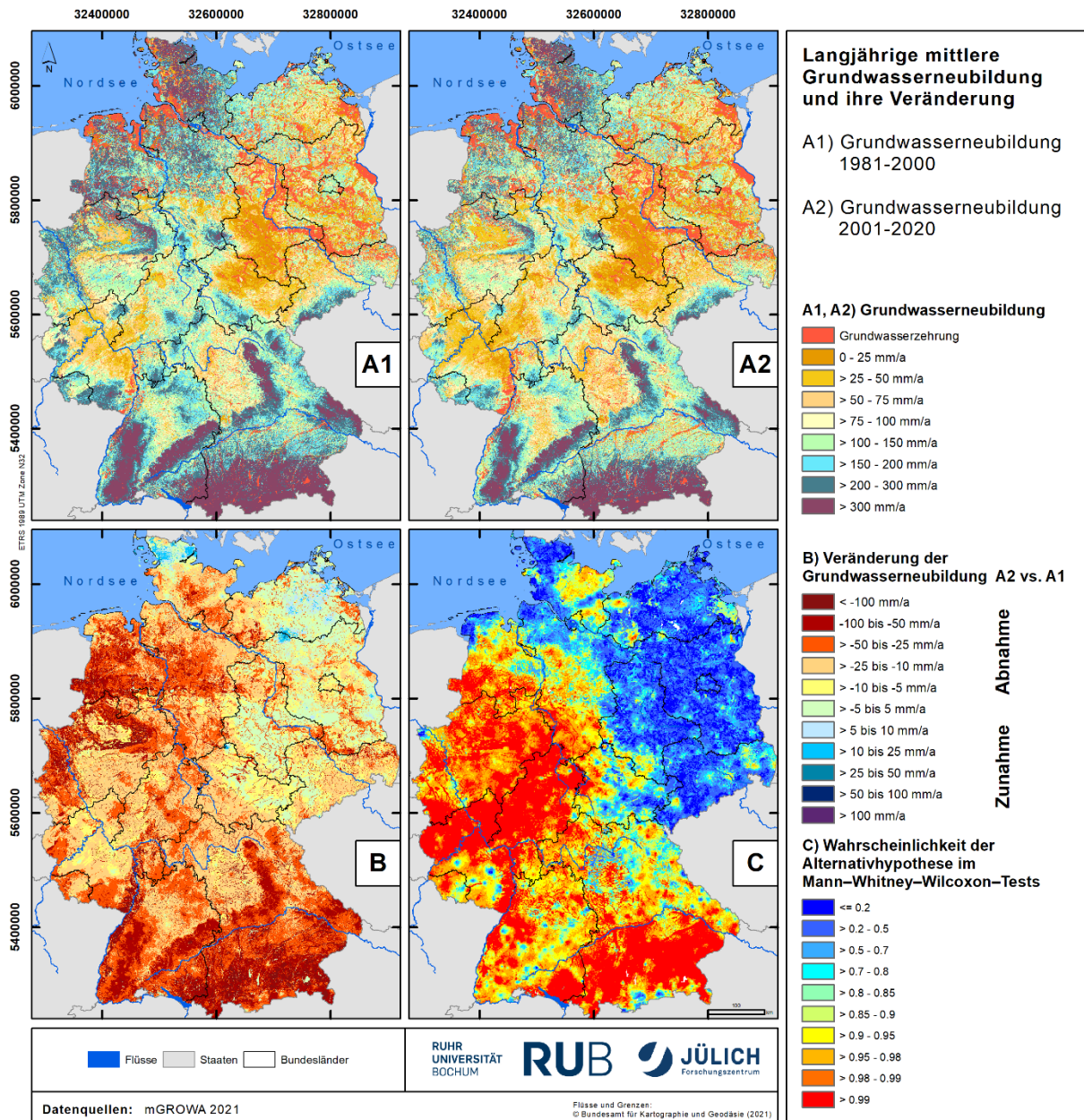
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Schon aufgrund der Kartendarstellungen der Abbildung 30 und Abbildung 31 wird deutlich, dass in vielen Regionen Deutschlands in den beiden Dekaden von 2001 bis 2020 gegenüber den Dekaden von 1981 bis 2000 nur eine unterdurchschnittliche GWNB stattgefunden hat. Inwieweit diese Veränderung im Grundwasserneubildungsregime signifikant ist, wurde mit Hilfe des Mann-Whitney-Wilcoxon-Tests (vgl. Kapitel 2.3.3.1) untersucht. Die Karten in Abbildung 32 zeigen dazu die Ergebnisse. Im Rahmen dieser Analyse wurde ab einer Wahrscheinlichkeit der Alternativhypothese von größer 0,85 von einer signifikanten Veränderung ausgegangen ($\alpha = 0,15$). Deutlich sichtbar hat 2001 bis 2020 hauptsächlich im Westen und Süden Deutschlands eine signifikante Veränderung der zeitlichen Muster der GWNB stattgefunden. Im Osten und Norden Deutschlands sind die Veränderungen entweder nicht oder noch nicht signifikant.

Darüber hinaus wurden die Zeitreihen der simulierten jährlichen GWNB mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests auf signifikante monotone Trends geprüft (Abbildung 33). Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde ab einer Wahrscheinlichkeit der Alternativhypothese größer 0,85 von einem signifikanten monotonen Trend ausgegangen ($\alpha = 0,15$). Monotone Trends können zusätzlich zu den signifikanten Veränderungen in der Verteilung der jährlichen GWNB auftreten. Die Abbildung 33 zeigt dazu die Ergebnisse für die Perioden 1961-1990 und 1991-2020. Dargestellt sind in den linken Karten (A2 u. B2) die räumlichen Verteilungen von Kendalls' Tau (τ) in den beiden Perioden, welches als Korrelationskoeffizient die Richtung der Veränderung anzeigt. In der Periode 1961-1990 verbleibt die GWNB weitgehend auf einem relativ konstanten Niveau. Nur in einzelnen Regionen wird eine leicht zu- oder abnehmende GWNB indiziert. In der Periode 1991-2020 wird hingegen insbesondere im Westen und Süden des Landes eine abnehmende GWNB angezeigt (negative Werte). Demnach gab es in der Periode 1961-1990 in einigen Regionen Süddeutschlands signifikante Trends leicht zunehmender Grundwasserneubildung. In weiten Teilen Deutschlands waren jedoch die zeitlichen Veränderungen in den Mustern der Grundwasserneubildung nicht signifikant. Für die Zeit seit 1991 lassen sich in vielen Regionen West- und Süddeutschlands signifikante monotone Trends abnehmender Grundwasserneubildung feststellen.

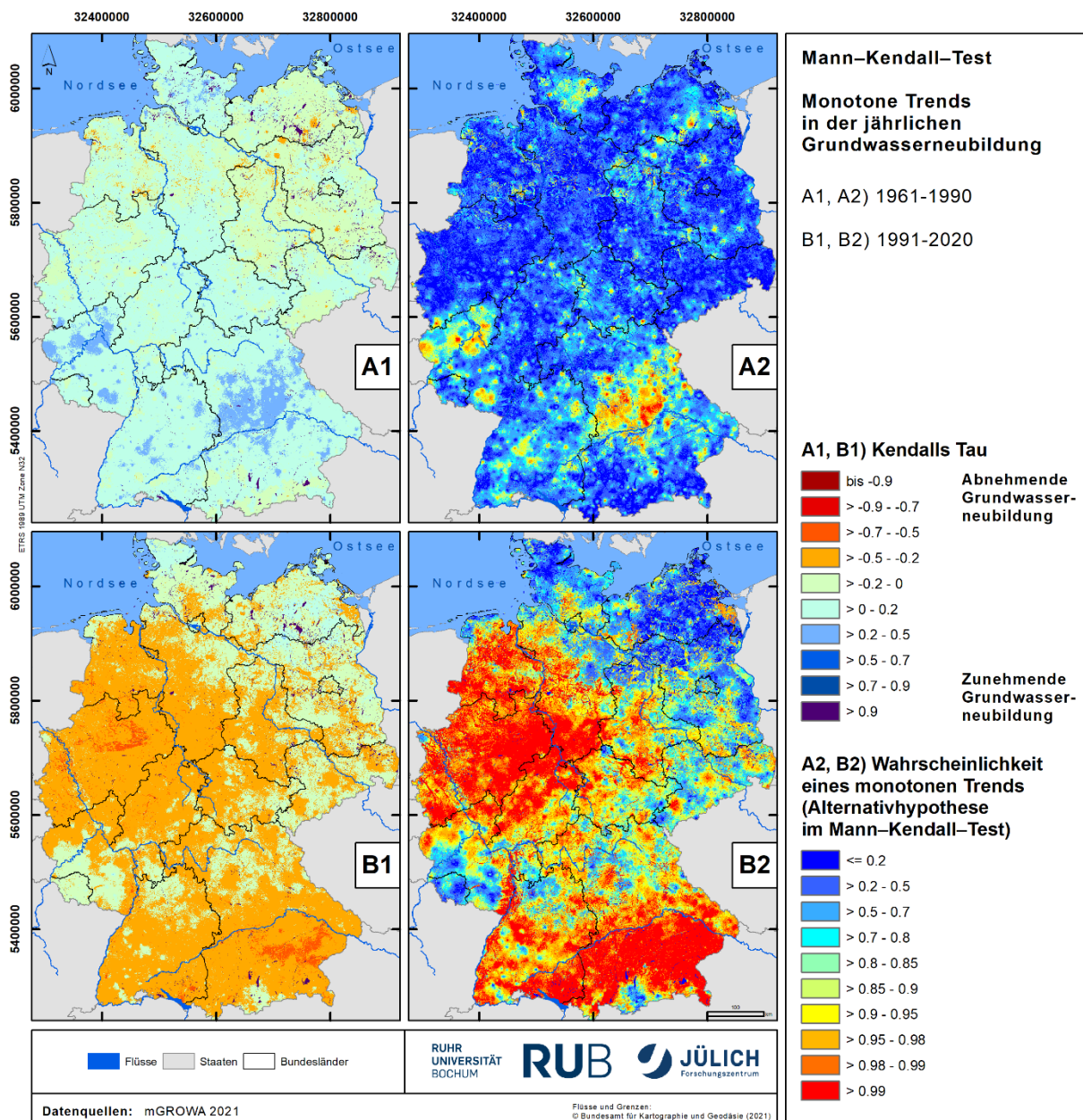
In den Darstellungen beider Tests (Abbildung 32 u. Abbildung 33) werden auch lokale starke Anomalien der Wahrscheinlichkeit der Alternativhypothese auffällig (z. B. im Norden von Rheinland-Pfalz, Abbildung 33 A2). Diese sind durch eine veränderte Zusammensetzung der verfügbaren Niederschlagsstationen (1961 bis 2020) beim DWD begründbar, die sich auf die Niederschlagsregionalisierung auswirken. Aus diesem Grund sollten die gezeigten Ergebnisse in weiteren Analysen nur regional aggregiert verwendet werden. Dadurch werden auf der regionalen Ebene abgesicherte Schlussfolgerungen hinsichtlich der unterschiedlich stark ausgeprägten Tendenzen und der Richtung der Veränderungen der GWNB möglich.

Abbildung 32: Auf Basis der mGROWA-Simulation berechnete langjährige mittlere Grundwasserneubildung (GWNB) in den Zeitspannen 1981-2000 und 2001-2020, die Veränderungen zwischen beiden Zeitspannen und die Wahrscheinlichkeit für die Alternativhypothese im Mann-Whitney-Wilcoxon-Test, die eine Information hinsichtlich einer signifikanten Veränderung des Grundwasserneubildungsregimes liefert.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 33: Ergebnisse der Analyse mit dem Mann-Kendall-Test auf monotone Trends in den Zeitreihen der Grundwasserneubildung (GWN) für die Perioden 1961-1990 (oben) und 1991-2020 (unten).

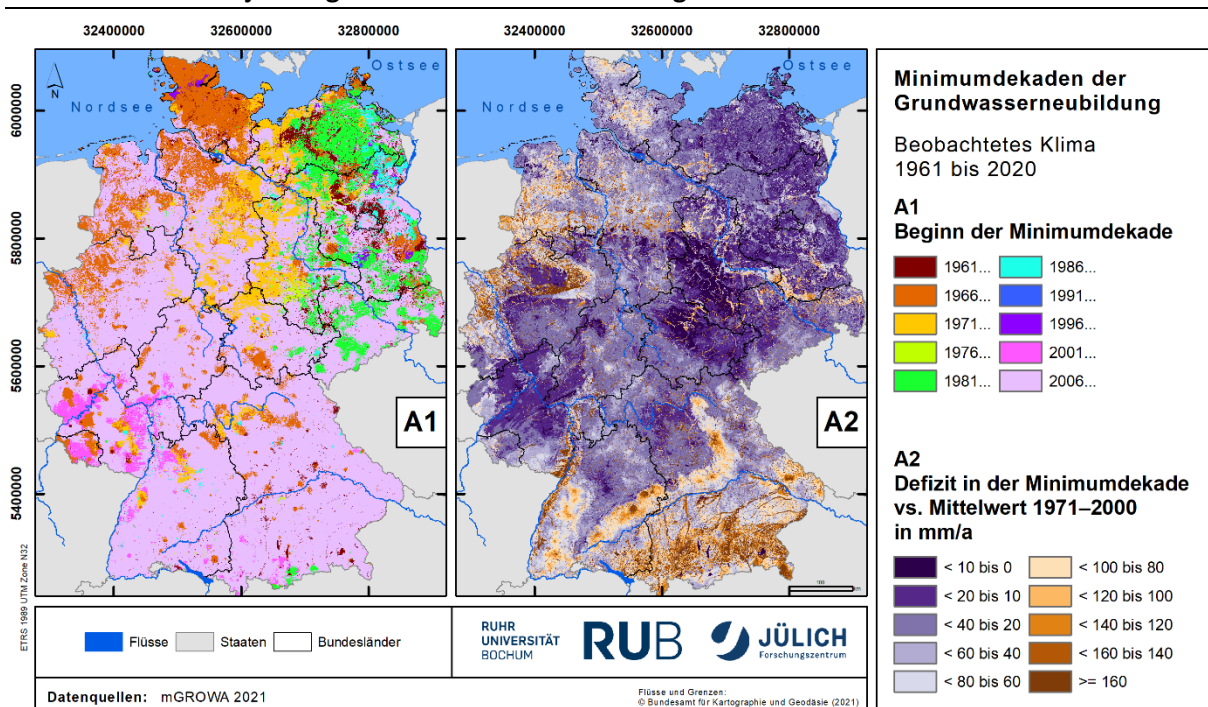


Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Die Abbildung 34 zeigt den Beginn der Minimumdekade und das Defizit der GWN in der jeweiligen Minimumdekade im Vergleich zum Mittelwert 1971-2000. Das Ziel der Auswertung war es, flächendeckend für ganz Deutschland die Dekade (aufeinanderfolgende 10 Jahre) zu identifizieren, in der die GWN im Mittel ein Minimum erreicht. Die somit identifizierten Minimumdekaden stellen dann einen natürlichen hydrologischen Status dar, der sich in den jeweiligen Regionen aufgrund veränderter Phasen länger anhaltender Trockenheit (Klimavariabilität und Klimawandel) einstellt. Aus der Karte des Beginns der identifizierten Minimumdekade lässt sich leicht erkennen, dass diese in vielen Regionen Deutschlands nach dem Jahr 2006 beginnt. Bemerkens-

wert ist jedoch, dass in räumlicher Nähe zu den Zonen mit einem Beginn nach 2006 die Minimumdekaden schon in den 1960-iger oder 1970-iger Jahren stattfanden, im Osten Deutschlands auch in den 1980-igern. Daraus kann geschlossen werden, dass sich derzeit in sehr vielen Regionen die GWNB praktisch auf das Niveau der Minimumdekade hinbewegt oder dieses kürzlich erreicht hatte. Von dieser Entwicklung ausgenommen scheint der Norden Deutschlands zu sein. Das Defizit der GWNB zum Mittelwert 1971-2000 ist mit einem Wert größer als 100 mm stärker in gut durchlässigen Festgesteinsgrundwasserleitern, den Grundwasserneubildungsgebieten der Lockergesteinsbereiche im Süden und Westen, sowie in den Grundwasserzehrgebieten (geringer Grundwasserflurabstand) ausgeprägt. Aufgrund des relativ geringen Niveaus der langjährigen mittleren GWNB im mitteldeutschen Trockengebiet ist dort auch das Defizit entsprechend schwach ausgeprägt. Es findet jedoch auch in solchen Gebieten während einer Minimumdekade noch GWNB statt.

Abbildung 34: Beginn der Minimumdekade und Defizit der Grundwasserneubildung (GWNB) in der jeweiligen Minimumdekade im Vergleich zum Mittelwert 1971-2000.

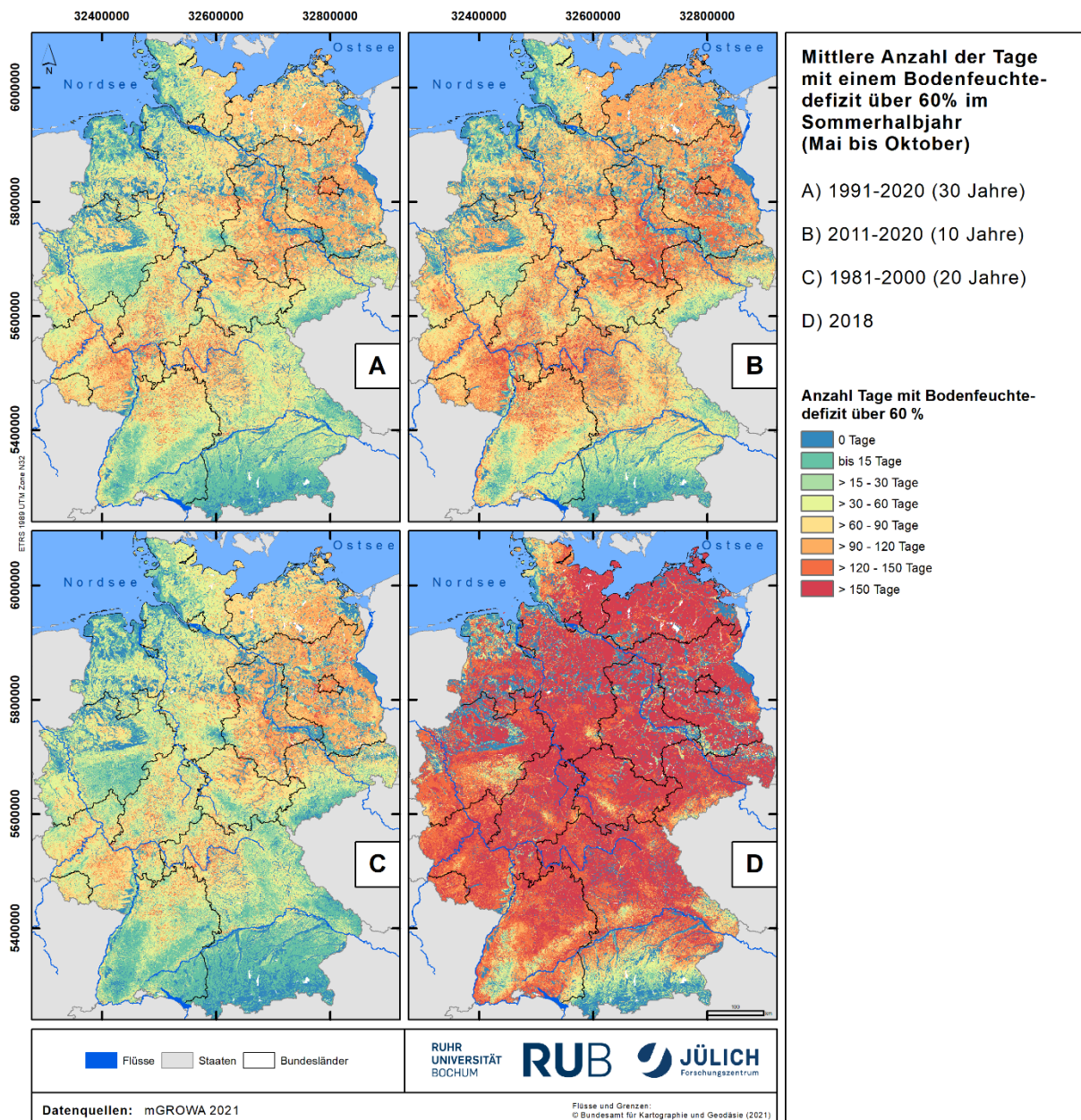


Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Die Abbildung 35 zeigt die mit mGROWA ermittelte Statistik zum Bodenfeuchtedefizit (BFD) in der Wurzelzone der Vegetation in verschiedenen Zeitspannen von 1991 bis 2020. Das BFD beträgt 100 %, wenn die Böden bis auf den permanenten Welkepunkt durch den Verdunstungsprozess ausgetrocknet sind. Die Vegetation kann dann kein Wasser mehr aus dem Boden aufnehmen. Das BFD beträgt 0 %, wenn die Böden auf Feldkapazität aufgefüllt sind. Die Feldkapazität umfasst die Menge an Wasser, welche die Böden im Porenraum entgegen der Schwerkraft speichern können, d.h. ohne dass eine Sickerwasserbewegung einsetzt. Das Modell mGROWA kann die in Abbildung 35 dargestellten Tage mit einem BFD über einem Schwellenwert in beliebigen Zeitspannen einer Simulation mitzählen. Ab einem Schwellenwert von 60 % entwickelt sich für die in Deutschland typische Vegetation ein relevanter Wasserstress. Je größer die Anzahl der Tage mit einem BFD über diesem Schwellenwert, desto länger hält der Wasserstress für die Vegetation an.

Im langjährigen Mittel liegt das BFD in den niederschlagsreichen Gebieten Deutschlands an weniger als 30 Tagen pro Sommerhalbjahr über dem Schwellenwert von 60 %. Wenn Böden aufgrund geringer Grundwasserflurabstände über eine Anbindung an das Grundwasser verfügen (Grundwasserzehrgebiete), kann das BFD während Trockenperioden durch den einsetzenden kapillaren Aufstieg schnell ausgeglichen werden. Dann resultieren meist nur sehr wenige Tage über dem Schwellenwert. In vielen landwirtschaftlich genutzten Gebieten treten in langjährig-durchschnittlichen Jahren (1991-2020 oder 1981-2000) bis zu 90 Tage mit Überschreitung des Schwellenwertes auf. In der vergangenen Dekade 2011-2020 wurden durch die Simulation jedoch auch verbreitet durchschnittlich bis zu 120 Tage registriert. Im Extremjahr 2018, in dem ganz Deutschland unter einer extrem stark ausgeprägten Dürre litt, wurde der Schwellenwert an über 150 Tagen überschritten. Die Vegetation stand demnach beinahe das gesamte Sommerhalbjahr im Bereich relevanten Wasserstress.

Abbildung 35: Mittlere Anzahl der Tage mit einem Bodenfeuchtedefizit über 60 % im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober).



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

2.3.10 Ergebnisse aus den Szenarien (Projektionen) des Wasserhaushalts mit dem Modell mGROWA (1971 bis 2100)

Autor*innen: Herrmann, F., McNamara, I.

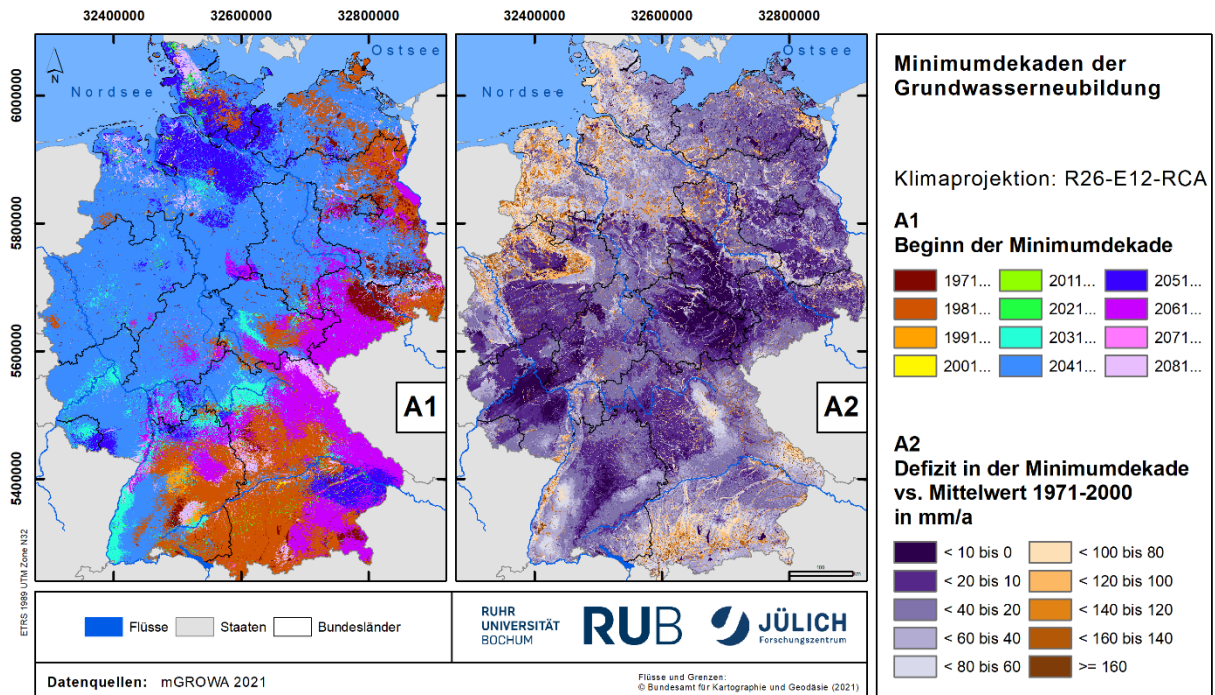
Im Rahmen des Projektes WADKlim wurden mit mGROWA auch Projektionen auf Basis der Ergebnisse der Klimaprojektionen R26-E12-RCA, R85-CA2-CLM und R85-MI5-CLM für die Zeit von 1971 bis 2100 durchgeführt. Neben vielen anderen Größen liefern diese Projektionen auch Zeitreihen der Grundwasserneubildung in hoher räumlicher Auflösung. Im Folgenden werden diese Zeitreihen kurz andiskutiert und im Hinblick auf die Ausprägung zukünftiger Minimumdekaden der GWNB untersucht. In den mGROWA-Projektionen resultiert die GWNB aus dem simulierten

Gesamtabfluss, der mit Hilfe der in Abbildung 3 dargestellten Verfahrensweise in Abflusskomponenten aufgespalten wird. Räumlich-zeitlich variable anthropogene Einflüsse auf den natürlichen Prozess der GWNB entstammen maßgeblich aus einer veränderten Landnutzung, insb. mit veränderten Vegetationsmustern (z. B. durch Waldumbau) und Versiegelungsgraden, sowie den Maßnahmen zur künstlichen Drainierung landwirtschaftlicher Nutzflächen. Im Rahmen der hier vorliegenden Studie lagen dafür keine geeigneten Zukunftsszenarien vor. Aus diesem Grund wurden in den Projektionen alle diesbezüglichen Parameter bis zum Ende des 21. Jahrhunderts konstant gehalten.

Das Ziel der Auswertung war es, flächendeckend für ganz Deutschland die Dekaden (aufeinanderfolgende 10 Jahre) zu identifizieren, in denen die mittlere jährliche GWNB in den Projektionen ein Minimum erreicht. Die in den Minimumdekaden erreichte GWNB kann dann in Bezug zur jeweiligen historischen Referenzperiode 1971-2000 gesetzt werden. In Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38 sind links für die drei Projektionen die Zeiträume des Beginns der Minimumdekaden der GWNB und rechts die zur jeweiligen historischen Referenzperiode resultierenden Defizite dargestellt. Die Defizit-Datenraster können als Änderungssignale der GWNB in Trockenperioden angesehen werden. Demnach kann explizit für eine Region die Grundwasserneubildungsmenge bestimmt werden, die im Szenario in der trockensten Dekade gegenüber dem bekannten (gegenwärtigen) Referenzniveau in Wasserbilanzbetrachtungen fehlt.

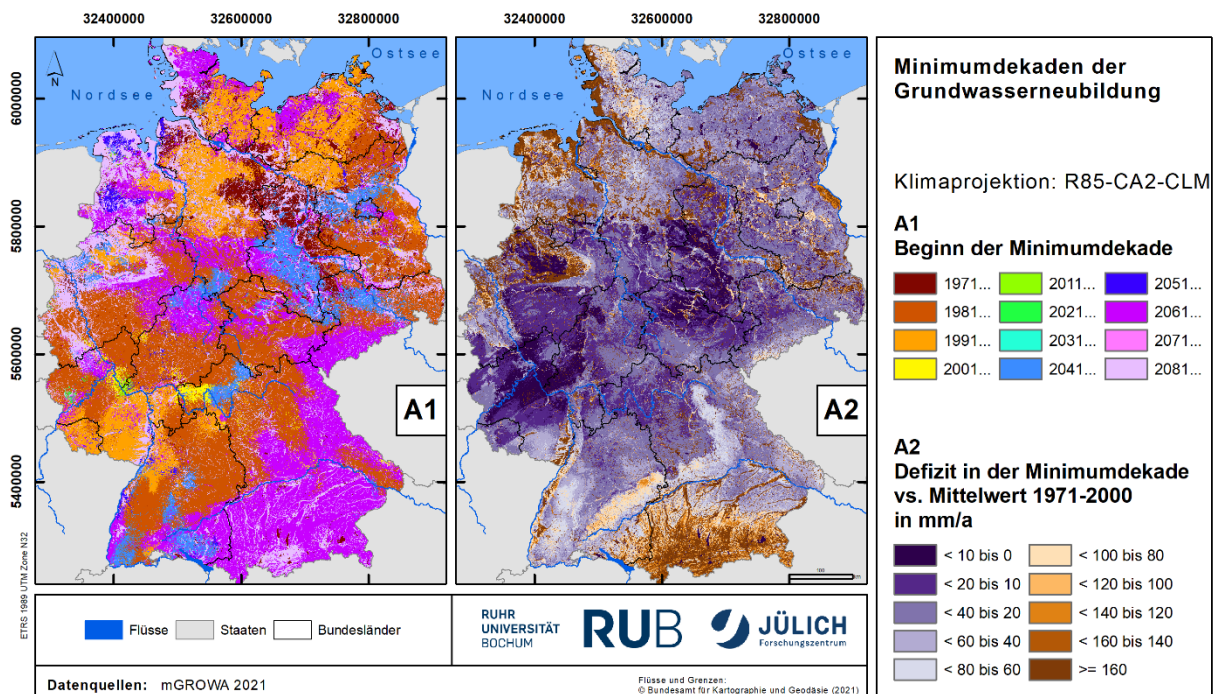
Generell sind globale Klimaprojektionen und damit die regionalen Projektionen von hydrologischen Größen mit mGROWA nicht zeitpunktgenau. Das bedeutet, es sollten keine einzelnen Jahre der Projektionen mit Beobachtungen verglichen werden, sondern nur das statistische Verhalten über längere Zeiträume. Außerdem existieren immer noch große Unsicherheiten hinsichtlich der Fähigkeiten der Klimamodelle, eine exakte multi-dekadische Variabilität vorherzusagen. Dies hat Auswirkungen auf die Interpretation der projizierten GWNB und insbesondere auf die Muster der zeitlichen Veränderungen. Beginnt beispielsweise in einer Projektion von 1971 bis 2100 die Minimumdekade bereits im 20. Jahrhundert, kann interpretiert werden, dass auf diesem Entwicklungspfad zukünftig keine stärker ausgeprägte Trockenperiode auftritt und die GWNB nicht stärker absinkt, als dies in der Vergangenheit bereits der Fall war. Tritt eine Minimumdekade in einer Projektion erst in der Zukunft auf, so darf das Jahr des Beginns ebenfalls keinen Einfluss auf die Verwendung in Szenarien haben. An dieser Stelle ist eher die defensive Interpretation empfohlen, dass mögliche zukünftige Trockenperioden zu einem stärkeren Absinken der GWNB führen können, als dies aus der Vergangenheit bekannt ist. Deutlich sichtbar variiert in den drei Projektionen der Beginn der Minimumdekaden kleinräumig- und auch überregional. Es gibt jedoch auch deutliche Tendenzen, dass in großen Teilen Deutschlands die Minimumdekaden eher in der Zukunft liegen werden als in der Vergangenheit (z. B. R85-MI5-CLM, Abbildung 38). Dies kann so interpretiert werden, dass Grundwasserdürren zukünftig stärker ausgeprägt sein können, als dies aus der Vergangenheit bekannt ist. Insgesamt ergibt sich ein sehr diverses Bild des möglichen Auftretens der Minimumdekaden, d.h. es deutet in den drei betrachteten Projektionen nichts darauf hin, dass in Zukunft alle Regionen Deutschlands nahezu gleichzeitig von ausgeprägten und aus klimatologischer Perspektive minimaler GWNB betroffen sein könnten. Wiederum sollte diese Schlussfolgerung auch nicht falsch interpretiert werden. Auch zukünftig kann in ganz Deutschland über ein paar Jahre hinweg eine unterdurchschnittliche Grundwasserneubildung nahezu flächendeckend stattfinden. Diese Grundwasserdürre wäre dann jedoch regional unterschiedlich stark ausgeprägt.

Abbildung 36: Minimumdekaden der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung (GWNB). Projektion basierend auf R26-E12-RAC und mGROWA.



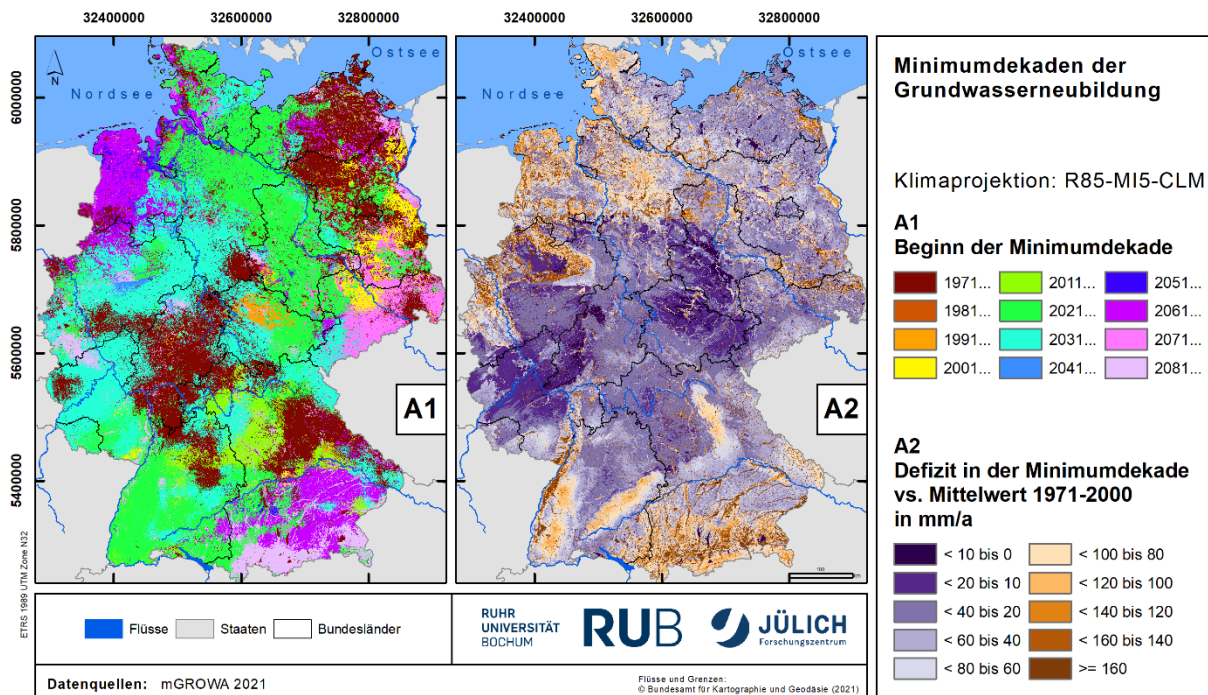
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 37: Minimumdekaden der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung (GWNB). Projektion basierend auf R85-CA2-CLM und mGROWA.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 38: Minimumdekaden der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung (GWNB). Projektion basierend auf R85-MI5-CLM und mGROWA.

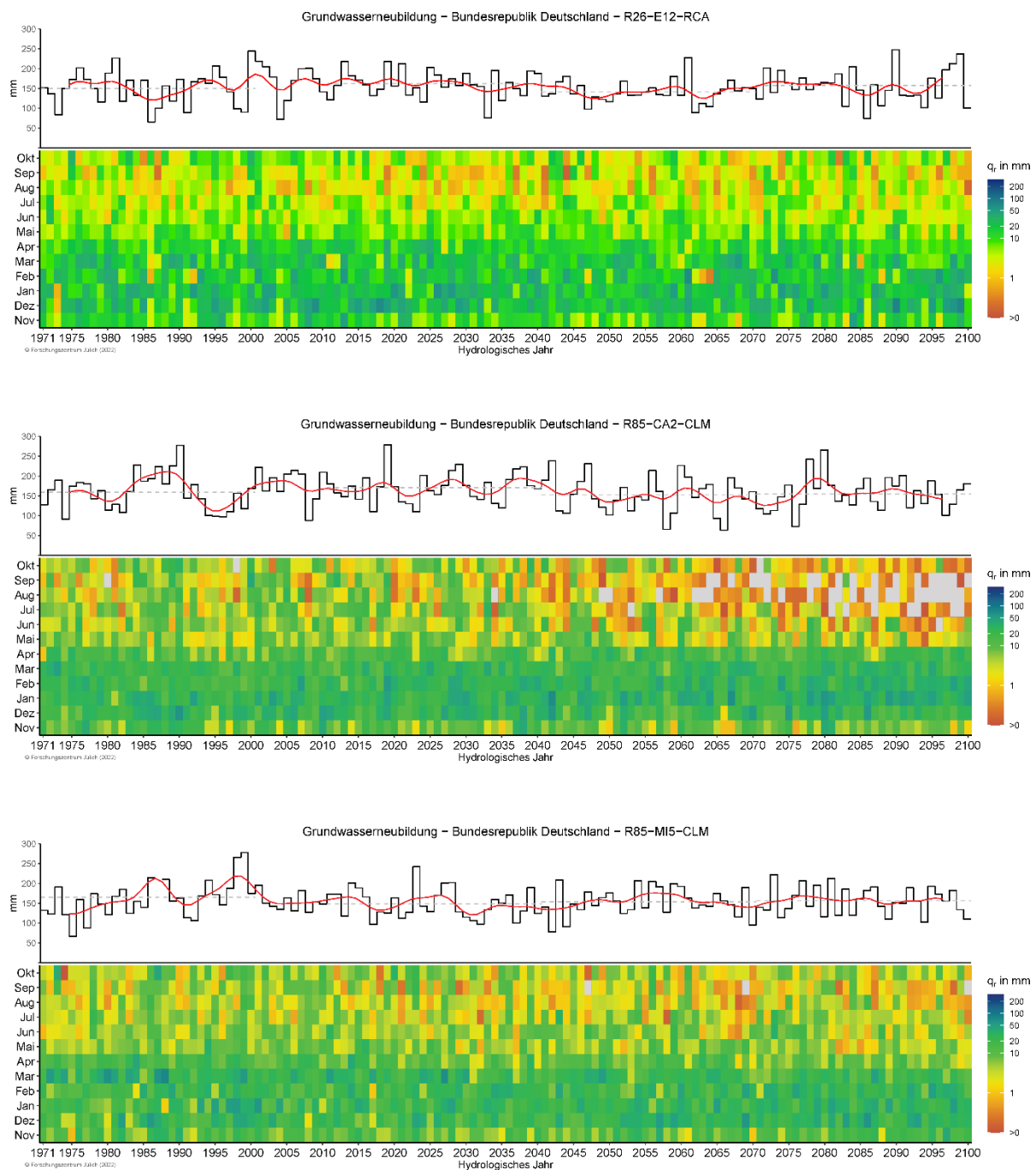


Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Die Schlussfolgerungen werden auch aus den Zeitreihendarstellungen der GWNB in Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 41 und Abbildung 42 deutlich. In diesen sind die Ergebnisse für Deutschland sowie exemplarisch für die NUTS-3-Regionen Ludwigslust-Parchim (Mecklenburg-Vorpommern), Weimar (Thüringen) und Garmisch-Partenkirchen (Bayern) aggregiert dargestellt. Genauere vergleichende visuelle Analysen dieser Zeitreihen lassen ebenfalls die Diversität der zeitlich und räumlich unterschiedlich stark ausgeprägten Einflüsse der Klimavariabilität auf die GWNB erkennen. Sichtbar werden beispielsweise:

- ▶ über 20 Jahre anhaltende Trends einer Abnahme der GWNB von 2030 bis 2050 und dann eine Stabilisierung auf niedrigerem Niveau und eine leichte Zunahme bis zum Ende des Jahrhunderts in Ludwigslust-Parchim mit R85-CA2-CLM in Abbildung 40 (Mitte),
- ▶ relativ kontinuierlich um einen Mittelwert unter 50 mm/a ohne erkennbare länger anhaltende Trends bis zum Ende des Jahrhunderts schwankende GWNB in Weimar in allen drei Projektionen in Abbildung 41,
- ▶ eine 2020 einsetzende schwankende starke Abnahme der GWNB bis zum Ende des Jahrhunderts, deren Ende nicht erkennbar ist, in Garmisch-Partenkirchen mit R85-CA2-CLM in Abbildung 42 (Mitte) oder
- ▶ eine am Ende des Jahrhunderts tendenziell mit größerer Amplitude schwankende GWNB ungefähr auf dem Referenzniveau 1971-2000 in Garmisch-Partenkirchen Abbildung 42 (oben).

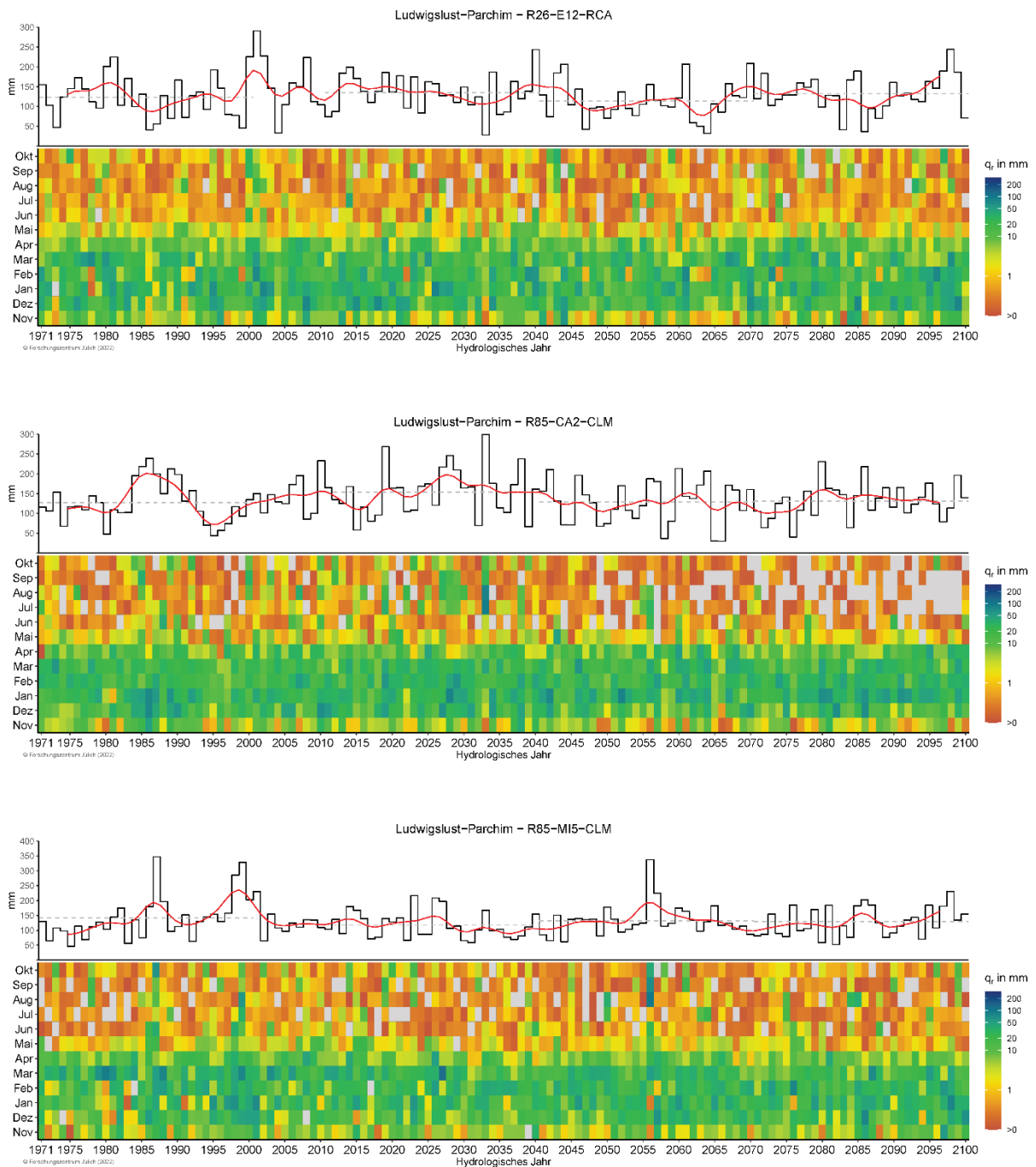
Abbildung 39: Zeitliche Muster der Grundwasserneubildung (GWNB) aggregiert auf die gesamte Bundesrepublik Deutschland aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RCA (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und mGROWA.



Erläuterungen zur Grafik: Der obere Teil zeigt die Summe der Grundwasserneubildung in den hydrologischen Jahren (November bis Oktober) in Form eines Stufendiagrammes. Zusätzlich ist in Rot die Tiefpass-gefilterte Zeitreihe dargestellt, d.h. es werden dadurch die mittelfristigen Schwankungen hervorgehoben und längerfristige Trends deutlicher sichtbar. Für die Berechnung wurde ein Gauß-Filter auf eine Periode von jeweils 10 Jahren angewendet. In Grau gestrichelt sind außerdem die langjährigen Mittelwerte der 30-Jahre-Perioden dargestellt. In der zweiten (unteren) Komponente der Zeitreihendarstellung sind für die einzelnen hydrologischen Jahre die Monatssummen farblich kodiert dargestellt. Durch diese Darstellungsweise werden saisonale Muster und deren Veränderungen visualisiert. Monate ohne Grundwasserneubildung oder mit Grundwasserzehrung sind grau dargestellt.

Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

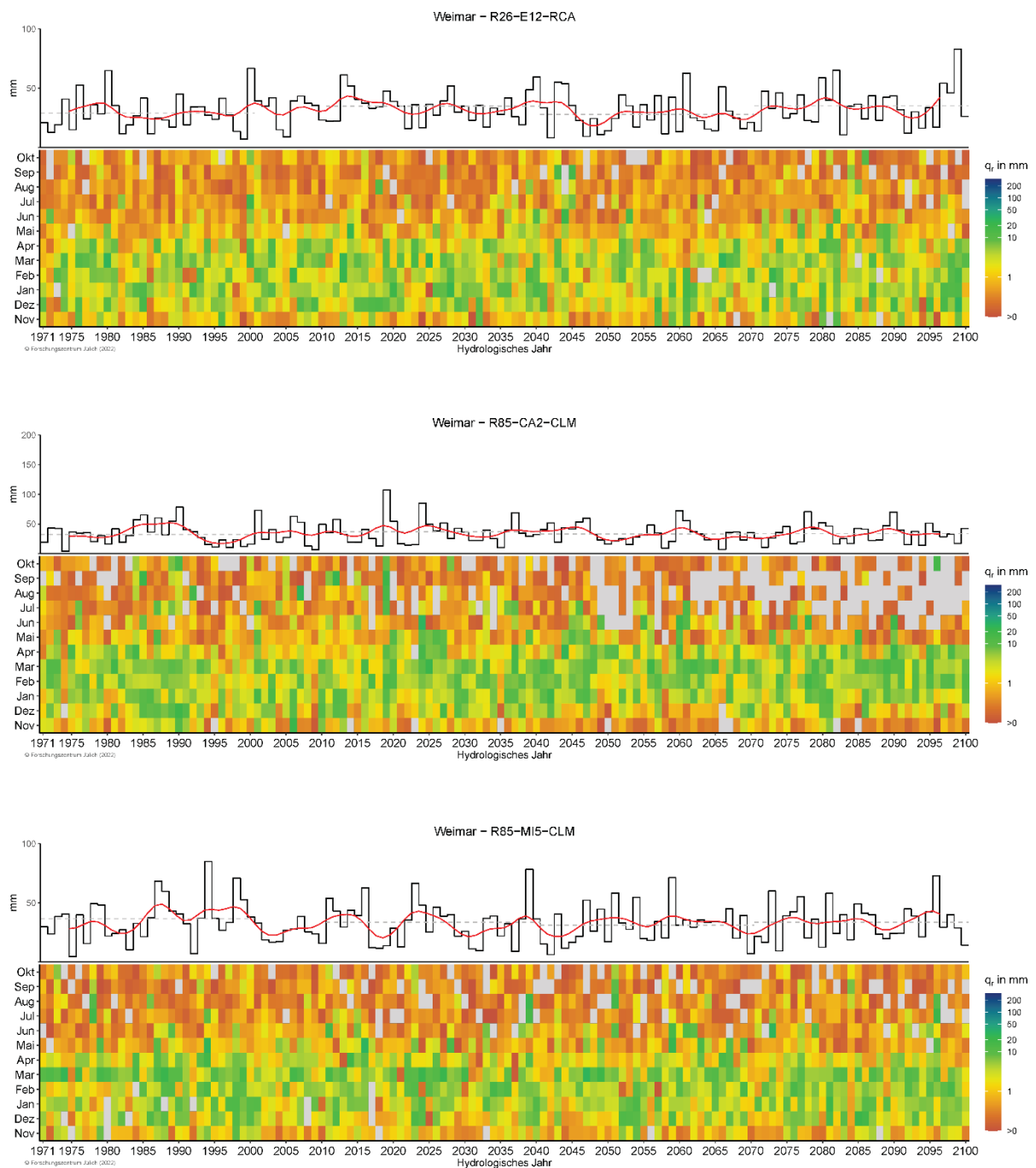
Abbildung 40: Zeitliche Muster der Grundwasserneubildung (GWNB) aggregiert auf die NUTS-3-Region Ludwigslust-Parchim (Mecklenburg-Vorpommern) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RCA (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und mGROWA.



Erläuterungen zur Grafik: Siehe Abbildung 39.

Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

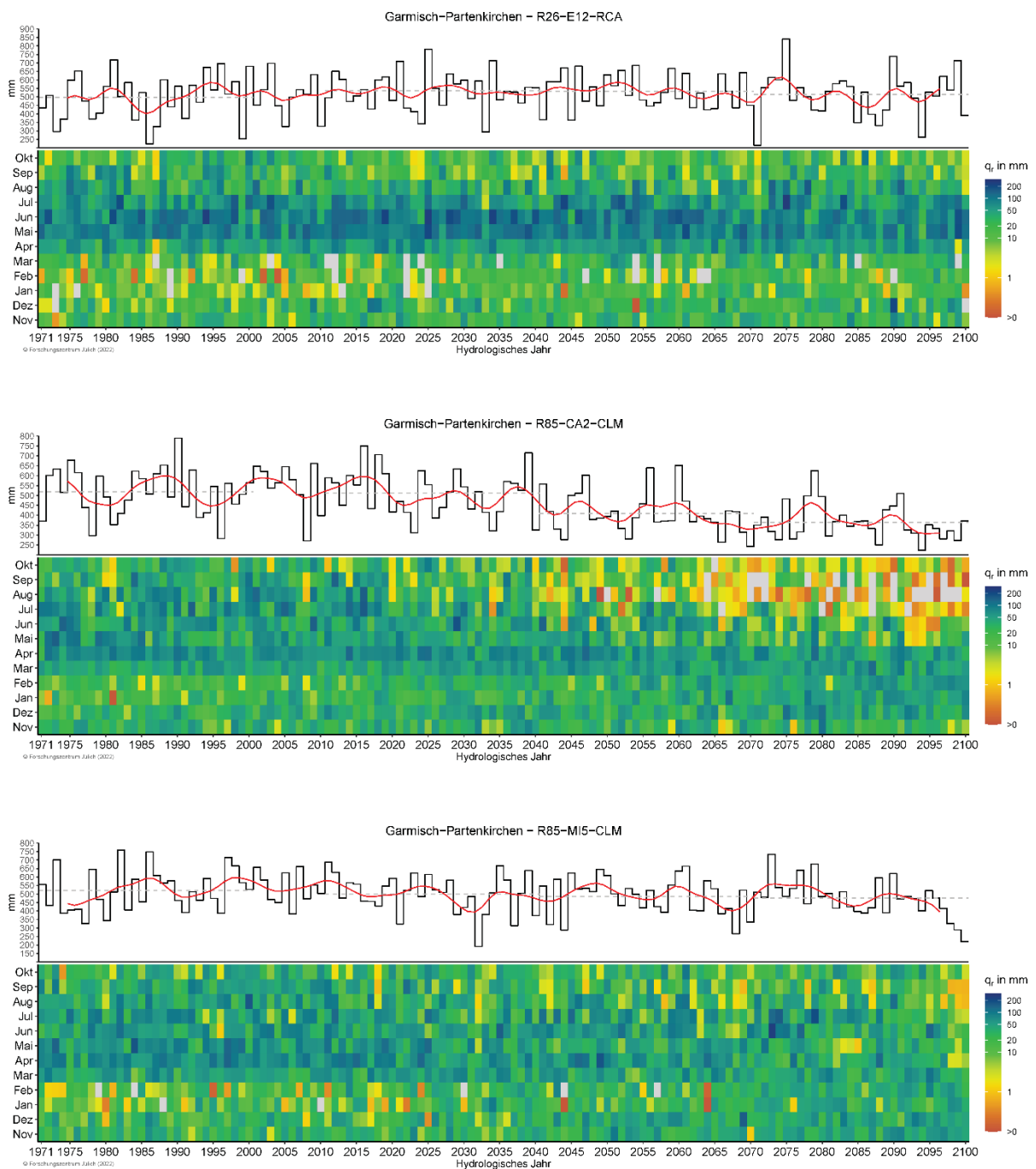
Abbildung 41: Zeitliche Muster der Grundwasserneubildung (GWNB) aggregiert auf die NUTS-3-Region Weimar (Thüringen) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RCA (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und mGROWA.



Erläuterungen zur Grafik: Siehe Abbildung 39.

Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 42: Zeitliche Muster der Grundwasserneubildung (GWNB) aggregiert auf die NUTS-3-Region Garmisch-Partenkirchen (Bayern) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RCA (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und mGROWA.



Erläuterungen zur Grafik: Siehe Abbildung 39.

Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Die saisonalen Schwankungen der GWNB bleiben im nicht-alpinen Raum weitgehend erhalten, d.h. im Sommerhalbjahr findet Grundwasserzehrung auf grundwasserbeeinflussten Standorten oder nur eine geringe GWNB statt. Das Winterhalbjahr bleibt die relevante Grundwasserneubildungsphase. In Regionen, die durch alpine Mittel- und Hochlagen dominiert werden, sowie in den Hochlagen der Mittelgebirge, kann eine Veränderung der Saisonalität einsetzen. Beispiels-

weise verschiebt sich mit R85-CA2-CLM die Phase mit relevanter GWNB aufgrund der sukzessive kürzer werdenden Schneebedeckung ins Winterhalbjahr und in trockener werdenden Sommern sinkt die GWNB, sodass in diesen Gebieten am Ende des Jahrhunderts die Saisonalität eher der gegenwärtig für flachere Teile der Mittelgebirge beobachteten Saisonalität gleicht (Abbildung 42, Mitte). Diese Veränderung der Saisonalität ist jedoch nicht in allen 3 betrachteten Projektionen gleich ausgeprägt. In R26-E12-RCA (Abbildung 42, oben) findet keine nennenswerte Verschiebung statt und in R85-MI5-CLM (Abbildung 42, unten) ist sie bis zum Ende des Jahrhunderts nur sehr gering ausgeprägt.

In den Karten des Defizits der GWNB zur Referenzperiode Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38 (jeweils rechts) werden in den Festgesteinsbereichen die unterschiedlichen Fähigkeiten der hydrogeologischen Gesteinseinheiten deutlich, Grundwasser aufzunehmen. In den hydraulisch gering durchlässigen Einheiten findet nur eine geringe GWNB statt und auch die Defizite sind dann mengenmäßig gering ausgeprägt. In diesen Einheiten fließen größere Mengen als Direktabfluss ab und wären beispielsweise für das Auffüllen von Talsperren relevant. In den gut durchlässigen verkarsteten Gesteinseinheiten, beispielsweise in der Schwäbischen Alb, sind die Defizite stärker ausgeprägt. In den Lockergesteinsgebieten weisen grundwasserbeeinflusste Standorte tendenziell höhere Defizite auf als grundwasserferne Standorte. Grund ist der sehr stark zunehmende kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser in die Wurzelzone der Vegetation in den Sommerhalbjahren bei ausgeprägten Trockenphasen, der dann in regenarmen Wintern nicht durch GWNB ausgeglichen werden kann. Dadurch können über längere Zeiträume größere Grundwasserzehrgebiete auftreten (z. B. in R85-CA2-CLM, Abbildung 37). Außerdem tendieren die Lockergesteinsgebiete zu höheren Defiziten, in denen außerhalb der Trockenphasen eine hohe GWNB stattfindet, beispielsweise das Voralpenland in R85-CA2-CLM (Abbildung 37).

2.3.11 Ergebnisse aus den Simulationen der Grundwasserdynamik mit TSMP/ ParFlow (1961 bis 2020)

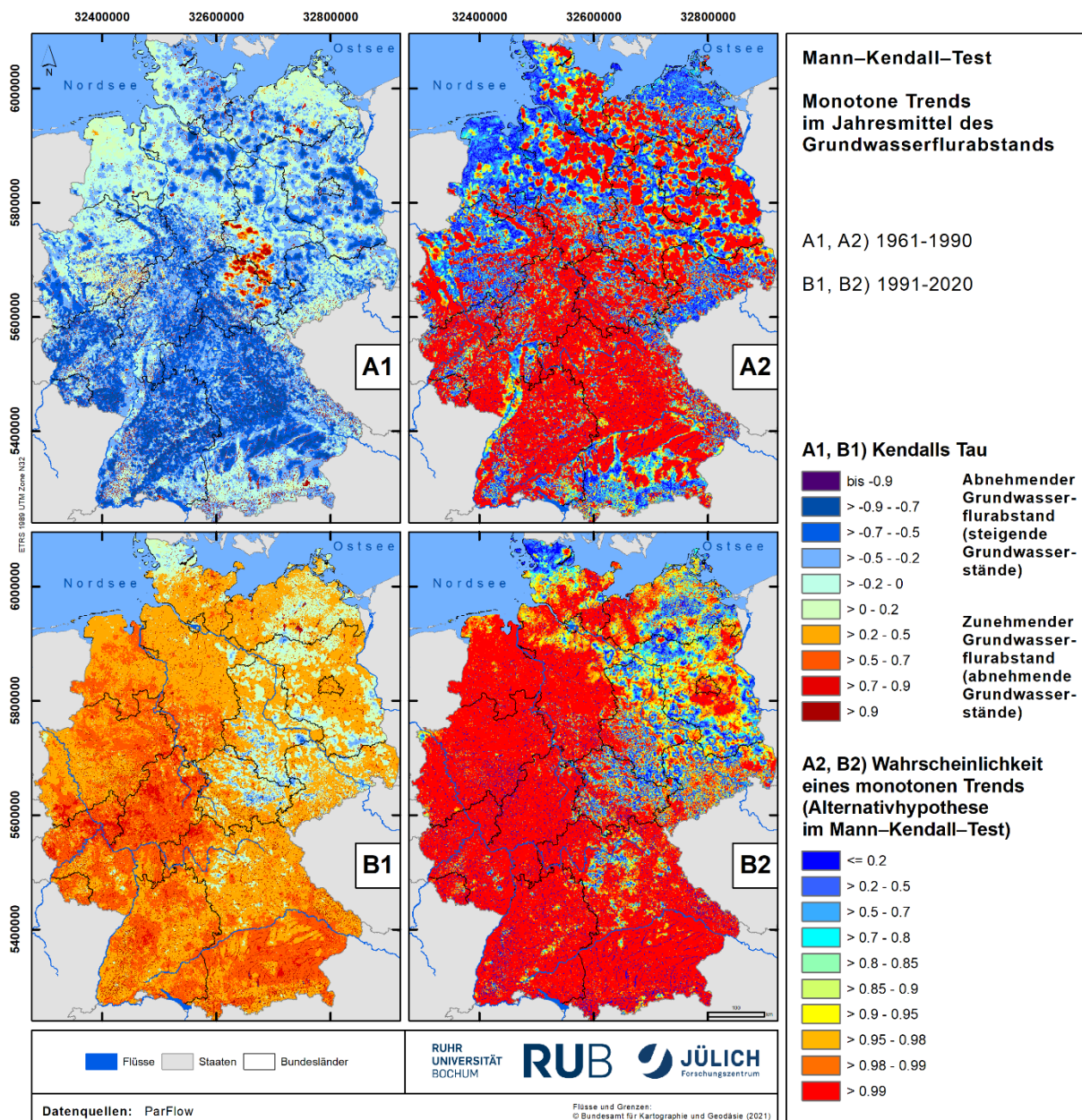
Autor*innen: Herrmann, F., Kollet, S., Wagner, N.

Mit TSMP in der Konfiguration ParFlow-Standalone (PF-S) wurde eine Simulation mit dem Ziel durchgeführt, die 3D Grundwasserdynamik im obersten Grundwasserleiter und die Dynamik des Bodenwassers in der ungesättigten Zone für die gesamte Zeitspanne von 1961 bis 2020 zu simulieren. Aufbauend auf dieser Simulation war es möglich, Trendanalysen zur Veränderung des Grundwasserflurabstandes (GWFA) und zu den Anomalien im Füllstand der bilanzierten unterirdischen Wasserspeicher (FUWS) durchzuführen.

Die Füllstände der unterirdischen Wasserspeicher und die Grundwasserflurabstände hängen auf nichtlineare Art und Weise vom räumlich und zeitlich variablen Zusammenspiel zwischen Sickerwasserbildung (und Grundwasserneubildung), also der Auffüllung der Grundwasserspeicher, sowie deren Entleerung durch den Basisabfluss ab. Dabei wird die Sickerwasserbildung stark durch die Klimavariabilität beeinflusst und der Basisabfluss durch die Füllstände. Beide Prozesse werden zusätzlich durch lokale und kleinräumige topographische und geohydraulische Charakteristiken der hydrogeologischen Gesteinseinheiten gesteuert. Die Simulation PF-S bildet dieses Zusammenspiel aus klimatologisch-hydrogeologischer Perspektive räumlich hoch aufgelöst ab, d.h. in den folgenden Darstellungen ist kein anthropogener Einfluss, z. B. durch Grundwasserförderung, immanent.

Die Abbildung 43 zeigt die Darstellung der Ergebnisse des Mann-Kendall-Trendtests (MKT), mit dem monotone Trends im GWFA und damit steigende oder fallende Grundwasserstände identifiziert wurden. Dargestellt sind in den linken Karten die räumlichen Verteilungen von Kendalls' Tau (τ) in den beiden Perioden 1961-1990 und 1991-2020, welches als Korrelationskoeffizient die Richtung der Veränderung anzeigt. Blaue Farbtöne zeigen einen abnehmenden GWFA (steigende Grundwasserstände) und rote Farbtöne einen zunehmenden GWFA (sinkende Grundwasserstände) an. Die Periode 1961-1990 ist eher durch konstante oder leicht abnehmende GWFA gekennzeichnet. Lediglich im mitteldeutschen Trockengebiet resultieren zunehmende GWFA. Demgegenüber ist die Periode 1991-2020 großräumig eher durch zunehmende GWFA geprägt. Nur einige Regionen im Norden und Osten Deutschlands zeigen in dieser Periode keine Tendenzen und nur wenige Gebiete abnehmende GWFA. In Abbildung 43 (rechts) sind zusätzlich die Wahrscheinlichkeiten der Alternativhypothese (es besteht ein monotoner Trend) dargestellt. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde ab einer Wahrscheinlichkeit größer 0,85 von einem signifikanten monotonen Trend ausgegangen ($\alpha = 0,15$). In der Periode 1961-1990 lagen demnach insbesondere auf grundwassernahen Standorten im Norden keine signifikanten Trends im Grundwasserflurabstand vor, wohingegen in den Mittelgebirgsregionen die Grundwasserflurabstände tendenziell abgenommen haben. Die Tendenzen hin zu zunehmenden Grundwasserflurabständen in der Periode 1991-2020 sind hauptsächlich im Westen und Süden Deutschlands signifikant. Weiter im Norden und Osten sind die Veränderungen im Grundwasserflurabstand jedoch nicht signifikant.

Abbildung 43: Ergebnisse der Analyse mit dem Mann-Kendall-Test (MKT) auf monotone Trends in den Zeitreihen des Grundwasserflurabstandes (GWFA) für die Perioden 1961-1990 (oben) und 1991-2020 (unten).

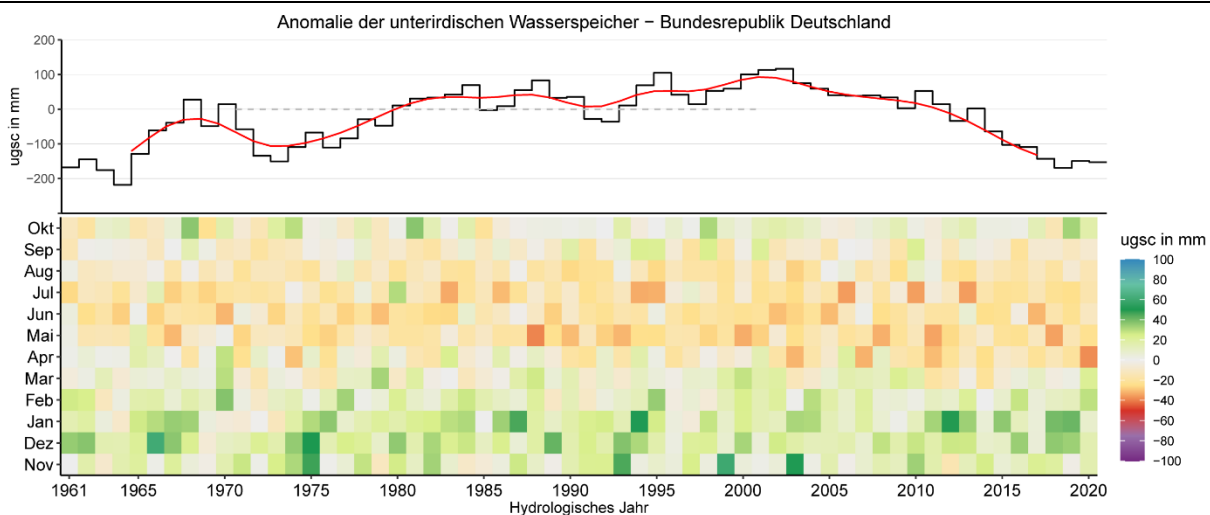


Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Als unterirdische Wasserspeicher werden im Rahmen dieser Analyse die gesamten im Modell bilanzierten Wassermengen in der ungesättigten und gesättigten Zone verstanden (FUWS), d.h. inklusive des Wassers, welches per Definition als Grundwasser des obersten Grundwasserleiters bezeichnet wird. Aus der wasserwirtschaftlichen Nachhaltigkeitsperspektive sind die durch die Simulation abgebildeten absoluten Grundwassermengen und lokalen Grundwasserspiegel nur von untergeordnetem Interesse. Vielmehr sind die mittel- und langfristigen Anomalien im Füllstand der unterirdischen Wasserspeicher relevant für eine Beurteilung der Kausalkette aus Klimavariabilität und Klimawandel sowie einem nur temporär oder auch langfristig reduzierten Grundwasserdargebot.

Einen ersten Überblick über die zeitlich und räumlich stark variierenden Anomalien im Füllstand der unterirdischen Wasserspeicher gibt die Abbildung 44. Für diese sind die Daten über das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland aggregiert worden. Im oberen Teil der Abbildung sind die Abweichungen der Füllstände zum langjährigen mittleren Füllstand Ende Oktober des Wasserwirtschaftsjahres der 30-Jahres-Perioden 1971-2000 dargestellt. In Grau gestrichelt ist außerdem dieser Mittelwert dargestellt. Negative Werte zeigen einen geringeren Füllstand an. Zusätzlich ist in Rot die Tiefpass-gefilterte Zeitreihe dargestellt, d.h. es werden dadurch die mittelfristigen Schwankungen hervorgehoben und längerfristige Trends deutlicher sichtbar. Für die Berechnung wurde ein Gauß-Filter auf eine Periode von jeweils 10 Jahren angewendet. Der untere Teil zeigt farblich kodiert die Veränderungen zum jeweiligen Vormonat und damit die saisonalen Muster der Auffüllung im Winterhalbjahr und der Entleerung im Sommerhalbjahr. Monate mit Zunahmen erscheinen in grünen Farbtönen, Monate mit Abnahmen in gelben Farbtönen.

Abbildung 44: Mit ParFlow–Standalone (PF-S) simulierte Veränderung des FUWS (in Millimeter Wassersäule) in Bezug auf den mittleren Füllstand von 1971-2000, aggregiert für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. (ugsc - underground storage change, Änderung im FUWS). Die Spannweite der Legende ist auch für die Darstellung in individuellen Grundwasserkörpern gedacht, die hier jedoch nicht gezeigt werden.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

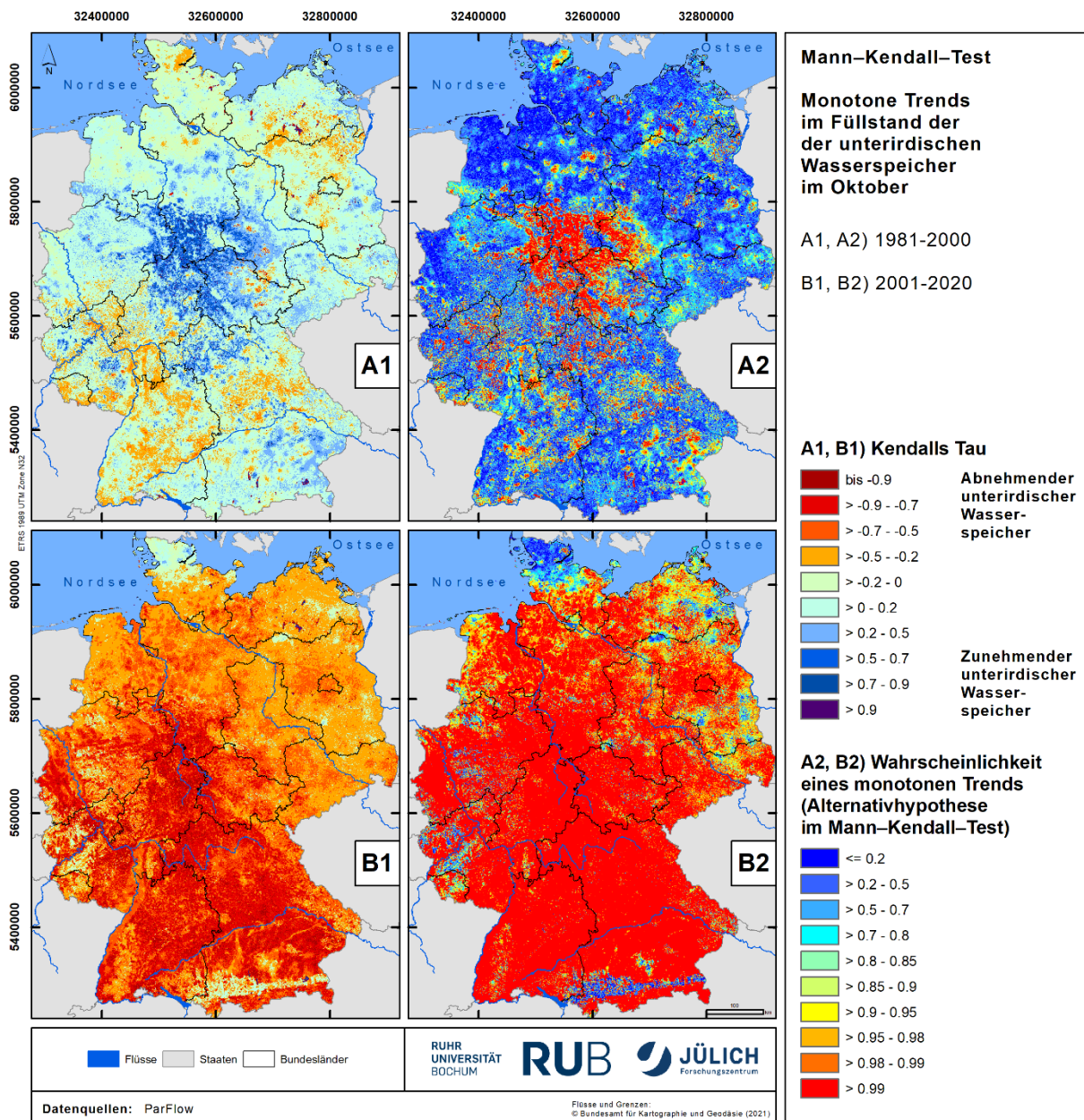
Deutlich erkennen lässt sich im oberen Teil der Abbildung 44, dass der FUWS in Deutschland bis ungefähr zum Jahr 2000 aufgrund der überdurchschnittlichen Grundwasserneubildung tendenziell gestiegen ist. Seitdem findet tendenziell eine Entleerung statt, die jedoch räumlich unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Insgesamt haben sich die Wasserspeicher in Deutschland in Bezug auf den gezeigten langjährigen Mittelwert 1971-2000 nur durch das Zusammenspiel aus Sickerwasserbildung und Basisabfluss deutlich entleert. Die absoluten Werte sind derzeit noch Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion, d.h. Vergleiche zum Beispiel mit Ergebnissen von (Güntner et al., 2023), die aus Satellitengravimetrie gewonnen wurden, sind empfehlenswert.

Analog zum GWFA, sind die Zeitreihen von FUWS auf monotone Trends getestet worden. Die Alternativhypothese besagt dabei, dass ein Trend hin zu fallenden Füllständen vorliegt. Die Abbildung 45 zeigt dazu die Ergebnisse des MKT für die beiden 20-Jahre-Perioden 1981-2000 und 2001-2020. Bemerkenswert ist der signifikante Trend mit einer deutlichen Zunahme in den Füllständen im Zentrum des Landes in der Periode 1981-2000 (Abbildung 45, A1, A2) und eine

ebensolche Entwicklung in scheinbar regellos verteilten Grundwasserleitern in allen Landesteilen. Zugleich weisen ebenfalls eher regellos verteilte Grundwasserleiter hauptsächlich im Südwesten und Nordosten keine ausgeprägten Trends im Füllstand auf. Die konkreten Ursachen für diese lokal mal mehr oder weniger stark ausgeprägten Anomalien lassen sich nur durch umfangreiche Detailstudien explizit darstellen. Die Anomalien sind aber generell an die regionalen strukturgeologischen Attribute der Grundwasserkörper und die räumliche Variabilität der geohydraulischen Parameter gebunden. In Deutschland sind teilweise Grundwasservorkommen aufgrund ihrer geringen Ergiebigkeit nicht für eine intensive Grundwassernutzung geeignet. Auch für solche Fälle kann beispielsweise lokal und regional ein Trend im FUWS vorliegen, dieser jedoch im Hinblick auf die Grundwassernutzung nur von untergeordneter Bedeutung sein. Die Abbildung 45 (B1, B2) zeigt die Ergebnisse des MKT für die Periode 2001-2020. Es resultieren für große Teil des Landes signifikante Trends hin zu abnehmenden Füllständen. Im Norden Schleswig-Holsteins und in einigen Grundwasserkörpern des Voralpenraumes, sowie vereinzelt auch in anderen Gebieten, sind keine signifikanten Veränderungen sichtbar.

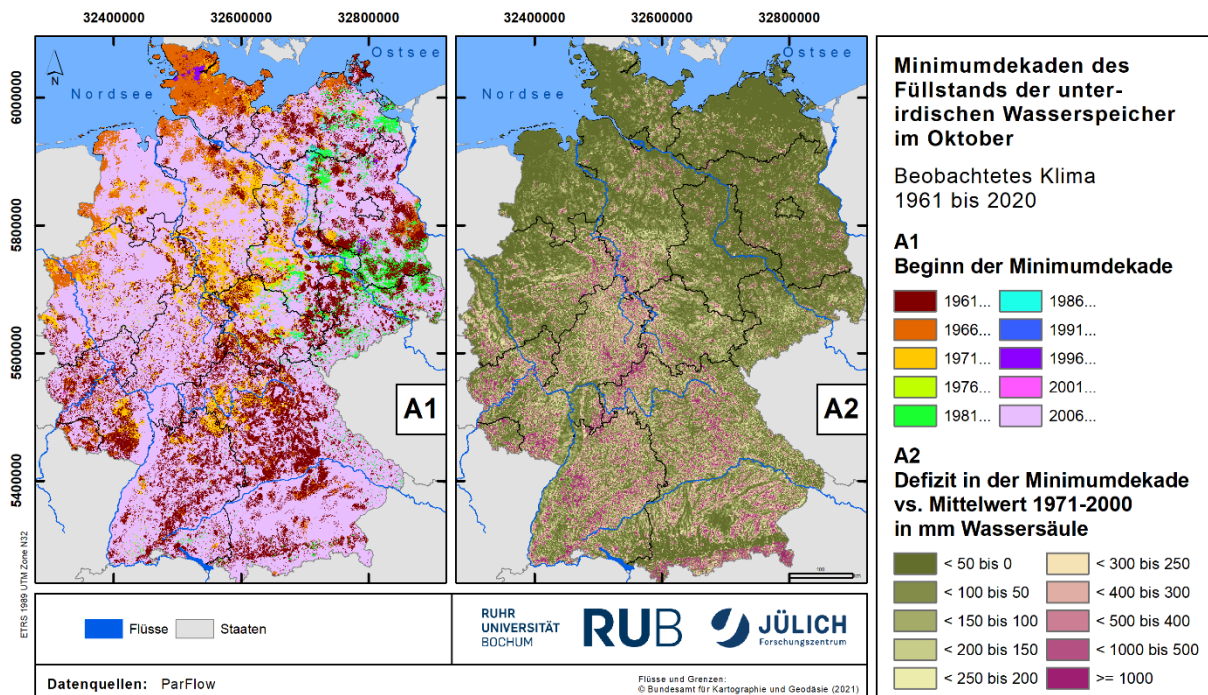
Die Abbildung 46 zeigt den Beginn der Minimumdekade und das Defizit des FUWS im Oktober in der jeweiligen Minimumdekade im Vergleich zum Mittelwert 1971-2000. Das Ziel der Auswertung war es, flächendeckend für ganz Deutschland die Dekade (aufeinanderfolgende 10 Jahre) zu identifizieren, in der FUWS im Oktober, dem Ende des hydrologischen Sommerhalbjahres, im Mittel ein Minimum erreichen. Die somit identifizierten Minimumdekaden stellen dann einen natürlichen hydrologischen Status dar, der sich in den jeweiligen Regionen aufgrund veränderter Phasen länger anhaltender Trockenheit (Klimavariabilität und Klimawandel) einstellt. Aus der Karte des Beginns der identifizierten Minimumdekade lässt sich leicht erkennen, dass diese in vielen Regionen Deutschlands nach dem Jahr 2006 beginnt. Bemerkenswert ist jedoch, dass in räumlicher Nähe zu den Zonen mit einem Beginn nach 2006 die Minimumdekaden schon in den 1960-iger oder 1970-iger Jahren stattfanden, im Osten Deutschlands auch in den 1980igern. Daraus kann geschlossen werden, dass sich derzeit fast deutschlandweit die FUWS praktisch auf das Niveau der Minimumdekade hinbewegen oder dieses erreicht haben. Von der Entwicklung ausgenommen scheint der Norden Schleswig-Holsteins zu sein. Der Prozess der Entleerung der unterirdischen Speicher, ausgedrückt durch das Defizit zum Mittelwert 1971-2000, scheint stärker in gut durchlässigen Festgesteinsgrundwasserleitern und den vorflutfernen Grundwasserneubildungsgebieten der Lockergesteinsbereiche ausgeprägt zu sein (Defizit größer 300 mm). Entsprechend der kleinräumigen Druckverhältnisse in den Grundwasserleitern strömt das Grundwasser aus diesen Gebieten in Richtung der regionalen Vorfluter. Aus diesem Grund stellt sich in Vorflutnähe durch den Basisabfluss während der Minimumdekade ein Defizit eher sehr spät und meist nur auf einem geringen Niveau ein (kleiner 100 mm).

Abbildung 45: Ergebnisse der Analyse mit dem Mann-Kendall-Test (MKT) auf monotone Trends in den Zeitreihen des Füllstandes der unterirdischen Wasserspeicher (FUWS) im Oktober für die Perioden 1981-2000 (oben) und 2001-2020 (unten).



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 46: Beginn der Minimumdekade und Defizit des Füllstandes der unterirdischen Wasserspeicher (FUWS) im Oktober in der jeweiligen Minimumdekade im Vergleich zum Mittelwert 1971-2000.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

2.3.12 Ergebnisse aus den Szenarien (Projektionen) der Grundwasserdynamik TSMP/ Par-Flow (1971 bis 2100)

Autor*innen: Herrmann, F., Kollet, S., Wagner, N.

Im Rahmen des Projektes WADKlim wurden mit der TSMP-Konfiguration ParFlow-Standalone (PF-S) auch Projektionen der Grundwasserdynamik auf Basis der Ergebnisse der Klimaprojektionen R26-E12-RCA, R85-CA2-CLM und R85-MI5-CLM für die Zeit von 1971 bis 2100 durchgeführt. Diese Projektionen mit PF-S bilden die Dynamik im Füllstand der unterirdischen Wasserspeicher (FUWS) aus klimatologisch-hydrogeologischer Perspektive räumlich hoch aufgelöst ab (wie auch in Kapitel 2.3.11), d.h. in den folgenden Darstellungen ist ebenfalls kein anthropogener Einfluss, z. B. durch Grundwasserförderung, immanent. Die Projektionen können auf vielfältige Art und Weise ausgewertet werden. Im Folgenden wird kurz die Frage nach der Ausprägung potenzieller zukünftiger Minimumdekaden des FUWS diskutiert, die in den jeweiligen Entwicklungspfaden der drei Klimaprojektionen auftreten könnten.

Analog zur Auswertung in Kapitel 2.3.11 war es das Ziel, flächendeckend für ganz Deutschland die Dekade (aufeinanderfolgende 10 Jahre) zu identifizieren, in der die Füllstände im Oktober, dem Ende des hydrologischen Sommerhalbjahres, im Mittel ein Minimum erreichen. Die somit identifizierten Minimumdekaden stellen dann einen natürlichen hydrologischen Status dar, der sich in der jeweiligen Region aufgrund der projizierten Klimavariabilität im ungünstigsten Fall einstellen würde. Durch die Ausprägung häufiger und langanhaltender Trockenheit in den jeweiligen Klimaprojektionen wird ein aus klimatologischer Perspektive maximales Defizit im FUWS erreicht. Aufgrund der langen Zeitspanne der Projektionen bis 2100 kann das Defizit einer Minimumdekade am Ende des Jahrhunderts auch wieder aufgefüllt sein.

In Abbildung 47, Abbildung 48 und Abbildung 49 sind links für die drei Projektionen die Zeiträume des Beginns der Minimumdekaden und rechts die zur jeweiligen historischen Referenzperiode resultierenden Defizite in Millimeter Wassersäule dargestellt. Die Defizit-Datenraster können als Änderungssignale der unterirdischen Wasserspeicher in Trockenperioden angesehen werden. Demnach kann explizit für eine Region die Wassermenge bestimmt werden, die im Szenario in der trockensten Dekade gegenüber dem bekannten (gegenwärtigen) Referenzniveau in den unterirdischen Wasserspeichern fehlt.

Weil globale Klimaprojektionen generell nicht zeitpunktgenau sind, sind es diese regionalen hydrologischen Projektionen ebenfalls nicht. Außerdem existieren weiterhin noch große Unsicherheiten hinsichtlich der Fähigkeiten der Klimamodelle, eine exakte multi-dekadische Variabilität vorherzusagen. Aufgrund dieser Unsicherheiten sind qualitative Aussagen wie „Die Minimumdekade liegt eher in der fernen Zukunft“ exakten Prognosen wie „Die Minimumdekade beginnt im Jahr 2043“ vorzuziehen. Beginnt beispielsweise die Minimumdekade in der Projektion bereits im 20. Jahrhundert, kann interpretiert werden, dass auf diesem Entwicklungspfad keine stärker ausgeprägte Trockenperiode auftritt und sich das Defizit nicht stärker erhöht, als dies in der Vergangenheit bereits der Fall war. Liegt die Minimumdekade in der Zukunft, kann interpretiert werden, dass mögliche zukünftige Trockenperioden zu einer stärkeren Ausprägung des Defizits führen können, als dies aus der Vergangenheit bekannt ist.

Deutlich sichtbar variiert in den drei Projektionen der Beginn der Minimumdekaden klein- und auch überregional. Es gibt jedoch auch deutliche Tendenzen, dass in großen Teilen Deutschlands die Minimumdekaden eher in der Zukunft liegen werden als in der Vergangenheit (z. B. R85-MI5-CLM, Abbildung 49). Insgesamt ergibt sich ein sehr diverses Bild des möglichen Auftretens der Minimumdekaden, d.h. es deutet in den drei betrachteten Projektionen nichts darauf hin, dass in Zukunft alle Regionen Deutschlands nahezu gleichzeitig von ausgeprägten und aus klimatologischer Perspektive maximalen Defiziten im unterirdischen Wasserspeicher betroffen sein könnten. Dies impliziert auch, dass deutschlandweit durchaus flächendeckend für ein paar Jahre unterschiedlich ausgeprägte Defizite im Vergleich zum langjährigen Mittelwert bestehen können und damit die Grundwasserdürre regional unterschiedlich stark ausgeprägt wäre.

Diese Schlussfolgerung wird auch in den Zeitreihendarstellungen der Anomalien im unterirdischen Wasserspeicher in Abbildung 50, Abbildung 51, Abbildung 52 und Abbildung 53 deutlich. In diesen sind die Anomalien für die gesamte Bundesrepublik Deutschland sowie exemplarisch für die NUTS-3-Regionen Ludwigslust-Parchim (Mecklenburg-Vorpommern), Weimar (Thüringen) und Garmisch-Partenkirchen (Bayern) aggregiert dargestellt. Genauere vergleichende visuelle Analysen dieser Zeitreihen lassen ebenfalls die Diversität der zeitlich und räumlich unterschiedlich stark ausgeprägten Einflüsse der Klimavariabilität auf das unterirdische Wasser erkennen.

Sichtbar werden beispielsweise:

- ▶ über 40 Jahre anhaltende Trends einer Abnahme des Speicherfüllstandes von 2000 bis 2040 und dann eine Stabilisierung und leichte Zunahme bis zum Ende des Jahrhunderts in Ludwigslust-Parchim mit R85-MI5-CLM in Abbildung 50 (unten),
- ▶ über 10 Jahre dauernde starke Abnahme des Speicherfüllstandes und dann ein „zurückpendeln“ auf das Referenzniveau 1971–2000 bis zum Ende des Jahrhunderts in Weimar mit R85-CA2-CLM in Abbildung 51 (Mitte),
- ▶ eine 2020 einsetzende schwankende starke Abnahme bis zum Ende des Jahrhunderts, deren Trendende nicht erkennbar ist, in Garmisch-Partenkirchen mit R85-CA2-CLM in Abbildung 52 (Mitte) oder
- ▶ eine unterschiedlich stark schwankende Entwicklung des Speicherfüllstandes leicht oberhalb des Referenzniveaus 1971–2000 mit R26-E12-RCA in Abbildung 53 (oben).

Die saisonalen Schwankungen in den unterirdischen Wasserspeichern bleiben im nicht-alpinen Raum weitgehend erhalten, d.h. die unterirdischen Speicher verlieren im Sommerhalbjahr relevante Wassermengen durch Basisabfluss und Verdunstung aus der Wurzelzone, die im Winterhalbjahr durch Grundwasserneubildung teilweise oder vollständig wieder ersetzt werden. In Gebieten, die durch alpine Mittel – und Hochlagen dominiert werden, sowie in den Hochlagen der Mittelgebirge, kann eine Veränderung der Saisonalität einsetzen. Beispielsweise verschiebt sich in R85-CA2-CLM die Phase der Auffüllung der Wasserspeicher aufgrund der sukzessive kürzer werdenden Schneebedeckung ins Winterhalbjahr und durch trockener werdende Sommer verstärkt sich die Abnahme der Füllstände, sodass in diesen Gebieten am Ende des Jahrhunderts die Saisonalität eher der gegenwärtig für flachere Teile der Mittelgebirge beobachteten gleicht (Abbildung 52, Mitte). Diese Veränderung der Saisonalität ist jedoch nicht in allen drei betrachteten Projektionen gleich ausgeprägt. In R26-E12-RCA (Abbildung 53, oben) findet keine nennenswerte Verschiebung statt und in R85-MI5-CLM (Abbildung 53, unten) ist sie bis zum Ende des Jahrhunderts weniger stark ausgeprägt als in R85-CA2-CLM.

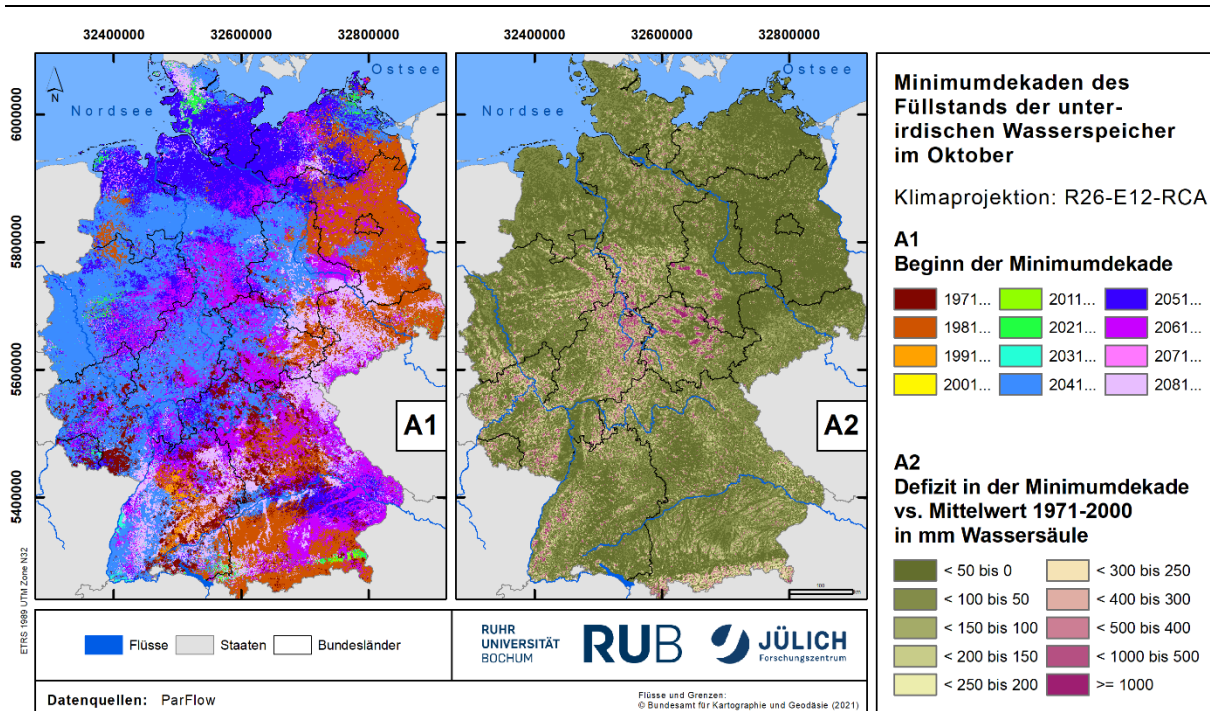
Die Ergebnisse der Projektionen müssen immer im Zusammenhang mit den regionalen hydrogeologischen Gegebenheiten und der eventuell in einem Gebiet stattfindenden Grundwassergewinnung analysiert und diskutiert werden. Eine solche Analyse und Diskussion konnte jedoch im Rahmen des Projektes WADKlim nur in sehr geringem Umfang durchgeführt werden. Ein erstes Beispiel wären die Grundwasservorkommen in den verkarsteten mesozoischen Gesteinseinheiten der Schwäbischen Alp, die in dem Modell nur extrem vereinfacht abgebildet werden können. Aufgrund der herausgehobenen Lage und der wasserführenden unterirdischen Hohlraumkonfiguration (Ergebnis aus den Gesteinseigenschaften Porosität, Klüftigkeit, Verkarstung, etc.) können solche Gesteinseinheiten in ausgeprägten Trockenphasen relevante Defizite im Bereich mehrerer Hundert Millimeter Wassersäule entwickeln. Die tatsächliche Grundwasserdynamik in Karstgrundwasserleitern kann mit PF-S im jetzigen Setup jedoch nicht explizit simuliert werden. In ähnlicher Weise könnten auch andere Mittelgebirgsregionen in Trockenphasen Teile des im Untergrund gespeicherten Wassers verlieren und damit das Grundwasserdargebot für lokale oder regional Wassernutzer reduzieren. Zum Beispiel der Grundwasserkomplex im Vogelsberg in Verbindung mit dem Großraum Frankfurt am Main.

Ein ebenfalls großer Teil der deutschen Mittelgebirgslandschaften besteht aus hydrogeologischen Festgesteinseinheiten, die keine oder nur wenig bedeutende Grundwasservorkommen umfassen. In diesen resultieren in den Minimumdekaden deutlich geringere Defizite, weil die un-

terirdischen Wasserspeicher gering ausgeprägt sind und weil deshalb ein großer Teil des Abflusses als Direktabfluss stattfindet, d.h. teilweise als Oberflächenabfluss und teilweise als unterirdischer Interflow in aufgelockerten Deckschichten oberhalb des hydraulisch sehr gering durchlässigen Grundgebirges. Ein Beispiel dafür wäre die paläozoischen Gesteinseinheit im Rheinischen Schiefergebirge. Der Interflow weist meist kurze unterirdische Verweilzeiten von wenigen Tagen bis zu mehreren Monaten auf und wird deshalb in den Abbildungen der Minimumdekaden (Oktoberwerte) nicht erfasst. Die Auffüllvorgänge von Talsperren in den geringdurchlässigen Gesteinseinheiten der Mittelgebirge sind mit dem Direktabfluss assoziiert, weshalb diesbezüglich aus den dargestellten Minimumdekaden keine Schlussfolgerungen für Talsperren gezogen werden sollten.

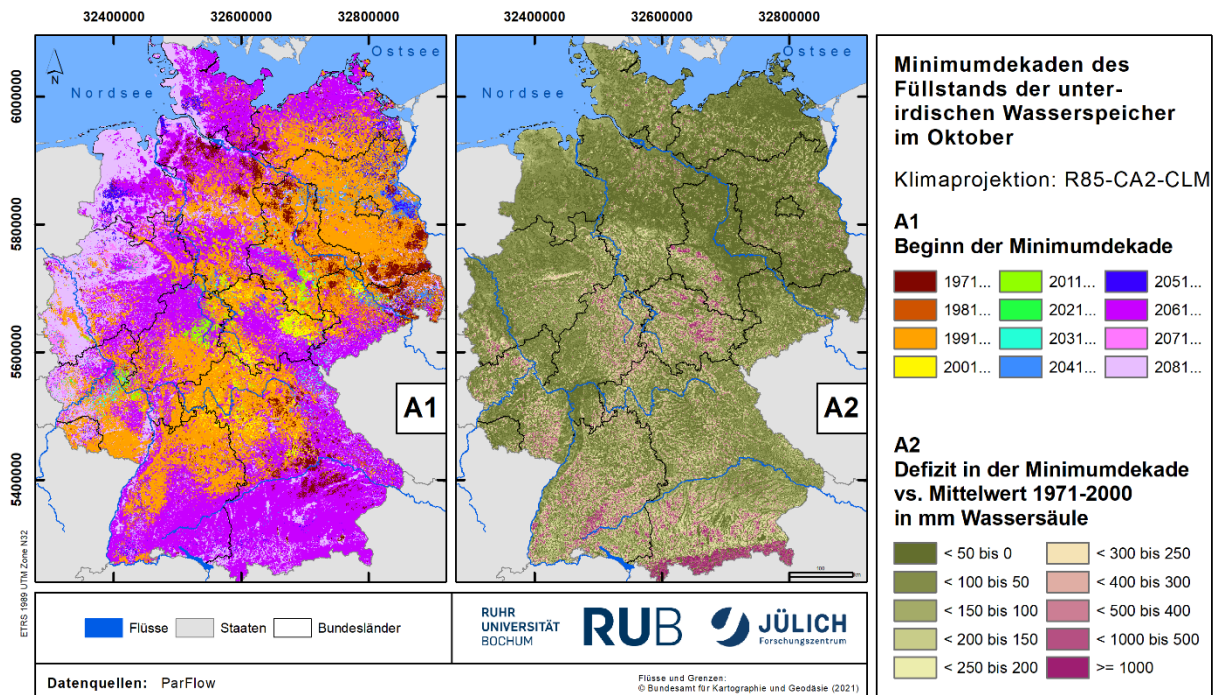
Für die Lockergesteinsgrundwasserleiter in der norddeutschen Tiefebene lassen sich ebenfalls Schlussfolgerungen aus der räumlichen Verteilung der Minimumdekaden ziehen. Die Defizite in Millimeter Wassersäule sind in diesen Gebieten deutlich geringer und meist auf die sogenannten Grundwasserneubildungsgebiete begrenzt. Dies ist begründet durch die geringeren hydraulischen Gradienten in den Lockergesteinsgebieten und die vorliegende Topographie der Geländeoberfläche. Diese Faktoren führen zu einem langsameren Auslaufen der Grundwasserspeicher in Trockenphasen, als dies in einigen Festgesteinsgebieten beobachtet wird. Der Einfluss von Trockenphasen macht sich dann aufgrund der langen natürlichen Verweilzeiten des Grundwassers als erstes in den Gebieten bemerkbar, in denen normalerweise viel Grundwasser neugebildet wird.

Abbildung 47: Beginn der Minimumdekade und Defizit des FUWS im Oktober in der Projektion basierend auf R26-E12-RCA.



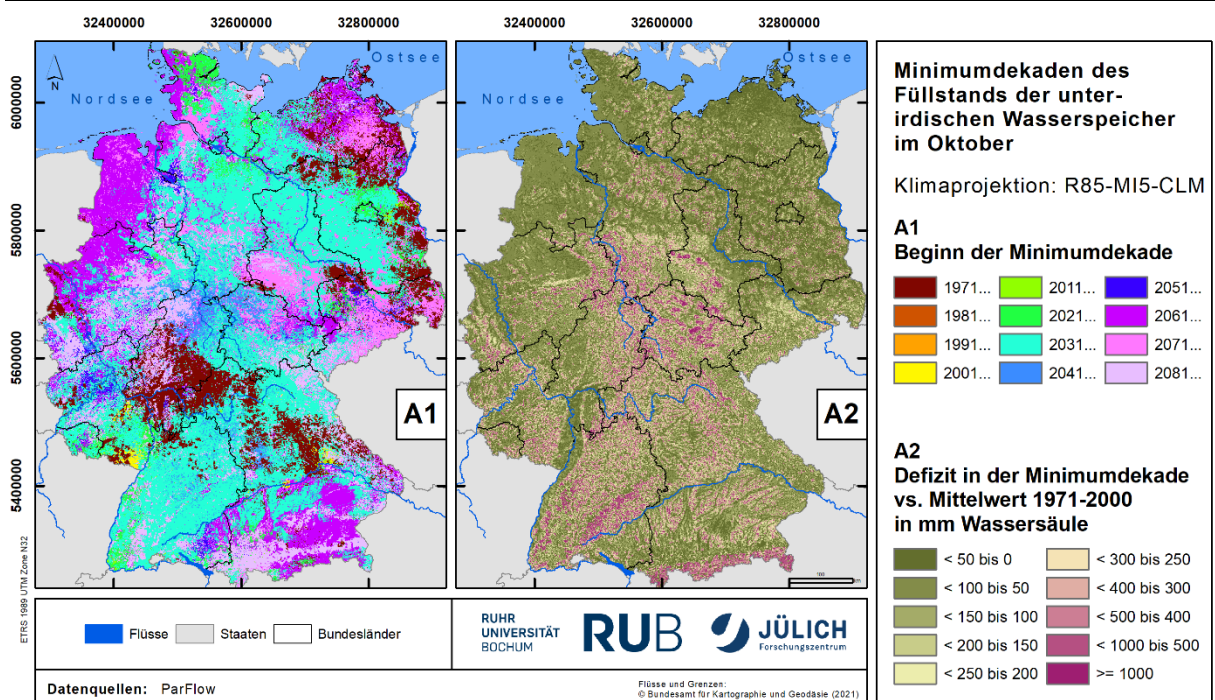
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 48: Beginn der Minimumdekade und Defizit des FUWS im Oktober in der Projektion basierend auf R85-CA2-CLM.



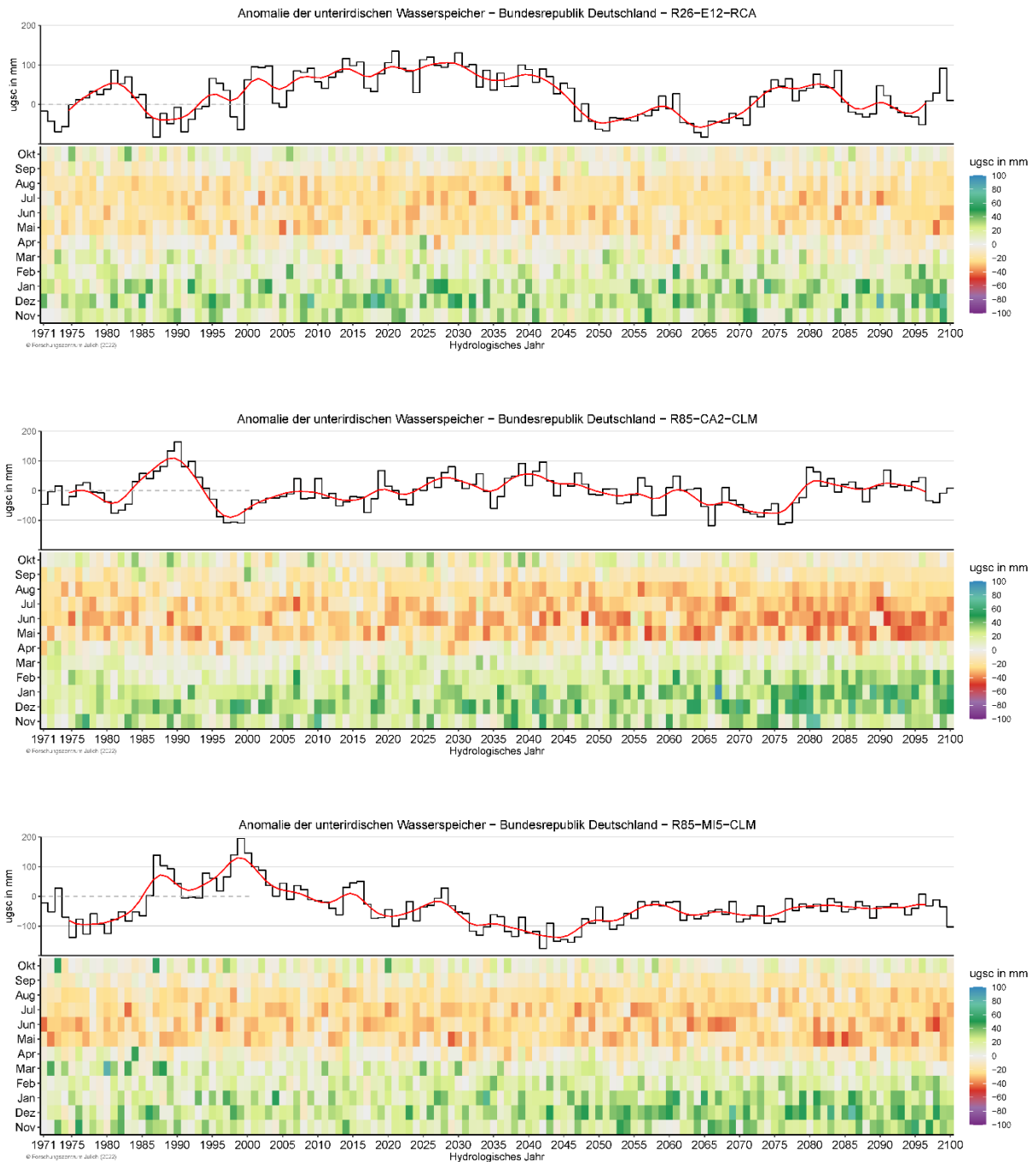
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 49: Beginn der Minimumdekade und Defizit des FUWS im Oktober in der Projektion basierend auf R85-MI5-CLM.



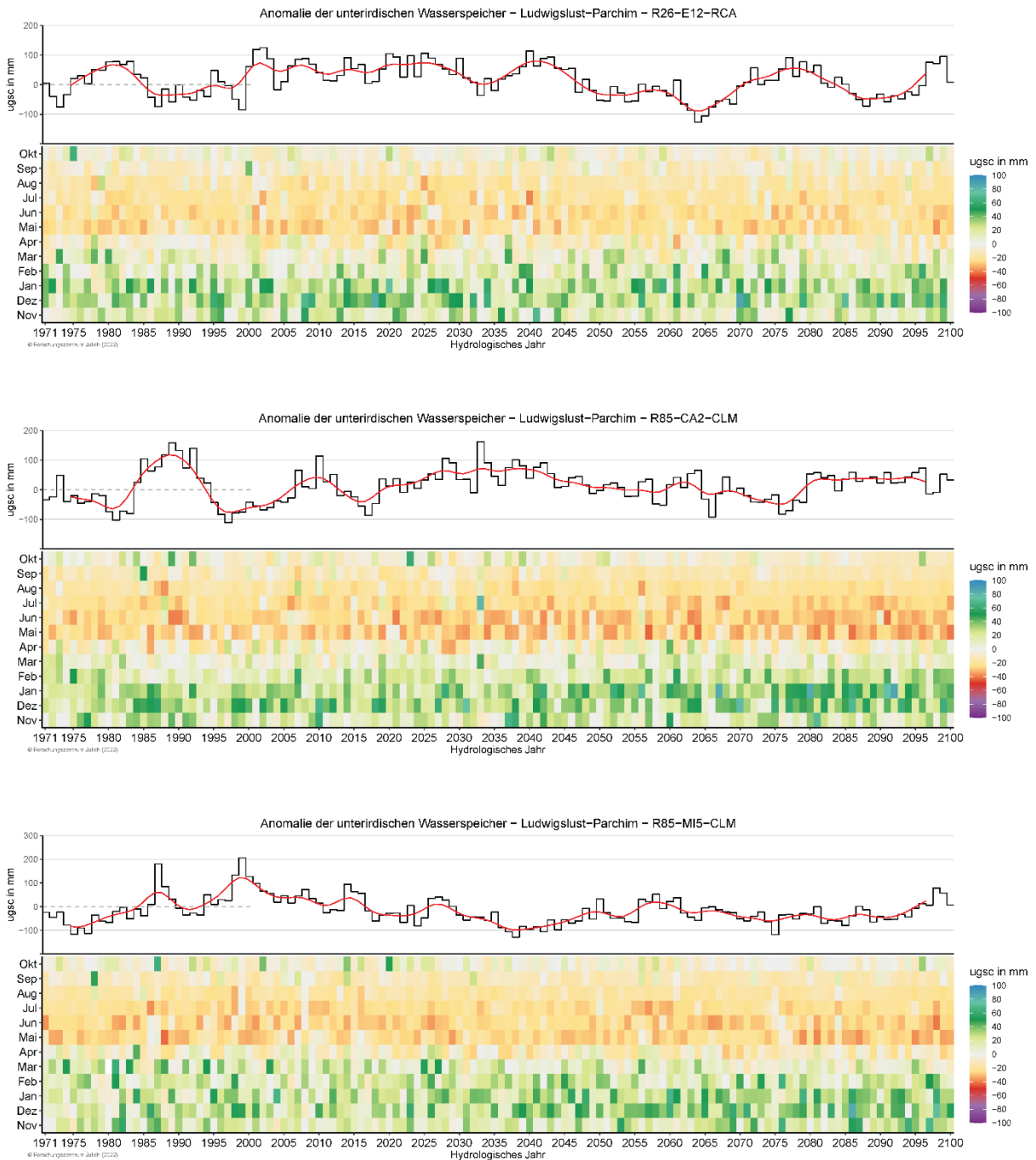
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 50: Anomalien der unterirdischen Wasserspeicher (ugsc) aggregiert auf die gesamte Bundesrepublik Deutschland aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RAC (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und ParFlow. Für weitere Erläuterungen zum Abbildungstyp siehe Abbildung 44.



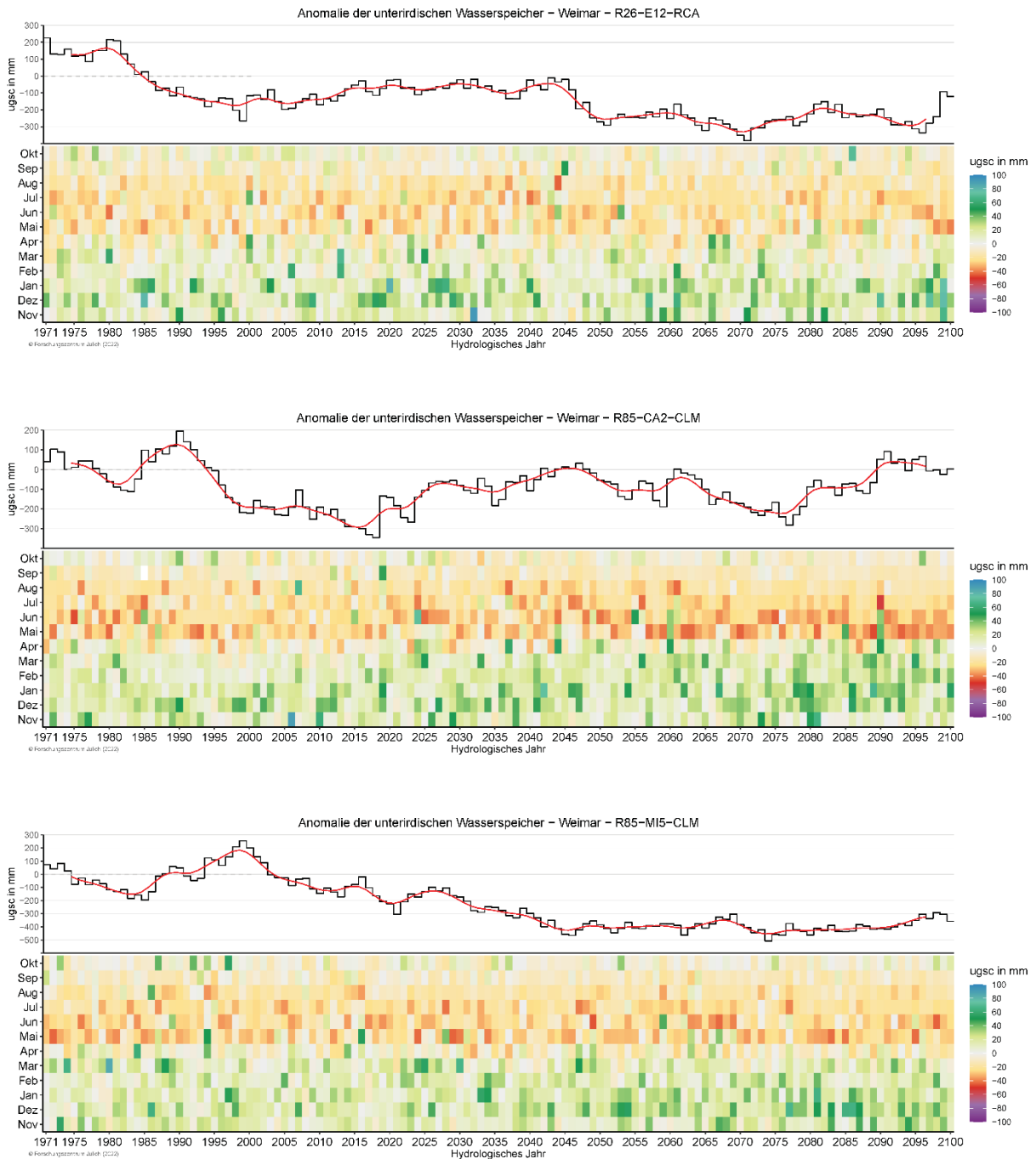
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 51: Anomalien der unterirdischen Wasserspeicher (ugsc) aggregiert auf die NUTS-3-Fläche Ludwigslust-Parchim (Mecklenburg-Vorpommern) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RAC (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und ParFlow. Für weitere Erläuterungen zum Abbildungstyp siehe Abbildung 44.



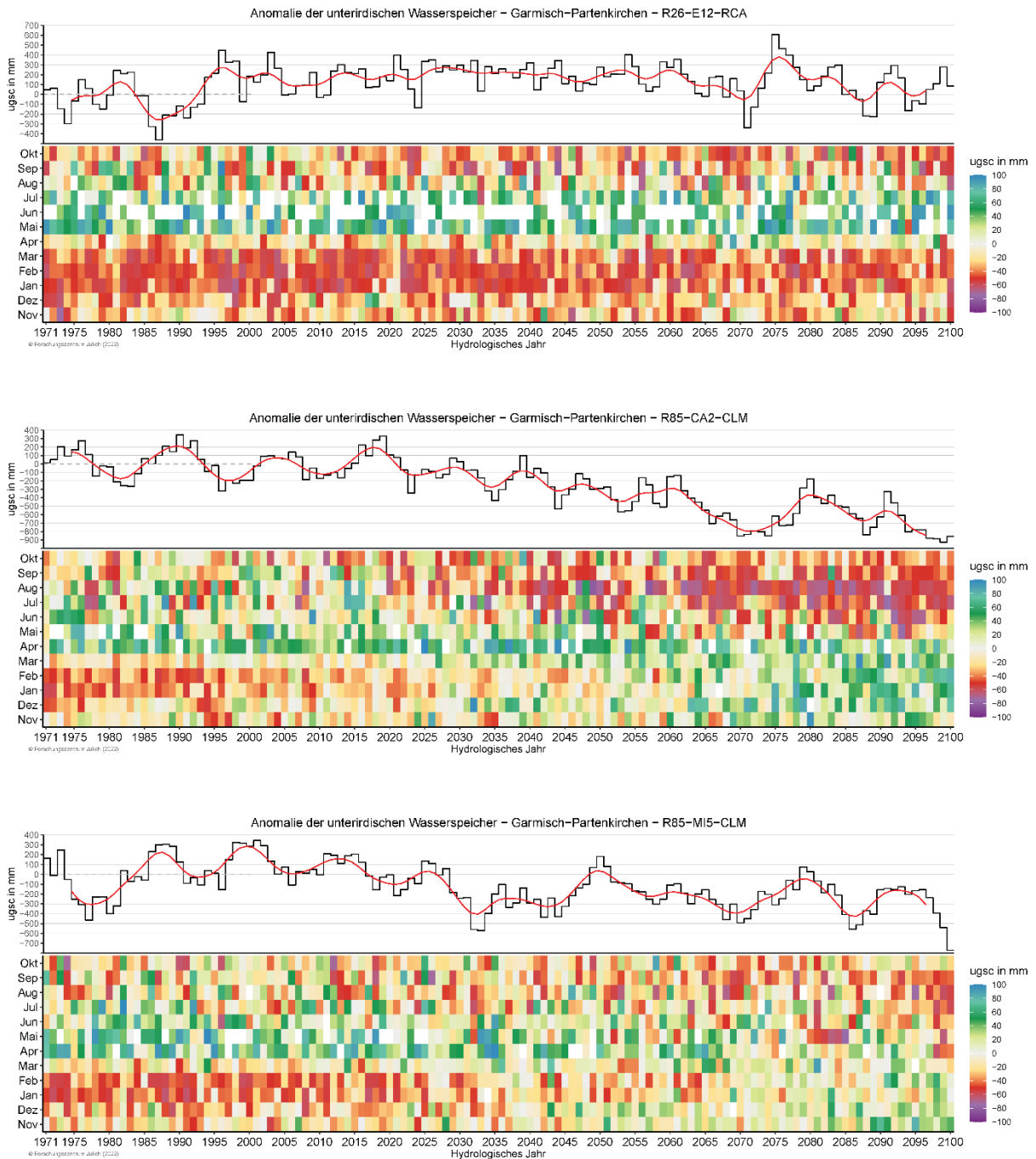
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 52: Anomalien der unterirdischen Wasserspeicher (ugsc) aggregiert auf die NUTS-3-Fläche Weimar (Thüringen) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RAC (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und ParFlow. Für weitere Erläuterungen zum Abbildungstyp siehe Abbildung 44.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 53: Anomalien der unterirdischen Wasserspeicher (ugsc) aggregiert auf die NUTS-3-Fläche Garmisch-Partenkirchen (Bayern) aus Ergebnissen der Projektionen mit R26-E12-RAC (oben), R85-CA2-CLM (Mitte) und R85-MI5-CLM (unten) und ParFlow. Für weitere Erläuterungen zum Abbildungstyp siehe Abbildung 44.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

2.3.13 „Status quo“ – Wassergewinnungsindizes in der Gegenwart und jüngeren Vergangenheit

Autor*innen: Herrmann, F., McNamara, I., Flörke, M., Uschan, T.

In Kapitel 2.3.3.2 wurde die im Rahmen des Projektes WADKlim implementierte Methodik zur Berechnung des Wassergewinnungsindex WGI und des Grundwassergewinnungsindex GWGI erläutert und die derzeitigen Einschränkungen durch das Fehlen von Daten zu Wassertransfers über die Grenzen der NUTS-3-Regionen kurz andiskutiert. In weiteren vorhergehenden Kapiteln erfolgte außerdem eine detaillierte Einführung in die Daten und hydrologischen Größen, die für eine Berechnung von WGI und GWGI in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung notwendig sind. Der WGI kumuliert und bilanziert die gesamte Wassergewinnung und das gesamte Wasserdargebot und der GWGI die Gewinnung aus Grundwasser und die Grundwasserneubildung.

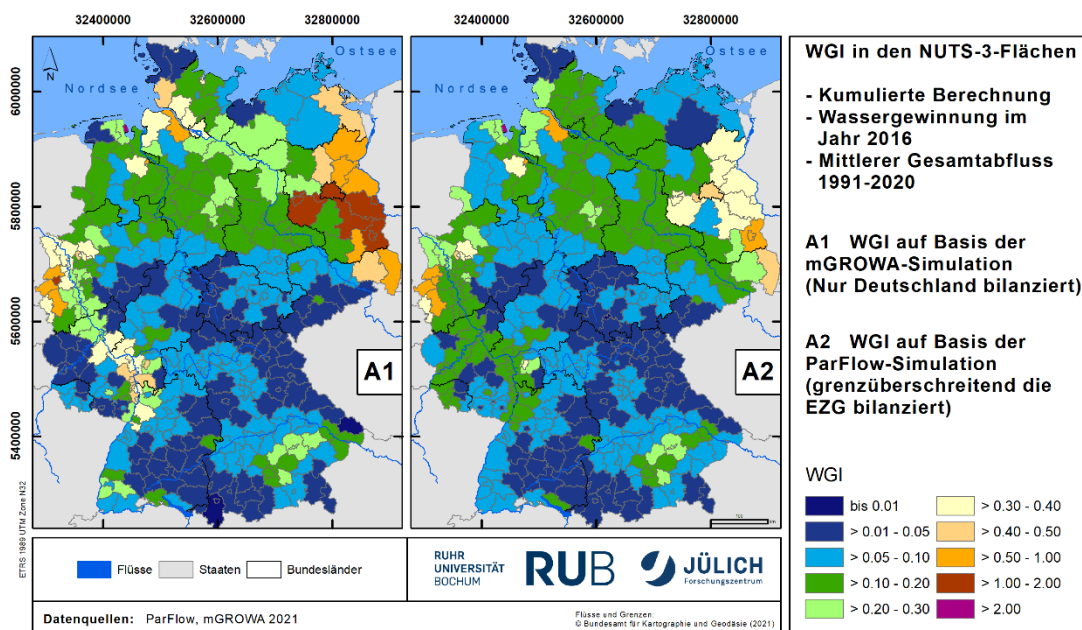
Einen ersten nützlichen Überblick über die Beträge des WGI in den NUTS-3-Regionen Deutschlands in den Jahren 2016 und 2019, den Jahren mit aufbereiteten Statistikdaten zur Wassergewinnung (vgl. Kap. 2.3.5.1), und mit Bezug zum simulierten langjährigen mittleren Wasserdargebot 1991-2020 liefern die Abbildung 54 und Abbildung 55. In (A1) sind jeweils die Ergebnisse auf Basis der Simulation mit dem Modell mGROWA und in (A2) die auf Basis des Modells Par-Flow gezeigt. Dies bedeutet, in (A1) wurde nur der auf deutschem Staatsgebiet stattfindende Gesamtabfluss (Wasserdargebot) berücksichtigt und in (A2) jeweils auch die Zuströme aus den grenzübergreifenden Einzugsgebieten. Dazu wurden einige öffentlich verfügbare Basisdaten zur Wassernutzung in den Nachbarländern in die Berechnung integriert^{13 14}: Deutlich sichtbar liegen die WGI in den niederschlagsreichen Mittelgebirgs- und Alpenregionen teilweise deutlich unter dem Schwellenwert 0,2 (keine Wasserknappheit). Auch in sehr vielen NUTS-3-Regionen in den Lockergesteinsgebieten im Norden und Süden des Landes wird keine Wasserknappheit indiziert.

Ebenfalls deutlich sichtbar wird beim Vergleich von (A1) und (A2) der Einfluss durch die zuströmenden Flusssysteme des Rheins, der Elbe und der Oder/Neiße. Die Bilanzierung über die Ländergrenzen hinweg senkt die WGI entlang der entsprechenden Ballungszentren (Berlin/Brandenburg, Rhein/Main, Hamburg und Nordseeküste, Niederrhein) mit sehr hoher Wassergewinnung deutlich ab. Das bedeutet, die entsprechenden Ballungszentren sind stark abhängig von den Bilanzen im Oberlauf der entsprechenden Flusssysteme, teilweise auch außerhalb Deutschlands. Es verbleiben in der Summe jedoch immer einige NUTS-3-Regionen, in denen der Schwellenwert über 0,4 und damit im Bereich schwerer Wasserknappheit liegt (A2). Dies sind in erster Linie die von den Sumpfungsmaßnahmen in den Braunkohlerevieren betroffenen Regionen. Die in diesem Rahmen gewonnenen Wassermengen gehen in die Bilanzierung ein, werden in großen Teilen in die Vorflut abgeschlagen und können dann teilweise erneut gewonnen werden. Beispielsweise geht in Berlin gewonnenes Uferfiltrat in die Bilanz ein, welches über das Einzugsgebiet der Spree einströmt und evtl. bereits in der Lausitz als Sumpfungswasser bilanziert wurde.

¹³https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WAT_BAL/default/table?lang=en&category=env.env_wat.env_nwat
Frankreich: 26536,92 Mio. m³/a (2016); Schweiz: 2004,8 Mio. m³/a (2012); Tschechien: 1635,60 Mio. m³/a (2016); Polen: 11152,87 Mio. m³/a (2016); Luxemburg: 44,24 Mio. m³/a (2016); Belgien: 4643,84 Mio. m³/a (2016); Dänemark: 886,995 Mio. m³/a (2016); Niederlande: 7988,71 Mio. m³/a (2016)

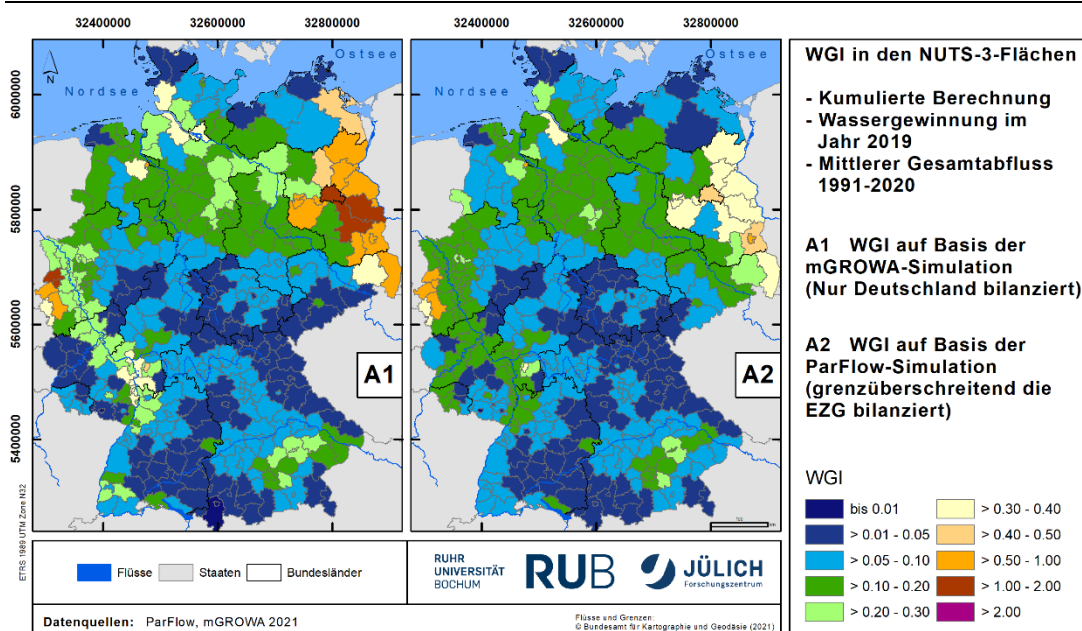
¹⁴ <http://www.wasserwerk.at/home/alles-ueber-wasser/wasserressource/16> Österreich: 2600 Mio. m³/a

Abbildung 54: Wassergewinnungsindex (WGI) in Deutschland im Jahr 2016 berechnet auf Basis des mit den Modellen mGROWA und ParFlow bilanzierten Gesamtabflusses (gesamtes Wasserdargebot) der Periode 1991-2020.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 55: Wassergewinnungsindex (WGI) in Deutschland im Jahr 2019 berechnet auf Basis des mit den Modellen mGROWA und ParFlow bilanzierten Gesamtabflusses (gesamtes Wasserdargebot) der Periode 1991-2020.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

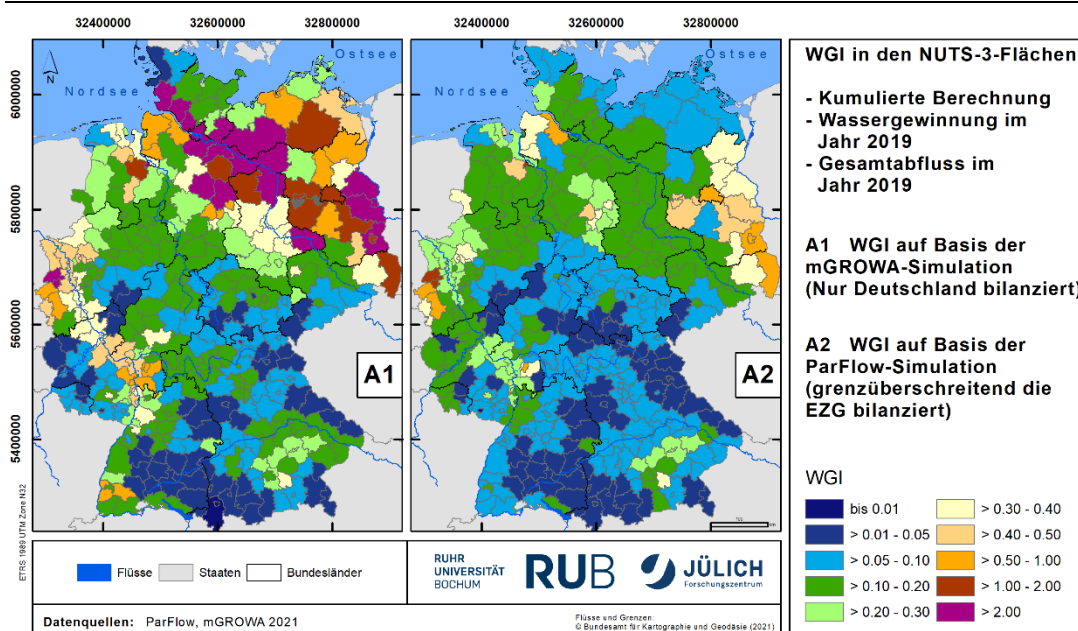
Weiterhin werden Effekte deutlich, die das Berechnungsverfahren auf sehr kleine NUTS-3-Regionen hat. Wenn beispielsweise in kreisfreien Städten (z. B. Weimar) innerhalb eines Landkreises (z. B. Weimarer Land) praktisch kein Wasser gewonnen wird, jedoch ein kleines Wasserdargebot vorhanden ist und ein Transfer über die Grenzen stattfindet, dann kann zwischen diesen beiden NUTS-3-Regionen eine größere Differenz im WGI resultieren. In solchen Fällen können sich Fehler und Unsicherheiten in den Gewinnungsdaten überproportional stark auswirken und damit die WGI in positive Richtung oder auch in Bereiche des starken oder sogar extremen Wasserstress verschoben. Aus diesem Grund wurden in den nachfolgenden Kapiteln 2.3.14 und 2.3.15 einige NUTS-3-Regionen zusammengelegt.

Bemerkenswert ist zudem, dass die stark von Wassertransfers über die Fernwasserleitungsnetze abhängigen Gebiete, beispielsweise das mitteldeutsche Trockengebiet oder das Ballungszentrum um Stuttgart, nicht als Hotspots mit hohen WGI sichtbar werden. Die Transfers in diesen Regionen sind auch nur im Fall des Ballungszentrums um Stuttgart abhängig vom Zustrom über die Landesgrenzen. Stuttgart erhält einen Teil seiner Fernwasserversorgung aus dem Bodensee und damit über das Einzugsgebiet des Oberrheins. Demzufolge sind diese Regionen über das ausreichend hohe Dargebot in den Gewinnungsgebieten im langfristigen Mittel vor Wasserknappheit ausreichend geschützt.

Ein Vergleich der WGI in den Einzeljahren 2016 und 2019 mit Bezug zum langjährigen Dargebot in Abbildung 54 und Abbildung 55 offenbart auch geringe Veränderungen in einigen NUTS-3-Regionen, die aus einer leicht veränderter gesamten Wassergewinnung resultieren. Diese ist natürlich auch in einigen Sektoren abhängig von der interannuellen Variabilität des Niederschlags und der Ausprägung von Trockenphasen.

Im generellen Gesamtbild der WGI in Deutschland ist der Einfluss der jährlichen Gewinnungsbilanzierung jedoch nur von untergeordneter Bedeutung, wenn sich die Berechnung auf langjährige Mittelwerte zum Dargebot bezieht. Dies ändert sich, wenn wie in Abbildung 56 dargestellt, die Gewinnung und das Dargebot im einzelnen Jahr 2019 bilanziert werden. Mit ParFlow (A2) resultiert ein Abfluss, der hauptsächlich aus dem unterirdischen Gebietspeicher gespeist wird, weil aufgrund der Trockenheit der Dürrejahre 2018/2019 nur eine sehr unterdurchschnittliche hydrologische Abflussbildung auf der Erdoberfläche (Versickerung, Oberflächenabfluss, etc.) stattfindet. Die resultierenden WGI fallen deshalb nur leicht im Vergleich zu den WGI mit Bezug zum langjährigen Mittelwert in Abbildung 54 und Abbildung 55. Das Bild verändert sich stark bei den WGI (jeweils in A1), die auf Basis des Gesamtabflusses im Modell mGROWA berechnet wurden. Dieser entspricht im Jahr 2019 der sehr geringen Abflussbildung und beinhaltet keinen Ausfluss aus dem Gebietspeicher. Im Norden und Nordosten Deutschlands steigen deshalb die WGI in einem Hotspot der Dürre stark an, so wie auch die SPEI im Jahr 2019 (vgl. Abbildung 25). Die Wassergewinnung ist folglich in vielen NUTS-3-Regionen aus der „Reserve“ heraus erfolgt. Interessanterweise steigen die WGI (jeweils in A1) weiter im Süden im Vergleich zum Hotspot in deutlich geringerem Maße, als dies die Statistik des SPEI (vgl. Abbildung 25) erwarten lassen könnte. Das Niveau des Niederschlags war in vielen der südlicheren Regionen hoch genug, um Wassergewinnung ohne ein Überschreiten der Schwellenwerte für Wasserknappheit zu erlauben.

Abbildung 56: Wassergewinnungsindex (WGI) in Deutschland im Jahr 2019 berechnet auf Basis des mit den Modellen mGROWA und ParFlow bilanzierten Gesamtabflusses (gesamtes Wasserdargebot) im Jahr 2019.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Für die GWGI, d.h. die Grundwassergewinnung bezogen auf die GWNB aus dem Modell mGROWA, ist eine Auswertung für Einzeljahre weniger sinnvoll, weil die GWNB jährlich stärker schwankt und die Grundwasserleiter auch als mittelfristiger Puffer fungieren. Deshalb sind die GWGI für die untersuchten Sektoren in Abbildung 57 bis Abbildung 60 jeweils auf die langjährige mittlere GWNB der Periode 1991-2020 und auf die für grundwasserwirtschaftliche Planungen empfohlene Minimumdekade der GWNB bezogen. In vielen NUTS-3-Regionen mit relevanter Grundwassergewinnung für die öffentliche Wasserversorgung (Abbildung 57, Abbildung 58, A1) wird der Schwellenwert des GWGI für Wasserknappheit ($< 0,2$) nicht erreicht. In einigen auffälligen Regionen resultieren jedoch Werte deutlich über der Schwelle zur schweren Wasserknappheit ($> 0,4$). Dies wird regional unterschiedliche Ursachen haben, die teilweise in der Struktur der vorliegenden Daten für die Berechnung der GWGI und teilweise in einer tatsächlichen Übernutzung liegen. Beispielsweise wird in der Hansestadt Hamburg Grundwasser auch aus tieferen Grundwasserstockwerken gewonnen, die teilweise auch über tiefe unterirdische Zuströme gespeist werden, die nicht in der GWNB-Bilanz abgebildet sind. Um die Relevanz solcher nicht durch die Modellkette abgebildeten Sachverhalte zu prüfen, müssten zukünftig alle durch erhöhte GWGI auffällig gewordenen NUTS-3-Regionen in Detailstudien untersucht werden. Erst dann kann sicher festgestellt werden, ob langfristig eine nichtnachhaltige Wassernutzung vorliegt, die mit einer latenten Gefahr schwerer Wasserknappheit einhergeht.

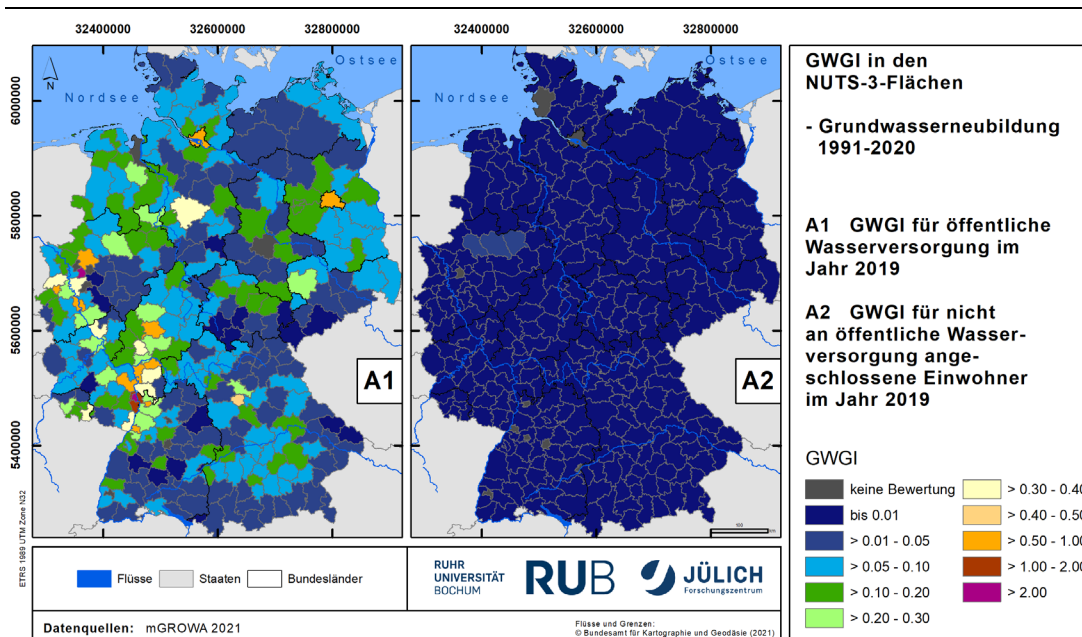
In den regional unterschiedlich stark ausgeprägten Minimumdekaden (vgl. Abbildung 34) verschieben sich die GWGI (für öffentliche Wasserversorgung, Abbildung 58 A1) in einigen Regionen über die Schwellenwerte für Wasserknappheit ($0,2$) oder schwere Wasserknappheit ($0,4$). Eine Überschreitung von $0,4$ sollte als klare Notwendigkeit interpretiert werden, die dortige regionale Grundwasserbewirtschaftung einem detaillierten Stresstest zu unterziehen. Die nicht an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossenen Einwohner mit eigener Versorgung aus dem Grundwasser sind für die regionalen GWGI praktisch irrelevant (Abbildung 58 A2). Dies bedeutet jedoch nicht, dass deutschlandweit stattfindende private Grundwasserentnahmen, die durch

keine Statistik erfasst sind, keine Bedeutung für die GWGI haben. Diese Bedeutung konnte jedoch im Rahmen des Projektes WADKlim aufgrund der Datenverfügbarkeit weder qualitativ noch quantitativ bewertet werden.

In Abbildung 59 und Abbildung 60 sind die GWGI für die nichtöffentliche Wasserversorgung (A1) und für alle drei Sektoren insgesamt (A2) dargestellt. Deutlich wird darin nun zusätzlich der Einfluss der Tagebausümpfung in den Braunkohlerevieren im Rheinland und der Lausitz. Außerdem sind die Grundwasserentnahmen für die Bewässerung in der Landwirtschaft, z. B. im Osten Niedersachsens, bilanziert. In der Bilanz über alle drei Sektoren verschieben sich die GWGI einiger weiterer Regionen über die Schwellenwerte. Insbesondere die Regionen mit intensiver Bewässerung in der Landwirtschaft überschreiten teilweise in der Minimumdekade der GWNB die Schwelle zur schweren Wasserknappheit.

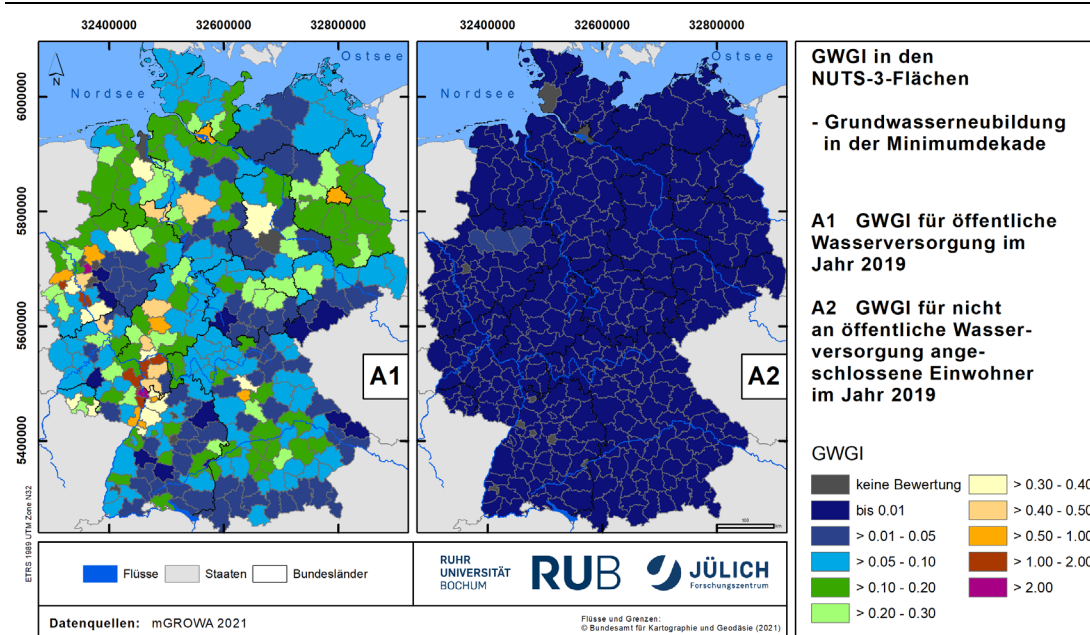
Als Hauptergebnis der vorliegenden Analyse kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass durch die Darstellung der GWGI die Regionen sichtbar werden, in denen gegenwärtig ernstzunehmende klimatologische Gefahren für den mengenmäßigen Zustand der Grundwasserressourcen bestehen. Zusätzlich können durch die differenzierte Betrachtung der drei Sektoren (öffentliche, nichtöffentliche und quasi private Wasserversorgung) Hinweise gewonnen werden, in welchen Regionen eine Priorisierung des Zugangs zu Grundwasserressourcen während langanhaltender Phasen von Grundwasserdürre notwendig werden könnte.

Abbildung 57: Grundwassergewinnungsindex (GWGI) bezogen auf die Grundwasserneubildung 1991-2020 sowie die Grundwassergewinnung für öffentliche Wasserversorgung (ÖWV) und für Einwohner, die nicht an die ÖWV angeschlossen sind (EWW) im Jahr 2019.



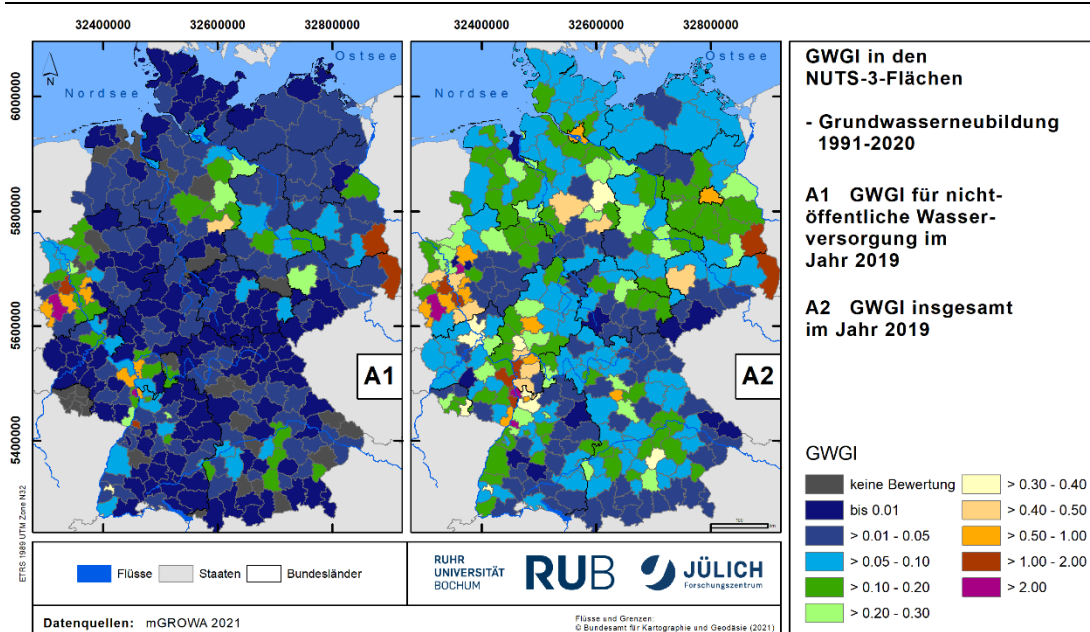
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 58: Grundwassergewinnungsindex (GWGI) bezogen auf die Grundwasserneubildung in der Minimumdekade sowie die Grundwassergewinnung für öffentliche Wasserversorgung (ÖWV) und für Einwohner, die nicht an die ÖWV angeschlossen sind (EWW) im Jahr 2019.



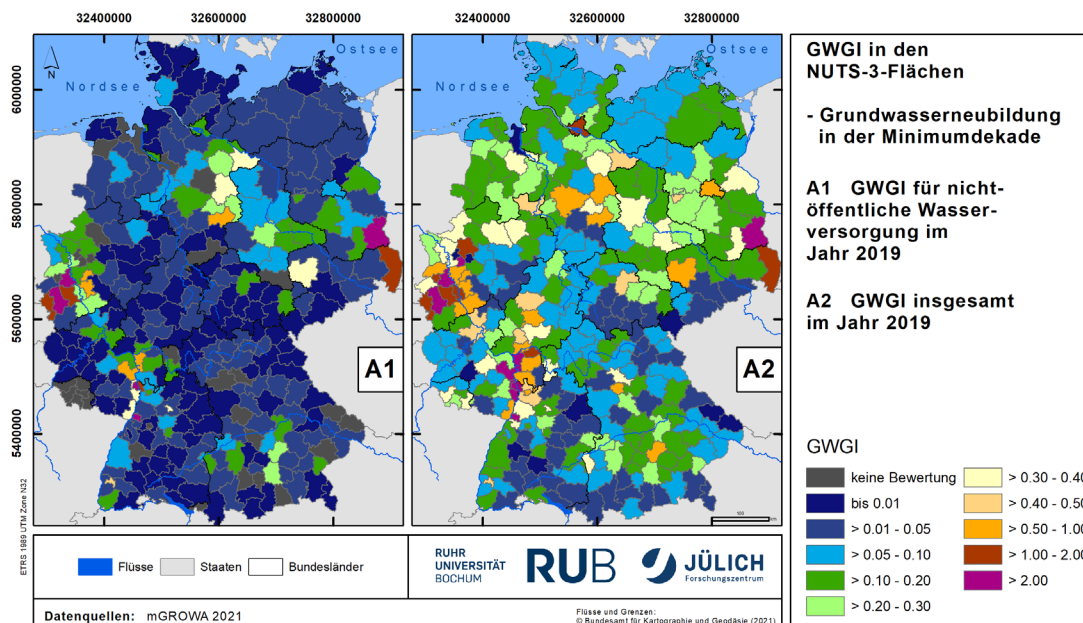
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 59: Grundwassergewinnungsindex (GWGI) bezogen auf die Grundwasserneubildung 1991-2020 sowie die Grundwassergewinnung für nicht-öffentliche Wasserversorgung (NÖWV) und aggregiert über ÖWV, EWW, und NÖWV im Jahr 2019.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 60: Grundwassergewinnungsindex (GWGI) bezogen auf die Grundwasserneubildung in der Minimumdekade sowie die Grundwassergewinnung für nicht-öffentliche Wasserversorgung (NÖWV) und aggregiert über ÖWV, EWV, und NÖWV im Jahr 2019.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

2.3.14 Skizze für die Nutzung von Szenarien (Projektionen) als Stresstest

Autor*innen: Herrmann, F., McNamara, I., Flörke, M., Uschan, T.

Auf Basis der in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Konzepte und Ergebnisse können Szenarien für Grundwassernutzungsindizes in der Zukunft berechnet und untersucht werden. Die dabei angewendete Vorgehensweise kommt einem sogenannten Stresstest gleich. Dafür müssen, als erstes exakte Fragen formuliert werden, die durch die Untersuchungen geklärt werden sollen. In der hier vorgestellten Skizze soll die Frage beantwortet werden, in welchen NUTS-3-Regionen zukünftig in Minimumdekaden der Grundwasserneubildung die GWNI potenziell über die Schwellenwerte von 0,2 (Wasserknappheit) oder 0,4 (schwere Wasserknappheit) ansteigen könnten.

Aufgrund der bereits diskutierten Einschränkungen in der Interpretation der Klimaprojektionen, die nicht zeitpunktgenau sind, bieten sich die folgenden Ergebnisse für die Berechnung der GWNI-Szenarien an:

- ▶ Die projizierten Mittelwerte der GWNB in den Perioden 2001-2030, 2061-2090 und in den jeweiligen Minimumdekaden (Kap. 2.3.10, Abbildung 36, Abbildung 37 und Abbildung 38).
- ▶ Die aus den Szenarien für das Wachstum der bewässerten Flächen (BS-BL bis BS-D) in Kombination mit den Klimaprojektionen resultierenden tatsächlichen Bewässerungsmengen in den Perioden 2001-2030 und 2061-2090 (Kap. 2.3.6.2, Abbildung 23 und Abbildung 24).
- ▶ Die gegenwärtige und zukünftige Wassernutzung aus der Projektion der Wasserabgabe an die Bevölkerung im Szenario 1 (Kap. 2.3.6.1) in den Jahren 2020 und 2070.

Durch die Limitierungen bei der Zusammenstellung der Szenarien, die sich aufgrund von fehlenden Daten oder Modellkomponenten ergeben, resultieren weitere Annahmen, unter der die Fragestellung beantwortet werden muss. Die wichtigste Annahme in dem hier skizzierten Stresstest ist, dass die Wassernutzung vollständig aus dem Grundwasser bedient wird. Diese einschränkende Annahme ist derzeit notwendig, weil die zukünftigen Wassertransfers über Regionsgrenzen hinweg und die Anteile der Wassernutzung aus Grund- und Oberflächengewässern noch nicht projiziert werden konnten.

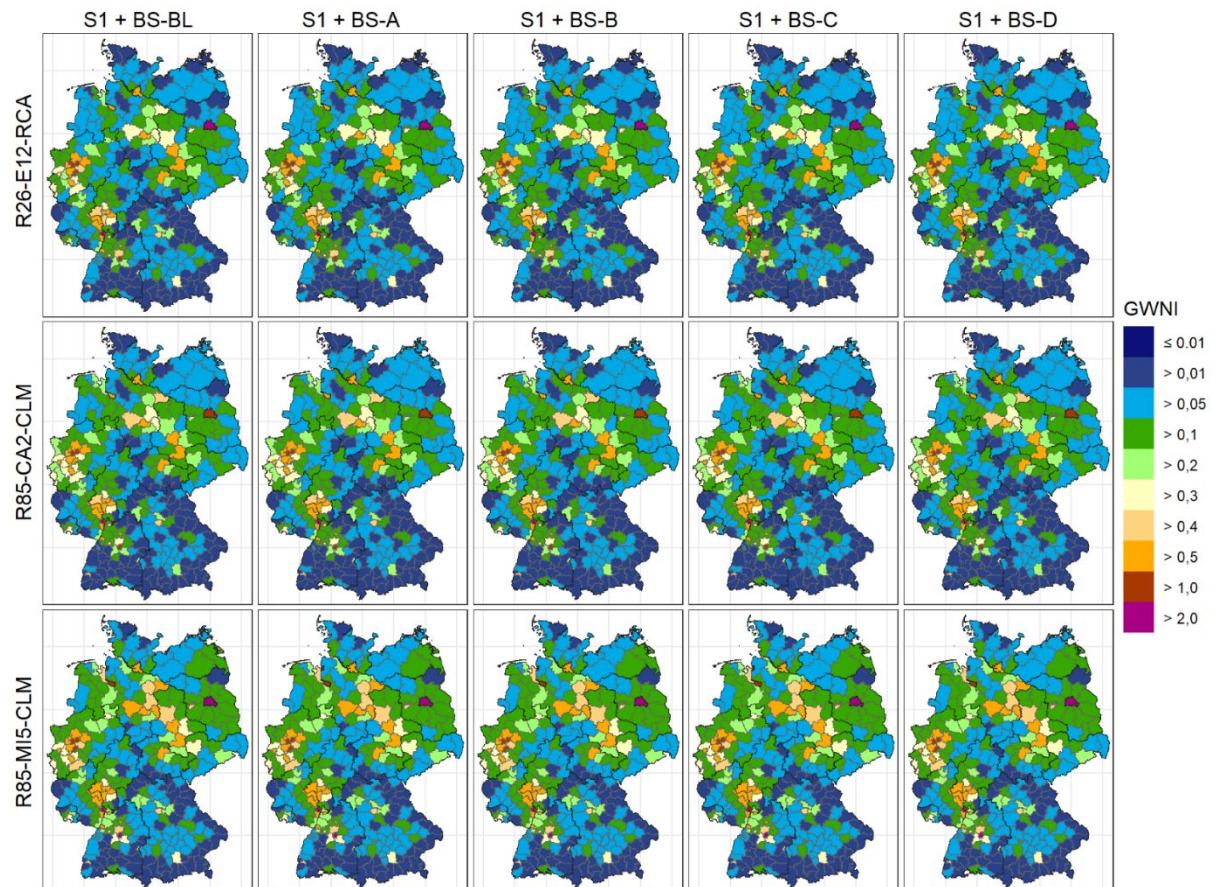
Insgesamt wurden die 401 NUTS-3-Regionen in den folgend dargestellten Abbildungen durch Zusammenlegung von kleinflächigen Stadt- in großflächigen Landkreisen auf 316 reduziert. Die Abbildung 60, Abbildung 61 und Abbildung 62 zeigen die resultierenden Matrixdarstellungen des GWNI in den Kombinationen aus den genannten Szenarien. Ein detaillierter Vergleich mit den in Kapitel 2.3.13 diskutierten Grundwassergewinnungsindizes sollte an dieser Stelle aufgrund der im Stresstest gesetzten Rahmenbedingungen nicht durchgeführt werden. Ein grober Vergleich der ersten Spalten (S1 + BS-BL) in Abbildung 61 bis Abbildung 63 mit Abbildung 59 (A2) zeigt jedoch relativ ähnliche Muster, die durch die hydrogeologisch-klimatologische Zonierung und die Bevölkerungsverteilung in Deutschland begründet sind. Die GWNI in Abbildung 61 (in allen Spalten) sind noch wenig durch das Wachstum der bewässerten Flächen beeinflusst. Deutlich werden jedoch schon Unterschiede aufgrund der angesetzten Klimaprojektionen. Ausgehend von den in Abbildung 60 bereits sichtbaren Clustern in Nordrhein-Westfalen, Ostniedersachsen und Sachsen-Anhalt sowie dem nördlichen Oberrheingraben weiten sich die Flächen mit höheren GWNI zukünftig aus (Abbildung 61). In einer möglicherweise zukünftig vorkommenden Minimumdekade der GWNB (Abbildung 62) wachsen die Regionen mit höheren GWNI förmlich zusammen und bilden einen „Bogen“ durch Deutschland, der vom Raum Stuttgart über das Rheinland ins südliche Niedersachsen reicht und sich dann weiter in Ostdeutschland auffächert. Deutlich werden auch die unterschiedlichen Ausprägungen dieses „Bogens“ einerseits in den drei Klimaprojektionen und andererseits durch das Wachstum der bewässerten Flächen.

Deutlich sichtbar werden in Abbildung 61, Abbildung 62 und Abbildung 63 auch einzelne NUTS-3-Regionen, in denen GWNI im definitiv nicht nachhaltigen Bereich $> 1,0$ resultieren (z. B. Berlin und Hamburg). Für solche Regionen kann direkt geschlossen werden, dass sie auch zukünftig von signifikanten Wassertransfers abhängig sein werden. In Berlin wird beispielsweise schon heute ein signifikanter Anteil des Wasserbedarfs aus Uferfiltration gedeckt, d.h. es handelt sich um Wasser, welches von außerhalb aus den Einzugsgebieten von Havel und Spree nach Berlin einströmt. Auch das ist im Sinne der Modellierung als ein Wassertransfer über Gebietsgrenzen anzusehen. Nur aus der natürlichen Grundwasserneubildung im Stadtgebiet kann der Wasserbedarf nicht gedeckt werden.

In Abbildung 64 bis Abbildung 69 sind die NUTS-3-Regionen farblich hervorgehoben, in denen im Rahmen des Stresstests die GWNI die Schwellenwerte von 0,2 und 0,4 überschreiten. Die bogenförmige Verteilung wird auch in diesen Abbildungen ersichtlich. Erscheinen einzelne NUTS-3-Regionen in Richtung des Wachstums der bewässerten Flächen (zunehmende Spaltennummer), kann indirekt auf eine maximal mögliche Entnahme von Grundwasser für die Bewässerung zur Einhaltung der Schwellenwerte geschlossen werden. Erscheinen NUTS-3-Regionen überhaupt nicht in diesen Karten, dann wäre ein Wachstum der Bewässerungsmengen auf den vorgegebenen klimatischen Entwicklungspfaden mindestens auf dem Niveau des BS-D möglich und würde auch in Minimumdekaden der GWNB nicht zu einer nichtnachhaltigen Grundwassernutzung führen. Bemerkenswert ist, dass insbesondere in Bayern ein stärkeres Wachstum der Bewässerungswirtschaft möglich erscheint. Explizite Planungen dazu dürfen jedoch keinesfalls allein nur auf Basis dieser Ergebnisse durchgeführt werden. Vielmehr werden mit dem

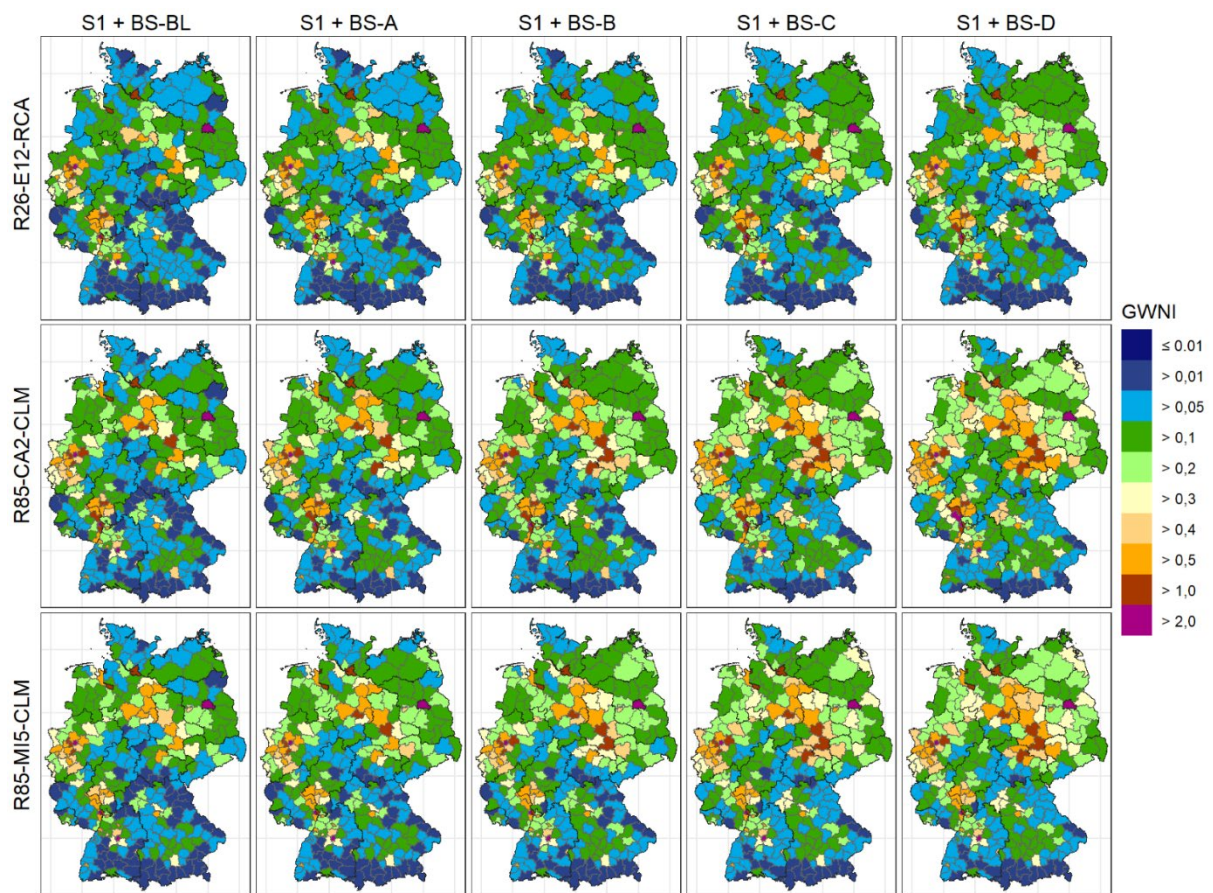
Stresstest Indikationen geliefert, für welche Regionen Detailstudien sinnvoll wären, mit besonderer Aufmerksamkeit an der Grundwasserbilanzierung gearbeitet werden muss oder Wassernutzungskonflikte aufkommen können, wenn vorliegende Erkenntnisse ignoriert werden.

Abbildung 61: Zukunftsszenarien zum Grundwassernutzungsindex (GWNI), mit Wassernutzung im Jahr 2020, mittlere Grundwasserneubildung und mittlerer tatsächlicher Bewässerungsbedarf in der Periode 2001-2030. (S1 - Szenario 1 zur Wassernutzung; BS - Bewässerungsszenario; BL - Baseline)



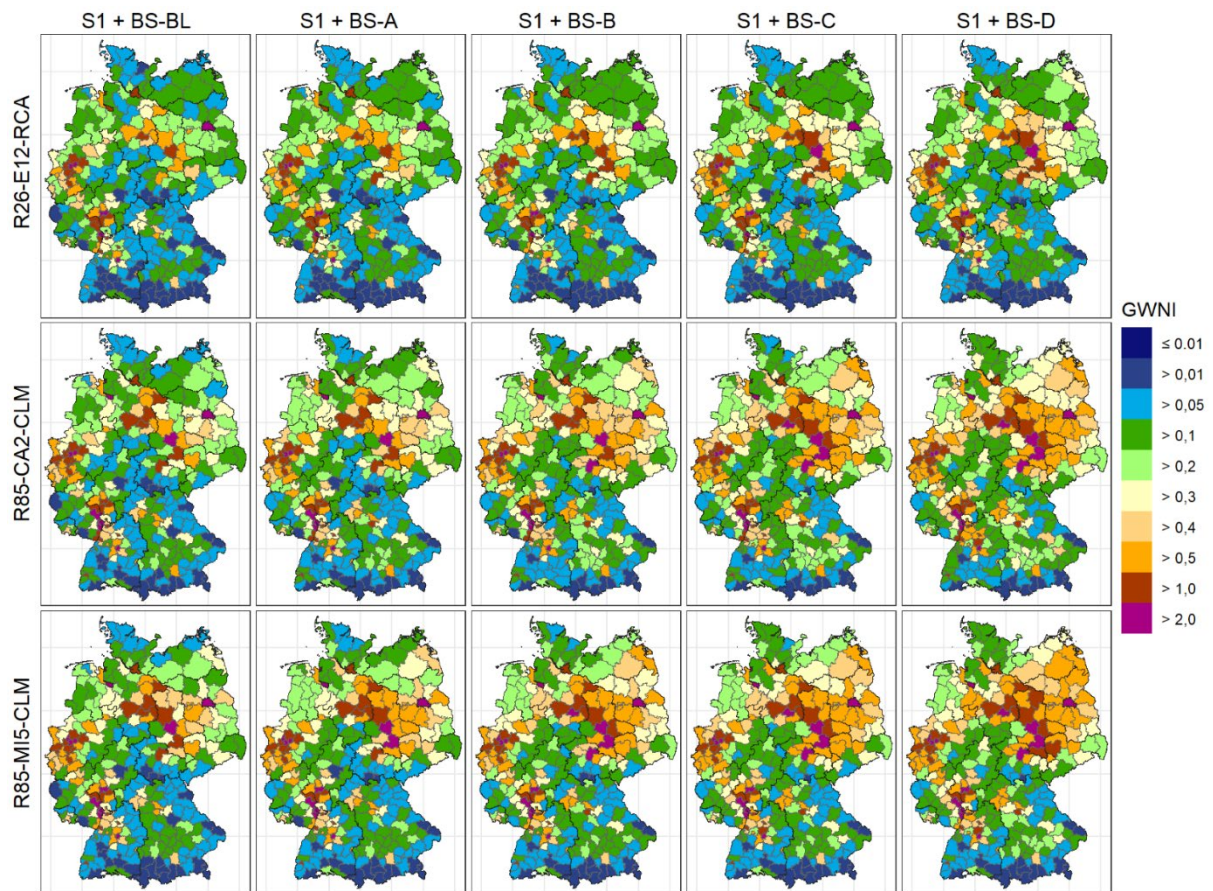
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 62: Zukunftsszenarien zum Grundwassernutzungsindex (GWNI), mit Wassernutzung im Jahr 2070, mittlere Grundwasserneubildung und mittlerer tatsächlicher Bewässerungsbedarf in der Periode 2061-2090. (S1 - Szenario 1 zur Wassernutzung; BS - Bewässerungsszenario; BL - Baseline)



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 63: Zukunftsszenarien zum Grundwassernutzungsindex (GWNI), mit Wassernutzung im Jahr 2070, Grundwasserneubildung in der Minimumdekade und mittlerer tatsächlicher Bewässerungsbedarf in der Periode 2061-2090. (S1 - Szenario 1 zur Wassernutzung; BS - Bewässerungsszenario; BL - Baseline)



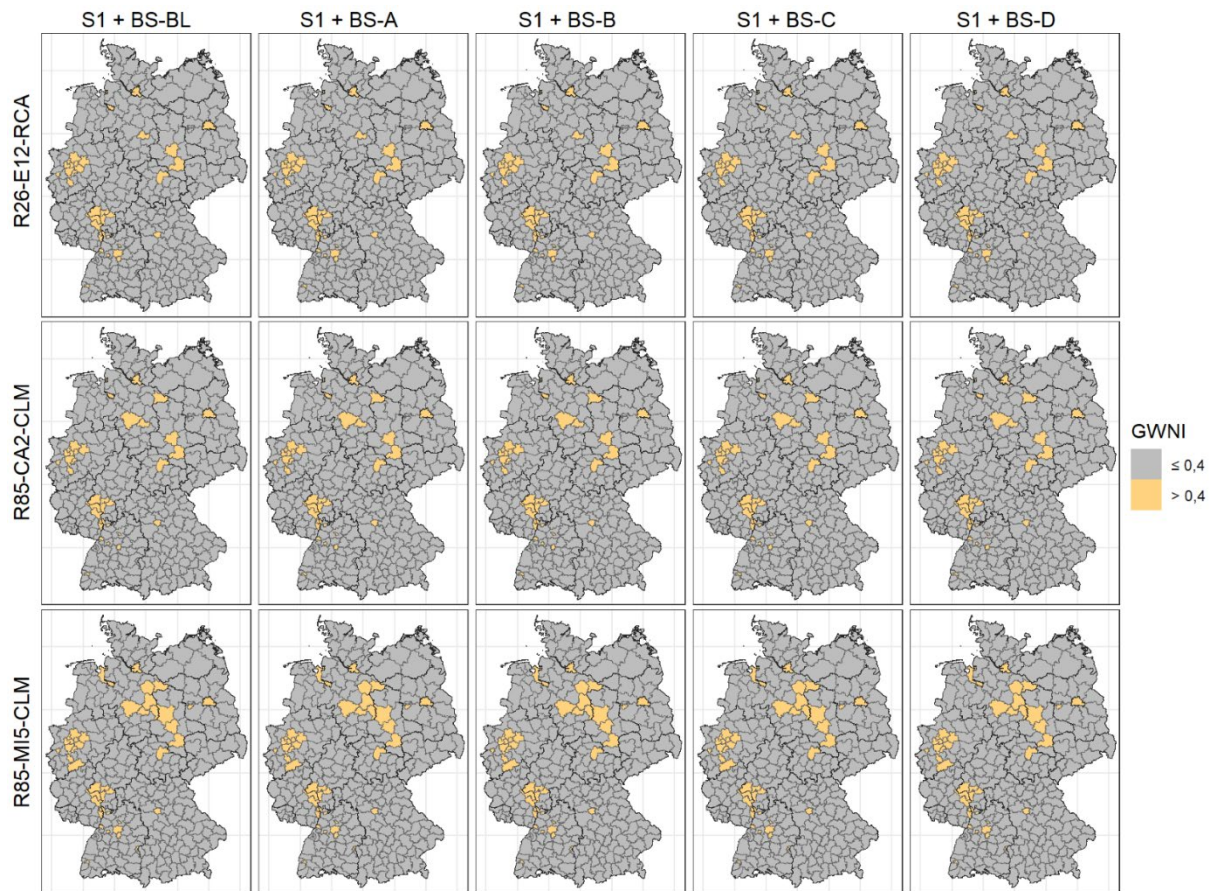
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 64: Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWNI) in Abbildung 60 für den Schwellenwert 0,2.



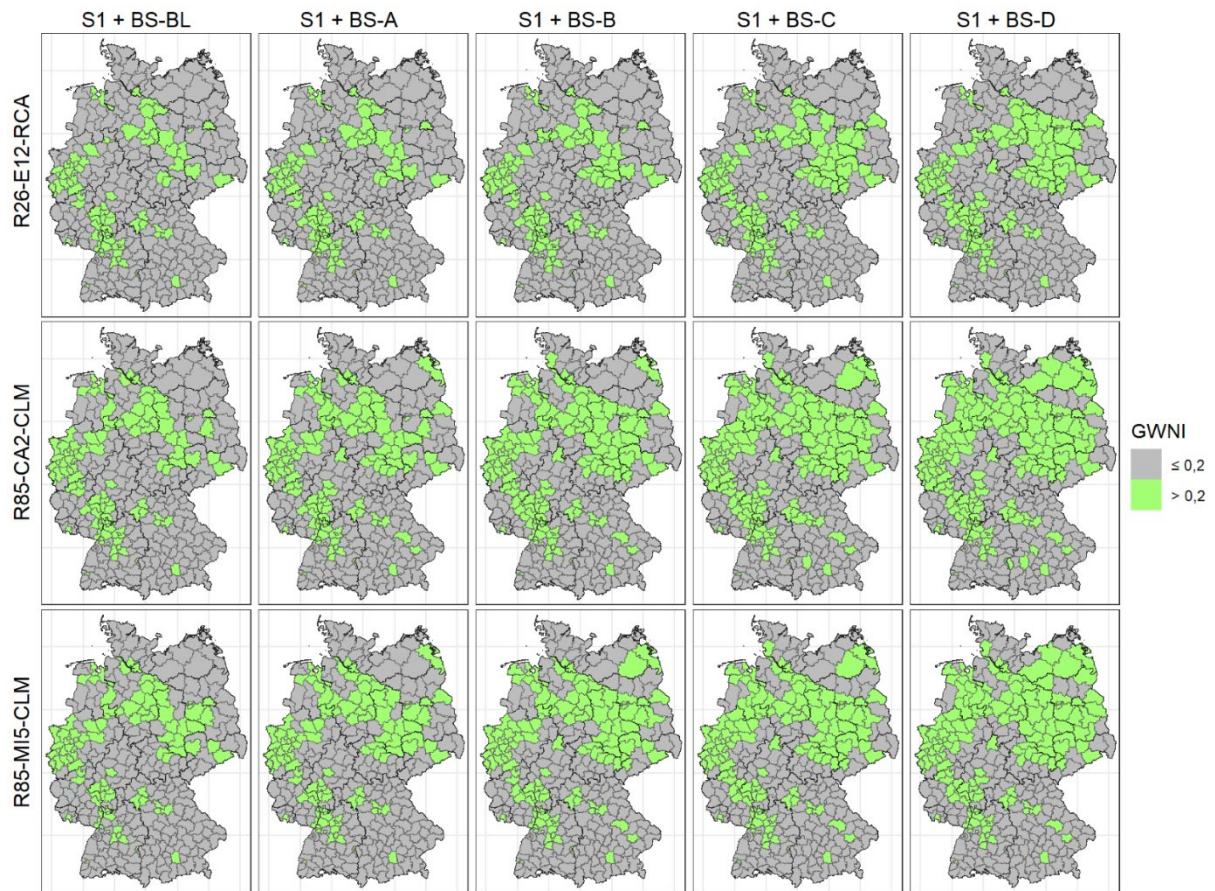
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 65: Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWN) in Abbildung 60 für den Schwellenwert 0,4.



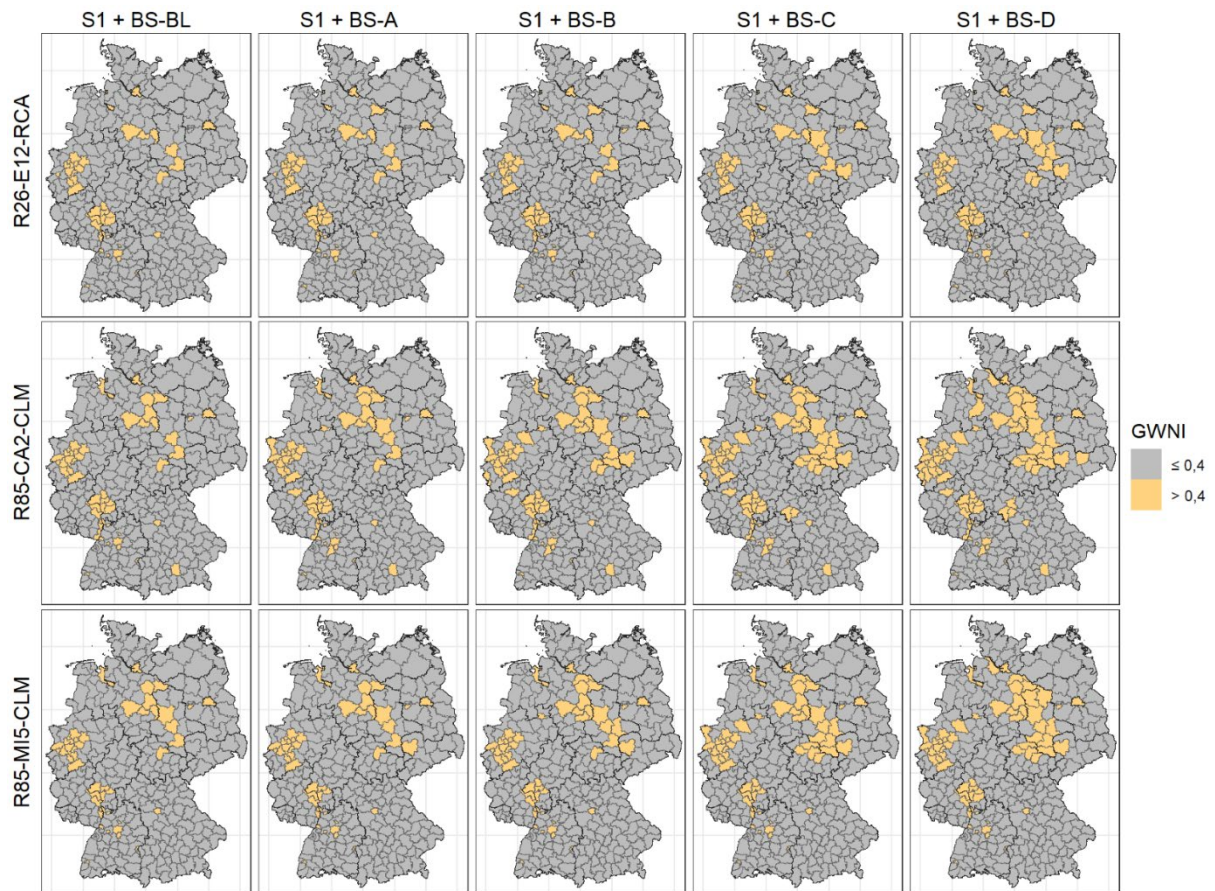
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 66: Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWN) in Abbildung 61 für den Schwellenwert 0,2.



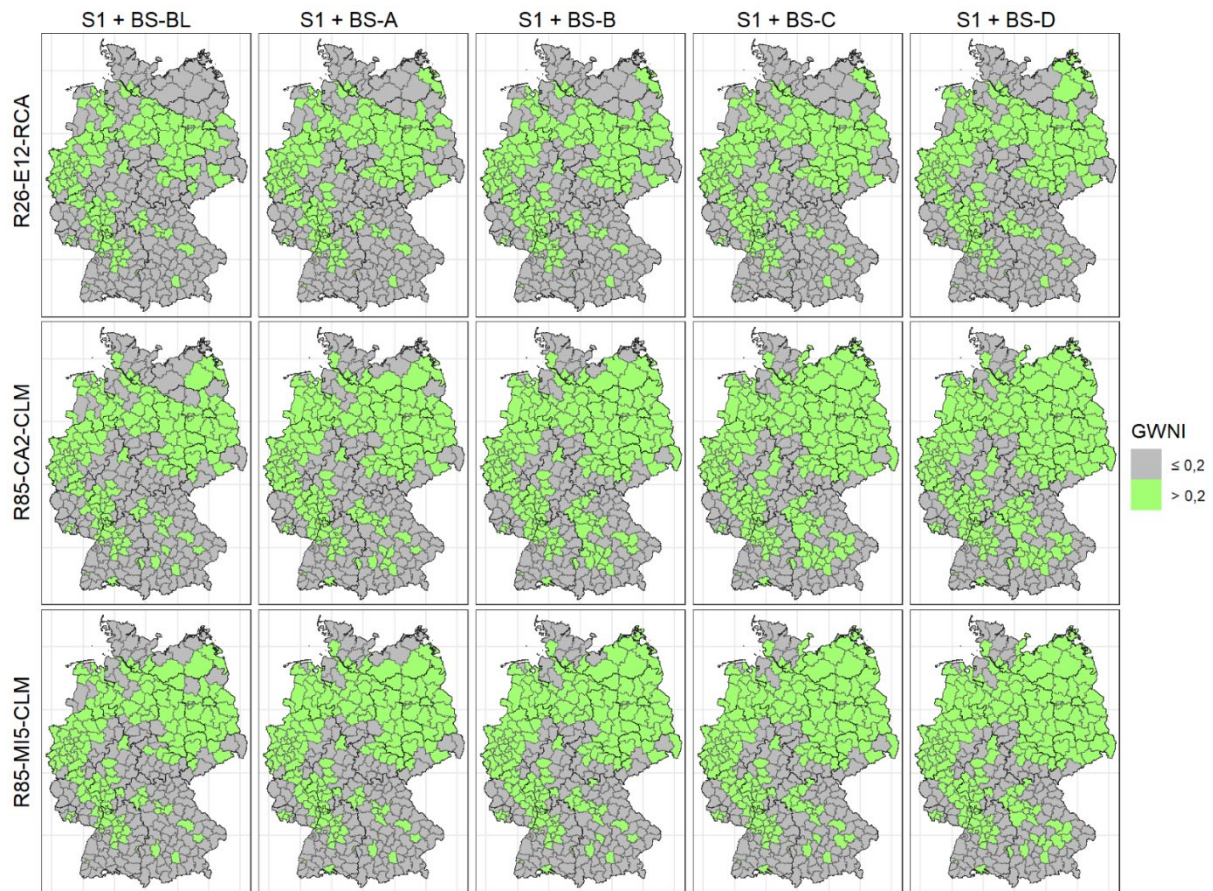
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 67: Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWN) in Abbildung 61 für den Schwellenwert 0,4.



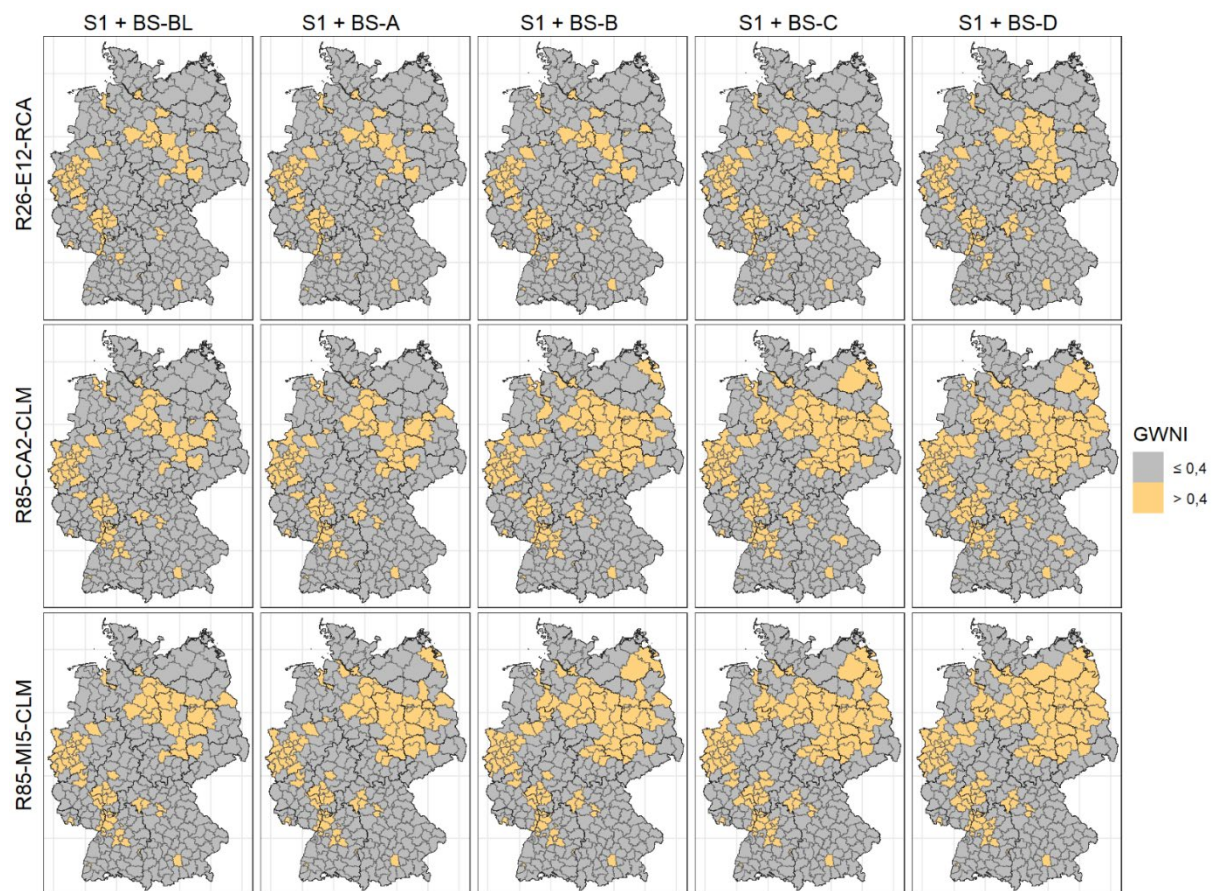
Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 68: Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWN) in Abbildung 62 für den Schwellenwert 0,2.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 69: Überschreitung des Grundwassernutzungsindex (GWNI) in Abbildung 62 für den Schwellenwert 0,4.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

In allen Abbildungen zum GWNI wird erstens der Einfluss der klimatischen Entwicklungspfade deutlich (wenn in den Spalten verglichen wird) und zweitens auch der Einfluss der wachsenden Bewässerungsmengen in der Landwirtschaft (wenn in den Zeilen verglichen wird). In vielen Regionen Deutschlands kann für die Grundwasserkörper ein wachsender Nutzungsdruck durch die Landwirtschaft erwartet werden, der wahrscheinlich vor allem entlang des skizzierten „Bogens“ nicht vollumfänglich befriedigt werden wird. Der hier vorliegende Stresstest sollte als erste Eingrenzung einer möglichen zukünftigen Spannbreite der regional-differenziert berechneten GWNI angesehen werden. Es besteht einerseits die Notwendigkeit, die angewendete Modell- und Analyseketten weiter zu verfeinern und andererseits auch noch viel Potenzial, die bisher geschaffenen Ergebnisse in Detailstudien vertieft auszuwerten. Beide Schlussfolgerungen sind mit erheblichem Arbeitsaufwand verbunden. Beispielsweise müssten die Wassertransfers über Regionsgrenzen durch eine geeignete zu entwickelnde Methodik in die Analysen eingebunden werden.

2.3.15 Skizze einer Methodik zur Darstellung von Wasser-Bilanz-Risiko-Gebieten (WBRG) in Deutschland

Autor*innen: Herrmann, F., McNamara, I., Kollet, S., Wagner, N., Flörke, M., Uschan, T.

In den vorherigen Kapiteln sind jeweils einzelne Gesichtspunkte der Ausprägung der Klimavariabilität und des sich derzeit entwickelnden Klimawandels auf die Grundwasserressourcen Deutschlands räumlich differenziert dargestellt worden. Ebenso sind Zusammenhänge zwischen

der Grundwassergewinnung und der Grundwasserneubildung in Form des Grundwassergewinnungs-Index (GWGI) räumlich für NUTS-3-Regionen quantifiziert worden. Wie bereits in Kapitel 2.3.14 diskutiert wurde, sind flächendeckende und räumlich differenzierte Daten zum nutzbaren Grundwasserdargebot gegenwärtig für Deutschland nicht verfügbar. Deshalb kann diese Größe nicht in die Berechnung von GWGIs eingehen, obwohl dies aus Perspektive der Grundwasserbewirtschaftung aussagekräftiger und somit wünschenswert wäre. Im Wesentlichen konnte bisher der Einfluss von Klimavariabilität und -wandel auf den Grundwasserhaushalt als räumlich und zeitlich stark heterogen identifiziert werden. Dies lässt sich aus der regionalen Überlagerung von klimatischen Gegebenheiten und Veränderungen mit den landesweit stark diversen hydrogeologischen Gebietscharakteristiken begründen. Die Kombination dieser Überlagerung, mit der ebenfalls räumlich stark variablen tatsächlichen Gewinnung von Grundwasser für die Nutzung in verschiedenen Sektoren, erlaubt Rückschlüsse auf die räumlich unterschiedliche Ausprägung der Herausforderungen, vor der die Grundwasserbewirtschaftung gegenwärtig steht.

Um die räumlich unterschiedliche Ausprägung der Herausforderungen darzustellen, müssen als erstes sogenannte Grundwasserthemen (GWT; Themen mit Bezug zum Grundwasser) festgelegt werden, die jeweils eine Komponente dieser Herausforderung darstellen und die durch deutschlandweit flächendeckende Daten beschrieben werden können. Die nachfolgend beschriebenen Analysen verwenden 10 exemplarische GWT (s. Tabelle 7), die im Text genauer diskutiert werden. Die Idee zur Darstellung besteht in einem Punktesystem, bei dem den verschiedenen GWT auf Basis von Simulationsergebnissen, räumlichen Analysen, Statistiken oder anderen sinnvollen Datenbeständen Punkte zugeordnet werden, die eine Relevanz für die Herausforderungen in der Grundwasserbewirtschaftung zum Ausdruck bringen. Die sukzessive Darstellung, d.h. das schrittweise Aufsummieren der in den GWT vergebenen Punkte in einer sinnvollen Reihenfolge, erlaubt Einblicke in die räumliche Verteilung der Herausforderungen. Durch hohe Punktzahlen werden die Regionen sichtbar, in denen viele GWT relevant sind. Im Rahmen des Projektes WADKlim wurden nur Analysen zum Einfluss von Klimavariabilität und -wandel auf die raumzeitliche und mengenmäßige Veränderung von Grundwasserressourcen durchgeführt. Es ist leicht vorstellbar, dass bei Verfügbarkeit entsprechender Analysen zur qualitativen (hydrochemischen) Beschaffenheit und Veränderung des Grundwassers die betrachtete Gesamtheit der GWT erweitert oder neu zusammengesetzt werden kann. Außerdem ist es vorstellbar, die Zusammenstellung an Themen so zu erweitern, dass die Ergebnisse dann dem allgemeinen gefassten Begriff der Wasser-Bilanz-Risiko-Gebiete (WBRG) gerecht werden. Mit dem Fokus auf GWT ist es sinnvoll, die Darstellung von Grundwasser-Bilanz-Risiko-Gebieten (GWBRG) zu diskutieren.

Die in Tabelle 7 dokumentierten GWT zielen jeweils auf verschiedene Aspekte der möglichen Veränderungen ab, denen Grundwasserressourcen heute ausgesetzt sind oder künftig ausgesetzt sein werden, und die durch die Simulationsergebnisse und Datenbestände im Projekt WADKlim auch quantifizierbar sind. Im GWT (1) GWNB-GD wird die Relevanz des Zusammenhangs der GWNB im Bereich ausgedehnter Grundwasserdrainagen (GD) in der Landwirtschaft bewertet. GD verursachen einen beschleunigten Abfluss von Wassermengen auf einem unterirdischen Abflusspfad hauptsächlich im Winterhalbjahr, die dann im Sommerhalbjahr nicht mehr für eine Stützung des Basisabflusses verfügbar sind und außerdem nicht zum nutzbaren Grundwasserdargebot beitragen können. Im Hinblick auf eine Sicherung oder Erhöhung der Gebietsgrundwasserneubildung ist die Existenz von GD praktisch die einzige Standorteigenschaft, auf die menschliches Handeln einen relevanten Einfluss nehmen kann. GD können zurückgebaut werden, was jedoch Nutzungseinschränkungen für die entsprechenden landwirtschaftlichen Nutzflächen bedeuten kann (z. B. durch Vernässung).

Die GWT (2) bis (6) zielen ebenfalls auf die GWNB ab, jedoch auf das Niveau und die Veränderung der zeitlichen Muster. Durch die Punktevergabe zu (2) GWNB-SW werden insbesondere Regionen identifiziert, in denen Standorte mit geringer Grundwasserneubildung oder auch Grundwasserzehrgebiete dominieren. Dies kann eine Gefahr schon in einzelnen Trockenjahren darstellen, in denen die GWNB dann auf null (oder netto unter null) sinken und durch den relativ kontinuierlichen Basisabfluss eine besonders starke Absenkung des Füllstands im Grundwasserleiter resultieren kann. Das GWT (3) GWNB-MWW zielt auf eine Bewertung der veränderten zeitlichen Muster der GWNB gegenüber einem Referenzzeitraum ab. Diese Veränderung kann sich einerseits in einem erhöhten oder abgesenkten langjährigen Niveau der GWNB ausdrücken. Andererseits können zu einer veränderten Verteilung der jährlichen GWNB auch veränderte Amplituden oder das veränderte Auftreten mehrjähriger Trockenperioden führen. Das GWT (4) GWNB-MK-Trend zielt dann auf das Auftreten von langjährigen monotonen Trends in den Zeitreihen der GWNB ab, welche meist auf einem längerfristig abgesenkten Niveau enden. Dies kann dann beispielsweise eine Minimumdekade der GWNB sein, die durch GWT (5) GWNB-minDek berücksichtigt wird. Findet sich diese in der jüngeren Vergangenheit, dann hält sie teilweise noch an oder deutet zumindest darauf hin, dass ältere langjährige Mittelwerte (z. B. 1971-2000) als Planungsgrundlage in Frage gestellt werden sollten. Im GWT (6) GWNB-DefMinDek wird dann die Ausprägung der Minimumdekade der GWNB bewertet, d.h. es wird das Defizit zum langjährigen Mittelwert in Prozent des Mittelwertes in Punkte übersetzt. Ist dieses Defizit hoch, dann haben in solchen Regionen langanhaltende Phasen mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen einen sehr relevanten Einfluss auf das Absinken des Grundwasserdargebotes und ggf. die Vulnerabilität der Grundwasserbewirtschaftung zur Folge.

Die GWT (7) und (8) zielen stärker auf die Auswirkungen der raumzeitlich veränderten Niederschlags- und Grundwasserneubildungsmuster auf die Grundwasseroberfläche und den Füllstand der unterirdischen Wasserspeicher ab. Im GWT (7) GWFA-MK-Trend wird das Auftreten monotoner Trends im Grundwasserflurabstand (GWFA) hin zu einem Absinken der Grundwasseroberfläche bewertet. Dabei wird jedoch nur die durch die Simulation abgebildete klimatische Komponente auf einen Trend gemessen und nicht der Einfluss von Grundwasserentnahmen verschiedenster Ausprägungen auf die Tiefenlage der Grundwasseroberfläche. Diese anthropogene Komponente ist derzeit noch nicht flächendeckend durch entsprechende Datenbestände bewertbar, hat jedoch auf die in einigen Regionen beobachteten Tiefststände des Grundwassers einen relevanten Einfluss. Im GWT (8) FUWS-minDek wird der Beginn der Minimumdekade des Füllstands der unterirdischen Wasserspeicher (FUWS) bewertet. Damit wird auch implizit ein verändertes Zusammenspiel von Auffüllung der Grundwasserleiter durch GWNB und Entlastung durch Basisabfluss in längeren Phasen unterdurchschnittlicher Niederschläge in der jüngeren Vergangenheit identifiziert.

Die GWT (9) und (10) bringen letztendlich mit GWGI-MW und GWGI-minDek die regional variable Grundwassergewinnung für alle Sektoren im Jahr 2019 im Verhältnis zur GWNB im langjährigen Mittelwert (MW) und in der Minimumdekade (minDek) mit in die Darstellung ein. Im Gegensatz zu den ausschließlich durch die regional variablen hydrogeologischen Standortcharakteristiken und das Klima kontrollierten GWT (2) bis (8) kann mit diesen beiden GWT (9, 10) durch Veränderungen in der Grundwassergewinnung – wie auch immer die ausgeprägt sein könnten – Einfluss auf die Bewertung von Regionen als GWBRG ausgeübt werden.

Tabelle 7: Exemplarische Grundwasserthemen (GWT) zur Skizzierung von Grundwasser-Bilanz-Risiko-Gebieten (GWBRG) auf NUTS-3-Niveau.

Nr.	Kurzbezeichnung	Basisabbildung	Beschreibung der GWT und Punktevergabe
1	GWNB-GD	Nicht gezeigt	Künstliche Grundwasserdrainagen (GD) in der Landwirtschaft beeinflussen die tatsächlich zum nutzbaren Grundwasserangebot beitragende GWNB in hohem Maße. Deshalb ist dies eine Standorteigenschaft, die im Modell mGROWA berücksichtigt wird. Regionen in denen GD die dominierende (flächig häufigste) Standorteigenschaft ist, erhalten 1 Punkt .
2	GWNB-SW	Abbildung 31	In Regionen, in denen GWNB generell nur auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau stattfindet, kann sie in trockenen Jahren oder Winterhalbjahren auch auf null reduziert oder negativ (Grundwasserzehrgebiete) sein. Liegt die mittlere GWNB (1991-2020) unter bestimmten Schwellenwerten (SW), erhalten diese Regionen Punkte: GWNB < 0 mm/a (Grundwasserzehrgebiete) – 4 Punkte GWNB < 25 mm/a – 3 Punkte GWNB < 50 mm/a – 2 Punkte GWNB < 100 mm/a – 1 Punkt
3	GWNB-MWW	Abbildung 32	Veränderung der statistischen Verteilung der jährlichen GWNB 2001-2020 vs. 1981-2000. Ergibt der Mann-Whitney-Wilcoxon-Test (MWW; auch U-Test) eine signifikante Veränderung (Signifikanzniveau $\alpha = 0,15$; d.h. $H_A > 0,85$) hin zu einer Abnahme der GWNB, erhalten diese Regionen 1 Punkt .
4	GWNB-MK-Trend	Abbildung 33	Veränderung in der Zeitreihe der jährlichen GWNB (1991-2020). Ergibt der Mann-Kendall-Test einen signifikanten monotonen Trend (Signifikanzniveau $\alpha = 0,15$; d.h. $H_A > 0,85$) hin zu einer Abnahme ($\tau < 0$), erhalten diese Regionen 1 Punkt .
5	GWNB-minDek	Abbildung 34	Beginnt die Minimumdekade (minDek) der GWNB später als 2006 und reicht demnach in die Phase der Veränderung der zeitlichen Muster der GWNB in der jüngeren Vergangenheit, erhalten diese Regionen 1 Punkt .
6	GWNB-DefMinDek	Abbildung 34	Vergrößert sich das Defizit der GWNB in einer Minimumdekade (DefMinDek) über einen bestimmten Prozentsatz vom Mittelwert der Referenzperiode 1971-2000, erhalten diese Regionen Punkte: DefMinDek > 29 % – 1 Punkt DefMinDek > 38 % – 2 Punkte DefMinDek > 52 % – 3 Punkte (Die Prozentwerte ergeben sich aus dem 50%-, 75%- u. 90%-Perzentil der räumlichen Verteilung über ganz Deutschland.)
7	GWFA-MK-Trend	Abbildung 43	Veränderung in der Zeitreihe (1991-2020) des Jahresmittelwertes des Grundwasserflurabstandes (GWFA). Ergibt der Mann-Kendall-Test einen signifikanten monotonen Trend (Signifikanzniveau $\alpha = 0,15$; d.h. $H_A > 0,85$) hin zu einer Zunahme (d.h. tiefere Grundwasseroberfläche indiziert durch $\tau > 0$), erhalten diese Regionen 1 Punkt .

Nr.	Kurzbezeichnung	Basisabbildung	Beschreibung der GWT und Punktevergabe
8	FUWS-minDek	Abbildung 46	Beginnt die Minimumdekade (minDek) des Füllstands der unterirdischen Wasserspeicher im Oktober (FUWS) später als 2006 und reicht demnach in die Phase der Veränderung der jüngeren Vergangenheit, erhalten diese Regionen 1 Punkt .
9	GWGI-MW	Abbildung 59	Der Grundwassergewinnungs-Index (GWGI) kann für verschiedene Sektoren und Bezugszeiträume berechnet werden. Hier wird die Grundwassergewinnung für alle Sektoren im Jahr 2019 und der Mittelwert (MW) der Grundwasserneubildung 1991-2020 verwendet. Den Regionen, in denen der GWGI über bestimmten Schwellenwerten liegt, werden Punkte zugeordnet: GWGI > 0,2 – 1 Punkt GWGI > 0,4 – 2 Punkte GWGI > 0,7 – 3 Punkte GWGI > 1,0 – 5 Punkte
10	GWGI-minDek	Abbildung 60	Der Grundwassergewinnungs-Index (GWGI) kann für verschiedene Sektoren und Bezugszeiträume berechnet werden. Hier wird die Grundwassergewinnung für alle Sektoren im Jahr 2019 und das Niveau der Grundwasserneubildung in der Minimumdekade (minDek) verwendet. Den Regionen, in denen der GWGI über bestimmten Schwellenwerten liegt, werden Punkte zugeordnet: GWGI > 0,2 – 1 Punkt GWGI > 0,4 – 2 Punkte GWGI > 0,7 – 3 Punkte GWGI > 1,0 – 5 Punkte

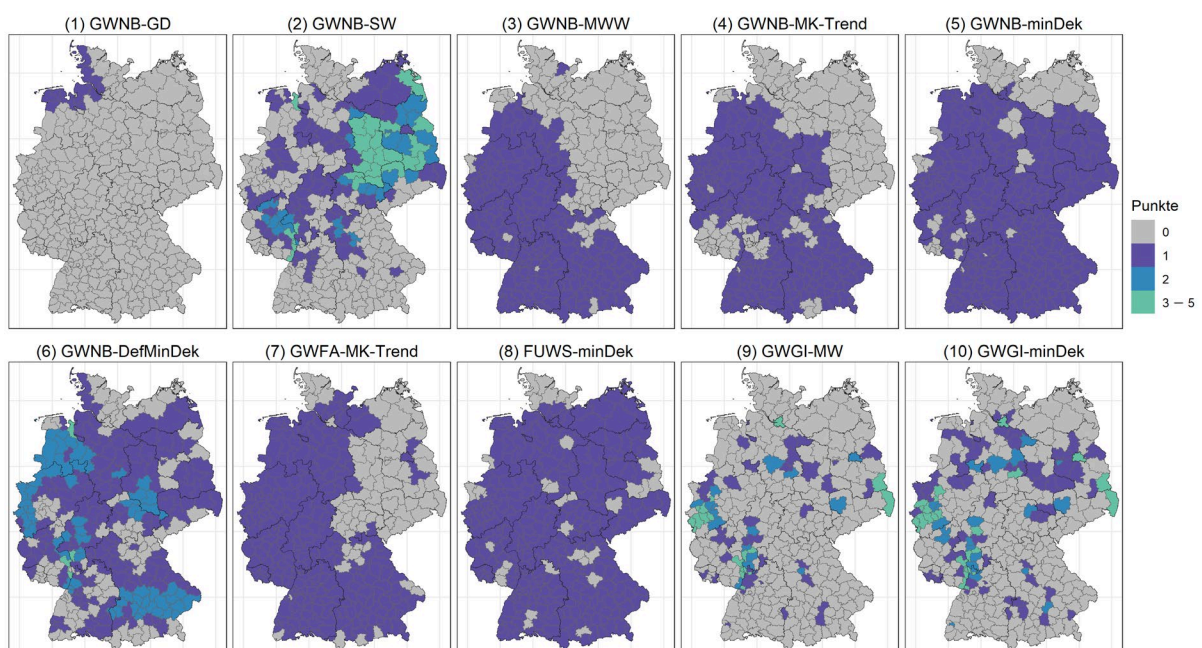
Die Abbildung 70 und die Abbildung 71 zeigen die Ergebnisse der Anwendung der skizzierten Methodik für die Darstellung der GWBRG in den NUTS-3-Regionen Deutschlands. Insgesamt wurden die 401 NUTS-3-Regionen durch Zusammenlegung von kleinflächigen Stadt- in großflächigen Landkreisen auf 316 reduziert. Die Abbildung 70 zeigt die räumliche Verteilung der Punktevergabe in den einzelnen GWT aus Tabelle 7, während in Abbildung 71 die Punkte der GWT sukzessive aufaddiert dargestellt sind, d.h. in der rechten unteren Karte findet sich die Gesamtpunktzahl zur Einordnung der GWBRG. Durch diese Vorgehensweise werden mit jedem Schritt die Beiträge der relevanten GWT ersichtlich.

Die Wirkung einer abgestuften Punktevergabe wird in Abbildung 70 deutlich, beispielsweise im GWT (3) GWNB-SW. Ein verändertes Setzen von Schwellenwerten oder Signifikanzniveaus kann zu einer veränderten Heraushebung von bestehenden Clustern führen, neue erscheinen oder bestehende verblassen lassen. Die Zuordnung von Punkten zu Schwellenwerten oder Signifikanzniveaus ist in vielen Fällen subjektiv und bleibt damit abhängig vom Ermessen oder kann das Ergebnis von Verhandlung sein, so wie die Zusammenstellung der GWT letztendlich auch. In einigen Fällen, z. B. (6) GWNB-DefMinDek, kann das Setzen von Schwellenwerten anhand der Statistik der räumlichen Verteilung einer Größe sinnvoll sein, womit praktisch die Bewertung des GWT abhängig vom räumlichen Kontrast erfolgt. Deutlich sichtbar unterscheidet sich die Punktevergabe räumlich in einigen GWT stärker als in anderen, wodurch die regional variierende Relevanz als Komponente in den Herausforderungen für die Grundwasserbewirtschaftung zum Ausdruck kommt. Nicht alle Regionen haben demzufolge die gleichen Herausforderungen zu bewältigen. Diese hängen wesentlich von der Ausprägung des Klimawandels und den regional spezifischen hydrogeologischen Standortcharakteristiken ab. Dies wird insbesondere deutlich,

wenn die Karten mit den Basisabbildungen (Tabelle 7) und deren Erläuterungen in Beziehung gesetzt werden.

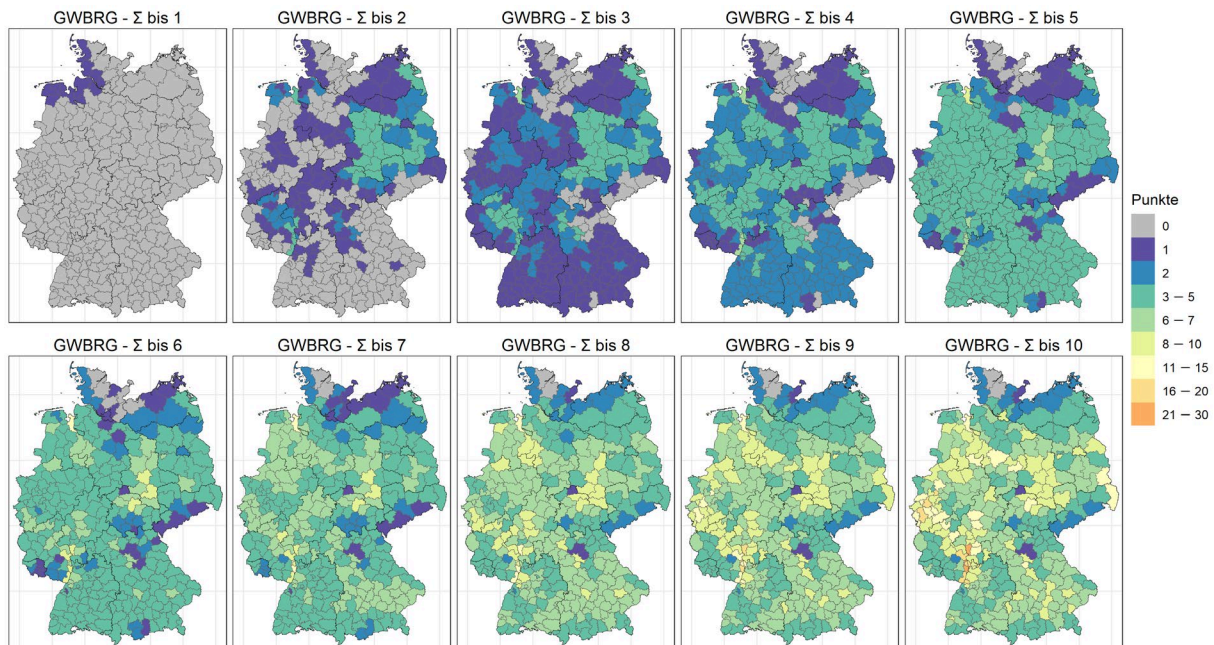
Regionen in denen kein GWT relevant ist, verbleiben in Abbildung 71 in grauer Farbe. Dies ist nur für zwei NUTS-3-Regionen in Schleswig-Holstein der Fall. Ein relevanter Einfluss von Klimavariabilität und -wandel auf die Grundwasserressourcen ist für die vergangenen Dekaden in diesen beiden Regionen demzufolge nicht nachgewiesen. Das bedeutet auch, die Grundwasserbewirtschaftung in diesen Regionen hat sehr wahrscheinlich bisher keine relevanten Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel leisten müssen. In Abbildung 71 wird auch deutlich, dass bis zur Aufsummierung von GWT (8) – in den GWT ohne Einfluss der Grundwassergewinnung – mehrere regionale Cluster identifizierbar werden. Beispielsweise zeichnen sich das mitteldeutsche Trockengebiet, die Regionen entlang des Ober- und Niederrheins und der Unterlauf der Weser in der Größenordnung 7 bis 10 Punkte ab. Grundwasserbewirtschaftung erfolgt in diesen Regionen häufig auch aus Lockergesteinsgrundwasserleitern unterschiedlicher Ausprägung. Tendenziell erreichen NUTS-3-Regionen im Norden und Nordosten sowie in Festgesteinsgebieten geringere Punktzahlen als Regionen im Westen und Süden, in denen die Grundwasserbewirtschaftung häufig aus Lockergesteinsgrundwasserleiter erfolgt. Durch Aufaddieren der Punkte der GWT (9) und (10), durch die die Grundwassergewinnung verstärkt Gewicht erhält, werden dann die Regionen in der Niederrheinischen Bucht und im nördlichen Oberrheingraben als größte Hotspots sichtbar. Außerdem erreichen weitere NUTS-3-Regionen über Deutschland verteilt Punktzahlen in der Größenordnung 10 bis 15. Ganz im Osten werden die NUTS-3-Regionen am Oberlauf des Spreeinzugsgebiets deutlich sichtbar, in denen derzeit noch intensive Grundwassergewinnung zur Sumpfung der Braunkohlentagebaue stattfindet. Letztendlich können über eine differenzierte Betrachtung der Details und Unterschiede in Abbildung 71 leicht Rückschlüsse für einzelne Regionen gezogen werden, ob die Herausforderungen für die Grundwasserbewirtschaftung eher in der Ausprägung der Grundwassergewinnung oder den klimatischen und hydrogeologischen Faktoren zu suchen wären. Oder auch ob Grundwasserbewirtschaftung im Klimawandel tatsächlich ein relevantes Thema in einer speziellen Region ist.

Abbildung 70: Punktevergabe in den einzelnen GWT entsprechend der Vorgaben in Tabelle 7.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Abbildung 71: Sukzessive Aufsummierung der Punkte aus Abbildung 70, d.h. rechts unten ist die Punktsumme über alle GWT dargestellt.



Quelle: eigene Darstellung, Forschungszentrum Jülich.

Die GWT (1) bis (8) in Abbildung 70 und Abbildung 71 können auch als Karten der klimatologischen Gefährdung für Grundwasserressourcen gelesen werden. Sie identifizieren auf verschiedenen Zeitskalen den Einfluss von veränderter Häufigkeit und Intensität länger anhaltender meteorologischer Trockenheit. Potenzielle Nachteile oder Schäden als Folge der klimatologischen Gefährdung für die Grundwasserbewirtschaftung ergeben sich in den NUTS-3-Regionen, in denen diese intensiv betrieben wird, was sich in hohen GWGI widerspiegelt. Das Risiko, mit Nachteilen oder Schäden konfrontiert zu sein, wächst für individuelle Regionen, wenn zusätzlich zur klimatologischen Gefährdung relevante Grundwassergewinnung stattfindet oder zukünftig vermehrt stattfinden soll. Individuelles Risiko aufgrund anthropogener Nutzung in den NUTS-3-Regionen wird demnach durch die GWT (9) und (10) verstärkt sichtbar. Vor dem Hintergrund solcher Überlegungen kann eine Einstufung der Punktesumme aus allen GWT in relative Risikoklassen erfolgen. Für Regionen, die Punktesummen kleiner 7 aufweisen, kann das Risiko von Gefahren durch den derzeit stattfindenden Klimawandel für die derzeit tatsächlich stattfindende Grundwassergewinnung als *gering* eingestuft werden. Für Regionen, in denen die Punktesumme im Bereich 7 bis kleiner 10 liegt, kann das Risiko als *moderat* eingestuft werden. Für Regionen, in denen die Punktesumme im Bereich 10 bis kleiner 15 liegt, kann das Risiko als *hoch* eingestuft werden und in Regionen mit mehr als 15 Punkten als *sehr hoch*. Eine Einführung höherer Risikoklassen erscheint für die hier diskutierte Beispielanwendung auf GWBRG nicht sinnvoll zu sein. Der Natur der Methodik nach muss eine solche Einordnung des relativen Risikos anhand von Überschreitungen von Punktesummen immer an die jeweilige Zusammensetzung der Gesamtheit der Einzelthemen (GWT) und deren individuelle Relevanzbewertung in Form der Punkte angepasst werden. In der hier vorgestellten Vorgehensweise (GWT und Punktesystem) werden NUTS-3-Regionen, in denen keine intensive Grundwasserbewirtschaftung stattfindet, weil das Grundwasserdargebot es nicht erlaubt, auch nicht in höheren Klassen sichtbar. Würde durch ein verändertes Grundwassergewinnungsregime der GWGI in solchen Regionen stark ansteigen, würden diese sehr wahrscheinlich auch in die Klassen *hoch* und *sehr hoch* eingeordnet.

Mit der in Abbildung 71 gewählten Darstellung wird eine Übersicht klimatischer und anthropogener Einflüsse auf die Grundwasserressourcen für Deutschland auf Basis von NUTS-3-Regionen vermittelt. Die Abbildung verdeutlicht die Heterogenität der Auswirkungen zum einen, zum anderen wird aber auch ersichtlich, dass die Herausforderungen an die Maßnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen regional bzw. lokal variieren. Der Vorteil einer Übersicht über das gesamte Bundesgebiet liegt in dem zugrundeliegenden umfassenden und konsistenten Datenmaterial aus Modellsimulation und Statistik. Aufgrund von Modell- und Datenunsicherheiten muss natürlich eine regionale und/oder lokale Bewertung folgen.

2.3.16 Kurze Synthese und Schlussfolgerungen

Autor*innen: Herrmann, F., McNamara, I., Kollet, S., Wagner, N., Flörke, M., Uschan, T.

Im Rahmen des Projektes WADKlim wurde für die Bewertung des Einflusses von Klimavariabilität und Klimawandel auf die Wassernutzung und die Wasserressourcen in Deutschland eine umfangreiche Modell- und Analyseketten zusammengestellt. Die Ausprägung des Klimawandels auf Wasserressourcen zu untersuchen, hat sich in den vergangenen Dekaden als ein sehr weites und komplexes wissenschaftliches Arbeitsgebiet herausgestellt. Aus diesem Grund wurde der Fokus der Analysen auf einige spezielle Herausforderungen im Spannungsfeld von Klimawandel und Wasserressourcen gesetzt. Die Modell- und Analyseketten wurde außerdem genutzt, um detaillierter die Auswirkungen von Klimavariabilität und Klimawandel auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen auf die Grundwasserressourcen näher zu untersuchen. In diesem Zusammenhang hatten die Analysen das Ziel, eine Datenbasis und daraus entwickelte räumliche Darstellungen auf Ebene der deutschen NUTS-3-Regionen zu schaffen, die für die Ergreifung von Maßnahmen zur Anpassung an längerfristige Trockenheit und Dürre im Kontext der Nutzung von Grundwasserressourcen verwertbar sind.

Die zusammengestellte Modell- und Analyseketten (Kap. 2.3.2, 2.3.3 und 2.3.4) besteht aus den seit vielen Jahren in der wissenschaftlichen wie auch in der wasserwirtschaftlichen Praxis angewendeten Modellen WaterGAP3, ParFlow/TSMF und mGROWA, in Kombination mit umfangreichen klimatologischen Datenbeständen, Klimaprojektionen, Daten zur Wassernutzung und -gewinnung sowie statistischen Analysemethoden zur Ermittlung relevanter zeitlicher Veränderung. Im Zusammenspiel dieser vielen Komponenten wurden Szenarien für mögliche zukünftige Entwicklungspfade aufgezeigt und hinsichtlich der Veränderungen von Grundwasserressourcen und deren Nutzung diskutiert. Die dabei entwickelten Analyse- und Darstellungskonzepte können zukünftig für regional-differenzierte Bewertungen herangezogen und auch auf andere konkrete Fragestellungen mit Bezug zum Klimawandel angewendet werden.

Einmal mehr hat sich im Rahmen des Projekts WADKlim herausgestellt, dass Fragestellungen, die mit komplexen Modell- und Analyseketten beantwortet werden sollen, präzise formuliert sein müssen. Viele einzelne Modelle oder Komponenten dieser Ketten sind schon sehr weit entwickelt und können auf sehr spezielle Fragestellungen mit nur geringen Unsicherheiten behaftete Antworten liefern. Die gegenwärtige und zukünftige Herausforderung besteht nun darin, aus diesen vielen Antworten auf sehr spezielle Fragestellungen auch Antworten auf die allgemeiner formulierten Fragen zum Einfluss des Klimawandels auf Wasserressourcen zu synthetisieren. Eine sehr spezielle Fragestellung, die auf Basis von Modellen und Analysen sicher beantwortet werden kann, wäre beispielsweise: „Wann war in der Vergangenheit in Oberfranken die Dekade, in der Grundwasserneubildung nur auf einem minimalen Niveau stattgefunden hat?“. Zur Beantwortung einer großen Vielfalt derartiger Fragen können die in den Kapiteln 2.3.5 bis 2.3.12 dokumentierten Ergebnisse aus den im Projekt WADKlim verwendeten Modellen und Datenbeständen herangezogen werden. Im Rahmen des Projektes wurden einige derartige Fragen exemplarisch andiskutiert und beantwortet.

Es verbleiben jedoch viele spezielle Fragestellungen, die mit tiefergehenden Studien auf Basis der etablierten Modell- und Analysekette sowie einer erweiterten und präzisierten Datenbasis beantwortet werden könnten. Folgende Studien und Verbesserungen in den Datenbeständen würden beispielsweise dazu beitragen, weitere Fragen von Relevanz zu beantworten:

- ▶ Grundwasserneubildung und Waldumbau – Wie wird Grundwasserneubildung flächendeckend durch Waldumbau, weg von Nadelwäldern hin zu Laub-Mischwäldern, verändert? Wo finden sich in Deutschland die Flächen, die ein relevantes Potenzial für eine Erhöhung der Grundwasserneubildung durch Waldumbau haben?
- ▶ Grundwasserneubildung und Versiegelung – In welchen Regionen Deutschlands besteht ein signifikantes Potenzial, durch Entsiegelung die Grundwasserneubildung relevant zu erhöhen, sodass tatsächlich eine Zunahme des bewirtschaftbaren Grundwasserdargebotes resultiert?
- ▶ Nutzbares Grundwasserdargebot im Standardverfahren – Wie können die derzeit in der Praxis verwendeten Verfahren und Datenbestände zur Bestimmung des lokalen oder regionalen Grundwasserdargebotes in einer deutschlandweiten flächendeckenden Methodik zur kontinuierlichen Bestimmung des dekadisch variablen Grundwasserdargebotes zusammenkommen?
- ▶ Grundwassernutzung aus tiefen Grundwasserleitern – Wie können die Erkenntnisse aus den vielfach bestehenden regionalen Grundwassermodellen mit Stockwerksgliederung zu einer deutschlandweiten Bewertung der Grundwasserreserven in länger andauernden Phasen von Grundwasserdürre zusammengefasst werden?
- ▶ Problemkreis Wassertransfers – Wie könnte die in Hirschfeld (2015) genutzte und derzeit von der BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) weitergeführte Methodik zur Wasserbilanzierung auf der Ebene der NUTS-3-Regionen mit der Methodik im Projekt WADKlim zusammengeführt werden? Wie lässt sich ein deutschlandweiter flächendeckender Datenbestand zu den zeitlich variablen Wassertransfers im deutschen Fernwasserleitungsnetz aufbauen?
- ▶ Problemkreis Wassernutzungsdaten – Wie kann die Datenaufbereitung der statistischen Ämter so verändert werden, dass eine nutzbare Schnittstelle in die Modelle zur Entwicklung von Nutzungsszenarien resultiert? Was müsste ein deutschlandweites elektronisches Wasserbuch alles leisten können? Können Unsicherheiten in den Daten durch Agenten-basierte Modelle reduziert werden?

Für die Beantwortung eher allgemein formulierter Fragen zum Klimawandel, z. B. „Gibt es in Deutschland ein Risiko, dass zukünftig die Wasserversorgung nicht mehr gesichert ist?“, muss häufig vorher eine größere Anzahl spezieller Fragestellungen sicher beantwortet werden. Diese speziellen Antworten müssen in einer Art Zusammenschau so aufbereitet werden, dass die Antwort auf die allgemeinere Frage offensichtlich wird. Wie sicher die dann resultierende Antwort ist, hängt dann ggf. auch von vielen bekannten oder unbekanntem Unsicherheiten ab. Vor diesem Hintergrund sollten die in den Kapiteln 2.3.14 und 2.3.15 dokumentierten Skizzen bewertet werden.

Insbesondere das in Kapitel 2.3.15 vorgeschlagene Punktesystem, mit dem eine Darstellung und Bewertung der klimatischen und anthropogenen Einflüsse auf die Grundwasserressourcen in Deutschland möglich wird, hat das Potenzial, auch auf andere Fragestellungen angewendet zu werden. Beispielsweise könnte mit dieser methodischen Vorgehensweise auch stärker auf Aspekte der Wasserqualität, auf landwirtschaftliche Dürre oder die Gefahren durch Niedrigwasser fokussiert werden. So wie die konkrete Anwendung der Methodik für eine Darstellung von Grundwasser-Bilanz-Risiko-Gebieten derzeit ausgearbeitet ist, ergeben sich Einblicke in die Gefahren und Risiken, die in einigen Regionen hinsichtlich der mengenmäßigen Verfügbarkeit und damit der potenziellen Nutzung von Grundwasser in überdurchschnittlich trockenen Dekaden bestehen. Es handelt sich jedoch erstmal um eine exemplarische Anwendung und Darstellung der Methodik. Aus diesem Grund muss vor einer konkreten exekutiven Verwertung von Punktzahlen wie in Abbildung 71 eine breite Abstimmung zu tatsächlich berücksichtigten Grundwasserthemen sowie den verwendenden Punktniveaus und Schwellenwerten stehen. Dies ist auch begründet durch die im gesamten Kapitel 2.3 an verschiedenen Stellen im Bezug zu den jeweiligen Themen diskutierten Lücken in den Datengrundlagen, methodischen Rahmenbedingungen und Unsicherheiten.

3 Umgang mit Nutzungskonflikten

Autor*innen: Vidaurre, R., Tröltzsch, J., Stein, U., Schritt, H., Bueb, B., Reineke, J., Uschan, T., Flörke, M.

Wasserbezogene Nutzungskonflikte sind außerhalb von Deutschland bereits gut dokumentiert und auch in Deutschland lassen sich bereits Regionen ausmachen, in denen die Verteilung von Wasser ein politisches Thema geworden ist. Umso wichtiger ist es, dass der Umgang mit wasserbezogenen Nutzungskonflikten frühzeitig vorgedacht wird und wirksame Mechanismen zu ihrer Bewältigung bereitgehalten werden. Die Arbeiten in WADKlim zielten darauf ab, wasserbezogene Nutzungskonflikte in Deutschland zu erfassen und geeignete Instrumente zu entwickeln, um diese Nutzungskonflikte vermeiden oder vermindern zu können.

3.1 Wasserbezogene Nutzungskonflikte in Deutschland – Ein Überblick

Autor*innen: Uschan, T., Flörke, M.

Wasserbezogene Nutzungskonflikte können u. a. bei einem Ungleichgewicht zwischen Wasserbedarf und Wasserdargebot entstehen und die Verfügbarkeit, Verteilung und Verwendung von Wasserressourcen betreffen. Bisher wurden WNK vorwiegend aus Regionen mit semiaridem bis aridem Klima berichtet. So z. B. aus der Provinz Almería (Spanien), in der eine auf Gewächshäusern basierende intensive Landwirtschaft zu einer Übernutzung des Grundwassers führt (Luis Caparrós-Martínez et al., 2020). Die Auswirkungen des Klimawandels durch vermehrt auftretende Hitzewellen und Dürren führen jedoch auch in Deutschland regional zu Wasserknappheit und somit zu WNK (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2020).

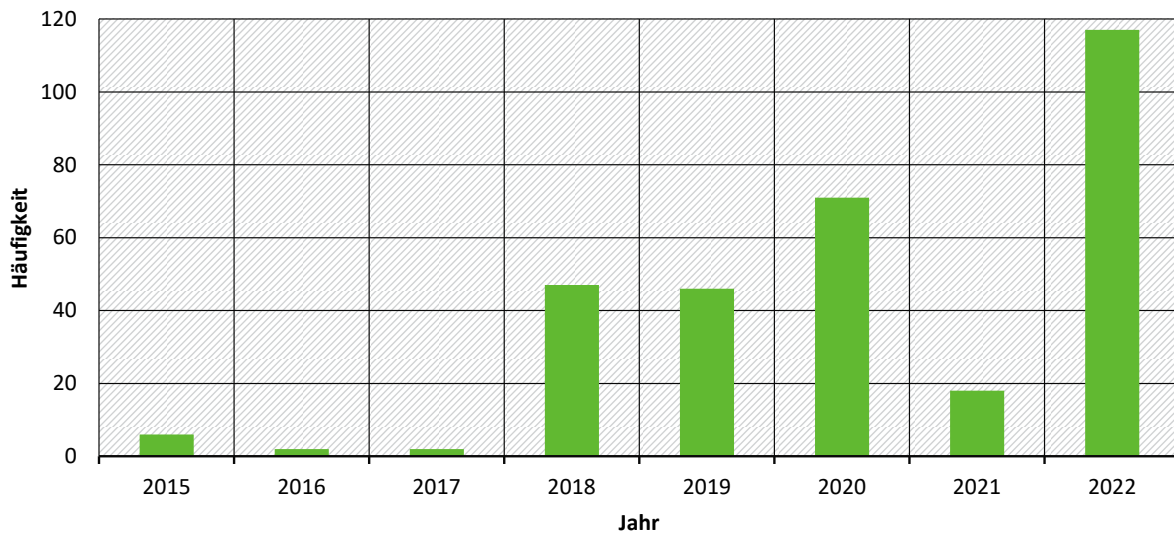
Da eine bundesweite Erfassung von WNK derzeit nicht vorliegt und davon auszugehen ist, dass WNK regional unterschiedlich ausgeprägt sind, wurde in WADKlim ein regionalisierter Überblick über das Auftreten von WNK in Deutschland geschaffen. Auf diese Weise werden Auslöser aufgezeigt und involvierte Akteure dargestellt.

Hierfür wurde eine systematische Medienanalyse durchgeführt. Verschiedene Medienformate wie Zeitungen und Nachrichten wurden nach WNK durchsucht. Die Einbeziehung von überregionalen, besonders jedoch von regionalen Medienformaten, ermöglichte eine detaillierte räumliche Zuordnung der WNK. Auf Basis der räumlichen Informationen wurden die WNK in die NUTS¹⁵-Gebietsklassifikation eingeordnet. Hierbei stellt die NUTS-3-Ebene (Kreise und kreisfreie Städte) die höchste räumliche Auflösung dar. War eine Zuordnung auf NUTS-3-Ebene nicht möglich, weil ein WNK bspw. überregional auftrat, wurde die nächsthöhere NUTS-2-Ebene (Regierungsbezirke) genutzt. Durch eine Abstraktion und Kategorisierung der Inhalte wurde ein Vergleich zwischen den heterogenen Informationen verschiedener Medienformate möglich. Zusätzlich sind WNK aus einer Online-Umfrage im Rahmen des Projektes ermittelt worden, die an ausgewählte Fachleute sowie an Behördenvertreter*innen verschickt wurde. Diese wurden in der Analyse mitberücksichtigt, der Anteil der Medienberichte überwiegt jedoch in der Analyse. Die Recherche wurde zum Stichtag 31.12.2022 beendet. Als Ergebnis konnten insgesamt 358 WNK in Deutschland identifiziert werden. Berichte zu WNK reichen vom Jahr 2022 bis in die 1950er-Jahre zurück, wobei zu berücksichtigen ist, dass in den Jahren vor 2015 höchstens 2 WNK pro Jahr berichtet wurden. Eine Ausnahme bilden die Jahre 2003 und 2006, die insbesondere durch sommerliche Hitzewellen charakterisiert waren (jeweils 20 bzw. 15 berichtete WNK). Seit dem Jahr 2015 ist eine regelmäßige Berichterstattung über WNK vorhanden. Die

¹⁵ Nomenclature of Territorial Units for Statistics: Systematik zur Unterteilung der Europäischen Union in statistische Gebietseinheiten (Europäische Kommission, 2022).

Häufigkeit der berichteten WNK für den Zeitraum 2015 bis 2022 ist in Abbildung 72 dargestellt. Während die Häufigkeit in den Jahren 2015 bis 2017 im einstelligen Bereich liegt, ist ein deutlicher Anstieg in den Jahren 2018 bis 2022 zu erkennen. 2018 wurden deutschlandweit 47, 2022 bereits 117 WNK berichtet.

Abbildung 72: Häufigkeit der in Medien berichteten WNK im Zeitraum von 2015 bis 2022.

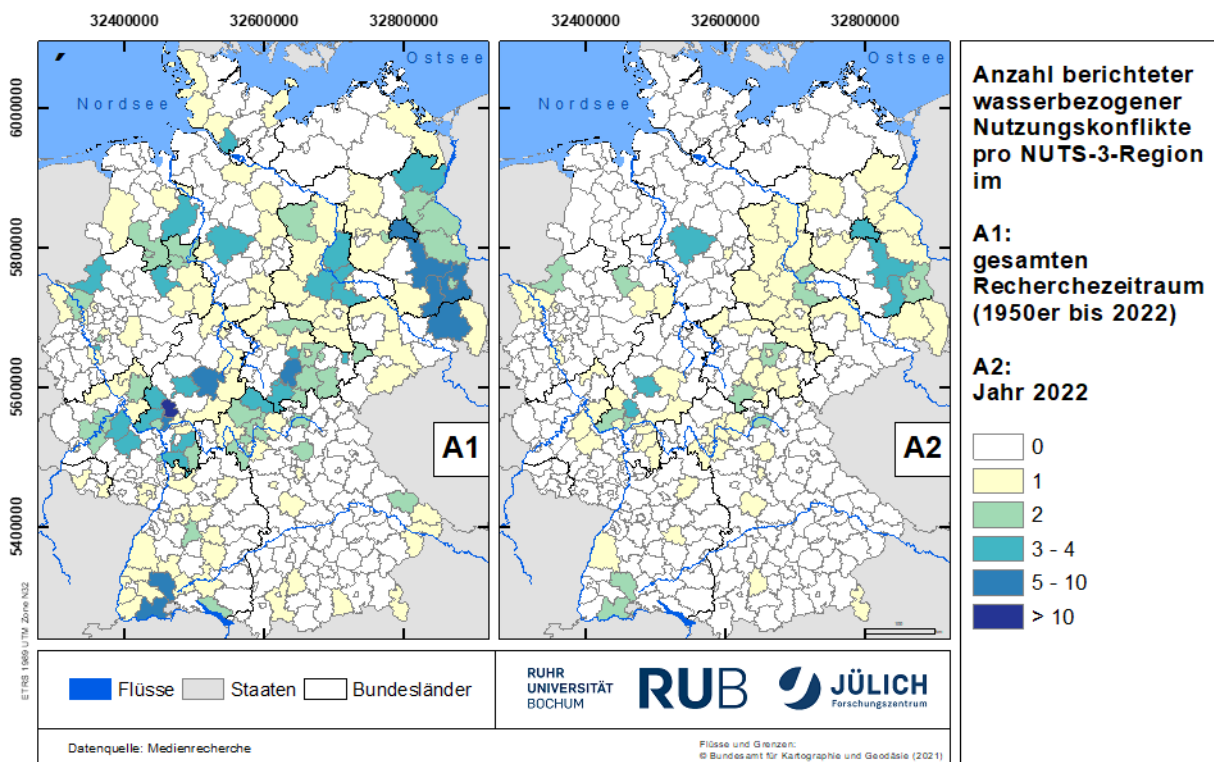


Quelle: eigene Abbildung, Ruhr-Universität Bochum.

Die Jahre 2018 bis 2020 waren durch Trockenheit geprägt. Das Jahr 2018 weist bspw. bis zu 25 % weniger Niederschlag als die Referenzperiode 1961 – 1990 auf (Deutscher Wetterdienst, 2018). Darüber hinaus waren dies die drei wärmsten Jahre seit Beginn der flächendeckenden Wetteraufzeichnung im Jahr 1881 (Deutscher Wetterdienst, 2020), was sich in der Häufigkeit der berichteten WNK widerspiegelt. Das Jahr 2021 war hingegen ein insgesamt durchschnittliches Wetterjahr mit ausreichend Niederschlag (Deutscher Wetterdienst, 2021), was durch eine Abnahme der Anzahl berichteter WNK sichtbar wird. 2022 war mit einer Jahresmitteltemperatur von 10,5 °C und einem Niederschlagsdefizit von 15 % bezogen auf die Referenzperiode 1961 – 1990 wieder deutlich wärmer und trockener (Imbery et al., 2023). Obwohl 2022 dieselbe Jahresmitteltemperatur und ein ähnliches Niederschlagsdefizit wie 2018 aufweist, ist in diesem Jahr die Häufigkeit berichteter WNK größer als 2018. Somit ist davon auszugehen, dass spätestens seit 2022 eine stärkere mediale Sensibilisierung für das Thema WNK vorhanden ist.

In Abbildung 73 ist die räumliche Verteilung der berichteten WNK für den gesamten Recherchezeitraum sowie für das Jahr 2022, welches die größte Häufigkeit berichteter WNK aufweist, dargestellt. Bei der Betrachtung beider Abbildungsteile wird deutlich, dass WNK kein flächendeckendes Phänomen sind, sondern diese regional differenziert auftreten. Über den gesamten Recherchezeitraum (Abbildung 73 A1) lassen sich zusammenhängende NUTS-3-Regionen mit einem vermehrten Auftreten von WNK im Nordosten, entlang der Grenze zu Polen, von der Oberlausitz bis in die Uckermark sowie im Spreewald identifizieren. In Mitteldeutschland sind weitere zusammenhängende NUTS-3-Regionen von der Magdeburger Börde über die Leipziger Bucht bis in den Thüringer Wald zu erkennen. Aber auch am Niederrhein, im Rhein-Main-Gebiet und im Schwarzwald sind mehrere NUTS-3-Regionen von WNK betroffen. Im Jahr 2022 (Abbildung 73 A2) herrscht eine ähnliche Verteilung vor, die Häufigkeit in den NUTS-3-Regionen ist jedoch geringer. Die meisten WNK wurden im Hochtaunuskreis, im Landkreis Gießen, der Region Hannover und von Berlin über Dahme-Spreewald bis Oberspreewald-Lausitz berichtet.

Abbildung 73: Räumliche Verteilung der Häufigkeit der berichteten WNK auf Ebene von NUTS-3-Regionen im gesamten Recherchezeitraum (A1) und im Jahr 2022 (A2).



Quelle: eigene Abbildung, Ruhr-Universität Bochum.

Im Jahr 2022 sind 75 % der WNK auf eine unzureichende Quantität sowohl von Oberflächen- als auch von Grundwasser zurückzuführen (s. Abbildung 74 A1). Beim Oberflächenwasser äußert sich dies bspw. in der Form von Niedrigwasser, beim Grundwasser in der Form von sinkenden Grundwasserspiegeln. Eine Beeinträchtigung der Trinkwasserversorgung liegt 11 % der WNK zugrunde. Dies äußert sich bspw. in Form einer eingeschränkten Trinkwasserversorgung mittels Eigenbrunnen und des Rückgangs von Quellschüttungen (Rüskamp, W., 2015) oder in einer überlasteten Trinkwasserversorgung aufgrund zu hoher Nachfrage (Deutsche Welle, 2020).

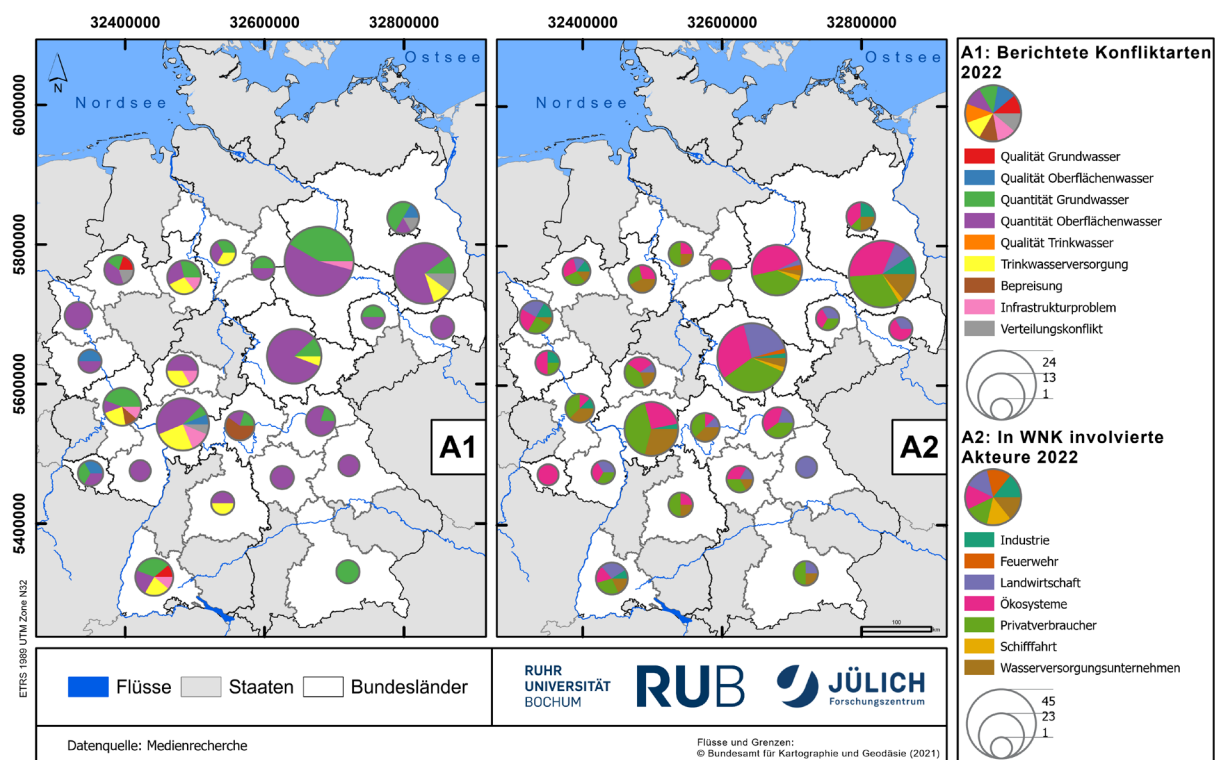
Infrastrukturprobleme (wie unzureichend dimensionierte Leitungen und Speicher), Verteilungskonflikte um dasselbe Wasser und Konflikte aufgrund des Wasserpreises machten jeweils etwa 3 % der Konfliktarten aus. Unzureichende Wasserqualität wurde nur in 6 NUTS-2-Regionen (ca. 4 %) berichtet, u. a. in Freiburg, in Köln und im Saarland.

Privatverbraucher*innen waren 2022 mit 34 % die am häufigsten von WNK betroffenen Akteure (Abbildung 74 A2). Gründe dafür sind u. a. verhängte Entnahmeverbote oder die temporäre Abhängigkeit von einer Trinkwasser-Ersatzversorgung. Der Anteil dieses Akteurs ist in den betroffenen NUTS-2-Regionen annähernd gleich hoch. Von den NUTS-2-Regionen, aus denen 2022 WNK berichtet wurden, weisen nur Dresden, Oberpfalz und Saarland keine WNK mit Auswirkungen auf Privatverbraucher*innen auf. Am zweithäufigsten von WNK betroffen waren Ökosysteme (31 %), bspw. durch eine reduzierte Wasserführung von Fließgewässern oder der Austrocknung dieser. Wasserversorgungsunternehmen und Landwirtschaft waren jeweils zu etwa 14 % von WNK betroffen.

Obwohl die Quantität des Oberflächenwassers die größte Konfliktart ausmacht, sind davon betroffene Akteure wie Schifffahrt (Transport) und Industrie (Kühlung) kaum bei den berichteten

WNK involviert (zusammen 6 %). WNK mit Auswirkungen auf die Industrie sind primär entlang des Mittel- und Niederrheins sowie in Brandenburg und Berlin vorhanden. Auswirkungen auf die Feuerwehr bedingt durch fehlendes Löschwasser wurden kaum berichtet (1 %).

Abbildung 74: Räumliche Verteilung der Konfliktarten (A1) und der in WNK involvierten Akteure (A2) auf Ebene von NUTS-2-Regionen im Jahr 2022.



Quelle: eigene Abbildung, Ruhr-Universität Bochum.

Zusammenfassend konnte im Rahmen der Recherche gezeigt werden, dass WNK zunehmend auch aus Deutschland berichtet werden, besonders in den durch Trockenheit geprägten Jahren 2018 bis 2020 und 2022. Die Medieninformationen ermöglichen an dieser Stelle keine vollständige und verzerrungsfreie Erfassung aller WNK in Deutschland. Sie besitzen meist nur eine begrenzte Informationstiefe und erfassen tendenziell eher Konflikte, die für die Allgemeinheit sichtbar sind (wie bspw. Niedrigwasser) bzw. die einen direkten Bezug zu Privatverbraucher*innen haben (wie bspw. Entnahmeverbote). Dennoch ist die hier geschaffene Informationsbasis geeignet, um Regionen mit bereits aufgetretenen WNK zu identifizieren, dort tieferegehende Analysen zu initiieren und die Verfügbarkeit der Wasserressourcen gegenwärtig und zukünftig zu bewerten.

3.2 Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten

Autor*innen: Vidaurre, R., Tröltzsch, J., Stein, U., Schritt, H., Bueb, B.

3.2.1 Einleitung

Zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten bestehen eine Vielzahl von Maßnahmen, die in unterschiedlichen Literaturquellen – und häufig sektorspezifisch – dokumentiert und analysiert wurden. In diesem Kapitel wird ein Überblick zu Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten dargeboten, die im deutschen Kontext sinnvoll sein könnten. Sie wurden in einer ausführlichen Analyse wissenschaftlicher wie auch grauer Literatur identifiziert.

Zu den Quellen der sogenannten grauen Literatur zählen Berichte von einer Reihe internationaler Institutionen, wie beispielsweise die Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) und die Asian Development Bank, die zu diesem Thema arbeiten. Ebenfalls wurden Datenbanken zu Klimaanpassungsmaßnahmen im Wassersektor im Rahmen europäischer Projekte ausgewertet. Weiterhin konnte auf Maßnahmenzusammenstellungen zu Klimaanpassung und Niedrigwasser im deutschen Kontext zurückgegriffen werden, wie beispielsweise Arbeiten der Bund/Länder-Arbeitsgruppe Wasser (LAWA), im Rahmen BMBF geförderter Verbundvorhaben (z. B. Globale Ressource Wasser (GRoW)-Forschungsschwerpunkt) oder Veröffentlichungen durch DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) und DVGW-Mitglieder (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches), u.a. Wasserversorger.

Hierbei wurden vorrangig Maßnahmen recherchiert, analysiert und katalogisiert, die bei Nutzungskonflikten aufgrund verringerter Wasserverfügbarkeit anwendbar sind. Maßnahmen für Nutzungskonflikte aufgrund der Wasserqualität oder für jene mit einem Flächenbezug, wurden nur dann in den Katalog aufgenommen, wenn ein Beitrag der entsprechenden Maßnahme zu Wassermengenkonflikten identifiziert werden kann.

3.2.2 Aufbau des Maßnahmenkatalogs „Reduzierung Wassernutzungskonflikte“

In einem ersten Schritt wurde eine Struktur für den Maßnahmenkatalog definiert. Jede in den Katalog aufgenommene Maßnahme wurde beschrieben und eine Reihe von Deskriptoren und analytischen Kategorien für sie bewertet (wenn Daten vorhanden). Im Folgenden werden diese Deskriptoren und Kategorien kurz erläutert.

1. Auswirkungen auf Wasserqualität, -quantität und Flächenbedarf

Maßnahmen können positive oder negative Auswirkungen auf die Wasserquantität, die Wasserqualität und den Flächenbedarf haben. Bei der Maßnahmenauswahl wurden Maßnahmen bevorzugt ausgewählt, bei denen schwerpunktmäßig Quantitätsaspekte adressiert werden. Zur Reduzierung von Wassernutzungskonflikten sind Auswirkungen auf Qualität und Flächenbedarf zwei weitere relevante Kategorien und werden daher mitbetrachtet. Bei den Auswirkungen auf die Wasserquantität und Wasserqualität wird darüber hinaus in Grund- und Oberflächenwasser unterschieden.

2. Ebene der Umsetzung

Mit der jeweiligen Umsetzungsebene hängen die umsetzungsrelevanten Akteure zusammen. Einige dieser Akteure wie auch die involvierten Sektoren werden in den weiteren Kategorien spezifiziert.

Der Katalog unterscheidet dabei zwischen:

- ▶ national,
- ▶ länderübergreifend,
- ▶ Länderebene,
- ▶ regional (landkreisübergreifend oder Regierungsbezirk) und
- ▶ lokal (auf Landkreis-, Gemeinde-, Städte- oder Stadtteilebene).

3. Involvierte Sektoren

Die Auswahl der involvierten Sektoren wurde auf Basis der Auswirkungen von Trockenheit und Dürre diskutiert und nach (Riedel et al., 2021) abgeleitet. Weitere Ergänzungen und Anpassungen basieren auf Deutscher Bundestag (2019), (LAWA, 2019) und Einschätzungen der Projektbearbeiter*innen. Die Auswahl der zu betrachtenden Sektoren ist folgende:

- ▶ Gewässerbewirtschaftung (Regulierung des Landschaftswasserhaushalts, inkl. Gewässerökologie)
- ▶ Siedlungswasserwirtschaft (haupts. Trinkwasserversorgung, auch Abwasserentsorgung)
- ▶ Energiewirtschaft (Thermische Kraftwerke, Wasserkraft)
- ▶ Landwirtschaft
- ▶ Forstwirtschaft
- ▶ Industrie (& Gewerbe)
- ▶ Schifffahrt / Transport
- ▶ Naturschutz (Feuchtgebiete, Biodiversität, Green Infrastructure)
- ▶ Katastrophenschutz/Gefahrenabwehr (Deutscher Bundestag, 2019)
- ▶ Tourismus (Deutscher Bundestag, 2019)
- ▶ Stadt- und Regionalplanung (LAWA, 2019)

Für die Maßnahmen, bei denen eine solche Unterscheidung klar zutrifft, wird innerhalb der betroffenen Sektoren in für die Umsetzung der Maßnahmen „federführender Sektor“ und „betroffene Sektoren“ unterschieden.

Über einzelne Sektoren hinaus gibt es auch sektorenübergreifende oder verschiedene Sektoren betreffende Maßnahmen. In dieser Kategorie benennt der Katalog die von einer Maßnahme hauptsächlich betroffenen Sektoren.

4. Hauptverantwortliche Institution bzw. Akteur*in (Maßnahmenträger*in)

Diese Kategorie beschreibt den/die Maßnahmenträger*in, also die hauptverantwortliche Institution bzw. Akteur*in. Für eine Umsetzung der Maßnahme wäre dies demnach die federführende Institution bzw. Akteur*in, beispielsweise die untere Wasserbehörde oder der/die einzelne*r Landwirt*in.

5. Zu beteiligende Institutionen bzw. Akteur*innen

Die meisten Maßnahmen werden nicht nur von einzelnen Akteur*innen umgesetzt, sondern bedürfen der Zusammenarbeit mehrerer Akteure, zum Teil mit unterschiedlichen bis gegensätzlichen Interessen. Ein Beispiel für eine Maßnahme zur Verbesserung der Grundwasserqualität sind Trinkwasserkooperationen zwischen Wasserversorgern und Landwirt*innen, an denen beispielsweise in Nordrhein-Westfalen Landwirt*innen, Landwirtschaftskammer, Trinkwasserverwerke und Landesregierung beteiligt sind.

6. Mögliche Zielkonflikte

Maßnahmen können auch im Konflikt mit anderen Zielen zur Reduzierung von Wassernutzungskonflikten stehen, also z. B. der Wasserquantität zugutekommen, aber gleichzeitig in größerem Umfang einen Flächenbedarf hervorrufen. Der Katalog unterscheidet auch die Zielkonflikte nach

Auswirkungen auf Grund- und Oberflächenwasser. Zielkonflikte in diesen Bereichen können sowohl abgemildert als auch verstärkt werden und werden entsprechend („potenziell abmildernd“ und „potenziell entstehend“) im Katalog aufgeführt.

7. Art der Maßnahmen

Folgende Maßnahmenkategorien für Maßnahmen zum Umgang mit WNK werden auf der Basis der Kategorien der European Environment Agency (Leitner et al., 2020) vorgeschlagen:

1. Wissen und Kommunikation („weiche“ Maßnahmen): Entscheidungsunterstützung-Tools, Kommunikationsmaßnahmen, Wissenstransfer, Gefahrenkarten, Risikoanalysen.
2. Planerische Maßnahmen: z. B. Vorbehalts- und Vorranggebiete, Festschreibung in B-Plänen, z. B. von ortsnaher Versickerung oder Nutzung von Niederschlagswasser
3. Organisatorische Maßnahmen in Verwaltung und Wasserwirtschaft: Koordinations- und Kooperationsmaßnahmen, inkl. Aufbau von Netzwerken, Datenerfassung und -analyse, u.a. des Wasserbedarfs, Monitoring von Wasserentnahmen,
4. Technische und naturbasierte Maßnahmen, u.a. Bau neuer Infrastruktur / Erweiterung bestehender Infrastruktur: z. B. Wasserspeicher, Grundwasseranreicherung, etc., Warnsysteme, Wasserwiederverwendung, modernisierte Bewässerungssysteme
5. Management-Maßnahmen: z. B. Anpassung von Talsperrenmanagement, Management von Grundwasseranreicherung, Fernwasserversorgung, im Voraus geplante Priorisierungskonzepte zur Wassernutzung im Dürrefall, Anpassung der Feldwirtschaft (Fruchtfolgen, Sorten).
6. Rechtliche Instrumente: Festlegung und Überarbeitung von Verboten, Geboten, Ordnungsrecht
7. Finanzinstrumente: finanzielle Anreizsysteme, wie Preissteuerung/Gebührenfestsetzungen, Wasserpfennig
8. Versicherungslösungen: u.a. Ernteausfallversicherung
9. Krisenkommunikation: Kommunikation und Informationsübermittlung in Notfallsituation
10. Konzepte für Versorgung in Notfallsituation (Ersatz und Notfallversorgung)
11. Ad-hoc Priorisierungen zur Wassernutzung im Dürrefall

8. Art der Maßnahme - Bezugszeitraum

Maßnahmen gegen Trockenheit und Dürre umfassen sowohl vorbeugende und vorsorgende, erst langfristige wirkende Maßnahmen, als auch kurzfristige operationelle Maßnahmen. Daher werden die Maßnahmen weiter in **Maßnahmen zur Dürrevorsorge** (Maßnahmen, die sich auf einen künftigen Zustand des Wasserdargebots beziehen) und **Maßnahmen für den Dürrenotfall** (Krisen- und Notfallmaßnahmen im Ereignisfall) unterschieden.

9. Zeitrahmen der Umsetzung

Der Zeitrahmen umfasst den Zeitraum von der Maßnahmenplanung bis zur Maßnahmenumsetzung. Es werden für die Maßnahmenumsetzung vier Zeitintervalle unterschieden:

- ▶ ad-hoc (im Ereignisfall)
- ▶ kurzfristig (< 2 Jahre)
- ▶ mittelfristig (2 - 5 Jahre)
- ▶ langfristig (> 5 Jahre)

Beim Zeitrahmen der Umsetzung der Maßnahme ist ebenfalls wieder die oben dargelegte Unterteilung in Vorsorge- und Krisenmaßnahmen relevant. Bestimmte Krisen- und Notfallmaßnahmen zielen auf die Linderung der Auswirkungen eines konkreten Trockenheitsereignisses ab. Ein Teil dieser Maßnahmen können vorgedacht und vorbereitet worden sein, während andere einen reinen Ad-hoc-Charakter haben und reaktiv, ohne weiteren Planungshorizont umgesetzt werden. Vorsorgemaßnahmen erfordern i.d.R. eine gewisse Umsetzungsdauer. Hierbei wird zwischen einem kurzfristigen, mittel- und langfristigen Umsetzungsrahmen unterschieden.

Der Zeitpunkt der vollständigen Maßnahmenumsetzung unterscheidet sich je nach Maßnahmenart. Bei technischen Maßnahmen ist der Zeitpunkt der Maßnahmenumsetzung definiert als jener, an dem eine Maßnahme installiert wurde und potenziell einsatzbereit ist. Bei ordnungsrechtlichen, planerischen oder organisatorischen Maßnahmen ist der Zeitpunkt als Inkrafttreten der ordnungsrechtlichen Maßnahme (Verordnung/Gesetz) definiert. Ähnlich wird auch der Umsetzungszeitpunkt für Finanz- und Versicherungsinstrumente als jener festgelegt, an dem die Instrumente auf dem Markt verfügbar und einsetzbar sind. Zu beachten ist, dass es sich hierbei nur um eine grobe Abschätzung handeln kann, da die genaue Dauer der Maßnahmenumsetzung von einer Vielzahl von Kontextfaktoren abhängt.

Ein Sonderfall stellen hybride Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen dar, die sowohl Vorsorge- als auch Notfallmaßnahmen umfassen, zum Beispiel im Rahmen einer integrierten Dürremanagementstrategie.

10. Kosten

Der Maßnahmenkatalog „Reduzierung Wassernutzungskonflikte“ führt auch die Kosten der Umsetzung entsprechender Maßnahmen auf. Ziel ist es, einen groben Richtwert für die Kostenintensität der Umsetzung zu liefern. Hierbei wird unterschieden in einmalige Investitionskosten zur Maßnahmenumsetzung sowie operative Kosten für den laufenden Betrieb. Nicht für jede Maßnahme wird sich hier eine bestimmte Summe definieren lassen. Für die Umsetzung ordnungsrechtlicher Maßnahmen ist die Definition von Kosten z. B. nicht möglich. Einfacher ist es hingegen im Fall von technischen Maßnahmen. Inwiefern konkrete Kosten aufgeführt werden können, hängt maßgeblich von der Verfügbarkeit entsprechender Daten in der ausgewerteten Literatur ab. Zudem muss beachtet werden, dass es sich hierbei nur um grobe Richtwerte handeln kann, da die genauen Kosten von weiteren Standort- und Kontextfaktoren abhängen.

11. Potenzielle Hindernisse/Herausforderungen

In dieser Kategorie werden potenzielle Hindernisse und Herausforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung der Maßnahmen aufgeführt. Dies können bspw. planerische Gründe sein, wie das Fehlen von notwendigen Grundstücken bzw. Bebauungsrechten für die Umsetzung einer Maßnahme.

3.2.3 Recherchestrategie für den Maßnahmenkatalog „Reduzierung Wassernutzungskonflikte“

Die im Folgenden beschriebene Recherchestrategie fasst sowohl die Auswahl der gesichteten Literaturquellen und -datenbanken als auch die Vorgehensweise und die Suchbegriffe zusammen.

3.2.3.1 Auswahl der Literaturquellen

Die Recherchestrategie für die Literaturanalyse umfasste sowohl wissenschaftliche (peer-reviewed) als auch graue Literatur. Sie wurde ergänzt durch gezielte Websuchen.

Wissenschaftliche Literatur (peer-reviewed): Es wurden zwei wichtige und umfassende Datenbanken ausgewertet:

- ▶ **Scopus** für englischsprachige Literatur
- ▶ **Scientific Electronic Library Online (SciELO) Citation Index** für Literatur aus Spanien, Portugal, Brasilien und 12 weitere lateinamerikanische Länder, die Karibik und Südafrika.

„Graue“ Literatur: Die Recherche der grauen Literatur umfasste sowohl Datenbanken und Webseiten internationaler und europäischer Organisationen und Initiativen bzw. Wissensportale. Weiterhin wurden deutsche Webseiten durchsucht, u.a. der Wasserwirtschaft.

Die folgende Liste stellt die untersuchten Quellen für graue Literatur dar.

Datenbanken und Webseiten:

1. UN iLibrary – inkl. Berichte von United Nations Development Programme (UNDP), United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), UN International Strategy for Disaster Reduction (UN ISDR), United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) und weitere Organisationen und Programme der UN
2. OECD iLibrary
3. World Bank research and publications
4. Asian Development Bank publications
5. Global Water Partnership (GWP)
6. Stockholm International Water Institute (SIWI)
7. DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
8. DVGW - Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
9. Berichte der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
10. Webportal Climate-ADAPT der Europäischen Umweltagentur
11. Relevante Forschungsprojekte der EU (<https://cordis.europa.eu/>) und BMBF-Projekte, insbesondere des Verbundvorhabens GroW

Gezielte Websuchen: Die Recherchestrategie wurde ergänzt mit gezielten Websuchen nach den Projektpartnern bekannten Maßnahmen und Konzepten, z. B.:

- ▶ Dürrierisikomanagement-Pläne in Spanien
- ▶ Australian Government Drought Response, Resilience and Preparedness Plan

3.2.3.2 Vorgehensweise und Suchbegriffe

Identifikation von Dokumenten: Für jede Datenbank / Webseite wurden mehrere Suchen durchgeführt mit einem Suchbegriff vom Typ A und einem vom Typ B (siehe Tabelle 8). Falls die Trefferzahl zu hoch lag, wurde versucht durch Nutzung von Restriktionen A bis C eine gut handhabbare Trefferzahl zu erreichen. Die kursiv gekennzeichneten Suchbegriffe wurden als besonders relevant eingestuft. Die Suchbegriffe in Tabelle 8 liegen ebenfalls in Deutsch vor.

Tabelle 8: Suchbegriffe für Identifikation von relevanten Berichten und Artikeln für den Maßnahmenkatalog

Keywords A	Keywords B	Restriction A	Restriction B	Restriction C
<i>water scarcity</i>	<i>management</i>	agriculture	coordination	Publication year (z. B. "2005 - 2020")
<i>drought</i>	<i>instrument</i>	energy production	cooperation	
<i>water conflict</i>	<i>measure</i>	drinking water supply	cross-cutting	
overabstraction	risk	drinking water provision		
water stress	response	hydropower		
	plan*	forestry		
	reaction	industr*		
	contingency	city plan*		
	governance	regional plan*		
	adaptation	ecosystem		

Bei der Recherche von grauer Literatur waren Anpassungen an die jeweiligen Charakteristika der zu durchsuchenden Webseite oder Datenbank notwendig, da sich die jeweiligen Datenbanken in ihrer Funktionalität unterschieden. Die Anpassungen wurden separat dokumentiert.

Screening: Aufgrund der Titel wurden die nicht relevanten Berichte bzw. Artikel aussortiert. In einem zweiten Schritt wurden, wenn Zusammenfassungen vorhanden waren, Berichte bzw. Artikel aufgrund des Abstracts aussortiert.

Eligibility: Der vollständige Bericht bzw. Artikel wird für die noch übrigbleibenden Treffer überprüft.

Included: Die relevanten Treffer werden in die interne Literaturliste aufgenommen.

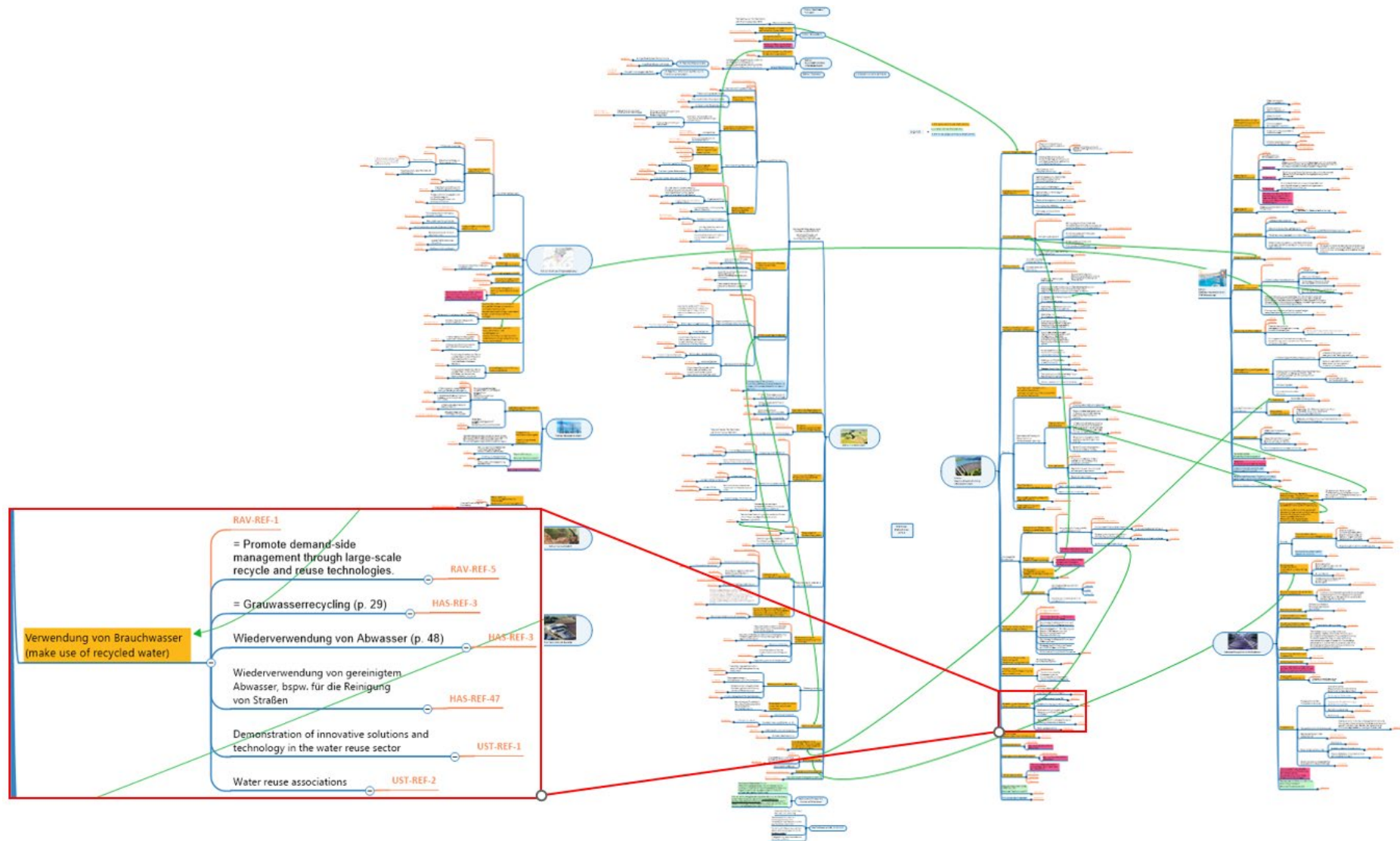
Die Dokumente auf der erarbeiteten Literaturliste wurden nach Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten durchsucht.

3.2.4 Überblick - Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten

Die identifizierten Maßnahmen wurden in einer Mindmap zusammengeführt und entlang der in den Maßnahmenkatalog aufgenommenen Sektoren strukturiert. Strukturierung und Maßnahmenauswahl wurden mit dem Auftraggeber abgestimmt. Sieben identifizierte Maßnahmen wurden für den deutschen Kontext verworfen (blau gefärbte Maßnahmen in der Mindmap). Schlussendlich wurden 62 Maßnahmen in den Katalog aufgenommen (orange gefärbte Maßnahmen in der Mindmap)

Abbildung 75 zeigt ein Abbild der gesamten Mindmap sowie eine Detaildarstellung.

Abbildung 75: Gesamtabbildung Mindmap mit Ergebnissen der Recherche von wissenschaftlicher und „grauer“ Literatur - Detaildarstellung

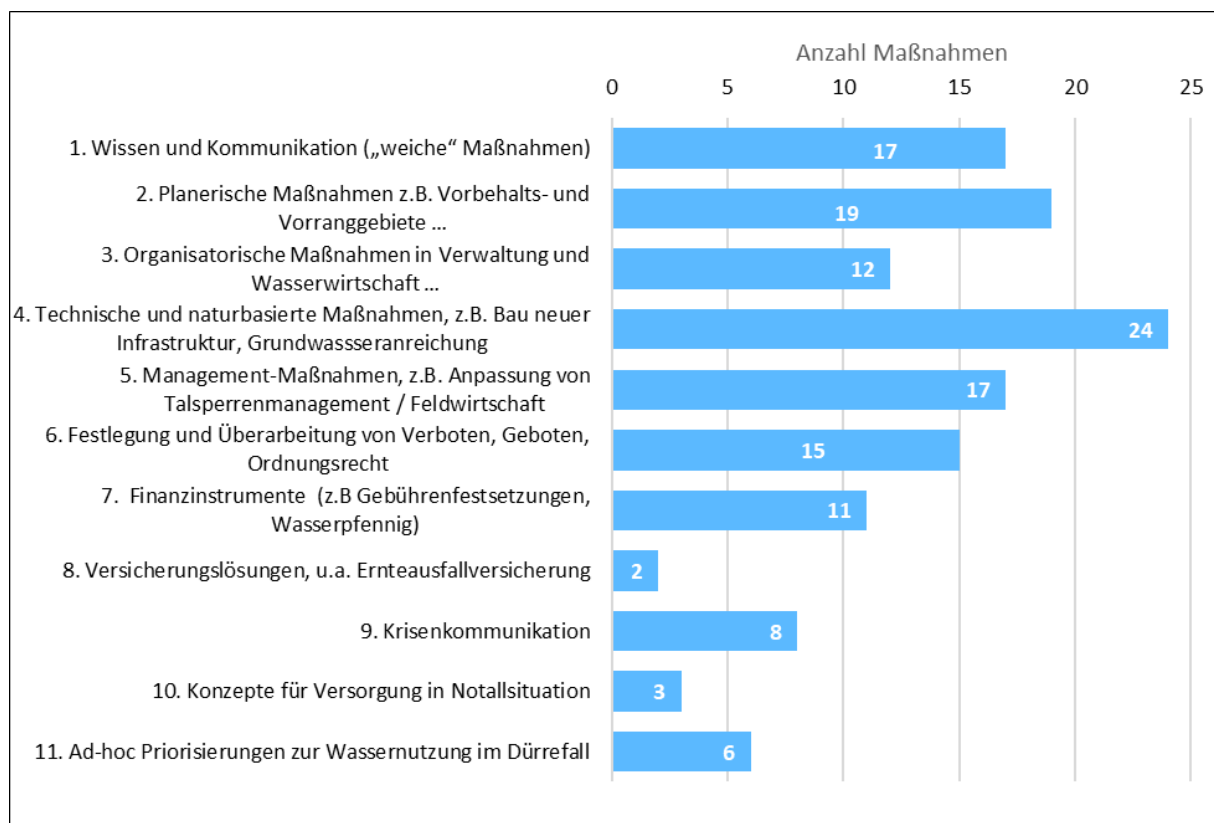


Quelle: eigene Darstellung, Ecologic Institut.

Für einige Maßnahmen (z. B. Niedrigwassermanagement, Talsperrenmanagement), erfolgte bei Titel und Beschreibung eine enge Orientierung an LAWA (2020).

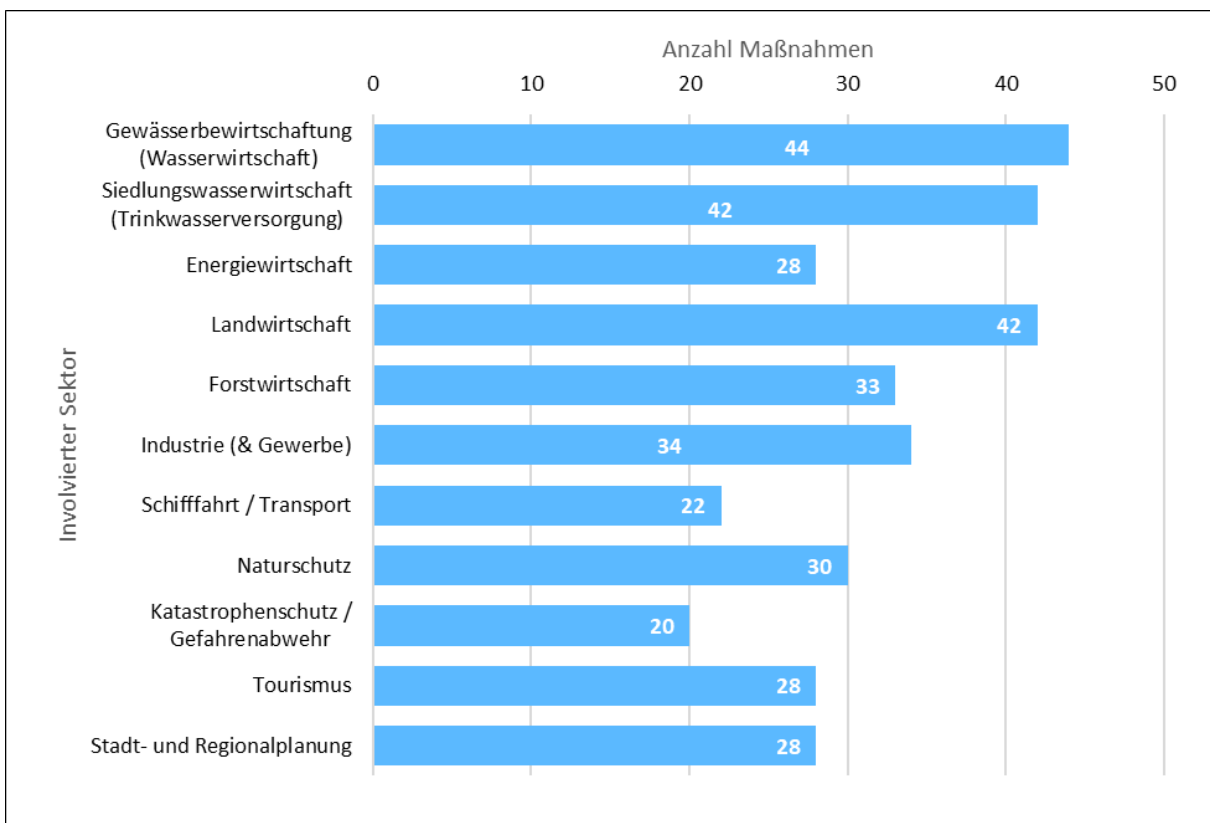
Eine tabellarische Zusammenfassung des Maßnahmenkatalogs stellt Tabelle 9 dar. Vom kompletten Umfang des Maßnahmenkatalogs werden in der Tabelle nur die Spalten *Maßnahme* und *Beschreibung* aufgenommen. Abbildungen 76 bis 78 fassen die Verteilung der Maßnahmen unter einigen weiteren im Katalog aufgenommenen Deskriptoren zusammen. Da Maßnahmen beispielsweise mehrere Sektoren involvieren werden sie in den Abbildungen oft mehrfach zugeordnet.

Abbildung 76: Anzahl Maßnahmen im Maßnahmenkatalog (n=62) nach Art der Maßnahme



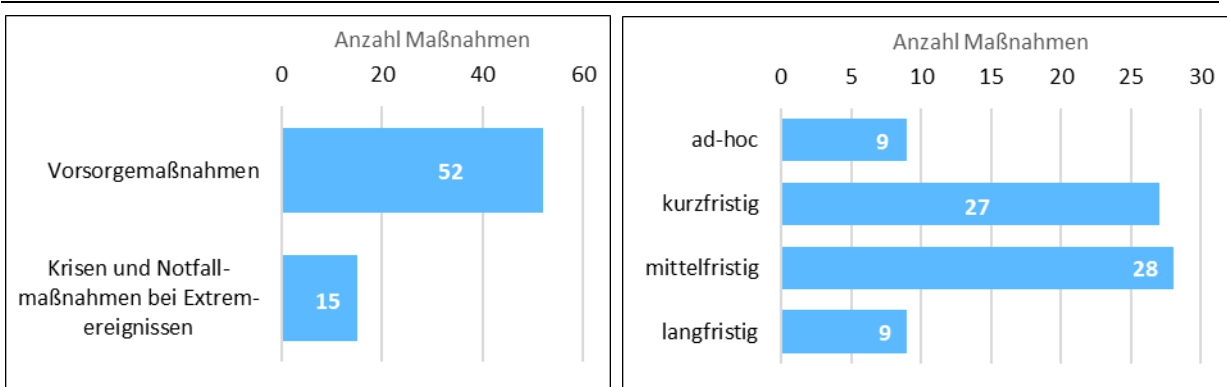
Quelle: eigene Darstellung, Ecologic Institut.

Abbildung 77: Anzahl Maßnahmen im Maßnahmenkatalog (n=62) nach involvierten Sektoren (federführend & beteiligt)



Quelle: eigene Darstellung, Ecologic Institut.

Abbildung 78: Überblick Maßnahmen nach Bezugsraum (links) und Umsetzungszeitrahmen (rechts)



Quelle: eigene Darstellung, Ecologic Institut.

Tabelle 9: Auswahl von potenziellen aus nationaler und internationaler Literatur entnommenen Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten

Maßnahme	Beschreibung
Angebotserweiterung in der Trinkwasserversorgung durch Anlagenerweiterung	Die Maßnahme hat das Ziel, durch technische Erweiterungen die Möglichkeiten der Wasserentnahmen zu steigern. Darunter fallen u.a. Reaktivierung alter Gewinnungsanlagen, Erstellung neuer Gewinnungsanlagen, Überprüfung der Bezugskapazitäten, Erkundung neuer Grundwasservorkommen, Ausbau der Versorgungssicherheit durch Notbrunnen und Entsalzungsanlagen (Inseln, salzhaltiges Grundwasser).
Anpassung der Wasserversorgungsinfrastruktur	<p>Die Anpassung der Wasserinfrastruktur kann in diversen Fällen eine sinnvolle Maßnahme sein. Bspw.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bei sinkenden Grundwasserspiegeln und einhergehender Verschlechterung der Rohwasserqualität sind die Wasserversorgungsanlagen zu optimieren, um eine ausreichende Trinkwasserqualität zu sichern. - Eine Zunahme des Spitzenwasserbedarfs erfordert ggf. größere Fassungs-, Aufbereitungs-, Transport- und Speicherkapazitäten, während eine Zunahme des maximalen Stundenbedarfs größere Wasserverteilungskapazitäten erforderlich machen kann. - Sowohl für mengenmäßige als auch qualitative Notfallsituationen ist die Möglichkeit einer redundanten Gewinnung und Aufbereitung von Trinkwasser zu empfehlen. - Durch flächendeckenden Grundwasserschutz wird die Option gesichert, weitere Entnahmestellen einzurichten. U.a. können tiefere Brunnen und die Steigerung der Pumpenleistung notwendig sein. - Ebenfalls kann die Schaffung größerer Speicherkapazitäten in Wassernetzen und -werken notwendig sein, z. B. durch Neubau oder Neudimensionierung von Hochbehältern.
Minimierung der Wasserverluste	Ein weiterer Ansatz kann sein, Wasserverluste zu reduzieren. Verluste entstehen im System durch reale und scheinbare Verluste. Zu den realen Verlusten zählen alle Leckagen an Behältern, im Rohrnetz und an Anschlüssen. Scheinbare Verluste werden durch Messfehler, betrieblichen Eigenbedarf (Spülen, Behälter reinigen) oder durch Wasserdiebstahl verursacht. Die konsequente Suche und Behebung von Leckagen im Netz sowie die kontinuierliche Erneuerung des Netzes bietet in Versorgungsnetzen mit hohen Verlustraten Wassereinsparpotenziale. U.a. sind ein Wasserverlustmonitoring und Netzinspektionen geeignet.
Ausbau der 4. Reinigungsstufe	Während Kläranlagen auch in den Dürrejahre Stickstoff und Phosphor in ausreichender Menge herausgefiltert haben, werden Spurenstoffe in Kläranlagen mit herkömmlicher Aufbereitungstechnik ohne vierte Reinigungsstufe generell nur unzureichend zurückgehalten. Dieses Problem wird in Dürrejahre (mit einer verminderten Verdünnung) noch verschärft, so dass erhöhte Konzentrationen erreicht werden. Der Ausbau der 4. Reinigungsstufe kann insbesondere an Gewässern mit einem hohen Anteil an Klarwasser und hoher Anfälligkeit für Niedrigwasser eine substantielle Verbesserung der Gewässerqualität darstellen. (Paetzel, 2021)

Maßnahme	Beschreibung
Anpassungen in Planung und Organisation der Wasserversorgung	Klimawandelgerechte Anpassung des betrieblichen Organisationsaufbaus und -ablaufs in Bezug auf Risiko- und Krisenmanagement und die zu erwartenden Veränderungen. Dazu gehört u.a. die Überarbeitung von Bedarfsprognosen/ Anpassungen bei der Erteilung wasserrechtlicher Bewilligungen (Wasserrechte) insbesondere die Integration angepasster Klimafaktoren und Spitzenfaktoren, die Erstellung von Notfallversorgungsplänen und ggf. die Festlegung von Quoten, Geboten und Verboten.
Schutz bestehender Wasserressourcen	Um die Verfügbarkeit von Wasser in ausreichender Menge und Qualität auch für die Zukunft zu gewährleisten, sind Maßnahmen zum Schutz bestehender Wasserressourcen zu ergreifen. Beispielsweise können Waldumbau oder beschränkte Rechte zum Verwenden von Düngern und Pflanzenschutzmitteln in Einzugsgebieten die Qualität und Quantität von für Trinkwasser bestimmten Wasserressourcen verbessern.
Dürremanagementpläne	Dürremanagementpläne stellen ein geeignetes Instrument für die Bereiche Planung, Überwachung und Umgang von Niedrigwassersituationen dar und unterstützen die politische Entscheidungsfindung zur Bekämpfung von Trockenheitsphasen. Dürremanagementpläne sind risikobasierte Strategien und politische Maßnahmen gegen Dürre, die auf allen Verwaltungsebenen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad entwickelt werden können. Ihr Ziel ist es, die mit dem Auftreten von Dürren verbundenen wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Risiken zu minimieren. Dürremanagementpläne umfassen Prävention (z. B. Frühwarnsysteme, Identifizierung von Gebieten, die für Dürren anfällig sind), strukturelle und nicht-strukturelle Schutzmaßnahmen (z. B. Definition geeigneter Praktiken der Landwirtschaft und der territorialen/städtischen Planung für dürreempfindliche Gebiete), Bereitschaft, Notfallmaßnahmen (z.B. Wassertanks und Trinkwasserverteilung, mobile Wasserreinigungsanlagen, sanitäre Einrichtungen), Wiederherstellung und Überprüfung.
Preisgestaltung Wasserabgaben	Die Wasserpreisgestaltung ist ein sehr effektives Managementinstrument zur Reduzierung des Wasserverbrauchs. Zahlreiche Umfragen und Studien haben gezeigt, dass Erhöhungen des Wasserpreises typischerweise zu einem Rückgang des Wasserverbrauchs führen. Die konkrete Preisgestaltung ist auf den jeweiligen Sektor anzupassen. Die Festlegung unterschiedlicher Tarifblöcke je nach genutzter Menge ist eine Möglichkeit, finanzielle Anreize zu schaffen, den Wasserverbrauch zu reduzieren. Eine dynamische Wasserpreisentwicklung abhängig von der Wasserknappheit stellt eine andere Möglichkeit der Preisgestaltung dar.
Dürrefrühwarnsystem	Aufbau eines Dürrefrühwarnsystems inklusive damit zusammenhängender Wissensvermittlung für Landwirt*innen und Entwicklung von entsprechender Software, bspw. Apps. Mithilfe eines Dürrefrühwarnsystems können Landwirt*innen ihr Management, wie der Berechnung oder der Aussaatzeiten, entsprechend anpassen und ihre Resilienz gegenüber Dürren erhöhen.

Maßnahme	Beschreibung
Technische Maßnahmen zur Senkung des Wasserverbrauchs in der Industrie	In bestimmten Industriesektoren kann die Wassernutzung durch gezielte Maßnahmen verringert und die Wasserwiederverwendung erhöht werden. Maßnahmen können auf das Recycling von Prozess- oder Kühlwasser, z.B. in der Papier- oder der Stahlindustrie, abzielen. Zudem können technische Innovationen die Schließung von Kühlwasserkreisläufen beschleunigen. Die Definition und Priorisierung entsprechender Maßnahmen kann durch den Einsatz von Umweltmanagementtools und -toolkits für das betriebliche Management auf freiwilliger Basis unterstützt werden, wie z. B. betriebliche Umweltpläne oder Umweltmanagementsysteme wie die Norm ISO 14001 und das EU-Umweltmanagement- und Auditsystem. Begleitende Vorschriften können Anreize schaffen, um entsprechende Maßnahmen zu implementieren.
Maßnahmen zur Reduzierung des Kühlwasserbedarfs	Aufgrund von Niedrigwasserständen kann es notwendig werden, die Leistung von mit Flusswasser gekühlten thermischen Kraftwerken zu reduzieren. Eine wichtige Anpassungsmaßnahme ist daher das Niedrigwassermanagement. Durch innovative technische Maßnahmen lässt sich die Menge des zur Energieerzeugung in Wärmekraftwerken benötigten Kühlwassers verringern bzw. die Effizienz der Wassernutzung erhöhen. Turmumlaufkühlung und Trockenkühlung sind alternative Kühloptionen, die den Wasserverbrauch im Vergleich zu herkömmlichen Durchlaufkühlsystemen erheblich reduzieren. Die Kühlung mit Umlauftürmen sieht immer noch eine Zufuhr von Wasser aus externen Quellen vor, aber die entnommene Menge ist um 95 % geringer als bei Kühlsystemen mit einmaliger Durchströmung, mit einer vergleichbaren Reduzierung der negativen Auswirkungen auf Ökosysteme. Das Wasser wird im System im Kreislauf gehalten, wobei es die Wärme aus dem Dampf, der zur Stromerzeugung verwendet wird, über einen Kondensator aufnimmt und durch Verdunstung in einem Kühlturm wieder abgibt. Da die Kühlung jedoch durch die Verdunstung eines Bruchteils des entnommenen Wassers erfolgt, kann die zirkulierende Nasskühlung auch unter Bedingungen starker Wasserknappheit problematisch sein. Problematisch ist an dieser Stelle auch die Temperatur des wiedereingeleiteten Wassers, welches zu thermischer „Verschmutzung“ führen kann. Bei der Trockenkühlung wird Luft als Wärmeübertragungsmedium verwendet und nicht die Verdunstung aus dem Verflüssigerkreislauf. Folglich sind die Wasserverluste minimal. Demgegenüber stehen geplante Notwasseranschlüsse für Kraftwerke bei Trockenperioden.
Preisgestaltung Wasserentnahmen	Im Energiesektor kann eine Verbesserung bestehender Bezahlssysteme für Wasserdienstleistungen (d.h. Wassernutzungsgebühren, Wasserdienstleistungsgebühren, Verschmutzungsgebühren und Einleitungsgebühren) für die Wassernutzung durch den Energie- und Bergbausektor mehrere Vorteile mit sich bringen. Zum einen kann eine effektive Anreizstruktur den Wasserverbrauch senken und Einsparpotenziale nutzen. Zum anderen kann eine klar kommunizierte Preisgestaltung sich positiv auf die Akzeptanz der Wassergovernance insgesamt auswirken und potenzielle intersektorale Konflikte, insbesondere zwischen Wasser- und Landwirtschaft abmildern.
Einrichtung von Frühwarnsystemen	Ein Frühwarnsystem erfasst und bewertet relevante Daten, ermöglicht eine Dürreüberwachung sowie Erkennung und Vorhersage der Ereignisse auf verschiedenen räumlichen Skalen, von lokalen und regionalen Aktivitäten bis hin zur internationalen Ebene. Dank der Bereitstellung rechtzeitiger und effektiver Informationen ermöglicht es den von außergewöhnlicher Trockenheit bedrohten Akteuren und Institutionen, Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung ihrer Risiken zu ergreifen und sich auf wirksame Reaktionen vorzubereiten.

Maßnahme	Beschreibung
Water Stewardship Konzept	Water Stewardship ist ein Konzept zur Einbeziehung verschiedener Stakeholder zur ganzheitlichen Bewirtschaftung von Wasserressourcen. Ziel ist es, Wirtschaftlichkeit mit ökologischer und sozialer Nachhaltigkeit zu vereinen. Hierbei spielt die Privatwirtschaft eine besondere Rolle. Entscheidend dabei ist der ökologische Rahmen des Flussgebietes, nicht die Belange des einzelnen Betriebs. Außerdem sind die Interessen, Bedürfnisse und Risiken aller Wassernutzer*innen innerhalb dieses Flussgebiets zu betrachten. Verschiedene Akteure aus den Bereichen Nichtregierungsorganisationen (z. B. WWF), Privatwirtschaft, Öffentlichkeit und Zivilgesellschaft sind Mitglieder im Bündnis Alliance for Water Stewardship (AWS). Die Allianz hat den internationalen Water Stewardship-Standard entwickelt, der für jede Art von Unternehmen in jeder Branche anwendbar und international anerkannt ist.
Professionelle Mediation im Konfliktfall	Konflikte um natürliche Ressourcen, z. B. Wasser, sind häufig von ungleichen Machtverhältnissen zwischen den beteiligten Akteuren sowie von komplexen Interessenlagen geprägt. Dies kann die Einbeziehung einer dritten Partei zur Konfliktbewältigung notwendig machen. Grundsätzlich beschreibt Mediation ein Verfahren, bei dem eine dritte Partei zwei oder mehr Parteien mit deren Einverständnis dabei unterstützt, einen Konflikt zu vermeiden, zu bewältigen oder zu lösen, indem sie ihnen hilft, eine für beide Seiten akzeptable Vereinbarung zu treffen (United Nations, 2012).
Fonds zur Finanzierung von Dürresilienzmaßnahmen	Die Einrichtung eines Fonds zur Finanzierung von Maßnahmen zur Stärkung der Resilienz gegenüber Dürre und Trockenheitsereignissen stellt ein geeignetes Mittel dar, um frühzeitig die Anpassungskapazität betroffener Stakeholder (insb. Landwirte) zu erhöhen. Landwirte können sich auf Zuwendungen aus dem Fonds bewerben, wobei die Ausschüttung der Gelder dann an die konkrete Umsetzung vorher abgestimmter Maßnahmen geknüpft ist. Der Fond kann durch die Regierung oder ein entsprechendes Verwaltungsorgan gespeist werden und hierbei vorrangig auf öffentliche Gelder zurückgreifen. Die Ausgestaltung der Förderrichtlinien kann eng von einem wissenschaftlichen Begleitkreis unterstützt werden, um die Effizienz der Förderung zu gewährleisten. Während sich dieses Instrument vorrangig an die Landwirtschaft richtet, ist auch eine Einbeziehung weiterer Sektoren, wie der Forstwirtschaft, möglich.
Nationales Dürreabkommen	Ein Nationales Dürreabkommen stellt ein Instrument dar, um einen nationalen Ansatz für die Vorbereitung auf Dürren, die Reaktion darauf und die Erholung von entsprechenden Ereignissen abzustimmen. Zentral ist hierbei die Festlegung von konkreten Verantwortlichkeiten für das Dürremanagement, sowohl auf nationaler als auch auf subnationaler Ebene und damit einhergehend die Einrichtung entsprechender Koordinationsmechanismen. Durch regelmäßige Berichtspflichten der zuständigen Behörden auf subnationaler Ebene kann ein Überblick der Maßnahmenumsetzung und des Maßnahmenerfolgs gegeben werden.
Innovationszentren für Dürresilienz	Durch die Einrichtung von Innovationszentren, die dem Wissensaustausch und der Entwicklung innovativer Strategien zur Dürrebekämpfung dienen, kann die Anpassungskapazität betroffener Stakeholder erhöht werden. Möglich ist, Stakeholder aus verschiedenen Sektoren zusammenzubringen, um sektorale Perspektiven auf die Dürreproblematik einzubringen und eine Sensibilisierung für die jeweiligen sektoralen Herausforderungen zu erzielen. Workshops und Fachseminare können eine Wissensvermittlung zum Thema Dürremanagement ermöglichen. Innovationszentren für Dürresilienz sind idealerweise dezentral, auf regionaler Ebene organisiert, um eine Einbindung in die jeweilige Region mit ihren spezifischen Anforderungen zu gewährleisten.

Maßnahme	Beschreibung
Kontrolle illegaler Entnahmen	<p>Illegale Entnahmen, d. h. solche ohne Genehmigung oder solche, die gegen eine erteilte Genehmigung verstoßen, können den Druck auf Wasserressourcen in Dürreperioden erhöhen. Aus diesem Grund hat die Europäische Kommission (2012) darauf hingewiesen, dass solche illegalen Entnahmen verstärkt in den Fokus eines ganzheitlichen Wasserressourcenmanagements gerückt werden müssen. Um die entsprechenden illegalen Entnahmen verfolgen zu können, ist jedoch die zuverlässige Identifizierung solcher Entnahmen notwendig, was mit den bestehenden behördlichen Mitteln kaum möglich ist. Es bedarf daher verstärkter Kontrollen sowie der Schaffung neuer Überwachungsmöglichkeiten, z. B. durch Fernerkundung.</p>
Steuerung des Verbraucher*innenverhaltens und Problembewusstseinsförderung (Training und Problembewusstseinsförderung)	<p>Durch die gezielte Beeinflussung des Verbraucher*innenverhaltens kann der Wasserverbrauch gesenkt werden. Eine Möglichkeit stellt hierbei eine Sensibilisierung der Verbraucher*innen für die Dürreproblematik dar. Konkrete Maßnahmen, um eine Sensibilisierung zu erzielen, umfassen ein Produktlabelling, das Aufschluss über den Wasserverbrauch von Lebensmitteln und Konsumgütern gibt oder auch gezielte Bildungsarbeit an Schulen oder über die sozialen Medien. Weitere Möglichkeiten stellen eine Subventionierung von wassereffizienten Produkten sowie einen Einfluss auf die Bepreisung wasserineffizienter Produkte dar.</p>
Erstellung von Wassernutzungshierarchien (Regeln und Kriterien zum Ausgleich von Nutzungskonflikten)	<p>Um im Fall von Dürresituationen Nutzungskonflikte eindeutig bearbeiten zu können, können festgelegte Wassernutzungshierarchien hilfreich sein, um den Entscheidungsträger*innen klare Handlungsleitlinien an die Hand zu geben. Die Wassernutzungshierarchie sollte im engen Austausch mit den beteiligten Akteur*innen erarbeitet werden und Wassernutzungsprioritäten für die beteiligten Sektoren definieren. Begleitende Mediationen (vgl. Maßnahme "Professionelle Mediation im Konfliktfall") können der Entstehung von Nutzungskonflikten schon während der Erarbeitung der Hierarchie vorbeugen.</p>
Systematische Planung der Wasserzuteilung	<p>Eine geeignete Zuteilung vorhandener Wasserressourcen z. B. auf Flussgebietsebene oder in anderen Bezugsräumen durch die zuständige Verwaltung auf subnationaler Ebene kann dazu beitragen, prognostizierte Nutzungskonflikte aufgrund der Wassermenge zu verhindern bzw. abzumildern. Konkret kann die Maßnahme als Vereinbarung über die Wasserzuteilung unter Beteiligung aller relevanten Sektoren geschlossen werden. Notwendig ist hierbei ein integrativer Politikansatz, der die Belange der relevanten Sektoren miteinbezieht, sowie das Vorhandensein von Daten zur Wasserverfügbarkeit und zum Verbrauch. Auf dieser Basis kann auch eine vorherige Priorisierung der Wassernutzung einzelner Sektoren vorgenommen werden.</p>
Bereitstellung und Integration von Daten und Modellen, inkl. Monitoring	<p>Der gebietspezifische Ausbau und die Weiterentwicklung der Überwachungsnetze und Monitoringprogramme als Grundlage für Trendanalysen und die Erstellung langfristiger Wasserdargebotsprognosen, um eine fundierte Abschätzung möglicher Wasserqualitäts- und quantitativänderungen vornehmen zu können. Dies beinhaltet den sektorenübergreifenden Austausch von Daten und Modellierungsergebnissen.</p>
Adaptives Talsperrenmanagement	<p>Adaptives Talsperrenmanagement bewirtschaftet die Stauräume unter Klimawandelbedingungen (u.a. Niedrigwasseraufhöhung) zeitlich und räumlich differenziert. Dies beinhaltet sowohl die Mengenbewirtschaftung als auch die daran gekoppelte Gütebewirtschaftung unter Berücksichtigung der multifunktionalen Ansprüche an Talsperren.</p>

Maßnahme	Beschreibung
Niedrigwassermanagement in Fließgewässern	In den Bewirtschaftungsplänen sind Niedrigwassersituationen zu berücksichtigen. Nutzungskonflikte für die Bewirtschaftung von Gewässern müssen im Vorfeld erkannt und prioritäre Nutzer*innen festgelegt werden. Einschränkungen sollten an definierte Schwellenwerte gebunden und in wasserrechtliche Bescheide aufgenommen werden. Bestehende Bescheide müssen evtl. angepasst werden. Vorhersagen zu Niedrigwasser und Wassertemperatur können zur Überwachung eingesetzt werden. Vorhersagen dienen auch dazu, die Öffentlichkeit und betroffene Nutzer*innen vorzuwarnen. Wenn kritische Werte überschritten werden, sind ggf. Nutzungsbeschränkungen einzuleiten.
Neue Normen und Bauvorschriften in Bezug auf den Wasserverbrauch von neuen/sanierten Gebäuden	Ein vielfältiges Paket weicher Anpassungsmaßnahmen kann für den Klimaschutz in der Stadt- und Bebauungsplanung als eine Art "Climateproofing" herangezogen werden. Beim Bauen können neue Standards und Vorschriften für die nachhaltige Gestaltung und den Bau neuer Gebäude eingeführt werden. Bauvorschriften sind das Regulierungsinstrument, das die Ressourcennutzung und andere Leistungsmerkmale von neuen und zu sanierenden Gebäuden festlegt. Es bezieht sich insbesondere auf Aspekte des Wasser- und Energiemanagements.
Installation von wassersparenden Armaturen von Wohn- und Geschäftsgebäuden	Wassersparende Armaturen sind Sanitärlösungen, die es ermöglichen, Wasser in Wohn- oder Geschäftsgebäuden zu sparen, indem sie den Wasserdurchfluss für bestimmte Anwendungen reduzieren. Beispiele für wassersparende Armaturen sind Wasserhahnperlatoren, Toiletten mit Wassersparspülungen und Duschköpfe mit geringem Durchfluss. Die Installation dieser Geräte kann durch Kennzeichnungssysteme oder ein Programm mit Vorrichtungsrabatten auf Tarife gefördert werden. Es ist erwiesen, dass diese Strategien zur Förderung wassersparender Armaturen in Kombination mit Kommunikationskampagnen zu einer Reduzierung des Wasserverbrauchs der Haushalte um 10 bis 30 Prozent führen können.
Wiedervernässung von Mooren und Revitalisierung von Auen	Die Wiedervernässung von entwässerten Moorkörpern verbessert den Wasserrückhalt in der Landschaft. Auch die Revitalisierung naturnaher Auen schafft neue Retentionsflächen und kann Habitatverlusten bei Abflussrückgängen entgegenwirken.
Ausweisung von Retentionsflächen/-räumen	Auen werden als Retentionszonen ausgewiesen und so raumplanerisch gesichert. In der Landes- und Regionalplanung können bereits Flächen, denen bestimmte Nutzungen zukommen sollen, als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiete ausgewiesen werden, aber das rechtliche Instrumentarium dazu muss noch weiterentwickelt werden.
Retentionsmaßnahmen und Flächenentsiegelung in Städten zur Nutzung von Versickerungspotenzialen und zur Regenwassernutzung	Retentionsmaßnahmen und Flächenentsiegelung in Städten können zur Nutzung von Versickerungspotenzialen genutzt werden. Außerdem können zentrale Retentionsmaßnahmen, z. B. Regenrückhaltebecken und Zisternen, auch für die Speicherung und Nutzung von Regenwasser eingesetzt werden.

Maßnahme	Beschreibung
Kommunale Flächennutzungs-entwicklung und Regionalplanung auf der Basis von Wasserversorgungskenngrößen	Verknüpfung von Wasserversorgungsplanung und Flächennutzungsplanung auf kommunaler Ebene. Auf der Basis von Annahmen und Szenarien können Wasserverwaltung, Raumplanung und Kommunalverwaltungen ihre Bemühungen zum Wasserressourcenschutz wirksam koordinieren und eine integrierte regionale Wasserbewirtschaftungsplanung praktizieren.
Reduzierte Bewässerung von Grünflächen	Bewässerungsplanung, aber auch ad-hoc Maßnahme, die auf eine klima-angepasste Bewässerung von Grün- und Erholungsflächen in Städten abzielt.
Wassersensible Stadt- und Freiraumplanung	Gesamtheit von Strategien und Gestaltungsansätzen zum nachhaltigen Umgang mit oberirdischen Abflüssen in der städtischen Wasserinfrastruktur im Sinne des Leitbildes wassersensible Stadtentwicklung. Dies umfasst die Maßnahmen zu zentralen und dezentralen Retentionsräumen sowie die systematische Förderung blau-grüner Infrastruktur, um Niederschlag in der Stadt zu halten und die Versickerung und Verdunstung von Regenwasser zu fördern.
Wassersparpläne	Pläne zur Wassereinsparung zielen darauf ab, den Wasserverbrauch zu begrenzen, den Verlust und die Verschwendung von Wasser zu reduzieren und die Effizienz der Wassernutzung zu erhöhen. Der Plan kann in Form von Richtlinien und Anforderungen zur Wassereinsparung für öffentliche Wasserversorger, Verbote oder Einschränkungen der Wassernutzung von Haushalten, Rationierungsprogramme für alle Wasserverbraucher, Bildungsprogramme oder spezielle Wassertarife vorgelegt werden.
Dürrekommunikation	Eine Dürrekommunikation kann sowohl ad-hoc im konkreten Ereignisfall eingesetzt werden als auch als längerfristige Vorsorgemaßnahme. Die meisten Länder sehen Dürren als Krisen, die Notfallmaßnahmen erfordern. Durch eine zukunftsgerichtete Kommunikation können die Risiken und Auswirkungen von Dürreereignissen reduziert werden. Um möglichst erfolgreich zu sein, sollte die Dürrekommunikation in das strategische Dürremanagement miteinbezogen werden und in enger Zusammenarbeit zwischen zuständigen Behörden, Vertreter*innen betroffener Sektoren und Kommunikationsexpert*innen entwickelt werden. Zudem sollte die Dürrekommunikation je nach Ziel- und Altersgruppe unterschiedliche Kommunikationsmittel umfassen.
Verwendung von Brauchwasser	Wiederverwendetes Wasser kann eine wertvolle Ressource sein. Von der Landschaftsgestaltung, der Stadtbegrünung und der Landwirtschaft bis hin zur Auffüllung von Flüssen und Seen und der Teilnutzung in Haushalten sind die möglichen Anwendungen für Brauchwasser vielfältig. Aus Gründen der Effizienz sollten Anlagen zur Wiederaufbereitung von Abwasser in der Nähe des Verwendungsortes liegen. Um die Nutzung von Brauchwasser zu unterstützen, könnte ein Austausch von Erfahrungen interessant sein, welcher beispielsweise durch die DWA oder aber eine Vereinigung zur Wasserwiederverwendung organisiert werden könnte (s. auch Kapitel 4).
Versicherungslösungen	Versicherungen, die im Dürrefall für Verluste aufkommen. Versicherungen könnten sich an Ernteauffällen, Niederschlagsmengen oder Dürreindizes orientieren und abhängig von der Schwere der Verluste Entschädigungen auszahlen. Landwirt*innen könnten darüber bspw. Futter für ihr Vieh kaufen. Nachhaltige Schäden oder die Aufgabe von Betrieben sollen dadurch verringert werden.

Maßnahme	Beschreibung
Finanzielle Anreize zur Steigerung der Bewässerungseffizienz	Die Modernisierung von Bewässerungstechnologien oder die Anwendung wassersparender Maßnahmen kann kontextabhängig zu bedeutenden Wassereinsparungen führen. Finanzielle Anreize für die Anwendung wassersparender Technik bzw. Maßnahmen, wie z. B. moderne Bewässerungstechnik und angepasste Anbaumaßnahmen, unterstützen Landwirte bei diesen Umstellungen, ohne dass sie dadurch signifikante Einkommensverluste erleiden. Anreize könnten z. B. Subventionen für den Kauf von effizienter Bewässerungstechnik, sein. Der Anteil, den die öffentliche Hand übernimmt, kann je nach Größe des landwirtschaftlichen Betriebs gestaffelt sein. (Bsp. Tunesien: 40, 50 und 60 Prozent Erstattungen der Beschaffungskosten für moderne Bewässerungstechnik für große, mittelgroße und kleine landwirtschaftliche Betriebe) Im Zusammenspiel mit einem Wassercent können diese Anreize eine starke Wirkung entfalten.
Verbindliche Messung der Wasserentnahmen	Die Messung der Wasserentnahmen in Industrie, Energie- und Landwirtschaft sowie für Trinkwasserentnahmen erhöht das Verbrauchsbewusstsein und ermöglicht die Einführung von Blocktarifen, die den Wasserbedarf reduzieren, indem sie höhere Tarife für Wasserentnahmen berechnen, die über einer festgelegten Mindestmenge liegen. Außerdem ermöglicht die Messung der Wasserentnahmen auch eine Anpassung der Verteilung des Wasserbedarfs, um Verbrauchsspitzen zu reduzieren und Engpässe in Trockenheitssituationen vorzubeugen. Die Messung der Wasserentnahmen kann verbindlich geregelt werden.
Notfall(vorsorge)plan und -management für vulnerable Infrastrukturen	Notfallpläne legen die Maßnahmen fest, welche im Falle eines Notfalls oder unvorhergesehenen Ereignisses ergriffen werden. Aus den Risikoanalysen der Wasserversorger ergeben sich unmittelbar Aussagen zur Versorgung im Notfall sowie in Zeiten mit angespannter Versorgungslage. Diese beinhaltet die Kategorisierung von Wasserressourcen nach ihrer Anfälligkeit für bestimmte Risiken. Beispielsweise können wichtige Leistungsindikatoren des Wassersystems festgelegt werden und Maßnahmen vereinbart werden, welcher der Wasserversorger ergreifen muss, um die Wasserversorgung zu gewährleisten und die wirtschaftlichen Auswirkungen abzumildern.
Maßnahmen zur Förderung der Grundwasserneubildung und des -dargebots	Durch den Rückhalt von Niederschlagswasser können Flächen sowohl in Ortslagen als auch in Außengebieten zur Grundwasserneubildung beitragen. Neugebildetes Grundwasser dient der Erhöhung des Grundwasserdargebots. Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche umfassen, u.a. Wiedervernässung von Feuchtgebieten, Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen, Verringerung der Flächenversiegelung, Erhöhung des Grünflächenanteils, Nutzung von Versickerungspotenzialen, Verbesserung der Bodenstruktur durch Vermeidung von Bodenverdichtungen und Stabilisierung des Porensystems, z. B. durch konservierende Bodenbearbeitung.
Steuerung von Grundwasserentnahmen (Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung)	Das ermittelte Grundwasserdargebot und -bedarf ist bei der Vergabe von Wasserrechten zu berücksichtigen. Es ist vermehrt zu prüfen, ob durch Vorgaben / Auflagen im Rahmen von wasserrechtlichen Erlaubnisverfahren zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels schon jetzt Rechnung getragen werden kann. Eine Maßnahme wäre beispielsweise die Steuerung von Grundwasserentnahmemengen abhängig vom Grundwasserstand durch die Festlegung von Grenzgrundwasserständen, die bei der Entnahme von Grundwasser zum Schutz der Ressource, aber auch zum Schutz grundwasserabhängiger Ökosysteme und setzungsempfindlicher Bausubstanz nicht unterschritten werden dürfen.

Maßnahme	Beschreibung
Neuverhandlung der Wasserzuteilungen	Die Befriedigung des Grundbedarfs an Wasser mit Vorrang für die Trinkwasserversorgung, aber ohne Vernachlässigung des Bedarfs in anderen Bereichen, erfordert eine Umverteilung der sehr begrenzten Wasserressourcen, die zur Verfügung stehen. Prioritäten der Wasserzuteilung haben weitere Konsequenzen, z. B. bei der Frage von Entschädigungen.
Planung der Wasserversorgungssicherheit	Der Water Reliability Plan koordiniert Projekte, um die Wasserinfrastruktur zu stärken, welche für mehr Redundanz sorgen und eine ununterbrochene Versorgung mit sicherem, hochwertigem Wasser gewährleisten. Der Plan beinhaltet aufeinander abgestimmte Projekte, welche die Infrastruktur ertüchtigen.
Ermittlung des Wasserdargebots- und bedarf	Um das Grund- und Oberflächenwasser nachhaltig bewirtschaften zu können, sind in regelmäßigen Abständen Wasserdargebot und -bedarf zu ermitteln und darauf aufbauend die Risiken für die Wasserversorgung abzuwägen. Dabei sind Analysen für die heutige Situation vorzunehmen und Projektionen für Wasserbedarfe und -dargebot während zukünftiger Trockenperioden zu entwickeln. Die Analyse sollte alle relevanten Wassernutzer*innen einer Region umfassen und sowohl klimatische Veränderungen als auch sozioökonomische Entwicklungen integrieren.
Forcierung der grundwasserschonenden Landwirtschaft (Qualität und Quantität)	Nitrat-belastetes Grundwasser ist nur eingeschränkt als Trinkwasser verwendbar. Es ist deshalb erforderlich bedarfsgerecht zu düngen. Neben der Einhaltung der Vorgaben der Düngeverordnung wird eine Stärkung der landwirtschaftlichen Beratung und die Förderung des ökologischen Landbaus angestrebt. Weitere Maßnahmen umfassen Precision Farming unter besonderer Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit und -qualität, Einsatz emissionsarmer Ausbringungstechniken für Düngemittel sowie angepasstes Düngemanagement.
Grundwassergovernance	Eine verantwortungsvolle Grundwassernutzung und -bewirtschaftung ist dringend geboten und entscheidend für eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung. Verschiedene Ansätze der Grundwassergovernance existieren, u.a. mit verschiedenen Möglichkeiten der landwirtschaftlichen Bewässerung mit Grundwasser und den damit verbundenen Risiken für Aquifere. Die Ausgestaltung einer nachhaltigen Grundwasser-Governance ist von lokalen, sozio-ökologischen und politischen Gegebenheiten abhängig. Als Voraussetzung müssen hinderliche Subventionen und Regulierungen abgebaut sowie Kapazitäten aufgebaut werden, um Instrumente, wie klare institutionelle Verantwortlichkeiten, Vergabe von Grundwasserrechten, Wasserpreise, Monitoring, etc., umzusetzen.
Technische Systeme zur Verteilung und Speicherung von Wasser	Technische und nicht-technische Maßnahmen zur Abflussverringern durch Erhöhung des natürlichen Rückhaltevermögens innerhalb des Einzugsgebiets. Verschiedene Formen der Retention können genutzt werden, z. B. zwischen Landschaft (Lebensraum), Boden, Oberflächenretention (Oberflächengewässer) und unterirdische Retention (Grundwasser). Oberflächenretention kann u.a. folgende Maßnahmen beinhalten: Regulierung des Wasserabflusses aus Teichen und kleinen Wasserreservoirs, Rückhaltung von Wasser in Entwässerungs- und Bewässerungssystemen, Regulierung des Wasserabflusses aus Grabensystemen und Erhöhung des Rückhaltes im Flusstal durch Reaktivierung natürlicher Überschwemmungsflächen oder des Baus von Poldern.

Maßnahme	Beschreibung
Meldepflichtige / genehmigungspflichtige Entnahme über private Brunnen	Eingeschränkte Wasserverfügbarkeit für Privathaushalte kann zur Zunahme privater Brunnen mit unkontrollierten Wasserentnahmen führen, welche nicht kontrollierbar sind, da nicht immer eine Genehmigung notwendig ist. Entnahme über private Brunnen sollte angezeigt/gepfligt/genehmigungspflichtig sein, damit die gesamten Entnahmemengen pro Grundwasserkörper erfasst werden können. Dafür wird eine gesetzliche Regelung benötigt.
Etablierung von Wassernutzer*innen-Komitees	Ein Wassernutzer*innen-Komitee kann hilfreich sein, um gemeinsame Ziele und Maßnahmen zu diskutieren und festzulegen. Das Komitee (oder Wasser-Parlament, Wasserbeirat) kann ein Forum zur Diskussion der Wassernutzung innerhalb eines Sektors oder zwischen verschiedenen Sektoren bieten. Durch die gemeinsamen Diskussionen können Komitees zu einer höheren kollektiven Disziplin bei der Einhaltung von Vorgaben z. B. zu Entnahmen beitragen. Unabhängige Akteure können als Mediatoren eingesetzt werden.
Wassertransfer zwischen Einzugsgebieten	Der Wassertransfer zwischen Einzugsgebieten bezieht sich auf Projekte, die Wasser von einem Einzugsgebiet in ein anderes über Kanäle, Tunnel, Brücken oder die Umleitung von Flüssen transportieren. In der Regel wird Wasser aus wasserreichen in wasserarme Gebiete geleitet, um Wasserknappheit zu verringern. Die Übertragung kann allein durch Schwerkraft oder durch Pumpsysteme erfolgen. Wasserumleitungsprojekte dieser Art werden schon seit Jahrhunderten eingesetzt, um Wasserknappheit durch Bevölkerungswachstum, wirtschaftliche Expansion oder zunehmende Bewässerung in der Landwirtschaft zu verringern. Projekte können dabei gleichzeitig zum Hochwasserschutz und zur Wasserkrafterzeugung beitragen.

3.3 Wasserversorgungskonzepte zur langfristigen Sicherstellung der Wasserversorgung

Autor*innen: Uschan T., Flörke, M.

Im vorausgegangenen Kapitel wurden Maßnahmen vorgestellt, die zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten beitragen können. Um eine Übernutzung von Wasserressourcen und damit das Entstehen solcher Nutzungskonflikte erst gar nicht entstehen zu lassen, werden zunehmend so genannte Wasserversorgungskonzepte (nachfolgend als WVK bezeichnet) entwickelt. Diese werden auch unter den Namen Konzept zur Anpassung an den Klimawandel, Leitbild, Masterplan oder Zukunftsplan Wasser geführt. Im Kern zielen diese Konzepte darauf ab, die Wasserversorgung gegenwärtig und in Zukunft zu sichern sowie „die Nutzung lokaler Wasserressourcen (Grund- und Oberflächenwasser) nachhaltig [zu] gestalten und deren Übernutzung [zu] verhindern [...]“ (BMUV, 2023, S. 99–100).

Viele Verantwortungsträger in Deutschland nehmen die letzten trockenen Jahre – wie bspw. das Jahr 2018 – zum Anlass, WVK zu entwickeln oder bestehende WVK zu aktualisieren, um den Folgen des Klimawandels zu begegnen, Schäden durch Nutzungskonflikte in Trockenphasen zu verhindern und die Wasserversorgung, insbesondere die öffentliche Wasserversorgung, zukünftig zu sichern. Die Entwicklung der WVK geht häufig auf politische Beschlüsse zurück: in Brandenburg bspw. auf einen Landtagsbeschluss und in Niedersachsen basierend auf einer Vereinbarung im Koalitionsvertrag. In Nordrhein-Westfalen ist die Erstellung von WVK durch Gemeinden in § 38 Abs. 3 LWG festgeschrieben. Auch die Nationale Wasserstrategie (NWS) sieht die Entwicklung von WVK als Möglichkeit an, zukünftige Herausforderungen proaktiv anzugehen (BMUV, 2023).

Um einen Überblick über existierende WVK, deren Methodiken sowie Maßnahmen zu erhalten, wurden in WADKlim bestehende WVK recherchiert und analysiert. Der Analyse zufolge wurden die WVK meist um das Jahr 2020 herum entwickelt und sind für verschiedene Verwaltungseinheiten vorhanden: für Bundesländer, Regierungsbezirke, Landkreise und kreisfreie Städte. Bei der Recherche zeigte sich auch, dass WVK nicht immer öffentlich zugänglich sind. Dies betrifft vor allem WVK von Landkreisen und kreisfreien Städten. Erschwerend kommt hinzu, dass aufgrund eines fehlenden zentralen Verzeichnisses nicht bekannt ist, ob für die betrachteten Regionen WVK existieren. Somit müssen diese für jede Region (und damit auch für jeden Landkreis und jede kreisfreie Stadt) einzeln recherchiert werden. Aus diesem Grund lag der Fokus der Recherche auf Ebene der Bundesländer. Landkreise und kreisfreie Städte wurden exemplarisch betrachtet.

Insgesamt konnten 27 WVK recherchiert werden: 17 für die Bundesländer¹⁶, 3 für Regierungsbezirke und 7 für Landreise und kreisfreie Städte. In 11 Bundesländern konnten veröffentlichte WVK gefunden werden. Für die Bundesländer Bremen, Nordrhein-Westfalen, Saarland, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein konnten Stand April 2023 keine auf die Wasserversorgung ausgerichteten landesweiten WVK gefunden werden. In Bremen und in Baden-Württemberg¹⁷ befinden sich WVK in der Entwicklungsphase, im Saarland soll laut Ausschreibungsunterlagen ein WVK im ersten Quartal 2023 fertiggestellt sein (Ministerium für Umwelt, Klima, Mobilität, Agrar und Verbraucherschutz Saarland, 2023; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2022; Theiner, 2021).

¹⁶ Da verschiedene Konzepte, die hier als WVK bezeichnet werden, auf die Sicherstellung der Wasserversorgung abzielen können, sind für einzelne Bundesländer mehrere WVK vorhanden.

¹⁷ In Baden-Württemberg gibt es bereits ein WVK. Aus diesem Grund wurde das Bundesland bei der obigen Auflistung nicht erwähnt.

3.3.1 Methodik der WVK

Um die Wasserversorgungssicherheit in den Verwaltungseinheiten zu beurteilen, greifen viele WVK auf eine Bilanzbetrachtung zurück. Das Wasserdargebot wird dem Wasserbedarf gegenübergestellt. Auf diese Weise ist eine Aussage darüber möglich, ob der Wasserbedarf durch das Wasserdargebot (nachhaltig) gedeckt werden kann oder ob eine Übernutzung der Wasserressourcen stattfindet. Dies erfolgt zunächst für die Ist-Situation und darauf aufbauend häufig auch für die Zukunft. Der Fokus der Bilanzbetrachtung liegt in den WVK primär auf dem Grundwasser.

Ist-Zustand

Die Bilanzbetrachtung für den Ist-Zustand erfolgt in den WVK auf Basis ähnlicher Methoden, die sich jedoch im Detail unterscheiden. Im WVK der Gemeinde Westerkappeln wird bspw. ein Ansatz gewählt, bei dem die durchschnittliche Grundwasserneubildung mit der Einzugsgebietsfläche multipliziert wird. Das Ergebnis entspricht der Grundwassermenge, die jährlich maximal in einem Einzugsgebiet für eine künstliche Entnahmen zur Verfügung steht. Hiervon werden anschließend die genehmigten bzw. tatsächlichen anthropogenen Grundwasserentnahmen subtrahiert. Ein positives Ergebnis bedeutet, dass die Wasserentnahmen kleiner sind als die jährlich neugebildete Grundwassermenge. Bei einem negativen Ergebnis findet eine nicht nachhaltige Nutzung des Grundwassers und somit eine Überbeanspruchung statt.

Im integralen Managementkonzept zur Bewirtschaftung von Wassermengen im Landkreis Nienburg/Weser (nachfolgend Managementkonzept im Landkreis Nienburg/Weser genannt) sowie im WVK Niedersachsen werden neben der Grundwasserneubildung für mittlere Verhältnisse zusätzlich auch die Grundwasserneubildung für trockene Verhältnisse (Trockenwetterbedingungen) berücksichtigt. So ergibt sich eine Spannbreite aus minimalem und maximalem Grundwasserdargebot. Mittels Abschlägen, u. a. zur Berücksichtigung der Bedarfe von Oberflächengewässern und von nicht nutzbarem versalzten Grundwasser, wird aus dem Grundwasserdargebot das minimal und maximal nutzbare Grundwasserdargebot¹⁸ ermittelt. Analog zum WVK der Gemeinde Westerkappeln, werden hiervon anschließend die Grundwasserentnahmen subtrahiert. Im WVK Niedersachsen sind dies die bestehenden Grundwasserrechte und im Managementkonzept Nienburg/Weser sowohl die bestehenden Grundwasserrechte als auch die tatsächlichen Grundwasserentnahmen. Bei der Nutzung bestehender Grundwasserechte wird vorsorgend davon ausgegangen, dass diese auch maximal ausgenutzt werden können.

In der Wasserversorgungsplanung Brandenburg wird die Methode der Grundwasservorratsprognose¹⁹ genutzt. Hierbei werden das Oberflächen- und das Grundwasser als eine naturgegebene Einheit verstanden. Die Berechnung des Grundwasserdargebotes erfolgt auf Basis einer kontrollfähigen regionalen Wasserbilanz, die anhand von mittleren gemessenen Abflüssen an einem festgelegten Pegel kontrolliert wird. Zunächst wird dazu die Gesamtwasserbilanz des oberirdischen Einzugsgebietes auf Basis des mittleren Abflusses und des ökohydrologischen Mindestabflusses ermittelt. Anschließend wird unter Berücksichtigung des Gesamtabflusses, sonstiger Zu- und Abflüsse, bekannter Grundwasserentnahmen und Grundwasseranreicherungen sowie nicht nutzbaren Grundwasseranteilen das nutzbare Grundwasserdargebot abgeleitet und ein Grundwasserauslastungsgrad zur Bewertung bestimmt.

¹⁸ Teil des Grundwasserdargebots, der mit technischen Mitteln entnehmbar ist und der für die Wasserversorgung unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen (z. B. aufgrund ökologischer Bedingungen) genutzt werden kann (DIN 4049-3:199) (Deutsches Institut für Normung e. V., 1994).

¹⁹ Entwickelt in (Meinert, 1987).

In der Wasserversorgungsbilanz Unterfranken wird zur Bewertung der Versorgungssicherheit neben den Grundwasserreserven zusätzlich auch die technische Infrastruktur betrachtet. Somit wird berücksichtigt, ob bei einem Ausfall einer Wassergewinnungsanlage die Wasserversorgung des Bilanzgebietes aufrechterhalten werden kann. Im Masterplan Wasser Berlin wird der Fokus auch auf Herausforderungen des Oberflächenwassers gelenkt, die sich durch bergbaubedingte Zuflussrückgänge von Spree und Havel ergeben.

Wie sichtbar wurde, stellt die Grundwasserneubildung häufig einen Teil des Bilanzterms des zukünftigen Grundwasserdargebotes dar und wird meist mit Modellen ermittelt. Im WVK der Gemeinde Westerkappeln wird diese durch ein externes Büro berechnet. Im Managementkonzept im Landkreis Nienburg/Weser sowie im WVK Niedersachsen wird mGROWA genutzt. Weitere eingesetzte Modelle sind bspw. J2000 (Thüringer Niedrigwasserstrategie) und ArcEGMO (Grundsatzkonzeption öffentliche Wasserversorgung 2030 für den Freistaat Sachsen). Im Masterplan Wasser Berlin wird auf bereits bestehende Berechnungen zurückgegriffen, die im Rahmen von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen für Bewilligungsverfahren erstellt worden sind.

Für den Bilanzterm des Grundwasserbedarfs werden je nach WVK sowohl die tatsächlichen Grundwasserentnahmen als auch die maximalen Grundwasserrechte angesetzt. Es wird jedoch nicht in allen WVK deutlich erläutert, welche Sektoren in den Grundwasserbedarfen berücksichtigt werden. Im Managementkonzept im Landkreis Nienburg/Weser wird dies hingegen sehr ausführlich dargestellt. Die hier berücksichtigten Sektoren sind Haushalte, Industrie, Landwirtschaft, Eigenbedarfe von Wasserversorgungsunternehmen und Abgaben außerhalb des Betrachtungsraums.

Zukunft

Aufbauend auf der Bewertung der Ist-Situation, findet in den WVK häufig eine Bewertung der zukünftigen Wasserversorgungssicherheit statt. Dies erfolgt meist für die nahe Zukunft (2030 bis 2060), wie in der Wasserversorgungsplanung Brandenburg, seltener auch für die ferne Zukunft (bis 2100), wie bspw. im WVK Niedersachsen. Es werden Prognosen des zukünftigen Grundwasserdargebotes und des Grundwasserbedarfs genutzt, um damit, ähnlich zu den beim Ist-Zustand beschriebenen Methoden, eine Bilanzbetrachtung durchzuführen.

Die zukünftige Grundwasserneubildung, die wiederum Teil des Bilanzterms des zukünftigen Grundwasserdargebotes ist, wird auch hier meist mit den oben beschriebenen Modellen ermittelt. In der Wasserversorgungsbilanz Unterfranken wird das zukünftige Grundwasserdargebot hingegen nicht mit einem Modell, sondern mit Abminderungsfaktoren bestimmt, mit denen das aktuell nutzbare Grundwasserdargebot reduziert wird. Auf diese Weise werden zukünftige Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt. Ähnlich wird im Masterplan Wasser Berlin vorgegangen, in dem die zukünftige Grundwasserneubildung um 20 % bis 50 % ggü. dem Ist-Zustand reduziert wird.

Der Bilanzterm des zukünftigen Grundwasserbedarfs setzt sich in den WVK aus den Bedarfen verschiedener Sektoren zusammen. Die meisten WVK konzentrieren sich auf den Grundwasserbedarf der öffentlichen Wasserversorgung. Für Haushalte und Kleingewerbe wird dieser überwiegend aus der demographischen Entwicklung und der Pro-Kopf-Wassernutzung der Bevölkerung abgeleitet, die je nach Annahme und betrachteter Region variieren. Darüber hinaus beziehen manche WVK Entwicklungen des Anschlussgrades der Bevölkerung an die öffentliche Wasserversorgung mit ein (z. B. im Zukunftskonzept Wasserversorgung im Landkreis Osnabrück). In einigen WVK werden zusätzlich auch Industrie- und Gewerbebetriebe sowie die Landwirtschaft berücksichtigt. Hierbei gibt es WVK, die nur die Versorgung über die öffentliche Wasserversor-

gung betrachten (u. a. Managementkonzepts im Landkreis Nienburg/Weser), während in anderen WVK auch Eigenförderungen dieser Sektoren berücksichtigt werden (WVK Niedersachsen). Teilweise geht aber auch nicht deutlich hervor, ob Eigengewinnungen berücksichtigt werden oder nicht.

Der zukünftige Grundwasserbedarf für Industrie- und Gewerbebetriebe sowie für die Landwirtschaft ist aufgrund vielfältiger Einflussfaktoren schwieriger zu prognostizieren als der der Haushalte. Im WVK Niedersachsen wird bspw. darauf hingewiesen, dass für die Nutzergruppe der Industriebetriebe „[...] in Ermangelung näherer Kenntnisse zu branchen- oder landesweiten Entwicklungen nahezu in allen Bereichen der Status quo als Entwicklung für die Zukunft fortgeschrieben werden [musste]“. Für den Bereich Landwirtschaft wurden Annahmen zum Grundwasserbedarf tierhaltender Betriebe und zur Feldeberegnung getroffen, für die teilweise eigene Methoden zur Abschätzung entwickelt wurden.

Im wasserwirtschaftlichen Fachplan Hessen wird bei Industrie- und Gewerbebetrieben davon ausgegangen, dass zukünftig keine signifikante Zunahme des Grundwasserbedarfs erfolgt und ein zum Beispiel durch die wirtschaftliche Entwicklung verursachter zusätzlicher Wasserbedarf durch eine verbesserte Wassereffizienz der Betriebe kompensiert werden kann. Ein zusätzlicher Grundwasserbedarf zur Beregnung infolge von Klimaauswirkungen wird hier auf Basis von Projektionen ermittelt. Im Managementkonzept im Landkreis Nienburg/Weser wird der zukünftige Bedarf für die Beregnung mit einer mit Landwirten abgestimmten Methode prognostiziert. Im selben Konzept werden für Industrie- und Gewerbebetriebe zwei Prognosen genutzt, die vom Jahr 2019 ausgehend einen sinkenden und einen steigenden Grundwasserbedarf aufweisen. Der Eigenbedarf von Wasserversorgungsunternehmen findet hier Berücksichtigung, indem der prozentuale Anteil des Eigenbedarfs von 2019 angepasst und auf die prognostizierten Wasserabgaben angewendet wird.

Unabhängig von den dargestellten Methoden und Annahmen zur zukünftigen Entwicklung, schreiben viele WVK den Wasserversorgungsunternehmen eine wichtige Stellung bei der Prognose der zukünftigen Grundwassernutzung zu, da diese detaillierte Informationen über den Grundwasserbedarf in ihrem Versorgungsgebiet besitzen (u. a. in der Wasserversorgungsplanung Brandenburg und in der Grundsatzkonzeption öffentliche Wasserversorgung 2030 für den Freistaat Sachsen).

Weitere Ansätze

Wie sichtbar wurde, unterscheidet sich die Vorgehensweise bei der Bilanzbetrachtung je nach WVK mehr oder weniger. Es existieren aber auch WVK, die keine Bilanzbetrachtung nutzen. So werden bspw. in der Strategie zum Umgang mit Wassermangel in Baden-Württemberg Auswirkungen von Wasserknappheit auf einzelne Akteure aufgezeigt und Handlungsempfehlungen unabhängig von einer Bilanz ausgesprochen. Auch im Bericht der Expertenkommission Wasserversorgung in Bayern werden unabhängig von einer Bilanzbetrachtung Gestaltungsvorschläge für eine zukunftssichere Trinkwasserversorgung entwickelt. In den Wasserversorgungskonzepten der Städte Oberhausen und Mülheim an der Ruhr wird das Grundwasserangebot und der Grundwasserbedarf separat betrachtet, ohne eine Bilanz zu bilden. Die Methode im Wasserversorgungskonzept des Landkreis Diepholz basiert auf einer Stakeholderbefragung und -beteiligung. Hier wurden u. a. Wasserversorgungsunternehmen, die Landwirtschaftskammer und Industrie- und Gewerbebetriebe nach deren möglichen zukünftigen Wasserentnahmen befragt, um zukünftige Konfliktfelder aufzeigen zu können.

3.3.2 Maßnahmen

Zur langfristigen Sicherung der Wasserversorgung und zur Etablierung einer nachhaltigen Wasserbewirtschaftung wird in den WVK auf vielfältige Maßnahmen zurückgegriffen. Nachfolgend werden einiger dieser Maßnahmen stellvertretend für das große Maßnahmenspektrum aufgelistet. Die Maßnahmen können grob in vier Kategorien unterteilt werden: *Anpassung von Infrastruktur, Erhöhung des verfügbaren Wasserdargebots, regulatorische Maßnahmen und Schließen von Datenlücken*. Eine detaillierte Beschreibung und Charakterisierung der WVK und der eingesetzten Maßnahmen wird auf die im Projekt erstellte Datenbank zu Wasserversorgungskonzepten verwiesen²⁰.

Die *Anpassung von Infrastruktur* zielt darauf ab, die Versorgungssicherheit durch die Schaffung einer redundanten und resilienten Wasserversorgung zu erhöhen. Vorgeschlagene Maßnahmen sind u. a. der Ausbau und die Vernetzung bestehender Fernleitungsnetze, der Zusammenschluss von WVU zu Versorgungsverbänden sowie die Wiederinbetriebnahme stillgelegter Wasserwerke. Darüber hinaus wird zur Sicherstellung der Wasserqualität der Ausbau von Kläranlagen mit der 4. Reinigungsstufe zur verbesserten Spurenstoffentfernung empfohlen.

Maßnahmen, die auf die *Erhöhung des verfügbaren Wasserdargebots* abzielen sind bspw. die Reduzierung von Flächenversiegelung, die Förderung der Niederschlagswasserversickerung sowie der Wasserrückhalt in der Fläche und in der Stadt z. B. durch die Umsetzung der so genannten „Schwammstädte“ oder der wassersensiblen Stadtentwicklung. Auf landwirtschaftlichen Flächen kann durch eine nachhaltige Bodenpflege die Infiltration von Wasser verbessert werden. An geeigneten Stellen wird auch eine Anhebung der Stauhöhe in Wasserspeichern vorgeschlagen, um ein größeres Wasservolumen speichern zu können.

Mittels *regulatorischer Maßnahmen* können Vorgaben gemacht werden, die bspw. eine Ausweitung von Trinkwasservorranggebieten vorsehen, eine Maßnahmenumsetzung finanziell unterstützen oder eine Vulnerabilitätsanalyse durch WVU einfordern. Darüber hinaus kann ggf. die Höhe von Wasserentnahmen kurzfristig mittels Allgemeinverfügungen begrenzt werden.

In vielen WVK wird auf *Datenlücken* hingewiesen, die zur Verbesserung der Analysen geschlossen werden müssen. Zum einen soll eine bessere Datenbasis vor allem der zur Bewässerung in der Landwirtschaft eingesetzten Wassermengen geschaffen werden. Zum anderen sind für Prognosen zukünftiger Wassernutzungen sektor- und regionalspezifische Wassernutzungsdaten zu erheben. Die Daten sollten dabei behördenübergreifend verarbeitet werden. Auf Basis geeigneter Messnetze könnten Frühwarnsysteme aufgebaut werden, die bei Grundwasserabsenkungen eine Warnung ausgeben (Ampelsystem). Auch sollten existierende Daten der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, um die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen von Wasserbehörden o. Ä. zu ermöglichen.

Der Umfang an Maßnahmen ist in den WVK sehr unterschiedlich. Über die Hälfte der WVK enthält eine Auflistung von mehr als 10 Maßnahmen. In 11 WVK werden besonders umfangreiche Maßnahmensammlungen zur Schaffung einer zukunftsfähigen Wasserversorgung zur Verfügung gestellt, u. a. im Zukunftskonzept Wasserversorgung im Landkreis Osnabrück, im Leitbild für ein Integriertes Wasserressourcen-Management Rhein-Main, im Masterplan Wasser Berlin und im Bericht der Expertenkommission Wasserversorgung in Bayern.

Allerdings weisen die Maßnahmen in etwa zwei Drittel der WVK einen allgemeinen und unkonkreten Charakter auf und können eher als allgemeine Handlungsempfehlungen verstanden werden. Diese sind von den Entscheidungsträgern vor Ort auf Eignung zu prüfen und an die Gegebenheiten anzupassen. In dieser Hinsicht weisen das WVK Niedersachsen und der Masterplan

²⁰ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/extremereignisse/niedrigwassertrockenheit>

Wasser Berlin darauf hin, dass keine Vorgaben für Einzelvorhaben ausgesprochen werden. Vielmehr dienen diese WVK primär als übergeordnete Informations- und Planungsgrundlage und sind als Rahmenkonzeption für aktuelle und zukünftige Maßnahmen sowie als Anstoß zur Auseinandersetzung mit zukünftigen Entwicklungen zu verstehen. WVK mit konkreter ausformulierten Maßnahmen sind bspw. der Zukunftsplan Wasser in Hessen und das WVK des Landkreises Diepholz. Das Integrale Managementkonzept zur Bewirtschaftung von Wassermengen im Landkreis Nienburg/Weser gibt Maßnahmen für die ferne Zukunft weitgehend unabhängig von zukünftigen Entwicklungen an, da die Unsicherheiten der Prognosen bis zu diesem Zeitpunkt als zu groß für eine spezifische Maßnahmenentwicklung eingeschätzt werden.

3.3.3 Vorrang von Wassernutzungen

Sollte es aufgrund von Wetterextremen oder einer ausgefallenen Infrastruktur wider Erwarten zu Wassermangellagen kommen, müssen in den betroffenen Regionen die vorhandenen Wasserressourcen aufgeteilt werden. Hierbei ist zu klären, welche Nutzergruppen (Bevölkerung, Industrie, Landwirtschaft etc.) priorisiert mit Wasser versorgt werden und welche nur nachrangig. In § 50 Abs. 1 WHG ist die öffentliche Wasserversorgung als eine Aufgabe der Daseinsvorsorge definiert. Hierbei genießt diese eine Vorrangstellung gegenüber anderen Wassernutzungen (LAWA, 2020). Es wird vorausgesetzt, dass dieser Vorrang auch bei vermehrten Nutzungskonflikten beachtet wird (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, 2017).

Für Situationen, in denen eine Priorisierung bestimmter Nutzungsformen erforderlich ist (z. B. während langer Trockenheit mit einer Verknappung der nutzbaren Wasserressource), enthält die Mehrheit der WVK keine konkreten Angaben zur Priorisierung. In WVK, in denen Aussagen zur Priorisierung getroffen werden, wird der öffentlichen Wasserversorgung die höchste Priorität eingeräumt. Hierbei können zwei Fälle unterschieden werden. Im ersten Fall wird davon ausgegangen, dass die vorhandenen (gesetzlichen) Regelungen ausreichend sind und es keiner weiteren Priorisierung bedarf. Dies ist bspw. im WVK Niedersachsen der Fall:

„Der öffentlichen Wasserversorgung wird über das WHG ein Vorrang im Rahmen des Wohls der Allgemeinheit zugewiesen. Es erscheint nicht erforderlich, über diese gesetzlich getroffenen Festlegungen hinaus einen ‚Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung‘ auch durch das Landesgesetz explizit festzuschreiben. Ein echter Zusatznutzen, etwa im Sinne einer weiteren Stärkung der Position der öffentlichen Wasserversorger, ist hierin nicht zu sehen“ (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2022).

Im zweiten Fall wird in den WVK auf weitere, über das WHG hinausgehende Regelungen verwiesen. Hierbei wird fast immer auf die Landeswassergesetze Bezug genommen. In der Grundsatzkonzeption öffentliche Wasserversorgung für den Freistaat Sachsen wird auf § 39 Abs. 2 S. 2 des SächsWG verwiesen, wonach die öffentliche Wasserversorgung Vorrang vor anderen Nutzungen aus dem Grundwasser erhält. Gleiches gilt für die Wasserversorgungsplanung Brandenburg, die sich auf den Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung aus dem Grundwasser durch einen Verweis auf § 54 Abs. 2 des BbgWG bezieht. Neben diesen Vorrangregelungen ist in einigen Landeswassergesetzen auch das Zusammentreffen mehrerer Anträge auf Benutzung geregelt, wenn diese sich nicht nebeneinander ausüben lassen. Eine Übersicht über den Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung und über die Regelung beim Zusammentreffen von Anträgen befindet sich in Anhang B.

In den WVK mit Aussagen zur Priorisierung werden keine Vorrangregelungen für andere Nutzergruppen außer der öffentlichen Wasserversorgung angesprochen. Im sächsischen Erlass zur Grundwasserbewirtschaftung heißt es: „Über den Vorrang der öffentlichen Wasserversorgung hinaus kann keine allgemeine Priorisierung von Nutzungen vorgegeben werden“ (Sächsische

Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft, 2022). In diesem WVK wird ferner darauf hingewiesen, dass bei Nutzungskonflikten Einzelfallentscheidungen notwendig sind. Dafür ist im WVK eine Aufzählung von Kriterien zur Priorisierung enthalten, die größtenteils den Vorgaben des sächsischen Wassergesetzes entspricht (siehe Anhangsband, Anhang B).

3.3.4 Diskussion und offene Fragen

Basierend auf den zuvor genannten Erkenntnissen und einem im November 2022 in Berlin mit Expert*innen durchgeführten Workshop werden im Nachfolgenden offene Fragen zum Thema WVK sowie Priorisierung der Wassernutzung diskutiert und Weiterentwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Wie oben sichtbar wurde, sind die WVK vorwiegend auf definierte Bilanzräume zugeschnitten, wodurch Gegebenheiten vor Ort bestmöglich erfasst werden können. Bei einer Betrachtung auf Bundesebene wird hingegen deutlich, wie strukturell und inhaltlich heterogen die WVK aufgebaut sind. Sie enthalten unterschiedliche Methoden, mit denen die aktuelle und die zukünftige Versorgungssicherheit bewertet wird (verschiedene Eingangsdaten, Modelle, Bilanzaufstellungen, berücksichtigte Wassernutzungen etc.). Dies wird durch einen fehlenden bundeseinheitlichen Standard und zum anderen durch eine inhomogene Datenlage in den verschiedenen Bundesländern und Verwaltungseinheiten verstärkt.

Um eine Vergleichbarkeit sowohl der WVK als auch der Ergebnisse über verschiedene Untersuchungsgebiete und Bundeslandgrenzen hinweg zu ermöglichen, ist ein Standard zu entwickeln, auf dem zukünftige WVK aufbauen sollten. Für jedes Untersuchungsgebiet sollte eine methodisch klar definierte und einheitliche Wasserbilanz erarbeitet werden. Notfalllagen (z. B. über einen Stress-Test) und Szenarien zukünftiger Entwicklungen sind ebenfalls zu berücksichtigen. Auch sollte genügend Raum für Anpassungen an die Vielfältigkeit der Wasserversorgungssysteme zur Verfügung stehen. Ein bundesweit einheitlicher Standard wird in der NWS (Aktion 47) gefordert. Dieser soll gemeinsam mit den Ländern erarbeitet werden und bereits existierende Konzepte berücksichtigen (BMUV, 2023). Ein solcher Standard könnte u. a. in Form einer LAWA-Arbeitshilfe hergestellt werden. Ein Beispiel für einen bundeslandweiten Standard ist in Nordrhein-Westfalen zu finden. Hier wird durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz der Aufbau und die Methodik der zu erstellenden WVK vorgegeben und anhand von Beispielen und Hinweisen erläutert²¹.

In einem solchen Standard sollten auch die in den WVK zu berücksichtigenden Wassernutzungen – wie Haushalte, Industrie und Gewerbe, Landwirtschaft etc. – definiert werden. Denn nicht aus allen WVK geht hervor, welche Wassernutzungen zur Bewertung der Versorgungssicherheit betrachtet werden. Ferner sind neben der öffentlichen auch die nichtöffentliche Wassernutzung (Eigenversorgung von Industrie, Gewerbe, Kraftwerke etc.), erteilte Wasserrechte sowie Oberflächenwasserentnahmen zu berücksichtigen, da nur so ein vollständiges Bild der Wassernutzung eines Untersuchungsgebietes geschaffen werden kann. Die Wassernutzung sollte hierbei nicht nur für administrative Strukturen, sondern unbedingt auch für hydrologische und hydrogeologische Einheiten betrachtet werden, da verschiedene WVU aus denselben Aquiferen Wasser beziehen können. Dies fände bei der Betrachtung administrativer Strukturen keine Berücksichtigung.

²¹ Verfügbar unter: www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/wasserversorgungstrinkwasser/wasserversorgungskonzept

Letztendlich könnte auch das Wissen aus bestehenden WVK die Entwicklung neuer WVK begünstigen. Hierzu ist die Zugänglichkeit zu bestehenden WVK zu verbessern, bspw. in Form einer zentralen Anlaufstelle, in der deutschlandweit WVK abgerufen werden können. Aktuell sind viele WVK nur mittels aufwendiger Recherche, auf verschiedenen Plattformen und häufig nicht flächendeckend auffindbar.

„Für den vorausschauenden planerischen Umgang mit Wassernutzungskonflikten bedarf es zunächst verlässlicher Grundlagen, d. h. eine solide Wissensbasis durch zielgerichtetes Monitoring des gesamten Wasserhaushalts und der Auswirkungen des Klimawandels darauf [...]“ (BMUV, 2023, p. 23). Dieses Monitoring ist speziell bei Eigengewinnungen und landwirtschaftlichen Wassernutzungen notwendig, da im Gegensatz zu öffentlichen Wassernutzungen die Höhe der Entnahmen dieser Nutzergruppen meist nicht ausreichend genau bekannt ist. Hinzu kommt, dass nach § 46 Abs. 1 WHG Grundwasserentnahmen zur Eigenversorgung von landwirtschaftlichen Hofbetrieben oder für das Tränken von Vieh außerhalb des Hofbetriebes keine Erlaubnis oder Bewilligung bedürfen, solange nachteilige Auswirkungen auf den Wasserhaushalt auszuschließen sind. Aus den genannten Gründen sollte eine ausgeweitete Datenerhebung stattfinden, bspw. mittels digitaler Wassermessung. Ein derartiges Konzept wird zurzeit im WVK des Landkreis Diepholz an zwei Förderstandorten erprobt. Darüber hinaus muss auch die Einhaltung der wasserrechtlich genehmigten Fördermengen kontrolliert werden, um unzulässigen Mehrentnahmen entgegenzuwirken.

Während des Workshops wurde auch eine verstärkte Berücksichtigung des Themas Wasserwiederverwendung in den WVK gefordert. In weniger als der Hälfte der recherchierten WVK wird die Wasserwiederverwendung erwähnt. In etwa einem Drittel davon wird diese nicht empfohlen, u. a. im WVK Niedersachsen, wo diese nach mehrjährigem Einsatz zur Grundwasseranreicherung in Waldgebieten in der Region um Wolfsburg und Gifhorn aufgrund qualitativer Aspekte eingestellt wurde. Im Gesamtkonzept zur Anpassung an den Klimawandel im Politikfeld Wasser in Brandenburg wird darauf hingewiesen, dass zuerst die Verordnung zu Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung (Verordnung (EU) 2020/741)²² in nationales Recht überführt werden muss, bevor derartige Maßnahmen ausgearbeitet werden können. In zwei Dritteln der WVK mit Aussagen zur Wasserwiederverwendung wird diese hingegen als mögliche Option genannt, um bspw. das nutzbare Wasserdargebot durch Versickerung von entsprechend gereinigtem Abwasser zu erhöhen (s. Niedrigwassermanagement zur Steuerung von Grundwasserentnahmen in Unterfranken). Zur Einordnung des Potenzials der Wasserwiederverwendung im urbanen Raum wird auf Kapitel 4 verwiesen.

Ferner gilt es zu klären, wie eine regional zu treffende Priorisierungsentscheidung – auch abseits der öffentlichen Wasserversorgung – bei Wassermangellagen ausgestaltet und mit geltendem Recht in Einklang gebracht werden kann. Hierfür ist eine transparente und bundesweit einheitliche Vorgehensweise zu schaffen, wie diese in der NWS gefordert wird (BMUV, 2023). Anschließend gilt es zu klären, wie eine solche Priorisierung auf infrastruktureller Ebene umgesetzt werden könnte, da das Wasser aus dem öffentlichen Versorgungsnetz nicht nur als Trinkwasser von der Bevölkerung genutzt wird. Zum einen wird es u. a. zur Bewässerung von Gärten oder zu Reinigungszwecken eingesetzt, zum anderen nutzt das Kleingewerbe (Arztpraxen, Bäckereien etc.) dieses Wasser, welches über Hauszähler zusammen mit privaten Haushalten abgerechnet wird. Eine Abkoppelung des Kleingewerbes vom Versorgungsnetz ohne gleichzeitige Abkopplung privater Haushalte ist nicht überall möglich.

²² Anmerkung der Autoren: Die Verordnung (EU) 2020/741 des Europäischen Parlaments vom 25. Mai 2020 gilt ab dem 26. Juni 2023 (Europäisches Parlament, 2020).

3.4 Entwicklung eines Konzepts für die Initiierung von regionalen Wasserbeiräten

Autor*innen: Tröltzsch, J, Bueb, B., Stein, U., Vidaurre, R., Dworak, T.

Im Rahmen des Nationalen Wasserdialogs (2018-2020) wurde die Einrichtung regionaler Wasserbeiräte als ein Instrument zum Umgang mit wasserbezogenen Nutzungskonflikten diskutiert. Die Trockenheitsereignisse der letzten Jahre zeigen, dass ein Austausch zwischen Akteuren verschiedener Sektoren notwendig ist, um die Fragen des Wassermanagements zu behandeln. Darüber hinaus sind Problemlagen und Ursachen regional- und lokalspezifisch. Maßnahmen müssen gemeinsam auf der relevanten Ebene diskutiert und umgesetzt werden.

Wasserbeiräte können dazu dienen, Vertreter*innen wasserrelevanter Sektoren zusammenzubringen und durch einen intersektoralen Austausch zur Vermeidung von Wassernutzungskonflikten beizutragen. Hierzu wurden im WADKlim-Projekt vorhandene Koordinationsgremien v.a. in wasserbezogenen Sektoren identifiziert und analysiert sowie Empfehlungen zur Initiierung von Wasserbeiräten erarbeitet.

Wasserbeiräte werden in WADKlim als Gremien definiert, welche die Koordination zwischen verschiedenen wassernutzenden Sektoren stärken. Sie dienen dem Austausch und der Zusammenarbeit zu regionalen Wasserbedarfen und können die Vereinbarung strategischer Ziele oder Maßnahmen unterstützen und regionale Wasserverteilungen empfehlen. Es wird davon ausgegangen, dass dadurch ein Ausgleich zwischen den Interessen von wassernutzenden Sektoren unterstützt wird und letztlich Wassernutzungskonflikte vermieden oder gemindert werden können. Wasserbeiräte haben eine beratende Funktion und unterstützen die Entscheidungsprozesse der Wasserbehörden. Wasserbeiräte sind auf lokaler oder regionaler Ebene angelegt. Darunter fallen u.a. Wassertische, Wasserforen oder Wassernetzwerke.

In diesem Kapitel werden die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse der Analyse bestehender Austauschgremien, der erarbeiteten Empfehlungen zur Initiierung von Wasserbeiräten und der Diskussionen in den Fallstudienregionen dargestellt.

3.4.1 Vorgehensweise

Die Analyse von Wasserbeiräten begann mit der Untersuchung bestehender Beiräte und deren Ausgestaltungsvarianten. Es wurden bestehende Beiräte in Deutschland, sowie in anderen Ländern analysiert. Darauf aufbauend wurden Empfehlungen und Vorschläge für die Initiierung von Wasserbeiräten erarbeitet. Diese Empfehlungen und Vorschläge wurden in regionalen Fallstudien in Stakeholderworkshops hinsichtlich ihrer Praxisrelevanz diskutiert. Die Workshops haben außerdem einen Austausch zwischen den zu beteiligenden regionalen Stakeholdern angestoßen und dienten dazu, Möglichkeiten auszuloten, wie ein Wasserbeirat in der jeweiligen Region ausgestaltet werden könnte. Anschließend wurden die Empfehlungen auf Basis der Rückmeldungen und Ideen aus den Workshops weiterentwickelt und konsolidiert. Das methodische Vorgehen zur Analyse von Wasserbeiräten ist in Abbildung 79 dargestellt.

Abbildung 79: Methodisches Vorgehen zur Analyse von Wasserbeiräten



Quelle: Eigene Darstellung, Ecologic Institut

Die Analyse der bestehenden Austauschgremien und die Empfehlungen zur Initiierung von Wasserbeiräten wurden in zwei separaten Kurzpapieren aufbereitet.

In einem ersten Schritt wurden elf Austauschgremien basierend auf einer Literatur- und Webrecherche sowie ausgewählten Interviews analysiert. Die Auswertung umfasst vor allem Gremien mit Bezug zum Wassersektor, aber auch einige Beispiele aus anderen Sektoren, z. B. Jagdbeiräte und Naturschutzbeiräte. Der Fokus ist auf Beiräten in Deutschland. Es wurden aber ebenfalls Beispiele aus anderen Staaten einbezogen. Die Austauschgremien wurden nach verschiedenen Kriterien ausgewertet, u.a. Zielsetzung, zeitlicher Fokus, rechtliche Rahmenbedingungen und Finanzierung.

Eine Übersicht der untersuchten Gremien findet sich in der folgenden Tabelle 10.

Tabelle 10: Übersicht untersuchte intersektorale Koordinationsgremien

Untersuchte Koordinationsgremien	Ebene	Beschreibung
Netzwerke Wasser 2.0 in Niedersachsen	Landkreis	Regionale Stakeholder-Netzwerke zur effektiven Anpassung an zunehmender Trockenheit in ländlichen Räumen unter Berücksichtigung von Vulnerabilitäts- und Adaptionanalysen und zur Vernetzung der jeweiligen örtlichen „Wasser- und Boden-Stakeholder“
Kulturlandschaftsverband „Obere Wipperau“	Interkommunal	Transdisziplinäre Kooperationsplattform um Kommunikationsprozesse zwischen Land-, Forst- und Wasserwirtschaft, Naturschutz und Politik zu unterstützen und Synergien und Konflikte offenzulegen.
AG Flussgebietsbewirtschaftung Spree, Schwarze Elster und Lausitzer Neiße	Flusseinzugsgebiets- und länderübergreifend	Wasserwirtschaftliche Fragen zur Herstellung eines nach Menge und Beschaffenheit ausgeglichenen Wasserhaushaltes in den durch den Bergbau beeinflussten Flusseinzugsgebieten werden in der länder- und ressourcenübergreifenden Arbeitsgruppe abgestimmt. Teilnehmer sind Umwelt- und Bergbauverwaltungen sowie Bergbauunternehmen.
Wasser-Cluster Lausitz (WCL) e.V.	Regional	Zur wichtigsten Aufgabe des Vereins gehört die Sicherung der Ressource Wasser, in Menge und Qualität, unter den Bedingungen des Klimawandels und des Bergbaues. Der WCL e.V. versteht sich als Wissensnetzwerk und Forum für Diskussionen, welches Ergebnisse zeitnah der wasserwirtschaftlichen Praxis zur Verfügung stellt. Hierzu gibt es eine Kooperation zwischen Partnern aus Wirtschaft, Industrie, Verbänden und Kommunen.
Beirat zur Klimaanpassung	Bundesland	Durch den Beirat sollen die Erwartungen, Ansprüche und Bedarfe unterschiedlicher gesellschaftlicher Gruppen in die Gestaltung der Klimaanpassung einfließen und dieser damit wichtige Impulse zur Weiterentwicklung der zukünftigen Ausrichtung der Klimaanpassungspolitik Nordrhein-Westfalens setzen.

Untersuchte Koordinations-gremien	Ebene	Beschreibung
Regiowasser e.V./ AK Wasser	Regional	In der Initiative Regiowasser diskutieren Wasserfachleute aus der Region Schritte zu einer zukunftsfähigen und nachhaltigen Wasserwirtschaftspolitik im Großraum Freiburg. Als AK Wasser ist der Verein bundesweit tätig und befasst sich mit „größräumigeren“ Wasserwirtschaftsproblemen.
Wasserverband Eifel-Rur (WVER)	Flusseinzugsgebiet	Der WVER ist ein sich selbstverwaltender Verband, welcher Aufgaben der Wasserwirtschaft, wie Renaturierung von Fließgewässern, übernimmt. Mitglieder sind fünf Kreise, die StädteRegion Aachen, 43 Gemeinden und Städte, 34 gewerbliche Unternehmen und die Trinkwasserversorger.
Jagdbeiräte	u.a. Bundesland und Landkreis	Die Jagdbeiräte beraten die Jagdbehörden auf unterschiedlichen Ebenen bei Einzelentscheidungen und sind in allen grundsätzlichen Fragen zu hören. Beteiligt sind z. B. Vertreter*innen der Landwirtschaft, Waldbesitzer, Forstbehörden, Naturschutzverbände, Jagdbehörden und Jagdgenossenschaften.
Naturschutzbeiräte	u.a. Bundesland und Landkreis	Zur wissenschaftlichen und fachlichen Beratung unterstützen Beiräte aus sachverständigen Personen die Naturschutzbehörden. Die Ausgestaltung, u.a. Ebenen, auf denen die Beiräte angesiedelt sind, variiert zwischen den Bundesländern. Zum Beispiel sind Vertreter*innen von Verbänden aus Naturschutz, Land- und Forstwirtschaft, Jagd, Fischerei, Sport, Imkerwesen beteiligt.
Water Use Advisory Council im US-Bundestaat Michigan	Bundesstaat	Der Water Use Council wurde eingerichtet, um relevanten Behörden des Bundesstaates Michigan Empfehlungen zu unterbreiten, u.a. bzgl. der Entwicklung und Untersuchung von Vorschriften zur Wasserentnahme und zur Vermeidung von Konflikten bei der Wassernutzung. Der Rat bietet ein Forum für Diskussionen zwischen verschiedenen Sektoren ²³ . Der Water Use Council kann keine verbindlichen Entscheidungen fällen.
Permanent Drought Commission in Spanien	Flusseinzugsgebiet	Die Permanent Drought Commission leitet sich aus dem Verwaltungsrat der Flussgebietsbehörde ab. Das Hauptziel ist das Dürremanagement in Wasserressourcensystemen, für die eine Dürre ausgerufen worden ist. Diese Kommissionen können u.a. die Wassernutzung reduzieren oder aussetzen. Die Permanent Drought Commission hat die Möglichkeit verbindliche Entscheidungen zu treffen.

²³ Die ernannten Vertreter*innen umfassen Wirtschaft und Industrie, öffentliche Versorgungsbetriebe, Fischerei, Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, lokale Verwaltung, landwirtschaftliche und nicht-landwirtschaftliche Bewässerung, Schutz von Feuchtgebieten, kommunale Wasserversorgung, Umweltorganisationen und lokale Wassereinzugsgebietsräte.

Auf Basis der Auswertung von bestehenden Beiräten wurden Empfehlungen zur Initiierung von Wasserbeiräten erarbeitet, welche in drei Fallstudienregionen mit Stakeholdern diskutiert wurden. In den Fallstudien wurde durch Workshops ein Austausch zwischen Stakeholdern angestoßen und konkrete Ausgestaltungsmöglichkeiten, wie ein Wasserbeirat in der jeweiligen Region etabliert werden kann, diskutiert.

Die Fallstudien wurden nach verschiedenen Kriterien ausgewählt. Darunter fallen u.a. die aktuelle und zukünftige Wasserverfügbarkeit, bestehende oder erwartete Wassernutzungskonflikte zwischen verschiedenen Sektoren und regional unterschiedliche Wassernutzungscharakteristika (z. B. großflächige Nutzung von Beregnungswasser in Ostniedersachsen vs. weniger Beregnung in den anderen Regionen). Für die Fallstudien wurden fallstudienübergreifende und fallstudien-spezifische Fragestellungen erarbeitet. Die Ergebnisse wurden in jeweils einem Konzept zur Initiierung von Wasserbeiräten für die Fallstudienregionen zusammengefasst.

3.4.2 Ergebnisse: Auswertung vorhandener Austauschgremien

Im Folgenden werden Hauptkenntnisse der Analyse von elf bestehenden Austauschgremien zusammengefasst. Eine Übersicht der elf untersuchten Gremien findet sich in Tabelle 10.

a) Thematische Ausrichtung

Die untersuchten Austauschgremien weisen unterschiedliche thematische Fokusse auf. Prinzipiell ist für alle Gremien die Integration von unterschiedlichen Perspektiven in aktuelle politische oder planerische Prozesse das Ziel. Einige Gremien widmen sich dabei speziell den Auswirkungen des Klimawandels und den Umgang mit diesen, z. B. Netzwerke Wasser 2.0 oder der Klimabeirat in NRW. Andere haben einen breiten Ansatz und umfassen unterschiedlichste thematische Fragestellungen, z. B. Wasserverbände in NRW oder das Wasser-Cluster Lausitz e.V. Weiterhin bestehen v.a. im Ausland Gremien, die speziell auf die Unterstützung des Trockenheitsmanagements ausgerichtet sind, z. B. Permant Drought Commission in Spanien oder Water Use Councils in den USA.

b) Zeitliche Ausrichtung

Der Großteil der untersuchten Gremien hat einen vorrangig vorsorgenden Charakter, das heißt der Stakeholderaustausch erfolgt zukunftsgerichtet, mit dem Ziel zukünftige Konfliktsituationen (z. B. aufgrund von Trockenheit) zu vermeiden. Manche Gremien, z. B., die AG Flussgebietsbewirtschaftung Spree, Schwarze Elster und Lausitzer Neiße (AG FGB) umfasst neben einem ständigen Gremium auch eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe „Extremsituation“, die im Falle von Niedrigwasser ad-hoc zusammenkommt, aber auch regelmäßige Treffen plant. Andere sind Wasserverbände, z. B. der Wasserverband Eifel-Rur, die potenziell sowohl der Vorsorge zukünftiger als auch Bearbeitung akuter Konfliktsituationen dienen. Eine Besonderheit sind die Permanent Drought Commissions in Spanien. Diese sind zwar auf Dauer angelegt, im Ereignisfall werden jedoch ad-hoc Entscheidungen getroffen. Zudem kann ein Drought Effect Mitigation Plan durch die Kommission genehmigt werden, welcher jedoch nur so lange aktiv ist, wie die Dürresituation besteht.

c) Ebene, auf der das Gremium angesiedelt ist

Die untersuchten Gremien sind auf verschiedenen Ebenen angesiedelt. Diese lassen sich grob wie folgt klassifizieren.

- ▶ Gremien auf interkommunaler Ebene: Der Kulturlandschaftsverband Obere Wipperaue, der mehrere Gemeinden umfasst.
- ▶ Gremien auf Landkreisebene: Die Netzwerke Wasser 2.0 bestehen aus je einem Landkreis sowie einem Partnerlandkreis; der Regiowasser e.V. ist auf die Stadt Freiburg und das Umland beschränkt.
- ▶ Gremien, die auf regionaler Ebene angesiedelt sind und ein oder mehrere Flusseinzugsgebiete umfassen: Die AG FGB involviert Vertreter*innen aus zwei Bundesländern und umfasst Abschnitte mehrerer Flusseinzugsgebiete. Das Wasser-Cluster Lausitz hat ebenfalls einen regionalen Bezug. Der Wasserverband Eifel-Rur bezieht sich auf Teileinzugsgebiete der Rur. Die Permanent Drought Commissions in Spanien sind auf Flusseinzugsgebietsebene angesiedelt.
- ▶ Gremien auf Bundesländerebene: Beirat zur Klimaanpassung in NRW
- ▶ Gremien mit Foren auf mehreren Ebenen: Je nach Landesrecht existieren Jagd- sowie Naturschutzbeiräte auf verschiedenen Verwaltungsebenen (auf Landkreis-, regionaler sowie Landesebene).

d) Hauptverantwortliche Institution / Akteur

In den meisten betrachteten Gremien sind Verwaltungsakteure hauptverantwortlich und in initiiender Rolle. In den Netzwerken Wasser 2.0 ist z. B. das Niedersächsische Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie gemeinsam mit der Landwirtschaftskammer Niedersachsen der Initiator des Projektes. Diese beiden Akteure haben relevante Stakeholder in den beteiligten Landkreisen für die Zusammenarbeit ausgewählt. Beim Kulturlandschaftsverband Obere Wipperaue war ebenfalls die Landwirtschaftskammer Niedersachsen der Initiator. In der AG FGB Spree sowie dem Beirat für Klimaanpassung NRW sind die jeweiligen Landesumweltministerien die hauptverantwortlichen Akteure. Bei den Jagd- und Naturschutzbeiräten sind es je nach Landesgesetzgebung die entsprechenden Behörden. Bei den Permanent Drought Commissions in Spanien sind die Präsidenten der Behörden für die Einzugsgebiete sowie der Verwaltungsrat der Flussgebietsbehörde für die Kommissionen hauptverantwortlich. Bei den Water Use Councils in Michigan, USA sind Ausschussvorsitzende hauptverantwortlich, die wiederum vom Water Use Advisory Council ausgesucht und gewählt werden.

e) Formalisierung

Die Art der Formalisierung der untersuchten Austauschgremien variiert. Vor allem die betrachteten Beispiele im Ausland (Spanien, Michigan (USA)) basieren auf von der verantwortlichen Regierung verabschiedeten Gesetzen oder Dekreten. Die in Deutschland bestehenden Jagd- und Naturschutzbeiräte sind ebenfalls gesetzlich verankert. Der Jagdbeirat wird im Bundesjagdgesetz erwähnt, die weitere Konkretisierung erfolgt in den jeweiligen Landesgesetzen. Die Naturschutzbeiräte werden in den Naturschutzgesetzen auf Landesebene erwähnt. Darüber hinaus ist der Klimabeirat in NRW im Landesgesetz zur Klimaanpassung festgeschrieben. Die in NRW gegründeten Wasserverbände sind über Verbandsgesetze formalisiert und gelten als Sondergesetzliche Wasserverbände. Der Kulturlandschaftsverband „Obere Wipperaue“ ist ein Verband nach dem Wasserverbandsgesetz, nach welchem Wasser- und Bodenverbände geregelt sind.

Eine Reihe der untersuchten Gremien basieren auf keiner rechtlichen Grundlage, sondern werden als Forschungsprojekt durchgeführt und basieren auf Kooperationsvereinbarungen oder anderen Verträgen. Weiterhin liegen gegründete Vereine vor, z. B. das Wasser-Cluster-Lausitz e.V.. Einen besonderen Fall bildet die Flussgebietsbewirtschaftung Spree, Schwarze Elster und Lausitzer Neiße (AG FGB), welches sich auf ein 2009 gemeinsam von den Landesregierungen Berlin und Brandenburg sowie der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (LMBV) und dem Kraftwerksbetreiber Vattenfall Mining (heute Lausitz Energie Bergbau AG) verabschiedetes Strategiepapier bezieht.

Aus der Betrachtung der unterschiedlichen rechtlichen Rahmenbedingungen und hauptverantwortlichen Akteure lassen sich die folgenden zentralen Modelle ableiten, welche auch im Konzept für Wasserbeiräte wieder aufgegriffen werden:

- ▶ Verankerung in übergeordneten Gesetzen
- ▶ Wasser- und Bodenverbände nach Wasserverbandsgesetz
- ▶ sondergesetzliche Wasserverbände
- ▶ Vereine
- ▶ Kooperationsvereinbarungen

f) Finanzierung

Ein Teil der betrachteten Gremien wird mit öffentlichen Mitteln aus den Haushalten finanziert, z. B. die Drought Commission in Spanien oder der Klimabeirat NRW. Eine reguläre Finanzierung über die Budgets der beteiligten Institutionen erfolgt für die AG FGB.

Darüber hinaus sind projektfinanzierte Gremien vorhanden, welche z. B. über Gelder des BMUV oder BMBF oder auf Landesebene finanziert werden und dadurch auch Herausforderungen bei der Verstetigung aufweisen. Die Wasserverbände weisen hier eine besondere Stellung auf, da sie sich aufgrund ihrer hoheitlichen Aufgaben aus Beiträgen der kommunalen und gewerblichen Verbandsmitglieder finanzieren. Für weitere Aktivitäten werben die Wasserverbände Fördergelder bei verschiedenen Fördergebern ein (EU, National, Land).

g) Aufgaben und Funktion

Für alle untersuchten Gremien ist eine Aufgabe der Informationsaustausch und Netzwerk-aufbau zwischen verschiedenen Akteuren, u.a. um das Bewusstsein für das Problem Trockenheit und Dürre bzw. das Verständnis für die unterschiedlichen Perspektiven zu erhöhen.

Die bereits bestehenden Beiräte in anderen Politikfeldern (Jagd, Naturschutz, Klima) haben als Aufgabe, Verwaltungen auf unterschiedlichen Ebenen zu beraten und bei Erarbeitungen von politischen Strategien zu unterstützen. Darüber hinaus zielen intersektorale Arbeitsgruppen oder Netzwerke auf die gemeinsame Entwicklung von Arbeitsprogrammen oder entscheidungsorientierten Planungen ab. Die Koordination von Dürremanagement im Dürrefall (Spanien) bzw. einer langfristigen nachhaltigen Wasserhaushaltsplanung bzw. Wasserwirtschaftspolitik (Regio-wasser e.V., Wasser Cluster Lausitz e.V.) wird ebenfalls als Aufgabe angegeben. Darüber hinaus zielen Gremien, z. B. Netzwerke Wasser 2.0, auf die Weitergabe von Informationen und Bewusstseinsbildung ab. Bestehende Wasserverbände in NRW nehmen eine besondere Stellung ein, da sie das grundsätzliche Ziel haben, die unterschiedlichen Nutzungsinteressen der Mitglieder in einen Ausgleich zu bringen.

Die Funktionen eines Austauschgremiums können nach der Systematik der International Association for Public Participation (IAP2) nach dem Grad, in dem Entscheidungsgewalt auf verschiedene Akteure verteilt ist, unterschieden werden (International Institution for Public Participation (IAP2), 2018). Während die Entscheidungsgewalt bei Beteiligung und Konsultation auf (gesetzlich) festgelegte Akteure - meist öffentliche Verwaltungen - beschränkt ist, ist sie im Falle von Stakeholder-Kontrolle in der Hand der relevanten Stakeholder. Im Folgenden werden die Funktionen kurz vorgestellt und in Tabelle 11 den untersuchten Gremien zugeordnet.

Information: Stakeholder werden informiert, um das Bewusstsein für das Problem der Trockenheit und Hitze bei der Verwaltung, betroffenen Sektoren und Bürger*innen zu erhöhen

Konsultation/Beratung: Stakeholder werden durch Konsultationen eingebunden. Z. B. werden von der Verwaltung erarbeitete Planungsprioritäten, Maßnahmen, Konzepte oder Strategien den Stakeholdern vorgestellt. Stakeholder haben die Möglichkeit Rückmeldungen und Feedback zu geben.

Beteiligung: Stakeholder werden frühzeitig in den Prozess eingebunden, z. B. werden Planungsprioritäten und Maßnahmen vor der ersten Fassung zusammen mit Stakeholdern besprochen. Prioritäten und Vorschläge werden gemeinsam diskutiert. Die Entscheidung wird von der Behörde getroffen.

Kollaboration: Die Entscheidungsgewalt ist aufgeteilt zwischen leitender Institution und Stakeholdern, z. B. können Stakeholder Vorschläge für Planungsprioritäten und Maßnahmen einbringen. Die Entscheidung wird innerhalb des Gremiums von Stakeholdern und regulatorischer Institution gemeinsam getroffen.

Stakeholder-Kontrolle: Stakeholder haben regulatorische Entscheidungsgewalt, d.h. die Stakeholder beschließen Planungsprioritäten bzw. Maßnahmen, etc. Die regulatorische Institution gibt ihre Entscheidungsgewalt an die Stakeholder ab.

Tabelle 11: Funktionen der untersuchten Austauschgremien

Untersuchte Austauschgremien	Ebene	Funktion				
		Information	Konsultation	Beteiligung	Kollaboration	Stakeholder-kontrolle
Netzwerke Wasser 2.0 in Niedersachsen	Landkreis	x	x			
Kulturlandschaftsverband „Obere Wipperau“	Interkommunal		x	x	x	
AG Flussgebietsbewirtschaftung Spree, Schwarze Elster und Lausitzer Neiße	Flusseinzugsgebiets- und länderübergreifend		x	x	x	
Wasser-Cluster Lausitz	Regional	x	x			
Beirat zur Klimaanpassung	Bundesland		x			
Regiowasser e.V./ AK Wasser	Regional	x	x			

Untersuchte Austauschgremien	Ebene	Funktion				
		Information	Konsultation	Beteiligung	Kollaboration	Stakeholder-kontrolle
Wasserverband Eifel-Rur	Flusseinzugsgebiet	x	x	x	x	
Jagdbeiräte	u.a. Bundesland und Landkreis		x	x		
Naturschutzbeiräte	u.a. Bundesland und Landkreis		x	x		
Water Use Advisory Council im US-Bundesstaat Michigan	Bundesstaat	x	x	x		
Permanent Drought Commission in Spanien	Flusseinzugsgebiet		x	x		

Die Auswertung zeigt, dass die meisten untersuchten Beiräte mehrere Funktionen erfüllen. Die meisten Gremien fokussieren auf Information bzw. Konsultation und Beteiligung. Sie beziehen damit Stakeholder aktiv in den Prozess ein, belassen aber die Entscheidungsgewalt bei der jeweiligen Behörde. Kollaboration trifft z. B. in der AG FGB und im Kulturlandschaftsverband „Obere Wipperau“ zu, in welchen Entscheidungen gemeinsam getroffen werden. Eine vollständige Abgabe der Entscheidungsgewalt an die Stakeholder (Stakeholder-Kontrolle) trat bei den untersuchten Beiräten nicht auf.

h) Austauschformate

Die untersuchten Gremien nutzen unterschiedliche Austauschformate. Ein genutztes Instrument für einen festgelegten Teilnehmer*innenkreis sind regelmäßige bzw. unregelmäßig einberufene Sitzungen, z. B. bei den Naturschutz- und Jagdbeiräten aber auch Drought Commission in Spanien, welche sich monatlich trifft. Die Arbeit des Gremiums Netzwerke Wasser 2.0 umfasst ebenfalls Treffen von ausgewählten Vertreter*innen der Stakeholder mehrfach pro Jahr, welche auch nach Ende der Projektlaufzeit unregelmäßig fortgesetzt wurden. Zusätzlich wurden Workshops und Fachexkursionen organisiert. Andere Gremien führen auch öffentliche Veranstaltungen durch, z. B. führt die Regiowasser e.V./AK-Wasser neben Arbeitsgruppen auch Bürgerbeteiligungsprojekte durch bzw. organisiert die Regionalen Wassertage. Das Wasser-Cluster Lausitz führt zudem Bildungsveranstaltungen durch. Bei der Entwicklung des Kulturlandschaftsplans Obere Wipperau wurde z. B. ein Runder Tisch mit Akteur*innen der Region einberufen.

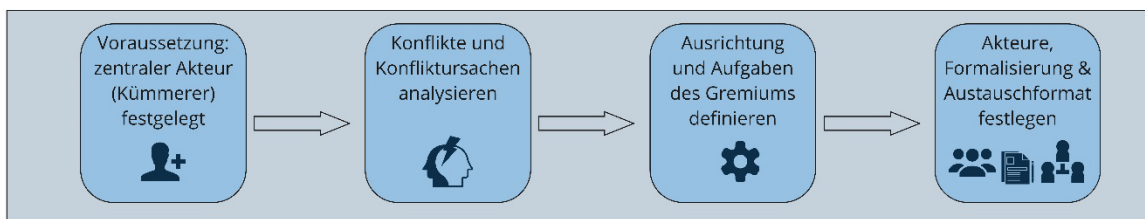
Zusammenfassend kann man feststellen, dass die untersuchten Gremien eine Bandbreite von verschiedenen thematischen Ausrichtungen aufweisen. Gemeinsam haben die untersuchten Gremien, dass sie einen Informationsaustausch zwischen verschiedenen Sektoren verstärken möchten. Diese Netzwerkarbeit verspricht, dass Verständnis für die Perspektiven der unterschiedlichen Akteure zu erhöhen. Viele untersuchte Gremien streben eine Integration von unterschiedlichen Perspektiven in aktuelle politische oder planerische Prozesse an. Langfristig und vorsorgend angelegte Gremien konnten gefunden werden, aber auch Gremien, die sich auf Ad-hoc Maßnahmen im Ereignisfall beziehen. Die beiden zeitlichen Ausrichtungen können auch im Rahmen eines Gremiums kombiniert werden. Die räumliche Ebene der untersuchten Gremien variiert sehr stark, dies liegt auch am breiten Untersuchungsfokus. Ein wichtiger Aspekt bei neu zu

etablierenden Wasserbeiräten ist die Anschlussfähigkeit an bestehende Gremien und Rahmenbedingungen in der Region. Die hauptverantwortliche Institution wurde als wichtig eingestuft, zurzeit übernimmt diese Aufgabe meist ein Verwaltungsakteur, wie Wasserbehörden oder Landesämter. In mehreren Gremien war auch die regionale Landwirtschaftskammer in die Organisation eingebunden. Bei der Wahl der Formalisierung treten verschiedene Herausforderungen auf: u.a. ist einerseits gewisse Flexibilität für eine Anpassung an regionale Gegebenheiten und vorliegende Austauschgremien notwendig, auf der anderen Seite können verbindliche Vorgaben und eine Harmonisierung die Etablierung der Wasserbeiräte fördern. Gerade bei projektbasierten Gremien wurde oft die Herausforderung der Verstetigung der Aktivitäten angesprochen.

3.4.3 Ergebnisse: Empfehlungen zur Initiierung von Wasserbeiräten

Auf Basis der Untersuchung bestehender Beiräte (in Kapitel 3.4.2) wurde eine schrittweise Abfolge zur Initiierung eines Wasserbeirats entwickelt (siehe Abbildung 80). Hierbei werden Handlungsempfehlungen gegeben sowie Hinweise dazu, welche organisatorischen, administrativen und politischen Aspekte bei der Initiierung eines Wasserbeirats zu beachten sind. Grundvoraussetzung für die Initiierung eines Wasserbeirats ist das Vorhandensein eines Akteurs („Kümmersers“), der die Initiierung hauptverantwortlich vorantreibt. Wichtig ist ein kooperativer Ansatz bereits beim Aufsetzen des Gremiums, der die Belange und Präferenzen der einzelnen Sektoren und Stakeholder miteinbezieht. Hierdurch lässt sich Vertrauen und Transparenz im Teilnehmer*innenkreis aufbauen, was für eine erfolgreiche Arbeit des Gremiums unerlässlich ist.

Abbildung 80: Schritte zur Initiierung eines Wasserbeirats



Quelle: Eigene Darstellung, Ecologic Institut

In einem ersten Schritt soll ein Verständnis zu bestehenden bzw. potenziellen Konflikten in der Region entwickelt werden. In einem nächsten Schritt sollen die grundsätzliche thematische und zeitliche Ausrichtung bzw. die Hauptaufgaben des Gremiums festgelegt werden. Im Weiteren werden die relevanten Stakeholder, eine mögliche Formalisierung und geeignete Austauschformate diskutiert und festgelegt.

Konflikte und Konfliktursachen analysieren: Als erstes ist ein Verständnis für den vorliegenden bzw. potenziell entstehenden Konflikt und dessen Ursachen zu schaffen. Wassernutzungskonflikte können unter anderem entstehen, wenn das Wasserdargebot in einer bestimmten Region zeitweilig oder dauerhaft nicht in benötigter Menge oder Qualität verfügbar ist und zudem zwischen den Akteuren Uneinigkeit über die Verteilung der knappen Ressource besteht. Es sollte die räumliche und zeitliche Dimension des Konflikts sowie ebenfalls die betroffenen Sektoren und dahinterliegenden Ursachen und Treiber für Trockenheitssituation betrachtet werden. Um den Konflikt ausreichend darstellen und beschreiben zu können, sind gute Informationen zur Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität notwendig. Diese sind oftmals in Deutschland nicht ausreichend vorhanden bzw. nicht öffentlich zugänglich. Wissenschaftliche Untersuchungen und eine verbesserte Datenlage können hier Abhilfe schaffen. Stakeholder sollten bereits in die Erarbeitung der Konfliktursachen einbezogen und aufgefordert werden, ihre Daten in den Prozess einzubringen.

Ausrichtung und Aufgaben des Gremiums definieren: Abhängig vom Charakter des identifizierten Konflikts ist festzulegen, welche thematische Ausrichtung (Wasserthemen im Allgemeinen bzw. begrenzt auf Dürre und Trockenheit), zeitliche Ausrichtung (langfristiges Dürremanagement und/oder kurzfristige Ad-hoc Entscheidungen im Dürrefall) und Aufgaben das Gremium in Bezug auf Trockenheitsmanagement einnehmen soll. Die übergeordnete Aufgabe von Wasserbeiräten ist es, auf einen Ausgleich zwischen den wasserwirtschaftlichen Interessen einschließlich der Trinkwasserversorgung und den Belangen der Land- und Forstwirtschaft, der Industrie, der Grundstückseigentümer, der Fischerei und Aquakultur, des Tourismus, der Binnenschifffahrt und des Naturschutzes hinzuwirken (BMUV, 2023). Konkrete Aufgaben können darüber hinaus u.a. umfassen:

- ▶ Informationsaustausch und Netzwerkaufbau zwischen verschiedenen wasserbezogenen Sektoren
- ▶ Konsultation bei gesetzlichen Regulierungen & Planungsprozessen
- ▶ Frühzeitige und durchgehende Beteiligung bei Festlegung von Zielen und Prioritäten innerhalb von Planungsprozessen
- ▶ Beratung von Behörden, Wasser- und Landnutzer*innen zu relevanten Maßnahmen sowie Überwachung und Evaluierung der Maßnahmenumsetzung
- ▶ Erarbeitung von Empfehlungen zur Aufstellung und Umsetzung regionaler Wasserversorgungskonzepte
- ▶ Öffentlichkeitsarbeit zur Erhöhung der Akzeptanz beschlossener Maßnahmen

Akteure, Formalisierung und Austauschformat festlegen: Im Gremium sollten **Akteure** aus allen relevanten Wassernutzungsbereichen vertreten sein, die in den vorliegenden Konflikt involviert sind. Dies umfasst private, landwirtschaftliche, Freizeitliche und industrielle Wassernutzer*innen, ggf. vertreten durch Interessensgruppen, sowie Behörden und Kommunen. Mögliche Akteure für verschiedene Sektoren sind in Anhang B zusammengestellt. Die genaue Auswahl sollte anhand der Analyse des zugrundeliegenden Konflikts erfolgen. Um ein Gremium erfolgreich zu initiieren, ist die Unterstützung einer hauptverantwortlichen Institution entscheidend. Hierbei handelt es sich in der Regel um Verwaltungsakteure, wie Wasserbehörden, Landesämter oder Bezirksregierungen.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten für den **rechtlichen Rahmen**, innerhalb dessen die Gremien agieren können. Neben einer Verankerung in Landesgesetzen, die in Deutschland zurzeit noch nicht besteht, in der Nationalen Wasserstrategie jedoch ausdrücklich gefordert wird (BMUV, 2023), stehen weitere Formalisierungsoptionen zur Verfügung, die für einen Wasserbeirat je nach Rahmenbedingungen geeignet sein können. Bei der Untersuchung bestehender Koordinationsgremien konnten die in Tabelle 12 zusammengestellten Möglichkeiten identifiziert werden. Die Art der Formalisierung sollte in Abhängigkeit der vorhandenen Strukturen in den Ländern und der relevanten Region gewählt werden.

Tabelle 12: Formalisierungsmöglichkeiten

Formalisierungsmöglichkeit	Beschreibung
Gesetzlich verankerte Wasserbeiräte	Wasserbeiräte können gesetzlich verankert werden, wie es z. B. im Falle der Dürremanagementkomitees in Spanien oder der Water Advisory Councils in Michigan (USA) der Fall ist. Diese basieren auf Bundes- oder Landesgesetzen oder Dekreten. Die in Deutschland bestehenden Jagd-, Naturschutzbeiräte sind ebenfalls bundesgesetzlich verankert. Die Ausgestaltung der Beiräte ist in Landesgesetzen festgehalten bzw. konkretisiert. In Deutschland ist eine Verankerung im Wasserhaushaltsgesetz oder den Landeswassergesetzen denkbar und wird auch so in der Nationalen Wasserstrategie vorgeschlagen (BMUV, 2023).
Wasser- und Bodenverbände nach Wasserverbandsgesetz	Die im Wasserverbandsgesetz (WVG) geregelten Wasser- und Bodenverbände sind Körperschaften des öffentlichen Rechts. Der Verband unterliegt der Rechtsaufsicht durch die Aufsichtsbehörde (in NRW z. B. die Landrätin oder der Landrat als untere staatliche Verwaltungsbehörde bzw. die Bezirksregierung als obere Aufsichtsbehörde). Die Mitglieder sind zum größten Teil aus der Landwirtschaft und Grundeigentümer*innen im Verbandsgebiet. Die Rechtsverhältnisse des Verbands werden durch eine Satzung geregelt. Hieraus ergibt sich der Vorteil dieser Organisationsform: Die klare Definition von Aufgabengebieten und Kompetenzen, wie z. B. die Beantragung von Fördermitteln.
Sondergesetzliche Wasserverbände	Sondergesetzliche Wasserverbände unterscheiden sich von den Wasser- und Bodenverbänden nach WVG in der Regel durch umfassendere Aufgaben und können die Privatwirtschaft einbinden. Die Mitglieder sind alle „Wassernutzer“ im Verbandsgebiet, u.a. alle kreisfreien Städte, Kreise und Gemeinden, gewerbliche Unternehmen.
Vereine	Ein Verein ist eine freiwillige Vereinigung. Er wird im Vereinsregister eingetragen und basiert auf einer Vereinsatzung, in welchem z. B. der Vereinszweck, Mitgliedsbeiträge und Organe festgeschrieben sind. Der Verein ist vom Bestand seiner Mitglieder unabhängig.
Kooperationsvereinbarungen	Für Gremien, die innerhalb von Forschungsprojekten initiiert wurden, liegt meist eine Kooperationsvereinbarung oder andere vertragliche Grundlage der Zusammenarbeit der verschiedenen Akteure zu Grunde.

Für die Koordination und den Austausch zwischen Stakeholdern stehen eine Reihe von **möglichen Formaten** zur Verfügung. Die Formate sollten neben weiteren Kriterien, wie Teilnehmendenzahl, entsprechend der Aufgabenstellung ausgewählt werden. Webseiten, Social Media bzw. Vorträge und Konferenzen bieten die Möglichkeiten der Informationsvermittlung bzw. bei Letzteren auch das Einholen von Feedback. Regelmäßige Austauschtreffen oder Workshops bieten darüber hinaus die Möglichkeiten einer aktiveren Beteiligung. Ad-hoc Arbeitsgruppen können genutzt werden, wenn ein konkretes Thema erörtert werden soll. Fokusgruppen können u.a. zum Sammeln von Ideen in einer kleinen Gruppe zu einem abgegrenzten, vorab festgelegten Thema genutzt werden. Exkursionen und Vor-Ort Begehungen bieten die Möglichkeit, Diskussionen und Erfahrungen ganz konkret vor Ort zu führen bzw. auszutauschen. Wichtig ist auch, die zeitliche Dimension des Gremiums in die Auswahl geeigneter Austauschformate miteinzubeziehen: Wenn der Austausch eher langfristig vorsorgend erfolgen soll, sind andere Formate zu wählen (z. B. regelmäßige Treffen) als für Gremien, die vor allem ad-hoc, im Konflikt- bzw. Dürreereignisfall aktiv werden sollen.

3.4.4 Ergebnisse: Auswertung der Fallstudien

Im Folgenden sind die Diskussionen in den Fallstudienregionen kurz zusammengefasst. In allen drei Fallstudienregionen wurden Ziele und Ausgestaltungsmöglichkeiten eines Wasserbeirats aus Sicht der Praxis mit regionalen Stakeholdern diskutiert. Für die Region Gifhorn wurde ein separater Workshop durchgeführt. Im Lausitzer und Mitteldeutschem Revier wurde jeweils ein Thementisch auf den Auftaktveranstaltungen des STARK-Projekts: RegionNet Wasser Boden²⁴ durchgeführt.

3.4.4.1 Landkreis Gifhorn

Im Landkreis Gifhorn bestehen bereits verschiedene Austauschgremien, welche Wasserquantitätsfragen (mit)abdecken. Im Netzwerk Wasser 2.0 wurden Klimaanpassungsmaßnahmen in verschiedenen Landkreisen diskutiert. Der Austausch über Sektorgrenzen hinweg hat sich im Landkreis Gifhorn etabliert. Es gibt bereits einige Gremien, wie die Flussgebietskooperation, das Wasserforum des Regionalverbands sowie die Arbeitsgruppe Aller-Wolfsburg. Es besteht der Wunsch der Akteure, diese Aktivitäten stärker zusammenzuführen bzw. klar abzugrenzen.

Bei den Diskussionen wurde deutlich, dass ein Austausch zu verschiedenen wasserwirtschaftlichen Fragen gewünscht ist, die von sektorenübergreifender Relevanz sind. Wichtig ist, die Aufgabenbereiche des Beirats im Vorfeld genau abzugrenzen. Aufgrund der wiederkehrenden Herausforderungen, die mit einem verringerten Wasserdargebot einhergehen, wird die Einrichtung eines auf Dauer angelegten Gremiums empfohlen. Zusätzlich sollten ad-hoc Abstimmungen ermöglicht werden. Verschiedene Aufgaben des Wasserbeirats wurden diskutiert, u.a. die Wissensbasis und das Verständnisschaffen für die Abwägung unterschiedlicher Interessen und Aufgaben – beide Aspekte sind zentral für den Erfolg. Es wurde angemerkt, dass Wasserbeiräte zudem unterschiedliche Zielvorstellungen in den Sektoren deutlich machen und zur Behebung von Umsetzungsproblemen beitragen sollten.

Ein ausführliches Konzept zur Initiierung eines Wasserbeirats im Landkreis Gifhorn ist im Anhang D.1 eingefügt. Das erarbeitete Konzept basiert auf den in Kapitel 3.4.3 dargestellten Schritten.

Auf der Grundlage der Diskussionen und dem erarbeiteten Konzept hat ein Wasserbeirat im Landkreis Gifhorn ein hohes Erfolgspotenzial, auch aufgrund etablierter Strukturen und Erfahrung im intersektoralen Austausch. Durch die Ereignisse der letzten Jahre sehen alle Akteure einen Handlungs- und Abstimmungsbedarf zum Trockenheitsmanagement im Landkreis. Durch den Kreistagsbeschluss zum Forum Wasser und den Diskussionen unter den Akteuren der Gewässerbewirtschaftung und Landwirtschaft, u.a. auf dem WADKlim Workshop, gibt es ein breites Interesse und gute Voraussetzungen. Allerdings muss diskutiert werden, was die Ziele und Interessen der verschiedenen Initiativen sind, um diese im besten Fall zusammenzuführen. Das Forum Wasser bietet auch gute Möglichkeiten der Verstetigung. Es ist weiter zu klären, ob die Wasserbehörde die Funktion eines Kümmerers erfüllen könnte und wie diese finanziell für diese Aufgabe ausgestattet werden kann, z. B. über die Aufnahme in den Haushaltsplan des Landkreises.

²⁴ Das STARK-Projekt: RegionNet Wasser Boden wird vom Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie und Landestalsperrenverwaltung des Freistaat Sachsen durchgeführt. Weitere Informationen sind auf der folgenden Webseite verfügbar: <https://www.regionet.sachsen.de/>

3.4.4.2 Mitteldeutsches bzw. Lausitzer Revier, Sachsen

Auf den beiden Auftaktveranstaltungen des STARK-Projekts: RegionNet Wasser Boden wurden ein sektor- und länderübergreifender Austausch und eine gemeinsame Koordination als Herausforderung für Wasserbeiräte benannt. Einzubeziehende Sektoren sollten je nach Region festgelegt werden (z.B. wichtige Rolle des Tourismus und der Teichwirtschaft im Lausitzer Revier).

Es wurde auf fehlende personelle und finanzielle Ressourcen für die Organisation aber auch Teilnahme an Gremien hingewiesen, u.a. bei den Fachbehörden und weiteren Akteuren. In der Lausitz wurde auch die Anerkennung für die Mitarbeit in Austauschgremien als Herausforderung erwähnt.

Thematisch wurden die Priorisierung von Wasserentnahmen bzw. Anreize für effiziente Wassernutzungen diskutiert. Dabei sollten auch zukünftige Wassernutzungen, z.B. für die Wasserstoffherstellung, einbezogen werden. Anreize für effiziente Wassernutzungen, Wasserwiederverwendung, lokale Kreisläufe und Brauchwassernutzung bzw. Empfehlungen für die Ansiedlung wasserarmer Industrien wurden angeführt. Weiterhin wurde ein Defizit bei den verfügbaren Daten zu tatsächlichen Wasserentnahmen und -rückführungen diskutiert und das Problem der Überwachung von Einschränkung der Wasserentnahmen/-nutzung thematisiert.

In beiden Regionen existieren bereits Austauschgremien, u.a. die Lenkungsinitiative Wassersensible Stadtentwicklung der Stadt Leipzig, die regionalen Arbeitsgruppen der Wasserrahmenrichtlinie bzw. die Arbeitsgruppe Flussgebietsbewirtschaftung. Diese decken jedoch jeweils nicht das gesamte Gebiet der Region ab. Es wurde allerdings deutlich gemacht, dass eine Verknüpfung mit bestehenden Strukturen wesentlich für den langfristigen Erfolg neuer Austauschgremien ist.

In beiden Diskussionsrunden wurde die Umsetzungs- und Lösungsorientierung eines Wasserbeirats bzw. eines regionalen Netzwerkes hervorgehoben. Es sollte konkret an Lösungsansätzen gearbeitet werden. Weitere Aufgaben könnten die Erhöhung des Bewusstseins für den Nutzungskonflikt bzw. die Informationsbeschaffung und Kommunikation an Dritte, wie Unternehmen und die Bevölkerung sein. Die Möglichkeit sich über die verschiedenen Standpunkte bezüglich des Konflikts auszutauschen, die Sichtweisen der verschiedenen Akteur*innen zu verstehen und im besten Fall darauf aufbauend Kompromisse zu finden, wurde als wichtige Aufgabe eines Beirats genannt. Ein Wasserbeirat oder regionales Netzwerk könnte Genehmigungsverfahren frühzeitig unterstützen und diese idealerweise beschleunigen sowie eine grobe Beurteilung unterstützen bieten, z.B. durch das frühzeitige grobe Indizieren von potenziellen Problemen bei der Genehmigung von Großansiedlungen.

Die Benennung eines Kümmerers und dessen Finanzierung wurde als wesentlich eingeschätzt. Dieser zentrale Akteur sollte die Organisation des Beirats übernehmen. Die Rückmeldungen zu einer geeigneten Ebene des Beirats waren nicht einheitlich und variierten zwischen einzugsgebietsbezogen bis hin zur Landkreisebene.

Die Attraktivität des Gremiums könnte erhöht werden, wenn der Mehrwert der Teilnahme so konkret wie möglich definiert und kommuniziert wird. Ebenfalls sind die Sichtbarkeit und die Anerkennung der Mitarbeit wesentlich, z.B. über Aufwandsentschädigungen, Präsentation der Ergebnisse vor den lokalen Entscheider*innen oder ein Monitoring und Evaluierung der Aktivitäten. Als interessante Formate wurden vor Ort-Begehungen und die Präsentation von Good-Practice Beispielen bzw. eine Messe mit technologischen Lösungsansätzen, die für die Region passend sind, vorgeschlagen. Unterschiedlicher Auffassung waren die Teilnehmenden im Hin-

blick darauf, wie weit die Entscheidungsbefugnis des Gremiums gehen soll. Einigkeit bestand jedoch darüber, dass die Rollen des Gremiums klar definiert werden muss, damit eindeutig ist, wie das Gremium institutionell eingebunden ist und welche Kompetenzen es hat.

Weiterhin wurde erwähnt, dass bei projektbezogenen Aktivitäten schon frühzeitig an einer Möglichkeit der Verstetigung zu arbeiten ist.

Ein ausführliches Konzept zur Initiierung eines Wasserbeirats im Mitteldeutschen und Lausitzer Review ist im Anhang D.2 eingefügt. Das erarbeitete Konzept basiert auf den in Kapitel 3.4.3 erarbeiteten Schritten.

Zusammenfassend kann festgesellt werden, dass in beiden Regionen ein Beirat Potenzial hat. Die Regionen weisen bereits jetzt Wasserknappheit auf, die sich in den nächsten Jahren bedingt durch den Klimawandel und die Beendigung des Bergbaus noch weiter verschärfen wird. Beide Regionen sind daher in hohem Maß betroffen und stehen im Rahmen des Transformationsprozesses vor der Entscheidung von Ansiedelungen z.B. von Industrien, Forschung, etc., welche einen hohen Einfluss auf den zukünftigen Wasserbedarf haben. Der Austausch könnte dabei beitragen, geeignete Sektoren aber auch mögliche wassereffiziente Technologien zu identifizieren. Der Beirat könnte zudem zur Diskussion von Lösungsansätzen im Hinblick auf das sich verringernde Wasserdargebot und Priorisierung von Wassernutzungen beitragen. Der Beirat sollte praxisorientiert an konkreten Umsetzungsfragestellungen bzw. -maßnahmen arbeiten.

3.5 Analyse des Potenzials von Wasserrückhalt in der Landschaft

Autor*innen: Schritt, H., Stein, U., Uschan, T., Reineke, J.

3.5.1 Einleitung

Der natürliche Landschaftswasserhaushalt beinhaltet die Komponenten Abfluss, Grundwasserneubildung und Verdunstung. In Deutschland wird der Landschaftswasserhaushalt in der Regel maßgeblich durch die Verdunstung dominiert, da die Niederschläge in den meisten Regionen höher sind als die Abflüsse (BfG, 2022). In Deutschland ist die Komponente Abfluss durch anthropogene Einflüsse historisch verstärkt worden. Im ländlichen Raum führen insbesondere begradigte Flüsse und Bäche sowie die Entwässerung von landwirtschaftlichen Flächen zu einem beschleunigten Wasserabfluss. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass der Landschaftswasserhaushalt zukünftig durch die erwarteten Klimaveränderungen und daraus folgend höheren Temperaturen, längeren Trockenzeiten, Veränderung der Niederschlagsmengen und -verteilung erheblich beeinflusst wird. Durch den Klimawandel bekommt der Wasserrückhalt in der Fläche bzw. die Verzögerung des Oberflächenabflusses und des oberflächennahen Abflusses neben dem Hochwasserschutz zunehmende Relevanz. Grundsätzlich kommen eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen in Frage, die den Landschaftswasserhaushalt verbessern oder die Resilienz der Landökosysteme gegenüber den Extremereignissen Trockenheit und Hochwasser stärken können.

3.5.2 Vorgehensweise

In WADKlim wurde ein Maßnahmenkatalog „Wasserrückhalt in der Landschaft“ mit einer vereinfachten Analyse von Wirkungen und Kosten von Maßnahmen zum Rückhalt von Wasser in der Landschaft erstellt. Der Maßnahmenkatalog soll Akteuren eine Entscheidungsgrundlage zur Umsetzung von Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche bieten.

Unter Maßnahmen zum Wasserrückhalt verstehen die Autor*innen Maßnahmen der Landschaftsgestaltung und des Bodenschutzes sowie technische Maßnahmen, welche die Wasserspeicher- und Rückhaltefähigkeit in der Fläche verbessern, um das Wasserdargebot für Trockenzeiten zu erhöhen. Der Fokus lag auf dem ländlichen Raum, also auf Maßnahmen in Wasserwirtschaft, Forstwirtschaft und Landwirtschaft, wie beispielsweise Tümpel oder Teiche als Zwischenspeicher und Drainagen inklusive deren Rückbau. Maßnahmen in urbanen Räumen, wie auch Konzepte zur wassersensiblen Stadtentwicklung, die auch den Landschaftswasserhaushalt verbessern können, wurden nicht betrachtet.

Für den Maßnahmenkatalog standen vor allem Maßnahmen gegen Hochwasser, Dürre oder mit Wirkungen für beide Wetterextreme im Fokus. Eine Differenzierung in Maßnahmen zum Umgang mit Hochwasser oder Dürre wurde nicht als zielführend angesehen und daher nicht vorgenommen. Grundsätzlich wurden nur solche Maßnahmen zum Wasserrückhalt ausgewählt, die anhaltende, also nicht einmalige, Wirkungen auf das Wasserdargebot haben können.

Der Maßnahmenkatalog wurde in **fünf Arbeitsschritten** erstellt:

1. Strukturierung des Katalogs nach den Sektoren Wasserwirtschaft, Landwirtschaft und Forstwirtschaft und Auswahl von Kriterien zur Bewertung der Maßnahmen (z. B. Wirkungen auf den Wasserhaushalt, Synergien mit anderen Schutzzielen, Aufwand, Kosten, Zeitrahmen, Zielkonflikte, Hindernisse).
2. Literaturrecherche zu etwa 70 Maßnahmen aus den drei Sektoren, basierend auf wissenschaftlichen Quellen und grauer Literatur. Der Detaillierungsgrad der Maßnahmen orientierte sich am Maßnahmenkatalog der LAWA (LAWA-BLANO, 2020) und wurde mithilfe weiterer Literatur ergänzt und verfeinert (Auswahl):
 - a. (Deutscher Verband für Landschaftspflege e. V., 2021): Verbesserung des natürlichen Wasserrückhaltes in der Agrarlandschaft. Nr. 29 der DVL-Schriftenreihe „Landschaft als Lebensraum“.
 - b. (DWA, 2015): DWA-Themen 2015 - Wasserrückhalt in der Fläche durch Maßnahmen in der Landwirtschaft – Bewertung und Folgerungen für die Praxis. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
 - c. (LAWA, 2022): Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).
 - d. (Office International de l’Eau, 2014). Natural water retention measures. [online]: <http://nwrn.eu/index.php/measures-catalogue> [letzter Aufruf: 08.06.2023].
3. Zusammenfassung von ähnlichen oder gleichartigen Maßnahmen zu einer gemeinsamen Maßnahme, um Redundanzen zu vermeiden und die Übersichtlichkeit zu erhöhen.
4. Bewertung der Maßnahmenwirkungen auf einer Skala von ++ bis -, unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Literatur sowie Experteneinschätzungen des Projektteams. Dabei wurden methodische Herausforderungen identifiziert und folgendermaßen angegangen: Ähnliche oder gleichartige Maßnahmen wurden zusammengefasst, um Redundanzen zu vermeiden und die Übersichtlichkeit zu erhöhen. Die unterschiedlichen Wirkungen in Trocken- und Niedrigwassersituationen wurden berücksichtigt. Die Vielfalt der möglichen Maßnahmen wurde vergleichbar gemacht, indem auch kleinskalige Maßnahmen mit hoher relativer Wirkung gut bewertet wurden. Die Bewertungen sind jedoch pauschal und kontextunabhängig und können je nach konkreten Standortbedingungen variieren.
5. Evaluierung der Bewertungen durch eine Expert*innenbefragung und einen Workshop mit ca. 60 Personen aus den Bereichen Wasserwirtschaft, Naturschutz, Landwirtschaft und Forstwirtschaft. Die Rückmeldungen führten zu weiteren Anpassungen des Katalogs und der Bewertungen.

3.5.2.1 Aufbau des Maßnahmenkatalogs

Jede Maßnahme wird beschrieben inklusive mehrerer Deskriptoren und Kategorien soweit es die Datengrundlage zuließ. Einige Deskriptoren beschreiben die Rahmenbedingungen für die Umsetzung der Maßnahme (Deskriptoren: 1, 4-8), damit Maßnahmenträger für bestimmte Bedingungen mögliche Maßnahmen auswählen können. Andere beschreiben die Wirkung und Wirksamkeit der Maßnahmen (Deskriptoren: 2-3).

Im Folgenden werden diese Deskriptoren und Kategorien kurz erläutert.

Sektorielle Verortung & Art der Maßnahme

Die katalogisierten Maßnahmen werden je nach ihrem möglichen Einsatzort unterschieden:

- ▶ Wasserwirtschaft: Feuchtgebiete & Gewässer,
- ▶ Landwirtschaft,
- ▶ Forstwirtschaft.

Mit den jeweiligen Einsatzorten sind die umsetzungsrelevanten Akteure, also die relevanten Maßnahmenträger, verknüpft.

Darüber hinaus wird die Art der Maßnahmen in den Kategorien naturbasierte Lösungen (NBS, nature based solutions), technische Lösungen, Hybridlösung und Management / Bewirtschaftung definiert.

Wirksamkeit – Wasserhaushalt

Die Wirksamkeit der Maßnahmen wird mit Bezug auf den lokalen Wasserhaushalt bewertet:

Wasserdargebot in Trockenzeiten	Bewirkt die Maßnahme eine Erhöhung der Wasserverfügbarkeit in der Landschaft in Trockenzeiten?
GW-Neubildung	Bewirkt die Maßnahme eine Veränderung der Infiltration von Wasser in GW-Leiter (bei entsprechenden geologischen Bedingungen)?
Wasserrückhalt in Böden	Bewirkt die Maßnahme eine Erhöhung der Speicherung von Wasser in Böden (inklusive Humusauflage)?
Verzögerung des Abflusses	Bewirkt die Maßnahme eine Verzögerung des Abflusses? Dies kann bspw. eine Verzögerung des Abflusses durch Laufverlängerung von Bächen oder eine verzögerte Abgabe des Niederschlagswassers durch die Schwammwirkung von Wäldern sein.
Reduzierte Verdunstung	Bewirkt die Maßnahme eine reduzierte Verdunstung? Verdunstung reduziert den Wasserrückhalt in der Fläche und ist in wasserarmen Regionen zumeist unerwünscht.

Dabei wurde versucht, die Maßnahmen weitmöglichst zu differenzieren, wobei einige Überschneidungen mit ähnlichen Maßnahmen nicht in jedem Fall vermeidbar sind. Trotz der teilweise unterschiedlichen Skalierung der Maßnahmengruppen wurde versucht die Maßnahmenwirkungen auch zwischen den Maßnahmen noch unterscheidbar zu halten. Die Wirkungen hängen vom Umsetzungsmaßstab der Maßnahme ab. Beispielsweise sind die Maßnahmen „Teiche anlegen“ oder „Änderung der Fruchtfolge“ kleinskaliger als der Bau von Rückhaltebecken oder eine Deichrückverlegung. Aus diesen Gründen wurden einzelne Kategorien von kleinskaligen Maßnahmen eher mit neutral bewertet, auch wenn vielleicht grundsätzlich positive Effekte zu

erwarten wären. Die pauschale Wirkungseinschätzung soll nicht darüber hinwegtäuschen, dass Maßnahmen regional und lokal unterschiedliche Wirkungen entfalten. Beispielsweise spielen die jeweilige hydrogeologische, bodenkundliche, topographische, betriebswirtschaftliche und zum Teil auch die naturräumliche Situation eine wichtige Rolle für die im Ergebnis vorliegende Wirksamkeit der Maßnahme. Auch sind räumliche und zeitliche Wechselwirkungen sowie Wirkungen auf unterschiedliche Gewässerfunktionen in der Bewertung nur schwer abzubilden. In Trockensituationen wirkt sich der Wasserrückhalt in der Fläche (positive Bewertung der lokalen Wirkung) ggf. verstärkend auf Niedrigwassersituationen in Fließgewässern aus (negative Bewertung der überregionalen Wirkung). Hier wurde in der Bewertung der Fokus auf die lokale Wirkung gelegt. In der Landwirtschaft und Forstwirtschaft sind Wirkungen von Maßnahmen stark von den individuellen Standortbedingungen (z. B. Boden, Gelände, Klima, aktuelle Nutzung, Schlagteilung, Betriebstyp, Förderbedingungen, rechtlich Rahmen etc.) abhängig, so dass Bewertungen in diesem Bereich mit großen Unsicherheiten behaftet sind und mit entsprechender Vorsicht interpretiert werden müssen.

Wirksamkeit – andere Schutzgüter

Neben den Wirkungen auf den Wasserhaushalt wurden weitere Schutzgüter mit in die Bewertung aufgenommen, um Synergien und nachteilige Wirkungen darzustellen:

Hochwasserschutz	Bewirkt die Maßnahme eine Reduzierung des Hochwasserscheitels?
Erosionsschutz	Bewirkt die Maßnahme eine Reduzierung der Gefahr von Erosion?
Gewässerschutz (physikochemisch)	Bewirkt die Maßnahme eine chemisch-physikalische Verbesserung der Gewässer?
Biodiversität	Bewirkt die Maßnahme eine Erhöhung der Artenvielfalt?
Klimaschutz (Reduktion von Treibhausgasemissionen)	Bewirkt die Maßnahme eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen?
Gewässerschutz (hydromorphologisch)	Bewirkt die Maßnahme eine Vernetzung von Biotopen?

Aufwand und Kosten

Maßnahmen lassen sich unterschiedlich gut umsetzen: Während sich einige Maßnahmen durch Managementanpassungen leicht umsetzen lassen, bspw. mit der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft, z. B. durch angepasstes Pflügen, so sind andere Maßnahmen aufwendiger, da sie mitunter sogar Genehmigungsverfahren, bauliche Umstrukturierungen, oder den Ankauf von Grundstücken notwendig machen. Der Maßnahmenkatalog führt (wo dies möglich ist) auch die Kosten der Umsetzung entsprechender Maßnahmen auf. Ziel ist es, einen groben Richtwert für die Kostenintensität der Umsetzung zu liefern. Hierbei wird in einmalige Investitionskosten zur Maßnahmenumsetzung, Kosten für Flächenbereitstellung und Transaktionskosten unterschieden:

- ▶ Kosten für Planung und Bau
 - „gering“ (bauliche Maßnahmen ohne oder mit einfachen Genehmigungsverfahren, oder Maßnahmen die bisher noch keine gute fachliche Praxis sind)
 - „mittel“
 - „hoch“ (bauliche Maßnahmen mit hohen Kosten und aufwendigen Genehmigungsverfahren (z. B. UVS))
- ▶ Kosten für Flächenbereitstellung (ggf. Ankauf von Flächen)
 - „keine“ (in der Regel kein Ankauf von Flächen nötig)
 - „gering“ (Flächennutzung kann in der Regel über Förderprogramme/Kompensationszahlungen finanziert werden)
 - „mittel“
 - „hoch“ (in der Regel müssen Flächen angekauft werden)
- ▶ Transaktionskosten (gering, mittel, hoch)
 - Kosten, welche zusätzlich zum Bau oder Flächenbereitstellung/-kauf entstehen. Die Bezeichnung Kosten beschränkt sich in diesem Fall nicht nur auf finanzielle, sondern auch auf organisatorische, zeitliche und personelle Kosten.

Zeitraumen bis zur Wirkung

Der Zeitrahmen umfasst den Zeitraum von der Maßnahmenplanung bis zur Maßnahmenumsetzung. Grundsätzlich werden für die Maßnahmenumsetzung vier Zeitintervalle unterschieden:

- ▶ sehr kurzfristig (< 6 Monate)
- ▶ kurzfristig (6 Monate - 2 Jahre)
- ▶ mittelfristig (2 - 5 Jahre)
- ▶ langfristig (> 5 Jahre)

Zu beachten ist, dass es sich hierbei nur um eine grobe Abschätzung handeln kann. Die genaue Dauer der Maßnahmenumsetzung hängt von einer Vielzahl von Kontextfaktoren ab, vor allem von der Anzahl der beteiligten Sektoren und Akteure, der Art des Genehmigungsverfahrens, der Maßnahmenebene sowie von der Komplexität und vom Umfang der Maßnahmen. Zu beachten ist, dass die Vorbereitung und Umsetzung größerer technischer Maßnahmen auch deutlich mehr als 5 Jahre in Anspruch nehmen können.

Flexibilität und Reversibilität

Flexibilität bezeichnet die Fähigkeit einer Maßnahme, sich an unterschiedliche Bedarfe, Ziele oder Umstände anzupassen, ohne ihre Wirksamkeit oder Effizienz zu beeinträchtigen. Reversibilität bezeichnet die Möglichkeit, eine Maßnahme rückgängig zu machen oder abzubrechen, falls sie unerwünschte Nebenwirkungen hat oder nicht mehr benötigt wird.

Mögliche Zielkonflikte

Maßnahmen können im Konflikt mit anderen Zielen stehen. Der Katalog unterscheidet Zielkonflikte nach Auswirkungen auf Wasserqualität, Flächenbedarf und weiteren Zielkonflikten. Zielkonflikte in diesen Bereichen können sowohl abgemildert als auch verstärkt werden und werden entsprechend („potenziell abmildernd“ und „potenziell entstehend“) im Katalog aufgeführt. So hat bspw. die Wiedervernässung von Feuchtgebieten Zielkonflikte mit dem Flächenbedarf in der Landwirtschaft oder die Grundwasseranreicherung mit der Grundwasserqualität.

Potenzielle Hindernisse/Herausforderungen

In dieser Kategorie werden potenzielle Hindernisse und Herausforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung der Maßnahmen aufgeführt. Dies können bspw. planerische Gründe sein, wie das Fehlen von notwendigen Grundstücken oder Bebauungsrechten für die Umsetzung einer Maßnahme.

Abbildung 81: Struktur des Katalogs für Maßnahmen in der Fläche

Maßnahme		Text
Beschreibung		Text
Maßnahmenummer		Zahl
Sektor		Welcher Sektor ist verantwortlich für die Umsetzung der Maßnahme?
Art der Maßnahme (NBS, technisch, Hybridlösung, Management / Bewirtschaftung)		Text
Wirksamkeit - Wasserhaushalt	Wasserdargebot in Trockenzeiten	++ = große vorteilhafte Wirkung; + = vorteilhafte Wirkung; ?/0 = neutrale oder nicht bekannte Wirkung; - = nachteilige Wirkung
	GW-Neubildung	
	Wasserrückhalt in Böden	
	Verzögerung des Abflusses	
	Reduzierte Verdunstung	
Synergien mit weiteren Schutzzielen	Hochwasserschutz	
	Erosionsschutz	
	Gewässerschutz (physikochemisch)	
	Biotopvernetzung	
	Artenvielfalt	
	Klimaschutz (Reduktion von Treibhausgasemissionen)	
Aufwand	Kosten für Planung und Bau	Auswahl (gering, mittel, hoch)
	Kosten für Flächenbereitstellung	keine: in der Regel kein Ankauf von Flächen nötig gering: Flächennutzung kann in der Regel über Förderprogramme/Kompensationszahlungen finanziert werden hoch: in der Regel müssen Flächen angekauft werden
	Transaktionskosten	Auswahl (gering, mittel, hoch)
	Anmerkungen	bspw. Wegfall von Maßnahmen, Aufkauf von Flächen, Bauwerk
Zeitraumen bis zur Wirkung		- sehr kurzfristig (< 6 Monate) - kurzfristig (< 2 Jahre) - mittelfristig (2 - 5 Jahre) - langfristig (> 5 Jahre)
Flexibilität / Reversibilität		hoch: Änderung jederzeit möglich mittel: Änderung mit Aufwand verbunden gering: Änderung nur schwer bis nicht möglich
Ggfs. Zielkonflikte		Text
Ggfs. Hindernisse/Herausforderungen		Text
Literatur Hauptquelle Maßnahme		Text
Literatur Hauptquelle Maßnahme - Link		Text
Weitere Quellen		Text

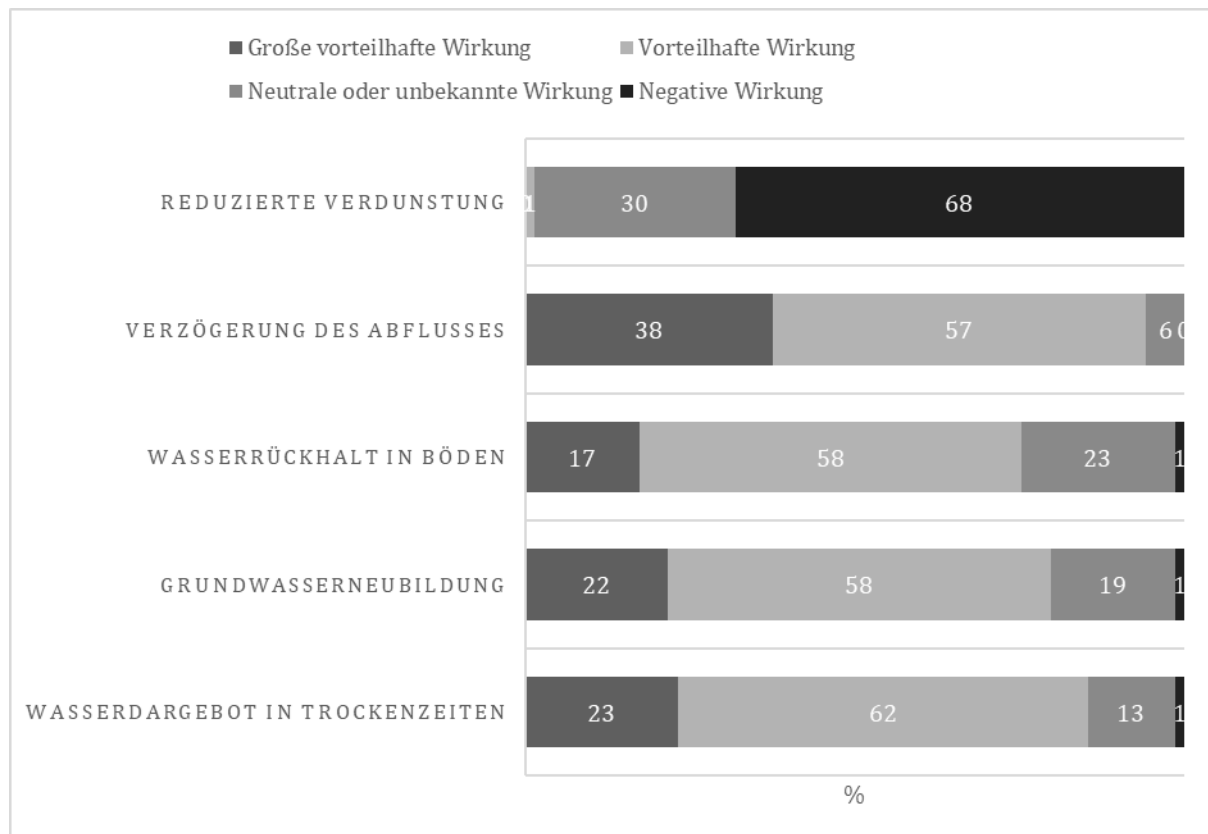
Quelle: eigene Darstellung, Ecolgic Institut.

Der Katalog ist für eine Auswahl an Kategorien im Anhangband (s. Anhang E) einzusehen. Der vollständige Katalog ist auf der UBA-Webseite veröffentlicht²⁵.

3.5.3 Zusammenfassung

Der Katalog umfasst 69 Maßnahmen zur Erhöhung des Wasserrückhalts in der Landschaft sowie ihre Wirkungen für den Wasserhaushalt und andere Schutzziele. Die Auswertung des Katalogs zeigt, dass die meisten Maßnahmen positive oder sehr positive Wirkungen auf die Ziele für den lokalen Wasserhaushalt haben.

Abbildung 82: Wirkungen der Maßnahmen auf den Wasserhaushalt (n=69).



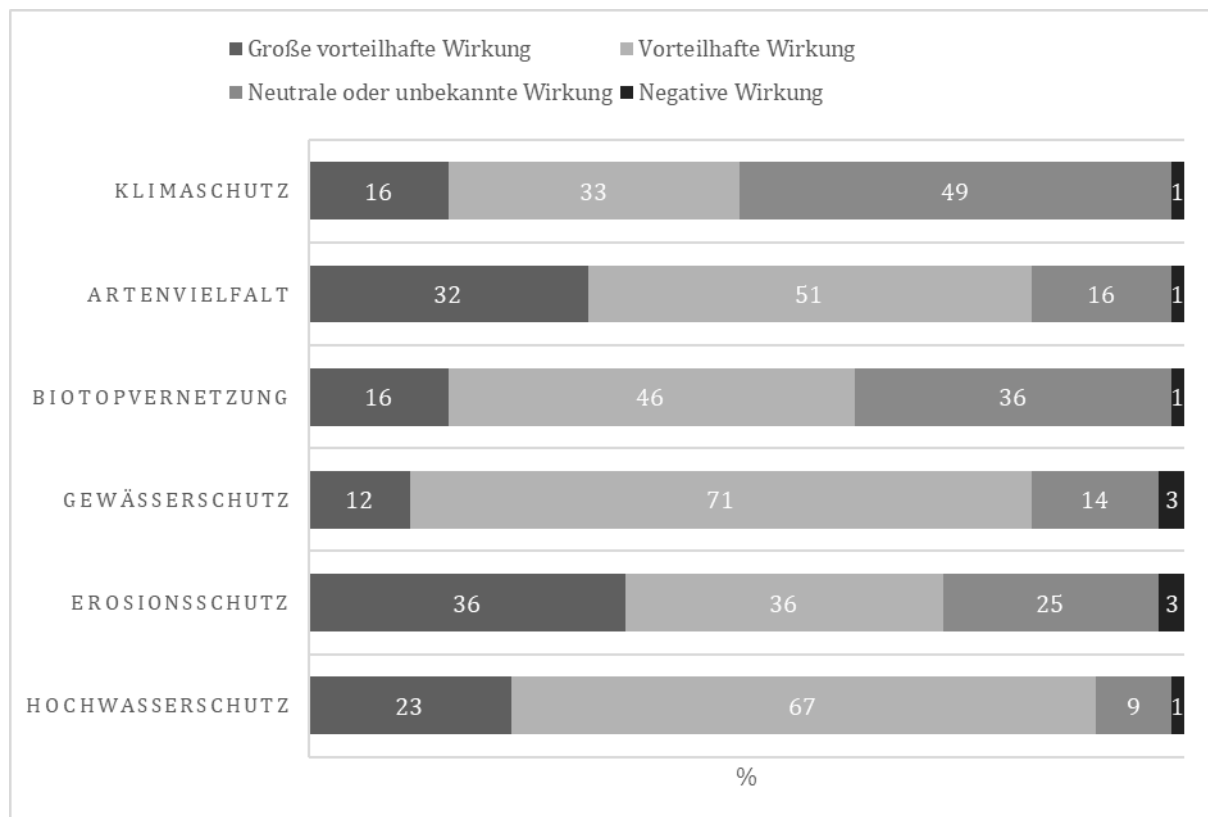
Quelle: eigene Darstellung, Ecologic Institut.

Davon ausgenommen ist die Verdunstung, die durch eine Zunahme von Biomasse und der Fläche für Oberflächengewässern erhöht wird und sich negativ auf den lokalen Wasserrückhalt niederschlägt. Die einzige Maßnahme, die eine positive Wirkung auf dieses Ziel hat, ist die künstliche Grundwasseranreicherung. Verdunstung wird in diesem Katalog als ein negativer Faktor gewertet, der lokal das Wasser reduziert und die Trockenheit verstärkt. Andererseits hat Verdunstung positive Effekte, denn die Luft wird durch Verdunstung gekühlt und die Luftfeuchtigkeit erhöht sich, was zu einem klimatischen Ausgleich beiträgt. Verdunstung hat außerdem positive Wirkungen auf den angestrebten natürlichen Wasserhaushalt (vgl. LAWA 2021), da sie den Wasserkreislauf aufrechterhält und die Wolkenbildung fördert, z. B. führt Verdunstung überregional zu mehr Niederschlag. Die Bewertung von Verdunstung sollte daher im Zusammenhang mit dem ganzen System und seinen Zielen betrachtet werden. Die Maßnahmen haben auch positive oder

²⁵ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/extremereignisse/niedrigwassertrockenheit>

sehr positive Wirkungen auf andere Schutzziele, wie den Klimaschutz, die Biodiversität, die Boden- und die Wasserqualität.

Abbildung 83: Wirkungen der Maßnahmen auf weitere Schutzziele (n=69).



Quelle: eigene Darstellung, Ecologic Institut.

Die Kosten für die Umsetzung der Maßnahmen wurden in drei Kategorien (Planung und Bau, Transaktionen und Flächenbereitstellung) unterteilt und als gering, mittel oder hoch eingeschätzt. Die Mehrheit der Maßnahmen hat geringe oder keine Kosten in allen drei Kategorien. Der Zeitrahmen für die Umsetzung und Wirkung der Maßnahmen wurde als sehr kurzfristig (weniger als 6 Monate), kurzfristig (weniger als 2 Jahre), mittelfristig (2 bis 5 Jahre) oder langfristig (mehr als 5 Jahre) eingeschätzt. Die Mehrheit der Maßnahmen hat einen sehr kurzfristigen oder kurzfristigen Zeitrahmen bis zur Wirkung.

Sechs besonders empfehlenswerte Maßnahmen wurden identifiziert, die einen positiven Effekt sowohl auf den Hochwasserschutz als auch auf das Wasserdargebot in Trockenzeiten, geringe oder keine Kosten für Bau und Planung, Transaktionen und Flächenbereitstellung und eine sehr kurzfristige oder kurzfristige Wirkung zeigen. Diese Maßnahmen sind:

- ▶ Reaktivierung von Binneneinzugsgebieten (Landwirtschaft, naturbasierte Lösung)
- ▶ Anlage von Sedimentauffangteichen²⁶ (Forstwirtschaft, naturbasierte Lösung)
- ▶ Angepasste Auswahl der Kulturen und der Fruchtfolge zum besseren Wasserrückhalt (Landwirtschaft, Bewirtschaftung)

²⁶ Sedimentauffangteiche sind künstlich angelegte Teiche, die in einem Netz von Waldgräben angelegt werden, um die Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses zu verlangsamen und die Ablagerung von Schwebstoffen zu bewirken.

- ▶ Flächen hangparallel bewirtschaften (Landwirtschaft, Bewirtschaftung)
- ▶ Etablierung von Pufferstreifen/Ackerrandstreifen (Landwirtschaft und Wasserwirtschaft, naturbasierte Lösung)
- ▶ Verschluss, Rückbau oder Steuerung von Drainagen oder Entwässerungsgräben (Wasserwirtschaft und Landwirtschaft, Bewirtschaftung)

Der Katalog kann als systematische Aufstellung und Entscheidungshilfe für die Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen zur Erhöhung des Wasserrückhalts in der Landschaft dienen. Er kann auch als Grundlage für weitere Forschungs- und Modellierungsarbeiten genutzt werden, um die räumliche Dimension und die kumulativen Effekte der Maßnahmen zu untersuchen.

3.6 Ableitung von Regeln zur Entscheidungsfindung und Priorisierung von Nutzungen bei wasserbezogenen Nutzungskonflikten – konzeptionelle Beiträge

Autor*innen: Vidaurre, R., Dworak, T., Schmidt, G.

3.6.1 Einleitung

Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten weisen eine große Bandbreite an Interventionslogiken und -ansätzen auf unterschiedlichen Governanceebenen auf. Während Planungs- und Vorsorgemaßnahmen i.d.R. noch vor dem Auftreten von Nutzungskonflikten greifen, gibt es auch eine Reihe von Maßnahmen, die erst in einem konkreten Dürre- oder Konfliktfall zur Anwendung kommen sollen.

Die in diesem Kapitel dargelegten Priorisierungsansätze und die für Deutschland entwickelten Empfehlungen besitzen Relevanz sowohl für Priorisierungsmaßnahmen im Dürrefall, die kurzfristig umzusetzen sind, als auch für strategische Ansätze, die einen vorsorgenden Charakter aufweisen und i.d.R. längere Vorlaufzeiten haben.

Dieser Arbeitsschritt liefert **erste konzeptionelle Beiträge** für die in der NWS angekündigte, bundesweit abgestimmte Leitlinie, welche einen **einheitlichen Orientierungsrahmen für lokal oder regional zu treffende Priorisierungsentscheidungen** zur Vermeidung oder Minderung von wasserbezogenen Konflikten schaffen soll. Dieser Orientierungsrahmen soll u.a. sicherstellen, „dass jederzeit ausreichende, möglichst ortsnahe Ressourcen für die Trinkwasserversorgung zur Verfügung stehen“ (BMUV, 2023, S. 86). Laut NWS soll die besondere Bedeutung der Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser (Vorrang der Trinkwasserversorgung) darüber hinaus auch für weitere kritische Bereiche der Daseinsvorsorge (u.a. Lebensmittel- und Gesundheitsversorgung) gelten. Zudem sollen ökologische und ökonomische Wasserbedarfe in diesen konzeptionellen Beiträgen berücksichtigt werden.

Eine weitere Grundlage – wenn auch auf Basis einer anderen Ausgangslage - ist das Wasserversicherungsgesetz²⁷ (WasSiG). Aufgabe der Trinkwassernotversorgung nach WasSiG ist die Gewährleistung einer Grundversorgung der Bevölkerung in Deutschland mit überlebensnotwendigem Trinkwasser im Verteidigungsfall. Nach diesem beträgt die vorgesehene Wassermenge pro Person und Tag 15 Liter. Darüber hinaus muss Trinkwasser für Krankenhäuser und andere ver-

²⁷ <https://www.gesetze-im-internet.de/wassig/>

gleichbare Einrichtungen, Betriebswasser für überlebenswichtige Betriebe, eine Löschwasserversorgung sowie auch Wasser für Nutztiere bereitgestellt werden. Im Zivilschutzfall erlauben die Vorschriften des Wassersicherstellungsgesetzes teilweise herabgesetzte Qualitätsanforderungen. Mit den sogenannten „Qualitätsstandards für die Anlagen der Trinkwassernotversorgung“ hat der Bund Richtwerte für die Wasserqualität festgelegt, die für eine Versorgungsdauer von bis zu 30 Tagen ausgelegt sind.²⁸

Die nachfolgenden konzeptionellen Beiträge sollen eine Grundlage für im Weiteren mit den Bundesländern und anderen Akteur*innen zu erarbeitende Regeln und Kriterien bilden, um transparente Entscheidungen über ggf. erforderliche Nutzungspriorisierungen im Fall regionaler temporärer Wasserknappheit zu treffen. Es ist dabei zwischen Krisenmaßnahmen bei Extremereignissen und Planungs- und Vorsorgemaßnahmen zur Sicherstellung einer nachhaltigen Wasserversorgung zu unterscheiden. Zu den Vorteilen solcher strukturierter und transparent kommunizierter Nutzungspriorisierungen zählen u.a. eine erhöhte Planungs- und Verfahrenssicherheit für die unterschiedlichen Akteur*innen.

3.6.2 Vorgehensweise

Im folgenden Unterkapitel werden die Priorisierungsansätze dreier EU-Mitgliedsstaaten kurz zusammengefasst dargestellt: Spanien, Frankreich und die Niederlande. Diese Länder wurden aufgrund der langjährigen Erfahrungen mit Dürreplanung und der darauf beruhenden, differenzierten Herangehensweisen ausgewählt. Spanien und die Niederlande waren die ersten EU-Mitgliedsstaaten, die eine nationale Dürreplanung ins Leben gerufen haben. Die Darstellung beruht auf einer Analyse ausgewählter Gesetzestexte und Strategiedokumente, wie auch auf Vorerfahrungen der Autor*innen mit den Wassermanagementsystemen dieser Länder.

In einem letzten Unterkapitel werden Empfehlungen für mögliche Priorisierungsregeln für den deutschen Kontext entwickelt.

3.6.3 Hauptmerkmale ausgewählter Priorisierungsansätze

Einführend sei darauf hingewiesen, dass in einigen dieser Länder die Nutzungspriorisierungen sowohl eine Rolle für die Maßnahmen in einem konkreten Dürre- bzw. Konfliktfall als auch für langfristige Planungs- und Vorsorgemaßnahmen spielen. In diesen Fällen kann man von einem Zusammenspiel der Priorisierung für die Notfallplanung mit der Priorisierung des Risikomindeungsmanagements sprechen, da die Priorisierungsansätze miteinander verknüpft sind. Die Priorisierungen gelten in der Regel für ein Flusseinzugsgebiet oder eine Untereinheit davon.

3.6.3.1 Spanien

Priorisierung auf der Planungsebene: Das nationale Wassergesetz Spaniens (Texto Refundido de la Ley de Aguas, TRLA, 2001) behandelt im Kapitel III die Wassergenehmigungen und -lizenzen. Im Art. 60 wird die Rangfolge der Nutzungen behandelt. Das Gesetz listet acht sektorale Nutzungen auf, für welche die Flussgebietsorganisationen für ihr Einzugsgebiet eine Nutzungspriorisierung festlegen dürfen (wobei die Versorgung der Bevölkerung und die der Industrie in urbanen Räumen mit geringem Wasserverbrauch immer an erster Stelle stehen muss). Falls die Flussgebietsorganisationen keine eigene Priorisierung definieren, gilt die Reihenfolge der Nutzungen,

²⁸ https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Kritische-Infrastrukturen/Sektoren-Branchen/Wasser/Wassersicherstellung/wassersicherstellung_node.html

wie sie im Gesetz aufgelistet sind. Die Liste umfasst sieben Nutzungen, wobei eine achte und letzte Nutzungsklasse „weitere Nutzungen“ umfasst.

Wasserlizenzen („concesiones“), die sowohl für die Entnahme von Grundwasser als auch von Oberflächengewässern gelten, können für eine in der Priorisierung höherliegende Nutzungsklasse enteignet werden. Innerhalb derselben Nutzungsklasse werden, soweit die Nutzungen miteinander inkompatibel sind, solche bevorzugt, welche einen größeren Nutzen für das Gemeinwohl haben bzw. welche mit technischen Verbesserungen einhergehen, die zu geringerem Wasserverbrauch oder aber zu einer Verbesserung der Wasserqualität führen. Bei der Erteilung der Lizenzen muss den Erfordernissen des Ressourcenschutzes Rechnung getragen werden.

Ein Blick in die Bewirtschaftungspläne der Flussgebietsorganisationen zeigt, dass es sowohl Pläne gibt, die eine eigene Priorisierung festlegen, wie auch solche, die die Standard-Priorisierung von Art. 60 §3 übernehmen. Dabei werden zum Teil Ergänzungen für die Priorisierung des Wassergesetzes geleistet.²⁹

Priorisierung im Dürrefall: Seit 2007 gibt es in den spanischen Flusseinzugsgebieten, parallel zu den Plänen und Maßnahmenprogrammen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), gesonderte Dürre- und Dürreerisikomanagementpläne. Die Erfahrungen des ersten Planungszyklus fließen in die aktuell gültigen Dürrepläne ein, welche seit Dezember 2018 gelten.

In Spanien erfolgt die Dürreplanung nach auf nationaler Ebene entwickelten Leitlinien, welche Prinzipien und Ansätze der Planung festlegen. Ein System hydrologischer Indikatoren, die die Grundlage für die Definition der Dürrephasen bilden, wurde ebenfalls auf nationaler Ebene eingeführt. Dabei werden vier Phasen in einer Art Ampelsystem definiert: (1) Normal (grün), (2) Vorwarnung (gelb), (3) Warnung (orange) und (4) Notfall (rot).

In den Plänen selbst werden zahlreiche Maßnahmen verschiedener Art festgelegt, die bei Erreichung der jeweiligen Dürrephase umzusetzen sind. Die für diesen Arbeitsschritt relevante Frage der Nutzungspriorisierung wird aber vor allem in den sogenannten „operativen Maßnahmen“ mit Bezug auf Wassernachfrage behandelt („Medidas B.1“ bzw. „B.2“), wie auch in den Maßnahmen, welche das Management des Angebots und der Nachfrage im Notfall kombinieren („Medidas B.3“). Diese Maßnahmen werden auf der Ebene einzelner Planungseinheiten (auf Spanisch UTE – Unidad Territorial de Escasez) definiert.

Genau diese eher lokale Definition der Maßnahmen – eine durchschnittlich große UTE entspricht ungefähr der Größe vier durchschnittlich großer Landkreise in Deutschland, wobei die Bevölkerungsdichte in Spanien signifikant geringer ist – wird allerdings auch als problematisch angesehen. Dies weil sie mit einer Nähe von Umsetzungsbehörden und Akteure einhergeht, die oft genug dazu führen würde, dass es der für den Dürrefall geplanten Maßnahmen an der notwendigen Stringenz mangelt bzw. dass gewisse Sektoren stark verschont bleiben.

An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass die Nutzungspriorisierung in Spanien nicht unbedingt dazu führt, dass weniger prioritäre Nutzungen früher von Einsparmaßnahmen betroffen

²⁹ Anhänge I bis XII (jeweils Kapitel 2) von <https://www.boe.es/boe/dias/2016/01/19/pdfs/BOE-A-2016-439.pdf>

sind als die Nutzungsklassen, die höher priorisiert sind. Aufgrund des vierstufigen Systems werden bei Phasenwechsel mehrere Nutzungen gleichzeitig mit Einschränkungen belegt, wobei die Nutzungen mit höherer Priorität i.d.R. von weniger starken Einschränkungen betroffen sind.

Um dies zu veranschaulichen sei an dieser Stelle eine Auswahl der sogenannten „spezifischen Maßnahmen“ für die UTE „Madre de las Marismas“ im Einzugsgebiet des Guadalquivir knapp zusammengefasst (Kapitel 7.2.5.2, Plan Especial de Sequía DH Guadalquivir, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, 2018). Tabelle 13 verdeutlicht die Einschränkungen von zwei Nutzungen über die verschiedenen Dürrephasen: Trinkwasserversorgung und landwirtschaftliche Bewässerung. Es ist davon auszugehen, dass in dieser spezifischen UTE keine weiteren Nutzungen von Relevanz sind.

Tabelle 13: Auswahl der spezifischen Maßnahmen für die UTE „Madre de las Marismas“, Einzugsgebiet des Guadalquivir

	Normal	Vorwarnung	Warnung	Notfall
Nutzung: Trinkwasser-versorgung	-	-	Minderung des angebotenen Wassers bis zu 5%. Beschränkung der nicht essenziellen urbanen Nutzungen (Bsp. Sprengung der Gärten).	Minderung des angebotenen Wassers, mindestens 5%, bis zu 10%.
Nutzung: landwirtschaftliche Bewässerung	-	Eine progressive Beschränkung der Bewässerungsvolumina entsprechend der Indikatorenentwicklung bis zu 25% der Gesamtmenge.	Eine progressive Beschränkung der Bewässerungsvolumina entsprechend der Indikatorenentwicklung zwischen 25% und 50% der Gesamtmenge.	Eine progressive Beschränkung der Bewässerungsvolumina entsprechend der Indikatorenentwicklung von mindestens 50% der Gesamtmenge.

Kriterien für den Dürrefall: Spanien definiert zwei Arten von für Dürren relevante Indikatoren. Die Indikatoren zu „dauerhafter Dürre“ werden rein aufgrund meteorologischer Daten (Niederschlag) definiert. Die Indikatoren zu Wasserknappheit dagegen bilden sich aus einer Kombination von Größen wie z. B. Volumina in Talsperren, Grundwasserstände, Abflussmengen, usw. Wie oben schon erwähnt wurde dieses System hydrologischer Indikatoren, die die Grundlage für die Definition der Dürrephasen bilden, auf nationaler Ebene eingeführt. Somit können sich Behörden bei der formalen Erklärung von Dürrephasen auf national festgelegte Kriterien berufen.

Die Berichterstattung ist von einer hohen Datentransparenz gekennzeichnet. Die monatlich ausgegebenen Berichte sind aktuell auf der entsprechenden Webseite abrufbar.

Tabelle 14: Zusammenfassung spanisches Dürremanagementsystem

Hervorzuhebende Aspekte des spanischen Dürremanagementansatzes

Transparentes Phasensystem, welches mithilfe öffentlich kommunizierter Indikatoren Übergänge zwischen den verschiedenen Phasen kommuniziert. Das nationale System legitimiert die Entscheidungen der zuständigen Behörden.

Eine adäquate Umsetzung des Subsidiaritätsprinzips: Die Verbindung von auf nationaler Ebene festgelegten Indikatoren und Planungsansätzen mit Entscheidungsfreiräumen für (a) die Flussgebietsorganisationen und (b) die an der Erstellung der Dürremanagementpläne beteiligten lokalen Behörden.

Zu ergreifende Maßnahmen werden im Voraus festgelegt.

3.6.3.2 Frankreich

Priorisierung im Notfall: Der derzeit gültige nationale Leitfaden für Dürrebeschränkungen, welcher in der ersten Jahreshälfte 2023 aktualisiert wurde, definiert lediglich zwei Gruppen von Nutzungen mit unterschiedlicher Priorität:

- ▶ Prioritäre Nutzungen: Gesundheit, zivile Sicherheit und Trinkwasserversorgung
- ▶ Nicht prioritäre Nutzungen: alle weiteren.

Der französische Ansatz hat zahlreiche Gemeinsamkeiten mit dem spanischen System. Zum einen werden auch in Frankreich vier mit Farben gekennzeichneten Dürrephasen definiert, wobei die erste nicht wie in Spanien dem Normalfall, sondern schon eine erste Dürrephase, bezeichnet (1) „Wachsamkeit“ (keine Farbe), entspricht. Die weiteren Phasen sind (2) Alarm (gelb), (3) erhöhte Alarmbereitschaft (orange) und (4) Krise (rot).

Darüber hinaus gibt es zwei weitere, wesentliche Gemeinsamkeiten: (1) auf nationaler Ebene festgelegte Leitlinien für auslösende Bedingungen und (2) die Umsetzung des Subsidiaritätsprinzips. Im Folgenden werden diese Aspekte kurz erörtert.

(1): Der auf nationaler Ebene festgelegte Leitfaden für die Umsetzung von Maßnahmen zur Wassernutzungsbeschränkung in Dürrezeiten³⁰ beschreibt eine Reihe von Auslösebedingungen, die zur vorübergehenden Einschränkung der Wassernutzung führen können und die in den entsprechenden Verordnungen auf Ebene von Région oder Department berücksichtigt werden können. Interessant ist die Möglichkeit, diese Bedingungen je nach Jahreszeit anzupassen. Somit können sogar zu Beginn der Niedrigwassersaison Maßnahmen ergriffen werden, die den Rückgang der verfügbaren Wasserressourcen verlangsamen. Es ist sogar möglich, Bedingungen für die Auslösung der Maßnahmen außerhalb der Niedrigwasserperiode festzulegen.

(2): Auch in Hinblick auf die umzusetzenden Maßnahmen erhalten die regionalen und lokalen Umsetzungsbehörden in Frankreich einen Orientierungsrahmen mit Prinzipien und Bedingungen, sind aber selbst zuständig für die Entwicklung des konkreten, in ihrer Region gültigen Ansatzes (Maßnahmen). Dabei wurden in Frankreich sogenannte „Mindestmaßnahmen zur Wasserverbrauchsbeschränkung“ von den Flussgebietsorganisationen definiert, also Mindestanforderungen für die festzulegenden Beschränkungen nach Nutzungen, Unterkategorien von Nutzungen und Arten von Tätigkeiten. Die umsetzenden Behörden dürfen strengere Maßnahmen

³⁰ „Guide circulaire de mise en oeuvre des mesures de restriction des usages de l'eau en période de sécheresse“ von Mai 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20circulaire%20secheresse-conforme1605.pdf>

ergreifen und auch zusätzliche Maßnahmen (bspw. für das Waschen von Booten in Küstenregionen) definieren.

Tabelle 15 ist ein Auszug aus der Tabelle der Mindestmaßnahmen zur Wasserverbrauchsbeschränkung, wie sie im nationalen Leitfaden zu finden ist. Sie verdeutlicht den in Frankreich verfolgten Ansatz.

Tabelle 15: Auszug aus der Tabelle der Mindestmaßnahmen zur Wasserverbrauchsbeschränkung aus dem nationalen Leitfaden für Frankreich

Nutzung	Wachsamkeit	Alarm	Erhöhte Alarmbereitschaft	Krise	P	E	C	A
Bewässerung von Gemüsegärten	Sensibilisierung der Öffentlichkeit und der lokalen Behörden für die Regeln einer sinnvollen Wassernutzung zum Sparen von Wasser.	Zwischen 11 und 18 Uhr verboten.	Von 9 bis 20 Uhr verboten.		X	X	X	X
Bewässerung von Waldflächen, Rasenflächen, Blumenbeeten, Plätzen		Zwischen 11 und 18 Uhr verboten.	Verboten. Ausgenommen sind Bäume und Sträucher, die vor weniger als 2 Jahre in den Boden gepflanzt wurden (dann ist eine Bewässerung von 20:00 bis 09:00 Uhr möglich).		X	X	X	X
Befüllung und Entleerung von nicht zur gemeinschaftlichen Nutzung bestimmten Schwimmbecken (über 1m ³)	Sensibilisierung der Öffentlichkeit und der lokalen Behörden für die Regeln einer sinnvollen Wassernutzung zum Sparen von Wasser.	Das Auffüllen ist verboten mit Ausnahme des Nachfüllens und der Erstbefüllung, wenn mit dieser vor Beginn der ersten Beschränkungen begonnen wurde.		Verboten.	X			
Befüllen und Entleeren von Schwimmbädern zur gemeinschaftlichen Nutzung		Erlaubt.	Befüllung verboten außer bei Neubefüllung oder bei Erstbefüllung oder aus behördlichen Gründen bzw. aus gesundheitlichen Gründen.	Das Befüllen ist verboten, es sei denn, es wird nachgerüstet oder die regionale Gesundheitsbehörde oder Vorschriften aus Gesundheitsgründen dies verlangen.		X	X	
Trinkwasserversorgung der Bevölkerung (vorrangige Verwendungszwecke: Gesundheit, Sanitärversorgung, zivile Sicherheit).		Keine Einschränkung außer im Fall einer spezifischen kommunalen Verordnung.				X	X	X

Legende: P = Einzelperson, E = Unternehmen, C = Gemeinschaft, A = Landwirt

Kriterien für den Dürrefall: Wie in Spanien wurde in Frankreich ein System von auslösenden Bedingungen eingeführt, das den Übergang zwischen den oben dargelegten Phasen regelt. Dazu zählen u.a. Schwellenwerte, zu berücksichtigende Messpunkte für Durchflussmessungen und

Grundwasserpegel, Gewässertemperaturen aber auch hydrometeorologische Vorhersagen. Die in einem Flusseinzugsgebiet geltenden Schwellenwerte werden von der regionalen Ebene festgelegt, beispielsweise als Durchflussmessungen in Flüssen.

Tabelle 16: Zusammenfassung französisches Dürremanagementsystem

Hervorzuhebende Aspekte des französischen Dürremanagementansatzes

Transparentes Phasensystem und die Umsetzung des Subsidiaritätsprinzips (ähnlich wie in Spanien).

Die Möglichkeit, die Auslösebedingungen je nach Jahreszeit anzupassen. Somit können sehr frühzeitig Maßnahmen ergriffen werden, wenn die Bedingungen den dieser Jahreszeit üblichen Indikatoren nicht entsprechen.

Auf regionaler Ebene (von den Flussgebietsorganisationen) definierte Mindestmaßnahmen zur Wasserverbrauchsbeschränkung, die Mindestanforderungen für die festzulegenden Beschränkungen für Nutzungen, Unterkategorien von Nutzungen und Arten von Tätigkeiten festlegen. Umsetzende Behörden auf der lokalen Ebene müssen mindestens diese Maßnahmen umsetzen, dürfen aber sowohl strengere als auch zusätzliche Maßnahmen festlegen.

3.6.3.3 Die Niederlande

Priorisierung im Notfall: In den Niederlanden wurde für Dürren auf nationaler Ebene und unter dem Namen „Verdrängungsreihe“ (Verdringingsreeks) eine Priorisierung der Wassernutzungen definiert.³¹ Abweichend von den Beispielen in Spanien und Frankreich, wie auch von der frühen Empfehlung der EU-Kommission³² zum Thema, steht in diesem Priorisierungskonzept nicht die Trinkwasserversorgung an erster Stelle. Tabelle 17 zeigt die in der Verdrängungsreihe definierten Nutzungsklassen und die dazugehörigen Nutzungen.

³¹ https://www.infomil.nl/publish/pages/162770/handleiding_verdringingsreeks_-_versie_2020.pdf

³² Communication addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union, 2007, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0414:FIN:en:PDF>

Tabelle 17: Die Verdrängungsreihe (Art. 2.1, niederländische Wasserverordnung)

Kategorie 1 Sicherheit (Schutz vor Überschwemmungen) und Prävention irreversibler Schäden	Kategorie 2 Versorgungsunternehmen	Kategorie 3 Kleinräumige hochwertige Nutzung	Kategorie 4 Andere Interessen
1. Stabilität des Hochwasserschutzes 2. Verhinderung von Bodensenkung (Torfböden) 3. Natur (verhindern von irreversiblen Schäden, sonst Kategorie 4) <i>Geht vor 2</i>	1. Trinkwasserversorgung (zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit, sonst Kategorie 4) 2. Energieversorgung (nur bei Gefährdung der Versorgungssicherheit, sonst Kategorie 4) <i>Geht vor 3</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitbegrenzte Sprengen kapitalintensiver Kulturen • Prozesswasser <i>Geht vor 4</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Schifffahrt • Landwirtschaft • Natur (falls keine irreversiblen Schäden zu erwarten sind) • Industrie • Erholung • Fischerei • Trinkwasserversorgung (außer Kategorie 2) • Energieversorgung (außer Kategorie 2) • Andere Interessen

Innerhalb der Kategorien 1 und 2 gibt es eine Prioritätenreihenfolge, die auf nationaler Ebene festgelegt wird. Innerhalb der Kategorien 3 und 4 dagegen wird keine Priorisierung auf nationaler Ebene festgelegt. Die Provinzen oder aber die Wasserverbände können für ihre Region ihre eigene Priorisierung der Nutzungen von Kategorie 3 und von Kategorie 4 festlegen. Nutzungen aus der Kategorie 4 dürfen allerdings nicht vor Nutzungen aus der Kategorie 3 priorisiert werden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich diese Nutzungspriorisierung auf Oberflächenwasser beschränkt.

Tabelle 18: Zusammenfassung niederländisches Dürremanagementsystem

Hervorzuhebende Aspekte des niederländischen Dürremanagementansatzes
Ein Zusammenspiel von national festgelegten, prioritären Nutzungen nach Wassernutzungssektoren/-typen einerseits und Entscheidungsräumen für regionale bzw. lokale Entscheidungsträger andererseits (Subsidiaritätsprinzip in der möglichen Priorisierung innerhalb von Kategorien 3 und 4).
Unterschiedliche Priorisierungen ein und derselben Nutzung je nachdem, ob irreversible Schäden verursacht werden könnten (Natur) bzw. die Versorgungssicherheit in Frage steht (Trinkwasser- und Energieversorgung).
Eine Priorisierung nach ökonomischen Kriterien im Vorrang von gleichzeitig kleinräumigen und hochwertigen Nutzungen (z. B. Gewächshauskulturen), bei denen mit wenig Wasser die Nutzung aufrechterhalten werden kann.

3.6.4 Regeln zur Entscheidungsfindung und Priorisierung von Nutzungen bei wasserbezogenen Nutzungskonflikten - Empfehlungen für Deutschland

Empfehlungen für Priorisierungsregeln, die die Wassernutzungen in Deutschland betreffen, sollten nicht alleine stehen, sondern in einen Rahmen zum Umgang mit Dürrephasen integriert werden. Die Autor*innen halten es also für nicht zielführend, an dieser Stelle eine reine Prioritätenliste von Nutzungen vorzuschlagen, da eine solche Liste zwar auf wissenschaftlichen Kriterien basieren muss, aber auch eine breite öffentliche Diskussion braucht. Es erscheint zielführender, die Frage nach einer Nutzungspriorisierung gemeinsam mit der Frage eines solchen Rahmens zum Umgang mit Dürrephasen oder bei sonstiger Wasserknappheit (etwa hervorgerufen durch eine Wasserverschmutzung oder Wasserressourcenübernutzung) zu behandeln. Die Maßnahmen sollten außerdem in Kombination mit Vorsorgemaßnahmen gesehen werden.

Im Folgenden werden einige Empfehlungen für den deutschen Kontext ausgesprochen, die sowohl den Rahmen als auch die Nutzungspriorisierungen betreffen. Allerdings wirft eine Behandlung von Dürren komplexe Fragestellungen auf, für die es in vielen Fällen im deutschen Kontext noch keine klaren Antworten gibt. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel auch eine Reihe von offenen Fragen aufgelistet, für die es aus Sicht der Autor*innen Antworten bedarf, bevor ein funktionierendes System zum Umgang mit wasserbezogenen Nutzungskonflikten etabliert werden kann.

3.6.4.1 Kontext in Deutschland

Wasserhaushaltsgesetz

Gemäß § 27 WHG ist die Genehmigung für ein konkretes Vorhaben danach zu versagen, wenn das Verschlechterungsverbot verletzt ist oder wenn das Vorhaben die Erreichung eines guten ökologischen und chemischen Zustandes bzw. eines guten ökologischen Potenzials eines Oberflächengewässers gefährdet wird. Dies kann nicht nur durch stoffliche Einleitungen passieren, sondern auch durch Wasserentnahmen, wenn a) die Verdünnung von Stoffen nicht mehr ausreichend gegeben ist, oder b) die Wasserstände so sinken, dass es zu Schäden der Biologie kommt.

§ 47 WHG legt fest, dass das Grundwasser so zu bewirtschaften ist, dass eine Verschlechterung seines mengenmäßigen und seines chemischen Zustands vermieden wird und ein guter mengenmäßiger und guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden. Zu einem guten mengenmäßigen Zustand gehört insbesondere ein Gleichgewicht zwischen Grundwasserentnahme und Grundwasserneubildung. Gerade dieses ist durch den Klimawandel an vielen Stellen bedroht und kann dazu führen, dass bestehende Entnahmen neu beurteilt werden müssen, oder dass geplante Entnahmen nicht genehmigt werden können.

Das Wasser auf und unter dem Grundstück ist nicht vom Eigentumsbegriff des Art. 14 GG erfasst. Es ist durch das WHG vom Grundeigentum und von den Rechten an ihm ‚abgekoppelt‘. Gewässer werden „als öffentliche Sachen im Gemeingebrauch“ angesehen. Für eine zulassungspflichtige Gewässerbenutzung gemäß § 8 WHG ist eine wasserrechtliche Erlaubnis oder eine wasserrechtliche Bewilligung erforderlich.

In bestimmten Fällen, z. B. im Rahmen des Gemeingebrauchs oder des Eigentümer- und Anliegergebrauchs, besteht eine zulassungsfreie Benutzungsmöglichkeit. Darunter fallen z.B. Löschwasserentnahmen, Einbringen von Stoffen für Zwecke der Fischerei, Wasserentnahmen für den Eigentümer- und Anliegergebrauch ohne wesentliche Verminderung der Wasserführung, Ent-

nahmen durch Hausbrunnen und Entnahmen für den landwirtschaftlichen Hofbetrieb. Die Nutzungsdaten (z. B. Anzahl, Mengen) sind für diese Benutzungen nicht erfasst und finden somit auch in räumlichen Wasserbilanzen keinen Eingang, was gerade im Falle des Dürremanagements von Bedeutung sein kann.

Alle übrigen Benutzungen sind zulassungspflichtig, bedürfen also entweder einer Bewilligung oder einer Erlaubnis. Diese Zulassungsformen unterscheiden sich in ihren Wirkungen gegenüber Dritten und gegenüber der Behörde (vgl. § 10 Abs. 1 WHG).

Wurden konkurrierende Gewässerbenutzungen genehmigt, kann ein Verfahren zum Ausgleich der konkurrierenden Gewässernutzungen gemäß § 22 WHG durchgeführt werden. So regelt § 22 WHG den Ausgleich zwischen konkurrierenden Gewässerbenutzungen wie folgt:

1. Art, Maß und Zeiten der Gewässerbenutzung im Rahmen von Erlaubnissen, Bewilligungen, alten Rechten und alten Befugnissen können auf Antrag eines Beteiligten oder von Amts wegen in einem Ausgleichsverfahren geregelt oder beschränkt werden, wenn das Wasser nach Menge oder Beschaffenheit nicht für alle Benutzungen ausreicht oder zumindest eine Benutzung beeinträchtigt ist und wenn das Wohl der Allgemeinheit es erfordert.
2. Der Ausgleich ist unter Abwägung der Interessen der Beteiligten und des Wohls der Allgemeinheit sowie unter Berücksichtigung des Gemeingebrauchs nach pflichtgemäßem Ermessen festzulegen.

Inwieweit § 22 aber für Dürre angewendet werden kann ist fraglich. So schreibt Wertmann (2021) dass im Rahmen des 367. wasserrechtlichen Kolloquiums des Instituts für das Recht der Wasser- und Entsorgungswirtschaft an der Universität Bonn (IRWE) im Plenum Konsens besteht, dass der Anwendungsbereich des § 22 WHG lediglich dauerhafte Ereignisse betreffe und insofern im Falle der vorübergehenden Dürre ausscheide. Inwieweit § 22 für andere klimawandelbedingte Anwendungsfälle (z.B. schleichende Veränderungen) anzuwenden ist, ist offen.

Die Erlaubnis und die Bewilligung sind gemäß § 12 Abs. 1 WHG zu versagen, wenn 1. schädliche, auch durch Nebenbestimmungen nicht vermeidbare oder nicht ausgleichbare Gewässerveränderungen zu erwarten sind oder 2. andere Anforderungen nach öffentlich-rechtlichen Vorschriften nicht erfüllt werden. Eine zur Versagung der Benutzung zwingende schädliche Gewässerveränderung kann also auch darin liegen, dass die Entnahme zu Knappheitssituationen führen und damit schutzwürdige Nutzungen (insbesondere die öffentliche Wasserversorgung) gefährden würde (Reese et al., 2016). Im Übrigen steht die Erteilung der Erlaubnis und der Bewilligung im pflichtgemäßen Ermessen (Bewirtschaftungsermessen) der zuständigen Behörde (§ 12 Abs. 2 WHG). Hierbei ist der allgemeine Grundsatz des § 6 Abs. 1 Nr. 5 WHG zu berücksichtigen, wonach die Gewässer auch mit dem Ziel zu bewirtschaften sind, möglichen Folgen des Klimawandels vorzubeugen. Auch hier können, wie bereits erwähnt, eine Mischung aus regionalen Trendprojektionen und regionalen Klimaprojektionen die Entscheidungsfindung unterstützen. Ergänzend müssten auch ungenutzte Wasserrechte mit in die Betrachtung aufgenommen werden.

Die zuständige Wasserbehörde kann auch nachträglich bei bereits bestehenden Zulassungen Inhalts- und Nebenbestimmungen anordnen (§ 13 WHG). Generell sind erteilte wasserrechtliche Zulassungen für Gewässerbenutzungen regelmäßig sowie aus besonderem Anlass zu überprüfen und, soweit erforderlich, anzupassen (§ 100 Abs. 2 WHG). Auf welcher wissenschaftlichen Basis

eine solche Überprüfung erfolgen kann ist zu klären, denkbar sind aber eine Mischung aus regionalen Wasserdargebotsprojektionen und regionale Klimaprojektionen.

Gesetz über die Sicherstellung von Leistungen auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft

Das Gesetz über die Sicherstellung von Leistungen auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft für Zwecke der Verteidigung, kurz Wassersicherungsgesetz, ist ein Bundesgesetz, das die Trinkwassernotversorgung in Deutschland im Verteidigungsfall regelt. Das 1965 erlassene Gesetz gehört zu den Sicherstellungsgesetzen, die als Präventivmaßnahme erlassen wurden. Neben der Trinkwasserversorgung sind auch die Sicherstellung der Betriebs-, Lösch- und Abwasserentsorgung Gegenstand des WasSiG. Zur Umsetzung sieht das Gesetz eine Vielzahl von Eingriffsmöglichkeiten vor, die hauptsächlich WVU betreffen. Auch wenn dieses Gesetz nur für den Verteidigungsfall gilt, lassen sich Kriterien ableiten (BBK, 2022):

Räumliche Kriterien:

Der räumliche Geltungsbereich umfasst das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Gebiets- und Planungseinheit bilden gemäß § 4 WasSiG im Allgemeinen die Landkreise und kreisfreien Städte.

Vorrang bei der Bereitstellung von Mitteln für die Durchführung von Vorsorgemaßnahmen gemäß § 1 Absatz 1 Nr. 1 bis 4 WasSiG haben:

a) bevölkerungsstarke Regionen, d.h. Ballungsräume (städtischer Raum mit hoher Einwohnerzahl und mindestens einer Großstadt), Großstädte (> 100.000 Einwohner) und Mittelstädte (> 20.000 Einwohner)

oder

b) Planungsgebiete mit hohem Risikopotenzial im Hinblick auf die Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit vor dem Hintergrund der im Rahmenkonzept Trinkwassernotversorgung genannten Kernszenarien (Abschnitt 4.6, z. B. sofortiger Ausfall der Wasserversorgung bei Stromausfall).

Der Vorrang bedeutet aber kein Ausschluss von Regionen, die nicht unter a) oder b) fallen. Die Entscheidung zur Priorisierung obliegt den nach § 26 WasSiG zuständigen Behörden.

Des Weiteren sind quantitative Mindestversorgungsziele gelistet:

- ▶ Wasserversorgungsunternehmen stellen im Regelbetrieb und bei eingeschränkter Versorgung unbefristet eine leitungsgebundene Trinkwasserversorgung von 50 Litern pro Person und Tag sicher
- ▶ 75 - 150 Liter pro Bett und Tag bei medizinischen Einrichtungen für mindestens 14 Tage
- ▶ 40 Liter pro Großvieheinheit und Tag für mindestens 14 Tage
- ▶ Der unentbehrliche Bedarf an Betriebswasser richtet sich nach Art und Umfang der Leistungen der Betriebe und Anstalten für den Verteidigungsfall

Da der Verteidigungsfall bei Dürren nicht gegeben ist, könnten hier andere wirtschaftliche Faktoren, wie Bedeutung des Betriebes für die regionale Wirtschaft, Anzahl der Arbeitsplätze usw. stattdessen herangezogen werden.

Unklar ist auch, wie die hier genannten Mindestversorgungsziele

- a. überhaupt auf eine Dürresituation übertragen lassen und als akzeptabel angesehen werden können und
- b. technisch umgesetzt werden können, insbesondere was eine gerechte Verteilung betrifft, da ja nicht jede Wohnung einen Wasserzähler besitzt, sondern dieser i.d.R. nur an der Grundstücksgrenze angebracht ist.

3.6.4.2 Herstellung von Transparenz in der Priorisierung / Dürreplanung

Transparenz bei der Wasserverteilung ist entscheidend, um Vertrauen zu schaffen, eine nachhaltige Ressourcennutzung zu fördern und faire Entscheidungen zu ermöglichen. Im Folgenden werden einige Maßnahmen aufgelistet, die Transparenz bei der Wasserverteilung fördern:

Öffentliche Information: Es muss sichergestellt werden, dass relevante Informationen über Wasserverteilungspläne, Zuteilungen und Richtlinien für die Öffentlichkeit bereitstehen und zugänglich sind. Dabei sind in leicht verständlicher Sprache die Kriterien, die bei der Wasserallokation berücksichtigt werden, zu erklären. Informationen über die zugrundeliegenden Prinzipien sind bereitzustellen. Das kann in eigenen benutzerfreundliche Online-Plattformen (z.B. durch Visualisierung von Wasserdaten³³) erfolgen.

- ▶ Transparente Kriterien für Wasserallokation: Die Kriterien, die bei der Wasserverteilung verwendet werden, müssen frei zugänglich sein. In Erläuterungen dazu sind die verschiedenen Faktoren, einschließlich sozialer, ökologischer und wirtschaftlicher Überlegungen, aufzuführen.
- ▶ Klare Verfahren und Veröffentlichung von Entscheidungen: Die Verfahren für die Wasserverteilung sind klar zu beschreiben und zu veröffentlichen. Ebenso ist die Begründung hinter den getroffenen Entscheidungen zu veröffentlichen Gesundheit, zivile Sicherheit und Trinkwasserversorgung.

³³ Beispielsweise zeigt der flämische Wasseratlas (<https://www.wateratlas.be/>) grafisch recht deutlich wo Verfügbarkeit und Nachfrage nach aufbereitetem Klärwasser bestehen.

- ▶ Verfügbarkeit von Daten und Berichten: Die regelmäßig aktualisierten Daten über die aktuelle Wasserentnahme, die Verfügbarkeit von Wasserressourcen und die Umsetzung von Wasserverteilungsplänen sind zu veröffentlichen, ebenso wie transparente Berichte über Wasserqualität, Umweltauswirkungen und die Leistung von Wasserallokationsprojekten.
- ▶ Partizipation und Stakeholderbeteiligung: Beteiligung der Öffentlichkeit und verschiedener Stakeholder in den Wasserverteilungsprozess sind sicherzustellen. Öffentliche Konsultationen, Workshops oder Bürgerforen sollten genutzt werden, um Meinungen, Bedenken und Vorschläge zu sammeln, vor allem bei der Entwicklung und Auswahl von Entscheidungskriterien.
- ▶ Klare Kommunikation über Entscheidungen: Behörden und Politiker sollten klar und transparent über getroffene Wasserverteilungsentscheidungen kommunizieren. Dabei sind die Gründe hinter den Entscheidungen zu verdeutlichen, zudem ist Darzulegen wie die verschiedenen Interessengruppen berücksichtigt wurden.
- ▶ Feedbackmechanismen einrichten: Mechanismen für Rückmeldungen und Beschwerden von Bürger*innen sind einzurichten.
- ▶ Unabhängige Überprüfung und Audit: Unabhängige Überprüfungen und Audits der Wasserverteilungspläne, der Mechanismen und der Daten sind hilfreich, um sicherzustellen, dass sie den Prinzipien der Transparenz, Fairness und Nachhaltigkeit entsprechen. Die Ergebnisse dieser Überprüfungen sind für die Öffentlichkeit publik zu machen.

3.6.4.3 Empfehlungen für ein System zur Priorisierung von Nutzungen bei wasserbezogenen Nutzungskonflikten (inkl. Trennung zwei Handlungsebenen)

Grundsätzlich ist von zwei Fällen der Priorisierung in Deutschland auszugehen:

- a) Priorisierung im „Notfall“ bzw. „Dürrefall“
- b) Strategischer Umgang mit Veränderung des dauerhaften Wasserdargebots (Gesamtreduktion, oder saisonale Verschiebung des Wasserdargebotes)

In beiden Fällen sollten unterschiedliche Priorisierungsmechanismen und Kriterien zur Anwendung kommen, wobei auch Gemeinsamkeiten identifiziert wurden:

- ▶ Es scheint empfehlenswert, ein System aufzustellen, in welchem es ein Zusammenspiel von auf nationaler Ebene festgelegten Regeln bzw. Kriterien und auf regionaler Ebene zu bestimmenden Entscheidungsräumen gibt. Insbesondere die auf regionaler oder lokaler Ebene, im Rahmen einer vorhandenen Struktur stattfindende Priorisierung von Nutzungen (s. Bsp. Niederlande) erscheint hier interessant. Solche ermöglichen den regionalen Akteuren eine differenzierte Berücksichtigung lokaler Begebenheiten und wirtschaftlicher Prioritäten, wobei die gesamtstaatlichen Interessen gewahrt bleiben.
- ▶ Alle Entscheidungen sollten den oben genannten Transparenzkriterien folgen.
- ▶ Der Natur/Umweltwasserbedarf ist in beiden Fällen ausreichend zu berücksichtigen. Maßnahmen zum Schutz des ökologischen Wasserbedarfes sind sicherzustellen, damit Ökosysteme, die von Wasserressourcen abhängig sind, nicht geschädigt werden und erhalten bleiben.
- ▶ Die Basis für alle Entscheidungen sollten auf einem umfassenden Kenntnisstand von Wasserverfügbarkeit, aktuellen Wasserbedarfen und Nutzungen basieren. Ebenso sind Wetter- und Klimavoraussagemodelle zu nutzen.

A) Priorisierungskriterien im “Notfall/Dürre”

- ▶ Wie schon in zahlreichen internationalen Ansätzen umgesetzt scheint ein einfaches System mit einer geringen Zahl von Phasen empfehlenswert, um es zu ermöglichen in jeder Phase entsprechend arbeiten zu können und um zu vermeiden, dass in einer Dürresituation Phasen „übersprungen“ werden müssen, da die Dürreentwicklung zu schnell abläuft. Jede der Phase stellt eine gewisse Schwere der Dürre dar. In der Regel weisen die Ansätze zwischen 3 und 4 Phasen auf, die oft mit Ampelfarben gekennzeichnet werden. Solch ein einfaches System trägt zur Transparenz bei und lässt sich leicht vermitteln.
- ▶ Der Übergang von einer niedrigeren zu einer höheren Dürrephase basiert i.d.R. auf individuellen (v.a. Standard Precipitation Index) oder kombinierten Indikatoren (z.B. Combined Drought Indicator), die letzteren zusammengesetzt aus Niederschlags- und/oder Wasserverfügbarkeitsdaten (z.B. Verfügbarkeit in Stauseen oder Grundwasserkörpern, Pegelstände in Seen oder Flüssen) und geht i.d.R. mit schrittweisen Einschränkungen mehrerer Nutzungen und anderen Maßnahmen (z.B. Bewusstseinsbildung, erhöhte Kontrolle und/oder Strafen, Notmaßnahmen wie Brunnenbohrungen oder – aktivierung oder dem Einsatz von Wassertransporten) einher. Eine Priorisierung der Nutzungen schlägt sich in den unterschiedlich starken Einschränkungen nieder und nicht unbedingt in einem unterschiedlichen Zeitpunkt der Einschränkung.
- ▶ Sinnvoll erscheint eine am niederländischen System angelehnte Gruppierung in Nutzungsklassen, welche einen einheitlichen Ordnungsrahmen mit Steuerungsfunktion und Entscheidungsräumen für die regionalen und lokalen Akteur*innen verbindet. Diese Akteur*innen haben die Möglichkeit, innerhalb der Nutzungsklassen nach den in den jeweiligen Regionen relevanten Problemen bzw. wichtigen Wirtschaftszweigen zu priorisieren. Mit einer solchen Priorisierung können auch Nutzungen berücksichtigt werden, die mit geringen Volumina ihre Produktion gewährleisten können (Bsp. Prozesswasser in NL).
- ▶ An die Jahreszeiten angepasste Auslösebedingungen (Bsp. Schwellenwerte beim Grundwasserstand, Stauseepegel oder Schneemassen – z.B. Snowpack Indicator, jeweils abhängig von der Bedeutung der Wasserquellen in den spezifischen Wassernutzungsgebieten) ermöglichen eine frühzeitige Antwort auf erste Dürreanzeichen und scheinen dadurch sehr geeignet, die Resilienz des Systems zu erhöhen.
- ▶ Ein Ansatz, welcher im Voraus die von den Akteur*innen umzusetzenden Maßnahmen in den jeweiligen Dürrephasen klar festlegt, scheint gut dafür geeignet, die Planungssicherheit aller Akteur*innen zu erhöhen.

B) Kriterien für den Strategischer Umgang mit Veränderung des dauerhaften Wasserdargebots

- ▶ Wasserdargebot: Hier sind bestehende Trends der Entwicklung der Wasserressourcen als auch zukünftige Veränderungen aufgrund des Klimawandels (Projektionen) zu berücksichtigen, wobei angeraten ist eine Vielzahl an klimatischen Projektionen und Szenarien zu berücksichtigen, um die Entscheidungen, die darauf basieren, ausreichend abzusichern.
- ▶ Systemrelevante Aspekte: Versorgung der kritischen Infrastruktur, Schulen, Altenheime, militärische Einrichtungen usw.

- ▶ **Soziale Aspekte:** Unverhältnismäßige Auswirkungen auf vulnerable oder marginalisierte Gemeinschaften sollen vermieden werden. Dazu können die Kriterien der Europäischen Union herangezogen werden, wo eine Person als von Armut oder sozialer Ausgrenzung bedroht gilt, wenn mindestens eine der folgenden drei Bedingungen zutrifft: 1) ihr Einkommen liegt unter der Armutsgefährdungsgrenze, 2) ihr Haushalt ist von erheblicher materieller und sozialer Entbehrung betroffen oder 3) sie lebt in einem Haushalt mit sehr geringer Erwerbsbeteiligung.³⁴ Dabei ist zu beachten, dass die erste und die dritte Bedingung stark mit der wirtschaftlichen Kraft einer Region zusammenhängt.
- ▶ **Wirtschaftliche Bedeutung des Wassers:** Die ökonomische Beziehung der Gesellschaft zu Wasser und Gewässern ist durch fundamentale Abhängigkeiten und zugleich durch das Streben nach Wohlstand gekennzeichnet. Wasser und Gewässer werden für zahlreiche Zwecke genutzt (z. B. als Trinkwasser, zur Kühlung, für den Gütertransport), dies erfolgt in unterschiedlicher regionaler Ausprägung. Vorschläge für Bewertungsindikatoren können aus der UBA-Studie "Indikatoren für die ökonomische Bedeutung von Wasser und Gewässern" (Geyler et al., 2018) abgeleitet werden³⁵. Wichtig ist auch zu bedenken, dass hier auch bundesweite Sichtweisen eine Rolle spielen können (z.B. Betrieb schafft zwar wenig Arbeitsplätze in der Region, ist aber bundesweit nur einer von drei Betrieben).
- ▶ **Bereits vorhandene oder geplante Wasserspar- und Wassereffizienzmaßnahmen:** Es kann andiskutiert werden, ob solchen Betrieben ein Vorrang gegeben werden kann.
- ▶ **Bedeutung der Landwirtschaft:** sie hat für die Versorgung mit Nahrungsmitteln eine entscheidende Bedeutung, ebenfalls werden landwirtschaftliche Produkte für die Energiegewinnung genutzt. Dies muss in den Kriterien für den strategischen Umgang mit den Wasserressourcen reflektiert werden.
- ▶ **Umsetzung und Überwachung:** die Dokumentation des Wasserverbrauchs und die Einhaltung der Allokationspläne sicherzustellen. Internationale Erfahrungen zeigen, dass die besten Wasserallokationspläne nicht ihr Potenzial erreichen, wenn nicht auch eine lückenlose Überwachung gegeben ist.

Diese Kriterien können in Kombination angewendet werden, um umfassende Wasserallokationspläne zu entwickeln, die die Bedürfnisse verschiedener Nutzer*innen ausbalancieren und gleichzeitig die langfristige Nachhaltigkeit der Wasserressourcen sichern. Zusätzlich können spezifische Kriterien zur Verfügung gestellt werden, die je nach den einzigartigen Umständen und Herausforderungen der betreffenden Region variieren.

3.6.4.4 Offene Fragen bzw. Vorbedingungen für die Aufstellung von Priorisierungsregeln

Um Priorisierungsregeln in Deutschland erfolgreich umzusetzen, müssen allerdings auch einige Fragen geklärt bzw. Bedingungen erfüllt werden. Darüber hinaus muss ein System auch gewissen Anforderungen entsprechen, um schwerwiegende Umsetzungsprobleme in anderen europäischen Ländern zu vermeiden. Im Folgenden wird eine Auswahl dieser Aspekte präsentiert.

³⁴ Diese Daten werden in Deutschland mit unterschiedlichen Methoden erfasst https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/05/PD23_190_63.html

³⁵ Diese sind z.B. Indikatoren zur Bewertung direkter Leistungen an die Gesellschaft anhand der Nutzenstiftung, oder Indikatoren zur Bewertung direkter Leistungen an die Gesellschaft anhand wirtschaftspolitischer Ziele

Vorbedingungen

- ▶ Die Abstufungsschritte müssen so definiert und voneinander abgegrenzt werden, dass sie einen schnellen Wechsel von „grün“ zu „rot“ ohne konkrete Handlungsoptionen oder Maßnahmen je nach Stufe vermeiden (vgl. spanisches System).
- ▶ Vorrang für die Trinkwassernutzung muss mit einer ausreichenden Wasserschutzgebietsausweisung einher gehen: Das Wasserrecht zu haben allein hilft nichts, wenn das Wasser nicht in der notwendigen Qualität verfügbar ist oder bereitgestellt werden kann. Dies muss bei Genehmigungsprozessen berücksichtigt werden.
- ▶ Umwelt als Wassernutzerin: Es bedarf einer genauen Definition, was das heißt, bspw. konkrete Angabe von Mindestabflüssen. Die in § 6 Absatz 1 WHG benannten allgemeinen Grundsätze der Gewässerbewirtschaftung sowie speziell die in §§ 27 bis 31 WHG benannten Bewirtschaftungsziele für oberirdische Gewässer sind einzuhalten.

Offene Fragen

- ▶ Welche regionale Einheit wird als Basis genommen (Grundwasserkörper, die auch länderübergreifend sein können, administrative Einheiten, Untereinzugsgebiete gemäß WRRL, ...)?
- ▶ Regionale Behörden haben derzeit keinen Überblick und/oder Zugang zu relevanten Datenbeständen. In Deutschland wird das Wasser größtenteils aus dem Grundwasser entnommen, hier sind Daten zur Verfügbarkeit und Entnahme oft gar nicht vorhanden.
 - Welcher Weiterentwicklung des Monitorings bedarf es? Wie kann eine Beobachtung der Grundwasserstände in ausreichend hoher zeitlicher und örtlicher Dichte und deren Verwendung als einheitlicher und gut zu messenden Indikator, um damit Schwellenwerte für die Bewirtschaftung festzulegen, sichergestellt werden?
 - Wie können die bestehenden Entnahmegenehmigungen an der richtigen Entscheidungsstelle zentral zusammengeführt werden³⁶?
- ▶ Was sind die gesellschaftlich besonders relevanten Nutzungen, die hoch priorisiert werden sollen und anhand welcher Kriterien kann die gesellschaftliche Relevanz einer Nutzung abgelesen werden? In anderen Worten: Nach welchen Kriterien wird das Wasser verteilt? Zu den Möglichkeiten zählen: Erreichung des guten Zustandes der Wasserkörper, Nachhaltigkeit, Effizienzsteigerung der Wassernutzung, andere soziale oder wirtschaftliche Ziele wie die Unterstützung von Arbeitsplätzen oder (Familien)betrieben (nur beim niederländischen Ansatz teilweise vorhanden). Wie können diese verschiedenen Ziele am besten kombiniert werden?
- ▶ Wie sollen die vom Klimawandel zu erwartenden Veränderungen in das Priorisierungssystem eingebaut werden (Flexibilität)?
- ▶ Wie ist damit umzugehen, wenn vereinbarte Vorsorgemaßnahmen von den Wassernutzer*innen nicht umgesetzt wurden? Beispiel: Ein Betrieb wurde aufgefordert seine Leitungsverluste zu reduzieren, dies wurde aber nicht umgesetzt.

³⁶ Siehe auch Aktion 31 der nationalen Wasserstrategie: Grundwasserentnahmemonitoring entwickeln Es wird ein repräsentatives, quantitatives Echtzeitgrundwasserentnahmemonitoring der tatsächlich entnommenen Mengen entwickelt, das zusammen mit der Bewertung des mengenmäßigen Zustands von Grundwasserkörpern als Basis für die zukünftige Ausgestaltung der Entnahmerechte und des risiko*orientierten Grundwassermanagements dienen soll. Des Weiteren sollen die Bagatellgrenzen überprüft werden

- ▶ Soll es bei Anzeichen von Dürre möglich sein, bereits präventiv aktiv zu werden, um Wasserknappheit zu verhindern und welche Indikatoren können dazu genutzt werden (siehe dazu z.B. Begutachtungsentwurf Kärntner Gemeindevasserversorgungsgesetz Jänner 2023 § 5 Abs. 2a)?³⁷
- ▶ Wie können alle Wasserentnahmen aus Grund- und Oberflächenwasser, einschließlich der für die Bewässerung genutzten, erfasst werden?
- ▶ Kann es Kompensationszahlungen zwischen den Nutzer*innen geben? (Wer das Wasser nutzen darf, zahlt einen Teil der Entschädigung an die, die das Wasser nicht nutzen dürfen.)
- ▶ Welche Rolle (und welchen Anteil) spielen die Nutzung von Brauchwasser bzw. gereinigtem Abwasser in der Priorisierung?
- ▶ Welche organisatorischen Entscheidungsstrukturen für die Entwicklung eines Entscheidungsbaumes oder Ablaufschemas sind auf regionaler Ebene zu schaffen und welche Nutzer*innen sind hierfür einzubinden?
- ▶ Wie können illegale Entnahmen (nicht nur in Krisenzeiten) verhindert werden?
- ▶ Wo soll eine solche Priorisierungsregelung juristisch verankert werden?

³⁷ <https://www.ktn.gv.at/Verwaltung/Amt-der-Kaerntner-Landesregierung/Verfassungsdienst/Landesgesetzgebung/abgeschlossene%20Begutachtungen%202023>

4 Leitplanken für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung im urbanen Raum

Autoren: Guggenberger, T., Barjenbruch, M., Schritt, H.

Wasserwiederverwendung ist die Nutzung von Wasser, das aus behandeltem Abwasser gewonnen wurde und durch entsprechende Aufbereitung die für seinen Verwendungszweck angemessene Qualität besitzt (unter Berücksichtigung der Gesundheits- und Umweltrisiken und der lokalen und EU-Gesetzgebung). Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf Abwasser aus kommunalen Kläranlagen. Ziel dieses Kapitels ist es, das Potenzial der Wasserwiederverwendung zur Bewässerung im urbanen Raum in Deutschland einzuschätzen, sowie technische Bedingungen und risikominimierende Maßnahmen für einen sicheren Umgang mit aufbereitetem Wasser zu benennen. Mögliche Anwendungen umfassen dabei die Bewässerung von Grünflächen wie z.B. Parks, Friedhöfe, Sport- oder Golfplätze sowie von Beeten, Zierflächen oder Stadtbäumen. Dafür wurde das maximale Bewässerungspotenzial für den deutschen Stadtraum über Näherungen und sechs Modellstädte von Klein- über Mittel- bis hin zur Großstadt bestimmt (Kapitel 4.1). Mittels einer Best Practice-Übersicht von bestehenden Wasserwiederverwendungssystemen für die urbane Bewässerung wurden technische Lösungen als Orientierung für die Umsetzung zusammengetragen und bewertet (Kapitel 4.2). Darüber hinaus wurde eine Bewertungsmatrix erarbeitet, die eine erste Orientierung für die Eignung und mögliche Ausgestaltung der Bewässerung mit aufbereitetem Wasser im urbanen Raum ermöglicht (Kapitel 4.3). Des Weiteren wurde in Anlehnung an die EU-Verordnung zu Wasserwiederverwendung (2020/741) ein Risikomanagement-Ansatz entwickelt (Kapitel 4.4), um mögliche Gefahren einschätzen und minimieren zu können. Darauf aufbauend wurden Handlungsempfehlungen für Politik und Entscheidungsträger*innen zur Wasserwiederverwendung in urbanen Räumen erarbeitet (Kapitel 4.5).

4.1 Analyse des Potenzials der Wasserwiederverwendung in deutschen Stadtgebieten

Autoren: Guggenberger, T., Schritt, H., Barjenbruch, M.

4.1.1 Stakeholderbefragung

Um die Akzeptanz und die Bereitschaft zur Wasserwiederverwendung aller an der Wasserwiederverwendung Teilhabenden zu ergründen, wurde eine Stakeholderbefragung mittels Online-Umfrage durchgeführt. Es wurden Fragen zum Hintergrund der Stakeholder, zum Kenntnisstand zur Wasserwiederverwendung, zum Bedarf und der Bereitschaft der Wiederverwendung, der Aufwands- und Risikoabschätzung gestellt. Die Fragen, die Methodik und die einzelnen Ergebnisse der Stakeholderbefragung sind im Anhang H im [Anhangband](#) verfügbar. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse aus der Befragung dargestellt.

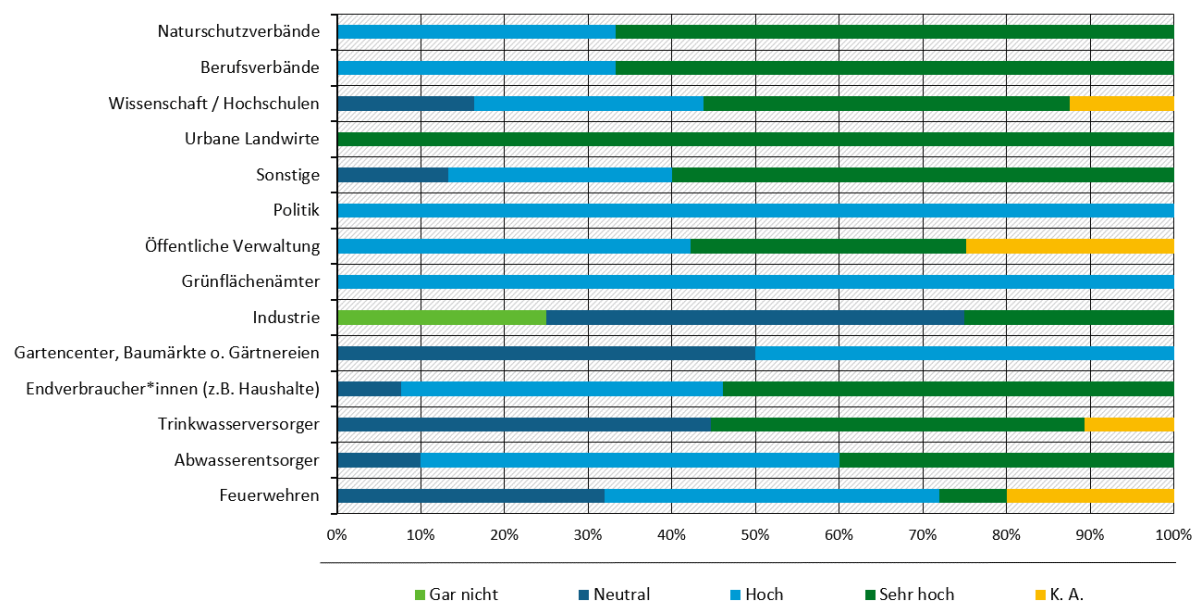
Zusammenfassung der Ergebnisse

Obwohl die Stakeholderbefragung nicht als repräsentativ gelten kann, gibt sie mit 128 teilgenommenen Stakeholdern aus dem weiteren Arbeitsfeld der urbanen Wasserwiederverwendung Einsichten zu Akzeptanz und möglichen Hemmnissen. Auch Anforderungen der Stakeholder, die für die Umsetzung eines erfolgreichen Wasserwiederverwendungsprojekts notwendig sind, konnten erkenntlich gemacht werden.

Unter den Teilnehmenden waren: 10 Abwasserentsorger und sechs Trinkwasserversorger, zwei Gärtnereien, ein Grünflächenamt und ein urbaner Landwirt, sowie 22 Vertreter*innen aus der öffentlichen Verwaltung und einer aus der Politik.

Es konnte gezeigt werden, dass mit 111 Befragten fast alle Stakeholder wussten, was Wasserwiederverwendung ist. 109 (85%) Stakeholder sind bereit Wasser wiederzuverwenden, wenn es hygienisch unbedenklich ist, wobei 91 (71%) ihre Bereitschaft dazu als hoch bis sehr hoch beschrieben. 92 (72%) Stakeholder gaben sogar an, ein eigenes Interesse zu haben, Wasserwiederverwendung zu praktizieren. Dabei waren die Förderung der Nachhaltigkeit, die Sicherheit der Wasserverfügbarkeit in zukünftigen Dürrezeiten und Kosteneinsparungen die Hauptmotive. Wasserknappheit wurde als die wichtigste Motivation zur Wasserwiederverwendung genannt. Ansonsten zeigen sich Kosteneinsparungen bei allen Befragten als vielversprechender Hebel - 44% gaben an, finanzielle Anreize als wichtig bis sehr wichtig zu empfinden, wobei die Mehrheit der Befragten Einsparungen zwischen 0 – 40% als ausreichend empfand.

Abbildung 84: Umfrage zur Bereitschaft zur Nutzung von recyceltem Wasser: „Wie hoch ist Ihrerseits die Bereitschaft recyceltes Wasser (z.B. Klar- oder Grauwasser) anstatt Trinkwasser für qualitativ entsprechende Nutzungen (z.B. Bewässerung von Grünflächen, Löschwasser, Toilettenspülwasser) zu verwenden?“

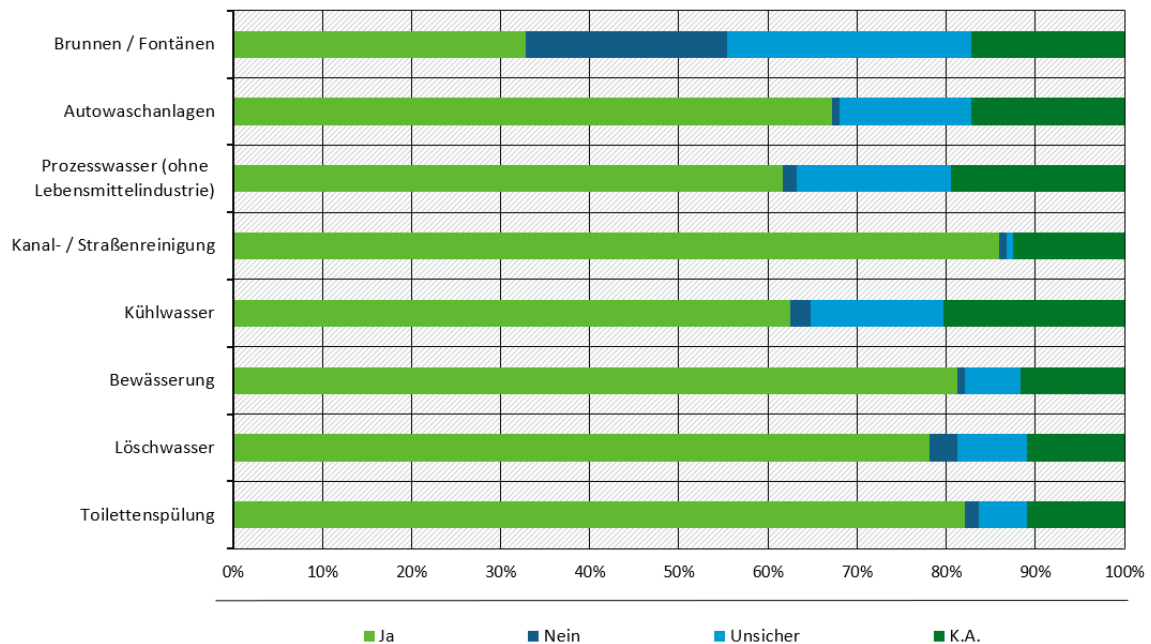


Quelle: eigene Darstellung, TU Berlin.

Weitere wichtige Anreize schaffen hygienische Unbedenklichkeit, Verfügbarkeit, Transparenz und eine wenig verschmutzte Abwasserquelle. Gerade die zuletzt genannten Anreize werden über das Risikomanagement abgedeckt, zeigen jedoch, wie wichtig es ist, diese Informationen über gute Kommunikationsstrategien und Aufklärungskampagnen an die Bevölkerung zu verbreiten. Weitere Punkte, die den Stakeholdern wichtig sind, sind ein ökologischer Nutzen, Rechtssicherheit, Handhabbarkeit und gute Schulung / Beschriftung.

Als Verwendungszweck für die Wasserwiederverwendung sahen die Stakeholder Kanal- und Straßenspülung gefolgt von Toilettenspülung, Löschwasser und Bewässerung. Die Nutzungsoption als Prozesswasser war eher zweitrangig, die zur Speisung von Brunnen und Fontänen wurde abgelehnt, vgl. Abbildung 85.

Abbildung 85: Umfrage zu den Verwendungszwecken von recyceltem Wasser: „Können Sie sich vorstellen, dass recyceltes Wasser mit der für die jeweilige Nutzung erforderlichen Qualität für folgende Verwendungszwecke verwendet wird?“



Quelle: eigene Darstellung, TU Berlin.

Die Bewässerung wird von vielen Stakeholdern nicht als erste Option zur Wiederverwendung angesehen und es zeigen sich noch weitere Einsatzfelder im urbanen Raum. Die Bedenken zur Umweltverträglichkeit sind sehr gering; bzgl. der Boden und Grundwasserträglichkeit enthielten sich die meisten Stakeholder oder schätzen diese ebenfalls als gering ein. Das heißt, dass die meisten Stakeholder bei der Bewässerung leichte Bedenken bzgl. der menschlichen Gesundheit haben, sich jedoch nicht vorrangig um die Umweltaspekte sorgen. Dies muss unbedingt adressiert werden, damit die Bewässerung des urbanen Grüns breite Akzeptanz findet.

Darüber hinaus gaben die meisten Stakeholder an, dass ihnen die logistischen Voraussetzungen zur Entgegennahme und Speicherung fehlten, was ebenfalls bei der infrastrukturellen Umsetzung berücksichtigt werden muss.

Es lässt sich zusammenfassen, dass zunehmende Wasserknappheit die meisten Stakeholder dazu motiviert, Wasser wiederzuverwenden. Hierfür wird ein hygienisch einwandfreies und sicheres Produkt, das ökologisch sinnvoll ist und deren Verwendung rechtlich gesichert ist, als Voraussetzung angesehen. Bei knapp der Hälfte der Befragten sind Kosteneinsparungen ein wichtiger Faktor. Die Antworten zeigen, dass gute Kommunikation und Transparenz bzgl. der Verfahren, Abwasserquelle, Transportinfrastruktur und Verwendung / Handhabung ein wichtiger Aspekt ist.

4.1.2 Grundlagen und Definitionen des Potenzials der urbanen Wasserwiederverwendung

Als Potenzial wird für die nachfolgende Betrachtung die benötigte Menge an Bewässerungswasser für die Instandhaltung und Pflege des urbanen Grüns (Grünanlagen, Parks, Sportplätze, Friedhöfe, Gärten, Straßenbäume und Straßenbegleitgrün) definiert. Diese Potenzialanalyse zeigt theoretisch substituierbare Wassermengen an Trink-, Grund oder Oberflächenwasser zur Bewässerung in Städten auf. Dafür werden in den drei Stadtgrößen Klein- (5.000 – 20.000 Einwohner*innen (EW)); Mittel- (20.000 – 100.000 EW) und Großstadt (>100.000 EW) die urbanen Grünflächen erhoben. Diese werden mit Bewässerungsbedarfen verschnitten, die mittels verschiedener Ansätze erhoben wurden (s.u.). Die so ermittelten maximalen Bewässerungsbedarfe werden ins Verhältnis zu den tatsächlich zur Verfügung stehenden Abwassermengen gesetzt, um die theoretische Umsetzbarkeit einzuschätzen.

Der Bewässerungsbedarf beruht auf vielen Einflüssen. Er besteht nur während der Vegetationsperiode, in der die Pflanze wächst und sich entwickelt. Im Wesentlichen bestimmen folgende Faktoren den Umfang der erforderlichen Bewässerung (DWA M 590, 2022):

- ▶ regionale klimatische Verhältnisse
- ▶ Kulturart und -sorte
- ▶ Trockenheitstoleranz
- ▶ Durchwurzelungstiefe
- ▶ Bodenart und -typ
- ▶ Grundwasserflurabstand und kapillarer Aufstieg
- ▶ nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum

Die genannten Faktoren können dabei noch innerhalb einer Vegetationsperiode durch Witterungsbedingungen oder standortspezifische Besonderheiten innerhalb einer Grünfläche, wie z.B. lokale Beschattung, stark variieren und wirken z.T. nicht konstant. Daher werden für die Ermittlung der städtischen Bewässerungsbedarfe präzise lokale und zeitliche Informationen benötigt, die für eine deutschlandweite Betrachtung nicht zur Verfügung stehen (FLL, 2015).

Die Bewässerung wird häufig mittels Mischnutzung aus Oberflächenwasser, Wasser aus eigenen Flach- und Tiefbrunnen und der öffentlichen Wasserversorgung vorgenommen. Die Mengen werden dabei nicht oder nur teilweise erfasst (FLL, 2015). Die tatsächlichen Bewässerungsmengen sind daher nur schwer abzuschätzen und können für die Potenzialanalyse nicht verwendet werden.

Die Ermittlung der urbanen Grünflächen und deren Differenzierung in die verschiedenen Nutzungsarten Sportplatz, Friedhof, Park- und Grünanlage, Golfplatz, Kleingarten, Straßenbegleitgrün, Straßenbaum zur genauen Bestimmung der unterschiedlichen Bewässerungsbedarfe benötigt ebenfalls einer Datengrundlage, die es für das gesamte deutsche Stadtgebiet so nicht gibt. Obwohl das urbane Grün der jeweiligen Kommunalverwaltung (i.d.R. den Grünflächenämtern) bekannt ist, ist deren Nutzungsart nicht immer separat geführt und diese Information vielen Grünflächenämtern nicht bekannt bzw. sind diese nicht öffentlich einsehbar. Eine bundesweite Datengrundlage, welche das urbane Grün einschließlich der nicht öffentlichen Grünflächen in allen deutschen Städten einheitlich beschreibt, fehlt (BBSR, 2022).

Die Bestimmung des Potenzials erfolgt daher über Näherungen. Die Bewässerungsbedarfe wurden über die klimatische Wasserbilanz und die städtischen Grünflächen über verschiedene statistische Angaben abgeschätzt. Sie werden im Folgenden beschrieben.

4.1.3 Ermittlung der Bewässerungsmengen

Für die Ermittlung des Bewässerungsbedarfs kann auf verschiedene pauschale Angaben für Pflanzen und Flächen des urbanen Grüns aus der Fachliteratur zurückgegriffen werden.

So gibt das Regelblatt 407 des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbands (ÖWAV) einen Gesamt-Bewässerungsbedarf in der Vegetationsperiode von April bis September von 390 mm für mittlere Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse an, vgl. Tabelle 19.

Tabelle 19: Monatlicher Bewässerungsbedarf für Park- und Grünflächen nach ÖWAV 407(2016)

	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober
[mm/Jahr]	0	20	50	70	100	100	50	0

Das „Handbuch Gute Pflege - Pflegestandards für die Berliner Grün- und Freiflächen“ der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz gibt einen Bewässerungsbedarf für Straßebäume von 1,2 bis 2,4 m³/a an, wobei sich hier auf Jungbäume (bis 15 Standjahre nach der Pflanzung) bezogen wird. Der Bewässerungsbedarf für Zier- und Nutzrasenflächen als auch diverser Strauch-, Hecken und Beetflächen wird dort in Abhängigkeit zu den Standort- und Wetterverhältnissen gesetzt, wobei nach Sichtkontrollen bei welken Blättern mit 20 bis 30 l/m² bewässert werden soll (Kurths et al., 2017).

Die DIN18035-2 über die Bewässerung von Sportplätzen unterscheidet dagegen deutlicher zwischen verschiedenen Flächennutzungen und mittleren jährlichen Niederschlägen. Dabei können die Angaben für Rasensportplätze und Golfplätze ebenfalls als Orientierung für die benötigten Bewässerungsmengen dienen, vgl. Tabelle 20 (DIN 18035-2, 2020).

Tabelle 20: Jahres-Bewässerungsbedarf für Golfplätze (DIN 18035-2, 2020)

Niederschlagsvorkommen	Niederschlagsmengen [mm/Jahr]	Beregnungswasser -bedarf ³⁸ [mm/Jahr]	Beregnungsbedarf		
			Grün [mm/Jahr]	Abschlag [mm/Jahr]	Spielbahn [mm/Jahr]
Reich	> 900	< 75	100 - 200	50 - 100	< 100
Mittel	700 - 900	75 - 150	200 - 300	100 - 200	100 - 150
Gering	500 - 700	150 - 250	300 - 400	200 - 250	150 - 200
Sehr gering	< 500	> 250	400 - 600	250 - 400	200 - 300

³⁸ Gilt auch für Rasensportplätze nach DIN 18035-2, 2020

Die DWA hat mit dem Merkblatt DWA M 590 die Grundlagen zur Bestimmung von Bewässerungsmengen zusammengetragen. Genau wie die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. FLL-Bewässerungsrichtlinie, wird jedoch noch detaillierter über die Standortspezifikationen wie Bodenart, pflanzenverfügbares Wasser, Wuchsform und Sonnenexposition sowie die potenzielle Evapotranspiration unterschieden, weshalb dieser Ansatz für eine deutschlandweite Bestimmung mit der momentanen Datengrundlage nicht möglich ist. Dennoch können DWA M 590 und FLL-Bewässerungsrichtlinie bei besserer Datenlage in einzelnen Städten als eine gute Orientierung dienen und bei der Ermittlung des notwendigen Bewässerungswassers helfen.

Eine weitere Möglichkeit, die benötigte Bewässerungsmenge abzuschätzen, besteht über die klimatische Wasserbilanz (KWB). Diese ist die Differenz aus der Niederschlagssumme und der Summe der potenziellen Evapotranspiration über einer Kulturfläche - für Vergleichszwecke; hier Grasland. Sie kann als Wasserdefizit in den oberen Bodenschichten interpretiert werden. Aus den KWB-Daten, berechnet aus allen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes aus den Jahren 1991 bis 2020 in den Monaten von März bis August, wurden so theoretische Bewässerungsmengen in der Vegetationsphase ermittelt, und bei negativen Werten dem Bewässerungsbedarf gleichgesetzt. Dabei wurde über das arithmetische Mittel der 30 Jahre - Periode 1991 bis 2020 die Bewässerungsmenge für durchschnittliche Jahre (im Folgenden: „normale Jahre“) bestimmt. Aus dem arithmetischen Mittel der 12 trockensten Jahre dieser Zeitperiode wurde die Bewässerungsmenge für trockene Jahre abgeleitet und aus dem trockensten Jahr (2018) die Bewässerungsmenge für sehr trockene Jahre. Um weiter zwischen Naturräumen mit ausreichendem Wasserdargebot, wie z.B. im Alpenvorland und Naturräumen mit angespanntem Wasserdargebot, wie z.B. in Nord-Ost Deutschland, zu unterscheiden, kann über das untere Quantil die Bewässerungsmenge für feuchte Lagen und über das obere Quantil die Bewässerungsmenge für trockene Lagen abgeleitet werden. Der Median kann als die Bewässerungsmenge für mittlere Lagen interpretiert werden (Junghans, 2022). Somit ergeben sich folgende theoretische Bewässerungsmengen ohne Berücksichtigung der Art der Nutzung:

Tabelle 21: Theoretische Bewässerungsbedarfe aus der gemittelten, saisonalen KWB Deutschlands von 1991-2020 (März bis August) nach Junghans (2022).

Niederschlag	Feuchte Lagen [mm/Jahr]	Mittlere Lagen [mm/Jahr]	Trockene Lagen [mm/Jahr]
Normale Jahre	52	110	164
Trockene Jahre	114	195	262
Sehr trockene Jahre	306	369	422

Die so ermittelten Daten für mittlere Lagen in trockenen und sehr trockenen Jahren entsprechen in etwa den modellierten Bewässerungsbedarfen aus dem Forschungsvorhaben „Schätzung des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs“ (Schwaller et al., 2021). Dabei ist zu berücksichtigen, dass das dort benutzte Modell die realen Bewässerungsbedarfe tendenziell überschätzt, besonders in trockenen und sehr trockenen Jahren. Es ist somit davon auszugehen, dass die realen

Bewässerungsbedarfe mit dem in diesem Vorhaben gewählten Ansatz ebenfalls etwas überschätzt werden.

Für die Potenzialanalyse wird die theoretische Bewässerungsmenge für jedes Stadtgebiet anhand der dort vorliegenden KWB-Daten ermittelt (vgl. Junghans, 2022). Für Potenzialanalysen, die auf Grundlage einer einzigen Flächenangabe erstellt werden, vgl. Kapitel 4.1.3, 4.1.4 und 4.1.5 und Anhang F im Anhangband, wird sich an der durchschnittlichen KWB für mittlere Lagen orientiert. Der theoretische Bewässerungsbedarf wird dann für die drei in Abschnitt 4.1.2 definierten Bereiche des Niederschlags (normale, trockene und sehr trockenen Jahre) angegeben.

4.1.4 Ermittlung der urbanen Grünflächen

Für die Ermittlung der urbanen Grünflächen wurden fünf verschiedene Ansätze entwickelt und bewertet:

1. Ermittlung über den Grünanlagenanteil (Parks, Siedlungsgrünflächen, Botanische Gärten, Spielplätze und Kleingartenanlagen) am Siedlungsgebiet aller deutscher Städte größer 100.000 EW auf Grundlage prozentualer Anteile aus den Erhebungen des Statistischen Bundesamtes (Destatis, 2020), sowie pauschaler Abschätzungen für alle kleineren Städte (siehe F.1 im Anhangband).
2. Ermittlung über den Grünflächenanteil (Laubholz, Nadelholz und krautige Vegetation des Stadtgrünrasters) am Siedlungsgebiet aller deutscher Städte größer 50.000 EW auf Grundlage des Monitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung (2018) des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung, sowie pauschaler Abschätzungen für alle kleineren Städte.
3. Ermittlung über den Grünlandanteil (gemähte und beweidete Gras- und Rasenfläche) am Siedlungsgebiet aller deutscher Städte größer 50.000 EW auf Grundlage des Monitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung (2021), sowie pauschaler Abschätzungen für alle kleineren Städte.
4. Über die Angaben der Flächennutzung am gesamten Siedlungsgebiet Deutschlands (Destatis, 2021).
5. Über eine Hochrechnung des Grünflächenanteils (öffentliche Parks und Grünanlagen, Sportplätze, Kleingärten, Friedhöfe, Straßenbegleitgrün und Straßenbäume) von sechs Modellstädten (Baruth, Lübbecke, Düsseldorf, Breisach am Rhein, Brandenburg a.d.H., Magdeburg), deren Grünflächen mittels GIS-Auswertung erfolgt ist (siehe F.5 im Anhangband).

Das detaillierte Vorgehen und Ergebnisse der fünf Ansätze können dem Anhang F entnommen werden.

4.1.5 Ermittlung des Stadtgrößen-spezifischen Abwasseranfalls

Da es stadtgrößen-spezifisch nur sehr limitierte Daten zum Abwasseraufkommen gibt, wurde auf die Datenbank *kommunales Abwasser* des Schadstofffreisetzungs- und Verbringungsregisters *Thru.de* des UBAs zurückgegriffen, die 3.364 Kläranlagen und deren Abwassermengen aus verschiedenen Jahren erfasst hat (Umweltbundesamt 2018). Die Datenbank listet u.a. die Kläranlagennamen und die zugehörigen Bundesländer auf. Um daraus die Abwassermengen für die jeweiligen Städte zu erhalten, wurden die Kläranlagen anhand ihrer Namen einzelnen Städten zugeordnet, z.B. wurde die Summe des Abwasseraufkommens der Kläranlagen Essen-Burgaltendorf, Essen-Kettwig, Essen Kupferdreh und Essen-Süd der Stadt Essen zugeordnet.

Da einige Kläranlagen nur nach Stadtteilen oder anliegenden Gemeinden benannt sind, z.B. die Kläranlage Ruhleben – einem Stadtteil von Berlin-Spandau, konnten nicht alle Abwassermengen einer Stadt zugeordnet werden.

Nach einer Kontrolle und manuellen Harmonisierung aller Einträge wurde das Abwasseraufkommen von 65 der 80 Groß-, 346 der 586 Mittel- und 492 der 1.015 Kleinstädte für das aktuellste Berichtsjahr 2018 ermittelt. Mit 903 der 1681 untersuchten Städte konnten somit 53% abgedeckt werden.

Um das durchschnittliche theoretische Abwasseraufkommen für die jeweilige Stadtgröße zu ermitteln, wurde das mittlere Abwasseraufkommen entsprechend der Datenbank thru.de der jeweiligen Stadtgröße mit der Gesamtanzahl aller Städte dieser Stadtgröße multipliziert, vgl. Tabelle 22.

Tabelle 22: Ermitteltes theoretisches jährliches Abwasseraufkommen je Stadtgröße aus dem Berichtsjahr 2018

Stadtgröße	Anzahl der Städte	Mittlere Abwassermenge (nach thru.de) [m ³ /a]	Gesamtes Abwasseraufkommen errechnet [Mrd. m ³ /a]
Großstadt	80	34.711.588	2,782
Mittelstadt	584	4.635.563	2,707
Kleinstadt	1015	1.526.479	1,550

Das ergibt ein Gesamtabwasseraufkommen in allen deutschen Städten von 7,040 Milliarden m³/a und entspricht damit 77,8 % des gesamtdeutschen Abwasseraufkommens von 9.047.942.000 m³/a (Destatis, 2022).

Die so ermittelten Abwasseraufkommen dienen der grundsätzlichen Beurteilung der theoretischen Umsetzbarkeit von Wasserwiederverwendungsprojekten im Stadtgebiet, ohne dabei genau auf ökologische Herausforderungen oder Wassernutzungsprobleme einzugehen. Daher sei an dieser Stelle auf den UBA-Bericht „Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderung für die Trinkwassergewinnung in Deutschland“ hingewiesen (Drewes et al., 2018). Nach dessen Ergebnissen enthalten weite Bereiche der Flusseinzugsgebiete von Neckar, Main, Rhein und Havel hohe Klarwasseranteile, die dort vor allem bei Trockenheit für mehrere Wochen dominieren können. Zum Beispiel weisen im Einzugsgebiet des Rheins und des Mains mehr als 60% der Pegel Klarwasseranteile von mehr als 10% auf. Bei Niedrigwasserbedingungen liegt der Klarwasseranteil deutlich höher, z.B. in Teileinzugsgebieten des Neckers, Rheins oder der Ems bei über 50% der Pegel. Um die ökologische Auswirkung einer reduzierten Klarwassereinleitung durch Wasserwiederverwendung genau einschätzen zu können, bedarf es daher immer einer detaillierten Überprüfung für jeden Standort. Dabei sollte die Beurteilung des standortspezifischen Mindestabflusses (MOW), der in Abhängigkeit des Gewässertyps festgelegt ist aus gewässerökologischer Sicht berücksichtigt werden. Jedoch herrschen bei Gewässerstrecken, in denen Niedrigwasserbedingungen über längere Zeit anthropogen bedingt sind (z.B. durch Wasserentnahme) erhöhte Unsicherheiten. Darüber hinaus müssen auch Min-

destabflüsse, die für andere morphologische Prozesse (z.B. bettbildender Abfluss) und für bestehende oder künftige Nutzungen (z.B. für die öffentliche Wasserversorgung oder Schifffahrt) nötig sind, berücksichtigt werden (LAWA, 2019; LAWA, 2020).

4.1.6 Ermittlung des städtischen Oberflächenabflusses

In Ergänzung oder alternativ zu einer Bewässerung mit aufbereitetem Wasser kann auch Niederschlagswasser für eine spätere Nutzung gespeichert werden. Um Aussagen über das Potenzial von Niederschlagswasser für die Bewässerung urbaner Grünflächen überschlägig benennen zu können und eine mögliche Nutzung abzuschätzen, wurde der Oberflächenabfluss von 1961 bis 2011 auf Grundlage der NUTS-3-Gebiete bestimmt. Dafür wurde der Monatsniederschlag abzüglich der Verdunstung in der Vegetationsperiode von April bis September mit der abflusswirksamen Fläche multipliziert, wobei die Abflusswirksamkeit mit einem Faktor in Abhängigkeit der benachbarten Versiegelung angepasst wurde. Auf NUTS-3-Ebene gibt es in Deutschland 213 Stadtstaaten und kreisfreie Städte, die für die Betrachtung des urbanen Raums in Frage kommen. Von den 80 Großstädten sind 72 auf NUTS-3-Ebene definiert, weshalb sich diese Stadtgröße für eine Abschätzung besonders anbietet.

Im Durchschnitt des 50-jährigen Untersuchungszeitraums fielen in allen 72 untersuchten Großstädten zusammen 1.022 Mio. m³ Wasser aus Oberflächenabfluss pro Vegetationsperiode von April bis September an, im Mittel waren es 14,2 Mio. m³ pro Stadt, wobei Berlin mit 69,53 Mio. m³ den größten und Offenbach am Main mit 3,2 Mio. m³ den geringsten Abfluss hatten. Die so ermittelten Oberflächenabflüsse zeigen das theoretische Potenzial, die Bewässerungsbedarfe in Großstädten auf diesem Wege zu decken. Jedoch erfordert die Nutzung von Niederschlagswasser entsprechende Ableitungs- und Speicherkapazitäten sowie Verteilsysteme und je nach Verschmutzung der versiegelten Fläche sowie der geplanten Anwendung des Niederschlagswassers auch eine zusätzliche Aufbereitung.

4.1.7 Zusammenfassung und Bewertung der entwickelten Ansätze

Eine Übersicht der fünf oben dargestellten Ansätze (siehe Kapitel 4.1.4) zur Ermittlung des Bewässerungsbedarfs der urbanen Grünflächen inkl. der drei gewählten Stadtgrößen kann der nachstehenden Tabelle 23 entnommen werden.

Tabelle 23: Übersicht des ermittelten Bewässerungsbedarfs in den fünf Ansätzen inkl. der drei gewählten Stadtgrößen

Ansatz & Stadtgröße	normale Jahre	trockene Jahre	sehr trockene Jahre	Fläche Grünanlagen
	[Mio. m ³ /a]	[Mio. m ³ /a]	[Mio.m ³ /a]	
Ansatz 1 [Summe]	246,54	415,91	788,30	2.284
Groß	62,84	101,44	183,80	669
Mittel	86,20	149,72	287,51	773
Klein	97,50	164,82	317,00	843
Ansatz 2 [Summe]	458,10	770,30	1.446,93	4.453

Ansatz & Stadtgröße	normale Jahre	trockene Jahre	sehr trockene Jahre	Fläche Grünanlagen
	[Mio. m³/a]	[Mio. m³/a]	[Mio.m³/a]	[km²]
Groß	191,80	309,60	562,70	2.079
Mittel	168,80	295,84	567,24	1.532
Klein	97,50	164,82	317,07	843
Ansatz 3 [Summe]	351,20	613,20	1.190,41	3.738
Groß	72,43	126,22	241,70	1.132
Mittel	181,30	322,14	631,81	1.764
Klein	97,50	164,82	317,00	843
Ansatz 4 [Summe]	626,80	1.111,11	2.102,60	5.698
Ansatz 5 [Summe]	390,51	685,52	1.266,20	3.396
Groß	251,60	442,20	819,13	2.200
Mittel	67,70	118,02	214,60	571
Klein	71,30	125,33	232,50	625
Durchschnitt aller Ansätze				
Gesamt	414,62	719,29	1.358,89	3.468
Groß	144,70	244,83	451,82	1.520
Mittel	126,00	221,43	425,30	1.160
Klein	90,93	154,95	295,90	788

Alle fünf gewählten Ansätze sind Annahmen. Um die Unwägbarkeiten dieser Ansätze auszugleichen, wird mit dem Durchschnitt weitergerechnet. Der Durchschnitt aller fünf Ansätze zeigt einen theoretischen Bewässerungsbedarf für urbanes Grün von 414,62 Mio. m³ in normalen Jahren, 719,19 Mio. m³ in trockenen Jahren und 1.358,89 Mio. m³ in sehr trockenen Jahren. Dabei weisen die Groß- und Mittelstädte einen ähnlichen Bewässerungsbedarf auf, wobei die Großstädte rechnerisch einen leicht höheren Bedarf haben. Im Folgenden wird der ermittelte Bewässerungsbedarf als mögliches Potenzial für die Bewässerung mit aufbereitetem Wasser aufgegriffen. In weiteren Schritten müssen jedoch zusätzliche Aspekte berücksichtigt werden, um zu beurteilen, ob der Bewässerungsbedarf tatsächlich durch aufbereitetes Wasser gedeckt werden könnte.

Die Ergebnisse der einzelnen Ansätze weichen z.T. um das 2,5-fache voneinander ab (z.B. Ansatz 1 „nach dem Grünflächenanteil am Siedlungsgebiet“ im Vergleich zu Ansatz 4 „nach der Flächennutzung am gesamten Siedlungsgebiet Deutschlands“). Ansatz 1 führt durch seine pauschale Zuordnung von Grünflächenanteilen an Verkehrs- und Siedlungsflächen für ganze Stadtgruppen

gleicher Größe zu einer Ungenauigkeit. Diese nimmt für alle Städte kleiner 100.000 EW zu, da die urbane Grünfläche auf den bundesdeutschen Durchschnitt von 6% an der Siedlungs- und Verkehrsfläche gesetzt wurde. Im Verhältnis zu den anderen Ansätzen weist Ansatz 1 das kleinste Potenzial auf. Ansatz 4 weist hingegen durch die deutschlandweite pauschale Angabe zu Siedlungs- und Verkehrsflächen, sowie deren Grünflächen, das größte Potenzial auf. Da in diesem Ansatz nicht zwischen ländlichen und städtischen Siedlungen unterschieden wird, überschätzt dieser Ansatz das Potenzial stark. Ansatz 2, 3 und 5 liegen relativ dicht beieinander, wobei Ansatz 2 auf Grund seiner Datengrundlage – Grünflächen und notwendige Bewässerungsmengen konnten für die Städte größer 50.000 Einwohner*innen relativ ortsspezifisch bestimmt werden – als der genaueste angesehen werden kann, auch wenn durch die Berücksichtigung von Nadel- und Laubbäumen (Stadtwälder) eine Überschätzung nicht ausgeschlossen werden kann.

Insgesamt wird der Durchschnitt der fünf Ansätze als erste Näherung für den maximalen Bewässerungsbedarf deutscher Städte angenommen.

Bezogen auf die Stadtgrößen zeigt sich, dass die Großstadt pro Stadt den größten Bedarf aufweist. Der Bedarf für Kleinstädte ist absolut, als auch relativ gesehen am kleinsten, vgl. Tabelle 24, da sie über die wenigsten urbanen Grünflächen verfügen.

Tabelle 24: Theoretischer Bewässerungsbedarf des urbanen Grüns relativ zur Anzahl der jeweiligen Stadtgröße

Stadtgröße	Anzahl	Maximaler Bewässerungsbedarf pro Stadt je Stadtgröße		
		normale Jahre	trockene Jahre	sehr trockene Jahre
		[m ³ /a]	[m ³ /a]	[m ³ /a]
Groß	80	1.808.326	3.060.362	5.647.789
Mittel	584	215.720	379.167	728.220
Klein	1015	89.590	152.660	291.490

Da Großstädte i.d.R. über große, zentrale Kläranlagen verfügen, ist das potenzielle Angebot von aufbereitetem Wasser zur Bewässerung in diesen Städten besonders groß. (AbwV, 2022). Allerdings ist eine weitergehende Aufbereitung sowie die Spurenstoffelimination (bisher) nicht an die Ausbaugröße gekoppelt, weshalb es keine direkten Synergieeffekte gibt. Diese sind mit Blick auf die angedachten Anforderungen zur Spurenstoffelimination auf Kläranlagen laut Entwurf der EU-Kommunalabwasserrichtlinie (2023) jedoch perspektivisch zu erwarten (vgl. Kap. 4.2.2 zu konkreten Aufbereitungsverfahren).

Setzt man die durchschnittlichen Abwassermengen (Tabelle 22) mit dem in Tabelle 24 dargestellten Bewässerungsbedarf in Bezug, ergibt sich eine Abschätzung, welcher Klarwasseranteil je Stadtgröße für die Bewässerung von Grünflächen genutzt werden könnte. Somit ergibt sich, dass der für die Bewässerung theoretisch erforderliche Klarwasseranteil in Mittel- und Großstädten mit ca. 5% in normalen Jahren, ca. 9% in trockenen Jahren und ca. 15% in sehr trockenen Jahren etwas geringer ausfallen würde als in Kleinstädten, die rechnerisch 5% in normalen Jahren, 10%

in trockenen Jahren und 19% des Jahresabwasseraufkommens in sehr trockenen Jahren benötigen würden, um den ermittelten Bewässerungsbedarf zu decken. Allerdings lässt sich daraus keine allgemeine Eignung einer Stadtgröße für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung städtischen Grüns ableiten. Aussagen zu einer möglichen ökologischen Gefährdung für die Gewässer durch eine verringerte Klarwassereinleitung kann nur durch detaillierte Untersuchungen im Rahmen des Risikomanagements (s.u.) am geplanten Einsatzort abschließend geklärt werden, die u.a. auch zeitlich variable Pegelstände und Konzentrationen sowie das aquatische Ökosystem berücksichtigen müssen.

Basierend auf den o.g. Abschätzungen ist das Flächenverhältnis von Grünfläche zu Stadtfläche je Stadtgröße für Großstädte am größten und beträgt im Schnitt etwa 15%. Mittelstädte haben demnach nur einen Anteil von 12% und Kleinstädte nur etwa 10%. Damit ist die Dichte an Grünflächen in Großstädten etwas höher, womit sich eine infrastrukturelle Anbindung eher lohnen kann, wenn die Kläranlagen ortsnah sind. Allerdings lässt sich daraus ebenfalls keine allgemeine Eignung für die Wasserwiederverwendung ableiten, da für die infrastrukturelle Anbindung genügend Raum, u.a. auch für Speichereinrichtungen, im städtischen Siedlungsgebiet vorhanden sein muss. Auch die Verlegung von Rohrleitungen kann in dichten Siedlungen wie z.B. Großstädten kostenaufwendiger sein. Dies muss individuell für jede Stadt geprüft werden.

Allgemein sind die Aspekte zur Wasserwiederverwendung losgelöst von der Stadtgröße zu betrachten und ein gut geplantes Wasserwiederverwendungskonzept kann sich in jeder Stadtgröße lohnen, wenn es an die örtlichen Gegebenheiten angepasst wird. Neben dem Wasserangebot, den Mengen behandelten kommunalen Abwassers für die Aufbereitung und den notwendigen Bewässerungswassermengen spielen die beteiligten Akteure eine entscheidende Rolle. Nur eine Kooperation aus bereitwilligen Betreiber*innen einer Aufbereitungseinrichtung und interessierten Abnehmer*innen, die sich auf eine langjährige Zusammenarbeit verständigen, kann zu einem lohnenden Wasserwiederverwendungsprojekt führen. Zukünftige klimatische Änderungen könnten diese Zusammenarbeit zusätzlich forcieren. Darüber hinaus muss die Zusammensetzung des Abwassers und die der urbanen Grünflächen den Randbedingungen für eine Bewässerung gerecht werden, vgl. Kapitel 4.3. Weiter muss der Raum und der finanzielle Grundstock für den Bau der Aufbereitungs-, Speicher- und Transportinfrastruktur vorhanden sein und die Investition sich über die Nutzungsdauer der Bewässerungsinfrastruktur zumindest amortisieren. Auch die Akzeptanz der städtischen Stakeholder für die Wasserwiederverwendung ist wichtig und stadtgrößenunabhängig zu betrachten.

4.1.8 Diskussion der Ergebnisse zum Potenzial der Wasserwiederverwendung für Bewässerung im urbanen Raum

Durch die beschriebene Datengrundlage der urbanen Grünflächen in Deutschland sowie ihrem Bewässerungsbedarf sind die Ergebnisse der Potenzialanalyse als Näherung zu verstehen. Da die fünf Ansätze zur Ermittlung der Grünflächen davon ausgehen, dass alle urbanen Grünflächen in der gesamten Vegetationsperiode mit dem Defizit aus der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) bewässert werden müssen, ist das abgeschätzte Potenzial als Maximalwert für die urbane Bewässerung zu verstehen.

Da die Bewässerungsbedürftigkeit auf der klimatischen Wasserbilanz ganzer Stadtgebiete beruht und lokale Gegebenheiten wie z.B. Verschattung, Bodenfeuchte, Pflanzenart oder auch Nut-

zungsart nicht berücksichtigt werden können, ist davon auszugehen, dass die tatsächlich benötigte Bewässerungsmenge geringer ausfällt. Hinzu kommt der Faktor der Bewässerungswürdigkeit, der in der Landwirtschaft als Kostendeckung der Bewässerungsmaßnahme durch einen Mehrerlös beschrieben wird (Albrecht et al., 2003). Auch wenn der Mehrerlös am urbanen Grün schwer zu beziffern ist, da hier i.d.R. keine Feldfrüchte erwirtschaftet werden, sondern Aspekte wie sozialer Zusammenhalt, kulturelle und bauhistorische Identität, Erholung und Bewegung, Gesundheitsförderung, Wohlbefinden und Lebensqualität, Frischluft und Kaltluftzufuhr, Lärmdämpfung, Temperaturregulierung und Regulierung des Wasserhaushalts maßgebende Mehrwerte sind (BBSR, 2022; Sieker et al. 2019), werden nicht alle urbanen Grünflächen gleich gepflegt/ bewässert. So werden z.B. Rabatten als gärtnerisch repräsentative Flächen, Schmuckbeete, Zierrasen sowie Blüh- und Decksträucher auf Grund ihrer Funktion intensiver gepflegt als z.B. Landschaftsrasen, Wiesen, Säume, Ränder und Straßenbegleitgrün. (Kurths et al., 2017).

Das wird auch anhand der beiden Modellstädte Baruth und Lübbecke deutlich, wo nach Angaben der Städte die urbanen Grünflächen ungefähr doppelt so groß ausfallen wie die durch die Auswertung der GIS-Daten (siehe Anhang F.5 im Anhangband). Gleichzeitig beträgt dort die tatsächliche Bewässerungsfläche und -menge jedoch nur einen Bruchteil der theoretisch ermittelten Mengen und Bewässerungsflächen. In Baruth liegen z.B. 419.555 m² urbane Grünfläche vor, wovon zurzeit lediglich 1.000 m² im Jahr mit 300 m³ Wasser aus der öffentlichen Wasserversorgung bewässert werden (Zierath, 2022). Nach GIS wurden nur 255.929 m² urbaner Grünfläche ermittelt (ca. 61%), die jedoch vollständig bewässert werden. Dies ergibt eine um ca. 256% größere Bewässerungsfläche. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch in Lübbecke, wo 767.000 m² urbane Grünfläche vorliegen, wovon zurzeit lediglich 82.000 m² im Jahr mit etwa 9000 m³ bewässert werden (Feiler, 2022). Die durch GIS -ermittelte urbane Grünfläche in Lübbecke entsprechen mit 306.800 m² nur 40% der angegebenen Fläche. Da diese nach den Ansätzen jedoch komplett bewässert werden, entspricht die tatsächliche Bewässerungsfläche nur 25%.

Da die gewählte Potenzialanalyse ein Maximal-Ansatz ist, der urbane Grünflächen nicht weiter in die unterschiedlichen Flächentypen und Nutzungsarten unterteilen kann, ist die tatsächlich benötigte Bewässerungsmenge momentan deutlich kleiner. Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch die Häufung von Extremwetterlagen die Bedeutung von urbanen Grünanlagen für das Stadtklima zunehmen wird (Sieker et al., 2019), womit auch die Bewässerungsbedarfe dieser Flächen steigen wird.

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt bei der Ermittlung des Potenzials der Wasserwiederverwendung zur Bewässerung des urbanen Grüns ist ein angepasstes Niederschlagswassermanagement im Sinne einer Blau-Grünen-Infrastruktur, das durch geeignete Maßnahmen wie z.B. ortsnah Versickerung, Speicherung und Entsiegelung zu einer Erhöhung der Regenwassernutzung führt und damit den Bewässerungsbedarf in Stadtquartieren minimieren kann (BGS, 2022; Matzinger, 2018). Da Niederschlagswasser von städtischen versiegelten Flächen, vor allem Dachflächen nur zum Teil oder geringfügig aufgereinigt werden muss und ggf. ortsnah anfällt, ist dort eine Weiternutzung als Bewässerungswasser möglich, womit auch Grund- und Oberflächengewässer geschont werden können (DWA A 102, 2020; DWA A 138-1; 2020).

Der gesamte jährliche Oberflächenabfluss in 72 untersuchten Großstädten von 1.022 Mio. m³ pro Vegetationsperiode, siehe Kapitel 4.1.6, im Mittel 14,2 Mio. m³ pro Stadt, zeigt, dass Niederschlagswasser rein theoretisch den ermittelten Bewässerungsbedarf von 144 – 541 Mio. m³ in Großstädten decken könnte (Hermann, 2022). Anfallsort und Nutzungsstelle sind allerdings sind

räumlich getrennt und auch die Verschmutzung ist zu beachten. Daher ist eine deutschlandweite Aussage schwer zu treffen, so dass das Niederschlagsgeschehen und der Oberflächenabfluss in jeder Stadt genau untersucht werden muss, ebenso wie Speicher-, Transportmöglichkeiten und notwendige Aufbereitung.

Im Gegensatz zu Niederschlag fällt Abwasser kontinuierlich an, weshalb es auch zur Bewässerung zur Verfügung steht, wenn es gebraucht wird. Die zentrale Aufbereitung macht den Transport darüber hinaus leicht planbar.

Da die Implementierung der Blau-Grünen-Infrastruktur im Bestand sehr kostspielig ist und weitgehend im Zuge von Neubau oder anfallenden Sanierungsmaßnahmen vorangetrieben wird, könnte der aktuelle Sanierungsbedarf aller städtischen Kanalisationen etwa 20% (Berger, et al, 2020) zu einer verstärkten Implementierung führen. Daher ist davon auszugehen, dass Niederschlagswasser in Zukunft teilweise effizienter genutzt wird, womit auch benötigte Bewässerungsmengen minimiert würden (BGS, 2022; Matzinger et al., 2020).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die ermittelten potenziellen Bewässerungsmengen von 414,62 Mio. m³ in normalen Jahren, 719,19 Mio. m³ in trockenen Jahren und 1.358,89 Mio. m³ in sehr trockenen Jahren maximale Werte sind, die durch die aktuellen Datengrundlagen die tatsächliche Bewässerungsbedürftigkeit und -würdigkeit stark überschätzen. Daher wird das tatsächliche Potenzial der Wasserwiederverwendung zur Bewässerung des urbanen Grüns geringer ausfallen als ermittelt. Das wird im Vergleich zu den Wassermengen für die landwirtschaftliche Bewässerung nochmal sehr deutlich, die im Jahr 2019 nur ca. 400 Mio. m³ betrug (Destatis, 2022).

Um die urbanen Bewässerungsmengen genauer beziffern zu können, muss die Datengrundlage bzgl. der urbanen Grünflächen verbessert werden. Dazu zählt neben einheitlichen Definitionen des urbanen Grüns auch die Erfassung von Flächen, Flächenarten sowie Flächennutzung und vor allem der tatsächlich benötigten Bewässerungsmengen und -zeiten, was sicherlich nur lokal erfolgen kann. Gerade im Hinblick auf zukünftige Dürre und Wasserknappheit sind die Erfassung und Dokumentation der Wassernutzung von Städten unabhängig von ihrer Quelle unabdingbar, um einen Überblick über den Verbrauch zu erhalten. Nur so lassen sich Einsparungspotenziale überhaupt ermitteln und im Weiteren auch das Potenzial durch Substitutionsmöglichkeiten, z.B. Wasserwiederverwendung, genau beziffern. Daher wird an dieser Stelle angeregt, die Erfassung von Bewässerungsmengen deutschlandweit einheitlich zu regeln sowie in einheitliche Datenbanken bzgl. öffentlicher Grünanlagen anzubieten, die auch eine Differenzierung zwischen Stadt und Land zulassen. Zur Charakterisierung der Grünflächen zählen dazu u.a. Baumbestände inkl. Baumalter, Flächennutzungen, Pflanzenarten, Bodenart, tatsächlich genutzte Bewässerungsmengen und deren Quellen, Eigentumsverhältnisse, Zugangs- und Öffnungszeiten.

Abschließend kann festgehalten werden, dass Großstädte prinzipiell die meisten Grünanlagen, die größten maximalen Bewässerungsbedarfe und i.d.R. eine ausreichende Menge an Klarwasser aus örtlichen Kläranlagen aufweisen.

4.2 Erkenntnisse aus bestehenden technischen Lösungen für die Wasserwiederverwendung zur urbanen Bewässerung

Autor*innen: Guggenberger, T. Barjenbruch, M., Schritt, H.

4.2.1 Einleitung und Übersicht zur Best-Practice

International bestehen umfassende Erfahrungen mit der Wasserwiederverwendung, die teilweise auch für die Bewässerung von Grünflächen eingesetzt wird. Durch eine umfassende Literaturrecherche zum Stand der Technik gängiger Aufbereitungsverfahren von Klarwasser für die Bewässerung von urbanen Grünanlagen wurden die dafür notwendigen Aufbereitungsschritte bestimmt. Dafür wurden Anlagen ausgewählt, die Wasser für die urbane Bewässerung aus kommunalem Abwasser aufbereiten. Da in der Regel Wasser für mehrere Nutzungsoptionen aufbereitet wird, z.B. urbane Bewässerung, Straßenspülung und der Anreicherung von natürlichen Gewässern, sind Anlagen, die nur Bewässerungswasser erzeugen die Ausnahme. Der Anteil an Bewässerungswasser für urbane Grünflächen spielte bei der Betrachtung keine Rolle.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche umfassen 19 Anlagen. Davon befinden sich acht in Kalifornien, USA; weitere Standorte sind u.a. China, Namibia, Singapur, Spanien und Italien. Informationen zu der Nutzung des aufbereiteten Wassers, den angewandten Aufbereitungsverfahren, Standorten sowie weitere Details können dem Anhang G im Anhangband entnommen werden.

Um eine Beurteilung der Anlagen vornehmen zu können, wurden die eingesetzten Technologien auf die Einhaltung relevanter Wasserparameter zur Wasserwiederverwendung aus internationalen Gesetzesvorgaben überprüft (die jeweiligen Anforderungen werden in Kap. 4.4.1 Tabelle 35 und Tabelle 36 vorgestellt). Zudem werden Abgabepreise mit Trinkwasserentgelten verglichen und mögliche Synergien mit bereits bestehenden bzw. geplanten Aufbereitungstechniken dargestellt. Aufbereitungsverfahren.

Die Standardabwasserbehandlung besteht aus mechanischer Vorreinigung mit Vorklärung, Belebungsverfahren und Nachklärung. Als zusätzliche Reinigungsstufe muss für die urbane Bewässerung mindestens eine Sand- (Ein- oder Zweischicht) bzw. Tuchfiltration in Kombination mit einer nachgeschalteten Desinfektion eingesetzt werden. Anspruchsvollere Aufbereitungsstufen werden verwendet, wenn das aufbereitete Wasser auch für die Anreicherung natürlicher Gewässer (einschließlich Grundwasser) oder als Prozesswasser in verschiedenen Industrieanwendungen bereitgestellt wird.

Die Richtlinien für Wasserwiederverwendung der US-Amerikanischen Umweltbehörde (EPA) beschreibt die notwendige Aufbereitung für die Wasserwiederverwendung für nicht trinkbare Anwendungen im urbanen Bereich mit unbeschränktem Zugang (z.B. öffentliche Parkanlagen) als Zweitbehandlung kombiniert mit einer Filtration und Desinfektion (EPA; 2012). Auch die EU-Verordnung 2020/741 für die landwirtschaftliche Wasserwiederverwendung sieht als schärfste Anforderung, für die Bewässerung von Pflanzen zum Rohverzehr, eine Zweitbehandlung in Kombination mit einer Filtration und Desinfektion vor (EU, 2020). Das portugiesische Gesetz 119/2019 für die Wasserwiederverwendung sieht ebenfalls mindestens eine Filtration kombiniert mit einer Desinfektion für die uneingeschränkte urbane Bewässerung vor (Portugal, 2019). Dies entspricht auch den Vorgaben von World Health Organization (WHO) (2016), der Australian Health Ministers Conference (2006) oder ISO 20760 und 20761. Nur die griechische Gesetz-

gebung verlangt für urbane Anwendungen eine Zweitbehandlung kombiniert mit einer weitergehenden Aufbereitung (min. Ultrafiltration) kombiniert mit einer Desinfektion (Griechenland, 2011).

Bei der Desinfektion muss je nach Einsatzort (z.B. Salzverträglichkeit des Bodens bzw. der Pflanzen), Speicher- und Transportzeit, überprüft werden, ob eine Chlor-, UV- oder Ozon-Desinfektion am geeignetsten für alle Umweltkompartimente und die menschliche Gesundheit ist. Generell ist eine UV-Desinfektion vorzuziehen, diese kann aber bei längeren Verweilzeiten eine Nachdesinfektion im Verteilungssystem oder am Speicher erfordern, um die Keimfreiheit aufrechtzuerhalten.

Neben den Qualitätsanforderungen muss die Reduktionsleistung der Prozesskette in der Regel über eine Validierung nachgewiesen werden, um eine unbedenkliche hygienische Qualität zu gewährleisten, wie es die internationale Praxis auch vorsieht – vgl. EU (2022), EU (2020), EPA (2022), WHO (2016), Australian Health Ministers Conference (2006)

Synergieeffekte einer weitergehenden Abwasseraufbereitung für die Wasserwiederverwendung lassen sich hinsichtlich bestehender und geplanter Anforderungen an die Phosphor- und Spurenstoffelimination ableiten:

Da zur Erreichung der mittlerweile häufig geforderten niedrigen P-Ablaufwerte von $\leq 0,5$ mg/l für Kläranlagen der Größenklasse 4 und 5 immer eine Filtration zum vollständigen Rückhalt von Schwebstoffen notwendig ist (DWA A 202, 2023), kann durch das Nachschalten einer geeigneten Desinfektion Wasser zur Wiederverwendung für die Bewässerung erzeugt werden. Dabei wären die geringen P-Konzentrationen von Vorteil, um Oberflächengewässer vor Eutrophierung zu schützen.

Auch die Spurenstoffelimination wird in Kombination mit einer Filtration betrieben. So kann sie oxidativ mit einer Kombination aus Ozon und einem biologisch wirksamen Filter; mit Pulveraktivkohle (PAK) und anschließender Filtration oder direkt mit einem Filter aus Granulierter Aktivkohle (GAK) umgesetzt werden. Dabei können die PAK- und GAK-Verfahren auch mit einer Ozonung kombiniert werden, um die Eliminationsleistung zu erhöhen. Dabei kann sich bei entsprechend hoher Ozon-Dosis schon eine desinfizierende Wirkung entfalten (DWA M 285, 2021). Ohne den Einsatz von Ozon kann durch eine geeignete nachgeschaltete Desinfektion die empfohlene Verfahrenskombination aus Filtration und Desinfektion umgesetzt werden. Da die Spurenstoffelimination umweltschädliche und gesundheitsgefährdende Stoffe entfernt, stellt dies einen Mehrwert für die Wasserwiederverwendung dar bzw. ist in der Regel insbesondere bei relevanten industriellen Indirekteinleitern oder einer unbekanntem Abwasserzusammensetzung erforderlich.

In Deutschland sind z.Z. 46 Kläranlagen zur Spurenstoffelimination in Betrieb und weitere 90 befinden sich im Bau (Baur et al., 2022). Dabei ist die Verteilung momentan nicht an die Ausbaugröße der Kläranlage gekoppelt, vgl. Tabelle 25. Allerdings sieht der Entwurf für die Novellierung der EU-Kommunalwasserrichtlinie den Bau einer Spurenstoffelimination für alle Kläranlagen der Größenklasse fünf bis 2035 und bis 31.12.2040 für alle Kläranlagen der Größenklasse drei und vier (91/271/EWG; Elgeti et al., 2023) vor. Da in Deutschland 223 Kläranlagen die Größenklasse fünf haben (4% aller Kläranlagen), diese aber 54% der Gesamtausbaugröße repräsentieren, ergibt sich hier ein großes zukünftiges Potenzial für die

4.2.2 Ablaufqualitäten

Die erreichten Ablaufqualitäten in den betrachteten internationalen Anwendungsbeispielen, vgl. Tabelle 25, bestätigen, dass eine Aufbereitung mit Sandfiltration und zusätzlicher Desinfektion in den meisten Fällen ausreicht, um die geforderten Ablaufqualitäten zu erreichen. Dies gilt für Griechenland jedoch nur für die Ablaufwerte, nicht für die Aufbereitungstechnik, da dort explizit eine Membranstufe verlangt wird.

Überschreitungen der Grenzwerte liegen bei einigen Anlagen für Stickstoff und BSB₅ vor. Das lässt auf eine unzureichende Belebungs- und Nitri-/Denitrifikationsstufe schließen.

Alle betrachteten Anlagen halten die geforderten Grenzwerte für den Indikatorparameter E. coli ein. In den gesamten Vereinigten Staaten besteht kein Nachweis über Krankheitsausbrüche im Zusammenhang mit Wasserwiederverwendungssystemen für die urbane Bewässerung (David, 2003). Weitere detaillierte Ausführungen zu möglichen Risiken und ihrer Minimierung sind in Kapitel 4.4. zum Risikomanagementansatz zu finden.

4.2.3 Kosteneinsparpotenziale

Um mögliche Einsparpotenziale durch eine Wasserwiederverwendung im Vergleich mit der Verwendung von Trinkwasser aufzuzeigen, wurden die angegebenen Abgabepreise für urbane Nutzungszwecke mit dem durchschnittlichen Trinkwasserentgelt aus dem Quellenjahr und dem jeweiligen Herkunftsland verglichen, vgl. Anhang G im Anhangband. Aussagen zu Einsparungen inkl. Kostendeckung auf der Betreiberseite sind auf Grund der Datenlage nicht möglich. Die ausgewerteten Aufbereitungsanlagen erheben eine Gebühr für die Wasserwiederverwendung, die 39% - 86% des lokalen Trinkwasserpreises entspricht.

Tabelle 25: Erreichte Zielwerte der untersuchten Aufbereitungsanlagen inkl. der Aufbereitungstechniken und Einhaltung der untersuchten Rechtsvorschriften (siehe Tabelle 35 und Tabelle 36) bzgl. der Wasserwiederverwendung für die Bewässerung urbaner Grünanlagen

	ECLWRF Kalifornien, USA 170.300 m³/d	JZWRP Tianjin, China 60.000 m³/d	HWRP Honolulu, USA 31.500 m³/d	PWWTP Bora Bora, Fran.- Poly. 50.000 m³/d	SWWTSRS New York, USA 95 m³/d	QHWRP Peking, China 80.000 m³/d	BXHWRP Peking, China 60.000 m³/d	NGWRP Windhoek, Na- mibia 21.000 m³/d
Aufbereitungs- technik	Fä. + Fl. SF Cl-D.	UF Oz. Cl-D.	Fä. SF UV-D.	UF SP Cl-D.	MF UV-D SP	UF UV- u. Cl-D. SP	S UF Cl-D.	AK UF Cl-D.
CSB (mg/l)	k. A.	10-25	k. A.	15	k. A.	45	17,5	11
BSB ₅ (mg/l)	k. A.	0,4 – 5	0 – 30	4	<6	<2	<2	k. A.
Trübung (NTU)	<2	0 – 2	0 – 30	k. A.	0,2	k. A.	k. A.	0,1
N (mg/l)	35-45	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	<20	<15	k. A.
P (mg/l)	-	k. A.		k. A.	k. A.	<0,5	<0,3	k. A.
E. coli (KBE/100ml)	n. n.	< 0,3	< 2,2	n. n.	n. n.	n. n.	n.n	n. n.
Grenzwerte einge- halten in	Zy, Fr, Po, Sp, EU, EPA	Zy, Fr, Gr, It, Po, Sp, EU, EPA	-	Zy, Fr, It, Po, Sp, EU, EPA	Zy, Fr, Gr, It, Po, Sp, EU, EPA	Zy, Fr, Po, Sp, EU, EPA	Zy, Fr, Gr, It, Po, Sp, EU, EPA	Zy, Fr, Gr, It, Po, Sp, EU, EPA

	IRIS Boca Raton, USA 36.718 m³/d	PWRP Kalifornien, USA 30.238 m³/d	LCWRP Kalifornien, USA 757 m³/d	VWRP Kalifornien, USA 81.164 m³/d	LCOWRP Kalifornien, USA 141.952 m³/d	LBWRP Kalifornien, USA 94.635 m³/d	LAWRP Kalifornien, USA 47.969 m³/d	PDWRP Kalifornien, USA 45.424 m³/d
Aufbereitungs- technik	SP CI-D. SF	CI-D. SF CI-D.	 CI-D. SP	CI-D. SF CI-D.	CI-D. SF CI-D.	CI-D. SF CI-D.	CI-D. SF CI-D.	SP TF CI-D.
CSB [mg/l]	22,1 – 80	k. A.	181	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
BSB ₅ [mg/l]	k. A.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Trübung [NTU]	2 – 12	0,5	k. A.	0,62	0,8	0,76	0,66	0,88
N [mg/l]	15 – 40	<12	36	<8	<9	<11	<6	<5
P [mg/l]	k. A.	<0,3	k. A.	0,8	0,3	0,5	k. A.	k. A.
E. coli [KBE/100ml]	k. A.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Grenzwerte eingehalten in	-	Zy, Fr, Gr*, It, Po, Sp, EU, EPA	-	Zy, Fr, Gr*, It, Po, Sp, EU, EPA	Zy, Fr, Gr*, It, Po, Sp, EU, EPA	Zy, Fr, Gr*, It, Po, Sp, EU, EPA	Zy, Fr, Gr*, It, Po, Sp, EU, EPA	Zy, Fr, Gr*, It, Po, Sp, EU, EPA

Legende: biologischer Aktivkohlefilter = BAK; Chlor-Desinfektion = CI-D; D = Desinfektion; Druck Entspannungs-Flotation = DEF; Fällung = Fä; Flockung = FI; Granulierte-Aktivkohle-F. = GAK; Klärteich = KT; Membranbioreaktor = BR; Mikrofiltration = MF; Mischbehälter = MB; Nitrifikation = N; Nitri-Denitri = N-DN; Ozonung = O-D; Pulver-Aktivkohle = PAK; Phosphat-Fällung = P-FI; Sandfiltration = SaF; Sieb = Si; Speicher = Sp; Schöpfungsteich = ST; Stabilisierung = Sta; Tuchfiltration = TF; UV-Desinfektion = UV-D.; Ultrafiltration = UF; Umkehrosiose = UO; Zweischichtfiltration = ZSF
n. n. = nicht nachgewiesen; k. A. = keine Angabe

Zy = Zypern, Fr = Frankreich; Gr = Griechenland; It = Italien; Po = Portugal; Sp = Spanien; EPA = 32 US-Bundesstaaten

* Eingehalten in Griechenland anhand der Grenzwerte, jedoch nicht anhand der verlangten Aufbereitung

4.2.4 Verteilungssystem / Infrastruktur

Die infrastrukturelle Anbindung zwischen Kläranlage und zu bewässernden Grünflächen kann mit einem eigenen Verteilernetz oder mit Tankwagen erfolgen. Dabei kann auch eine Kombination aus beiden Verteilungsformen bestehen, wenn zentrale Speicher- bzw. Tankanlagen für die Entnahme aufbereiteten Wassers mittels eines Leitungsnetzes angebunden sind. Von den aufgezeigten internationalen Praxisbeispielen verfügen alle über ein eigenes Leitungsnetz.

Die Verteilung mittels Tankwagen bietet sich vor allem für kleine Flächen an, wie Straßenbegleitgrün, Straßenbäume und eher unregelmäßig zu bewässernden Flächen, wenn sich keine Investition in ein Verteilernetz lohnt. Da der Betrieb der Tankwagen allerdings energie-, platz- und lärmintensiv ist und i.d.R. mit Verbrennungsmotoren geschieht, ist er aus Klimaschutz-, Lärm- und Platzgründen unter ökobilanziellen Gesichtspunkten abzuwägen.

Die Verteilung mittels eines separaten Leitungsnetzes hingegen bedarf einmalig sehr hoher Investitionskosten, wobei der Bau ebenfalls energieintensive Arbeit benötigt. Jedoch ist nach Fertigstellung der Betrieb verhältnismäßig energie- und wartungsarm und es kann von einem 50- bis 80-jährigen Betrieb ausgegangen werden (Baur, 2019). Es lohnt sich vor allem bei langjährigen Abnahmeverträgen mit konstantem und großem Bewässerungswasservolumen für große Grünanlagen.

Rohrleitungen, Schachtdeckel und weitere Komponenten des Verteilungssystems für aufbereitetes Wasser für urbane Zwecke ohne Trinkwasserqualität wird weltweit in violetter Farbe verbaut. Zusätzlich sind sie noch mit Warnhinweise versehen, die auf die Qualitätsstufe „kein Trinkwasser“ aufmerksam machen, vgl. Abbildung 86.

Abbildung 86: Beispiele für Verteilungssystemen für die Bewässerung urbaner Grünflächen mit aufbereitetem Wasser, links mit Warnhinweis auf dem Rohr, rechts separate Warnung (McCann et al., 2018; Madrid, 2023)



Quelle: McCann et al., 2018; Madrid, 2023.

Entnahmestellen und zu bewässernde Flächen sind ebenfalls gekennzeichnet und es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei dem verwendeten Wasser nicht um Trinkwasser handelt, vgl. Abbildung 87.

Generell sind die für das jeweilige Versorgungskonzept notwendigen Speicher- und Transportzeiten bei der Auslegung der notwendigen Desinfektion zu berücksichtigen. So kann durch die Depotwirkung von Chlor das aufbereitete Wasser vor einer Wiederverkeimung geschützt werden. Zusätzlich muss die geplante Beprobung inkl. der Probenahmestellen entlang des gesamten Wasserwiederverwendungssystems geplant und durchgeführt werden. D.h. die gesamte Infrastruktur mit möglichen Übergabestellen, Speichereinheiten, sowie Stand-, Speicher und Transportzeiten muss berücksichtigt werden, um die Sicherheit des Systems zu gewährleisten.

Abbildung 87: Entnahmestelle auf einem Park in Alicante mit violetter Rohrleitung und Warnhinweisen (Morote et al., 2019). Violette Warnschild auf einem dem „Campo Golf La Moraleja“ in Madrid (Madrid, 2023)



Quelle: Morote et al., 2019, Madrid, 2023.

4.2.5 Zusammenfassung

Die untersuchten Praxisbeispiele zur Wasserwiederverwendung für die Bewässerung urbaner Grünanlagen haben gezeigt, dass in der Regel die Aufbereitung von kommunalen Abwasser durch einen drei-stufigen Klärprozess inkl. umfassender Nitrifikation / Denitrifikation mit anschließender Sand- oder Tuchfiltration und Desinfektion ausreicht, um die jeweiligen nationalen bzw. internationalen Qualitätsanforderungen für urbane Wasserwiederverwendung zu erreichen.

Das notwendige Aufbereitungsverfahren sollte immer nach Kenntnis der Abwasserzusammensetzung und dem geplanten Einsatzort und -zweck und den damit einhergehenden Risiken für Umwelt und Gesundheit geplant werden. Auch wenn die minimale zusätzliche Aufbereitung aus Filtration und Desinfektion in vielen Fällen ausreicht, kann eine erfolgreiche und sichere Wasserwiederverwendung nach einer individuellen Planung am Einsatzort auch weitergehende Technologien verlangen.

Die Verteilung kann mittels Lastwagen oder eigenem Rohrleitungssystem praktiziert werden, wobei beide Varianten unter Aspekten der Nachhaltigkeit abgewogen werden müssen. Dabei sind Probenahmestellen entlang des gesamten Wasserwiederverwendungssystems zu berücksichtigen und eine Wiederverkeimung durch geeignete Gegenmaßnahmen zu verhindern.

4.3 Bewertungsmatrix für die Umsetzung eines Wasserwiederverwendungsprojekts

Autor*innen: Guggenberger, T., Barjenbruch, M. Schritt, H.

4.3.1 Grundlagen der Bewertungsmatrix

Um Verantwortungsträger*innen bei ihrem Entscheidungsprozess bei der Planung eines Wasserwiederverwendungsprojekts zu unterstützen, wurde eine Bewertungsmatrix im Rahmen dieses Vorhabens erstellt. Diese ist in Tabelle 30 bis Tabelle 33 dargestellt. Die Matrix beruht hauptsächlich

lich auf den Ergebnissen aus den Best-Practice Untersuchungen, vgl. Kapitel 4.2, deren Aufbereitungsverfahren, Bewässerungsmethoden bzw. anderweitigen Vorgehensweisen zur Risikominimierung. Die Bewertungsmatrix ordnet dabei die generellen Voraussetzungen zur Wasserwiederverwendung ein, ohne individuelle Risiken zu berücksichtigen. Sie ist daher nicht als Ersatz einer standortspezifischen Risikobewertung zu verstehen, vgl. Kapitel 4.4, sondern soll einer ersten Orientierung und Einordnung dienen. Nur durch eine zusätzliche individuelle Risikobetrachtung über das Risikomanagement können Gefahren in Zusammenhang mit der jeweiligen Flächennutzung und Aufbereitung identifiziert werden.

Es wurden vier Matrizen als Hauptkategorien erarbeitet, wobei zwei durch Unterkategorien weiter differenziert wurden:

1. Bewässerungsbedürftigkeit
2. Abwasser- und technische Spezifikationen
 - a. Herkunft des Abwassers
 - b. Klärtechnik
 - c. Aufbereitungstechnik
3. Spezifikationen des urbanen Grüns
 - a. Flächennutzung
 - b. Zugangsberechtigte Personen
 - c. Zugangsbeschränkungen / -zeiten
 - d. Bewässerungssystem
4. Infrastrukturelle Anbindung

Jede Hauptkategorie steht für sich. Jeder Haupt- bzw. Unterkategorie sind bestimmte Eigenschaften zugeordnet, für die im Rahmen der Matrix-Erarbeitung Punkte vergeben wurden. Die Punktzahlen dienen dabei als Metrik, die eine Bewertung der Eigenschaften und deren Kombination überhaupt erst ermöglicht. Die Eigenschaften der jeweiligen Hauptkategorie müssen miteinander so kombiniert werden, dass eine fest definierte Gesamtpunktzahl erreicht wird, damit die Wasserwiederverwendung nach technischen-, legislativen und risikominimierenden Gesichtspunkten erfolgreich praktiziert werden kann. Die Punktzahlen der jeweiligen Eigenschaft sind dabei so gewählt, dass nur bestimmte Kombinationen möglich sind. Zum einfachen Berechnen sind Werte zwischen 0 bis 12 gewählt worden.

Sollten die vorhandenen Eigenschaften nicht die geforderte Punktzahl erreichen, können die Verantwortungsträger*innen herauslesen, welche Maßnahmen und Eigenschaften verändert werden müssen, um die erforderlichen Bedingungen zu erreichen.

4.3.2 Detaillierte Beschreibung der Kategorien der Bewertungsmatrix

4.3.2.1 Bewässerungsbedürftigkeit

Die Bewässerungsbedürftigkeit beschreibt, inwiefern eine urbane Grünfläche bewässert werden muss. Damit stellt diese Kategorie die erste und wichtigste Frage bzgl. der Umsetzung einer Wasserwiederverwendung dar und ist als Ja/Nein-Entscheidung zu verstehen. Ist der Bewässerungsbedarf zu gering, ist eine Maßnahme zur Wasserwiederverwendung zur Bewässerung nicht sinnvoll bzw. ließe sich diese auch mittels bestehender Wasserquellen befriedigen. Eine Investition in Infrastrukturmaßnahmen zur Errichtung eines Wasserwiederverwendungssystems ist dann nicht notwendig. Dabei ist jedoch die Verfügbarkeit anderer Quellen zu überprüfen. Auch der Mehrwert einer Grünfläche für das Stadtklima spielt bei der Bewertung der Bewässerungsfrage eine wichtige Rolle. Die Verdunstungsleistung einer urbanen Grünfläche und der damit einhergehende Kühleffekt sollte dementsprechend bei der Bewertung berücksichtigt werden (Sieker et al., 2019).

Diese Kategorie wird in drei verschiedene Bedürftigkeiten unterteilt. Die Entscheidung hängt neben der Bewässerungsbedürftigkeit auch vom Vorhandensein anderer Quellen, deren Ergiebigkeit und bereits bestehender Aufbereitungsmöglichkeiten ab. So könnte im Falle bereits bestehender Anlagen zur Aufbereitung und Verteilung auf aufbereitetes Wasser auch bei sehr niedriger Bewässerungsbedürftigkeit zurückgegriffen werden. Genauso denkbar ist eine kurzfristige Verteilung mittels Lastwagen, bei geringen kurzzeitigen Bewässerungsbedarfen. Dagegen könnten sich Investitionen in Infrastrukturmaßnahmen bei geringer Bedürftigkeit anbieten, wenn andere Wasserquellen gar nicht zur Verfügung stehen und eine Bewässerung zum Erhalt des Stadtklimas oder des urbanen Ökosystems erforderlich ist. Daher ist die Bewertung immer im Bezug zu den Randbedingungen zu verstehen, unabhängig vom Detailgrad ihrer Unterscheidung.

Die Bewässerungsbedürftigkeit kann wie folgt eingeordnet werden:

Nicht gegeben:

- ▶ Ist keine Bewässerungsbedürftigkeit gegeben, lohnt sich dementsprechend auch keine Investition in Infrastrukturmaßnahmen zur Wasserwiederverwendung zur Bewässerung

Sehr selten (einzelne Tage im Jahr) bis selten (mehrere Tage im Jahr):

- ▶ Ist die Bewässerung nur an wenigen Tagen im Jahr notwendig, lässt sich diese auch mittels anderer Wasserquellen praktizieren, womit eine Investition genaustens hinterfragt werden muss. Auch kann eine kurzfristige Verteilung mittels Lastwagentransporten geschehen. Die Verfügbarkeit anderer Bewässerungsquellen und der Mehrwert der Fläche aus ökologischer und stadtklimatischer Sicht muss dafür genaustens geprüft werden.

Mehrere Tage pro Woche in der Vegetationsphase oder darüber hinaus:

- ▶ Ist die Bewässerung an mehreren Tagen pro Woche in der Vegetationsphase oder darüber hinaus notwendig, kann sich eine Investition in die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung als Substitutionsmaßnahmen lohnen. Die Randbedingungen und notwendigen Anpassungen der Wasseraufbereitung, die urbanen Grünflächen und die infrastrukturellen Maßnahmen sind zu überprüfen, um die passenden Voraussetzungen zu schaffen bzw. den Investitionsbedarf abzuschätzen.

Die Matrix sieht keine Punktvergabe vor. Eine Wasserwiederverwendung sollte bei entsprechend großem Bewässerungsbedarf, fehlender Bewässerungswasserquelle oder relevantem Mehrwert der Grünflächenbewässerung in Erwägung gezogen werden.

4.3.2.2 Abwasser- und technische Spezifikationen

Aus der Betrachtung des vorhandenen Abwassers in Kombination mit der technischen Aufbereitungsmethode lässt sich die Eignung für eine Wasserwiederverwendung abschätzen. Es ist dabei wichtig, diese im Zusammenhang zu betrachten. Denn leicht verschmutztes häusliches Abwasser kann z.B. durch vergleichsweise einfache Verfahren Bewässerungswasserqualität erreichen, während bei Kommunalabwasser mit hohem Industrieanteil ggf. kosten- und energieintensive Verfahren, wie z.B. Aktivkohlefiltration, Umkehrosmose und Desinfektion nötig sind bzw. eine Vorbehandlung durchzuführen ist. Daher besteht diese Hauptkategorie aus den Unterkategorien *Herkunft des Abwassers, Klärtechnik und Aufbereitungstechnik*. Denn hier können die verschiedensten Kombinationen anzutreffen sein. Wenn z.B. der Klärprozess schon eine vierte Reinigungsstufe enthält, die eine Filtration beinhaltet, reicht z.T. eine reine Desinfektion als Aufbereitungsschritt aus. Besteht der Klärprozess jedoch nur aus einer unzureichenden Vorklärung – auch wenn dies in Deutschland eher unwahrscheinlich ist – wäre ein vollständiger Nährstoffabbau zusätzlich zu einer Filtration und Desinfektion notwendig. Auch diese Bewertung ist nur als Orientierung zu verstehen.

Die Unterkategorien werden wie folgt beschrieben:

Herkunft des Abwassers

- ▶ Nur industrielles Abwasser 0 Pkt.
- ▶ Häusliches und industrielles Abwasser 3 Pkt.
- ▶ Häusliches und industrielles Abwasser mit unproblematischen Indirekteinleitern 6 Pkt.
- ▶ Nur häusliches Abwasser 8 Pkt.

Klärtechnik

- ▶ 1-stufig (z.B. nur Sedimentation o. Klärteich) 0 Pkt.
- ▶ 2-stufig (Mechanische- und Sedimentations-Stufe) 0 Pkt.
- ▶ 3-stufig (Vor-/ Belebung/ Nachklärung) 8 Pkt.
- ▶ 4-stufig inkl. Filtration 9 Pkt.
- ▶ Vorklärung u. Membranbioreaktor 10 Pkt.
- ▶ 4-stufig inkl. Spurenstoffelimination 11 Pkt.

Aufbereitungstechnik

- ▶ Chlor-, UV- oder Ozon-Desinfektion 3 Pkt.
- ▶ Sand Filtration + Desinfektion 6 Pkt.
- ▶ Spurenstoffelimination + Desinfektion 9 Pkt.
- ▶ Spurenstoffelimination + Membranstufe* + UV-Desinfektion 12 Pkt.

* Die Membranstufe kann dabei eine Ultrafiltration, Nanofiltration oder Umkehrosiose beschreiben. Dabei ist die Reinigungsleistung der Ultrafiltration kleiner als die einer Nanofiltration und diese wiederum kleiner als die einer Umkehrosiose. Der Energieverbrauch und der betriebliche Aufwand verhalten sich dazu konträr.

Die Bewertung in dieser Kategorie sieht vor, dass erst ab 20 Punkten eine Wasserwiederverwendung aus technischer Sicht sicher umgesetzt werden kann. Beispielhaft können sich für diese Kategorie folgende Szenarien vorgestellt werden:

- ▶ Häusliches und industrielles Abwasser mit nicht vollständig bekannter Zusammensetzung, das einen dreistufigen Klärprozess durchläuft, wie es momentan der Regelfall in Deutschland ist, muss noch mindestens eine Spurenstoffelimination und Desinfektion durchlaufen ($3+8+9=20$).
- ▶ Sind die Indirekteinleiter bekannt und damit auch die Abwasserzusammensetzung und diese frei von schwer umweltschädigenden Inhaltsstoffen, würde nach einem 3-stufigen Klärprozess auch ein Sandfiltration und Desinfektion ausreichen ($6+8+6=20$).
- ▶ Ist nur häusliches Abwasser aufzureinigen und durchläuft dieses einen 4-stufigen Klärprozess inkl. Filtration oder einen Membranbioreaktor, wäre eine reine Desinfektion als Aufbereitung ebenfalls ausreichend ($8+9+3=20$ o. $8+10+3=21$).

Bei dieser Hauptkategorie sollten jedoch immer eine engmaschige Überwachung der umweltrelevanten Zu- und Ablaufparameter erfolgen, um die Qualitätssicherung der gewählten Prozesskombination zu gewährleisten.

4.3.3 Spezifikationen des urbanen Grüns

Ähnlich wie bei der vorangegangenen Kategorie, kann die Eignung des gewählten urbanen Grüns für eine Bewässerung mit aufbereitetem Wasser nur aus der Kombination mehrerer Eigenschaften

abgeleitet werden. Daher müssen die Unterkategorien wieder im Zusammenhang betrachtet werden. Durch sehr sichere Bewässerungsmethoden wie z.B. unterirdische Tiefenbewässerung kann eine urbane Grünfläche bewässert werden, ohne dass ein gefährdender Kontakt mit Nutzer*innen stattfindet, womit die Zugangszeiten und -berechtigte Personen nicht eingeschränkt werden müssen. Andererseits kann eine Grünfläche wie z.B. ein abgegrenztes Zierbeet, bei dem der Kontakt zu Nutzer*innen stark reduziert ist, bei einer zeitlich beschränkten Bewässerung auch mit Sprühbewässerung bewässert werden und dennoch für Wasserwiederverwendung geeignet sein.

Prinzipiell spielt bei der Bewertung der Spezifikationen der urbanen Grünflächen auch die Wasserqualität eine wichtige Rolle. Bei ausreichender Qualitätsstufe, siehe u.a. DIN 19650, ISO 20760, ISO 20761 oder Tabelle 35 und Tabelle 36, kann jede Fläche, Bewässerungsmethode und Zugangseignung für die Bewässerung geeignet sein. Die Matrix bezieht sich dabei nur auf aufbereitetes Wasser.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Bewertungsmatrix zur Spezifikation des urbanen Grüns nur der Beurteilung des Zusammenhangs aus Nutzungsart, Zugangsarten und -personen sowie der Bewässerungsmethode dient. Umweltgegebenheiten, wie z.B. die lokalen Bodeneigenschaften, Pflanzen- oder Tierwelt, die Nähe zu Grundwasserleitern, werden dabei nicht beachtet, da diese vom Risikomanagement, siehe Kapitel 4.4, abgedeckt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass urbane Grünflächen, die in Wasserschutzgebieten (Zone I & II) liegen, als ungeeignet für die Wasserwiederverwendung eingeschätzt werden, vgl. LAWA (2022). Ebenfalls kann das Gewässer, in das das Klarwasser eingeleitet wird, auf diese Einleitungen angewiesen sein, da sonst der ökologische Mindestabflusses nicht mehr gewährleistet ist. Eine individuelle Risikobewertung, wie eingangs beschrieben, wird auch durch die Bewertungsmatrix zur Spezifikation des urbanen Grüns nicht ersetzt.

Für die Bewertung der Flächennutzungen werden bestimmte Randbedingungen angenommen. Dabei ist das Verhalten möglicher Nutzer*innen nicht eindeutig vorhersehbar. Damit die Punktevergabe dennoch deutlich wird, werden die Nutzungsarten im Folgenden näher beschrieben:

- ▶ Öffentliche Park-, Sport- und Gartenanlagen: Es gibt keine allgemein gültigen Einschränkungen für die Besucher*Innen. Einige Anlagen weisen Öffnungszeiten auf bzw. werden nachts verschlossen.
- ▶ Zierflächen / Schmuckbeete: Sie sind i.d.R. physisch abgegrenzt und ein Aufenthalt auf der Fläche ist nicht vorgesehen. Dennoch ist die Barriere nicht zu hoch und eine Überwachung findet nicht statt, weshalb die Vorgaben leicht umgangen werden können, z.B. um Blumen zu pflücken. Die Fläche ist geeignet, weil man sich dort nicht physisch aufhält, die Kontrollen sind aber relativ gering.
- ▶ Friedhof: Abgesehen von den Wegen und Sitzgelegenheiten ist ein Aufenthalt auf den zu bewässernden Flächen / Gräbern inkl. Kontakt zu den Flächen nicht vorgesehen. Zusätzlich spielen hier pietätische Gründe eine Rolle. Die Fläche erscheint dadurch stärker geeignet als Zierflächen, da angenommen wird, dass Kontakte mit der Fläche (z.B. Picknick oder Blumen pflücken) geringer ausfallen und die Verhaltensregeln berücksichtigt werden.
- ▶ Botanischer Garten: Die Flächen sind abgegrenzt, ein Aufenthalt ist auf den bepflanzten Flächen nicht vorgesehen und die Flächen werden überwacht. In der Regel muss Eintritt bezahlt werden, der an eine Hausordnung gekoppelt ist. Die Flächen sind besonders geeignet, da Ordnungsverstöße stark eingeschränkt werden.
- ▶ Straßenbegleitgrün: Ein Aufenthalt ist nicht vorgesehen und der Zugang durch die Verkehrswege stark eingeschränkt. Diese Flächen sind besonders geeignet.
- ▶ Straßenbäume: Durch wassersparende Bewässerungssäcke kann ein Kontakt zu ungeschulten Personen fast vollständig ausgeschlossen werden.

Die Einhaltung der Vorgaben und Regeln der jeweiligen Flächennutzung kann nicht garantiert werden, dennoch ergeben sich durch die genannten Hürden eine Priorisierung der Flächennutzung bzgl. Der Wasserwiederverwendung. Wenn die beschriebenen Annahmen zur Flächennutzung nicht zutreffen, wenn z.B. der zu bewertende Botanische Garten doch einen Aufenthalt auf den Flächen zulässt, oder Unsicherheiten diesbezüglich bestehen, müssen die Flächen wie öffentliche Parkanlagen bewertet werden. Die Unterkategorien werden wie folgt bepunktet:

Tabelle 26: Bepunktung Flächennutzung

Flächennutzung	Punkte
Öffentlicher Park, (Rasen-) Sportplatz und Gartenanlagen	3 Pkt.
Zierfläche / Schmuckbeet	7 Pkt.
Friedhof	8 Pkt.
Gärtnerei / Botanischer Garten	9 Pkt.
Straßenbegleitgrün	10 Pkt.
Straßenbaum	11 Pkt.

Tabelle 27: Bepunktung Zugangsberechtigte Personen

Zugangsberechtigte Personen	Punkte
Uneingeschränkt	2 Pkt.
Passiv unterwiesenes Publikum (z.B. Informationstafel)	3 Pkt.
Aktiv unterwiesenes Publikum (z.B. verbale Belehrung)	6 Pkt.
Beschränkter Personenkreis (z.B. Arbeiter*innen)	10 Pkt.
Nicht zugänglich	12 Pkt.

Tabelle 28: Bepunktung Zugangsbeschränkungen/ -zeiten

Zugangsbeschränkungen/ -zeiten	Punkte
Uneingeschränkt	2 Pkt.
Durch Schilder zugangsbeschränkte Flächen	5 Pkt.
Begrenzte Öffnungszeiten	9 Pkt.
Durch Barrieren zugangsbeschränkte Flächen	10 Pkt.
Nicht öffentlich zugänglich	12 Pkt.

Tabelle 29: Bepunktung Bewässerungssystem

Bewässerungssystem	Punkte
Beckenbewässerung	0 Pkt.
Furchenbewässerung	0 Pkt.
Beregnung	3 Pkt.
Sprühbewässerung	5 Pkt.
Tropfenbewässerung	9 Pkt.
Bewässerungssack	10 Pkt.
Unterirdische Flachbewässerung	11 Pkt.
unterirdische Tiefbewässerung	12 Pkt.

Die Matrix sieht vor, dass erst ab 16 Punkten die Spezifikationen des urbanen Grüns eine Wasserwiederverwendung sicher zulassen. Dabei ist zu beachten, dass entweder Keimfreiheit des eingesetzten Wassers gewährleistet werden sollte oder die Bewässerung außerhalb der üblichen Besuchszeiten bzw. Öffnungszeiten und/oder beschränkt zugänglichen Arealen stattfinden sollte, so dass kein direkter Kontakt mit den Nutzer*innen entsteht. Da die Bewässerungssysteme, die eine Kontaktgefahr stark reduzieren entweder sehr kostenintensive Installationen benötigen bzw. nicht für großflächige Park- und Rasenanlagen geeignet sind, sind für diese Kategorie folgende Szenarien denkbar:

- ▶ Eine öffentlich zugängliche Parkfläche mit uneingeschränktem Publikumsverkehr und Öffnungszeiten ließe sich nur mit einer Tröpfchenbewässerung in Bodennähe oder unterirdischen Bewässerungsanlagen bewässern ($3+2+2+9=16$).
- ▶ Ein Golfplatz kann als öffentlicher Rasensportplatz angesehen werden, da er komplett begehbar ist. Da er jedoch nur durch einen eingeschränkten Personenkreis (Gäste bzw. Clubmitglieder) nach einer zumindest passiven Unterweisung der Haus- bzw. Clubordnung zu den Öffnungszeiten genutzt werden kann, wäre hier eine Beregnung außerhalb der Öffnungszeiten möglich ($3+3+9+3=18$).
- ▶ Um die sehr aufwändige Installationen auf einer so großen Fläche zu umgehen, können Beregnungsanlagen nur verwendet werden, wenn eine öffentlich zugängliche Parkfläche mit uneingeschränktem Publikumsverkehr beschränkte Öffnungszeiten hat und die Bewässerung außerhalb der Öffnungszeiten geschieht ($3+2+9+3=17$).
- ▶ Andersherum gedacht könnten nicht öffentlich zugängliche Bereiche eines Parks, die nur von einem beschränkten Kreis an Personal und ausgewähltem Fachpublikum betreten werden dürfen (z.B. Botanischer Garten) auch rund um die Uhr beregnet werden ($3+10+2+3=18$).
- ▶ Ein weiteres Szenario betrifft Flächen, auf denen kein direkter Aufenthalt vorgesehen ist, wie z.B. Friedhöfe, Zierbeete oder Straßenbegleitgrün. Hier ist von keinem Kontakt auszugehen, weshalb auch bei uneingeschränktem Publikumsverkehr und permanenter Öffnungszeit ein Zierbeet mit einer automatischen Sprühbewässerung bewässert werden kann ($7+2+2+5=16$).

4.3.3.1 Infrastrukturelle Anbindung

Die letzte Hauptkategorie umfasst die infrastrukturelle Anbindung, also die Möglichkeit des Transportes des Bewässerungswassers zum Nutzungsort. Diese Hauptkategorie besitzt keine Mindestpunktzahl, die zur Umsetzung nötig ist, sondern nur einen unterstützenden Charakter. Durch die Priorisierung der verschiedenen infrastrukturellen Anbindungen können diese bewertet werden, ohne jedoch eine pauschale Auskunft über deren Eignung zur Wasserwiederverwendung abzuleiten. Denn selbst eine ortsferne Wasserquelle kann im Falle einer anhaltenden Dürre der einzige Weg zur Rettung urbaner Ökosysteme sein, auch wenn der Aufwand des Transports dabei deutlich größer, als bei einer ortsnahen oder sogar verbrauchsnahe Quelle ist.

Dabei können infrastrukturelle Anbindungen durch Rohrleitungssysteme als auch durch Lastwagen geschehen. Dabei sind bei Lastwagentransporten der Raumbedarf, Lärm, mögliche Emissionen sowie der Personalbedarf zu berücksichtigen. Allerdings können sie in Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten, sowie der Bewässerungsmengen und -häufigkeit, die ökonomischere Lösung sein und sollte zumindest immer mitbetrachtet werden.

Die infrastrukturelle Anbindung kann wie folgt beschrieben werden:

Ortsferne Klär-/Aufbereitungsanlage

- ▶ Die ortsferne Aufbereitung liegt weit außerhalb der Zielstadt und daher muss das Wasser erst durch eine Zubringerleitung mittels energieintensiver Pumpen- und Steuerungstechnik in die Stadt fördern. Dort wird das Wasser von einem oder mehreren Speichern über eine Versorgungsleitung zum Verbrauchsort gepumpt, was ebenfalls Energie benötigt. Der Bau und Betrieb sind sehr kostenintensiv. Durch die langen Zubringerleitungen kann es zu langen Standzeiten kommen, die eine Gefahr der Wiederverkeimung erhöhen, weshalb die Leitungen oft gespült und desinfiziert werden müssten. Die ortsferne Aufbereitung ist der ungünstigste Standort für die Wasserwiederverwendung.

Ortsnahe Klär-/Aufbereitungsanlage

- ▶ Die ortsnahe Aufbereitung liegt am Rand der Zielstadt und muss nur durch eine oder mehrere Versorgungsleitungen über Speicher zu den Verbrauchsorten gepumpt werden. Dies benötigt ebenfalls Energie, jedoch weniger als ein Transport über weite Strecken. Der Bau und Betrieb sind kostenintensiv. Die Gefahr der Wiederverkeimung ist geringer, allerdings muss dies regelmäßig kontrolliert werden. Durch die Ortsnähe wären für einzelne Standorte auch Transporte mittels Lastwagen möglich. Die ortsnahe Aufbereitung ist im deutschen Stadtgebiet der Regelfall.

Verbrauchsnahe Aufbereitung (z.B. zentrale Kläranlage)

- ▶ Die verbrauchsnahe Aufbereitung liegt unweit des Verbrauchsorts. Das aufbereitete Wasser kann mittels Versorgungs- und im Idealfall direkt über Anschlussleitungen transportiert werden. Um Schwankungen und ungleiche Bedarfe abzufangen sind auch hier Speicher notwendig. Die Pumpen- und Steuerungstechnik wäre im Verhältnis am günstigsten. Es fallen auch Baukosten an, jedoch ist der Betrieb im Verhältnis sehr günstig. Eine Gefahr der Wiederverkeimung ist relativ gering, muss jedoch kontrolliert werden. Bei einer verbrauchsnahe Aufbereitung kann die Versorgung z.T. auch vollständig mittels Lastwagen umgesetzt werden und es sollte geprüft werden, ob dies die finanziell günstigste Lösung ist. Häufig kann in Klein- und Mittelstädten diese Konstellation vorgefunden werden.

Infrastrukturelle Anbindung besteht bereits

- ▶ Die Versorgungs- und Aufbereitungsstrukturen bestehen bereits und können nach entsprechenden Anpassungen weiterverwendet werden.

4.3.4 Zusammenfassung

Kapitel 4.3 konnte zeigen, dass durch grobe Abschätzungen von Bewässerungsbedürftigkeiten, Abwasser- und technische Spezifikationen sowie der Spezifikationen des urbanen Grüns eine erste Orientierung zur Umsetzbarkeit von Wasserwiederverwendungsprojekten möglich ist. Dabei muss betont werden, dass die Bewertungsmatrix eine detaillierte Risikobetrachtung und Minimierung in Abhängigkeit der lokalen Umweltgegebenheiten nicht ersetzen kann.

Die eingesetzte Wasserqualität muss als Hauptfaktor betrachtet werden, der alle anderen Argumente nachgeschaltet werden müssen. Schließlich ist bei einer ausreichenden Qualitätsstufe des Bewässerungswassers keine Gefährdung der Umwelt und Gesundheit zu befürchten, womit die bewerteten Eigenschaften aus der Matrix keine Rolle mehr spielen.

Tabelle 30: 1. Teil Bewertungsmatrix: Bewässerungsbedürftigkeit, vgl. Kapitel 4.3.2.1

Bewässerungsbedürftigkeit	Beschreibung
Nicht gegeben	Es lohnt sich keine Investitionen in Infrastrukturmaßnahmen zur Wasserwiederverwendung zur Bewässerung, da keine Bewässerungsbedürftigkeit gegeben ist.
Sehr selten (vereinzelt Tage im Jahr)	Ist die Bewässerung an nur wenigen Tagen im Jahr notwendig, ließe sich diese auch mit anderen Wasserquellen praktizieren. Die Verfügbarkeit anderer Quellen bedarf jedoch genauer Prüfung.
Selten (mehrere Tage im Jahr)	
Mehrere Tage pro Woche in der Vegetationsphase	
Mehrere Tage pro Woche über die Vegetationsperiode hinaus	Ist die Bewässerung an mehreren Tagen pro Woche in der Vegetationsphase oder darüber hinaus notwendig, kann sich eine Investition in die Wasserwiederverwendung lohnen. Die notwendigen Randbedingungen und Anpassungen sind zu überprüfen. Der Investitionsbedarf für die Umsetzung ist abzuschätzen.

Tabelle 31: 2. Teil Bewertungsmatrix: Abwasser & technische Spezifikationen, vgl. Kapitel 4.3.2.2

Bewertung (Pkt.)	Abwasser- und technische Spezifikationen		
	Herkunft des Abwassers	Klärtechnik	Aufbereitungstechnik
0	Nur industrielles Abwasser	1 Stufig (z.B. nur Sedimentation o. Klärteich) 2 Stufig (Mech.- u. Sedimentationsstufe)	
1			
2			
3	Häusliches + industrielles Abwasser		UV / Ozon o. Chlor – Desinfektion
4			
5			
6	Häusl. + Ind. Abwasser mit bekannten Indirekteinleitern		Sand Filtration + Desinfektion
7			
8	Nur häusliches Abwasser	3 Stufig (Vor-/ Belebung / Nachklärung)	
9		4 Stufig inkl. Filtration	Spurenstoffelemination + Desinfektion
10		Vorklärung + Membranbioreaktor	
11		4 Stufig inkl. Spurenstoffelemination	Spurenstoffelemination + Membranstufe* + Desinfektion
12			
Summe			

Anmerkungen:

Zur Wasserwiederverwendung geeignet, wenn min. 20 Pkt. Erreicht.

4 Stufig = (3 Stufig mit nachgeschaltetem Prozess)

*Ultrafiltration<Nanofiltration<Umkehrosiose

Tabelle 32: 3. Teil Bewertungsmatrix: Spezifikationen des urbanen Grüns, vgl. Kapitel 4.3.2.3

Bewertung (Pkt.)	Spezifikation des urbanen Grüns			
	Flächennutzung	Zugangsberechtigte Personen	Zugangsbeschränkung / -Zeiten	Bewässerungssystem ¹
0				Beckenbewässerung, Furchenbewässerung
1				
2		uneingeschränkt	uneingeschränkt	
3	öffentliche Park-, (Rasen-) Sport- und Gartenanlagen	Passiv unterwiesenes Publikum (z.B. Informationstafel)		Beregnung
4				
5				Durch Schilder zugangsbeschränkte Flächen
6		Aktiv unterwiesenes Publikum (z.B. verbale Belehrung)	Sand Filtration + Desinfektion	
7	Zierfläche / Schmuckbeet			
8	Friedhof			
9	Gärtnerei / Botanischer Garten		Begrenzte Öffnungszeiten	Tropfenbewässerung*
10	Straßenbegleitgrün	Beschränkter Personenkreis (z.B. Arbeiter*innenkreis)	Durch psychische Barrieren zugangsbeschränkte Fläche	Bewässerungssack***
11	Straßenbaum			Unterirdische Flachbewässerung*
12		Nicht zugänglich	Nicht öffentlich zugänglich	Unterirdische Tiefbewässerung**
Summe				

Anmerkungen:

Zur Wasserwiederverwendung geeignet, wenn min. 16 Pkt. erreicht werden. (Wenn keine Trinkwasserqualität gewährleistet werden kann.)

¹ generell sollte die Bewässerung außerhalb der Besuchszeiten (bzw. Öffnungszeiten) und zur Ressourcenschonung idealerweise nachts.

*Kostenintensive Installation (nicht immer für großflächige Grünanlagen geeignet)

**Kostenintensiver als *

***Nur für Straßenbäume geeignet

Tabelle 33: 4. Teil Bewertungsmatrix: Infrastrukturelle Anbindung, vgl. Kapitel 4.3.2.4

Infrastrukturelle Anbindung	Beschreibung
Ortsferne Klär-/Aufbereitungsanlage	Sehr kostenintensiver Bau einer Zubringer- und Versorgungsleitung, sowie Speichereinheiten. Hohe Betriebskosten für die Förderung und Gewährleistung von Keimfreiheit
Ortsnahe Klär-/Aufbereitungsanlage	Kostenintensiver Bau einer Versorgungsleitung, sowie Speichereinheiten. Betriebskosten für die Förderung deutlich geringer. Gewährleistung von Keimfreiheit durch regelmäßige Kontrollen. Zur Not auch Lastwagentransporte möglich.
Verbrauchsnahe Aufbereitung (z.B. zentrale Kläranlage)	Bau von kurzen Versorgungs- o. Anschlussleitungen und Speichereinheiten notwendig. Geringe Förder- u. Betriebskosten. Kontrolle gegen Wiederverkeimung trotzdem nötig. Möglichkeit eines günstigen Lastwagentransports ist zu prüfen.
Infrastrukturelle Anbindung besteht bereits	Bestehende Infrastruktur kann durch kleine Umbauten genutzt werden.

4.4 Entwicklung eines Risikomanagementansatzes für Wasserwiederverwendung im städtischen Raum

Autor*innen: Guggenberger, T., Barjenbruch, M., Schritt, H.

Dieses Kapitel befasst sich mit der Entwicklung eines Risikomanagementansatzes für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung urbaner Grünflächen. Dazu wird zuerst das Risikomanagement anhand der wesentlichen Kernelemente der EU-Verordnung zur landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung beschrieben, wobei unzulängliche bzw. ausreichende Vorgaben für den urbanen Raum kenntlich gemacht werden (Kap. 4.4.1). Darauf aufbauend wird ein Risikomanagementkonzept für den urbanen Raum abgeleitet. Hierbei werden Anforderungen und Verpflichtungen von bereits existierenden Gesetzesvorgaben aus anderen EU-Ländern, Nicht-EU-Ländern sowie die nationale Gesetzgebung und untergesetzliche Regelwerke, Standards und Normen berücksichtigt (Kap. 4.4.2).

4.4.1 Analyse der gesetzlichen Vorgaben zum Risikomanagementplan (nach EU-VO 2020/741)

Die EU hat am 25. Mai 2020 mit der Verordnung 2020/741 eine neue Rechtsnorm geschaffen, um die Mindestanforderungen an die Wasserqualität und Überwachung, sowie ein geeignetes Risikomanagement für die sichere Verwendung von aufbereitetem Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung festzulegen. Die Verordnung gilt seit 26. Juni 2023. Nach Anhang II dieser Verordnung für „Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung“ gilt: „Zum Risikomanagement gehört die proaktive Risikoermittlung und -bewältigung, damit gewährleistet ist, dass aufbereitetes Wasser sicher genutzt und bewirtschaftet wird und keine Gefahr für die Umwelt oder die Gesundheit von Menschen und Tier besteht.“. Das heißt, durch vorausplanendes Handeln sollen mögliche Schäden an den Schutzgütern Umwelt (Tier- und Pflanzenwelt (inkl. Nahrungsmitteln)), Boden und Gewässer (Grundwasser, Flüsse, Seen, etc.)) und der menschlichen Gesundheit vorzeitig erkannt und verhindert werden. Die damit einhergehende Risikobewertung dient so als Grundlage technischer und administrativer Maßnahmen, um die erforderliche Wasserqualität und Zuverlässigkeit des Verfahrens zu gewährleisten und somit Wasserwiederverwendungsprojekte erfolgreich, d.h. ohne eine Verschlechterung der Schutzgüter, zu betreiben.

Um das zu realisieren, müssen die Grenzen des Wiederverwendungssystems, von der Abwasserquelle bis zur Verbrauchsstelle festgelegt (vgl. Element 1 des Risikomanagements), betroffene Schutzgüter bestimmt, Verfahrensschritte benannt, Gefahren bestimmt und beschrieben werden und Infrastrukturelemente und beteiligte Akteure inkl. deren Verantwortlichkeiten definiert werden. Innerhalb dieser Systemgrenzen erfolgt dann das Risikomanagement und dessen Anwendung.

Die EU-Verordnung hat dafür elf Elemente beschrieben, von denen die ersten fünf die wesentlichen Kernelemente der Risikobewertung sind, die im Folgenden erläutert und auf deren Anwendbarkeit für die urbane Bewässerung überprüft werden. Dazu sind die Elemente aus der Verordnung EU 2020/741, Anhang II nochmals kursiv eingerückt, worauf deren Diskussion folgt.

1. *Beschreibung des gesamten Wasserwiederverwendungssystems, von der Einleitung des Abwassers in die kommunale Abwasserbehandlungsanlage bis zum Zeitpunkt des Verbrauchs, einschließlich der Abwasserquellen, der Behandlungsschritte und -techniken, die in der Aufbereitungseinrichtung zur Anwendung kommen, der Versorgungs-, Verteilungs- und Speicherinfrastruktur, der beabsichtigten Verwendung, der Verbrauchsstelle und des Verbrauchszeitraums (z. B. vorübergehender oder punktueller Verbrauch), der Bewässerungsmethode, der Pflanzenart, anderer Wasserquellen, wenn eine Mischung verwendet werden soll, und der Menge an aufbereitetem Wasser, die bereitzustellen ist.*

Element eins ist die Beschreibung des gesamten Wasserwiederverwendungssystems in den Grenzen von der Einleitung in das System bis zur Verwendung am Einsatzort. Es kann durch folgende Punkte beschrieben werden (eigene Darstellung, nach DWA-M 1200-1 Entwurf):

- ▶ Beschreibung der Abwasserquellen
- ▶ Anzahl der einleitenden Industrie etc., Zulaufkonzentrationen und eventuelle Besonderheiten (Sondererlaubnisse)
- ▶ Detaillierte Beschreibung der Verfahrensstufen bzw. eingesetzten Techniken, deren Reinigungsleistungen (Reduktionszahlen, z.B. Log10-Stufen Reduktion) und/oder Ablaufkonzentration hinter der jeweiligen Stufe: Muss durch Messreihen bzw. einschlägige Quellen und Erfahrungsberichte regelmäßig validiert werden
- ▶ Beschreibung der Versorgungs-, Verteilungs- und Speicherinfrastruktur: Kann getrennt bzw. auch als eine Stufe aufgefasst werden und beschrieben werden
- ▶ Beschreibung der beabsichtigten Verwendung
- ▶ Was genau soll mit dem aufbereiteten Wasser passieren?
- ▶ Beschreibung des Einsatzorts
 - Welche Tiere, Pflanzen, Böden und weitere Umweltcharakteristika liegen vor?
- ▶ Angaben zum Verbrauchszeitraum: Wann wird das aufbereitete Wasser dort benutzt – Punktueller, dauerhafter oder vorübergehender Verbrauch?
- ▶ Beschreibung der Bewässerungsmethode: Beckenbewässerung, Furchenbewässerung, Beregnung, Sprühbewässerung, Tropfenbewässerung, Bewässerungssack, unterirdische Flachbewässerung, unterirdische Tiefbewässerung etc.
- ▶ Welche weiteren Wasserarten werden in welchem Umfang noch eingesetzt?
- ▶ Angabe zu der eingesetzten, aufbereiteten Wassermenge

Das erste Element bedarf keiner grundlegenden Änderungen, jedoch sollten hier einige Erweiterungen vorgenommen werden. Denn auch wenn die Abwasserquellen im Gesetzestext explizit erwähnt werden, beginnt die Systemgrenze dort erst bei „*der Einleitung des Abwassers in die kommunale Abwasserbehandlungsanlage*“. Die Systemgrenzen sollten jedoch die Abwasserquellen eindeutig miteinschließen, da es von großer Bedeutung ist die Art und den Anteil der angeschlossenen Industrie und des Gewerbes (also nicht häuslichen Ursprungs), sowie deren Einleitkonzentrationen von gefährlichen Stoffen (z.B. durch Sondererlaubnisse) mit zu erfassen und als Teil des Wasserwiederverwendungssystems zu verstehen. Nur so können besondere Auflagen zur Aufbereitung an die möglichen Indirekteinleiter sowie deren Überwachung gestellt werden, ohne die bestimmte Gefahren bei standardisierten Kontrollen und Verfahrensschritten nicht erfasst werden würden. Ein gutes Beispiel bietet hier das Forschungsprojekt „NutzWasser“, bei dem sehr hohen Benzotriazol-Konzentrationen (BZT) gemessen wurden. Dabei wurden > 20 mg/l BZT durch einen einzigen Industrieinleiter aus der Metallverarbeitung eingeleitet, von denen noch ca. 0,1 – 0,4 mg/l im Zulauf der Kläranlage gemessen wurden. Nur aufgrund der weitergehenden Aufbereitung des Klarlaufs durch Ultrafiltration, Ozonung und zweifacher Filtration über Aktivkohle, lag die Konzentration im aufbereiteten Wasser nur noch bei ca. 100 ng/l. Dabei

ließen sich durch den Einsatz von Ersatzstoffen, gezielter Elimination im Industriebetrieb oder einer Verschärfung bzw. Anpassung der Sondererlaubnis, noch deutlich bessere und damit sichere Ergebnisse erzielen (Schwaller, 2022). Weitere relevante Stoffe können Industriechemikalien wie perfluorierte Verbindungen, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und Pflanzenschutzmittel sein (Toshovski et al., 2020). Darüber hinaus gehört auch die Festlegung der Überwachungsintervalle und -methoden der indirekt einleitenden Industrie durch das Risikomanagement dazu.

Eine weitere notwendige Ergänzung betrifft die „*Verbrauchsstelle*“. Wie schon unter der Aufzählung beschrieben, ist hier eine detaillierte Beschreibung der vorliegenden Tiere, Pflanzen, Böden, sowie weitere Umweltcharakteristika notwendig. Darüber hinaus muss die Flächennutzung beschrieben werden, um auf typische Nutzungsverhalten schließen zu können. Nur darüber lassen sich die Gefahren genauer quantifizieren.

Nutzungsarten können dabei sein:

- ▶ öffentlicher Park
- ▶ (Rasen-)Sportplatz
- ▶ Schmuckbeet bzw. -fläche
- ▶ Friedhof
- ▶ Gärtnerei
- ▶ Botanischer Garten
- ▶ Straßenbegleitgrün
- ▶ Parkplatz
- ▶ Freibad
- ▶ Straßenbaum
- ▶ Gründach

Je nach Nutzungsart könne folgende Tätigkeiten ausgeübt werden:

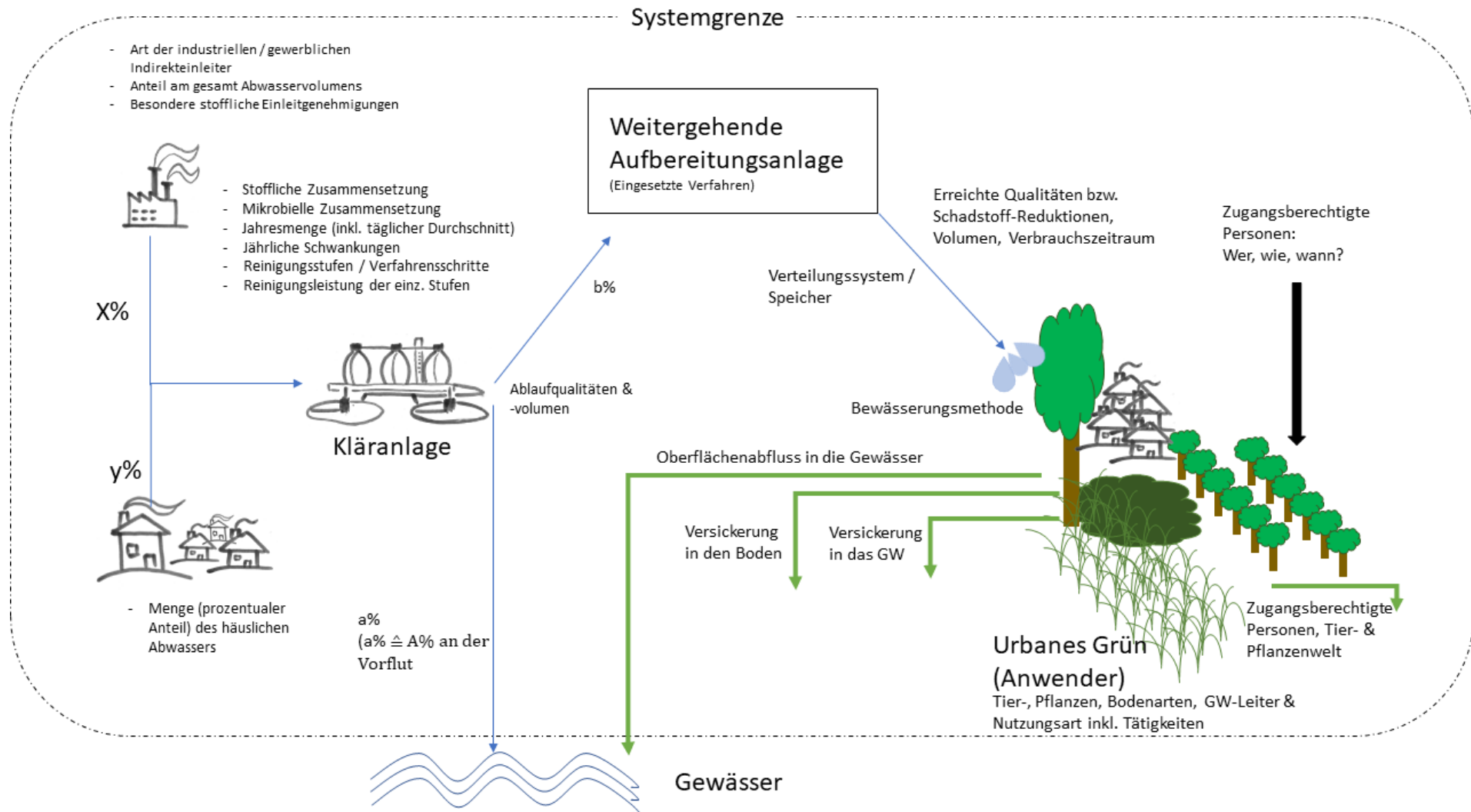
- ▶ Spielen
- ▶ Sonnen (ggf. FKK)
- ▶ Sporttreiben
- ▶ Picknicken
- ▶ Ruhen
- ▶ Spazieren
- ▶ Reden (halten)
- ▶ Queren
- ▶ Schulungen
- ▶ Anbauen
- ▶ Arbeiten
- ▶ anschauen (repräsentative Fläche)
- ▶ unspezifischen Mischnutzung

Die Nutzungsarten und Tätigkeiten müssen nicht in diesem Detail im Gesetzestext erscheinen, jedoch ist es wichtig, diese schon innerhalb der Systemgrenzen zu beschreiben. Unter Element vier des Risikomanagements müssen sie für die Identifizierung der gefährdeten *Umweltgegebenheiten und Bevölkerungsgruppen* sowie den möglichen Expositionswegen wieder herangezogen werden. Dafür ist zusätzlich auch die Erfassung der jeweiligen Zugangsberechtigten bzw. potenzielle Nutzer*innen notwendig. Durch die erweiterte Betrachtung von vulnerablen Nutzungsgruppen und deren Zugangsmöglichkeiten, örtlich und zeitlich, ergibt sich ein detaillierteres Bild

der möglichen Gefahren. Damit ließe sich das Risiko genauer beschreiben und zielgerichteter Gegenmaßnahmen ergreifen (BfR, 2020; BfR, 2022a; BfR, 2022b).

Eine Übersicht der Systemgrenzen für die Bewässerung des urbanen Grüns nach den genannten Gesichtspunkten kann Abbildung 88 entnommen werden.

Abbildung 88: Systemgrenzen der urbanen Wasserwiederverwendung gemäß angepasstem Risikomanagementplan



Quelle: eigene Darstellung, TU Berlin.

2. *Ermittlung aller am Wasserwiederverwendungssystem beteiligten Parteien und klare Beschreibung ihrer Aufgaben und Zuständigkeiten.*

Das zweite Element sollte ebenfalls konkretisiert werden. Die möglichen Akteure sollten klar benannt werden:

- ▶ Quelle des Klarwassers / Betreiber der kommunalen Abwasserbehandlungsanlage
- ▶ Betreiber der zusätzlichen Aufbereitungseinrichtung
- ▶ Betreiber des Verteilernetzes
- ▶ Betreiber der Speicher-Infrastruktur
- ▶ Bereitsteller des aufbereiteten Wassers
- ▶ Endverbraucher
 - Z.B Grünflächenpflegedienste (ggf. Grünflächenämter), Gärtnereien, Baumschulen, Friedhöfe, Schulen und Universitäten, Botanische Gärten, Sportvereine, Straßen- und Verkehrsdienste, Hausverwaltungen und -besitzer
- ▶ Einschlägige Behörden
 - Z.B.: Wasserbehörde, Verbraucherschutzbehörde, Umwelt- und Naturschutzbehörde, sowie Gesundheitsbehörde, Grünflächenamt, Friedhofsamt, Straßen- und Verkehrsamt, Sportamt

Laut (EU) Verordnung 2020/741 ist der Betreiber der Aufbereitungsanlage federführend für die Erstellung des Risikomanagementplans verantwortlich.

Alle oder auch mehrere Teilschritte des Wiederverwendungsprozesses können theoretisch von einer einzigen verantwortlichen Partei im Sinne der (EU) 2020/741 umgesetzt werden, z.B. Quelle und Aufbereiter des Klarwassers von Partei A und Verteilung, Speicherung und Bereitstellung von Partei B (2022/C 298/01, 2022).

Der Betreiber der Aufbereitungsanlage sollte der zentrale Ansprechpartner und Koordinator des Risikomanagements sein. Das beinhaltet auch die Informationspflicht gegenüber allen Beteiligten und der potenziellen Nutzer*innen, die im Risikomanagement ebenfalls klar benannt werden müssen. Um dies geordnet zu vollziehen, müssen regelmäßig Abstimmungsgespräche aller Akteure unter der Federführung des Koordinators abgehalten werden. Dazu gehören je nach Anwendungsbereich u.a. die Wasser-, die Verbraucherschutz-, Umwelt- und Naturschutz-, sowie die Gesundheitsbehörde, das Grünflächenamt, Friedhofsamt, Straßen- und Verkehrsamt und ggf. das Sportamt.

Der Risikomanagementplan ist Bestandteil des Genehmigungsantrags und wird im Zuge dessen durch die zuständige Behörde auf die Einhaltung geltender Vorschriften kontrolliert; ggf. sind spezifische Anforderungen an eine oder alle Parteien festzulegen. Abschließend muss der Hauptverantwortliche für die Einhaltung der Wasserqualität und deren Überwachung klar benannt sein. Die Stellen und Intervalle der Überwachung müssen vorab ebenfalls definiert werden, um bei der Übergabe zw. verschiedenen Parteien die Einhaltung der geforderten Wasserqualitäten sicherzustellen. Ebenfalls muss ein Notfallplan vom Koordinator*in erstellt werden, der die Krisenkommunikation aller relevanter Beteiligten am Wasserwiederverwendungssystem im Falle

der Nichteinhaltung bzw. unerwarteten Geschehnissen, wie z.B. einem unvorhergesehenen Versagen einer einzelnen Schutzbarriere, gewährleistet. Auf diesen Punkt wird unter Element zehn detaillierter eingegangen.

3. *Ermittlung von Gefahren, insbesondere das Vorhandensein von Schadstoffen und Pathogenen, und des Potenzials für gefährliche Ereignisse, wie Versagen von Behandlungen, unbeabsichtigte Leckagen oder Kontaminationen des Wasserwiederverwendungssystems.*

Das Element drei beschreibt die Ermittlung und Zusammenfassung potenzieller Gefahren und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. Potenziale durch unvorhergesehenes Versagen einzelner Schutzbarrieren innerhalb des Wiederverwendungssystems. Es dient als Grundlage für die Risikobewertung unter Element fünf. Es bedarf keiner Anpassung für den urbanen Anwendungsfall, da die Gefahren individuell innerhalb der Systemgrenzen ermittelt werden müssen. Um eine Übersicht der möglichen Gefahren und ihres Potenzials zu bekommen, werden sie hier nochmal beschrieben.

Die Schwere der Gefahren durch die Nutzung aufbereiteten Klarwassers variieren in Abhängigkeit der Abwasserquelle und der Aufbereitungsverfahren. Zu nennen sind Gefahren durch chemische Schadstoffe und Pathogene.

Die Pathogene, von denen noch viele im Klarlauf der Kläranlage zu finden sind, vgl. Tabelle 34, gehören entweder zur Gruppe der Bakterien, Protozoen, Helminthen (Würmer und deren Eier) oder Viren. Sie wirken besonders gefährdend auf die menschliche Gesundheit. Ihre Gefährlichkeit wird nicht nur von der Konzentration bestimmt, die saisonal, regional und in Abhängigkeit von den Einleitern sowie Krankheitswellen stark schwanken kann, sondern auch von deren Wiederverkeimungspotenzial. Dieses hängt von der Zusammensetzung des Abwassers, der Temperatur und der Speicherzeit ab und muss bei der Gefahrenbetrachtung unbedingt berücksichtigt werden (Klages, 2009).

Da bei den meisten Pathogenen nur die orale Aufnahme zu einer Erkrankung führt (BfR, 2022a; van Beek & Koopmans, 2013) und bei der Bewässerung des urbanen Grüns kein Verzehr vorgesehen ist, ist die Gefahr deutlich geringer als bei der landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung für zum Rohverzehr geeignete Pflanzen/Früchte. Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Flächen, halten sich Nutzer*innen jedoch häufiger und länger auf den urbanen Grünflächen auf. Da es unwahrscheinlich ist, dass die Nutzer*innen, abgesehen von besonders geschulten Arbeitskräften, dabei großen Bewässerungswassermengen direkt ausgesetzt sind, erfolgt eine Exposition hauptsächlich indirekt über den Kontakt mit den Grünflächen (Schmierinfektion). Laut australischen Untersuchungen werden öffentliche Grünanlagen ca. einmal alle zwei bis drei Wochen genutzt, wobei ca. 50 ml Flüssigkeit pro Jahr und Person unbeabsichtigt verschluckt werden (Australian Health, 2006). Besonders Durchfallerkrankungen spielen dabei eine Rolle, wobei vor allem Erreger wie Noroviren, Rotaviren, Adenoviren, Campylobacter oder EHEC übertragen werden können, wenn kontaminiertes Material, z.B. Boden oder Wasser aufgenommen wird (RKI, 2023). Zusätzlich kann es auch zum (unbeabsichtigten) Verzehr von Boden und Rasen kommen, gerade bei Kleinkindern. Weitere Infektionswege durch Schmierinfektion betreffen die Übertragung über Schleimhäute wie Augenbindehaut, Nasenschleimhaut, Mundschleimhaut, Genitalschleimhaut oder Hautverletzungen/Wunden (RKI, 2023). Letztere sind vor allem bei Sportplätzen sowie bei sportlichen Aktivitäten zu erwarten und müssen dementsprechend mit-

berücksichtigt werden. Als letzten Übertragungsweg muss das Einatmen von Aerosolen berücksichtigt werden, die sich in Abhängigkeit der Bewässerungsmethode bilden können. Dies spielt u.a. bei der Übertragung von Legionellen eine entscheidende Rolle.

Um die Gefahr von Krankheitsübertragung durch Kontakt mit Grünflächen besser bewerten zu können, besteht allerdings noch weiterer Forschungsbedarf. Im Zuge einer quantitativen mikrobiellen Risikobewertung von gezielten Mischwasserentlastungen auf Park- / Grasflächen in Dänemark wurden die Transferraten von Viren und Bakterien von Abwasser auf Gras und weiter von Gras auf die Haut untersucht. Dabei wurden 11% der Viren- und Bakterien-, sowie 5,6% der E. coli-Konzentration aus dem Abwasser auf dem Gras wiedergefunden. Vom Gras auf die Haut wurden davon 6% der Bakterien (davon 6,1% E. coli), 7% der Viren und 44% der Kryptosporidien übertragen. Damit wäre ohne weitere Maßnahmen eine Reduktion um mehr als zwei Log₁₀-Stufen allein durch den Transfer auf die Grünfläche zu erwarten (Jørgensens, 2022). Deboosere et al. Konnten auf Kopfsalat nur 0,1% bis 2% der Humanviren wiederfinden (Deboosere et al., 2012). Dabei hängt die Dauer und Übertragbarkeit der Infektiosität von Krankheitserregern in der Umwelt (Tenazität) grundsätzlich von mehreren Faktoren ab. So spielen Erreger-Konzentration, Feuchtigkeit, Temperatur, Material, Oberfläche, UV-Einstrahlung, pH-Wert, Einbettung in Schutzkolloide und viele weitere Faktoren eine entscheidende Rolle. Diese treten in der Umwelt in sehr vielen möglichen Varianten auf, weshalb eine allgemeine Angabe nur schwierig zu treffen ist (Petschelt, 2022). Zwar konnten auf trockenen, unbewegten Oberflächen z.B. Adenoviren sieben Wochen bis drei Monate, Rotaviren eine Woche bis zwei Monate und Noroviren acht Stunden bis sieben Tagen nachgewiesen werden (Kramer et al., 2006). Inwiefern sich diese Daten jedoch auf feuchte, frequentierte Oberflächen wie urbanen Grünflächen übertragen lässt, ist fraglich. Da Pathogene mit ihrer Umwelt interagieren, in die Pflanzen aufgenommen und dort gebunden werden bzw. aufgesaugt werden können, ist davon auszugehen, dass die Persistenz dort kürzer ist (Selinka, 2023).

Im Idealfall besteht dennoch absolute Keimfreiheit im Bewässerungswasser. Kann diese nicht gewährleistet werden, ist es sinnvoll durch weitere Maßnahmen am Verbrauchsort die Risiken zu minimieren. Durch physische Barrieren, Schulungen, Warnschilder oder Haus- bzw. Parkordnungen kann der Kontakt zu den bewässerten Flächen minimiert werden. Zusätzlich kann durch die Wahl der verwendeten Bewässerungsmethode, z.B. Tiefen- oder Tröpfchenbewässerung die Aerosolbildung und die Kontaktfläche minimiert bzw. vermieden werden. Darüber hinaus kann der Zeitpunkt der Bewässerungsmethode so gewählt werden, dass er außerhalb der Öffnungszeiten liegt oder in Zeiten mit sehr geringer Besucherzahl (z.B. nachts). So sieht z.B. Frankreich in der Verordnung zur Wasserwiederverwendung für die Bewässerung von öffentlichen Parkanlagen vor, dass die Bewässerung außerhalb der Öffnungszeiten und min. zwei Stunden vor Wiedereröffnung geschieht. Bei permanent geöffneten Grünanlagen soll die Bewässerung während Zeiten geringer Besucherzahlen stattfinden, wobei der Zugang für Passant*innen während und bis zwei Stunden nach der Bewässerung auf den Grünflächen zu verhindern ist (Frankreich, 2014).

Auf Grund der Vielzahl unterschiedlicher Krankheitserreger, vgl. Tabelle 34, werden für die Kontrolle der hygienisch-mikrobiellen Sicherheit Indikatorparameter benutzt. Innerhalb der EU gibt es acht verschiedene Hygiene-Indikatoren, wobei die sechs Länder mit Wiederverwendungsvorschriften nicht immer die gleichen vorgeben und die EU-Verordnung 2020/741 selbst nur zwei vorgibt, vgl. Tabelle 35. Darüber hinaus variieren die Grenzwerte zwischen den EU-Ländern und hängen teilweise zusätzlich von der Bewässerungsmethode, der Pflanzenart und der Bewässerungsfläche ab.

Tabelle 34: Übersicht häufig im Abwasser befindlicher pathogener Krankheitserreger nach (ISO 20426, 2018)

Pathogene	Erreger	Krankheit	Referenz Pathogen
Bakterien	Shigellen	Shigellose (Bazillenruhr)	E. coli O157:H7 Campylobacter
	Salmonellen	Salmonellose, Gastroenteritis (Durchfall, Erbrechen, Fieber), reaktive Arthritis, Typhus	
	Vibrio cholerae	Cholera	
	E. coli	Gastroenteritis und Septikämie, hämolytisch-urämisches Syndrom	
	Campylobacter	Gastroenteritis, reaktive Aarthritis, Guillain-Baré Syndrome	
Protozoen	Entamoeba	Amöbenruhr (Amöbendysenterie)	Kryptosporidium
	Giardia	Giardiasis (Gastroenteritis)	
	Kryptosporidien	Kryptosporidiose, Durchfall, Fieber	
Helminthen	Ascaris	Ascariasis (Rundwurm Infektion)	Intestinale Nematoden (Helminthen Eier)
	Ancylostoma	Ancylostomiose (Hakenwurm Infektion)	
	Necator	Necatoriose (Rundwurm Infektion)	
	Trichuris	Trichuriose (Peitschenwurm Infektion)	
Viren	Enterovirus	Gastroenteritis, Herzanomalien, Meningitis, Atemwegserkrankungen, Nervenstörungen, Andere	Rotavirus
	Adenovirus	Gastroenteritis, Atemwegserkrankungen, Augenentzündung	
	Rotavirus	Gastroenteritis	

Obwohl die aktuellen Indikatorbakterien auf das Vorhandensein und die wahrscheinliche Quelle von Wasserverschmutzung hindeuten können, geben sie keine Auskunft über möglichen Gefahren von pathogenen Viren (Rota-, Noro-, Entero- oder Adenoviren). Daher ist es ratsam diese Parameter mit einzuschließen, so werden Legionellen und Helimenthen auch in der (EU) Verordnung 2020/741 begrenzt und die WHO-Guidline für Potable Re-Use (2017) betrachtet auch Rotaviren und Adenoviren als Indikator.

Darüber hinaus ist es ratsam, aufbereitetes Bewässerungswasser mittelfristig auch auf sogenannte ESKAPE Bakterien als Überträger von Antibiotikaresistenzgenen zu untersuchen und ggf. Grenzwerte diesbezüglich aufzustellen. Da es dafür noch keine gängigen Screening-Verfahren

gibt, müssen diese noch im Rahmen von Forschungsvorhaben entwickelt und standardisiert werden (LAWA, 2022)

Neben den in den Tabellen genannten Anforderungs-basierten Zielen wie z.B. die Log_{10} -Reduktion oder Ablaufqualitäts-Zielen, können die mikrobiellen Risiken auch mittels einer definierten tolerierbaren Infektionswahrscheinlichkeit beschrieben werden. Ein Beispiel hierfür ist das Trinkwasser in den Niederlanden mit einem Wert von 10^{-4} Infektionen pro Person und Jahr (TrinkwG NL, 2011). Da bei der Anwendung von Wasserwiederverwendung insgesamt eine Pathogenkonzentration anzustreben ist, die keine gesundheitliche Beeinträchtigung vermuten lässt, können als weiteres Bewertungsinstrument die DALYs (disability-adjusted life years, zu Deutsch: verlorene gesunde Lebensjahre) herangezogen werden, die u.a. die Bewertungsgrundlage für Wasserwiederverwendung in Australien ist. Die WHO sieht dabei eine Verkürzung der Lebenserwartung um ein Jahr pro eine Million Einwohner (10^{-6}) als gesellschaftlich akzeptabel an, unabhängig von der Wassernutzung (WHO, 2022).

Um die Infektionsgefahr durch Pathogene zu bewerten, ist grundsätzlich die Zusammensetzung des Abwassers im Zusammenhang mit den Schutzbarrieren, der Nutzungsart, den Nutzungsgruppen sowie der geplanten Aktivität zu untersuchen. Da die Zusammensetzung regional und zeitlich stark variieren kann, müssen diese Parameter individuell bestimmt und regelmäßig kontrolliert werden.

Tabelle 35: Vorgaben zu mikrobiellen Parametern aus EU-Ländern und den USA und Normen für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung urbaner Grünflächen (Parks, Friedhöfe, Straßenbegleitgrün, Golfplätze) sowie Güteklasse A der EU-VO 2020/741 für landwirtschaftliche Bewässerung

Zielwerte / Herkunft	Zypern (2015)	Frankreich (2014)	Griechenland (2011)	Italien (2003)	Portugal (2019)	Spanien (2007)	EU (2020) (Güteklasse A)	EPA (2016)	DIN 19650 (öffentliche Parks)
E. coli (KBE ^x /100ml)	5 ^a – 200 ^b	≤ 250	5 – 200	10	10	0 [*] ; 200 ^{**} ; X ^{***}	10	-	200
Faekal Coliforme [KBE/100ml]	-	-	2	-	-	-	-	0	-
Enterokokken [Log ₁₀ Reduktion]	-	≥ 4	-	-	-	-	-	-	100 KBE/100 ml
Legionella Sp. [KBE/l]	-	-	-	-	-	100	1.000	-	-
Salmonella Sp. [KBE/l]	-	-	-	N.N.	-	N.N.	-	-	N.N.
Anaerobe Sulfat Reduzierer [Log ₁₀ Red.]	-	≥ 4	-	-	-	-	-	-	-
Helminthen Eier (Intestinale Nematoden) [Eier/l]	-	-	-	-	1	0,1	1	-	N.N.
Filamentöse Bakteriophagen [Log ₁₀ Reduktion]	-	≥ 4	-	-	-	-	-	-	-
Min. Behandlungsverfahren	-	-	Bio. Stufe + Membranfiltr. + Desinfektion	-	2. Behandlung, Filtration + Desinfektion	-	2. Behandlung, Filtration + Desinfektion	2. Behandlung, Filtration + Desinfektion	-

x) KBE = Koloniebildende Einheiten

a) unbeschränkter Zugang; b) beschränkter Zugang

* Privat Gärten; ** öffentliche Parks / Grünanlagen oder Golfplätze; *** Grünanlagen ohne öffentlichen Zugang

Güteklasse A nach EU (2020) = Alle roh verzehrten Nahrungsmittelpflanzen, deren essbarer Teil unmittelbar mit dem aufbereiteten Wasser in Kontakt kommt und roh verzehrte Hackfrüchte

N.N. = Nicht Nachweisbar

EPA = Environmental Protection Agency (US Amerikanische Umweltschutzbehörde)

DIN 19650 = Norm bzgl. hygienische Belange von Bewässerungswasser

Tabelle 36: Vorgaben zu chemischen Parametern aus EU-Ländern für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung urbaner Grünflächen (Parks, Friedhöfe, Straßenbegleitgrün) sowie Güteklasse A der EU-VO 2020/741 für landwirtschaftliche Bewässerung

Zielwerte / Herkunft	Zypern (2015)	Frankreich (2014)	Griechenland (2011)	Italien (2003)	Portugal (2019)	Spanien (2007)	EU (2020) (Güteklasse A)	EPA (2016)	DIN 19650 (öffentliche Parks)
BSB5 [mg/l]	10 ^a – 25 ^b	-	5	20	10	-	10	10	10
CSB [mg/l]	70 ^a – 125 ^b	70	-	100	-	-	-	-	60
N _{ges} [mg/l]	-	-	15	15	15	-	-	-	1 [NH ₄]
P _{ges} [mg/l]	-	-	-	2	5	-	-	-	-
AFS [mg/l]	10 ^a – 35 ^b	15	2	10	10	10*; 20**; 35***	10	-	-
Trübung [NTU]	-	-	2	10	5	2*; 10**/**; X***	5	2	-
Fette & Öle [mg/l]	5	-	-	0	-	-	-	-	-
pH [-]	6,5 – 8,5	-	-	6 – 9,5	6 – 9	-	-	6 - 9	-
Leitfähigkeit [µS/cm]	2.500	-	-	3.000	1000	-	-	-	-
Chlorid-Gehalt [mg/l]	300	-	-	-	-	-	-	-	-

Zielwerte / Herkunft	Zypern (2015)	Frankreich (2014)	Griechenland (2011)	Italien (2003)	Portugal (2019)	Spanien (2007)	EU (2020) (Güteklasse A)	EPA (2016)	DIN 19650 (öffentliche Parks)
Rest Chlorgehalt [mg/l]	> 2	-	> 2	> 0,2	-	-	-	> 1	-
Brom [mg/l]	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Saprobienindex [mg/l]	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3

x) KBE = Koloniebildende Einheiten

a) unbeschränkter Zugang; b) beschränkter Zugang

* Privat Gärten; ** öffentliche Parks / Grünanlagen oder Golfplätze; *** Grünanlagen ohne öffentlichen Zugang

Güteklasse A nach EU (2020) = Alle roh verzehrten Nahrungsmittelpflanzen, deren essbarer Teil unmittelbar mit dem aufbereiteten Wasser in Kontakt kommt und roh verzehrte Hackfrüchte

N.N. = Nicht Nachweisbar

EPA = Environmental Protection Agency (US Amerikanische Umweltschutzbehörde)

DIN 19650 = Norm bzgl. hygienische Belange von Bewässerungswasser

Gesetzliche Zusatzbestimmungen in den jeweiligen Ländern:

Zypern: Gilt nur für Kläranlagen mit > 2.000 EW

Frankreich: Es ist zu beachten, dass die Bewässerung außerhalb der Öffnungszeiten und min. zwei Stunden vor Wiedereröffnung geschieht. Bei permanent geöffneten Grünanlagen soll die Bewässerung während Zeiten geringer Besucherzahlen stattfinden, wobei der Zugang für Passanten während und bis zwei Stunden nach der Bewässerung auf den Grünflächen zu verhindern ist.

Griechenland: Kein Sprinkler / keine Beregnungsanlagen erlaubt

Italien: Die chemischen Grenzwerte gelten als einzuhaltender Jahresmittelwert; Lokalregierung kann die Grenzwerte weiter verschärfen

Spanien: Besteht die Gefahr einer Aerosolbildung, müssen die von den Gesundheitsbehörden von Fall zu Fall festgelegten Anforderungen beachtet werden; andernfalls wird eine solche Verwendung nicht genehmigt.

Portugal: UV- oder Ozon-Desinfektion ist der Chlordesinfektion vorzuziehen

Kontakt während der Bewässerung mit Menschen ist zu vermeiden

EPA: An Standorten mit kontrolliertem Zugang, an denen durch bauliche und betriebliche Maßnahmen der Kontakt mit aufbereitetem Wasser erheblich reduziert wird, kann eine geringere Aufbereitungsstufe, z. B. eine Zweitbehandlung und Desinfektion zur Erreichung von < 14 fäkale Coli/100 ml, angemessen sein.

Das aufbereitete Wasser sollte keine messbaren Mengen an Krankheitserregern enthalten

Aufbereitetes Wasser sollte klar und geruchsneutral sein.

Chlorrückstände > 0,5 mg/l im Verteilungssystem werden empfohlen, um Geruch, Schleim und bakterielles Nachwachsen zu reduzieren.

Chemische Schadstoffe, zu nennen sind hier Salze und ihre Ionen, Nährstoffe, Schwermetalle, Spurenstoffe und weitere organische Verbindungen, sind ebenfalls im Abwasser zu finden. Von ihnen kann eine erhebliche nachhaltige Gefährdung für den Boden, die Pflanzen bzw. Pflanzenteile oder das Oberflächengewässer bzw. Grundwasser ausgehen. Auch die menschliche Gesundheit kann durch die orale Aufnahme bestimmter Schwermetalle, Spurenstoffe oder organischer Verbindungen Schaden nehmen, was bei der Bewässerung des urbanen Grüns aber eine nachgestellte Rolle einnimmt, da der Verzehr nicht vorgesehen ist. Da häusliches Abwasser mit diesen Stoffen nur gering belastet ist, ist in der Regel von einer langen Expositionsdauer bis zur nachteiligen Beeinträchtigung auszugehen (Seis et al., 2016). Eine genaue Zusammensetzung des Abwassers, auch in Bezugnahme auf die Herkunft (z.B. Industrieeinleiter), muss darüber jedoch im Laufe der Risikoanalyse genau Klarheit schaffen, vgl. Element eins. Das Ausmaß des Risikos hängt darüber hinaus von verschiedenen Faktoren ab, die unter Element vier zusammengetragen werden und dann ebenfalls unter Element fünf in die Risikobewertung mit einfließen.

Gelöste Salze werden durch die herkömmlichen Abwasserbehandlungsverfahren nicht entfernt. Die Salzverträglichkeit am Einsatzort ist abhängig von der Salzkonzentration, Bodenart, Klimabedingung und Art und Sorte der (Kultur-) Pflanzen. Zusammen mit dem bereits im Boden gelösten Salz kann es zu Wachstumsstörungen bei den Pflanzen führen. Natrium, Calcium und Magnesium haben einen negativen Einfluss auf die Struktur des Bodens, was zu Verschlammungsneigung oder krustenförmiger Deckschichtbildung bei Austrocknung führt. Chlorid kann sich in den Pflanzen akkumulieren und ebenfalls zu starken Pflanzenschädigungen führen. Carbonate, vor allem als Natriumcarbonate, haben eine phytotoxische Wirkung (ISO 16075-1; DIN 19684-10). Für deutsche Klimaverhältnisse und Bodenfeuchten spielt die Salzverträglichkeit eher eine ungeordnete Rolle.

Die Salzkonzentration kann mit dem Summenparameter elektrische Leitfähigkeit zusammengefasst werden, wobei 1 mS/cm in etwa einer Konzentration von 600 mg Salz pro Kilogramm Wasser entspricht. Allerdings müssen für eine genaue Risikoabschätzung die einzelnen Salzfraktionen genau bestimmt werden und mit der Bodenzusammensetzung am Einsatzort verschnitten werden. Genauso wichtig ist die Tiefe des Grundwasserleiters, um das Versalzungspotenzial durch Bewässerung besser abschätzen zu können (BBodSchV; DIN 19684-10).

Organische Kohlenstoffverbindungen können zu Wechselwirkungen mit dem Boden, Pflanzen oder Gewässer / Grundwasser führen. Bei einer schlechten Bewässerungspraxis, z.B. durch eine übermäßige Bewässerung können die organischen Kohlenstoffverbindungen aus dem Bewässerungswasser ins Oberflächengewässer oder Grundwasser gelangen und dort zu Sauerstoffzehrung führen. (Seis et al., 2016). Allerdings beträgt die Abbaurate der organischen Kohlenstoffverbindungen in den herkömmlichen Abwasserbehandlungsverfahren durchschnittlich 95%. Darüber hinaus ist die Restbelastungen durch die Abwasserverordnung auf 75 mg/l CSB bzw. 15 mg/l BSB₅ für die Größenklasse 5 limitiert (AbwV 2022), woraus sich 2021 durchschnittlich sehr niedrige Ablaufkonzentrationen in Deutschland von 25 mg/l CSB für alle Kläranlagen ergaben (DWA-Leistungsnachweis, 2022). Trotzdem sollten mögliche Wechselwirkungen untersucht werden und in die Gefahrenbeurteilung mit einfließen.

Zu den Nährstoffen zählen Phosphor und Stickstoff - im Jahr 2022 betrug die durchschnittliche Ablaufkonzentration aller Kläranlagen in Deutschland 0,48 mg/l gesamt Phosphor und 8,4 mg/l gesamt Stickstoff (DWA-Leistungsnachweis, 2022). Beide Stoffe sind wichtig für das Pflanzenwachstum, weshalb das Vorhandensein im Bewässerungswasser auch als positiv angesehen werden kann. Allerdings sind seit Jahren erhöhte Stickstoff- und Phosphoreinträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in das Grundwasser die Hauptursache für einen schlechten chemischen Zustand des Grundwassers (Umweltbundesamt, 2022). Durch Oberflächenabwaschungen oder über Bodenerosion können die Nährstoffe in Oberflächengewässer getragen werden und

dort zu Eutrophierung führen. Dies spielt bei der Bewässerung des urbanen Grüns eine besondere Rolle, da hier im Gegensatz zur Landwirtschaft keine ähnlich hohe Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen zu erwarten ist (Koch, 2022). Daher muss auf diese beiden Parameter im Zusammenspiel mit der Bodenbeschaffenheit, topologischen Gegebenheiten und lokalen Randbedingungen besonders geachtet werden (91/676/EWG, 1991). Auch die Bewässerungsmenge und -art sind im Hinblick auf die Versickerungsgeschwindigkeit und dem Erosionspotenzials zu untersuchen. Dies muss ggf. in Element vier des Risikomanagements genauer beschrieben werden (Seis et al., 2016).

Schwermetalle können ebenfalls in der Abwassermatrix enthalten sein. Dabei unterscheiden sich die Schwermetalle in ihrer Giftigkeit. Z.B. ist Eisen generell nicht toxisch. Blei, Cadmium oder Quecksilber in Abhängigkeit ihrer Konzentration dagegen sehr. Nickel hat bei oraler Aufnahme eine vernachlässigbare toxische Wirkung, inhaliert wirkt es dagegen nachweislich toxisch (Scheffer et al., 2018). Allerdings reichern sich die Schwermetalle während des Abwasserbehandlungsverfahrens im Schlammfad an, weshalb die Belastungen im Wasserfad sehr gering sind (Scherer et al., 2010). Durchschnittlich ergaben sich 2019 folgende Konzentrationen im Ablauf deutscher Kläranlagen, vgl. Tabelle 37.

Tabelle 37: Mittlere Schwermetallkonzentrationen im Kläranlagenablauf für Deutschland für Kläranlagen ab 50 Einwohner*innen (Destatis, 2022)

Parameter	As	Cd	Pb	Hg	Cu	Ni	Zn	Cr
(µg / l)	0,326	1,2	3,2	0,1	9,4	6,3	51,6	3,3

Verglichen mit den „Tolerable Upper Intake Level (UL)“, also den tolerablen chronischen Aufnahmemengen pro Kilogramm Körpergewicht, vgl. Tabelle 38, müssten potenzielle Nutzer*innen mehrere Liter direkt zu sich nehmen, um gesundheitliche Folgen zu erleiden. Das ist bei den urbanen Bewässerungen ausgeschlossen.

Tabelle 38: Übersicht der tolerablen wöchentlichen oberen Aufnahmemengen je kg Körpergewicht bestimmter Schwermetalle nach 1) (Überschär, 2022); 2) (BfR, 2013); 3) (BfR, 2021)

Parameter	As	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	Cr
Tolerable obere Aufnahmemenge (mg/Kg·Woche)	0,015 ¹	0,007 ¹	0,0025 ¹	0,005 ¹	35 ²	175 ²	1,7 ³

Verschnitten mit dem mittleren Bewässerungsbedarf für Park- & Grünanlagen für mittlere Niederschlags- und Temperaturverhältnissen von 390 l/m²·a (ÖWAV, 2016) und der zulässigen zusätzlichen jährlichen Schwermetallfracht auf Böden gemäß der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV), Anhang II, als Bewertungsmaßstab angesetzt, ergibt sich für das Schutzgut Boden keine erhebliche Gefahr (Tabelle 39).

Tabelle 39: Vergleich der zulässigen Schwermetallfracht auf Böden nach BBodSchV mit den theoretischen Schwermetallfrachten aus ausbereitetem Klarwasser, errechnet aus der durchschnittlichen Bewässerungsmenge von 390 l/m²·a und der durchschnittlichen Klarwasserkonzentration.

Schwermetall	Zulässige Fracht nach BBodSchV (g/ha·a)	Fracht bei einer Bewässerung mit aufbereitetem Klarwasser zu 390 l/m ² ·a (g/ha·a)	Atmosphärische Deposition (g/ha·a)
Blei	400	0,7	31 – 310
Cadmium	6	0,2	1,5 – 3
Chrom	300	9	3
Kupfer	360	29	11 – 13
Nickel	100	15	5 – 35
Quecksilber	1,5	0	0,2 – 0,8
Zink	1200	201	70 – 618

Dennoch haben Schwermetalle einen direkten ökotoxischen Einfluss auf Boden- und Grundwasserlebewesen, Pflanzen und die Tierwelt. Indirekt können sie durch unbeabsichtigte Versickerung auch die menschliche Gesundheit gefährden und durch Oberflächenabfluss auch die aquatische Umwelt schädigen, weshalb dieser Parameter nicht vernachlässigt werden darf (de Vries et al., 2002; De Vries et al., 2007). Die Bundesbodenschutzverordnung gibt daher Grenzwerte bzgl. der Wirkungspfade Boden-Mensch, Boden-Nutzpflanze und Boden-Grundwasser für verschiedenste Flächennutzungen vor. Grenz- und Maßnahmenwerte für das urbane Grün mit Nutzung als Park- und Freizeitanlagen (inkl. Straßenbaum) können (Tabelle 40; Spalte 1) entnommen werden.

Auch wenn die bodenbezogene zusätzliche jährliche Fracht durch eine Bewässerung mit aufbereitetem Wasser vernachlässigbar ist, können durch die Bewässerung Schwermetalle im Boden angereichert werden. Daher muss die bewässerte Fläche vor Freigabe und während der Nutzung in regelmäßigen Abständen im Rahmen des Umweltmonitorings des Risikomanagements (vgl. Element neun) bezogen auf die genannten Grenzwerte für den Boden und die Geringfügigkeitsschwellwerte für das Grundwasser untersucht werden. Die Häufigkeit sollte sich dabei nach den Erkenntnissen aus dem Risikomanagement richten, spätestens jedoch alle zehn Jahre (LAWA, 2022).

Tabelle 40: Grenzwerte nach BBodSchV, Anhang II, für die verschiedenen Wirkungspfade

Schwermetall	Boden-Mensch Park- & Grünflächen	Boden-Nutzpflanze Grünlandflächen	Boden-Grundwasser Unabhängig der Boden- nutzung
Prüfwerte in mg/kg Trockenmasse			
Arsen	125	50	10
Blei	1000	1200	25
Cadmium	50	20	5
Chrom	1000	-	50
Chromat	-	-	8
Nickel	350	1900	50
Quecksilber	50	2	1
Kupfer	-	1300	50
Thallium	-	15	-
Antimon	-		10
Kobalt	-		50
Molybdän	-		50
Selen	-		10
Zinn	-		40
Zink			500

Ein weiterer Parameter, der durch die Bewässerung mit aufbereitetem Wasser im Rahmen des Risikomanagements genauer betrachtet werden muss, sind die organischen Spurenstoffe, die üblicherweise in sehr niedrigen Konzentrationen (Mikro- oder Nanogramm pro Liter) vorkommen. Ihren Ursprung haben sie u.a. in Arzneimittelwirkstoffen, Desinfektionsmitteln, medizinischen Kontrastmedien, Kosmetika, Wasch- und Reinigungsmitteln, Pflanzenschutzmitteln, Farbstoffen, Anstrichen oder Konservierungsmitteln und Industriechemikalien (Kümmerer, 2010). Spurenstoffe können u.a. durch Hemmung des Wachstums, Stoffwechselstörungen, Störung der Embryonalentwicklung, Schwächung des Immunsystems, bis hin zu Schäden an der Erbsubstanz (Mutationen) toxisch auf Lebewesen wirken (Bleckmann et al., 2016).

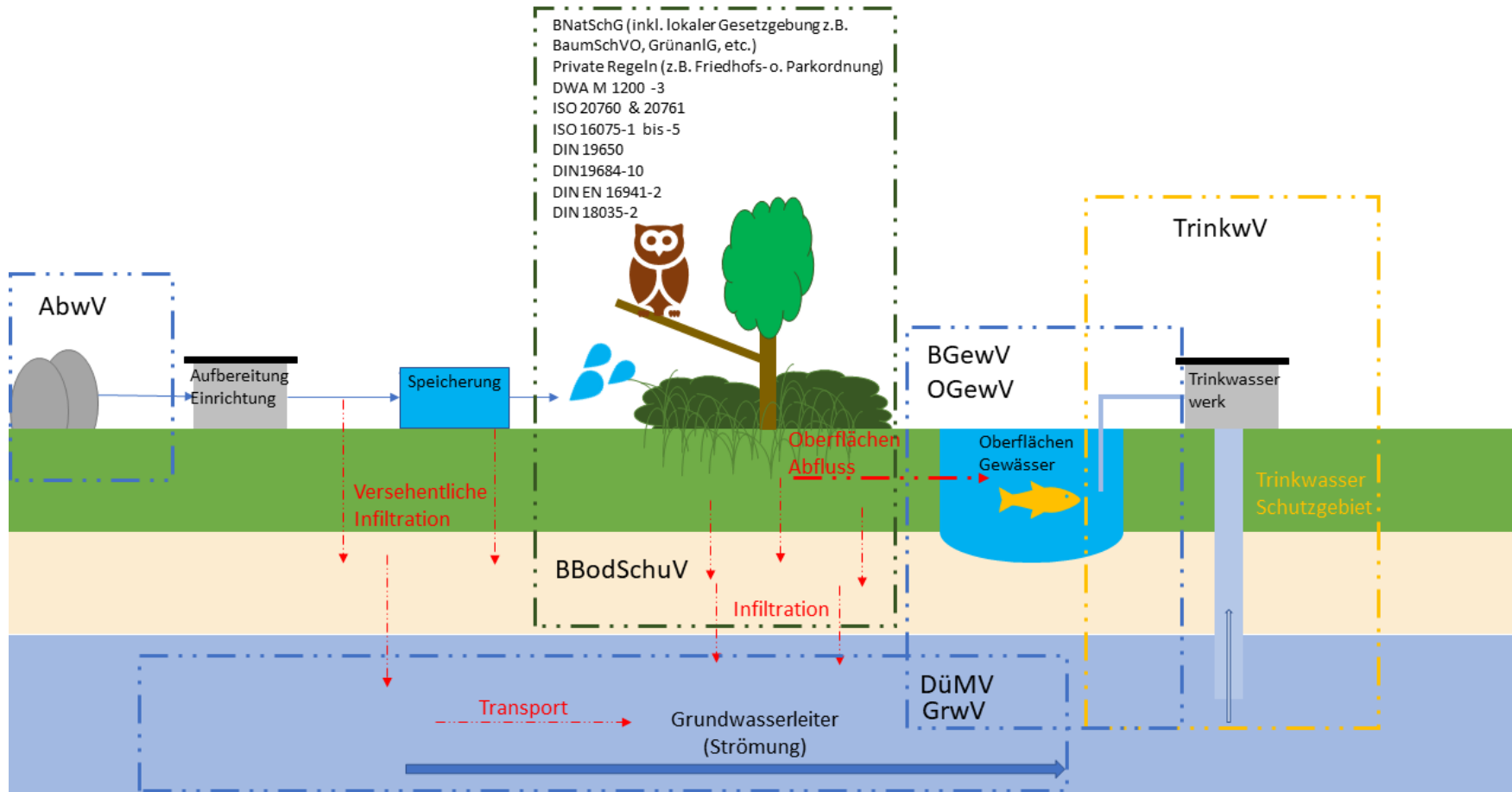
Spurenstoffe werden auf Kläranlagen ohne weitergehende Spurenstoffelimination nicht vollständig entfernt und können so bei der Bewässerung von urbanem Grün auf die Bewässerungsfläche gelangen. Durch Oberflächenabfluss können sie in die aquatische Umwelt oder über Versickerung in den Boden und in das Grundwasser verlagert werden. Auch wenn gezeigt werden konnte, dass einige Spurenstoffe während der Bodenpassage adsorbiert und z.T. auch mineralisiert werden können (Vilanova et al., 2012), sind andere, z.B. kurzkettige PFAS, sehr mobil und gelangen schnell in das Grundwasser. Darüber hinaus besteht eine Gefährdung durch Akkumulation oder Transformation im Boden der z.T. sehr persistenten Verbindungen. Diese können nach

einer gewissen Zeit durch Desorptionsprozesse auch zu einer verspäteten Verlagerung in das Grundwasser führen (LAWA, 2022). Daher ist eine Untersuchung und Bewertung dieser Stoffgruppe im Rahmen des Risikomanagements zwingend erforderlich. Dabei ist zu betonen, dass es z.Z. keine rechtlichen Vorschriften und Grenzwerte in Deutschland bzgl. der Spurenstoffe im Abwasser oder der Wasserwiederverwendung gibt (Halbach et al., 2022). Behörden können derzeit für eine Bewertung nur indirekt auf die gesundheitlichen Orientierungswerte des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, 2020); die Grenzwertparametern aus der Trinkwasserrichtlinie bezogen auf die Summe von 20 bestimmten PFAS-Stoffen ($\text{PFAS}_{\Sigma 20}$), PFAS_{ges} und Pestiziden; die Umweltqualitätsnormen (UQN) und- UQN-Vorschläge der Grundwasser- und UQN-Richtlinie zurückgreifen. Die LAWA-Arbeitsgruppe zur Wasserwiederverwendung empfiehlt für die landwirtschaftliche Wiederverwendung auf die 10 folgenden Indikator-Spurenstoffe zurückzugreifen: Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Gabapentin, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Ifamethoxazol,- Benzotriazol,- Σ 4- und 5-Methylbenzotriazol (LAWA, 2022).

Die generelle Beurteilung chemischer Risiken auf Menschen und Umwelt wird im Gegensatz zu mikrobiellen Risiken über die „Nicht-Effekt-Konzentration“ (PNEC) bzw. der höchstzulässigen Konzentration des Schadstoffs getätigt (z.B. aus den Umweltqualitätsnormen).

Abschließend muss betont werden, dass die Gefahren nicht pauschal angegeben werden können, sondern für das jeweilige Wiederverwendungssystem speziell ermittelt werden müssen. Dabei ist es wichtig, alle Industrie- und Gewerbebetriebe zu bestimmen, da diese durch hohe Einleitkonzentrationen die chemischen Schadstofffrachten besonders beeinflussen können bzw. dazu beitragen können, dass der entsprechende Abwasserstrom für die Wiederverwendung ungeeignet ist (z.B. Pharmaindustrie oder Galvanisierungsindustrie). Aber auch Krankheitswellen und Krankenhäuser dürfen auf Grund der hohen Gefahr durch Pathogene nicht vernachlässigt werden. Dabei ist auf eine vollständige Übereinstimmung des aufbereiteten Wassers mit allen für das Wasserwiederverwendungssystem geltenden Rechtsvorschriften und Anforderungen für die Pflege und den Erhalt des urbanen Grüns, so wie dem Schutz der Umwelt und der Gesundheit von Mensch und Tier durch eine Begrenzung der mikrobiologischen und chemischen Schadstoffe sicherzustellen. Dies kann durch Stofflisten relevanter Gefahren (Pathogene und chemische Schadstoffe) geschehen, die alle einschlägigen EU-, nationalen und lokalen Rechtsvorschriften und Standards berücksichtigt. Eine Übersicht dazu liefert Abbildung 89.

Abbildung 89: Darstellung der Richtlinien und Verordnungen in einem nach den Leitlinien zur Anwendung der Verordnung 2020/741 (2022/C 298/01, 2022).



Mit: AbwV = Abwasserverordnung; BGewV = Badegewässerverordnung; TrinkwV = Trinkwasserverordnung; DüMV = Düngemittelverordnung; GrwV = Grundwasserverordnung; OGewV = Oberflächengewässerverordnung. BBodSchV - Bundesbodenschutzverordnung

Quelle: eigene Darstellung, TU Berlin in Anlehnung an die Leitlinien zur Anwendung der Verordnung 2020/741 (2022/C 298/01, 2022).

4. *Identifizierung der gefährdeten Umweltgegebenheiten und Bevölkerungsgruppen und der Wege, auf denen die Exposition gegenüber den identifizierten Gefahren erfolgt, unter Berücksichtigung spezifischer Umweltfaktoren wie örtliche Hydrogeologie, Topologie, Bodenart und Ökologie, und von Faktoren im Zusammenhang mit der Art der Kulturen und der landwirtschaftlichen Praktiken und Bewässerungsmethoden. Berücksichtigung möglicher irreversibler oder langfristiger negativer Auswirkungen der Wasseraufbereitung auf die Umwelt und die Gesundheit, gestützt durch wissenschaftliche Erkenntnisse.*

Das vierte Element des Risikomanagements dient der Beschreibung aller möglichen Expositionswege für alle vorher unter Element drei ermittelten Gefahren und Risiken zu den exponierten Bevölkerungsgruppen und Umweltkompartimenten (menschliche, tierische und umweltliche Rezeptoren). Es dient, wie Element drei als Grundlage für die Risikobewertung unter Element fünf. Es muss in seinem Wortlaut für den urbanen Anwendungsfall angepasst werden, um von „landwirtschaftlichen Praktiken“ auf „Praktiken der Landschaftspflege“ hinzuweisen.

Da die Art und Dauer der Exposition zu den ermittelten Gefahren in Abhängigkeit der örtlichen Randbedingungen variiert, müssen die Expositionswege auch hier individuell innerhalb der Systemgrenzen ermittelt werden und können nicht pauschal benannt werden, vgl. Element eins (ISO 20426, 2018; WHO, 2016). Um dennoch eine Übersicht der möglichen betroffenen Bevölkerungsgruppen und Expositionswege zu bekommen, werden sie hier nochmal beschrieben.

Auf den Menschen kann in Abhängigkeit der Verwendungsart (z.B. Bewässerung), des Einsatzortes (inkl. der zugangsberechtigten Personen, Art der Personengruppe und der Zugangs- bzw. Aufenthaltszeiten), der Flächennutzung (z.B. sportliche Tätigkeit oder reiner Aufenthalt ohne direkten Pflanzenkontakt), der Einsatzdauer und der Bewässerungsart eingewirkt werden. Damit lassen sich die betroffenen Bevölkerungsgruppen und Expositionswege auf urbanen Grünflächen begrenzen, ohne eine pauschale Eintrittswahrscheinlichkeiten von Risiken und deren Wirkung zu beziffern.

Mögliche betroffene Bevölkerungsgruppen

- ▶ **Arbeiter*innen:**
Arbeiter*innen auf den Aufbereitungsanlagen, sowie die für die Pflege und Instandhaltung verantwortlichen Grünflächenmitarbeiter*innen haben eine relativ hohe Wahrscheinlichkeit mit dem Bewässerungswasser in Kontakt zu kommen. Die Exposition lässt sich durch Schulungen, Sicherheitsbelehrungen, persönliche Schutzausrüstung und Hygienemaßnahme reduzieren. Zudem bestehen mit den DGUV-Richtlinien zur Sicherheit und Gesundheitsschutz im Abwasserbereich als Vorgaben zum Schutz der Arbeiter*innen (DGUV, 2010).
- ▶ **Grünflächenbesucher*innen**
Jegliche Grünflächenbesucher*innen können mit Bewässerungswasser in Kontakt kommen. Hierbei spielen Risikominimierungsmaßnahmen wie Besuchszeiten, Bewässerungszeiten, -flächen und -methoden, Beschilderungen, Abgrenzungen und Belehrungen die entscheidende Rolle bei der Beurteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit. Insbesondere bei Kindern ist eine mögliche (unbeabsichtigte) Aufnahme von Boden und Rasen zu berücksichtigen.

- ▶ **Anwohner*innen und Querende**
Anwohner*innen und Querende haben nur eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit mit dem Bewässerungswasser in Kontakt zu kommen. Jedoch ist eine Exposition über Aerosole, hauptsächlich eine Inhalation, nicht auszuschließen. Durch Minimierungsmaßnahmen wie Mindestabständen zu Wohngebäuden, maximal zulässigen Windgeschwindigkeiten während der Bewässerung oder der aerosolfreie Bewässerungsmethode können die Expositionen reduziert werden.

Expositionsszenarien

- ▶ **(Schleim-) Hautkontakt:**
Durch Kontakt mit noch nasser Vegetation, Boden oder Rohrleitungen, dem Bewässerungssystem oder nassen Tieren, z.B. freilaufenden Hunden, können Arbeiter*innen und Besucher*innen in Kontakt mit dem aufbereiteten Wasser kommen. Dies ist die wahrscheinlichste Übertragungsvariante. Sie hängt von den Bewässerungszeiten, -Flächen, der Flächennutzung, Bewässerungsart und Zugangsberechtigungen ab.
- ▶ **Unbeabsichtigtes Verschlucken:**
Durch Kontakt mit noch nasser Vegetation, Boden oder Rohrleitungen, durch Leckagen des Bewässerungssystems oder während der Bewässerung, sowie durch den Kontakt mit nassen Tieren, z.B. freilaufenden Hunden, können alle betroffenen Bevölkerungsgruppen das Bewässerungswasser bzw. den damit bewässerten Boden oder Rasen unbeabsichtigt verschlucken. Dabei wird von 50 ml pro Jahr und Parkbesucher*in ausgegangen (Australian Health, 2006).
- ▶ **Beabsichtigtes Verschlucken:**
Das beabsichtigte Verschlucken von Vegetation, Boden oder Bewässerungswasser ist für Erwachsene eher unwahrscheinlich, jedoch insbesondere bei Kleinkindern als möglicher Expositionspfad zu berücksichtigen.
- ▶ **Inhalation von Aerosolen:**
Durch Leckagen des Bewässerungssystems oder während der aktiven Bewässerung, sowie durch den Kontakt mit nassen Tieren, z.B. freilaufenden Hunden, können alle identifizierten Bevölkerungsgruppen Aerosole des Bewässerungswasser inhalieren.

Der Einfluss auf die Umweltkompartimente Boden, Tiere, Pflanzenwelt, Grundwasser und Oberflächenwasser sind direkt abhängig von den Umweltfaktoren Hydrologie, klimatische Gegebenheiten, Topologie, Bodenart, Pflanzenart, Wassersättigung und Ökologie. Die potenziellen Gefahren durch aufbereitetes Wasser können je nach Umweltkompartiment variieren. Sie können wie in Tabelle 41 beschrieben bewertet werden.

Tabelle 41: Betroffene Umweltkompartimente und ihre Expositionspfade

Umweltkompartiment	Expositionsweg / Einfluss
Boden	Durch Versickerung/Infiltration kann es zu Versäuerung, Versalzung, Verschlammlung oder Akkumulation und Belastung mit Spurenstoffen oder Schwermetallen kommen.
Tiere	Durch eine orale Aufnahme des aufbereiteten Wassers können Tiere Schadstoffe aufnehmen
Pflanzenwelt	Durch eine Aufnahme über die Wurzel können Pflanzen versalzen oder Schadstoffe akkumulieren
Grundwasser	Durch die Bodenpassage, also Infiltration inkl. Adsorptions-/Desorptionsprozessen, kann es zu Auswaschung oder Verlagerung von Schadstoffen kommen. Hierbei spielen die Lage des Grundwasserleiters, die Deckschichtdicke und Bodenart sowie Bewässerungsmenge und Niederschlagsereignisse eine entscheidende Rolle.
Oberflächenwasser	Durch Oberflächenabfluss können Schadstoffe in nahegelegene Gewässer verfrachtet werden. Hier spielt die Bewässerungspraxis/-menge, Topologie, Bodenfeuchte eine entscheidende Rolle

Abschließend muss betont werden, dass die tatsächlich betroffenen Bevölkerungsgruppen, sowie Umweltkompartimente und deren Expositionsweg nicht pauschal angegeben werden können, sondern für das jeweilige Wiederverwendungssystem speziell ermittelt werden müssen. Dabei ist es für die Bewertung der Risiken besonders wichtig, die Nutzungsart der Grünfläche und das Nutzungsverhalten der zutreffenden Bevölkerungsgruppen, Umweltfaktoren und örtliche hydrologische, ökologische und topographische Gegebenheiten zu kennen.

5. *Durchführung einer Bewertung der Umweltrisiken und der Risiken für die Gesundheit von Mensch und Tier, unter Berücksichtigung der Art der ermittelten potenziellen Gefahren, der Dauer der beabsichtigten Verwendungen, der Umweltgegebenheiten und Bevölkerungsgruppen, die dem Risiko einer Exposition gegenüber diesen Gefahren ausgesetzt sind, der Schwere der möglichen Auswirkungen der Gefahren, in Anbetracht des Vorsorgeprinzips sowie aller einschlägigen Rechtsvorschriften, Leitlinien und Mindestanforderungen an die Sicherheit von Lebens- und Futtermitteln sowie den Schutz der Arbeitnehmer auf Unions- und nationaler Ebene. Die Risikobewertung könnte sich auf eine Übersicht der vorhandenen wissenschaftlichen Studien und Daten stützen.*

Das fünfte Kernelement des Risikomanagementplans beschreibt die Bewertung der Umwelt- und Gesundheitsrisiken unter Berücksichtigung aller vorab ermittelten Gefahren (vgl. Element drei) und der potenziellen Expositionsweg auf die Rezeptoren (vgl. Element vier). Der oben zitierte Absatz kann bis auf den Verweis auf die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Lebens- und Futtermittel für die Bewässerung des urbanen Grüns übernommen werden.

Die Bewertung kann mittels quantitativer, semi-qualitativer oder qualitativer Risikoanalyse erfolgen. Die Bewertung des Risikos (R) der qualitativen und semi-quantitativen Risikobewertun-

gen wird dabei als Funktion der Wahrscheinlichkeit (L) einer gesundheits- oder umweltschädlichen Auswirkung und der Schwere (S) dieser Auswirkung, die sich aus der ermittelten Gefahr, z.B. einer bakteriellen Infektion, ermittelt. (EG 178/2002, 2002). Mathematisch ausgedrückt:

$$R(S, L) = L \cdot S$$

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen beider Bewertungsansätze beruhen dabei auf historischen Daten, Expertenwissen, Erfahrungswerten, der Bewertung von menschlichem Versagen oder Fehler- und Ereignisbäumen im Kontext des Wasserwiederverwendungssystems. Die Beschreibung der Risiken für die Gesundheit von Menschen und Tieren beruht in der Regel auf Dosis-Wirkungs-Beziehungen, anhand derer festgestellt wird, ob eine Gefahr oder ein gefährliches Ereignis Auswirkungen auf die Gesundheit haben könnte. Dabei muss besonders auf die unterschiedlichen Nutzungsgruppen geachtet werden, da vulnerable Gruppen wie Kinder, kranke oder alte Menschen andere Dosis-Wirkungs-Beziehungen haben und sich ein gefährliches Ereignis schneller auf die Gesundheit auswirkt (2022/C 298/01, 2022).

Die qualitative Risikobewertung ist dabei die grundlegendste Form, die die Risiken über eine Matrix beispielsweise als signifikant, unsicher oder unbedeutend einstuft (WHO, 2012). Die semi-quantitative Bewertung ist der umfassendere Ansatz, bei der auch eine Risikomatrix verwendet wird, die dem Risiko jedoch eine Beurteilung in Form eines Zahlenwertes zuordnet (WHO, 2016), vgl. Abbildung 90.

Abbildung 90: Bewertungsmatrix zur semi-qualitativen Risikobewertung (WHO, 2016)

Wahrscheinlichkeit	Schwere der Auswirkung				
	1 - Geringfügig	2 - Klein	4 - Mäßig	8 - Groß	16 - Katastrophal
Selten (sehr unwahrscheinlich) - 1	1	2	4	8	16
Unwahrscheinlich - 2	2	4	8	16	32
Möglich - 3	3	6	12	24	48
Voraussichtlich - 4	4	8	16	32	64
Beinahe sicher - 5	5	10	20	40	80
Risikoeinstufung $R = L \times S$	<6		7-12	13-32	>32
Risikostufe	Gering		Mittel	Hoch	Extrem Hoch

Quelle: WHO (2016).

Die ermittelten Risikoniveaus bestimmen die Prioritäten für das Risikomanagement und mögliche Vorsorgemaßnahmen zur Verringerung der Risiken. Wenn beispielsweise ein hohes Risikoniveau ermittelt wurde, sollte dieses durch Vorsorgemaßnahmen gesenkt werden. Die Einstufung kann die Bewertung bereits bestehender Vorsorgemaßnahmen und die Ermittlung zusätzlicher Maßnahmen umfassen. Nachdem eine angepasste Vorsorgemaßnahme ein Risiko ausreichend gesenkt hat, müssen mögliche Überwachungs- und operationelle Kontrollmethoden festgelegt werden, um ihre Funktionsfähigkeit sicherzustellen. Der Multibarrieren-Ansatz ermöglicht hierbei ein zuverlässigeres Risikomanagement als eine einzige Maßnahme oder Barriere. Nach der Installation der geeigneten Vorsorgemaßnahmen bzw. Barrieren, sollte die Risikobewertung erneut vorgenommen werden, um zu überprüfen, ob alle Risiken ausreichend minimiert wurden.

Die Europäische Kommission erachtet den qualitativen Ansatz als geeignetste und wirtschaftlichste Methode für die Risikobewertung (2022/C 298/01, 2022). Dennoch können bei Projekten

mit hohem Risiko oder wenn ausreichend Beweisdaten vorliegen auch quantitative Risikobewertungen verlangt bzw. vorgenommen werden. Hier kann ein deterministisches Modell wie z.B. die Punktschätzung vorgenommen werden, bei der durch pauschale Annahme der maximalen Belastung des Abwassers und der minimalen Aufreinigung durch das Aufbereitungssystem eine hohe Sicherheit erzeugt wird, in dem das Risiko häufig überdimensioniert wird. Als Ergebnis steht die Aussage, ob das Qualitätsziel erfüllt wird oder nicht. Dagegen stehen probabilistische Modelle, die durch die Erstellung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Rohwasserqualität und Entfernungsleistung über zahlreiche Szenarien und der Berücksichtigung von Unsicherheiten und Variabilität eine numerische Schätzung über die Erreichung der Qualitätsziele abgeben kann (Miehe, 2022).

Leitlinien und Standards zu den verschiedenen Methoden der Risikobewertung sind in den einschlägigen WHO Richtlinien und Normen zu finden. Zu nennen sind hier u.a.: Safety and Quality of Water Used in Food Production and Processing (WHO, 2019); Guidelines for drinking-water quality (WHO, 2022), ISO 20426 oder die Leitlinien zur Anwendung der Verordnung 2020/741 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung (2022/C 298/01, 2022).

6. *Über die in Anhang I Abschnitt 2 genannten Anforderungen an die Wasserqualität und an die Überwachung hinaus sind zusätzliche oder strengere oder zusätzliche und strengere Anforderungen an die Wasserqualität und an die Überwachung in Betracht zu ziehen, wenn es für die Sicherstellung eines angemessenen Schutzes der Umwelt und der Gesundheit von Mensch und Tier erforderlich und zweckmäßig ist, insbesondere wenn es eindeutige wissenschaftliche Belege dafür gibt, dass das Risiko seinen Ursprung in dem aufbereiteten Wasser und nicht in anderen Quellen hat.*

Entsprechend den Ergebnissen der Risikobewertung gemäß Nummer 5 können die zusätzlichen Anforderungen insbesondere Folgendes betreffen:

a) Schwermetalle;

b) Pestizide;

c) Desinfektionsnebenprodukte;

d) Arzneimittel;

e) andere Stoffe, die zunehmend Anlass zu Besorgnis geben, einschließlich Mikroschadstoffen und Mikroplastik;

f) antimikrobielle Resistenzen.

Das sechste Element dient dazu, zusätzliche Anforderungen an die Wasserqualität und Überwachung unter Berücksichtigung standortspezifischer Bedingungen zu erlassen, die über die in der Verordnung 2020/741 hinausgehen bzw. diese verschärfen. Bis auf den Bezug zu „Anhang I, Abschnitt 2“ dieser Verordnung, kann es für die Bewässerung des urbanen Grüns übernommen werden. Da es zurzeit keine rechtsbindenden Anforderungen an die Wasserqualität und deren Überwachung für urbanes Grün gibt, sondern eine Vielzahl von Rechtsvorschriften unterschiedliche Umweltkompartimente regeln, ist es sinnvoll unter Berücksichtigung des Schutzes der Gesundheit und Umwelt höchstzulässige Konzentrationen bestimmter Stoffe und Pathogene durch

Behörden festzulegen lassen zu können. Sollte eine Rechtsvorschrift für die urbane Wasserwiederverwendung in Kraft treten, bezieht sich die Befähigung zur Verschärfung von Vorgaben auf diese Vorschrift.

Die genannten Beispiele aus dem sechsten Element können dabei unbegrenzt erweitert werden, wenn dies dem angemessenen Schutz der Umwelt und der Gesundheit dient. Durch eine Erweiterung auf für urbane Grünflächen relevante Anforderungen wie PFAS, PAK, Viren bzw. deren Surrogat-Parameter, weitere Pathogene und Antibiotikaresistenzen, können die möglichen Problemfelder teilweise weiter eingegrenzt werden. Ebenso ist es sinnvoll auf die weiteren Rechtsvorschriften hinzuweisen, um auf bestehende Anforderung an indirekt betroffene Umweltkompartimente zu verweisen. Zu nennen sind hier u.a. die Abwasserverordnung, die Badegewässerverordnung, Bundesbodenschutzverordnung, die Trinkwasserverordnung, die Düngemittelverordnung, die Grundwasserverordnung; die Oberflächengewässerverordnung, vgl. Abbildung 89.

7. *Festlegung von Vorsorgemaßnahmen, die zur Risikobegrenzung bereits eingeführt wurden oder eingeführt werden sollten, damit alle ermittelten Risiken angemessen bewältigt werden können. Besondere Aufmerksamkeit gilt dem Schutz von Wasserkörpern, aus denen Wasser für den menschlichen Gebrauch entnommen wird, bzw. einschlägigen Schutzgebieten.*

Diese Vorsorgemaßnahmen können Folgendes umfassen:

- a) Zugangskontrollen;*
- b) zusätzliche Desinfektions- oder Schadstoffbeseitigungsmaßnahmen;*
- c) spezifische Bewässerungstechniken, die das Risiko der Aerosolbildung verringern (z. B. Tropfbewässerung);*
- d) besondere Anforderungen an die künstliche Beregnung (z. B. maximale Windgeschwindigkeit, Abstand zwischen Beregnungsanlage und empfindlichen Gebieten);*
- e) besondere Anforderungen an landwirtschaftliche Flächen (z. B. Hangneigung, Wassersättigung des Feldes und Karstgebiete);*
- f) Förderung des Absterbens von Pathogenen vor der Ernte;*
- g) Festlegung von Mindestsicherheitsabständen (z. B. vom Oberflächenwasser, einschließlich Quellen für den Viehbestand, oder anderen Tätigkeiten wie Aquakultur, Fischzucht, Schalentier-Aquakultur, Schwimm- oder anderen Wassersportaktivitäten);*
- h) Beschilderung an Bewässerungsflächen, die darauf hinweisen, dass aufbereitetes und nicht als Trinkwasser geeignetes Wasser verwendet wird.*

Das siebte Element dient dazu, zusätzliche Vorsorgemaßnahmen treffen zu lassen bzw. auszuwählen, um Risiken weiter zu minimieren. Die Maßnahmen können dabei das gesamte Wiederverwendungssystem von der Aufbereitung, über den Transport und die Speicherung bis hin zum Einsatzort und den dortigen Gegebenheiten wie z.B. Bewässerungsart oder Zugangsbeschränkungen, betreffen. Es kann bis auf die landwirtschaftlichen Bezüge unter Punkt e) und f), die auf die urbanen Grünflächen umgeschrieben werden müssen, übernommen werden. Obwohl es schon einen umfangreichen Minimierungskatalog beschreibt, ist eine Erweiterung des Punktes c) auf „Bewässerungstechniken, die den Kontakt verringern“ sinnvoll, ebenso wie die Erweiterung

des Punkts g) auf Mindestabstände zu Gebäuden/Flächen im urbanen Kontext wie z.B. Wohngebäude, Schulen, Altenheime, Krankenhäuser, Trinkwasserbrunnen oder landwirtschaftliche Produktionsstätten. Des Weiteren kann es um einen Punkt i) erweitert werden, der die „Bewässerungszeiten im Verhältnis zu Öffnungszeiten oder Besucherzahlen“ als adäquate Schutzmaßnahme beschreibt.

8. *Angemessene Qualitätskontrollsysteme und -verfahren, einschließlich für die Überwachung der einschlägigen Parameter für aufbereitetes Wasser, und angemessene Wartungspläne für die Ausstattung.*

Es wird empfohlen, dass der Betreiber der Aufbereitungseinrichtung ein nach ISO 9001 oder einer gleichwertigen Norm zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem einrichtet und unterhält.

Das achte Element gibt eine angemessene Qualitätskontrolle für die vorab bestimmten Qualitätsziele sowie ein passendes Wartungsprogramm für die Aufbereitungs- und Bewässerungstechnik vor. Dabei wird auf das Qualitätsmanagementsystem nach ISO 9001 verwiesen, das als Grundlage empfohlen wird. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es momentan noch keine allgemeingültigen Qualitätsziele bzgl. der urbanen Wasserwiederverwendung gibt, da eine entsprechende Verordnung fehlt. Somit können Ziele momentan nur an die Vorgaben aus der landwirtschaftlichen Wiederverwendungsverordnung angelehnt werden oder müssen für jeden Einzelfall separat von der Genehmigungsbehörde bestimmt werden. Für die Umweltkompartimente, im besonderen Boden, Grundwasser, Oberflächengewässer und Tier- und Pflanzenwelt, kann auf die geltenden Rechtsvorschriften, vgl. Abbildung 89, zurückgegriffen werden.

Das Element acht kann für die Bewässerung des urbanen Grüns übernommen werden, wenn die momentan unbestimmten Qualitätsziele individuell gesetzt wurden.

9. *Umweltüberwachungssysteme zur Sicherstellung, dass ein Überwachungs-Feedback zur Verfügung gestellt wird und dass alle Prozesse und Verfahren ordnungsgemäß validiert und dokumentiert werden.*

Das neunte Element gibt die Einrichtung eines passenden Umweltüberwachungssystems vor, um sicherzustellen, dass der Gebrauch aufbereitenden Klarwassers zu Bewässerung nicht zur Verschlechterung des Zustandes der Umwelt führt. Gleichzeitig sollen die Ergebnisse des Überwachungssystems durch eine Feedbackschleife die angewandten Verfahren und Prozesse validieren, um zukünftige Wiederverwendungssysteme optimieren zu können.

Dafür müssen die Umweltkompartimente vor Beginn der Bewässerung anhand vorab bestimmter Qualitätsnormen bemessen werden, z.B. Schwermetallgehalt im Boden und Grundwasser, etc., um ein Lagebild vor der Bewässerung („Zustand NULL“) zu generieren. Die Qualitätsnormen beziehen sich dabei auf die entsprechenden Rechtsvorschriften (u.a. die Abwasserverordnung, die Badegewässerverordnung, die Bundesbodenschutzverordnung, die Trinkwasserverordnung, die Düngemittelverordnung, die Grundwasserverordnung oder die Oberflächengewässerverordnung), sowie auf Grund der Abwasserquelle vorab festgelegter Schadstoffe und bedenklicher Stoffgruppen. Im Anschluss müssen die Umweltkompartimente regelmäßig kontrolliert werden und mit dem Zustand NULL abgeglichen werden, um etwaige Verschlechterungen zu detektieren. Das Überwachungsintervall kann sich dabei ebenfalls an den geltenden Rechtsvorschriften orientieren, z.B. alle 10 Jahre für das Kompartiment Boden, oder enger gefasst werden. Gerade bei bestehenden Unsicherheiten, sollten zu Beginn häufigere Überwachungen stattfinden, die im Laufe des Projekts verlängert werden können, wenn keine Verschlechterung festgestellt werden

konnte. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Belastung auch aus anderen Quellen erfolgen kann, z.B. aus der Atmosphäre oder nahegelegenen Verkehr (bei Straßenbegleitgrün), und bei der Beurteilung der Zustandsänderung der Umweltkompartimente nicht vernachlässigt werden darf.

Das Element neun kann für des urbanen Grün übernommen werden.

10. Geeignete Systeme zur Bewältigung von Vorfällen und Notfällen, einschließlich Verfahren zur angemessenen Unterrichtung aller relevanten Kreise in solchen Fällen und regelmäßige Aktualisierung des Notfallplans.

Das zehnte Element gibt die Erarbeitung geeigneter Notfallpläne zur Bewältigung von Störungen und anderweitigen ungeplanten Vorfällen vor. Dafür muss zuerst definiert werden, was ein Notfall ist und wann der Notfallplan umgesetzt werden muss. Denkbar sind hier Grenzwertüberschreitungen und/oder bestimmte Ereignisse, z.B. Filterdurchbrüche, Leckagen oder sonstige Ausfälle.

Der Notfallplan umfasst folgende Unterpunkte:

- ▶ Lagepläne der Aufbereitungseinrichtung, Verteilungsnetze inkl. Speichereinheiten und des Einsatzortes inkl. Bewässerungseinheiten, die einen zielgerichteten Einsatz ermöglichen, z.B. Abschiebern der leckgeschlagenen Leitung oder Instandsetzung der defekten Aufbereitungseinrichtung.
- ▶ Einen Ablaufplan zur Festlegung geeigneter Gegenmaßnahmen und deren Reihenfolge bei bestimmten Notfallereignissen. Z.B. das Aussetzen der gesamten Bewässerung bei Überschreitung bestimmter Grenzwerte oder das Umfahren besonders sensibler Gebiete, bei mildereren Überschreitungen.
- ▶ Einen Alarmierungsplan in dem festgelegt ist wer, wie zu erreichen ist, inkl. Telefonnummern und Vertretung. Dabei ist wichtig, dass die hier hinterlegten Ansprechpartner auch zu jeder Zeit erreichbar sind. Gerade bei einem Wiederverwendungssystem, das aus verschiedenen Parteien besteht, vgl. Element zwei, ist ein schneller und zielführender Austausch der betroffenen Parteien zwingend erforderlich.
Darüber hinaus müssen hier weitere Kontakte wie z.B. Behörden, Ämter und Krankenhäuser hinterlegt werden, die ggf. nach oder auch schon während des Notfalls benachrichtigt werden müssen.
- ▶ Schulungsprogramme und -zeiten für eine regelmäßige Unterweisung aller Beteiligten. Die Unterweisung muss an eine Feedbackschleife gekoppelt sein, der den Notfallplan nach dem Eintritt validiert und notwendige Anpassungen ermöglicht.

Element 10 kann für die urbane Bewässerung übernommen werden.

11. Sicherstellung, dass zwischen den verschiedenen Akteuren Koordinierungsmechanismen eingerichtet werden, um eine sichere Erzeugung und Verwendung von aufbereitetem Wasser zu gewährleisten.

Das elfte und letzte Element gibt die Einrichtung passender Koordinationsmechanismen zur sicheren Erzeugung des aufbereiteten Wassers vor. Dazu zählen regelmäßige Treffen zum Austausch unter einem Koordinator (Hauptverantwortlichen) aller am Wasserwiederverwendungssystem beteiligter Parteien. Diese müssen ihre zugewiesenen Verantwortungen bestätigen bzw. Zuweisungen von Aufgaben/Verantwortungen annehmen. Es müssen Orte und Intervalle der Überwachung festgelegt werden inkl. Übergabeprotokolle, sowie die Sicherstellung von Meldekett

bei gewissen Überschreitungen. Es müssen Sicherheitsprotokolle und -unterweisungen festgelegt werden, die alle Beteiligten zu befolgen haben, inkl. der notwendigen Schulungen. Darüber hinaus müssen die Kontrollmechanismen regelmäßig überprüft werden und wie der Notfallplan an Feedbackschleifen gekoppelt werden, um diese konstant zu optimieren.

Das elfte Element kann für die Bewässerung des urbanen Grüns übernommen werden.

4.4.2 Risikomanagement für den urbanen Raum - Diskussion der Übertragbarkeit von Elementen der EU-Reuse Verordnung 2020/741

Die Überprüfung des Risikomanagements auf seine Übertragbarkeit vom landwirtschaftlichen Anwendungsfall auf die Bewässerung des urbanen Grüns zeigt, dass dies mittels Konkretisierungen und Anpassungen möglich ist. Ein Vorschlag für einen auf Grundlage der EU-Verordnung 2020/741 angepassten Risikomanagementansatz für die Bewässerung urbaner Grünflächen mit aufbereitetem Wasser findet sich im Anhang I im Anhangband.

4.5 Empfehlungen für den Einsatz von aufbereitetem Abwasser in Stadtgebieten

Autor*innen: Guggenberger, T., Schritt, H., Barjenbruch, M.

Durch die ermittelten Potenziale der Wasserwiederverwendung, die Best-Practice-Recherche, der Analyse des Risikomanagements und der Stakeholderbefragung sind Hindernisse und Möglichkeiten für die Bewässerung von urbanen Grünflächen deutlich geworden. Darauf aufbauend wurden die Handlungsempfehlungen abgeleitet, die sich an die Gesetzgebung und Vollzugsbehörden richten. Anschließend wird der Forschungsbedarf skizziert.

Empfehlungen an den Gesetzgeber:

Die Wasserwiederverwendung muss im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) definiert und geregelt werden.

Es wird empfohlen, eine nationale Wasserwiederverwendungsverordnung (WWV) für urbane Anwendungen aufzustellen, die entweder als eigenständige Verordnung oder als Unterkapitel einer allgemeinen Verordnung zur WWV veröffentlicht werden kann. Die Verordnung sollte folgende Aspekte beinhalten:

- ▶ Eine Empfehlung zur Definition der benötigten Abwasserbehandlung einschließlich einer Filtrations- und Desinfektionsstufe. Dies sollte eine klare Vorgabe zur Trennung zwischen Abwasserbehandlung und Aufbereitung für die WWV enthalten, um die gebührenfähige Abwasserbehandlung also solche abzugrenzen. U.A. aus Gründen der weitestgehenden P-Elimination oder Spurenstoffentfernung, wird empfohlen, die Filtration in der Regel als Teil des Abwasserbehandlung zu definieren.
- ▶ Vorgaben zu erforderlichen Qualitäten in Abhängigkeit der Nutzungsart sollten aufgestellt werden. Hierbei kann sich an den Vorgaben zur WWV aus den Europäischen Nachbarstaaten, vgl. Tabelle 35 und Tabelle 36, sowie den nationalen und internationalen Standards, z.B. ISO 20760 und 20761, DIN 19684-10, DIN 19650, orientiert werden.

- ▶ Ein Expertenrat sollte über weitere Parameter für die Verordnung wie z.B. Trübungswerte vor und nach der Desinfektion, Viren bzw. Surrogat-Parameter (Bakteriophagen) und deren Bestimmungsverfahren, Spurenstoffe, PFAS und ggf. Nährstoffe entscheiden. Die Vorgaben zum Risikomanagement sehen zwar die Möglichkeit einer Erweiterung der Überwachungsparameter vor, aber zum Zwecke der Harmonisierung und Risikominimierung sollte dies bereits in der Verordnung vorgegeben werden.
- ▶ Vorgaben zu Gebots- und Verbotsschildern an Grünflächen sowie Kennzeichnung von Rohrleitungen.
- ▶ Notwendige Mindestabflüsse von Fließgewässern sollten durch die Verordnung vorgegeben sein. Betreiber könnten so erkennen, ab wann aus gewässerökologischer Sicht, sowie morphologischen und nutzungstechnischen Aspekten keine WWV mehr praktiziert werden darf.
- ▶ Regeln für mögliche Organisationen zur Wasserwiederverwendung wie z.B. Wasserwiederverwendungsverbände sowie andere auch private Organisationsformen, Haftung und Schadensregulierungen, sowie Rechte und Pflichten der Endnutzer*innen.
- ▶ Festlegung der zuständigen Behörden für die Genehmigung und Umsetzung der WWV, sowie der Kontrolle der bewässerten urbanen Grünfläche. Dafür wird zusätzlich empfohlen, Randbedingungen für die Schaffung von Qualitätsbeauftragten zur WWV aufzustellen. Die Qualitätsbeauftragten sind zertifizierte Fachkräfte, die die ordnungsmäßige Durchführung der Risikoanalyse überwachen, die Randbedingungen kontrollieren und in Anlehnung an den TÜV wiederkehrende Kontrollen am gesamten WWV-System durchführen und ggf. Missstände an die Behörden weiterleiten. Durch die Schaffung von zertifizierten Qualitätsbeauftragten können Behörden entlastet werden, ohne dass die Sicherheit der WWV-Systeme darunter leidet.

Empfehlung an die Vollzugsbehörde:

Es wird empfohlen, dass die Vollzugsbehörden die Bewässerungsmengen und -flächen im urbanen Kontext erfassen, überwachen und die gesammelten Informationen zentral speichern.

Das gilt ebenso für die Erfassung von urbanen Grünflächen und deren Nutzungsarten in öffentlich zugänglichen Datenbanken. Dies würde interessierten Aufbereitern und Anwendern mögliche Potenziale und Projekt-Partner aufzeigen. Hierbei kann die Erfassung auch von den Stadt- bzw. Kommunalverwaltungen, i.d.R. den Grünflächenämtern o.ä. übernommen werden.

Weitere Forschungsbedarfe:

Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um einen sicheren Umgang mit aufbereitetem Wasser auf öffentlichen Grünflächen besser einschätzen zu können. Daher wird empfohlen, Modellprojekte für eine städtische Wasserwiederverwendung zu Bewässerung zu fördern. Dabei sollen neben den tatsächlichen Bedarfen, auch risikominimierende Aspekte und infrastrukturelle Lösungen untersucht werden, um die tatsächlich notwendigen betrieblichen und finanziellen Aufwendungen besser abschätzen zu können.

Etwaige Projekte könnten bspw. vom BMBF oder UBA gefördert werden. Zudem wären Datenlücken zu schließen, in dem die tatsächlich vorhandenen Grünflächen und die benötigten Bewässerungsmengen erfasst werden.

Es wird empfohlen, Reallabore zur praxisnahen Erforschung urbaner WWV-Projekte zu fördern. Denn durch eine engmaschige Begleitung von Wasserwiederverwendungsprojekten an urbanen Grünflächen können mögliche Umwelt-, Gesundheits- und Versagensrisiken ermittelt werden.

Transferraten von Pathogenen von aufbereitetem Wasser auf urbanen Oberflächen und von diesen Oberflächen auf die (Schleim-)Haut sollten bestimmt werden, sowie neue Erkenntnisse zur Tenazität auf feuchte, bewegte und belebte Oberflächen gewonnen werden. Durch die praxisnahe Untersuchung auf kleiner Fläche lassen sich verschiedene Risiken beziffern, womit die zukünftige Risikoermittlungen präzisiert werden können.

Ein weiterer Aspekt besteht im Monitoring von Kläranlagenabläufen über die üblichen Überwachungsparameter hinaus. Durch die gewonnenen Erkenntnisse zu Konzentrationen von Spurenstoffen, Mikroplastik, Pathogenen und weiteren Schadstoffen im Klarwasser und deren saisonalen und lokalen Schwankungen können Risiken noch besser reduziert werden und notwendige Aufbereitungsstufen zielgerichteter ausgelegt und betrieben werden.

Das Wiederverkeimungspotenzial sollte im Netz und Speicher untersucht werden, um maximale Standzeiten und Netzlängen bis zur Nachdesinfektion zu identifizieren. Zudem sollten Untersuchungen zur Mitnutzung bestehender Verteilleitungen (Abwasserleitungen oder Kabelschächte (z.B. Rohr im Rohr-Technik)) gefördert werden. Auch sollten Ökobilanzen zu verschiedenen Transportmöglichkeiten erstellt werden, um damit gezielt Fragen zu LKW-Transporten zu beantworten, z.B. „Ab wann lohnt sich welcher Transport?“.

Des Weiteren besteht weiterhin Forschungsbedarf, um urbane Bewässerungsbedarfe und – Praktiken zu ermitteln. Dabei wäre eine Art Bewässerungsbedarfskarte als Produkt für viele Entscheidungsträger*innen im Anwendungsfall sehr hilfreich. Aber auch andere Anwendungen könnten in der Forschung (z.B. Industrie, Stadtklima), bewertet und geprüft werden.

5 WADKlim-Handlungsempfehlungen

Autor*innen: Stein, U., Tröltzsch, J., Flörke, M., Herrmann, F., Uschan, T., Vidaurre, R., Bueb, B., Guggenberger, T., Schritt, H., Barjenbruch, M., Dworak, T.

5.1 Einleitung

Wasserknappheit und Nutzungskonflikte sind aktuelle Herausforderungen, die viele Regionen in Deutschland betreffen. Die Auswirkungen des Klimawandels, aber auch ein erhöhter Wasserbedarf, führen zu einer sinkenden Verfügbarkeit von Wasserressourcen in Deutschland. Insbesondere in Trockenperioden kann es regional zu erheblichen Engpässen in der Wasserversorgung kommen, die verschiedene Sektoren wie die Landwirtschaft, die Industrie oder die Wasserwirtschaft an sich beeinträchtigen. Nach aktuellem Stand des Wissens werden Dürren und Trockenheit häufiger und langanhaltender auftreten und bilden die „neue Normalität“, der sich die Wasserwirtschaft und die wassernutzenden Sektoren (z. B. Landwirtschaft, Energiewirtschaft, Industrie) in Deutschland stellen müssen.

Dieses Kapitel versteht sich als „Policy Brief“ und richtet sich an politische Entscheidungsträger*innen und Expert*innen aus der Praxis. Ziel ist es, über die Dringlichkeit des Themas zu informieren und darzustellen, wie Beiträge zur nachhaltigen Wassernutzung in Deutschland erreicht werden können. Dabei werden relevante Aspekte wie die Ursachen von Wasserknappheit, die Auswirkungen auf verschiedene Sektoren dargestellt. Des Weiteren werden Lösungsstrategien vorgestellt, die auf politischen Maßnahmen sowie technologischen und sozialen Innovationen (z. B. neue Governance Ansätze) basieren. Diese Handlungsempfehlungen sollen zudem dazu beitragen, dass Entscheidungen zur Bewältigung potenzieller Wassernutzungskonflikte aufgrund eines veränderten Wasserdargebots und Wasserbedarfs in Deutschland auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse getroffen werden können.

5.2 Retrospektive und aktuelle Wasserverfügbarkeit und -nutzung in Deutschland

5.2.1 Erkenntnisse aus WADKlim

- ▶ **Der Rückgang des Wasserdargebots der letzten Dekade ist statistisch signifikant, jedoch räumlich variabel.** In Deutschland basieren die für wasserwirtschaftliche Planungen durchgeführten Untersuchungen zum Wasserdargebot vielfach auf Mittelwerten der langjährigen Perioden 1971–2000 oder 1981–2010, welche sich im Nachhinein als überdurchschnittlich wasserreich herausgestellt haben. Bis in die Gegenwart hat in den vergangenen zwei Dekaden in vielen Regionen eine statistisch signifikante Abnahme des Wasserdargebotes stattgefunden, wobei diese Abnahme regional unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Der Rückgang des Dargebots hat seine Ursachen einerseits in der natürlichen Klimavariabilität, andererseits werden mittlerweile die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf den Wasserhaushalt sichtbar, welcher durch leicht veränderte saisonale Niederschlagsmuster, erhöhte Lufttemperaturen und damit einem veränderten Verdunstungsniveau wirksam wird. Letztendlich ist die Überlagerung von natürlicher Klimavariabilität und anthropogenem Klimawandel für die als sehr stark ausgeprägt wahrgenommene Trockenheit und damit einhergehende Reduzierung des Dargebotes in der vergangenen Dekade verantwortlich. Die Wasserbewirtschaftung ist teilweise bereits in eine Phase der Anpassung an veränderte klimatische und hydrologische Rahmenbedingungen eingetreten. Dies wird beispielsweise in der Empfehlung deutlich, zusätzlich oder als Alternative zu langjährigen Mittelwerten ein

“Trockenwetterdargebot” in wasserrechtlichen Bewirtschaftungsentscheidungen einzubeziehen (vgl. Fliß et al., 2021).

- ▶ **Wasserknappheit ist ein vielschichtiges Problem.** Wasserknappheit war in der Vergangenheit (vor der Jahrtausendwende) in Deutschland ein lokal oder kleinregional sowie ein zeitlich begrenzt auftretendes Phänomen, welchem durch langfristige wasserwirtschaftliche Planung auf dem „Stand des Wissens und der Technik“ sehr erfolgreich vorgebeugt wurde. Knappheit kann einerseits einen strukturellen Charakter haben, z. B. ein hoher langfristiger Wassernutzungsindex in einer Region, der eine Verteilung der Ressource Wasser aufwendig und konfliktreich machen kann. Andererseits kann Knappheit auch nur temporär auftreten, z. B. aufgrund reduzierter Quellschüttungen in einem sehr niederschlagsarmen Sommer, der dann durch geeignete Vorplanungen und Sofortmaßnahmen begegnet werden muss. Insgesamt kann Wasserknappheit in Deutschland viele unterschiedliche Ursachen haben, wobei meist nicht nur ein Aspekt für regional auftretende „echte Knappheit“, also eines nicht nur vorübergehend reduzierten Wasserdargebots, verantwortlich ist. Die Ursachen für Wasserknappheit in verschiedenen Regionen Deutschlands umfassen klimatische Bedingungen mit geringem Wasserdargebot, Wasserqualitätsprobleme wie Nitratbelastung, Einflüsse durch Bergbau, hohe Wasserentnahmen für Landwirtschaft und hohe Bedarfe in Metropolregionen. Es wurden bereits regionspezifische Maßnahmen ergriffen, um Wasserknappheit vorzubeugen, wie bspw. die Einrichtung von Fernwasserleitungssystemen und Limitierungen für Wasserentnahmen. Allerdings haben die anhaltende Trockenheit in der letzten Dekade und die Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Wassernutzung und Klimavariabilität offengelegt, dass diese Maßnahmen möglicherweise nicht ausreichen, um strukturelle oder temporäre Wasserknappheit zu bewältigen. Die zukünftige Wasserknappheit wird als komplexes Problem erkannt, das aufgrund der Unsicherheiten schwer zu prognostizieren ist.

5.2.2 Herausforderungen

- ▶ **Die Wasserbewirtschaftung muss neue erweiterte Planungsgrundlagen in ihre Prozesse integrieren.** Aktuell basieren Infrastrukturentscheidungen auf langjährigen Mittelwerten des Wasserdargebots aus der Vergangenheit und dem prognostizierten Wasserbedarf eines Untersuchungsraumes. Für eine angemessene wasserwirtschaftliche Planung müssen komplexe Ergebnisse aus Modell- und Szenarien-Rechnungen auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen berücksichtigt werden. Die Ergebnisse sollten alle potenziellen Komponenten des Wasserhaushalts, wie Wasserdargebot, Wasserspeicherung und Wassernutzung, angemessen abbilden. Eine verantwortungsbewusste Planung erfordert neben rechtlichen und ingenieurtechnischen Aspekten auch den Einsatz wissenschaftlicher Datenanalysemethoden bei der Entwicklung von Konzepten für die Wasserwirtschaft. Umfangreiche Datensätze, die für diese Zwecke erforderlich sind, sollten von öffentlicher Seite bereitgestellt werden.
- ▶ **Die Datenbasis zum anthropogenen Einfluss auf den Wasserhaushalt entspricht nicht den Erfordernissen.** Obwohl in den vergangenen Dekaden schon große Fortschritte bei der Erfassung und Bereitstellung vielfältiger Daten zum menschlichen Einfluss auf den Wasserhaushalt gemacht wurden, müssen diese Datenbestände besser strukturiert, häufiger aktualisiert und räumlich höher aufgelöst geo-referenziert werden. Nur dadurch wird eine realistische Bewertung des Einflusses einzelner Akteure auf den Wasserhaushalt und eine gerechte Verteilung von Wasserressourcen überhaupt erst möglich. Die derzeitigen datenschutzrechtlichen Regelungen stehen diesen Anforderungen häufig diametral gegenüber.

- ▶ **Die Erfassungs- und Bereitstellungspraxis von statistischen Daten zur Wassergewinnung und -nutzung ist nicht mehr zeitgemäß.** Um die Nachhaltigkeit der Wassernutzung regional oder lokal realistisch einzuschätzen, müssen zuverlässige und räumlich genau verteilte Daten erfasst und zugänglich gemacht werden. Dies umfasst Informationen zu Gewinnung, Transfer, Endnutzung, Verschmutzung und Verbleib des Wassers. Nur anhand solcher Daten kann einer nachteiligen Bewertung einzelner Verwaltungseinheiten vorgebeugt werden. In kleineren geographischen Raumeinheiten müssen lokale Wasserströme genauer erfasst werden. Zudem muss die zeitliche Erfassung statistischer Daten zur Wassergewinnung und -nutzung häufiger als alle drei Jahre erfolgen, da sonst die Erfassung eines Trockenjahres ausbleiben kann. Obwohl eine konsistente raumzeitlich hoch aufgelöste Datenbasis zur Wassernutzung (Wasserrechte und tatsächliche Nutzung) in einigen Bundesländern vorhanden oder zumindest im Aufbau ist, gibt es jedoch keinen gesetzlichen Rahmen zur vollumfänglichen Publikation dieser Datenbestände (teilweise nichtöffentliche Daten). Ein weiteres Beispiel sind die Wassertransfers zwischen administrativen Einheiten über die deutschen Fernwassernetze. Die Daten zu den potenziell möglichen und tatsächlich transportierten Wassermengen müssen verfügbar sein, um die Wassertransportbilanz zwischen den Gewinnungs- und Nutzungsgebieten korrekt zu ermitteln. Es ist wichtig, flächendeckende Daten zum Wasserverbrauch und zur Wassernutzung transparent und öffentlich zugänglich zu machen. Eine einheitliche Aufbereitung der Daten zwischen den Landesämtern und dem Statistischen Bundesamt (Destatis) wäre wünschenswert, um dem Umweltinformationsgesetz gerecht zu werden.
- ▶ **Natur und Landschaft als Wassernutzerinnen bisher nicht in die Gesamtrechnung einbezogen.** Das Schutzgut "Natur und Landschaft" ist bisher als Wassernutzer mit berechtigtem Interesse in der statistischen Betrachtung des Wasserbedarfs in Deutschland vernachlässigt worden. Natürliche Ökosysteme müssen nicht nur in der Kommunikation, sondern auch in der wasserwirtschaftlichen Gesamtbetrachtung eine stärkere Rolle einnehmen. Wasserbilanzdefizite im Grundwasser aufgrund klimatischer Einflussfaktoren und nicht-nachhaltiger Entnahmepraxis können sich über mehrere Dekaden aufbauen und erst mit Verzögerung in grundwasserabhängigen Ökosystemen relevant werden.
- ▶ **Vergleichende Untersuchungen skalenübergreifend durchführen.** Für den lokalen Wasserhaushalt haben kleinräumige Klimavariationen und die räumliche Heterogenität von Standorteigenschaften (Böden, Geologie etc.) einen wichtigen Einfluss, der adäquat berücksichtigt werden muss. Hinsichtlich solcher Standorteigenschaften zeigt sich für Deutschland ein stark heterogenes Bild. Landesweite Modelle und Modell-Ensembles können einen Referenzrahmen bilden, in dem lokale Detailstudien bewertet werden, sie können diese jedoch nicht vollumfänglich ersetzen. Umgekehrt ist die Übertragung von Schlussfolgerungen aus vorhandenen lokalen oder regionalen Studien auf die Landesebene nur bedingt möglich.
- ▶ **Regionalspezifische Analysen zur Ausprägung temporärer oder struktureller Wasserknappheit fehlten bisher und sind entsprechend nicht in Planungsprozessen berücksichtigt.** In diesem Zusammenhang müssen auch Unsicherheitsanalysen durchgeführt werden, für die jedoch vielfach erst eine geeignete Datenbasis geschaffen werden muss. Solche Studien müssen dann Eingang in Wasserversorgungskonzepte finden.
- ▶ **Gefahren und Risiken für Wasserressourcen bisher kaum greifbar.** Gefahren für ein Schutzgut mit direkter oder indirekter Verbindung zu Wasserressourcen können aus der Häufigkeit und Intensität von länger anhaltender meteorologischer Trockenheit resultieren. Bspw. können Wasserstände in verkarsteten Grundwasserleitern während längerer Dürreperioden bis auf ein Niveau absinken, das sich ggf. unterhalb der Wasserfassungen befindet, aus

denen ein kleiner lokaler Wasserbedarf gedeckt wird. Demgegenüber beschreibt das Risiko den potenziellen wirtschaftlichen Schaden, der sich langfristig aus verschiedenen Gefahren mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit akkumulieren kann. Die Identifizierung einzelner Gefahren ist meist einfacher als die Bestimmung des generellen Risikos aufgrund zunehmender Trockenheit. Für eine realistische Abschätzung von Risiken muss zukünftig eine verbesserte Datenbasis geschaffen werden bspw. durch die Integration von Wasserqualitätsaspekten (Stoffeinträge, Verschmutzungen etc.) in die Modellierungen zum Wasserhaushalt (Dargebot und Nutzung).

- ▶ **Kontinuierliche jährliche Fortschreibung regionaler Wassergewinnungsindizes im Rahmen eines deutschlandweiten Monitors implementieren.** Qualitativ hochwertige hydrologische Modelle als Voraussetzung für die kontinuierliche Berechnung des Wasserdargebotes sind in Deutschland vorhanden. Wenn zukünftig die Datenbasis zur Wassernutzung und –gewinnung jährlich verfügbar wird, dann können auch jährlich die Nachhaltigkeit der Wassernutzung in Deutschland regional abgebildet und Fortschritte objektiv bewertet werden.

5.2.3 Weiterer Forschungsbedarf

- ▶ **Sektorenübergreifende Zielkonflikte, z. B. zwischen Grundwasserbewirtschaftung und Naturschutz, in wissenschaftlichen Studien stärker adressieren.** Dies muss zukünftig stärker in den Fokus des "Studiendesigns" rücken, da durch erforderliche Maßnahmen Synergieeffekte hervorgerufen werden können (z. B. Maßnahmen zur Erhöhung des Wasserrückhalts in der Fläche, die gleichzeitig für den Hochwasserschutz und das Wasserdargebot in Trockenzeiten wirksam sind).
- ▶ **Bundeseinheitliche Methodik zur Bestimmung des regional nutzbaren Grundwasserdargebotes entwickeln und durch regionsspezifische Fallstudien untermauern.** Analysen zum Grundwasserdargebot müssen immer auch mit strengem Bezug auf die lokalen Gebietskulissen, z. B. Gegebenheiten im Einzugsbereich der Wasserfassungen durchgeführt werden. Für strategische Planungen muss jedoch auch das zeitlich variable nutzbare Grundwasserdargebot auf der regionalen Skala adäquat untersucht werden und dafür bedarf es einer einheitlichen Methodik. Diese Methodik muss auch verstärkt die Aspekte der Wasserqualität und des ökologischen Mindestabflusses in Fließgewässern berücksichtigen.
- ▶ **Langfristige Betrachtungen des Grundwasserdargebots für regionale und überregionale Grundwasserkörper durchführen.** In Analysen zum langfristigen nutzbaren Grundwasserdargebot sollten auch tiefe nicht-fossile Grundwasserleiter berücksichtigt werden, wenn in ihnen gegenwärtig Grundwasserneubildung stattfindet. Es müssten dazu großräumige Grundwassermodelle aufgebaut werden, die für die Lockergesteinsbereiche Deutschlands über alle nutzbaren Grundwasserstockwerke qualitativ und quantitativ den Wasserresourcenstatus abbilden.
- ▶ **Lokal differenzierte Simulationen der Wassernutzung durchführen.** Die lokal differenzierte Simulation der Wassernutzung aufgegliedert in verschiedene Sektoren ist ein Themenfeld, das zukünftig prioritär beforscht werden sollte. Dabei sollte auch der Aspekt Wasserqualität in zukünftigen Analysen des Wasserdargebotes eine stärkere Berücksichtigung finden, da Wasserknappheit auch durch Probleme mit der Wasserqualität hervorgerufen werden kann.

5.3 Klimawandel und Szenarien der Wasserverfügbarkeit und -nutzung in Deutschland

5.3.1 Erkenntnisse aus WADKlim

- ▶ **Grundwassermodellierung zeigt Wirkung von längeren Trockenperioden auf.** Auch zukünftig werden längere Trockenperioden zu Rückgängen im unterirdischen Wasserspeicher führen. Diese können mindestens so stark ausgeprägt vorkommen wie in der Gegenwart. Langjährige Trends zur Abnahme kehren sich jedoch nach ein bis zwei Dekaden um und führen meist innerhalb einer Dekade wieder in die Nähe des Referenzniveaus aus der Vergangenheit (1971-2000).
- ▶ **Der zukünftige Nutzungsdruck auf Wasserressourcen aus der Landwirtschaft (für Bewässerung) ist im Rahmen der Studie erstmals für ganz Deutschland in mehreren Szenarien dargestellt worden.** Zukünftig wird im langjährigen Mittel in vielen Regionen und insbesondere in Trockenperioden das nutzbare Grundwasserdargebot und die Priorisierung der öffentlichen Wasserversorgung die Grundwassernutzung für die Bewässerung limitieren.
- ▶ **Mit dem in WADKlim verwendeten Modellensemble kann der Wasserhaushalt und damit das Wasserdargebot in Deutschland simuliert und in die Zukunft projiziert werden.** Auf Basis der entwickelten Indikatoren können Regionen mit derzeit oder zukünftig nicht-nachhaltiger (Grund-) Wasserbewirtschaftung identifiziert werden. In Verbindung mit Wassernutzungsdaten (Statistik und Szenarien) können Nutzungsindizes berechnet werden, wobei die weiterhin bestehenden Unsicherheiten hauptsächlich auf die Datenlage zur Wassernutzung zurückzuführen sind.

5.3.2 Herausforderungen

- ▶ **Pfadabhängigkeiten bei der Maßnahmenauswahl beachten.** Die Auswahl geeigneter Anpassungsmaßnahmen muss sich an den mittelfristigen (z. B. bis 2050) Bedarfen orientieren. Gleichzeitig müssen die Maßnahmen aber so skalierbar sein, dass sie auch längerfristige Entwicklungen (bis 2100) abbilden oder zumindest keine negativen Pfadabhängigkeiten schaffen
- ▶ **Neue Strategien für die Ausweisung von Wasserschutzgebieten.** Die Ausweisung von Wasserschutzgebieten sollte die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserdargebot und Wasserqualität sowie mögliche Änderungen der Wassernutzung berücksichtigen. Dies beinhaltet die Durchführung von Detailstudien zu Wassernutzungsindizes für größere Regionen, die das jeweilige Wasserschutzgebiet umschließen.
- ▶ **Systematische Aufbereitung von Bestandsdaten und Schließung von Datenlücken.** Um belastbare Prognosen für Deutschland zu entwickeln, sind eine einheitliche Datenerhebung und Datenaufbereitung über verschiedene Gebietskulissen hinweg notwendig.

5.3.3 Weiterer Forschungsbedarf

- ▶ **Erhaltung von Kultur- und Naturlandschaften unter Wassermangel.** Wie der Waldzustandsbericht 2022 (BMEL 2023) zeigt, können wir uns zukünftig nicht uneingeschränkt auf die ökosystemare Resilienz von Natur und Landschaft verlassen. Eine offene Frage ist auch, wie der zusätzliche Wasserbedarf für die vom Aktionsplan Natürlicher Klimaschutz (ANK) angedachten Maßnahmen gedeckt werden soll.
- ▶ **Klimamodelle mit hydrologischen Modellen enger koppeln.** Klimamodelle können aufgrund der Limitierungen in der räumlichen Auflösung viele hydrologische Prozesse nicht adäquat abbilden, so wie es durch hydrologische Modelle aufgrund der höheren Auflösung möglich ist. Deswegen sind auch Rückkopplungseffekte, z. B. über den Grund- und Bodengewässerspeicher sowie die Verdunstung, bisher nicht kleinräumig abbildbar. Neue Modellgenerationen sollen solche Problemstellungen adressieren.
- ▶ **Ökonomische Aspekte der Bewässerungslandwirtschaft in großräumigen Studien zum Bewässerungsbedarf berücksichtigen.** Neben einem erhöhten theoretischen Bewässerungsbedarf wird für die Zukunft auch ein Wachstum der für eine Bewässerung ausgestatteten Flächen erwartet. Dieses Wachstum unterliegt ökonomischen Randbedingungen und muss zukünftig für belastbare Projektionen adäquat abgebildet werden. Dies kann durch Kombination von Wasserhaushaltsmodellen zur Berechnungssteuerung (Wasserverfügbarkeit und Bedarfsanalyse) und Agenten-basierten Modellen (Allokation der Wassermengen auf Flächen) realisiert werden.
- ▶ **Deutschlandweite Potenzialkarten zur Optimierung von Anpassungsmaßnahmen entwickeln.** Viele hydrologische Größen sind abhängig von Vegetation oder künstlicher Versiegelung der Erdoberfläche. Beide Faktoren und die hydrologischen Größen unterliegen langfristigen Veränderungen. Deshalb wird versucht, über Anpassungsmaßnahmen eine positive Beeinflussung auf das Wasserdargebot zu erwirken. Beispielsweise wird als ein positiver Aspekt des Waldumbaus die Gewinnung zusätzlicher Grundwasserneubildung angestrebt. Es sind dafür jedoch nicht alle Flächen aufgrund der lokalen Standortcharakteristiken gleichermaßen geeignet. Eine deutschlandweite Potenzialkarte zur Veränderung der Grundwasserneubildung durch Waldumbau würde diese Anpassungsmaßnahme besser (gezielter) förderbar machen.

5.4 Mögliche wasserbezogene Nutzungskonflikte

Wassernutzungskonflikte können unter anderem dann entstehen, wenn das Wasserdargebot in einer bestimmten Region zeitweilig oder dauerhaft nicht in benötigter Menge oder Qualität verfügbar ist und zudem zwischen den Akteuren Uneinigkeit über die Verteilung der knappen Ressource besteht. Diese Konflikte können innerhalb oder zwischen den Sektoren verlaufen.

5.4.1 Erkenntnisse aus WADKlim

- ▶ **Involvierte Akteure in Deutschland:** Die Ergebnisse einer Medienanalyse machen deutlich, dass die Bandbreite der von Wassernutzungskonflikten betroffenen Akteure in Deutschland groß ist. In den trockenen Jahren 2018 bis 2020 sowie 2022 waren die Sektoren Industrie, Landwirtschaft, Ökosysteme, Privatverbraucher*innen, Schifffahrt und Wasserversorgungsunternehmen in Nutzungskonflikten involviert.

- ▶ **Nutzungskonflikte aufgrund unzureichender Quantität von Oberflächen- und Grundwasser:** Im Jahr 2022 wurden zahlreiche Nutzungskonflikte aufgrund unzureichender Quantität von Oberflächen- und Grundwasser berichtet. Beim Oberflächenwasser äußert sich dies bspw. in der Form von Niedrigwasser oder ausgetrockneten Bächen und Flüssen, beim Grundwasser in der Form von sinkenden Grundwasserspiegeln und abnehmenden Quellschüttungen. In der Medienanalyse wurden keine Nutzungskonflikte aufgrund unzureichender Wasserqualität identifiziert.
- ▶ **Ursachen von Nutzungskonflikten in Zusammenhang mit einem reduzierten Wasserdargebot.** Die Auswirkungen des Klimawandels gehen mit einer deutlichen Zunahme von Klimaextremen einher. Zum einen durch häufigeres Auftreten von Starkregenereignissen und daraus resultierendem höheren Oberflächenabfluss, zum anderen durch steigende Temperaturen mit mehr Sommer- und Hitzetagen, einem höheren Verdunstungspotenzial sowie ausbleibende Niederschläge, die zu Trockenheit und Dürre führen. Daraus resultieren vielerorts eine verminderte Grundwasserneubildung sowie ein häufigeres Auftreten von Niedrigwasser im Sommerhalbjahr.
- ▶ **Nutzungskonflikte werden seit 2018 deutlich häufiger in den Medien berichtet.** Bisherige Maßnahmen zur Konfliktreduzierung bestehen meist aus Apellen zum Wassersparen, Verboten von Wasserentnahmen aus Oberflächengewässern sowie von Bewässerung und ggf. einer Trinkwasser-Ersatzversorgung per Tankwagen. Seit 2018 ist das mediale Interesse an der Thematik Wassernutzungskonflikte deutlich gestiegen, was auch zu einer höheren Sensibilität in der Bevölkerung führt.

5.4.2 Herausforderungen

- ▶ Die **Priorisierungsfrage ist für Wassermangelsituationen** zu stellen, wenn die Verfügbarkeiten der Wasserressourcen nicht für alle Akteure entsprechend der Bedarfe gegeben ist. Die öffentliche Wasserversorgung ist im Wasserhaushaltsgesetz als Aufgabe der Daseinsvorsorge definiert. Die Priorisierung der Wassernutzung ist ein zentraler Aspekt bei der Verteilung knapper Wasserressourcen und sollte daher in die WVK integriert werden. Bislang stellt dies für die Verantwortungsträger eine Herausforderung dar, da die Mehrheit der WVK keine konkreten Angaben zur Priorisierung enthalten.

5.4.3 Weiterer Forschungsbedarf

- ▶ **Weiterentwicklung regionaler sektorübergreifender Risikobewertungen.** Der jetzige und zukünftige Zustand der Wasserressourcen kann nur regional sinnvoll bewertet werden. Wassernutzungskonflikte werden weiterhin einen stark regionalen und intersektoralen Charakter aufweisen. Die Einbeziehung regionaler Akteure in eine regional angepasste Maßnahmenumsetzung ist daher essenziell, um den komplexen intersektoralen Herausforderungen gerecht zu werden.
- ▶ **Bilanzierung überregionaler Wassertransfers.** Je nach Perspektive und Fokus der Untersuchung müssen zukünftig auch Wassertransfers über Gebietsgrenzen hinweg bilanziert und berücksichtigt werden. Dazu sind erste Schritte zur Integration von Fernversorgungsnetzen in die Analysen erfolgt. Die vollständige Integration von Fernversorgungsnetzen benötigt jedoch Daten, die derzeit nicht zugänglich sind.

- ▶ **Erfassung und Verifizierung von Wassernutzungskonflikten.** Im Rahmen dieser Studie wurde eine Medienrecherche durchgeführt, da wissenschaftliche Studien noch ausstehen. Hier sollte ein besseres Verständnis der Prozesse und des Akteurverhaltens in Konfliktsituationen entstehen.

5.5 Lösungsansätze für Wassernutzungskonflikte in Deutschland

5.5.1 Erkenntnisse aus WADKlim

- ▶ **Möglichkeiten einer zeitlich variablen Intervention durch Maßnahmen nutzen.** Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von Wassernutzungskonflikten weisen eine breite Palette an Interventionslogiken und -ansätzen auf. Wo Planungs- und Vorsorgemaßnahmen i. d. R. noch vor dem Entstehen von Nutzungskonflikten greifen, gibt es auch Maßnahmen, die erst in einem konkreten Konfliktfall zur Anwendung kommen sollen.
- ▶ **Initiativen für akute Konfliktsituationen initiieren.** In den letzten Jahren wurden in Deutschland zahlreiche Initiativen ergriffen, die die Grundlagen eines modernen und nachhaltigen Wassermanagements schaffen und dadurch positive Effekte auf die Resilienz des Wasserdargebots ausüben (u.a. NWS, DAS, zahlreiche Wasserversorgungskonzepte von Ländern, Landkreisen und Kommunen). Die Analyse zeigt allerdings, dass sie primär auf die zukünftige Versorgungssicherheit abzielen und kaum Empfehlungen für akute Konfliktsituationen enthalten. Es bedarf zusätzlicher Maßnahmen zur Lösung von Konfliktsituationen. Die Nationale Wasserstrategie spricht sich für eine bundesweit abgestimmte Leitlinie aus, die „Regeln und Kriterien für eine transparente Entscheidungsfindung durch die zuständigen Stellen in Knappheitssituationen hinsichtlich deren Priorisierung enthält“.
- ▶ **Vielfältige Interventionsansätze zur Vermeidung von Wassernutzungskonflikten in allen Sektoren stehen zur Verfügung.** Der in WADKlim erarbeitete Maßnahmenkatalog zeigt eine breite Palette von Interventionsmöglichkeiten für alle Sektoren auf, die von technischen und naturbasierten Maßnahmen, über Maßnahmen, welche die Wissensbasis erweitern und die Kommunikation fördern bis zu planerischen Maßnahmen reichen.
- ▶ **Die Möglichkeiten des Portfolios insbesondere an politischen Maßnahmen zur Konfliktlösung werden bisher nicht ausgeschöpft.** Der erarbeitete Maßnahmenkatalog zeigt, dass eine große Bandbreite von Maßnahmen vorliegt, um mit Trockenheit und Dürre umzugehen. Bisher werden diese Handlungsoptionen in Deutschland noch nicht in ausreichendem Maße aufgegriffen.
- ▶ **Wichtige Maßnahmen, die das Potenzial haben, Nutzungskonflikte zu mindern,** sind: Wassersparmaßnahmen, Wasserversorgungskonzepte, Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche und die Einrichtung von Wasserbeiräten. Auch die Wasserwiederverwendung von Abwasser im urbanen Raum kann im Einzelfall Nutzungskonflikte abmildern, allerdings kann dieses Potenzial noch nicht exakt quantifiziert werden.

5.5.2 Herausforderungen

- ▶ Eine **Kernherausforderung besteht in der derzeitigen Datengrundlage zu Wasserrechten und Wassernutzungen**. Es ist dringend erforderlich, Wasserrechte und Wasserentnahmen in Deutschland systematischer zu erfassen, einschließlich der Herkunft und Menge des entnommenen Wassers. Bisher werden Wasserentnahmen, wenn überhaupt, nur dort erfasst, wo es eine Gebühr für die Wasserentnahme gibt. Eine indirekte Schätzung der Wasserentnahmen ist zwar über die vergebenen Wasserrechte möglich, es ist aber schwierig, daraus die tatsächlichen Wassermengen abzuleiten. Auch die punktgenaue Erfassung der Einleitungen des genutzten Wassers in die Oberflächengewässer, um Einblick in den tatsächlichen Wasserverbrauch zu erhalten, wäre sinnvoll.
- ▶ **Das bestehende Portfolio an politischen Maßnahmen zur Konfliktlösung ist bisher ungenügend, das Potenzial wird nicht ausgeschöpft**. Gleichzeitig braucht es regionale Prioritätensetzung zur gerechten Wasserverteilung.
- ▶ **Es fehlen relevante rechtliche Rahmenbedingungen** u.a. zur Institutionalisierung von Wasserbeiräten und zur Nutzungspriorisierung im Konfliktfall.
- ▶ **Überregionale Kommunikation**. Eine stärkere Harmonisierung und Austausch von regionalen und lokalen Ansätzen, u.a. um Anschlussfähigkeit, sowie regionale und überregionale Zusammenarbeit zu ermöglichen, ist wünschenswert.

5.5.3 Weiterer Forschungsbedarf

- ▶ **Rechtliche Verankerung von Wasserbeiräten und Definition der Aufgabenbereiche**. Es ist ein Rechtsgutachten zur Einbettung des Politikinstrumentes ins bestehende Recht in Auftrag zu geben.
- ▶ **Rechtliche Verankerung einer bundesweit abgestimmten Leitlinie mit Regeln und Kriterien für eine transparente Priorisierungsentscheidung bei Wasserknappheit**. Grundsätzlich priorisiert das WHG die öffentliche Wasserversorgung, aber es bedarf einer weiteren Konkretisierung, welche Nutzungen zukünftig in Wassermangelsituationen zu reduzieren und ggf. zu untersagen sind.
- ▶ **Prüfung von Akzeptanz, Wirksamkeit, Kosten und Umsetzbarkeit der verschiedenen Lösungsansätze zur Bewältigung von Nutzungskonflikten**. Vor allem bei technischen und naturbasierten Maßnahmen ist zu prüfen, wie diese sozialverträglich implementiert werden können.
- ▶ **Findung kohärenter Policy Mixes**. Viele der genannten Lösungsansätze zum Umgang mit Wassernutzungskonflikten sollten möglichst in Kombination und synergetisch umgesetzt werden. Dies betrifft u.a. Governance-Maßnahmen zusammen mit technischen oder Management-Maßnahmen, aber z. B. auch planerische und kommunikative Maßnahmen.

5.6 Beispielhafte Ansätze zur Minderung von Wasserknappheit und Dürre in Deutschland

5.6.1 Wasserwiederverwendung im urbanen Raum

5.6.1.1 Erkenntnisse aus WADKlim

- ▶ **Technologien zur Aufbereitung von Wasser zur Wiederverwendung werden international angewandt.** Die Bewässerung von Grünflächen im urbanen Raum mit aufbereitetem Wasser ist technisch möglich und wird international praktiziert. Weltweit findet sich häufig eine Kombination aus einer standardgemäßen 3-stufigen Klärung und einer zusätzlichen Sandfiltration und Desinfektion zur Aufbereitung urbaner Abwässer für die Wiederverwendung. Eine sichere Wasserwiederverwendung beinhaltet immer eine zusätzliche Aufbereitung mit entsprechenden Kosten.
- ▶ **Der Bewässerungsbedarf im urbanen Raum würde in Deutschland bestehen, ebenfalls gibt es Synergien mit aktuellen Prozessen.** Wären alle urbanen Flächen über die gesamte Vegetationsperiode zu bewässern, wird der maximale Bewässerungsbedarf in Deutschland auf 1,8 Mio. m³/a geschätzt. Für eine genauere Ermittlung des Bewässerungsbedarfs fehlen Daten zu den urbanen Grünflächen. Es gäbe große Synergien mit der Einführung der 4. Reinigungsstufe zur Entfernung von Spurenstoffen, wenn sich der aktuelle Entwurf der novellierten EU-Kommunalabwasserrichtlinie durchsetzt. In diesem wird eine entsprechende Erweiterung für alle Kläranlagen ab 100.000 Einwohnerwerten bis 2035 gefordert, mit dem Ziel die Abwasserqualität zu verbessern.
- ▶ **Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft kann als Vorbild für urbane Wasserwiederverwendung genutzt werden.** Die Übertragbarkeit des Risikomanagementansatzes vom landwirtschaftlichen Anwendungsfall (vgl. EU-Verordnung zur Wasserwiederverwendung 2020/741) auf die Bewässerung des urbanen Grüns ist mit Anpassungen u.a. der Systemgrenzen und von Messparametern möglich. Grundsätzlich sollte die Wasserwiederverwendung an ein großes und engmaschiges Untersuchungsprogramm gekoppelt sein, Qualitätsziele sollten laufend überwacht werden.

5.6.1.2 Herausforderungen

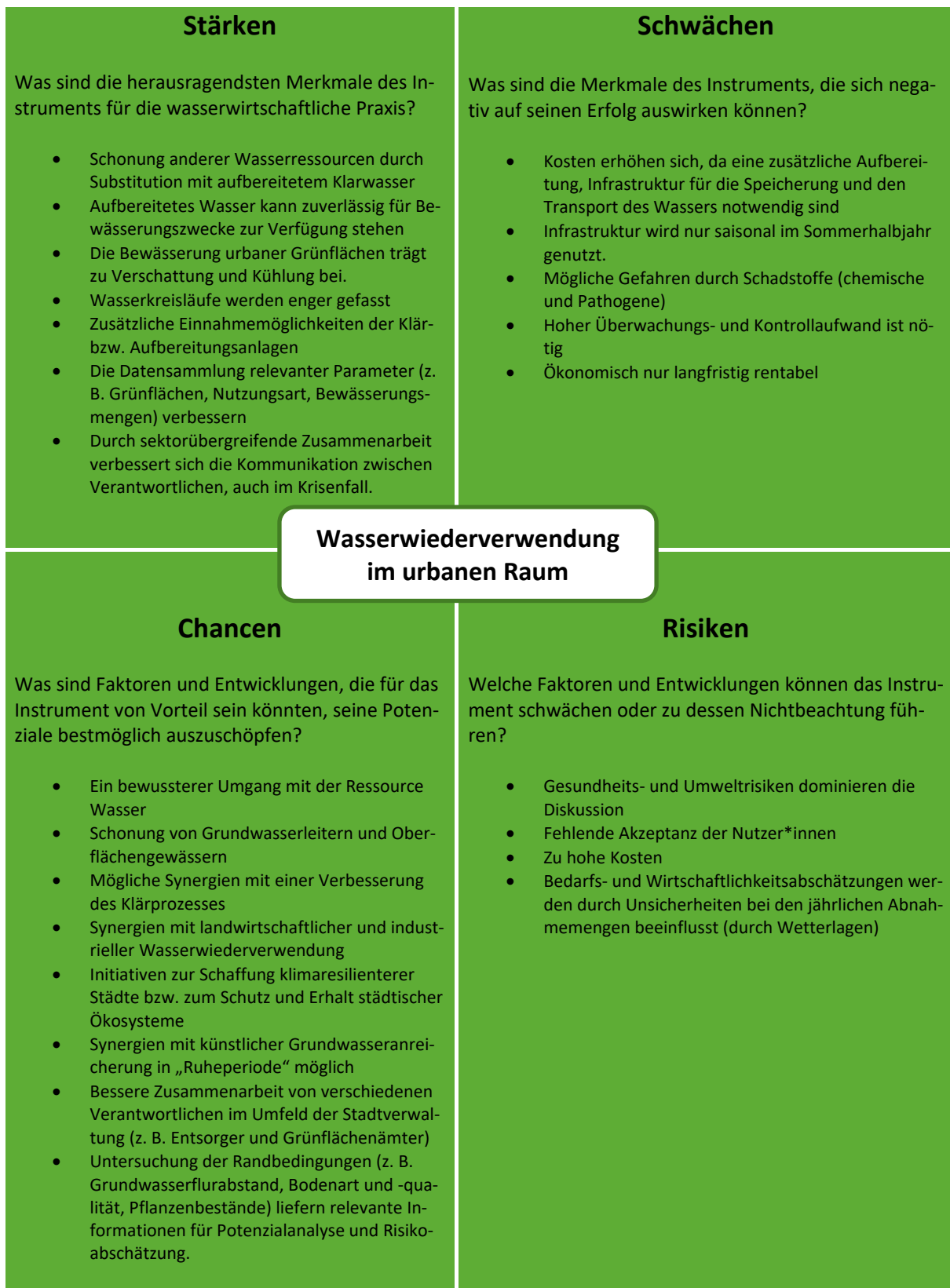
- ▶ **Es fehlen bislang lokale Bewässerungsbedarfsstudien und damit die Basis für Wirtschaftlichkeitsberechnungen.** Bewässerungsbedarfsstudien für den urbanen Raum, welche die lokale Bewässerungsmenge ermitteln und damit auch die Basis für eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit sind, liegen bisher in den meisten deutschen Kommunen nicht vor. Auch die fehlende Abschätzung des Nutzens der Maßnahme für den Gewässerschutz, Schutz von urbanem Grün, Stadtklima und Aspekte der Daseinsvorsorge erschwert die Abschätzung der Amortisationszeit der Investitionen.
- ▶ **Die Akzeptanz der Nutzer*innen spielen eine entscheidende Rolle bei der Initiierung von Wasserwiederverwendung.** Nur eine Kooperation von wasserwirtschaftlichen Unternehmen und interessierten Nutzer*innen, inklusive der Etablierung von langfristigen Abnahmeverträgen, kann den Bau von Aufbereitungsanlagen initiieren.

- ▶ **Komplexes Risikomanagement mit individuellen Risikoabschätzungen notwendig.** Herausforderungen für ein umfangreiches Risikomanagement inklusive Monitoring bestehen durch die Komplexität der Wasserwiederverwendung im urbanen Raum. Eine Risikoabschätzung ist immer anwendungsbezogen durchzuführen, da der Verschmutzungsgrad individuell und saisonal sehr unterschiedlich ausfallen kann bzw. die lokalen Randbedingungen, u.a. Lage und Nutzung der Grünflächen eine entscheidende Rolle spielen.

5.6.1.3 Weiterer Forschungsbedarf

- ▶ **Reallabore zur Wasserwiederverwendung unter verschiedenen Randbedingungen könnten weitere Informationen zu Abbauprozessen und Risiken liefern.** Eine engmaschige Begleitung von Wasserwiederverwendungsprojekten von urbanen Grünflächen inkl. Risikoermittlung (z. B. Versagen der Vorbehandlung, Transferraten von Pathogenen), eine Untersuchung der Wiederverkeimung im (Rohr-)Netz könnte aktuell laufende Forschungsaktivitäten ergänzen. Dabei könnten u.a. die Möglichkeiten und Kosten der nötigen Infrastruktur genauer untersucht werden.
- ▶ **Forschung bzgl. tatsächlicher Bewässerungsbedarfe und Bewässerungswürdigkeit im urbanen Raum ist notwendig.** Mögliche Vorteile für das Stadtklima durch Verschattung und Kühlung sollten dabei berücksichtigt werden. Der Einsatz von Bewässerungsverfahren zur bedarfsgerechten Bewässerung mit intelligenter Sensorik basierend auf Bodenfeuchte und Wetterdaten sollte dabei mit untersucht werden.
- ▶ **Die Erstellung von Potenzialanalysen zur Wasserwiederverwendung auf kommunaler Ebene könnte durch die Erarbeitung eines Praxisleitfadens und der Durchführung von vertieften Pilotstudien unterstützt werden.** Zurzeit fehlt oft die notwendige Datengrundlage zu städtischen Grünflächen, Nutzungsarten, temporär und lokal abhängigen Bewässerungssystemen, sowie zu tatsächlichen Bewässerungsmengen bzw. die Daten sind lückenhaft. Erst diese Informationen ermöglichen die Abschätzung der Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit.
- ▶ **Feldstudien könnten die Abschätzung der Folgen von Wasserwiederverwendung für Mensch und Umwelt untersuchen.** Es fehlt an Untersuchungen bezüglich möglicher Folgen der Wasserwiederverwendung im urbanen Raum auf Menschen und Umwelt. Diese sind zur Risikobetrachtung notwendig. Grenzwerte bzw. konkrete Empfehlungen bezüglich Pathogenen und Spurenstoffen müssen ermittelt werden und Daten zur Kontaktübertragung (Schmierinfektion) von Rasen- und Grünflächen müssen erhoben werden.
- ▶ **Ökobilanzen, Energiebedarfe sowie Kosten und Nutzen für die Aufbereitung und Infrastruktur sollten für verschiedene Anwendungsszenarien ermittelt werden.** Dabei sollte auch die Frage berücksichtigt werden, ab wann sich der Transport per LKW bzw. Netz lohnt.

Abbildung 91: SWOT-Analyse Wasserwiederverwendung im urbanen Raum



Quelle: eigene Darstellung, Ecologic Institut.

5.6.2 Wasserbeiräte

5.6.2.1 Erkenntnisse aus WADKlim

- ▶ **Wasserbeiräte sind in Deutschland bisher nicht einheitlich etabliert.** Bisher gibt es in Deutschland viele verschiedene Austauschgremien zur Diskussion von Wasserthemen auf lokaler und regionaler Ebene, aber keine einheitlich institutionalisierten. Existierende Beispiele zeigen, dass Netzwerkaufbau und Austausch zwischen verschiedenen Sektoren bereits ein relevanter Nutzen solcher Beiräte sind. Auf Landesebene werden kommunale Beiräte geplant und implementiert, z. B. in Brandenburg und Thüringen. Bedarf und Interesse an Informationen, Empfehlungen und praktischen Erfahrungen zur Einrichtung von Wasserbeiräten sind auf kommunaler Ebene vorhanden.

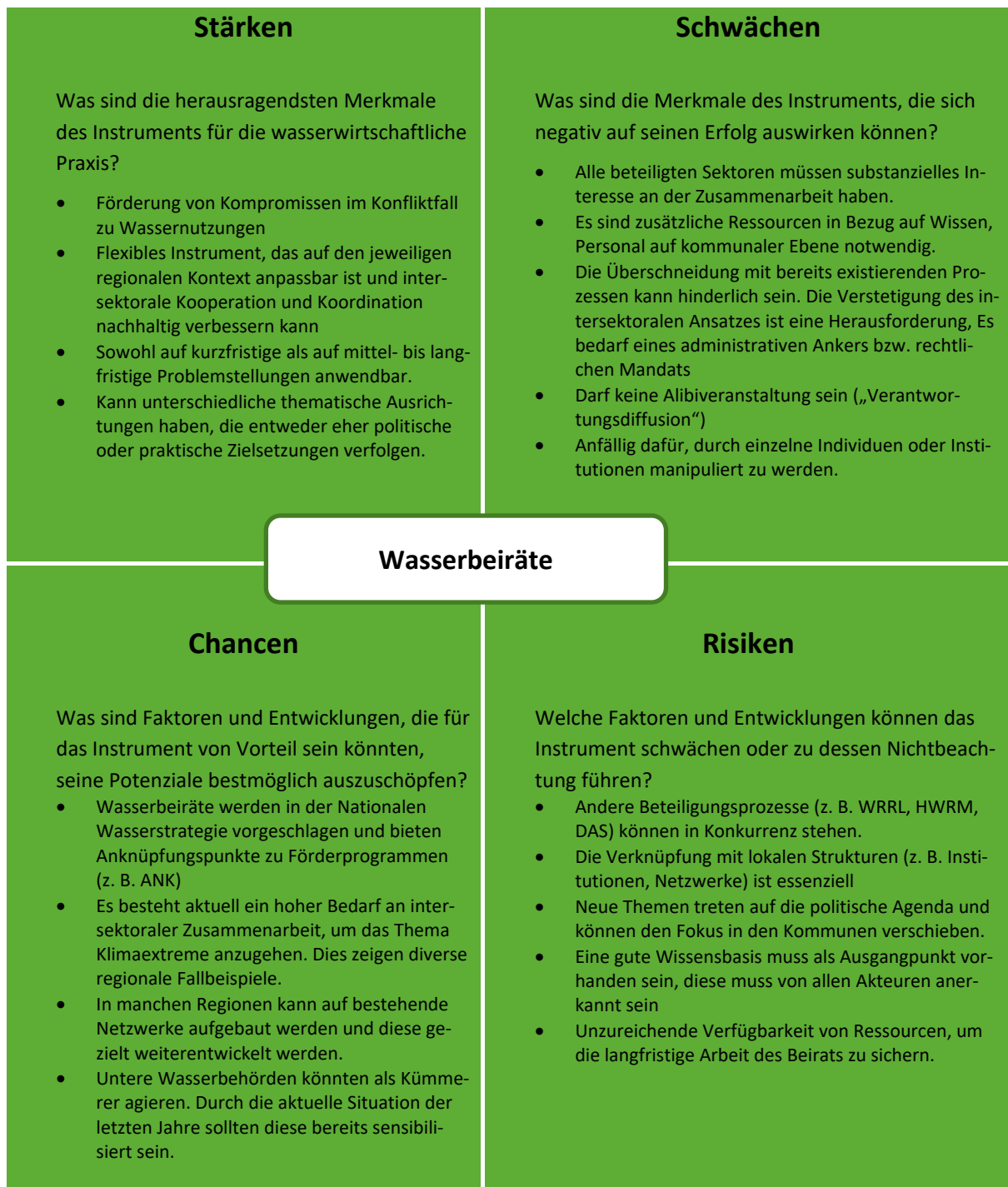
5.6.2.2 Herausforderungen

- ▶ **Zusätzlicher Arbeitsaufwand durch neue Wasserbeiräte.** Beiratsprozesse durch Akteure anzustoßen und zu pflegen ist aufwendig. Neben der Teilnahme ist es besonders aufwendig für den „Kümmerer“, welcher den Beirat koordiniert und organisiert.
- ▶ **Die richtige Besetzung zu finden ist wesentlich.** Ein breiter Ansatz mit der Einbeziehung von Akteur*innen aus allen lokal relevanten Sektoren ist anzustreben. Es sollte eine umfassende Analyse der relevanten Stakeholder erfolgen und Akteur*innen und Sektoren einbezogen werden, die ggfs. nicht in vergleichbaren Gremien vertreten sind. Die Gremien sollten zielorientiert mit den interessierten Akteur*innen arbeiten können.
- ▶ **Entscheidend ist die Verknüpfung von Beiratsprozessen auf Landesebene mit den bestehenden regionalen und lokalen Gremien.** Abhängig von der Region liegen bereits eine Reihe von Austauschgremien auf lokaler und regionaler Ebene vor, die sich mit Trockenheits- und Wasserthemen auseinandersetzen. Dies ist für Akteure ressourcenintensiv. Sofern Leitlinien zur Ausgestaltung von lokalen oder regionalen Wasserbeiräten von übergeordneten Ebenen vorgegeben werden, sollten diese eine gewisse Flexibilität bei der Ausgestaltung und Umsetzung lassen, um an bereits bestehende Gremien und Prozesse vor Ort sinnvoll anknüpfen zu können. Ziele und Aufgaben sollten für die Wasserbeiräte klar festgelegt werden.

5.6.2.3 Weiterer Forschungsbedarf

- ▶ **Untersuchung und Begleitung von Initiativen auf Landesebene.** In einer Reihe von Bundesländern entstehen gerade Initiativen zu Wasserbeiräten bzw. wird über eine Initiierung nachgedacht. Eine Unterstützung und Analyse dieser Initiativen über die nächsten Jahre wäre hilfreich, um Vorgaben und einen einheitlichen Ansatz für Deutschland zu entwickeln. Interessant wäre ebenfalls, Faktoren der erfolgreichen Verstetigung von Austauschgremien zu untersuchen.
- ▶ **Rechtliche Institutionalisierung von Wasserbeiräten.** Es bestehen verschiedene rechtliche Möglichkeiten, Wasserbeiräte zu verankern. Mit einem Fachgutachten könnten diese geprüft werden.
- ▶ **Entwicklung von Handlungsempfehlungen für Landesebene und kommunale Ebene zur konkreten Ausgestaltung von Wasserbeiräten.** Um Wasserbeiräte einheitlich einzuführen, sollten ein Leitfaden bzw. Handlungsempfehlungen entwickelt werden. Zur Unterstützung und Orientierung für die regionale Ebene sollten u.a. Ziele, Aufgaben und Verantwortlichkeiten konkretisiert werden.

Abbildung 92: SWOT-Analyse Wasserbeiräte



Quelle: eigene Darstellung, Ecologic Institut.

5.6.3 Wasserversorgungskonzepte (WVK)

5.6.3.1 Erkenntnisse aus WADKlim

- ▶ **Für fast alle Verwaltungseinheiten wie Bundesländer, Regierungsbezirke, Landkreise und kreisfreie Städte sind Beispiele für WVK verfügbar.** Das Ziel von Wasserversorgungskonzepten ist, die Wasserversorgung jetzt und in Zukunft zu sichern sowie die Nutzung lokaler Wasserressourcen (Grund- und Oberflächenwasser) nachhaltig zu gestalten und deren Übernutzung zu verhindern. Die öffentliche Zugänglichkeit der Wasserversorgungskonzepte ist bisher jedoch eingeschränkt, so dass keine abschließende Aussage über eine flächendeckende Entwicklung der Konzepte getätigt werden kann.
- ▶ **Bei der Beurteilung der Versorgungssicherheit wird häufig eine Bilanzbetrachtung genutzt, in die das Wasserdargebot und die Wassernutzung einbezogen werden.** Hierbei werden neben der Ist-Situation auch die nahe (2030 bis 2050) und teilweise auch die ferne Zukunft (2100) bewertet. Die primär berücksichtigten Einflussfaktoren sind der Klimawandel und die demographische Entwicklung.
- ▶ **Die WVK enthalten vielfältige Maßnahmen.** Die Maßnahmen beruhen teilweise auf identischen Prinzipien (wie z. B. Maßnahmen zur Erhöhung der Wasserverfügbarkeit), unterscheiden sich aber teilweise auch stark voneinander.

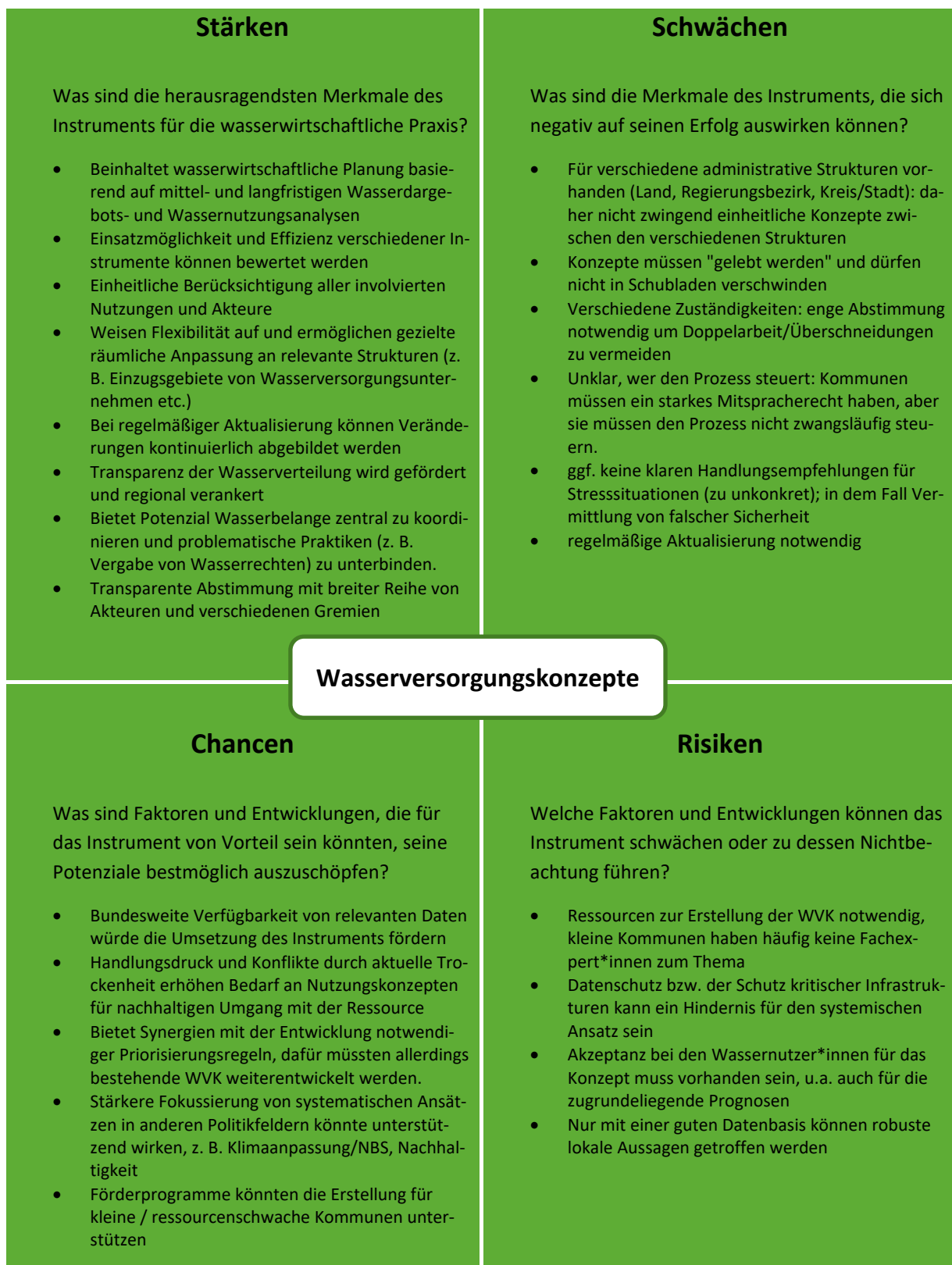
5.6.3.2 Herausforderungen

- ▶ **Die WVK sind in ihrem Aufbau und in ihren Methodiken teilweise sehr verschieden.** Um Ergebnisse länderübergreifend zusammenzuführen und die Länder bei der Entwicklung von WVK zu unterstützen, ist die Schaffung eines bundesweit einheitlichen Standards anzustreben (siehe auch Aktion 47 der Nationalen Wasserstrategie).
- ▶ **Zur Verbesserung der öffentlichen Zugänglichkeit der WVK sollte eine zentrale Anlaufstelle geschaffen werden,** in der diese deutschlandweit abrufbar sind. Dies könnte die Entwicklung von neuen WVK begünstigen, indem auf vorhandenes Wissen zurückgegriffen werden kann.
- ▶ **In vielen WVK wird auf Datenlücken hingewiesen, die zur Verbesserung der Analysen geschlossen werden müssen.** Zum einen soll eine bessere Datenbasis vor allem der zur Bewässerung eingesetzten Wassermengen geschaffen werden. Zum anderen sind für Prognosen zukünftiger Wassernutzungen sektor- und regionalspezifische Wassernutzungsdaten zu erheben. Die Daten sollten dabei behördenübergreifend verarbeitet und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden, um u.a. die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen von Wasserbehörden zu ermöglichen.
- ▶ **Bundesweit einheitlicher und transparenter Umgang mit Wassernutzungskonflikten fehlt bisher.** Konkrete Priorisierungen von Wassernutzungen im Dürrefall sind in wenigen Wasserversorgungskonzepten enthalten. Wenn Wassernutzungen hervorgehoben werden, bewegt sich dies auf einer sehr allgemeinen Ebene z. B. zum Vorrang der Trinkwasserversorgung.
- ▶ **Stärkere regionale Spezifizierung von Maßnahmen notwendig:** Häufig weisen die Maßnahmen der WVK einen eher allgemeinen und unkonkreten Charakter auf. Hier wäre für die Entscheidungsträger*innen vor Ort eine Anpassung auf die Gegebenheiten sowie eine genauere Aufschlüsselung der vorhandenen Probleme und deren Lösungsansätze hilfreich.

5.6.3.3 Weiterer Forschungsbedarf

- ▶ **Mindestanforderungen an Wasserversorgungskonzepte müssen definiert werden.** Ein bundeseinheitlicher Standard bzw. Mindestanforderungen an Wasserversorgungskonzepte sollen eine Rahmenkonzeption vorgeben, jedoch ausreichend Spielraum zur Anpassung an die Vielfältigkeit der Wasserversorgungssysteme einräumen, wie dies bspw. vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz in Nordrhein-Westfalen gemacht wird. Dabei sollte die Betrachtung nicht nur auf Ebene administrativer Strukturen, sondern auch auf hydrologischen Einheiten erfolgen. Eine Darstellung von Best-Practice Beispielen kann die Umsetzung ebenso unterstützen.
- ▶ **Entwicklung eines einheitlichen Ansatzes zur Priorisierung von Wassernutzungen.** Es ist zu diskutieren, wie eine regional zu treffende Priorisierungsentscheidung von Wasserressourcen ausgestaltet werden kann und inwieweit ein einheitlicher Ansatz einer Rangfolge angegeben werden kann. Wichtig ist, dass eine transparente und bundesweit einheitliche Vorgehensweise geschaffen wird, wie diese auch in der Nationalen Wasserstrategie gefordert wird.

Abbildung 93: SWOT-Analyse Wasserversorgungskonzepte



Quelle: eigene Darstellung, Ecologic Institut.

5.6.4 Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche

5.6.4.1 Erkenntnisse aus WADKlim

- ▶ **Es gibt eine Reihe an Maßnahmen in der Landwirtschaft, Wasserwirtschaft und Forstwirtschaft, die effektiv hinsichtlich Wasserrückhalt in der Fläche wirken.** Darunter auch solche, die kurzfristig wirken und mit geringen Kosten assoziiert sind.
- ▶ **Um den Landschaftswasserhaushalt zu stabilisieren, ist eine Kombination aus technischen und naturbasierten Ansätzen sowie Koordinationsinstrumenten notwendig.** Dabei ist insbesondere auf solche Maßnahmen zu setzen, die bezüglich beider Klimaextreme Hochwasser und Dürre wirksam sind. Dies umfasst u.a. konservierenden Bodenbearbeitung, intelligente und effiziente Entwässerungssysteme sowie Agroforst/Paludikultur in der Landwirtschaft; die weiträumige Renaturierung von Oberflächengewässern und wasserabhängiger Ökosysteme bzw. die Aufforstung auf Hangflächen und die flächendeckende Umsetzung einer naturnahen Waldwirtschaft. .
- ▶ **Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Landschaft haben eine Reihe von Nutzen.** Durch die Unterstützung der Wasserverfügbarkeit in Trockenperioden und der Abmilderung von Überschwemmungen können Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche die Resilienz von landwirtschaftlichen Produktionssystemen steigern und somit auch einen Beitrag zur Ernährungssicherheit leisten. Die Maßnahmen zum Wasserrückhalt wirken nicht nur ökosystemar, wie bspw. zur Verbesserung des Mikro- und Mesoklimas (Regional Cooling), sondern können unter Umständen auch die landwirtschaftliche Produktion steigern und bieten gesamtwirtschaftlich ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis.³⁹
- ▶ Gerade die flächenhafte Anwendung von **Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Landschaft** muss zukünftig durch Flächenzuweisung und Fördermaßnahmen gezielt unterstützt werden. Dabei sollten Synergien mit dem Europäischen Gesetz zur Wiederherstellung der Natur, dem ANK, sowie dem angedachten Natur-Flächen-Gesetz, aber auch den Planwerken nach Wasserrahmenrichtlinie und Flora-Fauna-Habitat Richtlinie (FFH-RL) genutzt werden.

5.6.4.2 Herausforderungen

- ▶ **Bei der Umsetzung der Maßnahmen treten oft Flächennutzungskonflikte auf.** Die meisten der Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche haben einen hohen Flächenbedarf und treten damit in Konkurrenz mit anderen Nutzungen, die Flächen benötigen, u.a. Ausweitung von Siedlungsfläche, industrielle oder touristische Entwicklungen. Dies kann zu (potenziellen) Konflikten führen, welche nur mit einem hohen Abstimmungsaufwand zu lösen bzw. zu vermeiden sind.
- ▶ **Ein Teil der Maßnahmen weist eine Lücke zwischen Umsetzung und Entfaltung der Wirkung auf.** Die Dauer von der Maßnahmenumsetzung bis zur Wirkung kann mitunter sehr unterschiedlich sein. Unter anderem Maßnahmen, wie Aufforstungen und naturnahe Waldwirtschaft, müssen frühzeitig initiiert werden, da die Wirkungen mit einer Verzögerung eintreten.

³⁹ u.a. https://environment.ec.europa.eu/publications/nature-restoration-law_en, Impact Assessment accompanying the proposal (Part 4 & 5)

5.6.4.3 Weiterer Forschungsbedarf

- ▶ **Multifunktionale Maßnahmen, die gleichzeitig bei Dürre wie bei Hochwasser helfen, sollten genauso systematisch erfasst werden.** Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche, aber auch andere Klimaanpassungsmaßnahmen in der Wasserwirtschaft bzw. nach Wasserrahmenrichtlinie sind auf ihre Wirkungen in Trockenheits- und Hochwassersituation systematisch aufzuarbeiten. Die Übersichten können als Empfehlung dienen, um die Resilienz des Wassermanagements gegenüber beiden Ereignissen zu erhöhen.
- ▶ **CO₂-Fußabdruck der Maßnahmen (Cradle to cradle) ist bisher nicht systematisch erfasst.** Neben der Wirkungen gegenüber dem Wasserhaushalt und Wasserextremereignissen sind die CO₂-Effekte der Aktivitäten relevant. Eine Betrachtung der CO₂-Effekte könnte analysieren, welche Maßnahmen hohe Synergien mit dem Klimaschutz aufweisen. Eine detaillierte Analyse verschiedener Bewertungsansätze und die Entwicklung von praxisorientierten einfach anwendbaren Methodiken könnte eine Verbreitung der Analyse des CO₂-Fußabdrucks in der Praxis unterstützen.

5.6.5 Ableitung von Regeln zur Entscheidungsfindung und Priorisierung von Nutzungen bei wasserbezogenen Nutzungskonflikten

5.6.5.1 Erkenntnisse aus WADKlim

- ▶ **Der europäische Kontext zeigt, dass der Grad der Vorbereitung auf Dürren in Europa generell verbesserungswürdig ist.** In den meisten, wenn nicht allen, EU Staaten mit Priorisierungsregeln sind verbesserte Kontrollsysteme, vermehrte Kontrollen von Entnahmemengen, Kontrollen illegaler Entnahmen und generell eine Reduzierung der Belastungen der Gewässer durch Wasserentnahmen notwendig. Zudem wird die Stakeholderbeteiligung im Dürrefall oft nur auf konsumptive Nutzer*innen begrenzt. Nicht Wasser verbrauchende Sektoren (z. B. Schifffahrt, Umwelt) haben oft kein Mitsprache- bzw. Mitentscheidungsrecht in der Dürreplanung. Auch in Deutschland gibt es große Defizite bei diesen Aspekten.
- ▶ **Nutzungspriorisierungen gibt es in 15 der 27 EU-Mitgliedsstaaten (Stand erste Hälfte 2023).** Große Unterschiede gibt es in der Anzahl der priorisierten Nutzungen: In Deutschland wird lediglich eine einzelne Nutzung (Trinkwasserversorgung) vor allen weiteren priorisiert. In den anderen EU-Mitgliedsstaaten werden oft vier bis fünf Nutzungen in eine Priorisierungsreihenfolge definiert. Es gibt auch Beispiele mit bis zu neun Nutzungen.
- ▶ **Priorisierungen können auf zwei unterschiedlichen Ebenen mit unterschiedlichen Priorisierungsreihenfolgen definiert werden** (wobei manche EU-Mitgliedsstaaten die gleiche Priorisierungskaskade für beide Ebenen anwenden):
 - Priorisierung im Ereignis- bzw. Dürrefall (also einen i.d.R. über einige Wochen oder Monate beschränkten Zeitraum)
 - langfristige Priorisierung als Teil einer vorsorgenden bzw. strategischen Planung (hierunter fallen sowohl die Priorisierung bei der Erteilung von neuen Wasserrechten als auch die nachträgliche Anpassung bestehender Wasserrechte)

- ▶ **Internationale Beispiele zeigen differenzierte und unterschiedlich strukturierte Umsetzungen des Subsidiaritätsprinzips, die für eine künftige Nutzungspriorisierung in Deutschland von Interesse sein können.** Mehrere europäische Mitgliedsstaaten legen keine einheitliche und „starre“ Priorisierung, sondern einen Rahmen für Priorisierungen fest. Auf dieser Grundlage entscheiden auf der regionalen Ebene bzw. auf der Ebene der WRRL-Flusseinzugsgebiete die jeweiligen Umsetzungsbehörden, welche Nutzungen in der Region prioritär sind. Priorisierungen erfolgen oft aufgrund ökonomischer Kriterien, bspw. mit einer Priorisierung der in der Region wichtigsten Wirtschaftszweige. In der Regel werden Priorisierungen nach Sektoren gestaltet.
- ▶ **Interessante Ansätze für die Strukturierung der Priorisierungen gibt es u.a. in Spanien, Frankreich und den Niederlanden.** Beispielsweise gibt es eine unterschiedliche Priorisierung ein und derselben Nutzung je nachdem, ob irreversible Schäden verursacht werden könnten (Natur) oder aber die Versorgungssicherheit in Frage steht (Trinkwasser- und Energieversorgung).
- ▶ **Anwendung des Subsidiaritätsprinzips auch in der Maßnahmenplanung für die Dürremanagementpläne, die i.d.R. auf lokaler Ebene festgelegt wird.** Interessante Ansätze für die Entwicklung einer Nutzungspriorisierung in Deutschland gibt es auch bei der Maßnahmenplanung im Dürrefall. Lokale Umsetzungsbehörden erhalten oftmals Orientierungsrahmen mit Prinzipien und Bedingungen, sie haben bei der Entwicklung konkreter Maßnahmen allerdings eigene Spielräume. Zudem können lokale Behörden, auf Basis der regionalen Priorisierung nach Wirtschaftssektoren, selber festlegen, welche Akteure innerhalb eines Sektors / einer Nutzungsklasse priorisiert werden sollten (z. B. Priorisierung Bewässerung von Dauerkulturen vor der von einjährigen Kulturen in der Landwirtschaft). Dieser lokal-spezifische Spielraum kann allerdings auch zu bedeutenden Problemen hinsichtlich der Transparenz der Entscheidungsfindung führen.

5.6.5.2 Herausforderungen

- ▶ **Transparenz in der Entscheidungsfindung herstellen:** Es wird ein Höchstmaß an Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen benötigt. Um für die Öffentlichkeit nachvollziehbare Entscheidungen zu treffen, braucht es sowohl klare Kriterien als auch die ihnen zugrundeliegenden Daten, bspw. Daten zu Wasserentnahmen, Zahlen zur Wertschöpfung, usw.
- ▶ **Kontrolle:** Die Kontrolle illegaler Wassernutzung ist entscheidend für eine nachhaltige Ressourcennutzung und Umweltschutz. Kontrollen fördern gerechte Wasserverteilung, sichert die Einhaltung von Gesetzen, schützt vor Übernutzung und gewährleistet Wassersicherheit. Kontrollmaßnahmen unterstützen zudem ökonomische Stabilität, Wasserrechtsprinzipien und die Förderung von Wassereffizienz, während Bewusstsein und Verantwortung in der Gesellschaft gestärkt werden.
- ▶ **Datenlücken:** Die im Rahmen von WADKlim aufgezeigten Datenlücken stellen eine Herausforderung bei der Erstellung von Wassernutzungsprioritäten dar, da keine gesamtheitliche Sicht auf die tatsächliche Situation möglich ist. Diese Lücken sind durch weitere Forschung, aber auch rechtliche Anpassung (z. B. Abschaffung von genehmigungsfreien Entnahmen) zu schließen.
- ▶ **Kompensation:** Zu klären ist, wie ggf. Kompensationen für wassersparende Maßnahmen oder Betriebsausfälle in Notsituationen finanziert werden können und welche Umlageverfahren möglich sind.

5.6.5.3 Weiterer Forschungsbedarf

► **Gesonderte Vorhaben sind für einige Punkte notwendig:**

- Datenlücken (siehe oben)
- Frage der Finanzierung: Wer zahlt für Effizienzsteigerungen? Geeignete Finanzierungs- und Umlageverfahren sind zu entwickeln, ebenso wie Anreizsysteme zum Wassersparen.
- Frage wer priorisiert, und bis wohin: Bei einer Nutzungspriorisierung muss die Rolle von Bund, Länder und Regionen klar definiert werden. Zur Klärung dieser Fragestellung könnte ein Dialogverfahren durchgeführt werden.
- Änderungen des Rechtsrahmens: Für die Etablierung einer Nutzungspriorisierung in Deutschland muss zudem abgeklärt werden, inwieweit eine wie auch immer ausdefinierte Priorisierung (Ereignisfall und strategisch) mit dem bestehenden Rechtsrahmen umsetzbar ist, oder ob dieser angepasst werden muss.

5.7 Fazit - Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

- **Verschiedene Lösungsstrategien wurden vorgestellt**, die dazu beitragen können, die nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen in Deutschland zu fördern und zukünftige Konflikte in der Wassernutzung zu minimieren. Dazu gehören bspw. die Förderung von Wassereffizienz und Wasserwiederverwendung, die Implementierung von Anpassungsmaßnahmen und die Stärkung der Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Nutzergruppen.
- **Unterstützung für die Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, der Nationalen Wasserstrategie und des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz**, indem politische Entscheidungsträger*innen und Stakeholdern ein umfassendes Verständnis für die aktuellen Herausforderungen in Bezug auf die Wassernutzung in Deutschland vermittelt wird. Durch die Vorstellung von Lösungsstrategien können auch konkrete Handlungsempfehlungen für politische Maßnahmen, technologische Innovationen und soziale Veränderungen bieten.
- **Es ist wichtig, dass politische Entscheidungsträger*innen und Stakeholder die vorgestellten Lösungsstrategien in ihre Entscheidungsprozesse integrieren und gemeinsam an einer nachhaltigen Wassernutzung arbeiten.** Nur so kann die Wasserverfügbarkeit in Deutschland langfristig gesichert werden. Dafür ist es unerlässlich, bisher fehlende Daten regelmäßig zu erheben und die Datenbestände zur Wassernutzung transparent und öffentlich zu machen. Zum Beispiel: Verpflichtende Erfassung von Bewässerungsmengen in zentralen Meldestellen. Für eine zukünftig bessere Vergleichbarkeit von Studien sollte stärker auf standardisierte Indikatoren zurückgegriffen werden.
- Ein zentrales Ziel der **Nationalen Wasserstrategie** ist es, die Verfügbarkeit von Wasser für alle Nutzergruppen in ausreichender Menge und Qualität sicherzustellen und dabei ökologische Belange zu berücksichtigen. Die vorliegenden Handlungsempfehlungen skizzieren aufkommende Nutzungskonflikte und schlagen mögliche Lösungsstrategien vor, die helfen, die Ziele der Nationalen Wasserstrategie umzusetzen. Darüber hinaus kann dazu beigetragen werden, ein Bewusstsein für die Dringlichkeit des Themas zu schaffen und die breite Öffentlichkeit für eine nachhaltige Wassernutzung zu sensibilisieren.

- ▶ **Wasserwiederverwendung im urbanen Raum kann zukünftig eine wichtige Rolle, bspw. bei der Bewässerung von Grünflächen, spielen.** Gerade in Wasserbilanz-Risikogebieten ist dieser Ansatz eine realistische Handlungsoption. Dazu müssen die notwendigen rechtlichen und institutionellen Rahmenbedingungen sowie neue infrastrukturelle Lösungen geschaffen werden.
- ▶ **Grundsätzlich sinkt zukünftig die Verfügbarkeit von Wasser in Deutschland unter dem Einfluss des Klimawandels, was zur Entstehung von Nutzungskonflikten führen oder bestehende Konflikte verschärfen kann.** Es ist daher notwendig, eine nachhaltige Wassernutzung zu fördern, um eine sichere und gerechte Versorgung für alle Nutzergruppen zu gewährleisten. Dabei ist es essenziell, dass natürliche Ökosysteme nicht nur in der Kommunikation, sondern auch in der wasserwirtschaftlichen Gesamtbetrachtung eine stärkere Rolle einnehmen.

5.7.1 Beitrag zur Nationalen Wasserstrategie

- ▶ **Ergebnisse aus WADKlim liefern Beiträge zur Umsetzung der Nationalen Wasserstrategie (NWS).** Aufgrund der breiten Modellierungs- und Analysearbeiten ergeben sich vielfältige Ansatzpunkte, die das Aktionsprogramm der NWS unterstützen. Die Kenngrößen und Zeitreihen zum Wasserhaushalt, die sich aus den Modellen mGROWA und TSMP/Parflow ergeben, sind ein signifikanter und praxisnaher Beitrag zur **Aktion 1 „Prognosefähigkeit der Wasserhaushaltsanalysen verbessern“**. Schon jetzt ist in mehreren Bundesländern mGROWA das offizielle Wasserhaushaltsmodell, auf dem die regionale wasserwirtschaftliche Planung und Genehmigung basiert. TSMP/Parflow liefert aktuelle Prognosen zum Bodenwasserhaushalt für Deutschland und die Regionen im Wasser-Monitor des Forschungszentrums Jülich unter <https://wasser-monitor.de/>. Im Hinblick auf **Aktion 3 „Einheitliche Definition von Kenngrößen zu Niedrigwasser und Wassermangel“** liefert WADKlim Einsichten in die raumzeitliche Variabilität einiger Indikatoren zur Charakterisierung des Einflusses von Trockenheit auf den Landschaftswasserhaushalt. Die langfristige Simulation der Grundwasserndynamik mit Parflow von 1961 bis zur Gegenwart dient als Technologiedemonstration für die **Aktion 4 „Grundwasser-Echtzeitentnahmemonitoring aufbauen“**. Die in WADKlim herausgearbeiteten Lücken und Inkonsistenzen in den bundesweit vorhandenen Datenbeständen zur Wassernutzung und die damit verbundenen Unsicherheiten zeigen sehr deutlich die Notwendigkeit von **Aktion 5 „Wasserregister und Abbau von Ausnahmen von der Erlaubnispflicht bei Grundwasserentnahmen“**. Ein Untersuchungsfokus in WADKlim war es, meteorologische Trockenheit als Auslöser für Wasserknappheit zeitlich und räumlich differenziert darzustellen. Solche Untersuchungen stellen einen essenziellen Beitrag zur **Aktion 6 „Leitlinie für den Umgang mit Wasserknappheit entwickeln“** dar. Ebenso sind die Erkenntnisse aus der langfristigen Simulation des Wasserhaushalts mit mGROWA von 1961 bis zur Gegenwart in der **Aktion 7 „Leitbilder für den regionalen, naturnahen Wasserhaushalt“** für verschiedene Gebietskulissen zu verwerten. Ein Aspekt lag im Projekt WADKlim auf einer Untersuchung der Grundwasserneubildung in den gegenwärtigen Wasserschutzgebieten, woraus sich ein Beitrag zu **Aktion 9 „Integrationsfähigkeit der wasserwirtschaftlichen Planung in die räumliche Gesamtplanung verbessern“** ableiten lässt. Durch Sensitivitätsanalysen mit dem Modell mGROWA können die potenziellen Wirkungen der **Aktion 12 „Verbesserung des Bodenschutzes, des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung“** und der **Aktion 20 „Versiegelung reduzieren - Entsiegelungsprojekte stärken“** auf den Wasserhaushalt evaluiert werden. Außerdem liefert WADKlim Daten zur regionalen Gegenüberstellung von Wasserdargebot und Wasserbedarf in einem bundesweit einheitlichen Ansatz und damit einen signifikanten Beitrag für die notwendige Datenbasis der

Aktion 47 „Bundesweit einheitliche Leitlinien für regionale Wasserversorgungskonzepte erstellen“. Perspektivisch können diese Methoden zur räumlichen Bilanzierung der Wassergewinnungs- und Wassernutzungs-Indizes auch in zukünftigen Planungen zur **Aktion 49 „Länderübergreifende und überregionale Infrastrukturen“** wieder aufgegriffen werden. Die Verfügbarkeit einer umfassenden Datenbasis zum raumzeitlichen Zusammenhang von Wasserdargebot und Wassernutzung wurde in WADKlim erneut als extrem relevant herausgearbeitet, sodass die Wichtigkeit der **Aktion 61 „Schaffung eines Rahmens für die Erhebung, Speicherung und Nutzung gewässerrelevanter Daten“** nochmals hervorgehoben wird.

- ▶ **Wissenschaftliche Grundlage hinsichtlich wasserbezogener Nutzungskonflikte.** Die WADKlim-Studie kann als wissenschaftliche Grundlage für den Stresstest von Wasserdargebot und Wassernutzung unter Klimawandelszenarien in Deutschland im Sinne des Aktionsprogramms III.1 dienen.
- ▶ **Identifizierung zukünftiger wasserbezogener Nutzungskonflikte und betroffener Akteure.** Die Daten können die Basis für die zu entwickelnde Leitlinie für regional zu treffende Priorisierungsentscheidungen (Aktion 6) sein.
- ▶ **Beitrag der Wasserwiederverwendung im urbanen Raum zur Nationalen Wasserstrategie:** Aktion 54 adressiert explizit die Stärkung der Wasserwiederverwendung einschließlich einer potenziellen Anwendung in Städten und der Entwicklung von entsprechenden Leitplanken. Des Weiteren bestehen Schnittstellen mit den folgenden strategischen Themen der NWS:
 - **Strategisches Thema 1 - Den naturnahen Wasserhaushalt schützen,** wiederherstellen und dauerhaft sichern; Wasserknappheit und Zielkonflikten vorbeugen: Durch Wasserwiederverwendung können vor allem Grundwasserressourcen quantitativ geschont werden.
 - **Strategisches Thema 3 - Nachhaltige Gewässerbewirtschaftung:** Trotz Entzugs von Klarwasser sollte der Mindestabfluss in Gewässern gewährleistet sein.
 - **Strategisches Thema 4 - Risiken durch Stoffeinträge begrenzen:** Durch ein angepasstes und gut geplantes Risikomanagement die Gefahren für die Umweltkompartimente bei gleichzeitiger Ressourcenschonung schützen.
 - **Strategisches Thema 9 - Bewusstsein für die Ressource Wasser stärken:** Durch Schulungen/Stakeholder-Beteiligungen etc.
- ▶ **Beitrag von Wasserbeiräten zur Nationalen Wasserstrategie:** Die Nationale Wasserstrategie erwähnt Wasserbeiräte, überlässt es aber den Akteuren dieses Instrument mit Leben zu füllen. In einigen Bundesländern (z. B. Sachsen) laufen gerade Anstrengungen Wasserbeiräte als Instrument einzuführen. Erfahrungen aus den WADKlim-Fallstudien können für die Empfehlungen zur Initiierung von Wasserbeiräten auf regionaler Ebene genutzt werden.
- ▶ **Beitrag von Wasserversorgungskonzepten zur Nationalen Wasserstrategie:** Wasserversorgungskonzepte werden in der Nationalen Wasserstrategie als Möglichkeit gesehen, proaktiv zukünftige Herausforderungen in der Wasserwirtschaft anzugehen. Durch das Zusammentragen bestehender WVK in WADKlim kann ein Überblick über den Umfang aktueller

WVK geschaffen werden. Auf dieser Basis besteht die Möglichkeit, die in der Nationalen Wasserstrategie geforderten bundeseinheitlichen Methoden zur Entwicklung von WVK zu schaffen.

- ▶ **Beitrag von Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche zur Nationalen Wasserstrategie:** viele der Maßnahmen des Katalogs haben Synergien mit der Vision „Naturnaher Wasserhaushalt im Jahr 2050“ der Nationalen Wasserstrategie, z. B. die Wiederherstellung von Auenlebensräumen und Ausweitung von naturnahen Retentionsflächen

5.7.2 Beitrag zum Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz

- ▶ **Ergebnisse aus WADKlim liefern auch Beiträge zur Umsetzung des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz (ANK).** Insbesondere leisten die Entwicklungen zu den Modellen mGROWA und TSMP/Parflow einen Beitrag zum Punkt „**Prognosefähigkeit der Wasserhaushaltsanalysen verbessern**“, so wie dies bereits oben mit Bezug zur NWS beschrieben wurde. Einen weiteren Beitrag liefert die erste Zusammenstellung von Nutzungskonflikten in Deutschland, die auf Pressemitteilungen basiert, jedoch erste Anhaltspunkte einer aktuellen Problematik widerspiegelt.
- ▶ Hinsichtlich **Klimawandel und Szenarien der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung** in Deutschland liefert die WADKlim-Studie eine nach objektiven Kriterien abgeleitete Datenbasis zur Erreichung der Ziele zum Management der Grundwasserressourcen .
- ▶ Bezüglich der Entwicklung von **Lösungsansätzen für Wassernutzungskonflikte in Deutschland** könnten die in WADKlim entwickelten Maßnahmenkataloge (zugänglich auf der [Webseite des Umweltbundesamtes](#)) im Rahmen der Weiterentwicklung der deutschen Anpassungsstrategie und des Aktionsplans Anpassung einfließen.
- ▶ **Beitrag der Wasserwiederverwendung im urbanen Raum zum Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz:**
 - **Naturnahen Wasserhaushalt wiederherstellen:** Durch urbane Wasserwiederverwendung werden Grundwasserressourcen geschont und der lokale Wasserkreislauf unterstützt.
 - **Städte und Gemeinden klimafest machen:** Schutz und Erhalt von zusammenhängenden naturnahen Grünflächen durch Bewässerung.
- ▶ **Beitrag von Wasserbeiräten zum Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz.** Maßnahmen, welche über das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz gefördert werden, könnten in Wasserbeiräten entwickelt werden. Gemeinsame Förderinitiativen auf kommunaler Ebene wären denkbar.
- ▶ **Beitrag von Wasserversorgungskonzepten zum Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz:** Wasserversorgungskonzepte sollten Maßnahmen nutzen, die einen naturnahen Wasserhaushalt fördern. Wenn WVK auf einer systematischen Datenanalyse und -auswertung bzw. Prognose aufbauen, können sie eine gute Basis für Maßnahmenpriorisierungen für das Aktionsprogramm sein.

- ▶ **Beitrag von Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Landschaft zum Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz:** Viele Maßnahmen adressieren die Ziele des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz bzgl. Wiedervernässung von Feuchtgebieten, Schutz intakter Moore, naturnaher Wasserhaushalt, Waldökosysteme, Humusanreicherung in Böden. Der entwickelte Maßnahmenkatalog kann sowohl auf kommunaler als auch Landesebene dazu dienen, einen Überblick über mögliche Maßnahmen zu geben und die Auswahl geeigneter Maßnahmen zu unterstützen.

5.7.3 Beitrag zur Deutschen Anpassungsstrategie

- ▶ Die bereitgestellten **WADKlim Daten zu Szenarien der Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung in Deutschland** können zur Ableitung von regionalspezifischen Strategien und Maßnahmen zur Klimaanpassung in Trockenperioden genutzt werden. Außerdem können regional differenzierte Analysen und Bewertungen derzeitiger und zukünftiger Wasserressourcen im Rahmen des Monitorings zur DAS mit dem entwickelten Modellinstrumentarium (MI) konsistent für Deutschland durchgeführt werden. Es wird empfohlen, die in WADKlim für die Identifizierung von Wasser-Bilanz-Risiko-Gebieten erprobten Modelle und Analysemethoden (Kapitel 2.3) kontinuierlich auch auf Bundesebene für das Monitoring zum Einfluss von klimatischen Trockenperioden auf die Wasserverfügbarkeit in den Bereichen Forst-, Land- und Wasserwirtschaft anzuwenden.
- ▶ **Beitrag der Wasserwiederverwendung im urbanen Raum zur Deutschen Anpassungsstrategie:**
 - Die Wasserwiederverwendung in urbanen Räumen trägt zur **mengenmäßigen Entlastung der Grundwasserressourcen** bei, welche sowohl im WHG (§ 47 (1)) als auch in der DAS (Kap. 3.2.14) festgeschrieben ist, sowie zum effizienteren Wassereinsatz, um bei längeren und häufigeren regionalen Trockenheitsphasen und Niedrigwasserperioden regionale Nutzungskonflikte [...] bei oberflächennahen Grundwasserentnahmen zu vermeiden (DAS, Kap. 3.2.3).
 - **Die Bewässerung trägt zum Schutz der Bodenfunktionen bei**, da trockene Böden das Wachstum von Kultur- und Wildpflanzen beeinträchtigen (DAS, Kap. 3.2.4).
 - **Durch die Bewässerung werden Grünflächen erhalten und die Evapotranspiration gefördert**, was zur Reduzierung von Hitzebelastung (GE- I-1), und damit zum Schutz der Menschlichen Gesundheit beiträgt.
- ▶ **Beitrag von Maßnahmen zum Wasserrückhalt in der Fläche zur Deutschen Anpassungsstrategie:** Viele Maßnahmen haben Synergien zu den Zielen der Klimaanpassung, insbesondere durch die enge Verknüpfung der Extremereignisse Hochwasserschutz und Trockenheit durch Maßnahmen zum Wasserrückhalt. Die entwickelte Maßnahmenübersicht kann im Rahmen der Aufstellung des nächsten Aktionsplans Klimaanpassung hilfreich sein, u.a. durch Bezüge zur Diskussion zu naturbasierten Lösungen.

6 Referenzen

6.1 Kapitel 1: Einleitung

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Ed.). (2020). Diskussionspapier zum Thema Nutzungskonflikte. https://www.fresh-thoughts.eu/userfiles/file/Diskussionspapier%20zum%20Thema%20Nutzungskonflikte_03032020.pdf

Imbery, F., Friedrich, K., Fleckenstein, R., Plückhahn, B., Brömser, A., Bissolli, P., Daßler, J., Haeseler, S., Rustermeier, E., Ziese, M., Breidenbach, J. N., Fränking, S., Trentmann, J., & Kaspar, F. (2023). Klimatologischer Rückblick auf 2022: Das sonnenscheinreichste und eines der beiden wärmsten Jahre in Deutschland (Deutscher Wetterdienst, Ed.). https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/230123/download_jahresrueckblick-2022.pdf;jsessionid=310711EEEE42E44D01F6450542F4048E.live21071?__blob=publicationFile&v=1

Luis Caparrós-Martínez, J., Rueda-López, N., Milán-García, J., & de Pablo Valenciano, J. (2020). Public policies for sustainability and water security: The case of Almeria (Spain). *Global Ecology and Conservation*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01037>

Umweltbundesamt. (2019). Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel: Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung.

6.2 Kapitel 2: Aktuelle und zukünftige Entwicklungen des Wasserdargebotes und der Grundwasserverfügbarkeit

Alcamo, J., van Vuuren, D., Cramer, W., Alder, J., Bennett, E., Carpenter, S., Christensen, V., Foley, J., Märker, M., Masui, T., Morita, T., O'Neill, B., Peterson, G., Ringler, C., Rosegrant, M., & Schulze, K. (2005). Changes in ecosystem services and their drivers across the scenarios. In S. R. Carpenter, P. L. Pingali, E. M. Bennett, & M. B. Zurek (Eds.), *Ecosystems and human well-being: Scenarios. Findings of the scenarios working group* (pp. 297–373). Island Press (The Millennium Ecosystem Assessment series, Bd. 2).

Arbeitskreis KLIWA. (2003). Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern: KLIWA-Projekt A 2.1.2 \textquotedblanalyse zum Langzeitverhalten der mittleren jährlichen und monatlichen Abflüsse\textquotedbl (Issue 3). LfU c/o JVA Mannheim Druckerei.

Baroni, G., Schalge, B., Rakovec, O., Kumar, R., Schüler, L., Samaniego, L., Simmer, C., & Attinger, S. (2019). A Comprehensive Distributed Hydrological Modeling Intercomparison to Support Process Representation and Data Collection Strategies. In *Water Resources Research* (Vol. 55, Issue 2, pp. 990–1010). <https://doi.org/10.1029/2018wr023941>

Barthel, R., Krimly, T., Elbers, M., Soboll, A., Wackerbauer, J., Hennicker, R., Janisch, S., Reichenau, T. G., Dabbert, S., Schmude, J., Ernst, A., & Mauser, W. (2011). Folgen des Globalen Wandels für das Grundwasser in Süddeutschland – Teil 2: Sozioökonomische Aspekte. *Grundwasser*, 16(4), 259–268. <https://doi.org/10.1007/s00767-011-0180-y>

Bauer, N., Calvin, K., Emmerling, J., Fricko, O., Fujimori, S., Hilaire, J., Eom, J., Krey, V., Kriegler, E., Mouratiadou, I., Sytze de Boer, H., van den Berg, M., Carrara, S., Daioglou, V., Drouet, L., Edmonds, J. E., Gernaat, D., Havlik, P., Johnson, N., ... van Vuuren, D. P. (2017). Shared Socio-Economic Pathways of the Energy Sector – Quantifying the Narratives. *Global Environmental Change*, 42, 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.07.006>

Beguéría, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. In *International Journal of Climatology* (Vol. 34, Issue 10, pp. 3001–3023). <https://doi.org/10.1002/joc.3887>

- Bender, S., Butts, M., Hagemann, S., Smith, M., Vereecken, H., & Wendland, F. (2017). Der Einfluss des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland. Eine Analyse ausgesuchter Studien der Jahre 2009 bis 2013 [Report].
- Bender, S., Groth, M., & Viktor, E. (2020). Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Grundwassernutzung – Betroffenheiten, Handlungsbedarfe und Lösungsansätze. Grundwasser. <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00465-9>
- Bergesen, C. (2010). UDI world electric power plants data base [dataset] [Report].
- Blickensdörfer, L., Schwieder, M., Pflugmacher, D., Nendel, C., Erasmí, S., & Hostert, P. (2022). Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany. In *Remote Sensing of Environment* (Vol. 269). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112831>
- BMU. (2008). Grundwasser in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3642.pdf>
- Boeing, F., & Marx, A. (2023). Klimafolgenstudie für das DVGW-Innovationsprogramm \glqqZukunftsstrategie Wasser\grqq: Abschlussbericht.
- Bogena, H., Kunkel, R., Schöbel, T., Schrey, H. P., & Wendland, F. (2003). Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen (Vol. 37). <http://hdl.handle.net/2128/344>
- Bronstert, A., Kolokotronis, V., Schwandt, D., & Straub, H. (2007). Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis: General scheme and application example. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1579–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1621>
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. (2015). Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland, Stand 2015 (LBM-DE2015) [dataset]. <http://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitales-landbedeckungsmodell-fur-deutschland-stand-2015-lbm-de2015.html>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Ed.). (2003). Hydrologischer Atlas von Deutschland (3. Lieferung). <https://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HAD/index.html>
- Climate Service Center Germany. (2012). Grundwasserneubildung. https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/062989/index.php.de
- DECHEMA e. V. (2014). Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik: Rohwasser, Prozess, Abwasser ; Positionspapier der ProcessNet-Fachgruppe Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik. DECHEMA e.V. <https://edocs.tib.eu/files/e01fn15/821077937.pdf>
- Destatis. (2011). Bodenbearbeitung, Bewässerung, Landschaftselemente—Erhebung über landwirtschaftliche Produktionsmethoden (ELPM)—Fachserie 3 Heft 5—2010 [dataset]. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/Publikationen/Downloads-Produktionsmethoden/bodenbearbeitung-bewaesserung-2032805109004.html>
- Destatis. (2021a). Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben—Landwirtschaftszählung 2020 (Letzte Ausgabe—Berichtsweise eingestellt) [dataset]. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/betriebe-bewaesserung-5411205209004.html>
- Destatis. (2021b). Bodennutzung der Betriebe—Landwirtschaftlich genutzte Flächen—Fachserie 3 Reihe 3.1.2—2020 [dataset]. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Publikationen/Bodennutzung/landwirtschaftliche-nutzflaeche-2030312207004.html>
- Dezsi, Ş., Mîndrescu, M., Petrea, D., Rai, P. K., Hamann, A., & Nistor, M.-M. (2018). High-resolution projections of evapotranspiration and water availability for Europe under climate change. *International Journal of Climatology*, 38(10), 3832–3841. <https://doi.org/10.1002/joc.5537>

- Eisner, S. (2016). Comprehensive evaluation of the WaterGAP3 model across climatic, physio-graphic, and anthropogenic gradients. [Thesis].
- Engel, N., Müller, U., & Schäfer, W. (2012). BOWAB - Ein Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell. In *GeoBe-richte—Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie* (Vol. 20, pp. 85–98).
- Erfurt, M., Glaser, R., & Blauhut, V. (2019). Changing impacts and societal responses to drought in southwestern Germany since 1800. *Regional Environmental Change*, 19(8), 2311–2323. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01522-7>
- Ertl, G., Bug, J., Elbracht, J., Engel, N., & Herrmann, F. (2019). Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen. Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18. https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geober_36_2019
- Ertl, G., Herrmann, F., & Elbracht, J. (2022). Bestimmung der Grundwasserneubildungshöhen für Festgesteinsgebiete in Niedersachsen. In *Grundwasser*. <https://doi.org/10.1007/s00767-021-00503-0>
- Fangmann, A., Belli, A., & Haberlandt, U. (2013). Trends in beobachteten Abflusszeitreihen in Niedersachsen [PDF]. *Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung / BfG – Jahrgang: 57.2013, 5ISSN 1439*. https://doi.org/10.5675/HYWA_2013,5_1
- Feyen, L., Ciscar, J.-C., Gosling, S. N., Ibarreta, D., & Soria, A. (Eds.). (2020). Climate change impacts and adaptation in Europe: JRC PESETA IV final report. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/171121>
- Fleiß, R., Baumeister, C., Gudera, T., Hergesell, M., Kopp, B., Neumann, J., & Posselt, M. (2021). Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser und die Wasserversorgung in Süddeutschland. In *Grundwasser* (Vol. 26, Issue 1, pp. 33–45). <https://doi.org/10.1007/s00767-021-00477-z>
- Flörke, M., Kynast, E., Bärlund, I., Eisner, S., Wimmer, F., & Alcamo, J. (2013). Domestic and industrial water uses of the past 60 years as a mirror of socio-economic development: A global simulation study. In *Global Environmental Change* (Vol. 23, Issue 1, pp. 144–156). <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.018>
- Flörke, M., Onigkeit, J., & Opiel, H. (2021). Water Resources as important factors in the Energy Transition at local and global scale: Final Report of the joint project WANDEL: ISSN 0949-5975. Ruhr-Universität Bochum.
- Flörke, M., Schneider, C., & McDonald, R. I. (2018). Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. In *Nature Sustainability* (Vol. 1, Issue 1, pp. 51–58). <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0006-8>
- Frieler, K., Lange, S., Piontek, F., Reyer, C. P. O., Schewe, J., Warszawski, L., Zhao, F., Chini, L., Denvil, S., Emanuel, K., Geiger, T., Halladay, K., Hurtt, G., Mengel, M., Murakami, D., Ostberg, S., Popp, A., Riva, R., Stevanovic, M., ... Yamagata, Y. (2017). Assessing the impacts of 1.5 °C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). *Geoscientific Model Development*, 10(12), 4321–4345. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4321-2017>
- Güntner, A., Gerdener, H., Boergens, E., Kusche, J., Kollet, S., Dobsław, H., Hartick, C., Sharifi, E., & Flechtner, F. (2023). Veränderungen der Wasserspeicherung in Deutschland seit 2002 aus Beobachtungen der Satellitengravimetrie. In *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung* (Vol. 67, Issue 2, pp. 74–89). https://doi.org/10.5675/HyWa_2023.2_1

- Haan, P., Stichnoth, H., Blömer, M., Buslei, H., Geyer, J., Krolage, C., & Müller, K.-U. (2017). Entwicklung der Altersarmut bis 2036: Trends, Risikogruppen und Politikszenerarien. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung und Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung. https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Entwicklung_der_Altersarmut_bis_2036.pdf
- Hagemann, S., & Jacob, D. (2007). Gradient in the climate change signal of European discharge predicted by a multi-model ensemble. *Climatic Change*, 81(S1), 309–327. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9225-0>
- Hattermann, F., Huang, S., & Koch, H. (2015). Climate change impacts on hydrology and water resources. *Meteorologische Zeitschrift*, 24(2), 201–211. <https://doi.org/10.1127/metz/2014/0575>
- Hellwig, J. (2019). Grundwasserdürren in Deutschland von 1970 bis 2018. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 12(10), 568–572. <https://doi.org/10.3243/kwe2019.10.001>
- Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., & Piontek, F. (2013). A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 4(2), 219–236. <https://doi.org/10.5194/esd-4-219-2013>
- Hennig, H., & Hilgert, T. (2021). Der Grundwasserhaushalt in Vorpommern – Seine anthropogene Prägung, Auswirkungen von Klimaänderungen und Anpassungsstrategien. *Grundwasser*. <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00464-w>
- Herbst, M., Falge, E., & Frühauf, C. (2021). Regionale Klimamodellierung – Perspektive Landwirtschaft. In Deutscher Wetterdienst (Ed.), *Promet, meteorologische Fortbildung Heft 104: Regionale Klimamodellierung II - Anwendungen* (pp. 55–62). Deutscher Wetterdienst.
- Herrmann, F. (2020). Methodendokumentation zum Wasserhaushaltsmodell mGROWA. Interner Bericht Forschungszentrum Jülich.
- Herrmann, A., Meyer-Ohlendorf, N., & Riedel et al., A. (2016). Rahmen für Klimaschutzinvestitionen—Hemmnisse und Maßnahmen. *Öko-Institut e.V.* <https://www.ecologic.eu/13982>
- Herrmann, F., Chen, S., Heidt, L., Elbracht, J., Engel, N., Kunkel, R., Müller, U., Röhm, H., Vereecken, H., & Wendland, F. (2013). Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA. In *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (Vol. 57, Issue 5, pp. 206–224). https://doi.org/10.5675/HyWa_2013,5_2
- Herrmann, F., Chen, S., Kunkel, S., & Wendland, F. (2013). Quantifizierung und Bewertung des innerjährlichen Abflussgeschehens und der Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt in Niedersachsen und Bremen. *Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Bio- und Geowissenschaften*.
- Herrmann, F., Hübsch, L., Elbracht, J., Engel, N., Keller, L., Kunkel, R., Müller, U., Röhm, H., Vereecken, H., & Wendland, F. (2017). Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen. In *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (Vol. 61, Issue 4, pp. 245–261). https://doi.org/10.5675/HyWa_2017,4_3
- Herrmann, F., Keller, L., Kunkel, R., Vereecken, H., & Wendland, F. (2015). Determination of spatially differentiated water balance components including groundwater recharge on the Federal State level – A case study using the mGROWA model in North Rhine-Westphalia (Germany). In *Journal of Hydrology: Regional Studies* (Vol. 4, pp. 294–312). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.018>
- Herrmann, F., Keuler, K., Wolters, T., Bergmann, S., Eisele, M., & Wendland, F. (2021). Mit der Modellkette RCP-GCM-RCM-mGROWA projizierte Grundwasserneubildung als Datenbasis für zukünftiges Grundwassermanagement in Nordrhein-Westfalen. In *Grundwasser* (Vol. 26, Issue 1, pp. 17–31). <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00471-x>

- Herrmann, F., Kunkel, R., Ostermann, U., Vereecken, H., & Wendland, F. (2016). Projected impact of climate change on irrigation needs and groundwater resources in the metropolitan area of Hamburg (Germany). In *Environmental Earth Sciences* (Vol. 75, Issue 14). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5904-y>
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. (2020). *Gewässerkundlicher Jahresbericht 2019. Hydrologie in Hessen*, 19.
- Hirschfeld, J. (2015). Wo ist Wasser in Deutschland knapp und könnte es in Zukunft knapper werden? Eine Untersuchung der natürlichen, künstlichen und virtuellen Wasserflüsse in Deutschland. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 8(11), 710–715. <https://doi.org/10.3243/kwe2015.11.006>
- Huang, S., Krysanova, V., & Hattermann, F. (2015). Projections of climate change impacts on floods and droughts in Germany using an ensemble of climate change scenarios. *Regional Environmental Change*, 15(3), 461–473. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0606-z>
- Huang, S., Krysanova, V., Österle, H., & Hattermann, F. F. (2010). Simulation of spatiotemporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change. *Hydrological Processes*, 24(23), 3289–3306. <https://doi.org/10.1002/hyp.7753>
- Hübener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., Keuler, K., Menz, C., Mohr, V., Radtke, K., Ramthun, H., Spekat, A., Steger, C., Toussaint, F., Warrach-Sagi, K., & Woldt, M. (2017). *ReKliEs-De Ergebnisbericht [Report]*. https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. In *Regional Environmental Change* (Vol. 14, Issue 2, pp. 563–578). <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jin, Y., Behrens, P., Tukker, A., & Scherer, L. (2019). Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109391>
- Jones, J. E., & Woodward, C. S. (2001). Newton–Krylov-multigrid solvers for large-scale, highly heterogeneous, variably saturated flow problems. In *Advances in Water Resources* (Vol. 24, Issue 7, pp. 763–774). [https://doi.org/10.1016/s0309-1708\(00\)00075-0](https://doi.org/10.1016/s0309-1708(00)00075-0)
- Kendall, M. G. (1938). A New Measure of Rank Correlation. In *Biometrika* (Vol. 30, Issues 1–2, pp. 81–93). <https://doi.org/10.1093/biomet/30.1-2.81>
- Kitous, A., Keramidas, K., Vanduyck, T., Saveyn, B., van Dingenen, R., Spadaro, J. V., & Holland, M. (2017). How climate policies improve air quality: Global energy trends and ancillary benefits of the Paris Agreement (Vol. 2017). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/474356>
- Koch, H., & Vögele, S. (2009). Dynamic modelling of water demand, water availability and adaptation strategies for power plants to global change. In *Ecological Economics* (Vol. 68, Issue 7, pp. 2031–2039). <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.02.015>
- Kollet, S. J., & Maxwell, R. M. (2006). Integrated surface–groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. In *Advances in Water Resources* (Vol. 29, Issue 7, pp. 945–958). <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.08.006>
- Kollet, S. J., Maxwell, R. M., Woodward, C. S., Smith, S., Vanderborght, J., Vereecken, H., & Simmer, C. (2010). Proof of concept of regional scale hydrologic simulations at hydrologic resolution utilizing massively parallel computer resources. In *Water Resources Research* (Vol. 46, Issue 4). <https://doi.org/10.1029/2009wr008730>

Kollet, S., Sulis, M., Maxwell, R. M., Paniconi, C., Putti, M., Bertoldi, G., Coon, E. T., Cordano, E., Endrizzi, S., Kikinzon, E., Mouche, E., Mügler, C., Park, Y.-J., Refsgaard, J. C., Stisen, S., & Sudicky, E. (2017). The integrated hydrologic model intercomparison project, IH-MIP2: A second set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. In *Water Resources Research* (Vol. 53, Issue 1, pp. 867–890).

<https://doi.org/10.1002/2016WR019191>

Krause, P., & Hanisch, S. (2009). Simulation and analysis of the impact of projected climate change on the spatially distributed waterbalance in Thuringia, Germany. *Advances in Geosciences*, 21, 33–48.

<https://doi.org/10.5194/adgeo-21-33-2009>

Lenderink, G., Buishand, A., & van Deursen, W. (2007). Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1145–1159. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>

Linke, V. (2010). Einfluss des Klimas und der Landnutzung auf die Grundwasserneubildung im nördlichen Deistervorland (1938–2003). *GeoBerichte - Landesamt Für Bergbau, Energie Und Geologie*, 16(1–73).

Liu, W., Lim, W. H., Sun, F., Mitchell, D., Wang, H., Chen, D., Bethke, I., Shiogama, H., & Fischer, E. (2018). Global Freshwater Availability Below Normal Conditions and Population Impact Under 1.5 and 2 °C Stabilization Scenarios. *Geophysical Research Letters*, 45(18), 9803–9813. <https://doi.org/10.1029/2018GL078789>

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. In *Econometrica* (Vol. 13, Issue 3).

<https://doi.org/10.2307/1907187>

Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. In *Annals of Mathematical Statistics* (Vol. 18, Issue 1, pp. 50–60).

Mauget, S. A. (2003). Multidecadal Regime Shifts in U.S. Streamflow, Precipitation, and Temperature at the End of the Twentieth Century. In *Journal of Climate* (Vol. 16, Issue 23, pp. 3905–3916).

[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3905:Mrsius>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3905:Mrsius>2.0.Co;2)

Maxwell, R. M. (2013). A terrain-following grid transform and preconditioner for parallel, large-scale, integrated hydrologic modeling. In *Advances in Water Resources* (Vol. 53, pp. 109–117). <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.10.001>

Maxwell, R. M., & Condon, L. E. (2016). Connections between groundwater flow and transpiration partitioning. In *Science* (Vol. 353, Issue 6297, pp. 377–380). <https://doi.org/10.1126/science.aaf7891>

Maxwell, R. M., Putti, M., Meyerhoff, S., Delfs, J., Ferguson, I. M., Ivanov, V., Kim, J., Kolditz, O., Kollet, S. J., Kumar, M., Lopez, S., Niu, J., Paniconi, C., Park, Y., Phanikumar, M. S., Shen, C., Sudicky, E. A., & Sulis, M. (2014). Surface-subsurface model intercomparison: A first set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. In *Water Resources Research* (Vol. 50, Issue 2, pp. 1531–1549).

<https://doi.org/10.1002/2013wr013725>

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration Times Scales. In *8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179–184). American Meteorological Society.

Merz, B., Maurer, T., & Kaiser, K. (2012). Wie gut können wir vergangene und zukünftige Veränderungen des Wasserhaushalts quantifizieren? *Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung*, 56(5), 244–256.

https://doi.org/10.5675/HyWa_2012

Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Climate change. Stationarity is dead: Whither water management? In *Science* (Vol. 319, Issue 5863, pp. 573–574). <https://doi.org/10.1126/science.1151915>

- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. In *Nature* (Vol. 463, Issue 7282, pp. 747–756). <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Natkhin, M., Steidl, J., & Dietrich, O. (2010). Der Einfluss von Klimaänderungen und Waldwirtschaft auf die Grundwasserneubildung in einem niederschlagsarmen Tieflandeinzugsgebiet. *Forum Für Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung*, 29.10, 79–85.
- Neumann, J., & Wendel, S. (2012). Grundwasser – Veränderungen und fachliche Schlussfolgerungen. *KLIWA-Berichte*, 19, 120–129.
- Nilson, E., Krahe, P., Klein, B., Lingemann, I., Horsten, T., Carambia, M., Larina, M., & Maurer, T. (2014). Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland: Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. *KLIWAS Schriftenreihe*, 43. https://doi.org/10.5675/KLIWAS_43/2014_4.01
- O’Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Inter-comparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- O’Neill, B., Kriegler, E., & Ebi, K. L. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *42(Global Environmental Change)*, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- Pfeifer, S., Bülow, K., Gobiet, A., Hänsler, A., Mudelsee, M., Otto, J., Rechid, D., Teichmann, C., & Jacob, D. (2015). Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany. In *Atmosphere* (Vol. 6, Issue 5, pp. 677–698). <https://doi.org/10.3390/atmos6050677>
- Pyka, C., Jacobs, C., Breuer, R., Elbers, J., Nacken, H., Sewilam, H., & Timmerman, J. (2016). Effects of water diversion and climate change on the Rur and Meuse in low-flow situations. *Environmental Earth Sciences*, 75(16). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5989-3>
- Rakovec, O., Samaniego, L., Hari, V., Markonis, Y., Moravec, V., Thober, S., Hanel, M., & Kumar, R. (2022). The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe. *Earth’s Future*, 10. <https://doi.org/10.1029/2021EF002394>
- Riedel, T., Nolte, C., aus der Beek, T., Liedtke, J., Sures, B., & Grabner, D. (2021). Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien. (Umweltbundesamt, Ed., Texte | 174/2021). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-01-17_texte_174-2021_niedrigwasser_duerre_und_grundwasserneubildung.pdf
- Riedel, T., & Weber, T. K. D. (2020). Review: The influence of global change on Europe’s water cycle and groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 28, 1939–1959. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02165-3>
- Rothman, D. S., Agard, J., Alcamo, J., & al, et. (2007). The future today. Chapter 9. In UNEP (Ed.), *Global Environment Outlook 4 (GEO4)* (pp. 397–456).
- Sachs, L., & Hedderich, J. (2009). *Angewandte Statistik—Methodensammlung mit R* (13.). Springer Berlin Heidelberg.
- Samaniego, L., Kumar, R., & Attinger, S. (2010). Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46(5). <https://doi.org/10.1029/2008WR007327>

- Scherzer, J., Schultze, B., Niederberger, J., & Pöhler, H. (2010). WASKlim-Potenzielle Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt am Beispiel der Wupper (NRW), der oberen Iller (Bayern) und der Salza (Sachsen-Anhalt). Forum Für Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung. http://www.wasklim.de/download/Scherzer-et-al_WHH-WASKlim_HyWa2010.pdf
- Schmidli, J., Frei, C., & Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. In *International Journal of Climatology* (Vol. 26, Issue 5, pp. 679–689). <https://doi.org/10.1002/joc.1287>
- Schmidt, B., Kuhn, U., Trepel, M., Kreins, P., Zinnbauer, M., Eysholdt, M., Osterburg, B., Löw, P., Wendland, F., Herrmann, F., Kunkel, R., Tetzlaff, B., Wolters, T., Venohr, M., & Nguyen, H. (2020). Modellansatz zur Bestimmung der Nährstoffbelastung und ihrer Reduktion in allen deutschen Flussgebieten. In *Wasser und Abfall* (Vols. 1–2, pp. 33–38).
- Schneider, P., Schmitt, A., & Hoy, A. (2021). Visualisierung der Auswirkungen des Klimawandels in der sächsisch-böhmischen Grenzregion. *WASSERWIRTSCHAFT*, 111(11), 70–75. <https://doi.org/10.1007/s35147-021-0917-1>
- Schönwiese, C.-D., & Janoschitz, R. (2008). Klima-Trendatlas Deutschland 1901-2000 (Issue 4). Institut für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt/Main.
- Schwarze, R., Hauffe, C., Baldy, A., Winkler, P., Dröge, W., Wagner, M., & Röhm, P. (2014). KliWES Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen: Wasserhaushaltsberechnungen für den Ist-Zustand und verschiedene Klima- bzw. Landnutzungsszenarien. *Schriftenreihe Des LfULG*, 32.
- Sordo-Ward, A., Granados, I., Iglesias, A., & Garrote, L. (2019). Blue Water in Europe: Estimates of Current and Future Availability and Analysis of Uncertainty. *Water*, 11(3), 420. <https://doi.org/10.3390/w11030420>
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2022a). Erhebung der nichtöffentlichen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung: Wassergewinnung und -bezug (verschiedene Jahrgänge).
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2022b). Statistik der öffentlichen Wasserversorgung: Anschlussgrad, Wasserabgabe (verschiedene Jahrgänge).
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2022c). Statistik der öffentlichen Wasserversorgung: Wassergewinnung (verschiedene Jahrgänge).
- Statistisches Bundesamt. (2022a). Bevölkerung im Wandel: Annahmen und Ergebnisse der 15. Koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung.
- Statistisches Bundesamt. (2022b). Fortschreibung des Bevölkerungsstandes.
- Statistisches Bundesamt. (2022c). Nichtöffentliche Wasserversorgung und nichtöffentliche Abwasserentsorgung (verschiedene Jahre): Fachserie 19 Reihe 2.2.
- Statistisches Bundesamt. (2022d). Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung (verschiedene Jahre): Fachserie 19 Reihe 2.1.1.
- Sulis, M., Meyerhoff, S. B., Paniconi, C., Maxwell, R. M., Putti, M., & Kollet, S. J. (2010). A comparison of two physics-based numerical models for simulating surface water–groundwater interactions. In *Advances in Water Resources* (Vol. 33, Issue 4, pp. 456–467). <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.01.010>
- Terrapon-Pfaff, J., Ortiz, W., Viebahn, P., Kynast, E., & Flörke, M. (2020). Water Demand Scenarios for Electricity Generation at the Global and Regional Levels. *Water*, 12(9), 2482. <https://doi.org/10.3390/w12092482>
- Teske, S., Pregger, T., Simon, S., Naegler, T., Graus, W., & Lins, C. (2011). Energy [R]evolution 2010—A sustainable world energy outlook. *Energy Efficiency*, 4(3), 409–433. <https://doi.org/10.1007/s12053-010-9098-y>
- Trauth, N., & Haupt, R. (2022). Niedrigwasser in Thüringen – Zeitreihenanalyse von Abflüssen an Fließgewässerpegeln: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung / BfG*. - 66.2022,4. - Seite 178- 188. - ISSN 1439-1783.

- UBA. (2021). Strommarkt und Klimaschutz: Transformation der Stromerzeugung bis 2050. Abschlussbericht. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-02-17_cc_08-2021_transformation_stromerzeugung_2050_0.pdf
- Umweltbundesamt. (2019). Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungs-strategie an den Klimawandel: Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung.
- United Nations. (2022). World Population Prospects 2022. <https://population.un.org/wpp/>
- Urban, B., Becker, J., Mersch, I., Meyer, W., Rechid, D., & Rottgardt, E. (2014). Klimawandel in der Lüneburger Heide: Kulturlandschaften zukunftsfähig gestalten (E. Rottgardt, Ed.; Issue Band 6). TuTech Verl.
- van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. In *Soil Science Society of America Journal* (Vol. 44, Issue 5, pp. 892–898). <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. In *Journal of Climate* (Vol. 23, Issue 7, pp. 1696–1718). <https://doi.org/10.1175/2009jcli2909.1>
- Wegehenkel, M., Heinrich, U., Jochheim, H., Kersebaum, K. C., & Röber, B. (2010). Evaluation of three different regional climate change scenarios for the application of a water balance model in a mesoscale catchment in Northeast Germany. *Advances in Geosciences*, 27, 57–64. <https://doi.org/10.5194/adgeo-27-57-2010>
- Werner, C.-P., Gerstengarbe, F.-W., & Wechsung, F. (2008). Großwetterlagen and precipitation trends in the Elbe river catchment. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(1), 61–66. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0263>
- Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. In *Biometrics Bulletin* (Vol. 1, pp. 80–83).
- WMO. (2012). Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes, D.Wood) [Report]. World Meteorological Organization.
- Wunsch, A., Liesch, T., & Broda, S. (2021). Deep learning shows declining groundwater levels in Germany until 2100 due to climate change. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-420056/v1>
- Zhou, G., Wei, H., & Fu, S. (2019). A fast and simple algorithm for calculating flow accumulation matrices from raster digital elevation. In *Front. Earth Sci.* (Vol. 13, Issue 2, pp. 317–326). <https://doi.org/10.1007/s11707-018-0725-9>
- Zink, M., Kumar, R., Cuntz, M., & Samaniego, L. (2017). A high-resolution dataset of water fluxes and states for Germany accounting for parametric uncertainty. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1769–1790. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1769-2017>
- Zink, M., Samaniego, L., Kumar, R., Thober, S., Mai, J., Schäfer, D., & Marx, A. (2016). The German drought monitor. *Environmental Research Letters*, 11(7). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074002>

6.3 Kapitel 3: Umgang mit Nutzungskonflikten

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (Hrsg.). (2017). Bayerische Klima-Anpassungsstrategie.

BBK. (2022). Vorsorgemaßnahmen zur Sicherstellung der Trinkwassernotversorgung. Merkblatt für die Planung wasserwirtschaftlicher Vorsorgemaßnahmen zur Trinkwassernotversorgung nach dem Gesetz über die Sicherstellung von Leistungen auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft für Zwecke der Verteidigung (Wassersicherstellungsgesetz WasSG), Fassung vom 12.12.2022 zur Anpassung an das Rahmenkonzept Trinkwassernotversorgung. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/KRITIS/planungshilfe-wassersicherstellung.pdf?__blob=publicationFile&v=3

BfG. (2022). Änderung der erneuerbaren Wasserressourcen in Deutschland. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Mitteilung vom 30.09.2022. Abgerufen am 6.11.2023, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#die-wassernutzer>

BMUV. (2023). Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.). (2020). Diskussionspapier zum Thema Nutzungskonflikte. https://www.fresh-thoughts.eu/userfiles/file/Diskussionspapier%20zum%20Thema%20Nutzungskonflikte_03032020.pdf

Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. (2018). Plan Especial de Sequía. Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. Memoria 30 de Mayo 2018. https://www.chguadalquivir.es/documentos/10182/1623748/PES_Guadalquivir_Memoria.pdf

Deutsche Welle. (2020). Corona und Hitze: Wassermangel in Lauenau. <https://p.dw.com/p/3gfjh>

Deutscher Bundestag. (2019). Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018. Unterrichtung durch die Bundesregierung, Drucksache 19/9521. <https://archive.org/details/ger-bt-drucksache-19-9521>

Deutscher Verband für Landschaftspflege e. V. (2021). Verbesserung des natürlichen Wasserrückhaltes in der Agrarlandschaft. Nr. 29 der DVL-Schriftenreihe „Landschaft als Lebensraum“.

Deutscher Wetterdienst. (2018). Deutschlandwetter im Jahr 2018: 2018 – ein außergewöhnliches Wetterjahr mit vielen Rekorden. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181228_deutschlandwetter_jahr2018_news.html

Deutscher Wetterdienst. (2020). Deutschlandwetter im Jahr 2020: 2020 bestätigt als zweitwärmstes Jahr den fortschreitenden Klimawandel. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2020/20201230_deutschlandwetter_jahr_2020_news.html

Deutscher Wetterdienst. (2021). Deutschlandwetter im Jahr 2021: Ein durchschnittliches Wetterjahr—Aber mit extremem Dauer- und Starkregen im Juli.

Deutsches Institut für Normung e. V. (1994). DIN 4049-3:1994-10, Hydrologie_- Teil_3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/2644617>

DWA. (2015). DWA-Themen 2015—Wasserrückhalt in der Fläche durch Maßnahmen in der Landwirtschaft – Bewertung und Folgerungen für die Praxis. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

Europäische Kommission. (2012). Arbeitsunterlage der Kommissionsdienststellen Zusammenfassung der Folgenabschätzung Begleitunterlage zur Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen—Ein Blueprint für den Schutz der europäischen Wasserressourcen {COM(2012) 673 final} {SWD(2012) 382 final}.

- Europäische Kommission. (2022). Statistical regions in the European Union and partner countries: NUTS and statistical regions 2021 (2022 edition). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2785/321792>
- Europäisches Parlament. (2020). Verordnung (EU) 2020/741 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 2020 über die Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung. Amtsblatt der Europäischen Union, L 177, 32–55.
- Geyler, S., Laforet, Lydie, Rüger, J., Nowak, K., Holländer, R., Bertzbach, F., Raehmel, P., Klauer, B., Schulz, A., Schade Carolin, Eichhorn, F., Hofmann, E., Jaklová, K., Petersen, T., Sickert, M., & Wüstneck, T. (2018). Indikatoren für die ökonomische Bedeutung von Wasser und Gewässern. Abschlussbericht. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/indikatoren-fuer-die-oekonomische-bedeutung-von>
- Imbery, F., Friedrich, K., Fleckenstein, R., Plückhahn, B., Brömser, A., Bissolli, P., Daßler, J., Haeseler, S., Rustermeier, E., Ziese, M., Breidenbach, J. N., Fränking, S., Trentmann, J., & Kaspar, F. (2023). Klimatologischer Rückblick auf 2022: Das sonnenscheinreichste und eines der beiden wärmsten Jahre in Deutschland (Deutscher Wetterdienst, Hrsg.). https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/230123/download_jahresueckblick-2022.pdf;jsessionid=310711EEEE42E44D01F6450542F4048E.live21071?__blob=publicationFile&v=1
- International Institution for Public Participation (IAP2). (2018). 20IAP2 Spectrum of Public Participation. https://iap2.org.au/wp-content/uploads/2020/01/2018_IAP2_Spectrum.pdf
- LAWA. (2019). Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel. Abschlussbericht.
- LAWA. (2020). Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft: Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder. https://www.lawa.de/documents/lawa-klimawandel-bericht_2020_1618816705.pdf
- LAWA. (2022). Umgang mit Zielkonflikten bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).
- LAWA-BLANO. (2020). LAWA-BLANO Maßnahmenkatalog (WRRL, HWRMRL, MSRL). Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Nord- und Ostsee (BLANO).
- Leitner, M., Dworak, T., Capela Lourenço, T., Lexer, W., Prutsch, A., & Vanneuville, W. (2020). Rationale, approach and added value of Key Type of Measures for adaptation to climate change (2020/2; Technical Report). ETC/CCA.
- Luis Caparrós-Martínez, J., Rueda-Lópe, N., Milán-García, J., & de Pablo Valenciano, J. (2020). Public policies for sustainability and water security: The case of Almeria (Spain). *Global Ecology and Conservation*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01037>
- Meinert, M. (1987). Grundwasservorratsprognosemethodik. Unveröffentlichter Bericht. VEB Hydrogeologie.
- Ministerium für Umwelt, Klima, Mobilität, Agrar und Verbraucherschutz Saarland. (2023). Zukunftssichere Wasserversorgung. Wasser. https://www.saarland.de/mukmav/DE/portale/wasser/aktuelles/aktuelle-meldungen/2023/q2/pm_2023-07-24_Wasserversorgung.html
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.). (2022). Strategie zum Umgang mit Wassermangel in Baden-Württemberg: Erfordernisse zur Verringerung von Risiken und -Nutzungskonflikten bei Niedrigwasser und -abnehmenden Grundwasserreserven.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (Hrsg.). (2022). Wasserversorgungskonzept Niedersachsen.
- Office International de l'Eau. (2014). Natural water retention measures [dataset]. <http://nwrn.eu/index.php/measures-catalogue>

Paetzel, 2021 (Experteninterview. In Riedel et al. (2021): Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien. Anhang D. (Umweltbundesamt, Hrsg.) Texte | 174/2021, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-01-17_texte_174-2021_niedrigwasser_duerre_und_grundwasserneubildung.pdf

Reese, M., Möckel, S., Bovet, J., & Köck, W. (2016). Rechtlicher Handlungsbedarf für die Anpassung an die Folgen des Klimawandels (2. Auflage). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_07_2016_rechtlicher_handlungsbedarf_fuer_die_anpassung_an_die_folgen_des_klimawandels.pdf

Riedel, T., Nolte, C., aus der Beek, T., Liedtke, J., Sures, B., & Grabner, D. (2021). Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien. (Umweltbundesamt, Hrsg.) Texte | 174/2021, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-01-17_texte_174-2021_niedrigwasser_duerre_und_grundwasserneubildung.pdf

Rüskamp, W. (2015, September 22). Hochschwarzwald: Mancherorts wird das Wasser knapp. Badische Zeitung. <https://www.badische-zeitung.de/hochschwarzwald-mancherorts-wird-das-wasser-knapp--111841125.html>

Sächsische Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.). (2022). Erlass zur Grundwasserbewirtschaftung.

Theiner, J. (2021). Senat gibt Konzept in Auftrag: Bremen will Trinkwasser bis 2050 sichern. <https://www.weserkurier.de/bremen/trinkwasser-bremen-stellt-versorgungskonzept-bis-2050-auf-doc7fbpp8oy3awmg8smcab>

United Nations. (2012). Guidance for Effective Mediation. https://peacemaker.un.org/sites/peacemaker.un.org/files/GuidanceEffectiveMediation_UNDPA2012%28english%29_0.pdf

Wertmann, L. (2021). Anpassung an Trockenheit und Dürre – welche wasserrechtlichen Handlungsmöglichkeiten gibt es? Tagungsbericht zum 367. Wasserrechtlichen Kolloquium des Instituts für das Recht der Wasser- und Entsorgungswirtschaft an der Universität Bonn (IRWE) am 13. November 2020 als virtuelle Webex-Konferenz. *Natur und Recht*, 43(5), 328–329. <https://doi.org/10.1007/s10357-021-3840-4>

6.4 Kapitel 4: Leitplanken für die Wasserwiederverwendung zur Bewässerung im urbanen Raum

Albrecht, M.; Pflieger, I.; Nußbaum, G. (2003). Standpunkt zur Bewässerung in Landwirtschaft und Gartenbau unter besonderer Berücksichtigung Thüringer Produktionsbedingungen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena, 2003.

Australian Health Ministers Conference (2006). National Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks. Natural Resource Management Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council, Australian Health Ministers' Conference, Canberra, 2006. ISBN 1 921173 06 8

Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; et. al. (2019). Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung. Springer, 17. Auflage, Wiesbaden, 2019. ISBN 978-3-658-23221-4

BlueGreenStreets (BGS) (2022). Toolbox – Teil A. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere, Hamburg. Erstellt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft“. ISBN 978-3-947972-45-6

Bundesinstitut für Risikobewertung (2020). Aufbereitete Abwässer: Bakterielle Krankheitserreger auf frischem Obst und Gemüse vermeiden: Stellungnahme Nr. 021/2020 des BfR vom 21. April 2020. Letzter Zugriff am 01.08.2022. DOI 10.17590/20200421-115529

Bundesinstitut für Risikobewertung (2021). Stellungnahme Nr. 009/2021 des BfR vom 15. März 2021: „Höchst-mengenvorschläge für Chrom in Lebensmitteln inklusive Nahrungsergänzungsmitteln“. Letzter Zugriff am 01.08.2022. DOI 10.17590/20210315-143130

Bundesinstitut für Risikobewertung (2022a). Aufbereitete Abwässer: Virale Krankheitserreger auf pflanzlichen Lebensmitteln vermeiden: Stellungnahme Nr. 019/2022 des BfR vom 8. Juli 2022, Letzter Zugriff am 01.08.2022. DOI: <https://doi.org/10.17590/20220708-125409>

Bundesinstitut für Risikobewertung (2022b). Aufbereitete Abwässer: Protozoen auf pflanzlichen Lebensmitteln vermeiden: Stellungnahme Nr. 021/2022 des BfR vom 27. Juli 2022, Letzter Zugriff am 01.08.2022: <https://doi.org/10.17590/20220727-111138>

Bleckmann, F.; Stroh, K.; Sengl, M.; et. al. (2016). UmweltWissen: Schadstoffe - Spurenstoffe im Wasser. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg, 2016.

Deboosere, N.; Pinon, A.; Caudrelier, Y.; et al. (2012). Adhesion of human pathogenic enteric viruses and surrogate viruses to inert and vegetal food surfaces. *Food Microbiology* 32, 48-56, 2012. doi:10.1016/j.fm.2012.04.007

De Vries, W.; Schütze, G.; Lots, S.; et. al. (2002). Critical limits for cadmium, lead and mercury related to ecotoxicological effects on soil organisms, aquatic organisms, plants, animals and humans. Background document for the "Expert meeting on critical limits for heavy metals and methods for their application", Berlin, 2-4 December 2002

De Vries, W.; Lots, S.; Tipping, E.; et. Al. (2007). Impact of soil properties on critical concentrations of cadmium, lead, copper, zinc and mercury in soil and soil solution in view of ecotoxicological effects. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Springer, Berlin, 2007.

Drewes, J.; Karakurt, S.; Schmid, L.; et al. (2018). Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderung für die Trinkwassergewinnung in Deutschland. TEXTE 59/2018, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2018. ISSN: 1862-4804

Elgeti, T.; Durinke, C.; Plate, C. (2023). Der Entwurf der neuen EU-Kommunalabwasserrichtlinie - Was kann, was wird sich ändern?. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* Nr.2, Hennef, 2023. ISSN 1866-0029.

Environmental Protection Agency (EPA) (2012). Guidelines for Water Reuse. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management, Office of Water, Washington D.C., 2012.

Feiler, A. (2022). Schriftverkehr mit Armin Feiler, Dezernat 3 / Grün & Umwelt der Stadt Lübbecke.

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2015). Richtlinien für die Planung, Installation und Instandhaltung von Bewässerungsanlagen in Vegetationsflächen. 2. Ausgabe 2015.

Hermann, F. (2022). Schriftliche Zuarbeit zum Oberflächenwirksamen Abfluss auf NUT-3-Ebene durch Frank Hermann vom Forschungszentrum Jülich.

Halbach, K.; Starke, M.; Kubelt, J.; et. al. (2022). Das Spurenstoffzentrum des Bundes: Struktur und Arbeitsschwerpunkte. Vortrag des Spurenstoffzentrums des Bundes, MARIS Netzwerktreffen, Berlin, 2022.

Jørgensen, C. (2022). Application of hydraulic modelling and quantitative microbial risk assessment (QMRA) for cloudburst management in cities with combined sewer systems. Vortrag im Panel 4.4.3: "MICROBIAL AND CHEMICAL RISKS FOR CITY PLANNING". IWA World Water Congress & Exhibition, Kopenhagen, 2022.

Junghans, V. (2022). Mündliche und schriftliche Zuarbeit durch Dr. rer. agr. Veikko Junghans vom Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften. Speziell die Aufarbeitung der freiverfügbaren KWB Daten des DWD.

Klages, S., U. Schultheiß, et al. (2009): Anforderungen an die Novelierung der Klärschlammverordnung unter besonderer Berücksichtigung von Hygieneparametern. Umweltbundesamt, F. I. 2.6. Dessau-Roßlau, 2009.

Kramer, A.; Schwebke, I.; Kampf, G. (2006). How long do nosocomial pathogens persist on inanimate surfaces? A systematic review. *BioMed Central Ltd, Greifswald*, 2006. doi:10.1186/1471-2334-6-130

Koch, D. (2022). Nährstoffgehalt von Kulturpflanzen. Fachinformation Pflanzenbau. Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, 2022. Letzter Zugriff am 01.08.2022: <https://lh.hessen.de/pflanze/boden-und-duengung/naehrstoffgehalt-von-kulturpflanzen/>

- Kümmerer, K. (2010). Neuartige Spurenstoffe im Wasser – Emerging contaminants in waters. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Jahrgang 54, Heft 6. BfG für Fachverwaltungen des Bundes und der Länder, Rheinbach, 2010.
- Kurths, A.; Schwemmer, C.; Pütz, G. (2017). Handbuch Gute Pflege - Pflegestandards für die Berliner Grün- und Freiflächen. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Referat Naturschutz, Landschaftsplanung und Forstwesen und Referat Freiraumplanung und Stadtgrün, Berlin, 2017.
- LAWA (2019). Herleitung von ökologisch begründeten Orientierungswerten für die Mindestwasserführung von Fließgewässern. Projekt O 8.17 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“. Auftragnehmer Projektteam „umweltbüro essen – chromgruen – Senckenberg“. Essen/Velbert/Gelnhausen, Juni 2019.
- LAWA (2020). LAWA Empfehlung zur Ermittlung einer ökologisch begründeten Mindestwasserführung in Ausleistungsstrecken von Wasserkraftanlagen. 159 LAWA-Vollversammlung, München, 2020.
- LAWA (2022): Endbericht der LAWA-Ad hoc AG/KG Water Reuse an die 163. LAWA-Vollversammlung. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). LAWA, Berlin, 2022.
- McCann, H.; Escriva-Bou, A.; Schwabe, K. (2018). Alternative Water Supplies in California. Public policy institute of California, Sacramento, 2018. Letzter Zugriff: 02.02.2023: <https://www.ppic.org/publication/alternative-water-supplies/>
- Madrid (2023). Agua regenerada: la "M-40" del agua. Offizielle Website der Stadt Madrid, Madrid, 2023. Letzter Zugriff: 02.02.2023: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Gestion/Agua-regenerada-la-M-40-del-agua/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=6c53e1be3cdfd310VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnnextchannel=888d566813946010VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>
- Matzinger, A. (2018). Regenwasser ist Wertvoll. Jahresbericht, Kompetenzzentrum Berlin, 2018.
- Matzinger, A.; Funke, F. Gunkel, M; et al. (2020). Partizipative Regenwasserkonzepte als wirksames Element zur Gestaltung klimaresilienter Städte. Sonderausgabe der Fachzeitschrift WWT, Modernisierungsreport 2019/20, Frankfurt am Main, 2020. ISSN: 1438-5716
- Miehe, U. (2022). Qualitative und quantitative Ansätze der Risikobewertung. Vortrag zum 49. Abwassertechnischen Seminar (ATS) in „Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft Nr. 223. TU München, 2022.
- Morote, Á.-F.; Olcina, J.; Hernández, M. (2019): The Use of Non-Conventional Water Resources as a Means of Adaptation to Drought and Climate Change in Semi-Arid Regions: South-Eastern Spain. In: Water 11 (1), S. 93. DOI: 10.3390/w11010093.
- Petschelt, J. (2022). Persönliche E-Mail Korrespondent. Pressestelle, Robert Koch-Institut, info@rki.de, Berlin, 2022.
- RKI (2023). RKI-Ratgeber. Infektionsschutz. Letzter Zugriff: 22.05.2024: https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Merkblaetter/merkblaetter_node.html
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P.; Amelung, W.; et. al. (2018). Lehrbuch der Bodenkunde. 17. Auflage. Springer-Spektrum Verlag, Berlin, 2018.
- Scherer, U; Fuch, S.; Wander, R.; et. al. (2010). Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS - Nährstoffe, Schwermetalle und Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe“. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Texte 45/2010
- Schwaller, C.; Keller, Y; Helmreich, B.; et.al. (2021). Estimating the agricultural irrigation demand for planning of non-potable water reuse projects. Agricultural Water Management 244. ISSN: 1873-2283
- Schwaller, C. (2022). Risikomanagementansätze im BMBF-Projekt Nutzwasser. Vortrag zum 49. Abwassertechnischen Seminar (ATS) in „Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft Nr. 223. TU München, 2022.
- Seis, W.; Lesjean, B.; Maaßen, S.; et. al. (2016). Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von behandeltem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2016.
- Sieker, H.; Steyer, R.; Büter, B.; et. al. (2019). Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten – Abschlussbericht. Texte 111/2019. Dessau-Roßlau, 2019, Umweltbundesamt. ISSN 1862-4804.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2020). Zahl der Woche Nr. 37. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2020/PD20_37_p002.html. Zugriff: 22.12.2022 08:00 Uhr

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021). Flächennutzung: Fläche für Siedlung nach Nutzungsarten in Deutschland. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/siedlungsflaeche.html> . Zugriff: 22.12.22.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022). Umwelt - Erhebung der öffentlichen Wasserversorgung und öffentlichen Abwasserentsorgung 2019. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt, 2022.

Toshovski, S.; Kaiser, M.; Fuchs, S.; et. al. (2020). Prioritäre Stoffe in kommunalen Kläranlagen. Ein deutschlandweit harmonisiertes Vorgehen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2020.

Umweltbundesamt (2018). Europäische Kommunalabwasser-Richtlinie in Deutschland. <https://kommunales-abwasser.de/> . Zugriff: 23.12.2022

Umweltbundesamt (2020). Gesundheitlicher Orientierungswert – GOW. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/trinkwasser/trinkwasserqualitaet/toxikologie-des-trinkwassers/gesundheitlicher-orientierungswert-gow>. Zugriff: 20.12.23

Umweltbundesamt (2022). Die Wasserrahmenrichtlinie – Gewässer in Deutschland 2021. Fortschritte und Herausforderungen. Umweltbundesamt, Bonn, Dessau, 2022. ISSN 2363-8311

Überschär, K.-H. (2020). Möglichkeiten der Dekontamination: 1, Anorganische Stoffe / Kontaminanten; 1.1, Arsen, Blei, Cadmium und Quecksilber - Vorkommen und Bedeutung der Elemente“. Thünen Institut, 2022. Letzter Zugriff am 01.09.2022: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/zi040830.pdf

Van Beek, J., Koopmans, M. (2013): Introduction to norovirus -Foodborne viruses and prions and their significance for public health. Wageningen Academic Publishers, Niederlande, 2013

Vilanova, E.; Miret, M.; Molinero, J.; et. al. (2012). Decision trees for MAR impact evaluation: Identification of optimum conditions to face emerging pollutants removal in MAR systems. Report of the Demeau project, 2012. Letzter Zugriff am 01.08.2022: www.demeau-fp7.eu

WHO (2012). Water safety planning for small community water supplies. Step-by-step risk management guidance for drinking-water supplies in small communities. Geneva: World Health Organization. Letzter Zugriff am 01.08.2022: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/75145/9789241548427_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y

WHO (2016). Sanitation safety planning: manual for safe use and disposal of wastewater, greywater and excreta. WHO, Genf, 2016.

WHO (2019). Safety and Quality of Water Used in Food Production and Processing. Zugriff 01.09.2022: <https://www.fao.org/3/ca6062en/CA6062EN.pdf>

WHO (2022). Guidelines for drinking-water quality - Fourth edition Incorporating the first and second addenda. Letzter Zugriff am 01.09.2022: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>

Zierath, F. (2022). Schriftverkehr mit Frank Zierath, Werksleiter Eigenbetriebe WABAU, Stadt Baruth/Mark

Rechtsvorschriften:

AbwV (2022). Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV): "Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 20. Januar 2022 (BGBl. I S. 87) geändert worden ist"

BBodSchV (2020). Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). "Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist"

BGewV (2009). Verordnung des Bundesministers für Gesundheit über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung (Badegewässerverordnung – BGewV) StF: BGBl. II Nr. 349/2009

DüMV (2012). Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV): "Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012

(BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist"

EG 178/2002 (2002). Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit.

EU 2020/741 (2020). Verordnung (EU) 2020/ Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 2020 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung.

GrwV (2017). Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung - GrwV). "Grundwasserverordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1044) geändert worden ist"

TrinkwG NL (2011). Besluit van 23 mei 2011, houdende bepalingen inzake de productie en distributie van drinkwater en de organisatie van de openbare drinkwatervoorziening (Drinkwaterbesluit) Zugriff. 01.08.2022: <http://wetten.overheid.nl/BWBR0030111/2015-11-28>

TrinkwV (2021). Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV): "Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. September 2021 (BGBl. I S. 4343) geändert worden ist"

Frankreich (2014). Journal Officiel de la Republique Francaise (JORF) 0153/2014, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/jo/2014/07/04/0153>

Griechenland (2011). Common Ministerial Decision (JMD) 145116/2011)

Italien (2003). Decreto Ministeriale (DM) 185/2003, https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/2003_0185.htm

Portugal (2019). Decreto-Lei n.º 119/2019, <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/119-2019-124097549>

Spanien (2007). Royal Decree 1620/2007, <https://www.asersagua.es/Asersa/Documentos/Spanish%20Regulations%20for%20Water%20Reuse%20EN.pdf>

Zypern (2015). Zypriotisches Gesetz KDP 379/2015

Standards und Normen:

DWA A 102 (2020). Arbeitsblatt DWA-A 102: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 1 & 2.“ DWA, 2. Auflage, Hennef 2020. ISBN: 978-3-7388-0571-0 & 978-3-96862-044-2

DWA A 138-1 (2020). Arbeitsblatt DWA-A 138-1: „Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1: Planung, Bau, Betrieb“. DWA, 1. Auflage, Hennef 2020. ISBN: 978-3-96862-018-3

DWA A 202 (2023). Arbeitsblatt DWA-A 202: „Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser“ DWA, 3. Auflage, Hennef, 2023.

DWA M 285 (2021). Merkblatt DWA-M 285-2: „Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 2: Einsatz von Aktivkohle – Verfahrensgrundsätze und Bemessung“ DWA, 1. Auflage, Hennef, 2021. 978-3-96862-141-8

DWA M 590 (2022). Merkblatt DWA-M 590: „Grundsätze und Richtwerte zur Beurteilung von Anträgen zur Entnahme von Wasser für die Bewässerung“. DWA, 2. Auflage, Hennef 2022. ISBN: 978-3-88721-843-0

DWA-M 1200-3 (Entwurf). Haberkamp, J.; Drewes, J., Fuhrmann, T.; et. al.: Wasserwiederverwendung für landwirtschaftliche und urbane Zwecke in Deutschland – Teil 3: Verwertung von Klarwasser für die Bewässerung in Landwirtschaft, Gartenbau und Grünflächen. Merkblatt DWA-M 1200-3, Hennef, noch unveröffentlicht.

ISO 20760-1:2018 Water reuse in urban areas Guidelines for centralized water reuse system, Part 1: Design principle of a centralized water reuse system, ISO 2018

ISO 20761 (2018). Water reuse in urban areas - Guidelines for water reuse safety evaluation - Assessment parameters and methods. ISO, 2018.

ISO 20426 (2018). Guidelines for health risk assessment and management for non-potable water reuse. ISO, 2018.

ISO 16075-1 bis -5 (2020). Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects. ISO, 2020.

Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) (2016). ÖWAV-Regelblatt 407: Empfehlungen für die Bewässerung. Wien, 2016.