



DRYRIVERS – Ziele, Strategien, Anwendungen und Werkzeuge für ein zu- kunftsfähiges Niedrigwasserrisikomanagement (NWRM)

Abschlussbericht Teil II – Ergebnisendbericht

Version 2025



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

M.Sc. You Wu

M.A. Tim Franke



Zusammenfassung

In DRYRIVERS wurde ein Instrument zur holistischen Niedrigwasserrisikoanalyse entwickelt, das Behörden bei Entwicklung eines transparenten, objektiven und effektiven Niedrigwasserrisikomanagement (NWRM) unterstützt. Zwischen 2022 und 2025 waren die Verbundpartner der Hochschule Magdeburg Stendal (H2M), das umweltbüro essen Bolle und Partner GbR, Limnoplan sowie der Lehrstuhl und das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) und der Lehrstuhl für Technik- und Organisationssoziologie (STO) an dem BMFTR-geförderten Projekt in der WaX-Förderreihe beteiligt. Im vorliegenden ausführlichen Bericht werden die Forschungsergebnisse der Arbeitspakete AP1, AP2, AP 4, AP 5.1. und AP 5.4 dargestellt. AP1 umfasst die netzwerkanalytische und transdisziplinäre Identifikation der für ein NWRM relevanten Akteure an der Selke, der Rur und der Elbe. In AP2 wird der natürliche Wasserhaushalt im Rur-Einzugsgebiet erfasst, der als Datengrundlage für ein Modell zur Kopplung der Grund- und Fließgewässer dient, welches in AP4 für die Niedrigwasserrisikoanalyse entwickelt und getestet wurde. Außerdem wurde eine Strategie für ein systematisches Niedrigwasserrisikomanagement entwickelt (AP 4.4) und risikominimierende Maßnahmen (AP 5.1) werden vorgeschlagen. In AP 5.4 wurde abschließend eine Zukunftswerkstatt Rur durchgeführt.

DRYRIVERS – Ziele, Strategien, Anwendungen und Werkzeuge für ein zukunftsfähiges Niedrigwasserrisikomanagement (NWRM)

Abschlussbericht Teil II – Ergebnisendbericht

Version 2026

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

M.Sc. You Wu

M.A. Tim Franke

Nils Mühlenbrock, B.A.

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und
Wasserwirtschaft

RWTH Aachen University

Mies-van-der-Rohe-Str. 17

D-52056 Aachen



Lehrstuhl für Technik- und Organisations-
soziologie

RWTH Aachen University

Eilfschornsteinstraße 7

D-52062 Aachen



Aachen, im Januar 2026

Inhalt

1	Einleitung	1
2	AP 1 Akteure	2
2.1	Literaturrecherche (AP 1.1.)	3
2.1.1	Natürliches Profil: Zunehmende Trockenheit als klimatisches Problem	4
2.1.2	Government: Akteure, Intermediäre und Institutionen der Klimaanpassung	6
2.1.3	Soziologie: Relevanz von und Zugang zu hydrosozialen Wasserfragen	15
2.2	Vorbereitung der Net-Map Erhebungen (AP 1.2.)	16
2.2.1	Net-Maps als transdisziplinäres und triangulierendes Analyse-Instrument	16
2.2.2	Literaturrecherche zu den Pilotgebieten und Datenpools	19
2.2.3	Akquise von Probanden und Vorbereitung der Net-Map Erhebungen	20
2.3	Durchführung der Net-Map Erhebungen	21
2.4	Auswertung der Net-Map Erhebungen	25
2.4.1	Das Selketal	27
2.4.2	Die Rur	30
2.4.3	Die Elbe	37
3	AP 2 Wasserhaushalt	42
3.1	Untersuchungsgebiet: Rur-Einzugsgebiet	42
3.2	Datengrundlage	43
3.3	Analyse der Wasserhaushaltskomponenten	44
3.3.1	Natürlicher Wasserhaushalt	44
3.3.2	Anthropogene Einflüsse	45
3.3.3	Ökologischer Zustand	48
3.4	Diskussion und Fazit	49
4	AP4.1 + AP4.2 Fließgewässer und Grundwasser	49
4.1	Theoretische Grundlage	49
4.2	Modellkonzept LoFloDes	51
4.2.1	Software Struktur LoFloDes	51
4.2.2	1D-Fließgewässermodell	52
4.2.3	2D-Grundwassermodell	52
4.2.4	Kopplung zwischen Fließgewässer- und Grundwasser-Modellen	53
4.2.5	Kopplung zwischen Grundwasser-Modellen	53
4.2.6	Numerische Berechnung	54
4.3	Modell im Rur-Einzugsgebiet	54
4.3.1	Modellaufbau	54
4.3.2	Methode zur Kalibrierung und Validierung	56
4.3.3	Kalibrierungsergebnisse 2002-2005	58
4.3.4	Validierungsergebnisse 1991-2020	59
4.4	Diskussion	63
4.4.1	Diskussion der Langzeitsimulationsergebnisse	63
4.4.2	Diskussion zur Software-Benutzerfreundlichkeit und weiteren Anwendungsmöglichkeiten	64
4.5	Fazit und Ausblick	65
5	AP4.3 Niedrigwasserrisikoanalyse	66

5.1	Theoretische Grundlage	66
5.2	Daten und Methode	67
5.2.1	Workflow für die Niedrigwasserrisikoanalyse.....	67
5.2.2	Konsequenzenanalyse auf Fischpopulationen	68
5.2.3	Risikoanalyse auf Kühlwasserentnahme	68
5.3	Ergebnisse und Diskussion	69
5.3.1	Risikoanalyse auf Fischpopulationen	69
5.3.2	Risikoanalyse auf Kühlwasser.....	70
5.4	Fazit	71
6	AP 4.4 Niedrigwasserrisikomanagement	71
6.1	Literaturrecherche zur Risikomanagement & -kommunikation	71
6.1.1	Europäischer Niedrigwasserrisikomanagementplan	71
6.1.2	Kritische Fragen zum Niedrigwasserrisikokommunikationsplan.....	73
6.2	Grobe Strategie zur Niedrigwasserrisikomanagement & -kommunikation	75
6.2.1	Niedrigwasser und Dürre.....	75
6.2.2	Niedrigwasserrisiko definieren.....	75
6.2.3	Frühwarnsystem und Indikator	76
6.2.4	Risikomanagementplan.....	77
6.2.5	Akteure im NWRM und die Frage priorisierter Nutzungen	81
6.3	Bewertung der geplanten Strategie zur Risikomanagement & -kommunikation	86
7	AP 5.1 Maßnahmen	87
7.1	Maßnahmenkatalog für das Rur-Einzugsgebiet	87
7.2	Maßnahmen zur Steigerung der Grundwasserneubildung	88
7.3	Evaluierung der Maßnahme (Entsiegelung) in Rur-Einzugsgebiet	89
7.3.1	Methode.....	90
7.3.2	Ergebnis.....	91
7.3.3	Diskussion.....	94
8	AP 5.4 Zukunftswerkstatt	95
8.1	Selke	96
8.2	Rur	99
8.3	Elbe.....	101
9	Literaturverzeichnis.....	103

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Modell sektoralen Wandels.	3
Abbildung 2: Die Definition von Dürrephasen des DWD-Glossars	5
Abbildung 3: Schematische Darstellung flussrelevanter Akteure, die auf globaler, europäischer und auf Bundesebene relevant sein können.....	7
Abbildung 4: Vereinfachtes Organigramm der Wasserpolitik in Deutschland.....	8
Abbildung 5: Forschungsdesign für die Erhebung der Net-Maps an der Selke, Rur, Elbe.....	18
Abbildung 6: Recherchiertes Netzwerk von Akteuren an der Selke.	19
Abbildung 7: Akteursverteilung im recherchierten Selke-Netzwerk.	19
Abbildung 8: Das Miro-Board zur Entwicklung der Netzwerkkarten.	20
Abbildung 9: Darstellung der gezeichneten Netzwerkkarten an der Rur.	23
Abbildung 10: Darstellung des Vorgehens bei der Auswertung der Net-Map-Erhebungen. ..	25
Abbildung 11: „Die Selke am Falkensteiner Weg.“.....	27
Abbildung 12: Akteursverteilung an der Selke	27
Abbildung 13: Das Netzwerk an der Selke nach der 2. Erhebung.....	28
Abbildung 14: Akteursverteilung an der Rur.	31
Abbildung 15: Netzwerk an der Rur.	32
Abbildung 16: Akteursverteilung an der Elbe.	37
Abbildung 17: Netzwerk an der Elbe.....	40
Abbildung 18: Die Lage des Einzugsgebiets des Flusses Rur mit den Staatsgrenzen. (Eurostat 2024).....	43
Abbildung 19: Fließgewässersystem (links) und Grundwassersystem (rechts) im Rur- Einzugsgebiet.	45
Abbildung 20: Prozentuale Verteilung der Wassernutzung in Bezug auf Aachen, Düren und Heinsberg für 2022. Eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen 2025.....	46
Abbildung 21: Gesamte Wasserversorgung (öffentlich + nicht öffentlich) nach der Quelle und der Stadt für das Rur-Einzugsgebiet für das Jahr 2022.....	46
Abbildung 22: Ökologischer Zustand der Rur nach 4. Monitoringzyklus. Eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Land NRW 2024.....	48
Abbildung 23: Ein konzeptioneller Modellierungsrahmen für das HYD-Modell in LoFloDes mit Integration des LoFloDes QGIS-Plugin	51
Abbildung 24: Die Entwicklung des gekoppelten Modells im Rur-Einzugsgebiet.....	55
Abbildung 25: Vergleich der simulierten und beobachteten Flusswasserstände (RV) an den Pegeln Selhausen, Altenburg, Jülich, Linnich und Stah für den Zeitraum 1992– 2020.	60
Abbildung 26: Vergleich der simulierten und beobachteten Grundwasserkonturkarten für den durchschnittlichen Grundwasserstand im Zeitraum 1991–2020 sowie für die jährlichen Grundwasserstände der Jahre 2001 und 2018.	61
Abbildung 27: Vergleich der simulierten und beobachteten Grundwasserstände (GW) an den Messstellen 10304307, 10406323, 10201142, 10305981, 10202237 und 10201233 für den Zeitraum 1992–2020.	62
Abbildung 28: Simulierte mittlere tägliche Grundwasser–Flusswasser-Austauschraten (m/s) an den Kopplungspunkten entlang des Rur-Abschnitts für den Zeitraum 1992–	

	2020 (links); simulierte aufsummierte mittlere tägliche Grundwasser– Flusswasser-Austauschraten entlang des Rur-Abschnitts für den Zeitraum 1992–2020 (rechts).....	63
Abbildung 29:	Workflow zur Berechnung der Niedrigwasserrisikoanalyse (Satzinger and Bachmann 2024)	67
Abbildung 30:	Gewässerstruktur entlang der unteren Rur. Eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Land NRW 2024.	68
Abbildung 31:	Simulierte Niedrigwasserauswirkungen auf die Fischpopulation entlang der unteren Rur (1991-2020) im Vergleich zwischen Modellen mit Grundwasserzufluss (mit GW) und ohne Grundwasserzufluss (ohne GW)	70
Abbildung 32:	Simulierte Niedrigwasserauswirkungen auf die Kühlwasserentnahme bei der Weisweiler Kraftwerk (1991-2020) im Vergleich zwischen Modellen mit Grundwasserzufluss (mit GW) und ohne Grundwasserzufluss (ohne GW)	70
Abbildung 33:	Die Zeitreihe von SPI 6 und SPI 12 für den Rur-Einzugsgebiet zwischen 1991- 2021 (von oben nach unten)	77
Abbildung 34:	Schematische Darstellung des Niedrigwasserrisikomanagements in DRYRIVERS.	77
Abbildung 35:	Darstellung von Risikokommunikationsstrategien zwischen diversen Stakeholder-Gruppen.	81
Abbildung 36:	Identifizierung der organisatorischen Gruppe und Priorisierung der Wassernutzung im Rur-Einzugsgebiet.	86
Abbildung 37:	Landnutzung des Einzugsgebiets und resultierende Abflussbeiwert-Raster (Urmetzer 2025)	91
Abbildung 38:	Jahressummen der GWN für 2011 (Urmetzer 2025).....	92
Abbildung 39:	Simulierte Grundwasserstände am Beobachtungspunkt in Jülich und Linnich im Zeitraum von 2010 bis 2012 (Urmetzer 2025)	93
Abbildung 40:	Simulierte Flusswasserstände am Beobachtungspunkt in Jülich und Linnich im Zeitraum von 2010 bis 2012 (Urmetzer 2025).....	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht und Verantwortlichkeiten für die APs.....	2
Tabelle 2: Ziele des AP 1 (STO).....	4
Tabelle 3: In der DAS (BMUKN 2024) festgelegte Cluster. Sie geben Hinweise darauf, welche gesellschaftlichen Akteure vom Klimawandel betroffen sein können.	9
Tabelle 4: Auswahl intermediärer Institutionen und Programme	11
Tabelle 5: Darstellung von Konflikttypen nach Zehetmair (2012, 220-230; 2013).	13
Tabelle 6: Übersicht über die Net-Map-Erhebungen im Forschungsprojekt DRYRIVERS	22
Tabelle 7: In den Net-Map-Erhebungen erfragte Informationen und deren Darstellung.	23
Tabelle 8: Kritik an Net-Maps als Methode und Optimierungspotenzial.	24
Tabelle 9: Übersicht über die in den Net-Maps erhobenen Variablen	26
Tabelle 10: Übersicht über die Publikationen in DRYRIVERS	26
Tabelle 11: Zentrale Akteure im Selke Netzwerk	28
Tabelle 12: Zentrale Akteure im Rur-Netzwerk.	33
Tabelle 13: Zentrale Akteure im Netzwerk an der Elbe.	39
Tabelle 14: Wichtige Datengrundlage zum Niedrigwasserrisikomanagement.	43
Tabelle 15: Übersicht über die Modellparameter des HYD-Modells in LoFloDes.	51
Tabelle 16: die final Kalibrierte Parameter für das Grundwasser- und Flussmodell	58
Tabelle 17: Statistische Kennwerte (RMSE, R ²) für die Grundwasser- und Flussmodelle im Kalibrierungszeitraum (2003–2004).....	59
Tabelle 18: Vergleich der Langzeitsimulationsergebnisse zwischen dieser Studie und Chen et al. (2020).....	65
Tabelle 19: Einteilung der Dürrekategorien anhand des SPI-Werts. (McKee et al. 1993)	76
Tabelle 20: ausgewählte Maßnahmen zur Niedrigwasserminderung von Riedel et al. (2021) für das Rur-Einzugsgebiet.....	87

Abkürzungsverzeichnis

AMK Agrarministerkonferenz	HWRM Hochwasserrisikomanagement
AP Arbeitspaket	HWS Hochwasserschutz
ATT Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V.	IWRM Integrated Water Resource Management
BBK Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe	IKSE Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde	KWRA Klimawirkungs- und Risikoanalyse
BMDV Bundesministerium für Digitales und Verkehr	LAWA Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
BMI Bundesministerium des Innern und für Heimat	LHW Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen Anhalt
BMUB Bundesministerium für Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit	NABU Naturschutzbund Deutschland
BMVD Bundesministerium für Verkehr und Digitales	NHWSP Nationales Hochwasserschutzprogramm
BMUKN Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit	NIWIS Niedrigwasserinformationssystem
BUND Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland	NWRM <i>Niedrigwasserrisikomanagement</i> Niedrigwasserrisikomanagement
DAS Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel	NWS Nationale Wasserstrategie
DKD Deutscher Klimadienst	OWB Obere Wasserbehörde
DWA Deutsche Vereinigung Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall	PLE Planungseinheit
DWD Deutscher Wetterdienst	SH Sachsen-Anhalt
DVGW Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches	StAAFK Ständiger Ausschuss „Anpassung an die Folgen des Klimawandels“
FEG Flusseinzugsgebiet	UBA Umweltbundesamt
FGG Flussgebietsgemeinschaft	UWB Untere Wasserbehörde
GKE Gesamtkonzept Elbe	VKU Verband kommunaler Unternehmen
GDWS Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt	WHG Wasserhaushaltsgesetz
HRB Hochwasserrückhaltebecken	WPLDWF Wiedereinbürgerungsprogramm für Langdistanzwanderfische
	WRRL Wasserrahmenrichtlinie
	WSA Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
	WWF World Wide Fund for Nature
	ZKA Zentrum KlimaAnpassung

1 Einleitung

Das Projekt DRYRIVERS verfolgt das Ziel, ein praxisgerechtes Werkzeug zu entwickeln, das Behörden im Niedrigwasserrisikomanagement (NWRM) effektiv, objektiv und transparent unterstützen kann. Dazu tragen die beiden RWTH-Institute Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) sowie der Lehrstuhl für Technik- und Organisationssoziologie (STO) bei.¹

Niedrigwasser wird durch die jährlichen Mindestabflüsse charakterisiert und tritt typischerweise während der Sommermonate eines Jahres auf. Es zeichnet sich durch niedrige Wasserstände in den Oberflächengewässern aus, die nicht nur durch klimatische Bedingungen wie Niederschlagsdefizite beeinflusst werden, sondern auch durch die Interaktion zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser geprägt sind. Dabei spielt das Grundwasser sowie seine Dynamik eine wichtige Rolle bei der Simulation der Oberflächengewässerdynamik und der Niedrigwasserrisikoanalyse. In diesem Zusammenhang konzentriert sich das IWW auf die Entwicklung eines Grundwassermoduls zur Simulation des flussnahen Grundwasserkörpers und dessen Interaktion mit dem Fließgewässer für Langzeitsimulationen (AP 2). Das entwickelte Modul wird im Untersuchungsgebiet des Rur-Einzugsgebiets getestet und validiert, um eine robuste und stabile hydrodynamische Simulation der Oberflächengewässer zu gewährleisten. Die berechneten hydraulischen Ergebnisse fließen in die Niedrigwasserrisikoanalyse unter Verwendung der an der Projektpartner entwickelten Methode ein. Anschließend soll eine Strategie für das Niedrigwasserrisikomanagement (AP 4) entwickelt werden.

Maßnahmen im Niedrigwasserrisikomanagement (von anthropogenen und baulichen Maßnahmen bis zur Risikokommunikation) betreffen unterschiedliche, lokale Akteursgruppen. Dabei können „Government-“ und „Governance-“ relevante Akteure unterschieden werden (Wilson et al. 2019). Die Government-Ebene umfasst staatliche, administrative, und legislative Institutionen (d.h. Untere und Obere Wasserbehörde, Ministerien des Bundes und der Länder, aber auch die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und das Wasserhaushaltsgesetz (WHG)), die entlang verschiedener Flusseinzugsgebiete (FEG) nur in geringem Maße variieren. Die Governance-Ebene hingegen umfasst alle lokalen Akteursgruppen, die lokal mit den Fließgewässern assoziiert sind. Neben politisch-administrativen Institutionen ist auch jede andere Form der Wassernutzung (industriell bis touristisch) impliziert. Seitens STO werden daher die Wassergovernance-Netzwerke in den Pilotgebieten identifiziert, die eine Übersicht über die lokal-relevanten Akteure für ein NWRM geben (AP 1). Der Perspektive der politischen Ökologie folgend (Gottschlich et al. 2022), werden dabei menschliche, nicht-menschliche und institutionelle Akteure berücksichtigt. Schließlich werden ausgehend von den identifizierten Netzwerken partizipativ Zukunftsszenarien des NWRM-Managements erörtert (AP 5.4.).

Der Abschlussbericht stellt die Ergebnisse der Arbeitspakete (AP) dar, an denen IWW und STO beteiligt waren und zu denen sie beigetragen haben. Dazu wird der Bericht nach APs gegliedert (s. Tabelle 1).

¹ Kurzdarstellungen des Projekts sind Satzinger/Bachmann (2024), Satzinger et al. (2023) und Satzinger et al. (2025) zu entnehmen.

Tabelle 1: Übersicht und Verantwortlichkeiten für die APs.

Arbeitspaket (AP)	Teil-AP	Kapitel	IWW	STO
AP 1 Akteure	AP 1.1 Literaturrecherche	2		
	AP 1.2 Vorbereitung der Net-Map-Erhebungen			
	AP 1.3 Durchführung der Net-Map Erhebungen			
	AP 1.4 Auswertung der Net-Map-Erhebungen			
AP 2 Wasserhaushalt	AP 2.1 Natürlich	3		
	AP 2.2 Anthropogen			
AP 4 Niedrigwasser-Risikomanagement	AP 4.1 Fließgewässer	4		
	AP 4.2 Grundwasser	5		
	AP 4.3 Risikoanalyse	6		
	AP 4.4 Risikomanagement & -kommunikation	7		
AP 5 Zukunft	AP 5.1 Maßnahme	8		
	AP 5.4 Zukunftswerkstatt			

2 AP 1 Akteure

Ausgangspunkt des Arbeitspakets (AP) 1 bildete Dolatas (2007) Modell zur Analyse des sektoralen Wandels², mit dem in DRYRIVERS die Einführung neuer Technologien (z. B. neue Risikomanagementsysteme) sowie der Klimawandel und dessen Folgen betrachtet werden sollten. Die Prämisse ist, dass Veränderungen des hydrologischen Wasserdargebots sowie die in Frequenz und Intensität zunehmenden meteorologischen Wetterextreme Adaptionen auf bestehende Technologien, Infrastrukturen und das Risikomanagement ausüben (s. Abb. 1).

Im ursprünglichen Modell sektoraler Anpassung ergibt sich ein sektorales „Transformationsprofil“ aus der Eingriffstiefe des Wandlungsimpulses und der Adaptionenfähigkeit eines Sektors (Dolata 2007). Der Klimawandel zeigt sich als kontinuierlich zunehmender, universeller, exogener Adaptionen- und Transformationsdruck, der fast alle Bereiche des gesellschaftlichen Lebens betrifft. Demgegenüber ist die Adaptionen- und Transformationsfähigkeit der in DRYRIVERS betrachteten Wassergovernance und des Risikomanagements vergleichsweise gering: Erstens sind Fluss- und Risikomanagementpraktiken stark institutionalisiert, bürokratisiert und das Flussgebietsmanagement ist komplex und eher unflexibel.³ Zweitens bestehen für die exogenen Treiber, hier: langanhaltende Dürren, in Deutschland kaum historisch-naheliegende Referenzpunkte (UFZ 2025). Drittens sind die betroffenen Flussinfrastrukturen eher transformationsresistent, da es sich um weitreichende und komplexe Systeme handelt, und, weil (Um-)Bauvorhaben dieser Größenordnung (Staudämme, Rückhaltebecken etc.) kostenaufwendig und verfahrensrechtlich schwer zu realisieren sind. Treffen Bedingungen einer hohen sektoralen Eingriffstiefe bei gleichzeitig geringer sektoraler Adaptionenfähigkeit aufeinander, spricht Dolata von „transformationsresistenten sektoralen

² Dolatas Modell fokussiert technikinduzierte Wandlungsprozesse, in denen sich das „technologische Profil“ verändert, das den Handlungsspielraum von Akteuren konstituiert – etwa durch das Aufkommen neuer Technologien (z.B. MP3) – und Adaptionenprozesse in bestehenden Sektoren auslöst. In DRYRIVERS wurden prozessorientierte, netzwerkanalytische Instrumente herangezogen und ausgearbeitet, die konkrete Transformationsprozesse empirisch erfassen. Das Modell sektoralen Wandels wurde angepasst, um nicht nur technikinduzierte, sondern auch klimatische, infrastrukturelevante Transformationen zu erfassen.

³ Während Märkten gewinnorientiert sind, können im Flussgebiets- und Wassermanagement heterogene, zum Teil sich widersprechende Anforderungen (z. B. Umweltschutz versus Hochwasserschutz) bestehen.

Pfadabhängigkeiten“, die nahelegen, dass sich entsprechende Sektoren tendenziell krisenhaft transformieren (ebd.: 37).⁴ Um erzwungene, krisenhafte Transformationen im Wasser- und Dürrerisikomanagement vorzubeugen, scheinen daher frühzeitige Interventionen angebracht.

Transformationsprozesse, wie die in DRYRIVERS erforschte Einführung eines Niedrigwasserrisikomanagement (NWRM), sind abhängig von lokalen Gegebenheiten: Lokale Unterschiede zeigen sich etwa in den ökologischen und hydrologischen Gegebenheiten der Flusseinzugsgebiete sowie in dem Grad

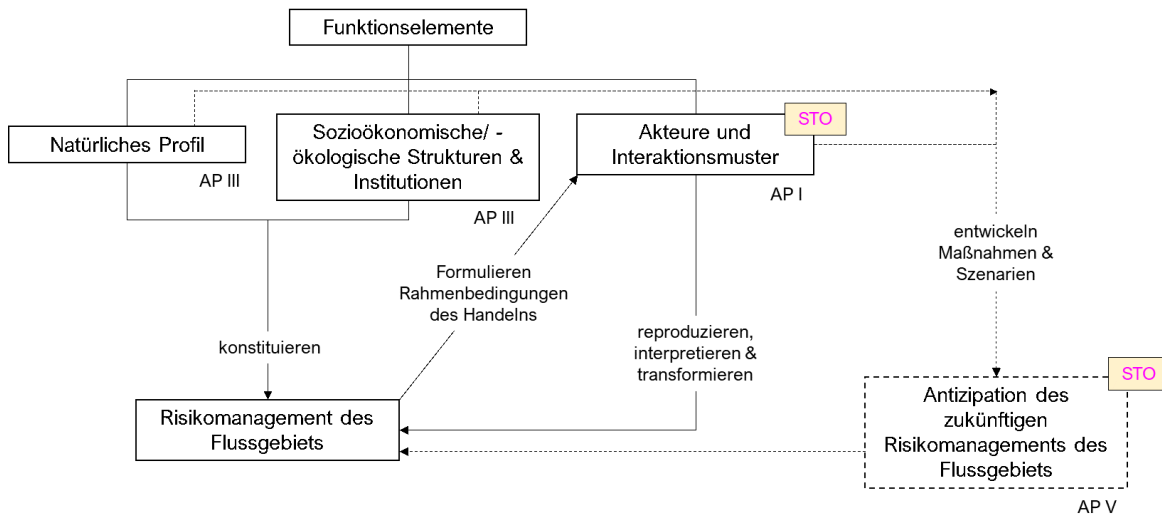


Abbildung 1: Das Modell sektoralen Wandels.

(Angepasst auf DRYRIVERS. Eigene Darstellung angelehnt an Dolata (2007: 25) entnommen aus der TVB.)

der Klimawandelanpassung der jeweiligen Kommunen, Kreise und Länder. In DRYRIVERS werden daher in „AP 1 – Akteure“ Netzwerke erhoben, die flussgebietspezifische, für ein NWRM-relevante Akteure zu identifizieren, sowie ihre Verbindungen untereinander herauszuarbeiten. So werden sozial-ökologische Netzwerke⁵ identifiziert, in die das potenzielle NWRM einzubetten ist.

2.1 Literaturrecherche (AP 1.1.)

Ziel des APs 1.1. ist es, anhand einer Literaturrecherche potenziell NWRM-relevante Akteure in den Pilotgebieten der Selke, Rur sowie der Elbe zu identifizieren. Zusätzlich zu relevanten *Government*-Akteuren (z. B. administrative Institutionen, Behörden, etc.) sollen konkrete, lokale Akteure sowie deren Beziehungen identifiziert werden. Als Orientierung dient die Umsetzung der Hochwasserrahmenrichtlinie (HWRRL) und das Hochwasserrisikomanagement der HWRRL.

⁴ Andere Transformationsmodelle, wie die Multi-Level-Perspective (MLP) von Geels (2002), stellen den klimawandelbedingten Adaptionsdruck deutlicher heraus (s. Kap. 2.4.2.).

⁵ Die hier verwendeten, relationalen Transformations- und Innovationsmodelle fokussieren sozio-technische Interaktionsprozesse zwischen Menschen und Organisationen, Technologien und Infrastrukturen, die sich reziprok aufrechterhalten und permanent reproduzieren. Sie sind dabei prozessual und ontologisch „nicht-reduktiv“ angelegt, d.h. sie implizieren menschliche und nicht-menschliche Entitäten. Sie unterscheiden sich darin von bestehenden ökonomischen Ansätzen, die Flüsse primär als Ressource oder Ökosystemdienstleistung betrachten, und sehen diese – posthumanistischer – als ebenso wirksame Teile des Ganzen.

Tabelle 2: Ziele des AP 1 (STO)

- Identifikation relevanter Akteure im NWRM und verwandter Fachbereiche
- Analyse potentieller Beziehungen zwischen identifizierten Interessengruppen
- Recherche relevanter Akteure in den drei Pilotgebieten
- Evaluation potentieller Beziehungen zwischen den Akteuren in lokalen Kontexten
- Vergleich und Zusammenführung der Erkenntnisse aus der Literatur und den drei Pilotgebieten
- Aufbereitung der Ergebnisse für die durchzuführenden Net-Map-Erhebungen

Folgend werden meteohydrologische und gesellschaftliche Kontexte eines zu entwickelnden NWRM dargestellt. Differenziert werden (1) der Government-Kontext, in dem die historischen, politischen und legislativen Bedingungen und Meilensteine dargestellt werden. Hinzukommen (2) erdsystemische, hydrologische und meteorologische Kontexte, insbesondere bezüglich klimawandelbedingter Hitze- und Dürreperioden, und (3) die bestehenden soziologischen Forschungslücken im Kontext von Dürren.

2.1.1 Natürliches Profil: Zunehmende Trockenheit als klimatisches Problem

Laut Ressourcenbericht 2022 des UBA halbierte sich der Wasserverbrauch Deutschlands zwischen 1991 und 2016 von 46 auf 24 Mrd. m³. Insgesamt würden derzeit jährlich 13% des langjährigen Wasserdargebots entnommen, was unterhalb des „Kritischen Wassernutzungs-Index“ läge (UBA 2022: 14).⁶ Als größte Entnehmer werden hier – Stand 2016 – der Energiesektor aufgeführt, der Kraftwerke kühlt (53%), der Bergbau und das verarbeitende Gewerbe (24%), die öffentliche Wasserversorgung (22%) sowie die Landwirtschaft (1%) (ebd.).⁷ Die öffentliche Wassergewinnung erfolgt über Grundwasserentnahmen (61,2%) – unmittelbare Entnahmen aus Fließgewässern sind die Ausnahme (1,2%). Nichtsdestotrotz werden Fließgewässer u.a. für die Trinkwassergewinnung gestaut (etwa an der Rur). Daher sind indirekt auch Entnahmen über Talsperren (12,3%) für Niedrigwasserphasen relevant. Mit circa 20% der Gesamtwassergewinnung ist der Anteil des Verbrauchs privater Haushalte (gegenüber der Energiegewinnung und dem Bergbau) vergleichsweise klein. Anders als in anderen Bereichen bleibt der Anteil der öffentlichen Wasserversorgung hingegen konstant.

Deutschland galt lange als wasserreiches Land; Wasserknappheiten und Dürren galten als Ausnahme. Im Dürremonitor sind (ausgenommen 1976) bis 2013 keine terrestrischen Trockenperioden zu verzeichnen (UFZ 2025). Zwischen 2017 und 2023 verzeichnet der Dürremonitor ernstzunehmende Austrocknungen des Gesamtbodens. Anhand des Dürremonitors wird ersichtlich, dass Wasserknappheiten ungleich verteilt sind: Nicht jede Region ist gleichermaßen und zur gleichen Zeit von Dürreperioden betroffen. Grund- und Fließgewässer stehen in wechselseitigem Austausch (s. Kap. 4), weshalb auch

⁶ Wenn der Wassernutzungsindex von 20% der ‚erneuerbaren Wasserressourcen‘ – in Deutschland laut UBA (2025a) 176 Mrd. m³ – überschritten wird, also mehr als ca. 35 Mrd. m³ Wasser entnommen wird, steigen die Risiken für Umwelt und Wirtschaft. Seit ca. 2004 liegen Entnahmemengen unterhalb des kritischen Werts.

⁷ Aktuelle Wasserentnahmen: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffmaterialfluesse-wasser/Tabellen/einsatzbereiche-wasser.html?templateQueryString=Wasser#Fussnote1>

Grundwasserentnahmen Fließgewässer beeinflussen. Der BUND (2025: 23) weist Regionen mit strukturellem und akutem Grundwasserstress⁸ aus. Grundwasserentnahmen werden insbesondere in den in DRYRIVERS untersuchten Pilotgebieten Rur und Elbe als weitreichend identifiziert. Im Kreis Düren wird der Grundwasserstress als ‚akut‘ ausgewiesen (ebd.). Aus einer Umfrage des Verbands kommunaler Unternehmen (VKU) im Sommer 2025 geht hervor, dass kommunale Wasserversorger insbesondere in Hitzeperioden, in denen es zu saisonalen Nachfragespitzen kommt, bereits in den vergangenen Jahren mit „infrastrukturellen“ oder „ressourcenseitigen“ Engpässen zu kämpfen hatten (29% der befragten Unternehmen). (VKU 2025) Mit Nutzungseinschränkungen und behördliche Einschränkungen in Hitzeperioden sind 25% der befragten Unternehmen vertraut. Den Klimaprojektionen des IPCC (Calvin et al. 2023: 51) zufolge, nimmt die Frequenz von Hitzewellen im Klimawandel weltweit zu. Somit stehen in Deutschland verfügbare aquatische Ressourcen zunehmend unter Druck.

Dürren sind nicht gleichzusetzen mit Niedrigwasserperioden, stehen aber in Zusammenhang mit diesen. Der DWD unterscheidet die „meteorologische Dürre“, die „landwirtschaftliche Dürre“, die „hydrologische Dürre“ sowie die „sozio-ökonomische Dürre“ (DWD, o.A.).

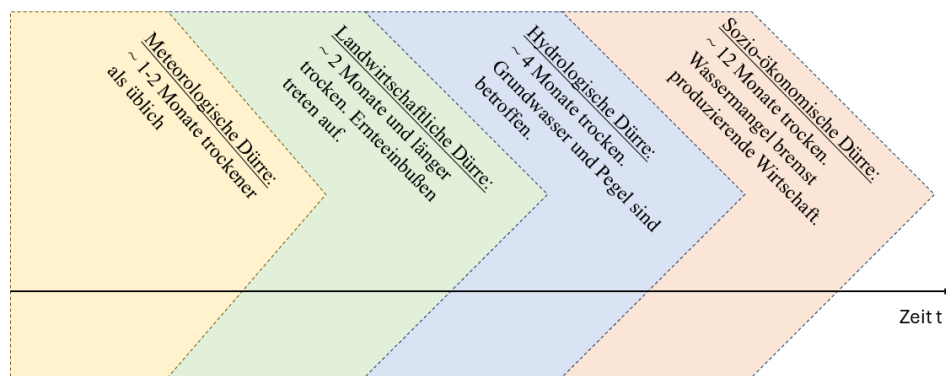


Abbildung 2: Die Definition von Dürrephasen des DWD-Glossars (eigene Darstellung auf Basis des DWD-Glossars).

Der Dürremonitor zeigt, dass Dürreperioden weder singuläre Ereignisse sind, noch dass sie linear verlaufen. (UFZ 2025) Während es historische Dürreperioden vereinzelt auftraten (etwa 1976), belasten Dürreperioden seit 2017 natürliche und künstliche (Grund-)Wasserspeicher, sodass kumulative Effekte auftreten und Regenerationsphasen ausbleiben. Es können regionale Unterschiede in dem Grad der Betroffenheit auftreten. Der *Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI)* (Begueira et al., o.A.) zeigt, wie stark sich hydrologisch-meteorologischen Bedingungen regional und temporal unterscheiden. Während die südeuropäischen Staaten (z.B. Spanien, Italien, Griechenland) 1976 wasserreiche Sommermonate aufwiesen, traten in nordeuropäischen Staaten (z.B. England, Dänemark) Trockenperioden auf. Auch in dem „Dürrejahr“ 2018, indem Deutschland stark von Trockenheit betroffen war, war es in Südosteuropa – zumindest im Juli des Jahres – vergleichsweise nass.

⁸ „Struktureller Grundwasserstress wird angenommen, wenn die Grundwasserentnahmen 20% der langjährigen Grundwasserneubildung übersteigen. Akuter Grundwasserstress wird durch rezente, signifikante Absenkungen der Grundwasserstände identifiziert.“ (BUND 2025: 5)

2.1.2 Government: Akteure, Intermediäre und Institutionen der Klimaanpassung

Die *Governance*-Forschung unterscheidet *Governance* von *Government*. *Government*-Ansätze fokussieren historisch-gewachsene, formal-organisationale Regeln und institutionelle Rahmen des Wassermanagements, die politisch definiert und strukturiert werden.⁹ Forschung zur *Wasser-Governance* hingegen beinhaltet:

„[...] a wide range of considerations over how the circulation of water is animated by formal institutional structures as well as everyday negotiations, contestations, and conciliations between actors. These dynamics are embedded both within historical and geographical contexts as well as broader preferences and managerial practices of institutions.“ (Wilson et al. 2019)

Die *Governance*-Forschung fokussiert lokale geografische, historische Gegebenheiten, Akteurskonstellationen und Aushandlungsprozesse. Folgend wird die staatliche Organisation und Regulierung der Wasserbewirtschaftung (*Government*) beschrieben, die den Rahmen für Aushandlungsprozesse auf der *Governance*-Ebene bilden. Anschließend werden konkrete, lokale und kommunale Wasserbewirtschaftungs- und Wassernutzungsprozesse (*Governance*) dargestellt.

Wichtige Akteure, Verbände und Strategien zur Wasserregulierung auf Ebene des Bundes

Auf Bundes- und Landesebene ergibt sich ein Bild heterogener Akteure mit unübersichtlichen Zuständigkeiten, die unterschiedlich stark institutionalisiert sind, und, die Informationsbeschaffende, -verarbeitende und -bereitstellende Aufgaben übernehmen. Wenn es um die Koordination wasserrelevanter Projekte geht, sind Verantwortlichkeiten formal klarer verteilt, etwa auf *oberste* (Landesebene), *obere* (ggf. Bezirksebene) und *untere* Wasserbehörden. Auf Bundesebene übernimmt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUKN) über das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) sowie die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wesentliche rahmensetzende Funktionen der Wasserbewirtschaftung. Ausnahmen bilden die größeren Wasserstraßen (z.B. Elbe, Rhein, Donau...), deren Bewirtschaftung sowie der Binnenschifffahrt, die auf den Flüssen stattfinden, das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), die Generaldirektion Wasserstraßen- und Schifffahrt (GDWS) und die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) übernehmen.

Zusätzliche intermediäre Institutionen, Beteiligungsformate und Informationsplattformen, wie etwa der „Nationale Wasserdialog“, die „KliVo“ oder das „Zentrum Klimaanpassung“ (s. Tab. 4), bilden die Schnittstellen zu angrenzenden politischen und wissenschaftlichen Feldern sowie zur Öffentlichkeit. Je nach FEG unterscheiden sich zuständige administrativen Institutionen (z.B. Bezirksregierungen oder kommunale Verwaltungen und Naturschutzämter) und lokale Akteure in ihrer Relevanz, Präsenz und in ihren Einflussmöglichkeiten (s. Kap. 2.4). An Wasserstraßen wie der Elbe können nationale, z.T. globale Institutionen lokalisiert sein, wie bspw. die ‚Elbeallianz‘ oder der ‚Bundesverband deutscher Binnenschifffahrt e.V.‘. Aber auch für kleinere Flüsse können sich auf Bundesebene vernetzte Akteure wie „Greenpeace“, der „NABU“ oder der „BUND“ interessieren. Abb. 8 stellt eine schematische Übersicht über theoretisch relevante Akteure dar.

⁹ „A focus on government and management invites attention to politics as the formal regulation of water, inter-jurisdictional negotiations or outcomes of policies. Such an orientation often also implies that better information and sharing of scientific data will solve problem x or y.“ (Wilson et al. 2019).

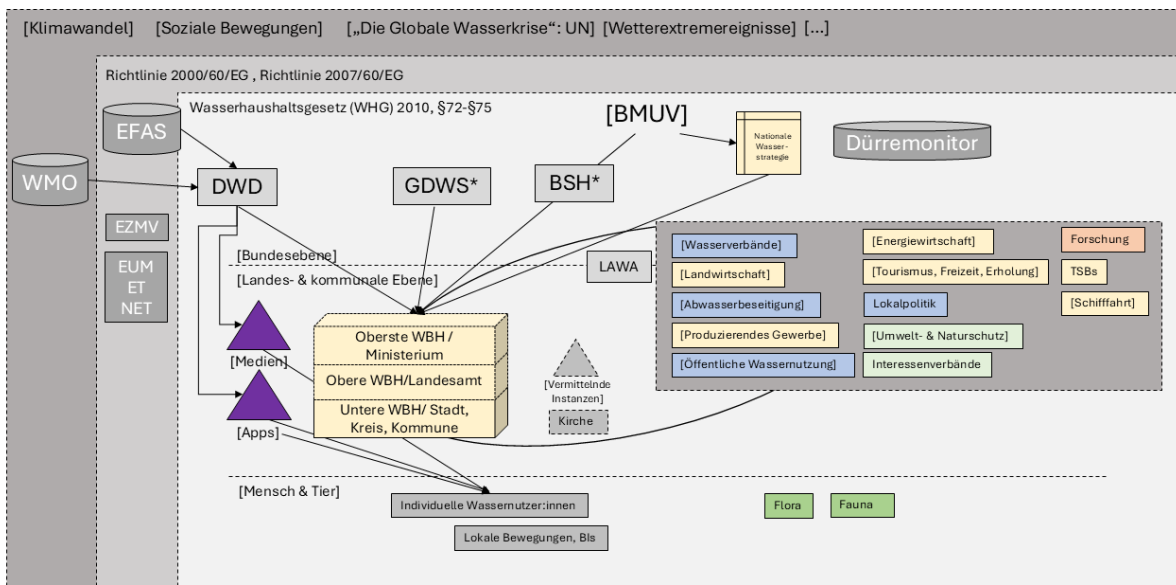


Abbildung 3: Schematische Darstellung flussrelevanter Akteure, die auf globaler, europäischer und auf Bundesebene relevant sein können (eigene Darstellung).

Auf höchster regulatorischer Ebene bildet die Europäische Richtlinie 2000/60/EG „zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik“, die sog. Wasser-rahmenrichtlinie (WRRL), den wasserpolitischen Bezugspunkt europäischer Mitgliedsstaaten. Hier werden relevante Leitlinien gesetzt und Bedingungen formuliert.¹⁰ Politisch kann die Initiierung und Umsetzung der WRRL als ‚Top-Down‘-Reformprozess betrachtet werden. Das Gesetzesvorhaben wurde ausgehend vom europäischen Parlament und dem Rat zunächst in nationales Recht übersetzt (WHG – Wasserhaushaltsgesetz) und zur Umsetzung über die Bundes- und Landesministerien, Fachbehörden bis hin zu kommunalen Verwaltungsstrukturen weitergegeben.

Nach einer Anfrage zur „grundlegenden Überprüfung der öffentlichen Wasserpolitik“ im Europäischen Parlament im Juni 1995 wurde durch den Rat der Europäischen Union und den Ausschuss für Umwelt, öffentliche Gesundheit und Verbraucherschutz 1996/1997 eine Gesetzesvorlage initiiert, die bereits wesentliche Elemente der späteren WRRL enthielt. In den Flusseinzugsgebieten (FEGs) sollten:

- Parameter für ein Monitoring der Qualität des Oberflächen- und Grundwassers definiert werden;
- Managementpläne für FEGs unter Einbezug der Öffentlichkeit entwickelt werden;
- und Mechanismen ein kontinuierliches Feedback an übergeordnete Behörden etabliert werden, die angemessene Wassernutzungspreise festlegten und zusätzliche Verschmutzungen der Gewässer unterbinden.

¹⁰ Etwa, dass der gesellschaftliche Süßwasserverbrauch stetig zunimmt, lokal spezifische Lösungen zum Schutz der Gewässergüte notwendig sind, und hierzu eine stärker integrative Verfahrensweise unterschiedlicher Politikbereiche sowie Nationalstaaten-übergreifende Regulationsmechanismen angestrebt werden.

Im Zuge der Umsetzung der WRRL (und des WHG) sollten Netzwerke lokaler Wasserexpert:innen etabliert werden. Der Zeitplan sah vor, bis 2010 die drei zentralen Ziele der (1) guten Qualität der Oberflächengewässer und (2) des Grundwassers sowie (3) die Einhaltung definierter Normen und Richtwerte insbesondere in den Schutzgebieten zu erreichen. Zur Umsetzung der Gesetzesvorlage wurden mehrere Etappen festgelegt. Beschlossen wurde der Gesetzesentwurf final im Jahr 2000.

Die deutsche Wasserbewirtschaftung ist föderal aufgeteilt zwischen Bund und Ländern. Während auf Bundesebene die Bewirtschaftung der Wasserstraßen (Elbe, Rhein, Donau, Weser und Ems) durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) und nachgeordneten Behörden, z. B. der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) und das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA), organisiert wird, sind die Länder für die Bewirtschaftung kleinerer Fließgewässer und Seen zuständig. Die jeweiligen Oberen Wasserbehörden (OWBs) der Länder¹¹ übernehmen wesentliche Aufsichts- und Strategieentwicklungsfunktionen und genehmigen u.a. größere Wasserentnahmen.

Untere Wasserbehörden (UWB) der Landkreise und Städte werden mit Gewässerunterhaltungsmaßnahmen beauftragt und genehmigen kleinere Entnahmen aus Grund- und Fließgewässern. Kommunen sowie kommunale Wasserverbände und Trinkwasserversorger übernehmen Aufgaben der Gewässerunterhaltung, etwa Pflege und Instandhaltung der Gewässer. Seit 1956 gibt es in Deutschland zusätzlich die „Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser“ (LAWA). Das intermediäre Gremium setzt sich aus den zuständigen Ministerien der Länder zusammen, um die länderübergreifende Zusammenarbeit in wasserwirtschaftlichen und wasserrechtlichen Fragen zu vereinfachen.

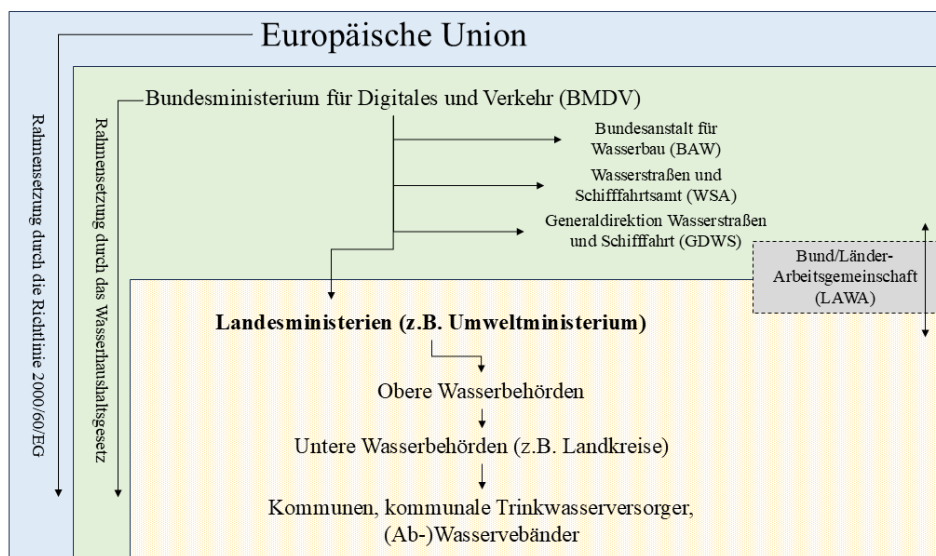


Abbildung 4: Vereinfachtes Organigramm der Wasserpolitik in Deutschland (eigene Darstellung).

Zwischen 2002 und 2009 wurde das WHG im Anschluss an die WRRL überarbeitet; ihr Ziel definierte das BMUKN (o.A.):

¹¹ Zwischen den Ländern bestehen Unterschiede: In Nordrhein-Westfalen ist die OWB etwa bei der Bezirksregierung Köln angesiedelt, in Bayern hingegen bei dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.

„Das WHG hat zum Ziel, die rechtlichen Voraussetzungen für eine geordnete Bewirtschaftung des ober- und unterirdischen Wassers nach Menge und Beschaffenheit zu schaffen sowie die menschlichen Einwirkungen auf Gewässer zu steuern. Das WHG schreibt vor, die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu sichern und so zu bewirtschaften, dass sie dem Wohl der Allgemeinheit und im Einklang mit ihr auch dem Nutzen Einzelner dienen. Vermeidbare Beeinträchtigungen ihrer ökologischen Funktionen sollen unterbleiben (Vorsorgegrundsatz). Insgesamt ist ein hohes Schutzniveau für die Umwelt zu gewährleisten.“ (BMUKN, o.A.)

Zielvorgaben und Bewirtschaftungsrichtlinien der übergeordneten WRRL bilden zentrale Komponenten des WHG. Darüber hinaus knüpfen Tochterrichtlinien, wie die Oberflächengewässerverordnung, die Grundwasserverordnung oder die Richtlinie über Umweltqualitätsnormen an das WHG an. Durch verschiedene legislative Verfahren wurde das WHG immer wieder angepasst und verändert.

Wasserpolitische und -rechtliche Verantwortlichkeiten sind jedoch nicht so klar strukturiert, wie Abb. 9 suggeriert. Die Länder verabschieden je eigene Wassergesetze und Regeln für Wasserentnahmen. Während die Bereitstellung wesentlicher Informationen (z.B. zu Hoch- und Niedrigwasser) und das Monitoring (z. B. auf Informationsportalen) zwar ein länderübergreifendes Anliegen ist, unterscheiden sich die Strategien der Länder in Niedrigwasserfragen:

In Sachsen-Anhalt wurde jüngst das Landeswassergesetz überarbeitet (WG LSA), in welchem Wetterextreme stärker berücksichtigt werden. Etwa soll die Gewässerunterhaltungspflicht ausgeweitet werden, sodass die Wasserrückhaltung verpflichtend ist, Gewässerrandstreifen für den Hochwasserschutz eingeführt und die öffentliche Wasserversorgung rechtlich gegenüber anderen Wassernutzungsinteressen gestärkt werden (MWU o.A.).

In Nordrhein-Westfalen sieht der Entwurf für die „Zukunftsstrategie Wasser“ (MUNV 2025) die Entwicklung eines Niedrigwassermanagements vor sowie die Verwendung der Böden als Wasserspeicher und die Ausbildung neuer Wasserexpert*innen. Zentral ist aus wasserwirtschaftlicher Sicht auch die Energiewende im Braunkohlerevier und die geplante Tagebauseeentlastung.

WRRL und WHG werden auf Bundesebene flankiert durch Strategiepapiere und Förderprogramme, wie die „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (DAS) (BMUKN 2024). Förderprogramme bieten ggf. finanzielle Unterstützung zur Umsetzung angestrebter Transformationsprozesse.

In der DAS werden bereits Änderungen zukünftiger Niederschlagsmengen antizipiert, die von starken Niederschlagsschwankungen zum Ende des Jahrhunderts ausgehen. Die in der DAS definierten Cluster skizzieren bereits relevante gesellschaftliche Gruppen:

Tabelle 3: In der DAS (BMUKN 2024) festgelegte Cluster. Sie geben Hinweise darauf, welche gesellschaftlichen Akteure vom Klimawandel betroffen sein können.

· Infrastruktur	· Wirtschaft
· Land und Landnutzung	· Stadtentwicklung, Raumplanung und Bevölkerungsschutz
· Menschliche Gesundheit und Pflege	
· Wasser	

Für Wasserwirtschaft, Risikomanagement und Gewässerunterhaltung werden in der DAS bereits NWRM-relevante Maßnahmen vorgeschlagen, wie sie auch in DRYRIVERS entwickelt werden: z.B. ein vernetztes (Niedrig-) Wassermonitoring und -management, sektorübergreifende Abstimmung von Anpassungsprozessen oder die angepasste infrastrukturelle Vorsorge zur ausreichenden Bevorratung von Wasser (ebd.).

Besonders Teile Ostdeutschlands, das norddeutsche Tiefland sowie das südostdeutsche Becken könnten laut DAS von einem geringen Wasserdargebot betroffen sein, sodass die Kraftwerkskühlung im Stromerzeugungssektor beeinträchtigt würde. Auch das zunehmende Risiko von Starkniederschlagsereignissen im Anschluss an sommerliche Trockenperioden wird hier thematisiert, wobei extremere Trinkwasserengpässe nicht aufgegriffen werden (Bundesregierung 2008: 21ff.). Als wesentlich für Anpassungsstrategien wird die Berücksichtigung von Klimafolgen bei der Umsetzung der WRRL (und der HWRRL) gesehen. Bereits 2008 wird festgehalten, dass lokale Infrastrukturen angepasst werden müssen und auch die Bewusstseinsbildung und Informationsbereitstellung für die Verhalten- und Eigenvorsorge der Bevölkerung wird erwähnt (ebd.). Ob und inwiefern hydrologische Dürren auftreten, hängt jedoch stark von den Eigenschaften des jeweiligen Einzugsgebiets ab. Ein Katalog „kontextspezifischer Maßnahmen“ fehlt derzeit (Marx et al. 2023).

Seither wurden zahlreiche weitere Arbeitsgruppen, Monitoring-Strategien, Netzwerke und Förderprogramme gegründet. Die IMA-Anpassung koordiniert die interministerielle Zusammenarbeit auf Bundesebene, ein ständiger Ausschuss „Anpassung an die Folgen des Klimawandels“ (StAAFK) die der Bundesländer und das „Behörden-Netzwerk Vulnerabilität“ die der Bundesoberbehörden. (BMUB 2016: 16-17) Laut Aktionsplan II der DAS sollten außerdem weitere Institutionen geschaffen werden: Unter Federführung des Bundesministeriums für Verkehr und Digitales (BMVD) wurde der Deutsche Klimadienst (DKD) 2015 v.a. als Informationsdienst zur Klimabeobachtung mit einer Geschäftsstelle beim Deutschen Wetterdienst (DWD) gegründet. Das Bundesministerium für Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) sollte „Dienste zur Unterstützung der Klimaanpassung“ (KlimAdapt) anbieten, die seitens einer Geschäftsstelle beim Umweltbundesamt (UBA) betreut werden (ebd. 33).

Die Notwendigkeit von ministerieller und referatsübergreifender Zusammenarbeit ist im Kontext des Klimawandels offensichtlich. Es bestehen bereits Beispiele für Kooperationen: Etwa im Monitoring hydro-meteorologischer Klimafolgen und -entwicklungen. Hier arbeiten die DAS und die LAWA im Handlungsfeld Wasserhaushalt zusammen.¹² 2018 hat das Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) eine szenariobasierte Risikoanalyse „Dürre“ beauftragt, die durch das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) betreut wurde (Deutscher Bundestag 2019).

Dürren über einen Zeitraum von sechs Jahren werden hier als „bedingt wahrscheinlich“ eingestuft, sodass sie einmal in 100 bis 1000 Jahren auftreten können. Mit Blick auf Niedrigwasserereignisse kommt die Risikoanalyse zu folgendem Ergebnis: Von Niedrigwasser betroffen seien demnach u.a. thermisch gekühlte Kraftwerke im Stromsektor und der Transportsektor in der Binnenschifffahrt. Großflächige Ereignisse wie Stromausfälle, Waldbrände und Ernteertragsdepressionen treffen neben der Landwirtschaft auch die gesamte Bevölkerung – inklusive Flora und Fauna.

Es lassen sich weitere Institutionen, Strategiepapiere, Portale und Akteure aufzählen, die u.a. aus der DAS hervorgingen und hydrologische sowie meteorologische Themen adressieren. Organisational nehmen sie häufig vernetzende und zentralisierende Funktionen ein, parallel zu bestehenden politischen Institutionen und Abläufen:

¹² Die LAWA ist eine Arbeitsgemeinschaft aus Bund und Ländern, die 1956 gegründet wurde, um länder- und bereichsübergreifende Fragen der Wasserwirtschaft und des Wasserrechts zu erörtern.

Tabelle 4: Auswahl intermediärer Institutionen und Programme

Akteur, Institution	Beschreibung
KliVo	Das Deutsche Klimavorsorge-Portal ist seit 2018 ein zentrales Informationsportal zum Klimawandel und dessen Folgen. Es vereint vorherige „Dienste zur Unterstützung der Klimaanpassung“ (KlimAdapt). Betreut wird es durch die interministerielle Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel (IMAA), durch das BMU, den DWD und der Geschäftsstelle des deutschen Klimadienstes (DKD).
Nationaler Wasserdialo- g (bis 2020)	2018 startete das BMU mit dem 1. Nationalen Wasserforum den Nationalen Wasserdialo- g zu Zukunftsfragen des Wasserhaushalts. Ergebnisse des Nationalen Wasserdialo- gs bildeten die Grundlage für die „Nationale Wasserstrategie“.
LAWA-AK	Auf der 90. Umweltministerkonferenz 2018 wurde der „Ständige Ausschuss Klima- wandel“ innerhalb der LAWA initiiert. Seither veröffentlicht der Ausschuss Handlungs- empfehlungen etwa zur „Wassersensiblen Stadtentwicklung“ (LAWA 2024)
Agrarministerkonferenz (AMK)	Mit Blick auf den besonders trockenen Sommer 2018 stimmt die Agrarministerkonfe- renz der DAS zu. In der „Agenda Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur“ werden technische Innovationen gefordert, die z.B. Teich- wirtschaften der Karpfen- und Forellenzucht besser schützen. (BMEL 2019)
Nationales Hochwas- serschutzprogramm (NHWSP)	Die LAWA und die UMK beschlossen 2014 die Umsetzung des NHWSPs. Sie sieht Maßnahmen, wie die Deichrückverlegung und die Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen, die gesteuerte Hochwasserrückhaltung, sowie die Beseitigung von Schwachstellen vor. Die Bereitstellung von Hochwassergefahrenkarten ist auf dieses Programm zurückzuführen. Maßnahmen des HWS beeinflussen stets auch Maßnah- men des NWRM.
Bundesprogramm Blaues Band	Das Programm Blaues Band setzt sich für die Renaturierung der Bundeswasserstra- ßen ein. Es setzt Akzente im Bereich des Gewässerschutzes, der Freizeit, des Tou- rismus und des Wassersports, und versammelt wichtige Akteure. ¹³
Zentrum KlimaAnpas- sung (ZKA)	Das Zentrum KlimaAnpassung ¹⁴ adressiert die Förderung kommunaler KlimaAnpas- sung. Initiiert wurde es durch das BMUV zusammen mit kommunalen Spitzenverbän- den (dem Deutschen Städtetag, dem Deutschen Landkreistag und dem Deutschen Städte- und Gemeindebund), das Deutsche Institut für Urbanistik gGmbH (Difu) und adelphi. Seitdem richtet das ZKA die „Woche der Klimaanpassung“ aus, betreibt „Re- gionale Klimawerkstätten“ und fungiert als Informationsvermittlungs- und Anlaufstelle in Sachen kommunalen Klimaschutzes.
Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) (UBA 2021)	Hier benennt das UBA verschiedene Klimawirkungen (z.B. Niedrig- und Hochwasser, Sturzfluten oder den Mangel an Bewässerungs- und Trinkwasser) (UBA 2021: 74). Das Klimarisiko für Wassermangel und Niedrigwasser bewertet sie (bei ‚geringer Ge- wissheit‘) gegenwärtig und in optimistischen Szenarien als ‚gering‘ bis ‚mittel‘. Ledig- lich in pessimistischen Szenarien scheint das Klimarisiko für Niedrigwasser ‚hoch‘ zu sein (ebd.).

¹³ Es impliziert das BMDV, das BMUV, die Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Naturschutz, Landschaftspflege und Erholung (LANA), die LAWA sowie das Wirtschaftsministerium des Landes Brandenburg. Hinzu kommen der Allgemeine Deutsche Automobilclub – Sparte Sportschifffahrt (ADAC), der Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND), der Deutsche Olympische Sportbund (DOSB), der Deutsche Ruderverband, der Deutsche Tourismusverband (DTV), der Naturschutzbund Deutschland (NABU) und der WWF Deutschland. Einzusehen unter: https://www.blaues-band.bund.de/Projektseiten/Blaues_Band/DE/00_Home/home_node.html

¹⁴ Online einsehbar unter: <https://zentrum-klimaanpassung.de/>

Bezüglich Anpassungskapazitäten wird in der KWRA betont, dass zwischen dem Handlungsfeld ‚Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft‘ und fast allen anderen Handlungsfeldern (‚Boden‘; ‚Landwirtschaft‘; ‚Biologische Vielfalt‘; ‚Verkehr, Verkehrsinfrastruktur‘; ‚Energiewirtschaft‘ ...) Wechselbeziehungen bestehen, sodass ein hoher Koordinations- und Abstimmungsbedarf auf Bundes- und Länderebene besteht (UBA 2021: 75).

Im Aktionsplan Anpassung III der DAS seien daher technische, informationstechnische und natürliche Anpassungsmaßnahmen vorgesehen: Neben der Renaturierung von Fließgewässern werden hier etwa digitale Werkzeuge der langfristigen Projektion von NW-Ereignissen angesprochen.

Heinrich-Böll-Stiftung Sie publizierte den »Wasseratlas« und fokussiert soziale Themen, wie Wasserkonflikte, Bevölkerungsumfragen zu Wasserthemen, wasserpolitische Fragen und solche des Wasserverbrauchs.

In der KWRA des UBA (2021) wird die Relevanz von „Wasserstandsvorhersagen“ hervorgehoben.¹⁵ Zusätzlich ist die einheitliche Regelung eines Wasserentnahmetgeldes vorgesehen sowie „multifunktionale Flächennutzungskonzepte“ nach Schwammstadtprinzip (ebd.). Für die Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“, die im Zusammenhang mit Niedrigwasser stehen, sowie für den „Mangel an Bewässerungswasser“, die „Chemische Wasserqualität“ und die potenzielle „Einschränkung der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen“ wird dringender Handlungsbedarf gesehen (ebd. 77).

Die Nationale Wasserstrategie, Niedrigwasser und Zielkonflikte der Wassergovernance

Die Nationale Wasserstrategie (NWS) des BMUV (2023) folgte dem Nationalen Wasserdiallog und den besonders trockenen Jahren 2018 bis 2022 mit Fokus auf potentiellen dürrebedingtem Wasserstress.¹⁶ In der NWS wird die volkswirtschaftliche Bedeutung von Niedrigwasserperioden betont:

„Anhaltende Niedrigwasserperioden haben deutliche negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie, die Wassergüte- und Wassermengenwirtschaft, die Wasserversorgung, die Energiewirtschaft, die Industrie, die Binnenschifffahrt, die Fischerei sowie die Aquakultur. Daraus ergibt sich die volkswirtschaftliche Bedeutung von Niedrigwasser.“ (BMUV 2023: 18)

Im Kontext von Niedrigwasserereignissen sieht das BMUV die Notwendigkeit eines Niedrigwasser- und Dürremanagements, das – sofern notwendige Infrastrukturen bestehen – Ausgleichspotenziale zwischen Teilräumen schafft (ebd.: 24). Ein Niedrigwasserinformationssystem (NIWIS) zentralisiert das Monitoring und Daten zur Analyse, zur Beurteilung und zur Bewirtschaftung von Niedrigwasserperioden auf der Grundlage einheitlicher Kenngrößen zur Identifikation von Niedrigwasser und Wassermangel (ebd. 25). Im Niedrigwasserfall müssen die Abwassereinleitungen reguliert werden (ebd.: 41). Darüber hinaus sollen Wasserstraßen aber weiterhin als Transportwege zur Verfügung stehen (ebd. 50).

¹⁵ „Wichtige Werkzeuge für das Hoch- und Niedrigwassermanagement sind qualitativ hochwertige und möglichst weit in die Zukunft reichende Vorhersagen von Extremsituationen. Die konsequente Weiterentwicklung von Wasserstandsvorhersagen ist somit eine wichtige informationstechnische APA III-Maßnahme des Handlungsfelds „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“.“ (UBA 2021: 75)

¹⁶ Die Daten des UBA verdeutlichen, dass die erneuerbaren Wasserressourcen in den Jahren 2018 bis 2020 nur 116 Mrd. m³ im langjährigen Mittel betragen anstatt der sonst verfügbaren 176 Mrd. m³. Zwar trete bisher kein flächendeckender Wasserstress auf, jedoch sind die Wasserressourcen regional ungleich verteilt, sodass es zu lokalen Trockenperioden kommen kann (BMUV 2023: 17).

Insgesamt soll ein Niedrigwasser- und Speichermanagement *synergetisch* zum Hochwassermanagement entwickelt werden, sodass etwa Stauanlagen im Hochwasserfall Wasser zurückhalten und es in Niedrigwasserperioden abgeben, um Flüsse mit niedrigen Wasserständen aufzufüllen (ebd.: 98). Die Definition von Niedrigwasserkenngrößen und die Einrichtung des NIWIS zählen zu den kurzfristigen Anpassungszielen innerhalb der NWS (BMUV 2023: 82).¹⁷

Die Ziele der NWS können Zielkonflikte mit sich bringen (z.B. Renaturierung vs. Wasserstraßenoptimierung). Sowohl die EU-HWRRL (Artikel 10) als auch das WHG (§79) sehen die ‚Beteiligung der interessierten Stellen‘ vor, weil im Risikomanagement bauliche und infrastrukturelle Maßnahmen vorgesehen sind, die unterschiedliche Akteursgruppen betreffen. Da Niedrigwasserereignisse und Dürren langfristige Implikationen haben, kann es hier z.B. zu Wassernutzungskonflikten kommen. Aber auch Fragen der Akzeptanz gegenüber landschaftsarchitektonischer und technischer Niedrigwasserschutzvorhaben spielen eine Rolle.

Im Falle von Wasserknappheit könne es etwa zu einem Wassernutzungskonflikt zwischen der Trinkwasserversorgung und der Landwirtschaft kommen, wenn die Wasseraufbereitung durch ein relativ erhöhtes Aufkommen von Dünger und Pflanzenschutzmitteln erschwert wird. Die Abwasserentsorgung hätte im Falle von Niedrigwasser einen vergleichbar verunreinigenden Effekt (ebd.: 20). Ein weiterer potenzieller Konflikt liegt in der Renaturierung von Gewässern gegenüber ihrer Nutzung als Transportwege (ebd.). Flächennutzungskonflikte treten auf, wenn Flächen in unmittelbarer Nähe von Gewässern mit dem Ziel der verbesserten Gewässerentwicklung renaturiert werden sollen, die Flächen jedoch ebenso interessant für die Landwirtschaft, für die Erholung in der Freizeit oder als Bebauungsflächen für die Kommunen sind (ebd.). Etwas konkreter beschreibt Zehetmair (2012, 2013) lokale Konflikte, die im Hochwasserschutz auftauchen können und in Niedrigwasserkontexte übertragen werden können.

Tabelle 5: Darstellung von Konflikttypen nach Zehetmair (2012: 220-230; 2013).

Flächennutzungskonflikte

Zehetmair (2013) schreibt, dass etwa bei Deichrückverlegungen große Flächen benötigt werden. Flächennutzungskonflikte treten auf, wenn unterschiedliche Vorstellungen darüber bestehen, (a) wie das Land genutzt werden soll oder (b) zu welchen Bedingungen das Land genutzt werden darf. Eigentumsfragen sind entscheidend, wenn (Teile der) Flächen Privateigentum sind und (z.B. landwirtschaftlich) genutzt werden. Privateigentümer*innen haben ein finanzielles Interesse an hohen Entschädigungen für die betroffenen Flächen. Flächennutzungskonflikte treten auch auf, wenn seitens Kommunen flussnahe Flächen als (attraktives) Bauland zu nutzen beabsichtigen. Auch Anwohner können sich gegen bauliche Maßnahmen aussprechen, wenn sie etwa den Wert anliegender Grundstücke senken.

Denkmalschutzkonflikte

Insbesondere in historischen Innenstädten stehen flussnahe Gebäude, Straßen und Infrastrukturen oft unter Denkmalschutz. Technische, landschaftsarchitektonische und infrastrukturelle Maßnahmen des Hochwassermanagements bzw. grundsätzlich Eingriffe in das Bestehende stehen somit erhebliche bürokratische Hürden

¹⁷ Eindeutige Dürreindikatoren und Niedrigwasserkenngrößen bestehen bisher nicht. Sie müssten kontextspezifisch adaptierbar sein, da die Auswirkungen der Dürre Flussgebiets-abhängig sind und sowohl Fließ- als auch Grundwasser betreffen (Marx et al. 2023).

gegenüber. Auch die Akzeptanz (siehe Akzeptanzkonflikte) von Anwohner*innen gegenüber entsprechenden Maßnahmen kann variieren, sobald Eingriffe in denkmalgeschützte Gebäude, Fassaden oder Infrastrukturen vorgesehen sind. Zehetmair schreibt, dass Maßnahmen des Hochwasserrisikomanagements etwa in der historischen Innenstadt von Dresden erfolgreich durchgeführt werden konnten, in der Stadt Grimma jedoch zu langwierigen Auseinandersetzungen führten.

Akzeptanzkonflikte

Akzeptanzkonflikte weisen Parallelen zu den vorhergehenden Konflikten auf: Etwa kann die Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber technischen Maßnahmen des HWRM je nach betroffener Fläche variieren. Akzeptanzkonflikte sind raumbezogen und damit Verteilungskonflikte. Zur Debatte steht, wo die entsprechenden HWRM-Maßnahmen durchgeführt werden, wessen Flächen beeinträchtigt werden – und sei es ‚nur‘ durch Maßnahmen, die das weitere Umfeld der betroffenen Flächen betreffen, also die Aussicht verschlechtern oder Immobilienpreise sinken lassen. Akzeptanzkonflikte können zu ökologischen Konflikten werden, wenn sie die Art und Weise der Umsetzung vorgesehener Maßnahmen betreffen.

Ökologische Konflikte

In ökologische Konflikte sind nicht-menschliche Entitäten, wie Flora und Fauna involviert. Sollten HWRM- oder NWRM-Maßnahmen Veränderungen der Fließgewässer vorsehen, die Flora und Fauna beeinträchtigen, kann es zu Interessenkonflikten kommen. Interessen nicht-menschliche Entitäten werden meist durch Verbände wie dem BUND, Greenpeace oder dem NABU vertreten. Auch lokale Vertreter*innen können sich öffentlich gegen geplante NWRM-Maßnahmen (z.B. in Form von Initiativen) positionieren. Lässt sich nachweisen, dass Maßnahmen Tiere oder Pflanzen gefährden, die unter Natur- oder Artenschutz stehen, können die NWRM-Projekte abgebrochen oder maßgeblich verzögert werden. Bedrohte Tiere und Pflanzen müssten aufwendig umgesiedelt werden und andernorts rekultiviert werden. Darüber hinaus können ökologische Flächenkonflikte auftreten, wenn die NWRM-Maßnahmen in bereits geschützten Gebieten vorgesehen sind. Laut dem Bundesamt für Naturschutz (BMUV/BfN, o.A.) sind 15,5% der terrestrischen und 45% der marinen Fläche Deutschlands seitens der EU als „Natura 2000“ Schutzgebiete ausgewiesen.¹⁸ Vor der Umsetzung von Bauvorhaben in Natura 2000-Gebieten müssen Verträglichkeitsprüfungen durchgeführt werden, die prüfen, inwiefern geschützte Arten und deren Lebensräume gefährdet werden bzw. wie sich die Maßnahmen umsetzen lassen, ohne die Habitats zu irritieren (Verschlechterungsverbot). Wenn Bau- und Anpassungsvorhaben vorgesehen sind, kann außerdem der Nachweis und die Dokumentation bedrohter Pflanzen- und Tierarten als Instrument genutzt werden, um die Vorhaben zu verzögern oder zu verhindern.

Wassernutzungskonflikte

Wassernutzungskonflikte treten bei einem Mangel an verfügbaren Wasserressourcen auf oder infolge einer (nicht akzeptierten oder nicht zu akzeptierenden) Ungleichverteilung verfügbarer Wasserressourcen. Sie liegen nicht nur in Niedrigwasserperioden vor, sondern können grundlegender Natur sein, wenn etwa ein Entnehmer grundsätzlich zu viel Wasser verbraucht. Hochwasserinduzierte Wassernutzungskonflikte entstehen, wenn große Mengen bestehender Wasserressourcen verunreinigt werden. Konkrete Wassernutzungskonflikte lassen sich immer öfter beobachten und können ökologische Konflikte beinhalten. Etwa wenn die exorbitante Nutzung

¹⁸ Natura 2000-Schutzgebiete werden hier aufgelistet: <https://www.bfn.de/natura-2000-gebiete>

bestehender Wasserressourcen zur Beeinträchtigung der Umwelt führt. Wasserkonflikte können ebenso ökonomische Natur sein, wenn einige Wasserentnehmer*innen mehr für die Wassernutzung bezahlen, als andere.¹⁹

2.1.3 Soziologie: Relevanz von und Zugang zu hydrosozialen Wasserfragen²⁰

Das Thema „Wasser“ wurde in der soziologischen Forschung lange Zeit und z. T. aus wissenschaftshistorischen Gründen vernachlässigt.²¹ Die Forschung zur *Wassergovernance* lässt sich bis dato nicht als ein klar definiertes, wissenschaftliches Forschungsfeld definieren, sondern wird oft in disziplinären Nischen, wie u.a. der kritischen Geografie, der politischen Ökologie, den *Science and Technology Studies* und den *Sustainability Studies* betrieben. Ausnahmen bilden etwa die *maritime Soziologie* (Poole 1981), sowie das seit 1973 erscheinende Journal „Maritime Policy & Management“, das sich Meeres- und Schifffahrts-bezogenen Fragestellungen widmet. Spezifischere Fragen nach Flüssen oder Wetterextremereignissen stellen nach wie vor Forschungslücken dar. Dabei können – je nach disziplinärer Ausrichtung unterschiedliche Forschungsfragen relevant sein:

- **Wasser(nutzungs-)praktiken:** Wasserpraktiken fokussieren den gesellschaftlich-kulturell geprägten Umgang mit Trink-, Ab- und Fließgewässern. Insbesondere in (meist wasserreichen) westlichen Gesellschaften werden Wassernutzungspraktiken (vom täglichen Duschen, über die Trinkwasserversorgung bis hin zur touristischen und sportlichen Nutzung) kaum thematisiert und problematisiert. Im Zuge der Trocken- und Niedrigwasserperioden in Deutschland 2018-2022 änderte sich dies: Beispielsweise kam es 2023 zu ersten kommunalen Einschränkungen der Wassernutzung in Form von Bewässerungsverboten. In den sozialen Medien wurde unter dem Stichwort „pool shaming“ diskutiert, inwiefern private Pools moralisch vertretbar sind.
- **Wasserkonflikte:** In Zusammenhang mit Wassernutzungspraktiken stehen Konflikte um Wasser als Ressource. Wasserkonflikte zwischen Ländern sind kein neues Phänomen (Stichwort: „Water Wars“ (Starr 1991)), insbesondere wenn Flüsse grenznah gestaut werden. Wasserverteilungskonflikte treten aber auch auf nationaler Ebene auf: Etwa Konflikte in der tendenziell trockenen, brandenburgischen Grünheide zwischen dem Autobauer Tesla, Kommunen und sozialen Bewegungen.
- **Wasserverständnisse:** Wasserverständnisse sind gesellschaftlich geprägt. In der westlichen Welt dominiert ein primär ökonomisch geprägtes, neoliberales Verständnis von »modernem Wasser« (Schmitt 2022) als Ressource. Zusätzliche Bedeutungsebenen, wie etwa Wasser und Flüsse als lokales, identitätsstiftendes Merkmal, als Element religiöser Praktiken und dessen touristische Relevanz werden vernachlässigt. Wie Geels (2005) anhand der Transformation der Wasserversorgung in den Niederlanden im 19. und 20. Jahrhundert darlegt, spielt die ‚water culture‘ eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Organisation von Wasser.

¹⁹ Das Recherchekollektiv Correctiv hatte angesichts besonders trockener Sommerjahre darauf hingewiesen, dass industrielle Entnahmen auf zum Teil sehr alten Verträgen beruhen, die zu stark vergünstigten Bedingungen geschlossen wurden (s. Joeres et al. 2022).

²⁰ Im Folgenden wird die soziologische Relevanz nur Überblicksartig dargestellt. Ausführlich dargestellt wird sie bei Schmitt (2022) und Schulz/Gros (2024).

²¹ Hierfür werden unterschiedliche Gründe angeführt: Etwa berichtet Schroer (2022) von der wissenschaftshistorisch begründeten „Bereinigung der Soziologie von den geografischen Grundlagen“, der zufolge sich die Soziologie primär auf die Erklärung sozialer Phänomene beschränkte. Kropp (2018) folgend ließe sich argumentieren, dass die (Trink-)Wasserversorgung – insbesondere in Deutschland – lange reibungslos funktionierte und keine (soziologische) Aufmerksamkeit erhielt.

- **Wasserinfrastrukturen:** Wasserinfrastrukturen betreffen Binnengewässer, Trinkwasserleitungen sowie materielle Infrastrukturen, wie künstliche Seen, begradigten Flüsse, Mühlenteiche, Dämme und Rückhaltebecken. Dabei handelt es sich um technologische, sozial-konstruierte Infrastrukturen, die das Ergebnis sozialer Aushandlungsprozesse sind, und als solche auch zukünftige Aushandlungsprozesse prägen. Fragen nach der (Art und Weise) der Gestaltung aquatischer Infrastrukturen sind dabei geleitet von dominanten „Wasserverständnissen“.

Die Liste wassersociologisch relevanter Themen ließe sich fortsetzen: Etwa gehen mit zunehmenden Hitze- und Dürreperioden auch Fragen der gesellschaftlichen Gestaltung urbaner Räume einher, in denen die steigenden Temperaturen zum gesundheitlichen Faktor (insbesondere für ältere Menschen) wird. Tilo Wesche (2023) stellt moderne Eigentumsrechte infrage und diskutiert, inwiefern Flüsse ein ‚ökologisches Eigenrecht‘ haben. Aber auch die Risiken und ‚water security‘ geraten zunehmend ins Blickfeld; Fragen also, die sich mit der (ungleichen) Verteilung hydrologischer Risiken beschäftigen.

Soziologische, politikwissenschaftliche, anthropologische, ethno- und geografische Zugänge zur Wassergovernance hinterfragen das (wissenschaftliche) Verständnis von „modernem Wasser“ als zu managende Ressource, denn:

“The reality is often remarkably different: Water access and rights are often linked to contentious politics of struggle, water access and quality is deeply differentiated, water uses are fundamentally contested, and what water “is” and how water is known, constructed, and lived is variegated and difficult to conceptualize, let alone implement.” (Wilson et al. 2019: 2)

Wasser wird hier weniger als Ressource verstanden, sondern als ‚totales soziales Phänomen‘ (Orlove/Caton 2010), welches alle Sphären des Sozialen (vom Körper bis zur Wasserstraße) durchzieht, und Gegenstand (machtvoller) sozialer Aushandlungsprozesse ist. Die reziproke Ko-Konstituierung, der zufolge Wasser durch Gesellschaft gestaltet wird und gestaltend wirkt, wird in jüngeren Ansätzen als ‚hydrosoziales‘ (engl. »hydrosocial«) Wechselverhältnis beschrieben, das geprägt wird durch ein engmaschiges Geflecht aus sozialen, technologischen und hydrologischen Prozessen (Linton/Budds 2014).

DRYRIVERS lag zunächst das Verständnis um die soziologische Marginalisierung von Wasserfragen zu Grunde. Erforscht werden sollen ‚hydrosozialen‘ Arrangements und Verflechtungen, die sich entlang der Flüsse in den Pilotgebieten der Selke, der Elbe und der Rur ergeben. Als theoretisches Instrument wurde die Netzwerktheorie aus verschiedenen Gründen gewählt; u.a. aufgrund deren gemeinsame Wurzeln mit den *Science & Technology Studies*, die bereits früh Natur|Kultur-Grenzen hinterfragten und somit – im Sinne des methodologischen Symmetrieprinzips – natürliche Entitäten und Prozesse als ontologisch gleichwertig betrachten. Darüber hinaus bietet die Netzwerkforschung einen breit gefächerten *empirischen* Instrumentenkasten, mit dessen Hilfe sich die Flussnetzwerke entwirren lassen. Net-Maps wurden als *transdisziplinäres* Instrument gewählt, in welchem lokale Akteure aktiv in die Kartierung relevanter Netzwerke eingebunden werden, und die sich bewährt haben, um Wassergovernance-Netzwerke zu erheben (Schiffer/Hauck 2010; Ball et al. 2022).

2.2 Vorbereitung der Net-Map Erhebungen (AP 1.2.)

2.2.1 Net-Maps als transdisziplinäres und triangulierendes Analyse-Instrument

Die Verwendung von Netzwerken als Instrument und Theorie greift die in AP 1.1. identifizierten Aspekte auf: Es wird angenommen, dass lokale Wassergovernance nicht das Resultat alleiniger politischer Ent-

scheidungsträger*innen und Institutionen ist, sondern dass es sich dabei um Netzwerke aus heterogenen Akteuren, Institutionen und ökologischen Entitäten sowie den materiellen Gegebenheiten handelt. Sie stellen ein Netzwerk sozial-ökologischer Strukturen dar, eröffnen sich gegenseitig Möglichkeitsräume, aber begrenzen diese auch. Netzwerke werden entweder vollständig (und oft mittels Fragebogen) als Gesamtnetzwerke erhoben, um dessen Struktur abzubilden. Ein solches Verfahren setzt profundes Vorwissen im Feld voraus und ist bezüglich der Netzwerkgestaltung wenig flexibel. Individuelle Relevanzsetzungen werden (meist mit qualitativen, interview-basierten Instrumenten) als Egonetzwerke erhoben, die wiederum die Struktur und den Kontext des Netzwerks tendenziell vernachlässigen (müssen) (Franke/Wald 2006). Qualitativ-explorative Erhebungsverfahren wurden in der Netzwerkforschung lange vernachlässigt, wobei jüngere Publikationen das Forschungsdesiderat aufgreifen (Hollstein/Strauß 2006; Häußling 2021: 419). Um die lokalen Wassergovernance- und Flussnetzwerke zu erfassen, wurde das ursprünglich von Schiffer/Hauck (2010) entwickelte Verfahren der Netzwerkkartierung (sog. „Net-Maps“) aufgegriffen und adaptiert.

Net-Maps sind ein pragmatisches Instrument der Netzwerkanalyse; sie kombinieren Elemente der Netzwerkforschung mit ethnografischer Forschung. Entwickelt von Schiffer/Hauck (2010) sind sie ein niedrigschwelliges („low tech, low cost“) Instrument der Netzwerkkartierung und -visualisierung. Ziele der transdisziplinären Netzwerkkartierung bestanden in (1) der Visualisierung impliziten Wissens und dem Verstehen komplexer, formeller und informeller Netzwerke (2) dem Aufdecken von potentiellen Konflikt- und Kooperationsmöglichkeiten, (3) dem Anregen von Wissensaustausch und Lernprozessen sowie in der (4) Entwicklung von gemeinsamen Zielen und Wegen zu deren Erreichung. Das von Schiffer/Hauck (2010) als analoges Instrument entworfene Verfahren wurde für die Erhebungen in DRYRIVERS angepasst, wobei die zentralen Schritte beibehalten wurden. Entscheidende Unterschiede in dem Vorgehen bestehen darin, dass

- (a) die Net-Map-Erhebungen digital durchgeführt und aufgezeichnet wurden,
- (b) in Gruppen statt in Einzelinterviews durchgeführt wurden und
- (c) das Net-Maps in wiederholten Erhebungen evaluiert und erweitert wurden.

Das Net-Map-Verfahren wurde erweitert, damit sowohl die Vorteile der qualitativ-explorativen Verfahren aufgegriffen werden (Hollstein 2006), als auch die Struktur des Netzwerks (aus Sicht mehrerer Probanden) abgebildet wird (Diaz-Bone 2008, Häußling 2021). Ein qualitativ-exploratives Vorgehen ist deshalb notwendig, weil die lokalen Flussnetzwerke (z.B. an der Selke) Akteure, Institutionen und ökologische Entitäten enthalten, die sich nicht anhand einschlägiger Internetrecherchen identifizieren lassen oder entlang gegebener politischer Hierarchien ergeben. Das Verfahren wird in Fokusgruppen durchgeführt, um die Reliabilität der Netzwerkkarten zu erhöhen, da die Probanden kartierte Knoten und Kanten diskutieren können.²² Um darüber hinaus die wissenschaftliche Güte der Netzwerkkarten zu erhöhen, wird das Verfahren wiederholt durchgeführt, was den Probanden die Möglichkeit zur Evaluation und Korrektur der Netzwerke gibt. Die gezeichneten Netzwerkkarten sind überwiegend deskriptiver Natur und geben kaum Auskunft über die Gründe und Hintergründe einzelner Netzwerkpositionen. Als exploratives Element dienen daher aufgezeichnete Diskussionen, die in Form von qualitativen Daten als Interviewmaterial zur Verfügung stehen und zur Erklärung der Positionierung einzelner Akteure, Institutionen und

²² Die Netzwerke sind durch die Wahrnehmungen der Teilnehmenden geprägt (s. AP 1.4.).

Entitäten beitragen. In Abb. 10 wird das angepasste Erhebungsverfahren dargestellt. Dabei handelt es sich um ein „Parallel-Design“ im Sinne Hollsteins (2010: 466).²³

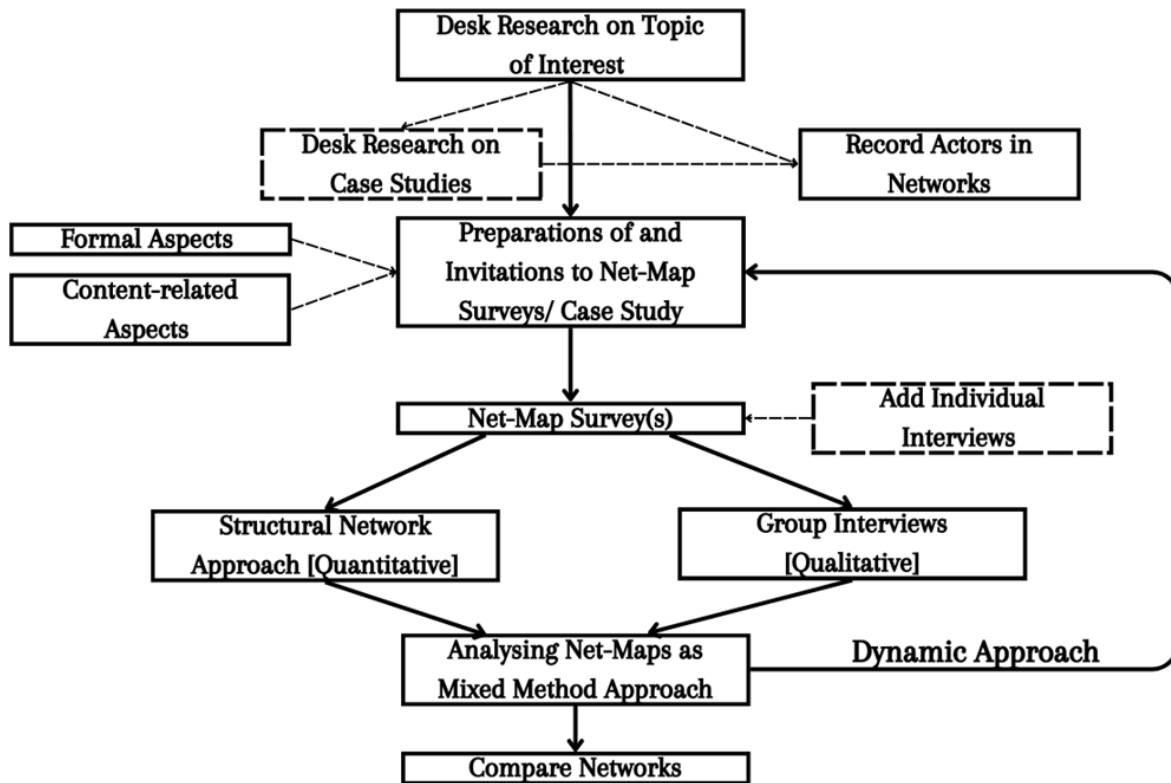


Abbildung 5: Forschungsdesign für die Erhebung der Net-Maps an der Selke, Rur, Elbe (eigene Darstellung).

²³ „Parallel-Designs [dienen] dazu, ein breites, vielschichtiges und möglichst umfassendes Verständnis von sozialen Phänomenen zu erhalten und erhöhen so die Reichweite und Generalisierbarkeit der Ergebnisse.“ (Hollstein 2010: 466)

2.2.2 Literaturrecherche zu den Pilotgebieten und Datenpools

Die soziologische Fachliteratur bietet kaum Anhaltspunkte zu relevanten Akteuren lokaler Watergovernance- und Flussnetzwerke (s. Kap. 1.2.3.). Aus der Analyse der *Government*-Strukturen gehen administrative Institutionen mit dem politischen Mandat zur Entwicklung, Durchführung und Beaufsichtigung von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen (z. B. Kommunen, Untere und Obere Wasserbehörden, s. Kap. 1.2.) hervor. Darüber hinaus relevante Akteure, wie wirtschaftliche Wasserentnehmer*innen, Flächeneigentümer*innen und Interessenverbände,

lassen nicht unmittelbar erschließen. Mögliche Erklärungen dafür sind – neben der generellen Infrastruktur- und Wasservergessenheit der Soziologie (s. Kap. 2.1.) –, dass es sich bei den Pilotgebieten der Selke und der Rur um kleinere Fließgewässer handelt, die sich der soziologischen Aufmerksamkeit entziehen. Dezierte Akteursanalysen liegen nicht vor. Anhand von Internetrecherchen wurden für jedes Pilotgebiet Akteure, Institutionen und Entitäten identifiziert, die in der Region verortet sind und Assoziationen (z.B. lokale Nähe, Anliegen in der Region etc.) zum Gewässer aufweisen. Sie geben darüber Auskunft, welche Akteure sich in den Regionen befinden und wie sie entlang der Akteurskategorien verteilt sind.

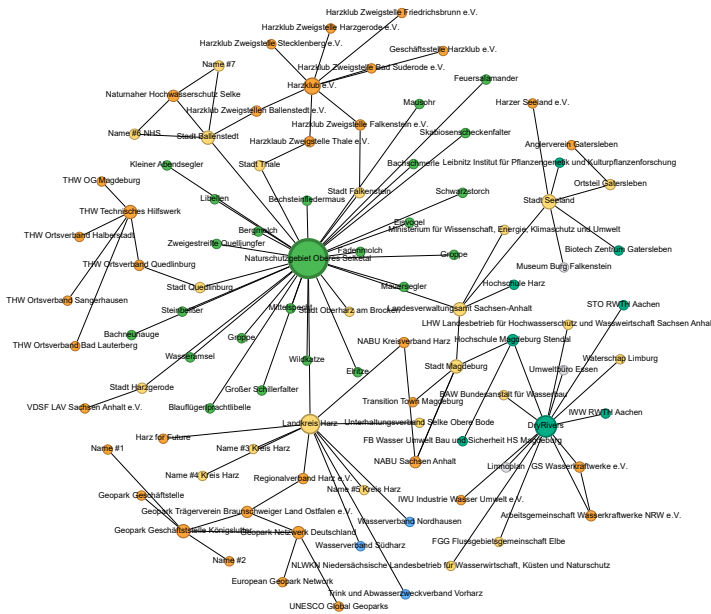


Abbildung 6: Recherchiertes Netzwerk von Akteuren an der Selke.

Identifizierte Entitäten wurden tabellarisch gesammelt, kategorisiert und via Gephi aufgrund gemeinsamer Bezugspunkte als Netzwerke visualisiert. Die Größe der Knoten ist proportional zur Anzahl bestehender Verbindungen zu anderen Knoten im Netz (die sog. „Degree-Centrality“) dargestellt. Die Netzwerke wurden via „Fruchterman Reingold“-Algorithmus sortiert, um ggf. Cluster aufzuzeigen. Die Farben der Knoten entsprechen den zugeordneten Akteurskategorien. Sie geben keine Auskunft darüber, in welcher Beziehung die identifizierten Akteure zueinander sowie zu dem untersuchten Fließgewässer stehen, und inwiefern sie für ein zu entwickelndes NWRM relevant sind. Die gesammelten Akteure

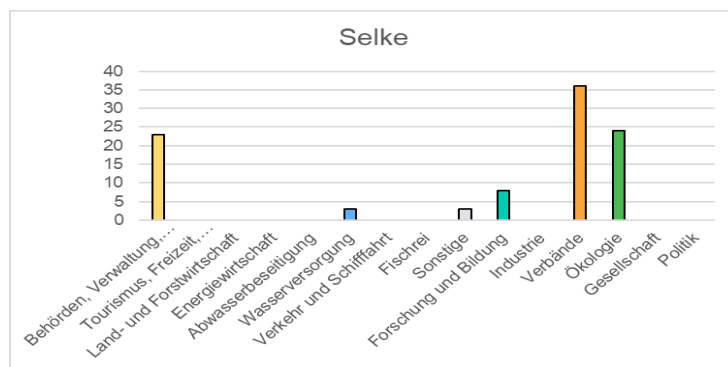


Abbildung 7: Akteursverteilung im recherchierten Selke-Netzwerk.

ergeben einen Pool an potenziellen Proband*innen und können für spätere Befragungen aufgegriffen werden. Anhand der Netzwerke, die im Zuge der Recherche entwickelt wurden, sowie der Kategorisierung identifizierter Akteure zeigen sich Tendenzen der Akteursverteilung in den Pilotgebieten.

2.2.3 Akquise von Probanden und Vorbereitung der Net-Map Erhebungen

Um die Net-Map-Erhebungen durchzuführen, wurden im April/ Mai 2024 anhand der Literaturrecherche (s. Kap. 1.3.2) jeweils 10 Akteure und Institutionen in den Pilotgebieten ausgewählt und kontaktiert. Es wurde darauf geachtet, dass je Pilotgebiet und entsprechend des Fließgewässers Akteure und Institutionen aus den administrativen Bereichen (UWBs, OWBs, Ministerien), aus relevanten Verbänden (z.B. Umweltverbänden, Heimatvereine etc.), aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft vertreten waren.

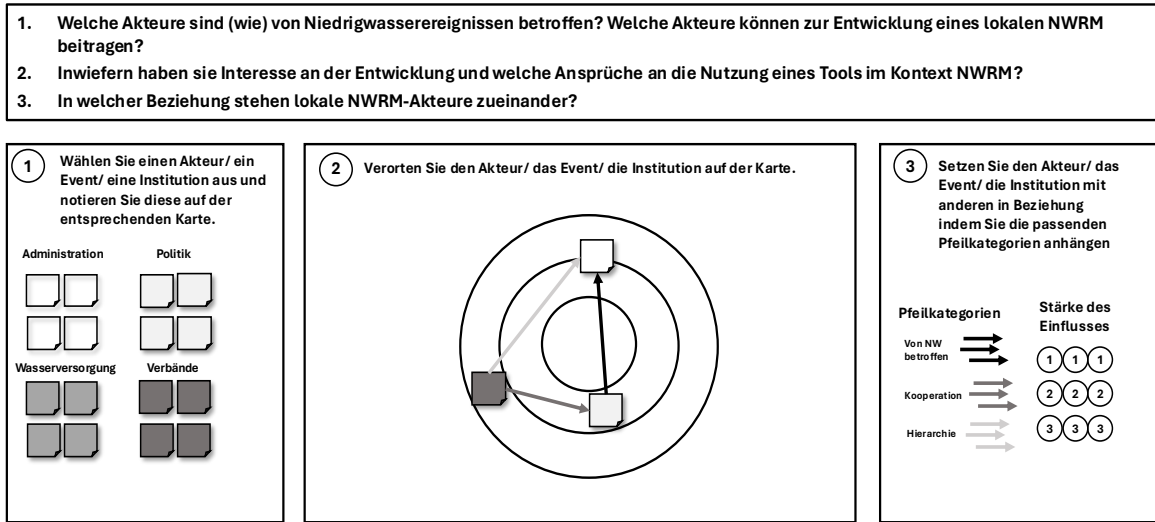


Abbildung 8: Das Miro-Board zur Entwicklung der Netzwerkkarten (eigene Darstellung).

Die Erhebungen sollten möglichst inklusiv sein, indem etwa männlich- und weiblich-gelesene Befragte angefragt wurden.²⁴ Es wurden individuelle Anschreiben und Einladungen vorbereitet und via Email versendet. Erfolgte keine Reaktion, wurden Probanden zusätzlich telefonisch kontaktiert, und ggf. weitere angefragt, bis eine kritische Gruppengröße von min. fünf Personen erreicht war. Anschließend wurden je Pilotgebiet Terminfindungsprozesse eingeleitet und abgestimmt. Für jedes Pilotgebiet wurden Datenschutzerklärungen entwickelt, versendet und eingeholt. Wenn eine Teilnahme an der gemeinsamen Net-Map-Erhebung nicht möglich war, wurden individuelle Interviews²⁵ geführt.

Die ersten Net-Map-Erhebungen (Selke, Rur, Elbe) fanden zwischen dem 14.-16. Juni 2023 online statt, um Anreisen zu vermeiden und um Netzwerke in digitaler Form zu entwickeln.²⁶ Je Pilotgebiet wurde ein Miro-Board für das Zeichnen der Netzwerkkarten in Anlehnung an Schiffer/Hauck (2010) vorbereitet. Es wurde jeweils eine einleitende Präsentation vorbereitet, die die Relevanz von DRYRIVERS darlegte und Erklärungen zur netzwerkanalytisch-relationalen Perspektive anführte. Außerdem wurden Video-Konferenzen via Zoom vorbereitet, um die Diskussionen zwischen den Probanden aufzuzeichnen. Da

²⁴ In den Erhebungen ließ sich dieser Anspruch allerdings nicht aufrechterhalten. Aufgrund schwieriger Akquiseverfahren war die Bereitschaft zur Teilnahme das primäre Auswahlkriterium. Insgesamt nahmen bis auf wenige Ausnahmen überwiegend männlich gelesene Personen an den Erhebungen teil.

²⁵ Bei Einzelinterviews wurde dabei auf die Netzwerkkarten verzichtet. Stattdessen wurden das Interviewmaterial erhoben und eingesetzt, um Akteure und Beziehungen in den Netzwerkkarten zu ergänzen.

²⁶ Netzwerkkarten digital zu erheben hat methodologische Vorteile gegenüber den analogen Verfahren Schiffer/Haucks (2010); u.a. die Veränderbarkeit der gezeichneten Netzwerke und die Aufzeichnung der Erhebungssituation. Ausführlich dargelegt bei Hansen-Ampah (2022: 95ff.).

es sich bei dem entwickelten Vorgehen um wiederholte Net-Map-Erhebungen handelt, wurden die Vorbereitungen wiederholt durchgeführt. Im Anschluss an die Auswertung der ersten Net-Map-Erhebungen wurden im Dezember 2023 die Probanden der ersten Erhebung erneut kontaktiert, wobei versucht wurde, den Personenkreis der Erhebungen strategisch zu erweitern, wenn einzelne Akteursgruppen unterrepräsentiert waren, oder sich deren Relevanz aus der ersten Erhebungsrunde ergab. Während die Erhebung an der Elbe mit den gleichen Probanden erneut durchgeführt werden konnte, wurden an der Rur teilweise neue Probanden akquiriert und an der Selke wurde der Probandenkreis insgesamt ausgetauscht. Für die zweite Erhebungsrunde im Januar/Februar 2024 wurden erneut Einladungen versendet, Terminfindungen moderiert, Datenschutzerklärungen vorbereitet und eingeholt, sowie die Erhebungen (inklusive einleitender Präsentation, Miro-Board etc.) vorbereitet (s. Abb. 13). Für die Präsentationen in der zweiten Erhebungsrunde wurden die Ergebnisse der ersten Erhebung aufbereitet, sodass die Probanden an bestehenden Netzwerkkarten arbeiten konnten (s. Kap. 2.3). Fallbezogene Vorgehensbeschreibung liegen für die Selke (Franke 2024) sowie für die Rur (Franke 2025) vor.

2.3 Durchführung der Net-Map Erhebungen

Die Net-Map Erhebungen (AP 1.3) an der Selke fanden am 25. Mai 2023 und 02. Februar 2024, an der Rur am 16. Juni 2023 und 29. Januar 2024 und an der Elbe am 14. Juni 2023 sowie am 21. Januar 2024 statt. Identifiziert wurden die Proband*innen in der ersten Erhebung auf Basis der Literaturrecherche (AP 1.1.) und theoretisch relevanter Perspektiven. In der zweiten Erhebung wurden bei Bedarf zusätzliche Proband*innen kontaktiert. Je Pilotgebiet haben 3 (Erste Erhebung Selke) bis 5 (Zweite Erhebung Rur), meist aber 4 Proband*innen an den Erhebungen teilgenommen. Insgesamt haben 17 Proband*innen an 6 Net-Map-Erhebungen und 3 Einzelinterviews teilgenommen. Die Einzelinterviews wurden an der Selke mit dem Ministerium für Wissenschaft, Energie, Klimaschutz und Umwelt (MWU), dem BUND Sachsen-Anhalt und der Bezirksregierung Köln geführt.²⁷ In der ersten Erhebung moderierte je ein Interviewer, die zweiten Erhebungen wurden von einer zusätzlichen Person begleitet.

Die Erhebungen wurden digital mit dem Kollaborationstool *Miro* durchgeführt. Die Diskussionen wurden mit *Zoom* aufgezeichnet und anschließend transkribiert. Für die Erhebungen wurde ein Zeitraum von ca. 90 Minuten (inklusive einführender Präsentation) angesetzt. Die kürzeste Erhebung dauerte ca. 65 Minuten (2. Erhebung Selke), die längste circa 117 Minuten (1. Erhebung Elbe).

²⁷ Das Gespräch mit der Bezirksregierung Köln durfte nicht aufgezeichnet werden, daher wurde es seitens des Interviewers protokolliert.

Tabelle 6: Übersicht über die Net-Map-Erhebungen im Forschungsprojekt DRYRIVERS

Pilotgebiet Erhebung	Selke		Rur		Elbe	
	1. Erhebung	2. Erhebung	1. Erhebung	2. Erhebung	1. Erhebung	2. Erhebung
Zahl der Teilnehmer/innen	4/5	3	4	4/5	4	4
Datum der Erhebungen	25.05.2023	02.02.2024	16.06.2023	29.01.2024	14.06.2023	21.01.2024
Dauer der Erhebung	01:13:50	01:04:55	01:37:36	01:18:54	01:56:49	01:27:48
Zahl identifizierter Knoten	N ₁ =26	N ₂ =4	N=39	N ₂ =5	N ₁ =72	N ₂ =12
Zahl identifizierter Kanten	K ₂ =17 (6 doppelt)	K ₂ =2	K=45**	K ₂ =55	K ₂ =71	K ₂ =22
Qualitative Ergänzungen Knoten	N _{Q1} =25*	N _{Q1} =10	N _{Q1} =10*	N _{Q2} =10	N _{Q1} =5	N _{Q2} =5
Qualitative Ergänzungen Kanten	K _{Q1} =36*	K _{Q2} =33	K _{Q1} =29	K _{Q1} =23	K _{Q1} =13	K _{Q2} =27
Summe	N _{gesamt} =65; K _{gesamt} =88		N _{gesamt} =64; K _{gesamt} =152		N _{gesamt} =94; K _{gesamt} =133	

In den mit * gekennzeichneten Erhebungen wurden zusätzliche Einzelinterviews geführt.

** Ein Teil der Kanten (K₁=25) wurde von den Probanden selbst hinterlegt. Weitere K₁=20 Kanten wurden ergänzt, für Akteure, die in Clustern eingezeichnet wurden (z.B. Papier- und Chemieindustrie – Entnehmer; Grundwasserabsenkung, Tagebau, Tagebau-Seeflutung – RWE).

Eröffnet wurden die Erhebungen durch eine Vorstellung der Teilnehmer*innen und einleitende Präsentationen. Anschließend öffneten die Probanden *Miro*, um gemeinsam Netzwerkkarten für das jeweilige Pilotgebiet zu zeichnen. Vier Leitfragen strukturierten den Erhebungsprozess:

- (1) „Welche lokalen Akteure sind (wie) von Niedrigwasser betroffen und welche können zu der Entwicklung eines lokalen Niedrigwasserrisikomanagement beitragen?“;
- (2) „Inwiefern haben sie ein Interesse an der Entwicklung und welche Ansprüche haben Sie an die Nutzung eines Tools im Niedrigwasserrisikomanagement?“;
- (3) „In welcher Beziehung stehen lokale NWRM-Akteure zueinander?“;
- (4) Welchen Einfluss haben die Akteure auf ein bzw. im Kontext eines NWRM?“.

Um Akteure, Institutionen und Entitäten im Netzwerk zu hinterlegen, führten die Probanden die wesentlichen Schritte der Net-Map-Erhebung durch (s. Schiffer/Hauck 2010; Ball et al. 2022):

- (1) Für das NWRM relevante Akteure oder Institutionen wurden identifiziert, auf farblich-kodierten, digitalen Notizzetteln entlang gesellschaftlicher Sphären (z.B. gelb für „Administration“, blau für „Wasserversorgung“) notiert und in konzentrischen Kreisen verortet. Die konzentrischen Kreise bildeten das Zentrum des Boards; je stärker – aus Sicht der Probanden – einzelne Institutionen, Akteure und Entitäten in ein NWRM einzubeziehen seien, desto zentraler wurden sie verortet (s. Abbildung 13).
- (2) Dann verknüpften die Proband*innen hinzugefügte mit bereits hinterlegten Akteuren und Institutionen. Hierzu standen farblich kodierte Relationen bzw. „Pfeile“ zur Verfügung (z. B. gelb für „formeller Einfluss; Hierarchie“ und grün für „Kooperation“).
- (3) Abschließend hatten die Probanden die Möglichkeit, den attestierten Einfluss (1 „kaum Einfluss“ bis 3 „starker Einfluss“) des Akteurs bzw. der Institution auf ein potentielles NWRM zu ergänzen. Insgesamt hinterlegten die Probanden folgende Informationen (s. Tab. 7).

Tabelle 7: In den Net-Map-Erhebungen erfragte Informationen und deren Darstellung.

Variable	Erklärung	Angabe
Bezeichnung der Entität	Welche Entität ist für das Netzwerk relevant? Um welche Art von Entität handelt es sich?	Name der Entität
Gesellschaftl. Sphäre	Welcher gesellschaftlichen Sphäre ist die Entität zuzuordnen?	Farbe des (digitalen) Notizzettels
Relevanz für NWRM	Wie „zentral“ ist die Entität für ein potenzielles NWRM?	Zentralität in konzentrischen Kreisen
Beziehungen	Welche Beziehung haben die Entitäten zu umliegenden Akteuren, Institutionen etc.?	Hinterlegte Verbindungen
Art der Beziehungen	Welche Art von Beziehungen haben die Entitäten zu umliegenden Akteuren, Institutionen etc.?	Farbe der Verbindungen
Einfluss	Welchen Einfluss hätten die Entitäten in einem potentiellen NWRM?	Stärke des Einflusses (1-3)

Bei Net-Maps handelt es sich um ein anspruchsvolles Erhebungsverfahren, weil parallel zur Interviewsituation Netzwerkkarten gezeichnet werden (Multitasking). Bis auf wenige Ausnahmen eignete sich das Verfahren jedoch als zur interaktiven Genese von Netzwerkkarten. Der Umgang mit dem Tool fiel den Probanden leicht. Ausnahmen bestanden, wenn Probanden wenig Erfahrung mit Softwareprodukten

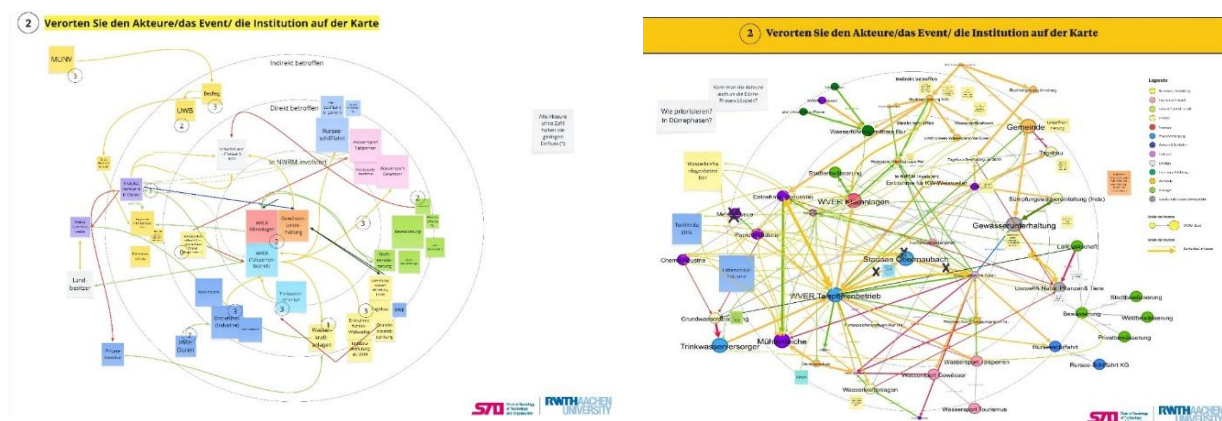


Abbildung 9: Darstellung der gezeichneten Netzwerkkarten an der Rur. Gezeigt wird das Ergebnis der ersten Erhebung im Juni 2023 (rechts) und das der zweiten Erhebung im Januar 2024 (links).

hatten, oder sich – wider Erwarten – mit dem Mobiltelefon einwählten.²⁸ Die Netzwerkmetapher war für die Probanden gut nachvollziehbar und entsprechend leicht fiel das Zeichnen der Netzwerkkarten.²⁹ Je Pilotgebiet wurden unterschiedlich viele Akteure, Institutionen, Entitäten und Beziehungen in den Netzwerkkarten hinterlegt. Je kleiner das Flussgebiet – die Selke war das kleinste Flussgebiet – desto weniger Akteure und Beziehungen wurden eingezeichnet. An der Elbe, dem größten Flussgebiet, wurden relativ viele Akteure und Beziehungen identifiziert. In der ersten Erhebung an der Selke wurden 26 Akteure und 23 Beziehungen hinterlegt, an der Elbe hingegen 72 Akteure und 82 Beziehungen. Für die

²⁸ In zwei Fällen hatten Partizipierende grundsätzliche Schwierigkeiten im Umgang mit Miro. Um dennoch teilnehmen zu können, wurden Sie gebeten, Akteure und Beziehungen verbal zu ergänzen, sodass sie seitens des Interviewers ergänzt werden konnten.

²⁹ Es ist anzunehmen, dass die Probanden in der Corona-Pandemie bereits Erfahrungen einerseits mit den Onlineformaten und andererseits mit entsprechender Software gesammelt haben.

zweite Erhebungsrunde wurden die gezeichneten Netzwerkkarten der ersten Erhebung via *Gephi* visualisiert. Das Interviewmaterial wurde transkribiert, in MAXQDA übertragen, und auf zu ergänzende Akteure, Institutionen, ökologische Entitäten und Beziehungen untersucht. Wurden Akteure und Beziehungen diskutiert und nicht in den Netzwerkkarten hinterlegt, wurden relevante Textpassagen extrahiert und die Akteure und Beziehungen in den Netzwerkkarten ergänzt. Die Ergänzung bzw. Evaluation der Netzwerkkarten wird in Abb. 10 als ‚dynamic approach‘ bezeichnet und bildet ein besonderes Merkmal der in DRYRIVERS angewandten Methode. Dass die Probanden die tendenziell anspruchsvollen Netzwerkkarten bearbeiten konnten, zeigte sich an ihrem Umgang mit den Net-Maps: Sie ergänzten eigenständig Akteurskategorien, hinterfragten die Beziehungsformen³⁰ und verorteten Institutionen ggf. zwischen zwei Kategorien, wenn eine eindeutige Zuordnung nicht sinnvoll erschien.

Eine Besonderheit der Netzwerkkarten besteht darin, dass sie sich zur Genese struktureller Netzwerkkarten eignen *und* als erzählgenerierendes Instrument. Sobald die Probanden Akteure und Beziehungen hinterlegten, erklärten sie ihr Vorgehen gegenüber den anderen Teilnehmer*innen. So entstandene Diskussionen beschreiben nicht nur reichhaltige, multiple Perspektiven auf zentrale Akteure, ihre Position im Netzwerk sowie ihre Beziehungen und Relevanz für ein NWRM, sondern eignen sich auch dazu, potenzielle Meinungsverschiedenheiten nachzuzeichnen. Die aufgezeichneten Diskussionen standen anschließend als qualitative Daten zur Verfügung. Die Net-Maps generierten reichhaltige quantitative und qualitative Daten. Dennoch lassen sich am methodologischen Vorgehen auch kritische Punkte und Optimierungspotenzial identifizieren, welches in Tab. 8 zusammengefasst wird.

Tabelle 8: Kritik an Net-Maps als Methode und Optimierungspotenzial.

Kritik an Net-Maps als Methode	Optimierungspotenzial
- Es viel den Probanden schwer, einen Ausgangspunkt für das Netzwerk zu wählen: „Wie fangen wir an?“	- Hier empfiehlt es sich, zu Beginn bereits teilnehmende Institutionen im Netzwerk zu hinterlegen, um Anknüpfungspunkte zu bieten.
- Akteurskategorien sind zu eindeutig; manche Akteure und Institutionen sind in unterschiedlichen Rollen aktiv. (Z.B.: Sind Verbände wie NABU und BUND auch politische Akteure?)	- Grundsätzliches Problem der Kategorisierung. Typische, hybride Kategorien könnten ggf. angelegt werden. Probanden sollten Kategorien ergänzen können.
- Einige Fragen (z.B. Institutionen und deren Beziehungen) werden intensiver bearbeitet, als andere (insb. Relevanz).	- Die Net-Maps dürfen nicht überfrachtet werden. Es empfiehlt sich, sich auf zentrale Variablen zu konzentrieren (z.B. Entweder Zentralität anhand konzentrischer Kreise oder den Einfluss anhand der Skalen erheben).
- Nicht alle diskutierten Akteure und Institutionen werden auch eingezeichnet.	- Diskutierte Akteure können anhand des Interviewmaterials nachgetragen werden. Es empfiehlt sich, zwei interviewende Personen einzubinden, sodass eine Person moderiert und die andere die Netzwerkkarte betreut.
- Die Dauer von 90 Minuten ist zu lang für einzelne Erhebungen	- Hierbei handelt es sich um ein grundsätzliches Problem partizipativer Verfahren: Gruppenbasierte Workshops nehmen viel Zeit in Anspruch. Bei den Net-Map-Erhebungen mindestens etwa 120 Minuten angesetzt werden.

³⁰ Beziehungen wurden in den Net-Map-Erhebungen anfangs als unilaterale Pfeile hinterlegt. Beziehungen seien aber, wie die Probanden anmerkten, bilateral, weshalb die unilateralen Pfeile irritierten. In den nachfolgenden Erhebungen wurde dies angepasst.

2.4 Auswertung der Net-Map Erhebungen

Bei Net-Maps handelt es sich um einen Mixed-Methods-Ansatz zur Triangulation quantitativer und qualitativer Daten für den keine keine standardisierten Auswertungsverfahren vorliegen. Häußling (2006) folgend, lassen sich die erhobenen Daten differenzieren: Gezeichnete Netzwerkkarten bilden die sog. „Interaktionsebene“ des Netzwerks ab. Sie stellt ein Resultat sozialer Aushandlungs- und Konstruktionsprozesse dar, auf welcher sich individuelle Positionen aus den Beziehungen zu anderen Akteuren, Institutionen und Entitäten im Netz ergeben (Häußling 2006: 127). „Soziale Beziehungen sind demgemäß aus einem Netz anderer Beziehungen bedingt.“ (ebd.) Auf dieser Ebene werden Kooperations- und Konfliktbeziehungen, Informationskanäle, strukturelle Barrieren und Lücken sowie Konflikte betrachtet (ebd.). Diese (Art von) Beziehungen werden in dem Net-Map-Verfahren in das Netzwerk eingezeichnet. Analytisch trennen lässt sich die „Interventionsebene“. Hier sind individuelle Bedeutungszuschreibungen ebenso verortet, wie die Interventionsbestrebungen einzelner Akteure, anhand derer sie ihre Position im Netzwerk verändern und Dynamik ins Netzwerk bringen. Zur Erfassung der Motive und Bedeutungszuschreibungen sind qualitative Instrumente besonders geeignet (ebd.: 128).

In DRYRIVERS wurden die *quantitativen* Daten der Netzwerkkarten dazu verwendet, ein relativ belastbares und konsensfähiges Bild der Netzwerkstruktur zu entwickeln. *Qualitative* Daten wurden verwendet, um die Strukturen lokaler Wassergovernance zu explorieren, individuelle Positionen nachzuvollziehen und um die Motive und Bedeutungszuschreibungen der Akteure zu erfassen. In der Auswertung (s. Abb. 15) werden (1) gezeichnete Netzwerke in Excel-Matrixen überführt und via *Gephi* visualisiert. Sie bilden die Grundlage der Auswertung. (2) Aufgezeichnete Diskussionen werden transkribiert und als Textmaterial zur Analyse in MAXQDA übertragen. (3) Die Diskussionen werden dann mit den gezeichneten Netzwerkkarten verglichen. (4) Sollten in der Diskussion Akteure, Institutionen, Entitäten oder Bezie-

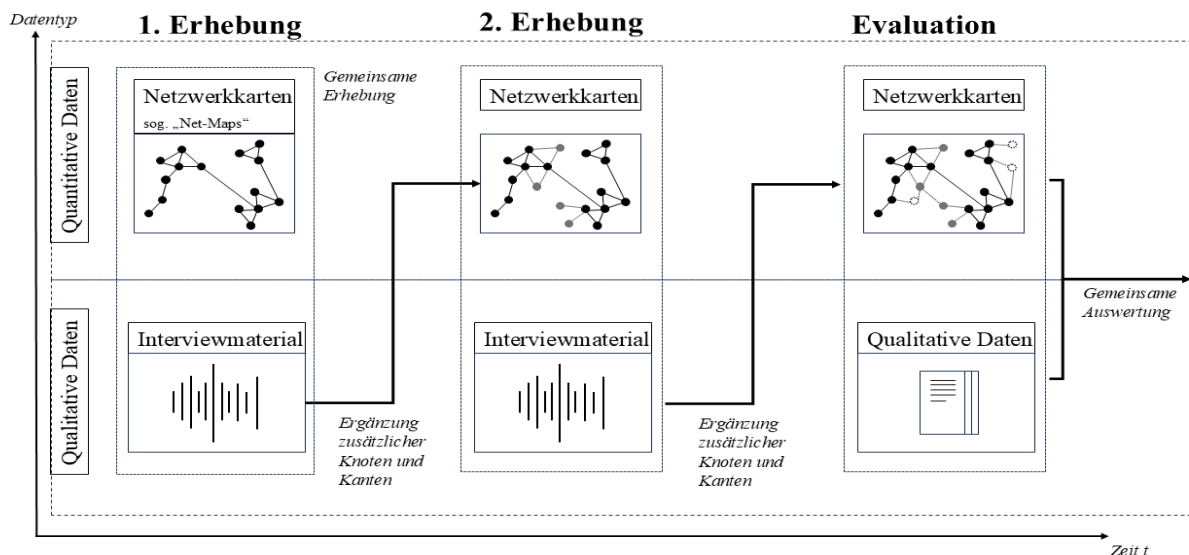


Abbildung 10: Darstellung des Vorgehens bei der Auswertung der Net-Map-Erhebungen. Quantitative und qualitative Daten wurden trianguliert (eigene Darstellung).

hungen genannt werden, die nicht in den Netzwerkkarten hinterlegt sind, werden diese in den Netzwerkkarten ergänzt.³¹ (5) Anschließend wurden die ergänzten Netzwerkkarten für die nächste Erhebungsrunde aufbereitet. (6) Schritte 1-5 wurden in der zweiten Erhebungsrunde wiederholt (s. Abbildung 10.), sodass die Netzwerke zur Evaluation verwendet werden konnten. Die erhobenen Daten wurden für die Flussgebiete getrennt ausgewertet und analysiert. Für jedes Flussgebiet liegen zwei Netzwerkkarten vor, die die Ergebnisse der ersten und zweiten Erhebung je Pilotgebiet darstellen.

Für die Flussgebiete Selke (Franke 2024) und Rur (Franke 2025) liegen Publikationen vor. Aus zeitlichen Gründen wurden die Ergebnisse der ersten Erhebungen verwendet.³² Folgende Parameter und Variablen wurden im Anschluss an die zweite Erhebung ausgewertet (s. Tabelle 9).

Tabelle 9: Übersicht über die in den Net-Maps erhobenen Variablen

<i>Variable</i>	<i>Erklärung</i>	<i>Ebene</i>
<i>Average Clustering Coefficient</i>	Der standardisierte <i>Average Clustering Coefficient (ACC)</i> wird als Maß herangezogen, um die Dichte des Netzwerks zu beurteilen. Der ACC ist standardisiert zwischen 0 (keine Verbindungen im Netzwerk) 1 (alle Knoten sind miteinander verbunden).	Gesamtnetzwerk
<i>Mittlerer Grad</i>	Der mittlere Grad gibt Auskunft darüber, wie viele Verbindungen bzw. Kanten ein Knoten im Netzwerk im Durchschnitt hat und kann als Indiz auf die Dichte des Netzwerks herangezogen werden.	Gesamtnetzwerk
Degree C	Die Degree-Zentralität gibt Auskunft über die Zahl der Verbindungen bzw. Kanten (k) eines Akteurs oder einer Institution.	Akteur/Institution

Tabelle 10: Übersicht über die Publikationen in DRYRIVERS

Flussgebiet	Publikation	Datengrundlage
Selke	Franke, T. (2024): „Flusspolitische Konflikte im Selketal: Transformative Zukunftsnarrative in hydro-soziologischen Netzwerken. Transformative Visions in Hydro-sociological Networks“. Berliner Debatte Initial 35(4):477–96. doi:10.25162/bdi-2024-0029.	Erste Erhebung (25.05.2023)
Rur	Franke, T. (2025). „Stadt, Land, Fluss. Transformative Netzwerke und schwierige Triaden in hydrosozialen Transformationsprozessen an der Rur. In: <i>Soziologie und Nachhaltigkeit</i> (SuN), Bd. 11, H. 2, S. 86-108. https://doi.org/10.17879/sun-2025-9182	Erste Erhebung (16.06.2025)

³¹ Knoten und Kanten, die nur in den Interviews genannt, nicht aber eingezeichnet wurden, wurden in der Dokumentation der Daten gekennzeichnet.

³² Beide Publikationen sind als Reaktion auf einen Call for Paper entstanden.

2.4.1 Das Selketal



Abbildung 11: „Die Selke am Falkensteiner Weg.“
Fotografiert am 14. September 2016 von „Migebert“. Zur
Verfügung gestellt via Creative Commons Attribution-Share
Alike 4.0.

Die Selke im Selketal stellt mit einer Wasserlauf-
länge von rund 64,4 km das kleinste un-
tersuchte Flussgebiet dar. Mit ihrer Quelle im
Nordostharz ist die Selke administrativ der
Flussgebietseinheit Elbe in Sachsen-Anhalt
zugeordnet. Sie stellt einen Zufluss zur Bode
dar, einem Nebenfluss der Saale. Im Oberlauf
verläuft die Selke weitestgehend naturbelas-
sen durch Natur-, Vogelschutz- und Land-
schaftsschutzgebiete, im Unterlauf verläuft
sie durch kleinere Ortschaften (z. B. Günters-
berge, Straßberg, Silberhütte, Alexisbad etc.).
Der Durchfluss der Selke liegt im niedrigen,
einstelligen Bereich (ca. 1-2 m³/s). Vor allem
im Winter und Frühjahr steigen die Pegel-
stände an. Aus soziologischer Perspektive ist
die Selke besonders, weil im wenig besiedel-
ten Oberlauf vergleichsweise wenig anthro-
pogene Eingriffe bestehen. Ausnahmen bilden Rudimente historischen Bergbaus im Oberlauf.

Der Durchfluss der Selke liegt im niedrigen, einstelligen Bereich (ca. 1-2 m³/s). Vor allem im Winter und Frühjahr steigen die Pegelstände an. Aus soziologischer Perspektive ist die Selke besonders, weil im wenig besiedelten Oberlauf vergleichsweise wenig anthropogene Eingriffe bestehen. Ausnahmen bilden Rudimente historischen Bergbaus im Oberlauf.

An der Selke wurden in der *ersten Erhebung* n=25 Akteure identifiziert, die mit k=17 Beziehungen verbunden wurden. In zwei ergänzenden Einzelinterviews (MWU, BUND) wurden weitere n_Q=25 Akteure und k_Q=36 Beziehungen ergänzt. In der zweiten Erhebung wurden in der Net-Map N₂=4 und K₂=2 Beziehungen hinterlegt. Nach der Analyse des Interviewmaterials konnten N_{Q(2)}=10 Akteure und K_{Q(2)}=33 Verbindungen ergänzt werden. Insgesamt ergibt sich damit ein Flussnetzwerk an der Selke mit N_{gesamt}=65 Akteuren und K_{gesamt}=88 Verbindungen.

Der Average Clustering Koeffizient von 0,259 legt nahe, dass es sich um ein mäßig vernetztes, überzufälliges Netzwerk handelt. Die meisten hinterlegten und diskutierten Akteure wurden dem administrativen Bereich zugeordnet (z.B. LHW, MWU, LAU). Es folgen „Sonstige“; etwa „Bürgerinitiativen“ (BIs) und „Flächeneigentümer“, weil hier heterogene Akteure gesammelt wurden. „Verbände“ bilden die drittgrößte Kategorie (u.a. BUND, NABU, Verband der Waldbesitzer, Harzklub). Es folgen die Land- und Forstwirtschaft (n=6), die Energiewirtschaft (n=6) und die Ökologie (n=5). Wirtschaftlich orientierte Akteure wie Schifffahrt (n=0), Fischerei (n=0) und Industrie (n=1) werden kaum oder gar nicht benannt.

Akteursverteilung an der Selke

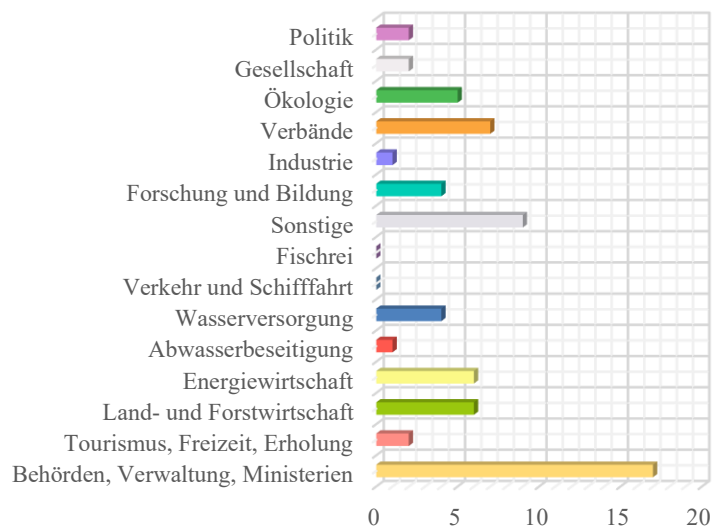


Abbildung 12: Akteursverteilung an der Selke

Zentrale Akteure lassen sich entlang relevanter Parameter identifizieren. Gemessen an der Zahl der Verbindungen zu anderen Akteuren („Degree-Zentralität“ oder „Grad“) nehmen der Selke-Dialog ($G_{\text{Selke-Dialog}}=12$) und der BUND Sachsen-Anhalt ($G_{\text{BUND}}=9$) die zentralsten Positionen ein. Es folgen das Ministerium ($G_{\text{MWU}}=7$), der Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt ($G_{\text{TSB}}=7$) und die Bürgerinitiative „Naturnaher Hochwasserschutz Selke“ ($G_{\text{NHWS}}=7$). Die Betweenness-Zentralität (B) zeigt vermittelnde Positionen im Netzwerk auf. Zwar korrelieren diese mit der Degree-Zentralität, allerdings sind auch Akteure vorhanden, die mit wenige Verbindungen hohe Betweenness-Zentralitäten aufweisen. Sie können als „Brücken“ bzw. „Gatekeeper“ interpretiert werden. Im erhobenen Selke Netzwerk zählen dazu etwa der Landesbetrieb für Hochwasserschutz Sachsen-Anhalt (LHW; $Z_B=0,175$), der das Landesamt für Umweltschutz (LAU), das MWU und den Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt (TSB) miteinander verbindet. Auch die Flächeneigentümer ($Z_B=0,157$, $G_{\text{FE}}=4$), die den Verband der Waldbesitzer, die Landwirtschaft, den BUND und erneuerbare Energien verbinden, nehmen eine zentrale Position ein.

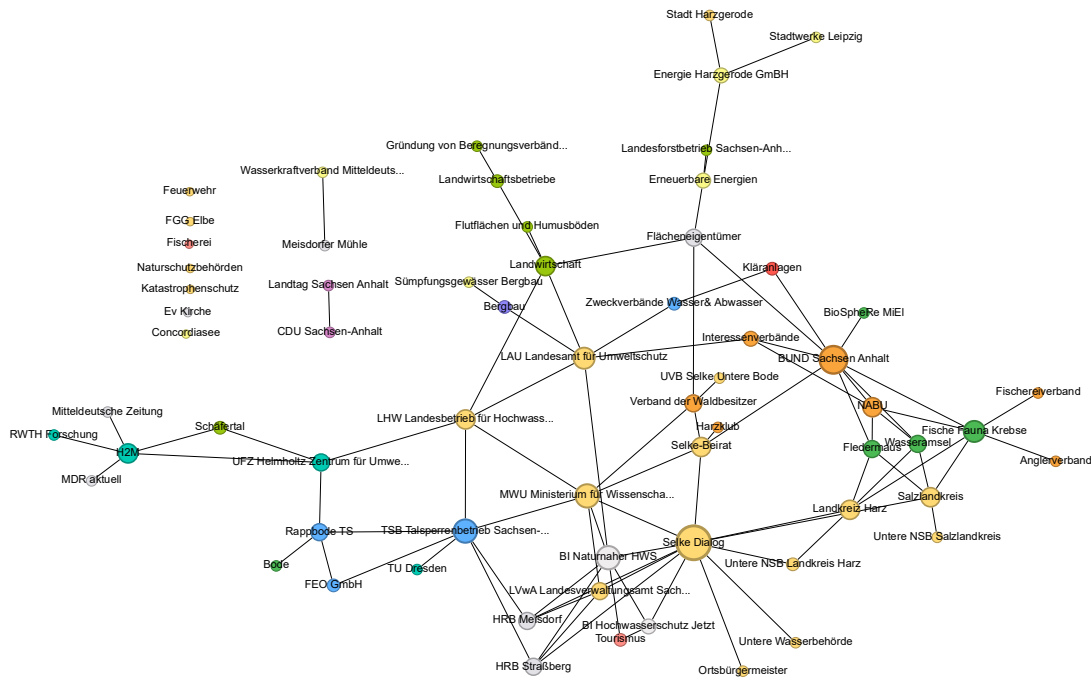


Abbildung 13: Das Netzwerk an der Selke nach der 2. Erhebung.

Tabelle 11: Zentrale Akteure im Selke Netzwerk

Akteur an der Selke	Kategorie	Grad	Betweenness-Zentralität
Selke Dialog	Administration	12	0,167
BUND SH	Verbände	9	0,139
MWU	Administration	7	0,067
TSB	Wasserwirtschaft	7	0,093
BI NHWS	Sonstige	6	0,135

In vielerlei Hinsicht erscheint das gezeichnete Netzwerk plausibel; etwa, weil offizielle-administrative Institutionen zentrale Positionen einnehmen, naturnahe Verbände im Naturschutzgebiet der Selke stark vertreten sind, und weil die industrielle Nutzung der Selke eine untergeordnete Rolle spielt. Quantitative

Parameter geben eine Orientierung im Feld lokaler Wassergovernance an der Selke und leiten die anschließende qualitative Auswertung. Durch die Auswertung der qualitativen Daten lassen sich die Besonderheiten der Selke darstellen und besondere Institutionen, wie der „Selke-Dialog“, die Bürger*inneninitiativen und die Rolle erneuerbarer Energien, verdeutlichen.

Der Selke-Dialog

Als Besonderheit der Selke wurde der „Selke-Dialog“ betrachtet (ausführlich in: Franke 2024). Im Ostharz liegt die Selke in einer dünn besiedelten, strukturschwachen und naturnahen Region.³³ 1994 kam es in Folge starker Niederschläge ($>80\text{l/m}^2$) zu einer Hochwasserlage, die den Scheiteldurchfluss von normalerweise zwischen $1\text{ m}^3/\text{s}$ und $8\text{ m}^3/\text{s}$ – in Ausnahmefällen im Frühjahr auch bis zu $15\text{ m}^3/\text{s}$ – auf $70\text{--}80\text{ m}^3/\text{s}$ anwachsen ließ, und demnach ein HQ_{200} darstellte (LHW 2002). Infolge der Hochwasserschäden (laut Schadensbericht ca. $53,526\text{ Mio. DM}$ ³⁴, s. LHW (2002)) entwickelte sich an der Selke ein langwieriger, lokalpolitischer Prozess zur Entwicklung eines adäquaten Hochwasserschutzes (HWS). Auf eine anfängliche ‚Selketalkonferenz‘ 2002 folgten auf administrativer Seite zunächst langwierige Planungsprozesse, während sich in der Lokalbevölkerung eine Bürgerinitiative gründete, die HWS-Optionen einforderte, die mit dem ökologischen Schutz des Selketals vereinbar waren. Eine zentrale Frage bestand darin, an welchen Orten (z.B. Straßberg, Uhlenbach, Meisdorf etc.) Hochwasserrückhaltebecken (HRBs) einzurichten und genehmigungsfähig sind. Eingeleitet durch das MWU erfolgte 2017 und 2018 ein Dialogprozess (sog. Selke-Dialog), in dessen Folge der ‚Selke-Beirat‘ 2018 gegründet werden konnte. Den nach wie vor stattfindenden Sitzungen des Selke-Beirats wohnen verschiedene Vertreter*innen der Verbände (BUND, Bauernverband, Waldbesitzerverband etc.), der Bürgerinitiativen, des Ministeriums und der Ämter auf Landesebene sowie der Landkreise bei. Seit 2021 besteht Baurecht für ein HRB oberhalb Straßbergs. Darüber hinaus stellt der Selke-Beirat einen wichtigen Bezugspunkt für das MWU dar, um konsensfähige Maßnahmen zu entwickeln und die Bedingungen für beschleunigte Planungsprozesse zu schaffen (s. MWU 2021).

Die (zukünftige) Einrichtung der HRBs sowie weitere Maßnahmen im HWS oberhalb Meisdorfs sind unmittelbar relevant für das NWRM an der Selke.³⁵ Wie auch die Talsperren-Systeme an der Rur kön-

³³ Wie Otto et al. (2021) zeigen, neigen kleinere Städte zu langsameren bzw. schlechteren Anpassungsstrategien und weisen daher einen niedrigeren ‚Adaption Readiness Index‘ auf.

³⁴ Das LHW weist auch darauf hin, dass die geschätzte Schadenssumme die tatsächlich entstandenen Schäden wohl unterschätzt, da es zu Verzögerungen und Verfahrensfehlern bei der Schadenserfassung kam.

³⁵ „[J]ede Benutzung des Gewässers ist erst mal genehmigungspflichtig. [...] Und jetzt ist die Frage, was für Maßnahmen (...) des Niedrigwasser Managements stellen Sie sich dort vor? Wollen sie zum Beispiel, (...) Einbauten in den Fluss vorsehen, wie zum Beispiel ein Rückhaltebecken oder ähnliches, um Wasser zurückzuhalten? Dann brauchen sie dazu die entsprechenden wasserwirtschaftlichen Genehmigungsverfahren. (...) [W]eil man muss das ja als hydrologische Extreme bedenken. Niedrigwasser- und Hochwasserschutz schließen ja irgendwann wieder den Kreis. Und das, was man für den Hochwasserschutz tut, kann man auch für das Niedrigwasser nutzen, wenn man das will. Ja, Stichwort: ein Rückhaltebecken muss nicht immer leer sein, sondern es kann auch mit einem Teilstau gefahren werden, um dann halt im Gebiet eine Veränderung der klimatologischen Rahmenbedingungen, der Auffüllung des Grundwasserleiters zur Verfügungstellung von Wasser für andere Zwecke zu gewährleisten. Aber all das ist in entsprechende genehmigungsrechtliche Verfahren zu kleiden. Ja? Das aber vorausgesetzt jetzt, sie planen etwas aktives, was am Gewässer Veränderungen nach sich zieht. Ansonsten ist Niedrigwasser erstmal auch ein hydrologisches Phänomen wie Hochwasser, und auch, dass ein Gewässer mal kein Wasser führt, ist etwas, was es also auch, glaube ich, ohne den Eingriff des Menschen schon immer mal gegeben hat und auch geben wird. (...) Ja, und dann wäre es immer im Einzelfall eine Entscheidung,

nen sie dazu genutzt werden, wenn es der HWS erlaubt, Wasser in niederschlagsreichen Phasen (tendenziell im Winter- und Frühjahr) zurückzuhalten und in den trockeneren Sommerphasen abzugeben, somit den Pegelstand der Selke zu regulieren. Mit Blick auf Planungsverfahren wurde mit dem Selke-Dialog ein Austauschformat institutionalisiert, das Planungsprozesse insofern flankiert und beschleunigen kann, dass relevante Vertreter*innen aus der Region – von lokalen (Naturschutz-)Verbänden, über Waldbesitzer*innen und Bürger*inneninitiativen, Ministerien etc. – versammelt und ggf. juristischen Verfahren vorbeugt. Im November 2025 gibt das MWU bekannt, dass unter Einbezug des Selke-Dialogs zukünftig ein zusätzliches HRB bei Ermsleben den Hochwasserschutz im Selketal gewährleisten soll (MWU 2025). Das Thema Niedrigwasser wurde im Selke-Dialog mit Blick auf die Selke als Biotop diskutiert, wobei kritisiert wird, dass Lebewesen von der Fledermaus bis zum Bachflohkrebs unterrepräsentiert bleiben, wie ein Teilnehmer berichtet:

„[D]ie die Fische, die sonstige Fauna im Fluss, wie Krebse, Bachflohkrebse und Sonstiges, was im Untergrund lebt, und zum Beispiel die Wasseramsel, die Fledermäuse, die auch vom, vom Wasser leben. Also, das ist ein sehr umfangreiches Biotop, was da durch die, die den Trockenfall der Selke, geschädigt werden würde. Und zwar dann dann nachher irreversibel, und deswegen war ja im vergangenen Jahr im im Selke-/ im Beirat, war das ja Thema, und das ist also ein ganz wichtiger Aspekt, dass die Selke als ökologisches Objekt leben bleibt. [Selke, Zweite Erhebung, #00:07:40-4#]

Inklusivere Ansätze der Wassergovernance, wie etwa das des „Integrated Water Resources Management (IWRM)“ kategorisieren Wasser (wie auch Böden oder Nahrungsproduktion) primär als Ressource (Samadi-Foroushani 2022) und als Lebensräume. Inwiefern nicht-menschliche Akteure an demokratischen Verfahren partizipieren (können), wird in der politischen Ökologie diskutiert.³⁶

Der Selke-Dialog ist als Plattform zu betrachten, mit dessen Hilfe sich mikro-politische Planungs- und Beteiligungsprozesse moderieren lassen. Am ersten Beispiel (Hochwasserschutz versus Naturschutz) wird deutlich, dass es dennoch zu Zielkonflikten zwischen verschiedenen, klimawandelrelevanten Aspekten kommen kann (ausführlich in Franke 2024).

2.4.2 Die Rur

Die Rur im FEG Maas-Süd in Nordrhein-Westfalen ist in drei Planungseinheiten (PLEs) unterteilt, die spezifische, anthropogene Prägungen aufweisen. Ihr 165km langer Fließweg ist länger als der der Selke. Die PLE *Obere Rur* ist der naturbelassene Flussabschnitt von der Quelle im Hohen Venn in Belgien bis zum Stausee Obermaubach. Die PLE *Mittlere Rur* beginnend beim Stausee durchfließt Düren, Jülich und Linnich. Der Abschnitt von Linnich durch die Heinsberger Region und der Mündung in

was dort konkret genehmigungsrechtlich notwendig ist. Aber auch aus naturschutzfachlichen Gesichtspunkten heraus (...) wäre natürlich immer auch gerade aufgrund dieses hohen Status als FFH-Gebiet, diese Dinge mit ganz präsent zu berücksichtigen, was uns also auch in unserem Verfahren bei dem Hochwasserrückhaltebecken Straßberg sehr lange beschäftigt hat und noch beschäftigt, gerade was die Substitution des Hochwasserrückhaltebeckens am ehemaligen Standort Meisdorf betrifft. Dort versuchen wir jetzt gerade, Lösungen zu finden, die den Eingriff in dieses sensible Ökosystem möglichst minimiert durch das Finden von alternativen Standorten. (Selke, Zweite Erhebung, #00:13:20-3#“)

³⁶ Breitere Resonanz fand das Konzept eines „Parlaments der Dinge“ von Bruno Latour (Latour 2009; s. auch Härpfer/Franke 2025).

die Maas wird als PLE *Untere Rur* bezeichnet. Im Fokus der Erhebung standen der Obere und der Mittlere Rur-Abschnitt.

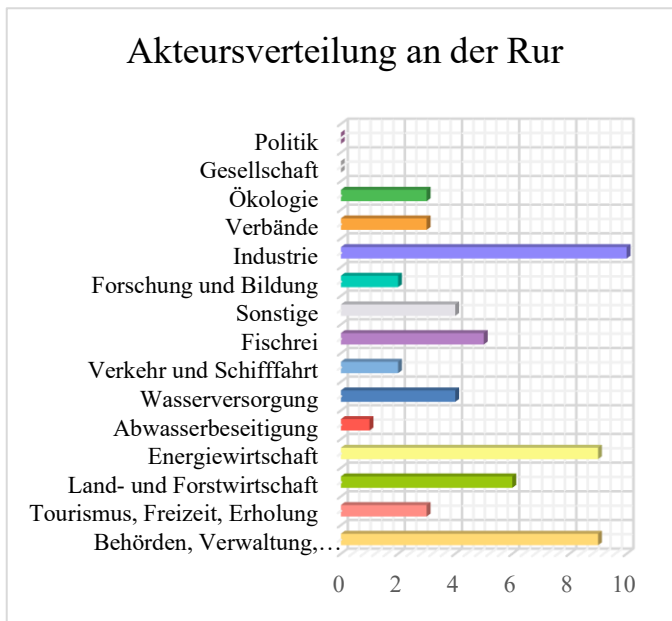


Abbildung 14: Akteursverteilung an der Rur.

Umliegende Flächen der Oberen Rur sind naturbelassen und werden überwiegend forstwirtschaftlich sowie als Grünflächen genutzt. Großen Einfluss auf die Gewässerökologie der Mittleren und Unteren Rur hat das Talsperren-System der Oberen Rur. Hierzu zählen die Rurtalsperre Schwammenauel, Deutschlands zweitgrößter Stausee, sowie die Staustufen Heimbach und Obermaubach (Deutsches Talsperrenkomitee e.V. 2013: 295).³⁷ Die Mittlere Rur ist historisch stark industriell geprägt. Hier befinden sich jahrhundertalte Mühlenteiche, also künstliche Seitenarme, die parallel zur Rur verlaufen, deren Ursprung sich kaum datieren lässt, die jedoch die industriellen Wurzeln der Stadt bezeugen.³⁸ Hydrologisch relevant sind darüber hinaus Grundwasserabsenkungen in der Re-

gion, die die Bezirksregierung Arnsberg RWE bis 2030 genehmigte, mit dem Ziel, vor allem die Abbruchkanten der anliegenden Braunkohletagebaue Hambach und Inden zu stabilisieren.³⁹

Die historischen Tendenzen industrieller Nutzung zeigen sich in den Net-Maps: die Probanden hinterlegen und diskutieren $N_{\text{gesamt}}=64$ verschiedene Akteure an der Rur, die sie durch $K_{\text{gesamt}}=152$ Kanten verbinden (s. Tab. 6). Zentrale administrative Institutionen (z.B. Bezirksregierung Köln, Untere Wasserbehörde Düren, MUNV) sind zahlreich vertreten. Ebenso viele Institutionen und Akteure werden der Energiewirtschaft ($n=9$) und der Industrie ($n=10$) zugeordnet.

Verbände ($n=3$), wie der BUND und NABU, werden seltener angeführt als die Land- und Forstwirtschaft ($n=6$) oder die Fischerei ($n=5$). Politik und Gesellschaft werden nicht diskutiert. Ein Average-Clustering-Koeffizienten von $C=0,347$ deutet auf eine moderate lokale Kohäsion hin. Gemessen an dem Grad und der Betweenness-Zentralität lassen sich einige Akteure und Institutionen hervorheben. Besonders viele

³⁷ Nur die Bleilochtalsperre in Thüringen ist größer, sie hält 212,1 Mio. m^3 zurück (Deutsches Talsperrenkomitee 2013: 44). Der Stauinhalt der Rurtalsperre lässt sich für 30 Tage nachvollziehen. Im August 2025 lag der Stauinhalt zwischen 112 und 123 Mio. m^3 (WVER 2025).

³⁸ Droste schreibt zur Geschichte Dürens: „Die Entwicklung des Jülich-Dürener Wirtschaftsraumes ist somit ein Resultat der intensiven Nutzung seiner Wasserkraft seit dem 12.-13. Jahrhundert. Seit dem 8. Jahrhundert sind die Voraussetzungen dafür geschaffen worden. Durch die Anlage künstlicher Seitenarme, sogenannter Mühlenteiche, machte man die Wasserkraft der Rur nutzbar. Zusammen mit seinen Teichen bildete der Fluß das Energienetz des protoindustriellen Jülich-Dürener Wirtschaftsraumes.“ (Droste 2003: 10)

³⁹ „Die Bezirksregierung Arnsberg hat den wasserrechtlichen Erlaubnis Antrag der RWE Power AG zur Fortsetzung der Entnahme und Ableitung von Grundwasser für die Entwässerung des Tagebaus Hambach im Zeitraum 2020 – 2030 geprüft. Der Antrag ist für eine auf 370 Millionen m^3 beschränkte Jahressüpfungsmenge erlaubnisfähig.“ (Bezirksregierung Arnsberg 2021)

Verbindungen weisen der Wasserverband Eifel-Rur ($G_{WV}=24$) sowie der Wirtschaftsverband ($G_{WirtVB}=24$) auf. Es folgen der lokale Fischverein ($G_{FV}=15$), die industriellen Entnehmer ($G_{IE}=12$) sowie die „Umwelt & Natur, Pflanzen & Tiere“ ($G_{UNPT}=11$).⁴⁰ 11% der Akteure weisen weniger als zwei Kanten auf. Akteure mit vielen Verbindungen (Grad) weisen oft auch hohe Betweenness-Zentralitäten auf (s. Tab. 12). Zentrale Institutionen sind jedoch nicht unbedingt vermittelnde Instanzen. Industrielle Entnehmer ($ZB_{IE} = 0,057$) und die Bezirksregierung Köln ($ZB_{BK}=0,041$) weisen im Verhältnis zu ihrer Zentralität vergleichsweise niedrige Betweenness-Zentralitäten auf. Sie vermitteln insbesondere in ihnen nahestehende Cluster, die darüber hinaus weniger verbunden sind.

Die gezeichneten Netzwerke an der Rur wirken plausibel, da sie die Tendenzen der historisch gewachsenen Strukturen vor allem im Dürener Raum spiegeln. Die Besonderheiten des durch die Industrie und Energiewirtschaft geprägten Flussnetzwerks wurden in den Netzwerkerhebungen diskutiert und in Franke (2025) theoretisch eingebettet.

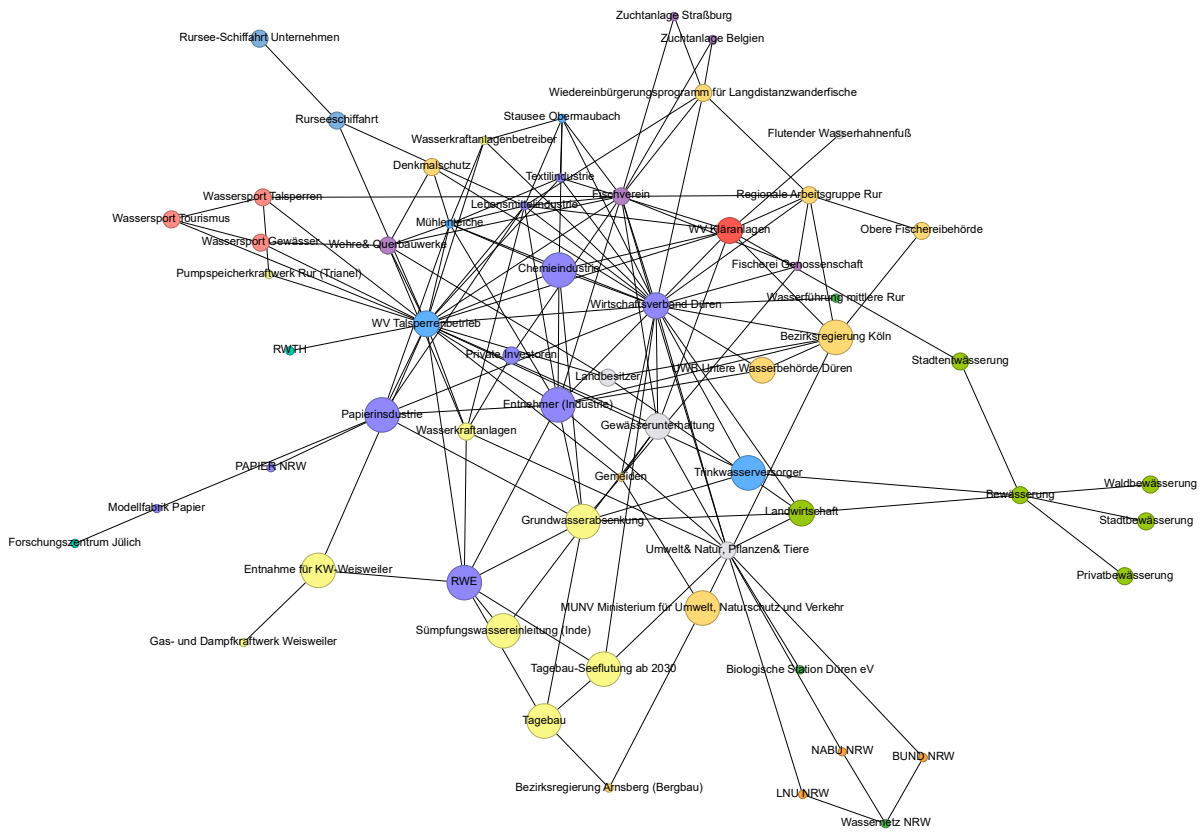


Abbildung 15: Netzwerk an der Rur.

⁴⁰ Bei den Zentralitätsmaßen sind methodologisch bedingte Verzerrungseffekte nicht zu vermeiden, etwa weil Vertreter*innen teilnehmender Institutionen Verbindungen ‚von sich ausgehend‘ zeichnen (s. Kap. 2.3).

Tabelle 12: Zentrale Akteure im Rur-Netzwerk.

<i>Akteur an der Rur</i>	<i>Kategorie</i>	<i>Grad</i>	<i>Betweenness-Zentralität</i>
WV Talsperrenbetrieb	Wasserversorgung	24	0,299
Wirtschaftsverband	Industrie	24	0,259
Fischverein	Fischerei	15	0,117
Entnehmer Industrie	Industrie	12	0,057
Umwelt, Natur, Pflanzen und Tiere	Ökologie	11	0,171

Wasser-Regime an der Rur

Anders als an der Selke (s. Kap. 2.4.1.) ist der Wasserstand an der Rur unmittelbar durch den Abfluss der Rurtalsperre geprägt. Das Speichervolumen der Talsperre beträgt bei Vollstau 202,6 Mio. m³. Der Abfluss der Talsperre wird konstant auf mindestens 5 m³/s gehalten⁴¹, sodass bei Niedrigwasser ein Trockenfallen der Rur nahezu ausgeschlossen ist.⁴²

Den Net-Map-Erhebungen als auch der Historie Dürens folgend, liegt der Fokus der Netzwerke auf der Energiewirtschaft und der Industrie (insbesondere Papier- und Chemieindustrie). In DRYRIVERS wurde die sich wechselseitig-verstärkenden Institutionalisierung und Stabilisierung heterogener Akteure in einem Netzwerk, dass im Anschluss an Geels (2014) als *Regime*⁴³ bezeichnet werden kann, betrachtet. Geels' (2014) Regime-Begriff ist Teil der sog. ‚Multi-Level-Perspective‘ (MLP) und als solcher der Institutionentheorie sowie den *Sustainability-Studies* zuzuordnen. Ihr Ziel ist es, institutionellen Wandel zu erklären. Die grundlegenden Kategorien bilden: (1) Nischen, d.h. ‚geschützte‘ Räume, in denen sich sozio-technische Innovationen entwickeln, (2) die Regime-Ebene, auf der es zu einem ‚alignement‘ unterschiedlicher sozialer Akteure eines dynamisch-stabilisierten, soziotechnischen Systems, (3) sowie die sog. *Landscape*-Ebene, auf welcher z.B. meteorologische, infrastrukturelle und materielle Kontexte verortet sind (s. Abb. 21) (Geels 2002, Geels 2011, Geels/Schot 2007). Das Konzept eignet sich für die analytische Trennung relevanter Einflussgrößen im Rur-Flussnetzwerk.

⁴¹ Der Abfluss am Heimbacher Staubecken schwankt zwischen dem 26.07.2025 und dem 26.08.2025 zwischen ca. 2,8 und 7,3 m³/s. Einsehbar sind die Pegelstände beim WVER (2025).

⁴² So berichtet ein Teilnehmer der Net-Map Erhebungen: „Wir sind ja abhängig vom Wasserverband (...). Wir dürfen eigentlich nie was mit Niedrigwasser zu tun haben, weil die noch unterhalb vom Stausee Obermaubach liegt, und (...) der Wasserverband ist verpflichtet, von diesem Stausee Obermaubach Minimum fünf Kubikmeter abzugeben, egal was oben im See drin ist. Das sind die der Industrie gegenüber verpflichtet, das heißt, niedriger als fünf Kubikmeter kann es bei uns nicht gehen.“ (Rur, Erste Erhebung, #00:07:18-9#)

⁴³ Der institutionentheoretische Regime-Begriff unterscheidet sich damit von einem hydrologischen Regime-Begriff, der saisonale Abflussmuster beschreibt. In der hier gewählten Verwendung gibt das institutionelle Regime das hydrologische Regime der Rur vor.

Sowohl meteorologisch/hydrologisch (und auch aufgrund der Talsperrensteuerung) sind Niedrigwassereignisse und hydrologische Dürren⁴⁴ keine akut auftretenden Herausforderungen, sondern langfristige Phänomene unter lokal divergierenden Bedingungen (Marx et al. 2023). Wenn sie auftreten, was in den letzten Jahren (2003, 2011, 2015, 2018-2020) öfter vorkam, können sie jedoch weitreichende, multisektorale Folgen haben (ebd.). Die meteohydrologischen Bedingungen sowie die durch das Talsperrensystem-geprägten infrastrukturellen Bedingungen sind auf der Landscape-Ebene verortet, durch vergleichsweise stabile Rhythmen und Entwicklungsgeschwindigkeiten charakterisiert. Dennoch üben das sich verändernde Klima, zunehmende Trockenphasen und in Intensität und Frequenz zunehmende Extremereignisse, einen langfristigen Anpassungsdruck auf die sozio-technische Regime-Ebene und das institutionelle Wassermanagement aus.

Zur Regime-Ebene gehören politische Entscheidungsträger/innen (an der Rur: Untere/Obere Wasserböden, die Bezirksregierung Köln, das MUNV), der sondergesetzliche Wasserverband, der die Talsperrensteuerung sowie zentrale Aufgaben der Gewässerunterhaltung übernimmt und industrielle Akteure des Energie- und Industriesektors – also die Akteure, die in den Net-Map-Erhebungen als zentral ausgewiesen wurden (s. Abb. 20). Es zeigt sich, dass industrielle Entnahmen, bewilligte Wasserrechte und Abflussmengen, die den Wasserstand der Rur regulieren, ein hydrosoziales Netzwerk bilden.

Der Tagebau Inden, das Kraftwerk Weisweiler, sowie der Tagebau Hambach der RWE Power AG liegen in geographischer Nähe zur Rur. Konkrete Entnahmemengen aus der Rur sind zwar unbekannt, dennoch weisen das UBA (2025c) Energieversorger mit 38,6% [6,9Mrd. m³] als anteilig große Entnehmer aus – Wasser wird hier insbesondere zu Kühlzwecken eingesetzt –, gefolgt vom Bergbau und verarbeitenden Gewerbe mit anteilig 3,2% am gesamten Wasserdargebot Deutschlands [176 Mrd. m³] (UBA 2025b). Das Recherche-Kollektiv Correctiv beziffert Entnahmen für die Tagebaue Hambach und Inden 2019 auf insgesamt auf 376.563.464 m³ (Joeres et al. 2022).⁴⁵ Hinzu kommen industrielle Entnahmen von Papier-, Chemie- und Lebensmittelindustrie in Düren, die historische Wurzeln an der Rur haben:

„[B]ei uns sind wir das gewohnt, dass die Industrie dieses Wasser braucht. Dafür wurden vor über 200, 300 Jahren fast sind diese Mühlenteiche alt; die wurden immer für die Papierindustrie gebraucht und auch Stoffindustrie, und das ist, das sind doch ganz alte Wasserrechte, die die haben, die dann das Wasser, was in die Mühle und Teiche abgeht. Ob man jetzt da mal nachrechnen kann, bei den einzelnen Firmen: "Kommen wir mit etwas weniger zurecht?", das wäre dann eine zweite Schiene. Aber ich glaube nicht, dass einer an seine Wasserrechte rangeht und die so ohne Weiteres einschränkt. Das wird nicht so einfach sein. Obwohl die Industrie da schon sehr viel, muss ich wirklich auch hier lobend erwähnen, die haben sehr viel gemacht, die arbeiten sehr viel mit internen Kreislaufsystemen, die entnehmen gar nicht mehr so viel Wasser aus

⁴⁴ „Dürren entwickeln sich schleichend mit oft nicht eindeutig definierbarem Anfang und Ende. Einflussfaktoren sind z. B. stabile Hochdruck-Wetterlagen mit ausbleibendem Niederschlag und zunehmender Verdunstung, abnehmende Schnee- und Gletscherschmelze, aber auch Eigenschaften von Böden oder hydrologischen Einzugsgebiete.“ (Marx et al. 2023: 139)

⁴⁵ Nach eigenen Angaben liegen bzw. lagen die Entnahmen durch die RWE Power AG deutlich niedriger. Im Rahmen einer Veranstaltung zur Öffentlichkeitsbeteiligung gibt RWE 2016 folgendes Statement: „RWE Power bezahlt neben den anfallenden Betriebskosten für die Grundwasserentnahme das sogenannte Wasserentnahmeentgelt. Als Wasserentnahmeentgelt wird das in deutschen Bundesländern nach den Landeswassergesetzen für die Entnahme von Grundwasser und Oberflächenwasser erhobene Entgelt bezeichnet. Im Moment belaufen sich die Kosten auf ca. 10 Mio. € pro Jahr für eine gehobene Wassermenge von jährlich rund 575 Mio. m³ (Stand 2015). Die revierweite Gesamtsüpfungsmenge liegt unter der maximal genehmigten Fördermenge der jeweiligen Wasserrechte von in Summe 715 Mio. m³/a.“ (RWE/IFOK 2016)

diesen Teichen, vor allen Dingen leiten nichts mehr ab in die Teiche. Früher wurden Schmutzwasser in die Teiche zurückgeleitet, und das ist alles nicht mehr da.“ [Rur, Erste Erhebung, #00:20:15-7#]

Wasserentnahmerechte, insbesondere für Entnahmen über 600.000 m³/a, erteilt die Bezirksregierung Köln, wobei für Entnahmen im Bergbau die Bezirksregierung Arnsberg zuständig ist (Bezirksregierung Köln o.A.). Wasserentnahmerechte legitimieren industrielle Entnahmen, sind rechtssicher und längerfristig angelegt. In Ausnahmefällen bestehen sog. „alte Wasserrechte“, die z.T. sehr günstige Entnahmekonditionen sichern und laut WHG nur in Ausnahmefällen (und gegen Entschädigung) widerrufen werden können (Schoster 2023: 807). Industrielle Entnehmer ist an der Rur vor allem die Papierindustrie.⁴⁶ Die Bereitstellung von Brauchwasser gehört, neben der Trinkwasserversorgung und dem Hochwasserschutz zu den Bewirtschaftungszielen des Talsperrenbetriebs. Andere Nutzungen, etwa der Wassersport in der Rur und auf dem Rursee, Tourismus, die Wasserkraft haben eine geringere Priorität als die übergeordneten Bewirtschaftungsziele:

„Was den Talsperrenbetrieb angeht, ist es so, dass es eigentlich nur drei Bewirtschaftungsziele gibt, und das ist Hochwasserschutz, Brauchwasser und Trinkwasser, und alles andere wird dem untergeordnet, auch zum Beispiel die Wasserkraft. Die Wasserkraft kriegt nur das Wasser, was [abgelassen wird, T.F.]. Und was aber versucht wird, ist, betrieblich einen Ausgleich zu finden. Das heißt, [...] dann kann man das ja manchmal auch mal eine Woche hin und herschieben oder entsprechend so betrieblich irgendwie eine Vorgehensweise finden, wie es dann für alle Nutzer doch besser ist.“ [Rur, Erste Erhebung, #00:27:53-0#]

Die durch das Talsperren-Management gewährleistete, hohe Ausfallsicherheit der Mindestabgabemenge von 5 m³/s ist nicht nur im Interesse industrieller Entnehmer, sondern ebenso in dem der Lokalpolitik. Denn Teil des hydrosozialen Arrangements sind auch die Arbeitsplätze, die an die industrielle Wassernutzung gebunden sind.

„[E]s ist auch so, dass die Ausfallsicherheit sehr, sehr hoch ist von diesen fünf Kubikmetern Abfluss die Sekunde, weil natürlich da eine ganze Menge Industrie da ist. Also, sobald [der Wasserverband] nicht mehr genug Wasser liefert, kriegt die Industrie Probleme, und da hängen viele Arbeitskräfte dran, und das wird, das wird, ist schon eine sehr, sehr hohe Priorität. Und es ist so, dass rein hydrologisch, dass man keine Probleme hat in der Rur, also rein von der vom, also was Niedrigwasser angeht, klar, in den Strecken, wo die Mühlenteiche, Wasser entnehmen, da bleibt weniger in der Rur übrig. Aber [...] es immer noch mehr als es, als es ohne Talsperren wäre, das Problem eigentlich der Rur ist, dass die Gewässerstruktur nicht Niedrigwasser fähig ist [...]. (Rur, Erste Erhebung, #00:34:29-3#)

Über die Mitgliedschaft im sondergesetzlichen Wasserverband können industrielle Entnehmer Einfluss auf die Abgabemengen nehmen, wobei die Einflussmöglichkeiten über monetäre Mittel moderiert werden.⁴⁷ Insgesamt bilden Bezirksregierung, Wasserverband und industrieller Entnehmer was Geels ei-

⁴⁶ „Jetzt überwiegend ist das jetzt Papierindustrie. Auch war das früher auch schon. Wir haben, wir haben sehr viel Papierindustrie in Düren, und das fängt schon an dem oberen Teil unserer Strecke an direkt, da gibt's die gibt's schon lange ne Hygienepapierfabrik, Toilettenpapier, Haushaltspapier und so weiter.“ [Rur, Erste Erhebung, #00:21:48-7#]

⁴⁷ „[E]s gibt einmal pro Jahr die Verbandsversammlung, wo die wichtigen Sachen bestimmt werden, und sowas wie so (...) ein Aufsichtsrat, der sogenannte Verbandsrat, der zwischenzeitlich (...) Ansprechpartner ist für Regelungen, wo halt Delegierte der Verbandsversammlung hin delegiert werden. Und jeder, jedes Mitglied, hat so viel Mitspracherecht, wie es zahlt ist. Es hängt eigentlich wirklich an den Euros, weil je mehr man zahlt, desto mehr hat man auch Vorteil, ne? So sind die Verbandsregeln (...) ausgelegt, und genauso wird das auch gewichtet. Das heißt, große Entnehmer haben mehr Rechte, also mehr Mitspracherecht, als kleine Entnehmer und bei großen Entnehmern, das ist hauptsächlich die Papierindustrie und RWE mit dem Kraftwerksentnahme, das ist auch nochmal ein großer Name, und halt die Trinkwasserversorger, in Sachen Wasserrecht sind das die großen Player. Es gibt natürlich auch so kleine wie Fischbetriebe, Fischereibetriebe, die ein Entnahmerecht

nen ‚historical bloc‘ (Geels 2014) nennt; d.h. ein assoziiertes Arrangement aus materiellen, institutionellen, politischen und ökonomischen Komponenten, dass über großen Einfluss verfügt. Da sie sich gegenseitig stützen, sind sie gegenüber Wandlungsprozessen relativ resistent. Ihre Resistenz ließe sich Geels (2014: 33f.) folgend durch ihre *material power* inklusive finanzieller Ressourcen begründen – historische Infrastrukturen, wie die Talsperre, aber auch die Mühlenteiche, sind tief in die Landschaft eingeschrieben. Außerdem verfügen sie über sog. „broader institutional power“, d.h. sie sind Teil weitreichenderer Governance-Strukturen, deren Interdependenz sie vor Transformations- und Innovationsvorhaben schützt, aber (klimatisch bedingte) Adaptionsprozesse ebenso zu einer Herausforderung werden lässt.

In Regimen finden Adaptionsprozesse als inkrementelle Innovationen statt: Berichtet wird von der Modellfabrik Papier, in welcher daran geforscht wird, den Energieeinsatz der Papierproduktion (inklusive Wasser) zu senken.⁴⁸ Auch die Zahlen des statistischen Bundesamtes weisen darauf hin, dass die industrielle Wassergewinnung insgesamt zurückgeht – von 46,3 Mrd. m³ 1991 auf 17,9 Mrd. m³ 2022 (s. Kap. 1.2.1). Die industriellen Betriebe entlang der Rur verfügen für den unwahrscheinlichen Fall eines Niedrigwassers über ein Schlichtungsabkommen, welches durch einen lokalen Industrieverband moderiert würde – allerdings ist historisch kein solcher Fall bekannt.

„Mir ist auch nicht bekannt, dass es diesen Fall jemals gegeben hat, weil wir halt das Talsperrensystem haben. Ähm, das heißt, der innerhalb oder unter den Wasserentnehmern gibt es da keinen Konflikt. Also, es entnimmt heutzutage keiner so viel Wasser, dass der andere kein Wasser mehr zur Verfügung hat.“ (Rur, Zweite Erhebung, #00:54:32-6#)

RWE, der numerisch größte Einzelentnehmer NRWs, plant den Kohleausstieg 2030 (RWE 2023a, 2023b), womit auch das Volumen des benötigten Kühlwassers sinkt, da Kühlwasser den größten Anteil der betrieblichen Wassernutzung in NRW bildet. Die anschließend geplante Flutung des Tagebaus benötigt wiederum Wasser (mehr dazu in Kap. 7).

Von lokalen Transformationsprozessen an der Rur wurde ebenfalls berichtet: Ein lokaler Fischverein setzt sich seit Jahren für die Wiederansiedlung der ‚Langdistanzwanderfische‘ an der Rur ein. Das ‚Wiedereinbürgerungsprogramm für Langdistanzwanderfische‘ (WPLDWF) bildet den Nukleus des NRW-weiten Vorhabens. In der lokalen „AG Rur“ sind laut Fischverein zentrale Institutionen der Wasserwirtschaft an dem Vorhaben beteiligt, wie u.a. der Wasserverband und die Bezirksregierung. Um die Wanderungen der Fische zu beobachten und Hindernisse zu identifizieren, holen die Angler regelmäßig Lachseier aus Frankreich und Belgien. Prämisse für die Wiedereinbürgerung der Wanderfische ist eine durchlässige Wasserführung der Rur, die zurzeit durch historische Wehre und Querbauwerke verhindert wird. Die Fischer sehen den Lachs als ‚politisches Zugpferd‘ (Rur, Erste Erhebung, #00:55:40-7#) zur

haben, oder irgendwelche Gartenbaubetriebe, die auch mal Wasser entnehmen, auch [...] landwirtschaftlichen Betriebe [...] da [sind] die Entnahmen sporadisch, die sind sehr klein, und dann lohnt es sich nicht, diejenigen als Mitglied zu führen, weil das mehr Verwaltungsaufwand ist, als nachher nutzen hat, und der Bauer muss ja dann auch zahlen.“ (Rur, Erste Erhebung, #00:46:45-0#)

⁴⁸ „Die Modellfabrik Papier – das ist ein bundesweites Forschungsprojekt der Papierindustrie – die hat primär zum Ziel, zu erforschen, die CO₂-Neutralität der Papierproduktion, erstens, und zweitens die Reduktion des Energieeinsatzes um bis zu 80 Prozent, ja? (...) Also, das ist so iteratives Forschungsprojekt, wo alles auf den Kopf gestellt wird in der Papierproduktion, ne? Und da ist ein Nebenaspekt (...) kann sein, nochmal die erhebliche Reduzierung vom Wassereinsatz bei der Papierproduktion. Also, da forscht man auch daran, zu überlegen, wie kann ich Papier überhaupt gänzlich ohne Wasser produzieren?“ (Rur, Zweite Erhebung, #00:49:02-8#)

Wiederherstellung der Durchlässigkeit der Rur und zum Rückbau der Wehre – oder zur Einrichtung von alternativen Lösungen wie Fischtreppe.⁴⁹ Sie sehen sich damit im Einklang mit der WRRL, welche die Renaturierung der Rur-Abschnitte vorsieht.

Soziologisch lässt sich die Konstellation aus Hobby-Fischer*innen, dem Wasserverband und dem Lachs als Allianz des ‚ökologischen Eigensinns‘ (Schaupp 2024: 49ff.) beschreiben, weil die Fischer ihr Umweltwissen einsetzen, um politische Transformationsvorhaben zu initiieren. Die Renaturierungsvorhaben an der Rur verfolgen WRRL-konforme Ziele, weshalb die Fischer auf politische Unterstützung hoffen können. Den Renaturierungsvorhaben steht allerdings entgegen, dass die Querbauwerke und Wehre partiell unter Denkmalschutz stehen. Darüber hinaus berichtet die Rheinische Post (RP) (2025) für den Ort Wassenberg an der Rur, dass die SPD-Kreistagsfraktion eine kleine Anfrage zur Renaturierung der Rur mit folgendem Ergebnis stellte:

„Die Renaturierung der Rur und ihrer Auen sei eine Aufgabe, deren Lösung voraussichtlich Jahrzehnte in Anspruch nehmen werde, betont die Kreisverwaltung. Dies gelte für Wassenberg genauso wie für alle anderen Bereiche des Kreises Heinsberg.“ (RP 2025)

Die Kreisverwaltung begründet die Dauer des Vorhabens mit lokalen Grundeigentumsverhältnissen im



Abbildung 16: Akteursverteilung an der Elbe.

Ortsteil Ophoven: Die Kreisverwaltung müsse für die Renaturierung der Rur Grunderwerb tätigen, welcher in vielen Fällen nur über Tauschland möglich ist (ebd.). Die Herausforderung, dass flussnahe Flächen nicht Eigentum der Kreise und Kommunen sind, und somit Renaturierungsvorhaben ebenso wie andere Bauvorhaben erschwert werden, lässt sich auf andere Rur-Abschnitte übertragen.

2.4.3 Die Elbe

In DRYRIVERS wird der Elbabschnitt von Prettin (Grenze SN/SH) bis Geesthacht (ca. 410 Fließkilometer) betrachtet, wo die Außen- und Binnenelbe durch das gleichnamige Wehr getrennt werden (s. GVB DRYRIVERS 2021: 13). Die mittleren Abflussvolumina sind in dem Elbabschnitt mit 556 m³/s deutlich höher, als in Selke oder Rur. Zum Zeitpunkt der Antragsstellung lag der niedrigste gemessene Wasserstand der Elbe bei 0,46 m⁵⁰ und der Elbabschnitt zählt als einziger zu

⁴⁹ Der für die Gewässerunterhaltung zuständige Wasserverband unterstützt das Vorhaben, wie sich am Staubecken Obermaubach zeigt, das so modifiziert wurde, dass die Wanderung der Fische ermöglicht und beobachtbar wird, was einen touristischen Mehrwert mit sich bringt.

⁵⁰ Im Juli 2025 verzeichnen Teile der Elbe infolge langer Trockenheit erneut Niedrigwasser, wobei die sog. „Strecke 9“ – ein sehr breiter und eher flacher Flussabschnitt zwischen Dömitz und Hitzacker – sich auf einen Wasserstand von 50cm in der Fahrrinne abflachte. In Folge des Niedrigwassers würden Sportboothäfen geschlossen, Elbfähren eingestellt und Fischer sorgten sich um die ökologische Qualität der Elbe (Schiller/Sander 2025).

den Bundeswasserstraßen. Im Elbe-Einzugsgebiet liegen insgesamt 10 Bundesländer⁵¹.

In 85% der Oberflächenwasserkörper im Elbeeinzugsgebiet stellen „Abflussregulierungen und/oder hydromorphologische Veränderungen eine signifikante Belastung dar“ (FGG Elbe 2021: 66). Hydromorphologische Veränderungen können z.B. Querbauwerke (Wehre, Schleusen, HWBs etc.) oder Flussbegradigungen sein, die für den HWS, zur Wasserkraftnutzung, der landwirtschaftlichen und industriellen Nutzung und zum Erhalt der Schifffahrt vorgenommen werden (ebd.).

Bei der Elbe handelt es sich um den „viertgrößten Fluss Mittel- und Westeuropas“, der 97175 km durch Deutschland fließt. Die größten Städte im Einzugsgebiet sind u.a. Berlin, Hamburg und Prag. Mit im Schnitt 187 E/km² (FGG Elbe 2021) ist die Besiedlungsdichte entlang der Elbe (mit Ausnahme der Metropolen) insgesamt relativ niedrig. Über die Hälfte der Einzugsgebietsfläche wird ackerbaulich oder als Grünland verwendet, 30% der Fläche sind Wald- und Forstflächen (ebd.). Entsprechend ihrer Weitläufigkeit wird die Elbe vielfältig genutzt und verändert (von der Schifffahrt und HWS, über die Trink- und Brauchwasserbereitstellung, Wasserkraft und Freizeitaktivitäten im Motor- und Angelsport bis hin zur touristischen Nutzung).

Als langwirkende und problematische Nutzungen werden im Bewirtschaftungsplan 2021 die Tagebaue in Mitteldeutschland und der Lausitz angegeben.⁵² Im FEG werden knapp 18 Mio. Einwohner mit Trinkwasser von 623 öffentlichen Wasserversorgungsunternehmen versorgt. Das Trinkwasser wird aus Grundwasser (57%) und See- und Talsperrenwasser (17%) und Uferfiltrat (18%) gewonnen. Weniger als 1% stammt aus dem Flusswasser. Wasser für industrielle Nutzungen wird überwiegend durch Eigenversorgung der Betriebe gewonnen, wobei von 5,17 Mrd. m³ der Großteil aus See-, Talsperren- und Flusswasser stammt. 3,72 Mrd. m³ werden für die Energiegewinnung veranschlagt und überwiegend als Kühlwasser genutzt (FGG Elbe 2021: 248).

Elbenetzwerk

In den Net-Map-Erhebungen an der Elbe werden die meisten Akteure ($N_{\text{gesamt}}=94$) identifiziert und mit insgesamt $K_{\text{gesamt}}=133$ Beziehungen verbunden. Am häufigsten werden administrative Akteure angeführt, wie das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), die Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE), die LAWA, das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) oder der Landesbetrieb für Hochwasserschutz (LHW). Die zweitmeisten Akteure ($N_{\text{Forschung}}=16$) wurden der Forschung zugeordnet, wobei hierzu auch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), der DWD, die UNESCO oder der DAS Basisdienst gezählt wurden. Es folgen Verbände ($N_{\text{Verbände}}=12$), wie der WWF, BUND und NABU.

Der durchschnittliche Clustering-Koeffizient beträgt $ACC=0,211$; ein insgesamt eher locker verknüpftes Netzwerk. Die Zentralitätsmaße weisen, bis auf wenige Ausnahmen, kaum privilegierte Positionen im

⁵¹ Bayern, Berlin, Brandenburg, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen.

⁵² „Besonders problematisch in der FGG Elbe sind Wasserentnahmen im Rahmen des Braunkohlebergbaus und Überleitungen in benachbarte FGEen sowie Teileinzugsgebiete der Elbe. Die Braunkohleförderung aus Tagebauen in Mitteldeutschland und der Lausitz hat insgesamt zu erheblichen wasserwirtschaftlichen Nachhaltigkeitsdefiziten geführt, die noch über Jahrzehnte wassermengen- und wassergütemäßig nachwirken werden (Grünwald 2005).“ (FGG Elbe 2021: 66)

Netzwerk aus: Das Gesamtkonzept Elbe (GKE) hat die meisten Verbindungen im Netz (GGKE=16) und höchste Betweenness-Zentralität (ZBGKE=0,269). Es folgen Umweltverbände (GUUVB=12; ZBUUVB=0,251) sowie die Bevölkerung (GBV=10; ZBBV=0,136). Eine vermittelnde Instanz mit eher wenigen Verbindungen ist die Landwirtschaft (GUUVB=8; ZBUUVB=0,265).

Tabelle 13: Zentrale Akteure im Netzwerk an der Elbe.

Akteur an der Elbe	Kategorie	Grad	Betweenness-Zentralität
GKE Elbe	Administration	16	0,269
Umweltverbände	Verbände	12	0,251
Bevölkerung	Gesellschaft	10	0,136
Bundesministerien	Administration	9	0,128
Landwirtschaft (Wasserversorgung)	Wasserversorgung	8	0,265

Die Anzahl administrativer Institutionen an der Elbe, die mehrere Bundesländer durchfließt, ist plausibel und deckt sich mit bestehenden Netzwerkanalysen (Samadi-Foroushani et al. 2022: 6105). Ein Gremium der FGG Elbe bildet die „Elbe Ministerkonferenz“, in welcher für den Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft zuständige Minister*innen der Länder vertreten sind. Der „Elbe-Rat“ versammelt zusätzlich die zuständigen Abteilungsleiter der Ministerien. Das GKE ist das gemeinsame Konzept des Bundesministeriums für Verkehr (BMV), des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) sowie der 10 beteiligten Länder. Sie bilden daher Intermediäre im Netzwerk und Plattformen innerhalb der Flussgebietsverwaltung, die administrative Institutionen, Wirtschaftsverbände (Elbe Allianz, Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt, Bundesverband Öffentlicher Binnenhäfen...) und Umweltverbände (BUND, NABU, WWF) verbindet.

Die Verbände sind im Netzwerk zentral, weil sie als Interessenvertreter*innen auftreten; das gilt für Umweltverbände (BUND; NABU etc.) und für Bauern-, Schifffahrts- und Industrieverbände. Ihre Einflussmöglichkeiten definieren die Probanden als politische „Lobbyarbeit“ und „Diskursprägung“:

[I]n dem öffentlichen Diskursprozess (...) sind sie diejenigen, die stellvertretend für ihren Bereich (...) entsprechend Interessen vertreten. Das ist ja die Aufgabe der Verbände, ne? (...). Aber auch (...) in Niedrigwasserrisikomanagement (...) bei der Erstellung von Leitlinien oder in Arbeitsgruppen oder wie auch immer das dann gestaltet wird, auch direkt wahrscheinlich involviert sind. Also der NABU oder BUND (...), aber auch die Binnenschifffahrtsverbände oder die der Bauernverband, also Landwirtschaft etc., die natürlich einfach über die Verbandslobbyarbeit ganz starken Einfluss auf verschiedene Prozesse nehmen, nicht nur über Politik, sondern auch über Arbeitsgruppen, und bei der Gestaltung von Regularien da Einfluss nehmen. (...). Dann wäre beides adressiert, (...) die Einflussnahme oder die direkte Lobbyarbeit in Richtung der Politik der Ministerien, aber auch dann die, die Diskursprägung im öffentlichen Raum über Pressearbeit etc., auch dort Diskussionsrunden, die dann geführt werden, auch in der Gesellschaft dann wiederum Forum bieten, dass (...), dass da eine große Reichweite ist.“ (Elbe, Erste Erhebung, #01:13:55-4#)

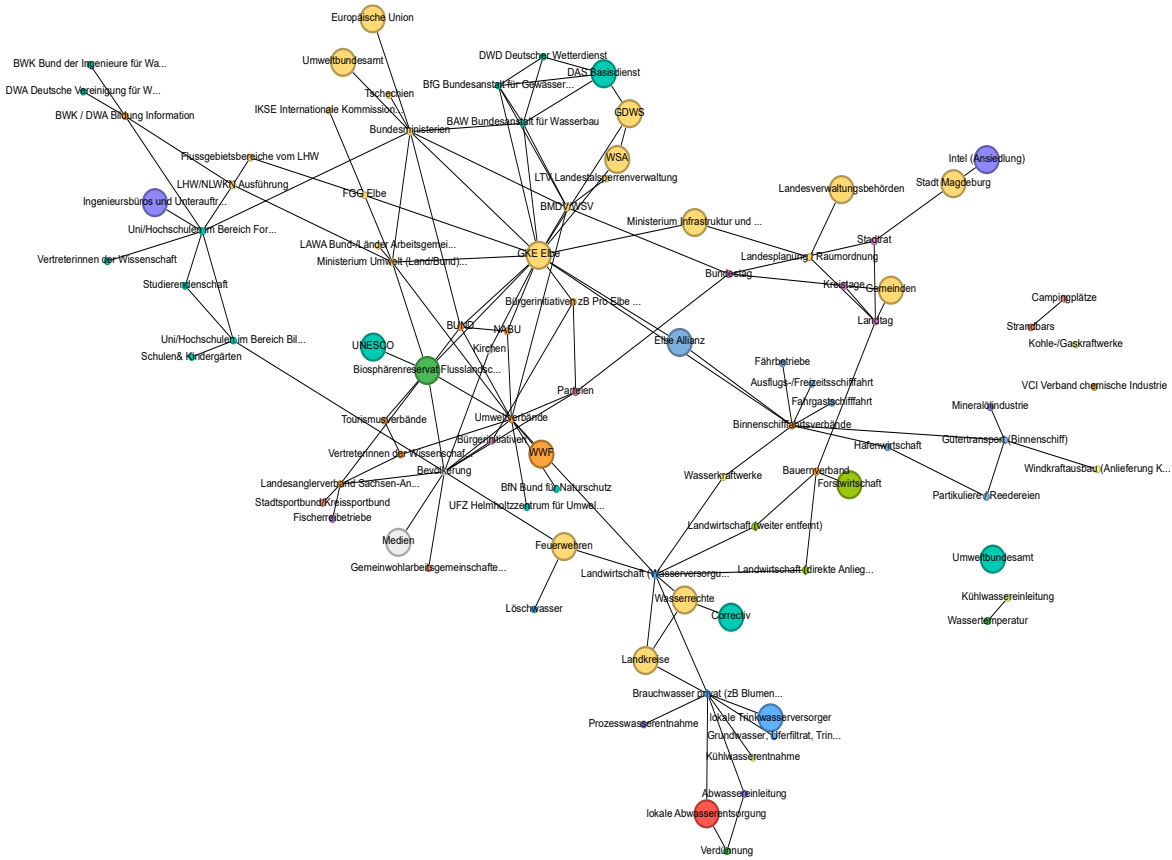


Abbildung 17: Netzwerk an der Elbe.

Auch das Klagerecht (der Verbände) wird als Einflussnahme erwähnt. Universitäten und Forschungsinstitutionen werden als ‚Lösungsanbieter‘ (Elbe, Erste Erhebung, #01:14:51-9#) betrachtet. Die Entwicklung eines NWRM sei aber eine hoheitliche Aufgabe, die – analog zum HWRM – politisch gestützt werden muss. Die NWS ist ein Orientierungsrahmen, in dem Niedrigwasser berücksichtigt wird, die Entwicklung eines NWRM allerdings nicht (verpflichtend) vorgesehen ist.⁵³ Für die Behörden sind legislative Grundlagen entscheidend: „Wichtig ist immer das Gesetz. (...) Behörden agieren (...) ganz klar zwingend in/ oder müssen zwingend – das ist die Verwendung öffentlicher Mittel – immer im Rahmen des gesetzlichen Auftrags handeln, das ist die hoheitliche Tätigkeit.“ (Elbe, Erste Erhebung, #01:36:57-0#)

An der Elbe gibt es vermittelnde und koordinierende Instanzen, wie etwa die LAWA (Bund/Länder), die FGG Elbe (länderübergreifend inklusive Verbände) und die IKSE (v.a. internationale Koordination). Die

⁵³ Die NWS sieht vor, dass ein „Grundwasser-Echtzeitentnahmemonitoring der tatsächlich entnommenen Mengen entwickelt [wird], das als Basis für ein risikoorientiertes Grundwassermanagement dienen soll. Darüber hinaus soll eine Dokumentationspflicht der tatsächlich getätigten Wasserentnahmen (Wasserregister) eingeführt und ein Abbau von Ausnahmen von der Erlaubnispflicht bei Grundwasserentnahmen (erlaubnisfreie Benutzung) vorgenommen werden. Mit der Einrichtung eines Niedrigwasserinformationssystems (NIWIS) werden Daten und Analysen für die Beurteilung und Bewirtschaftung von Niedrigwasser zur Verfügung gestellt.“ (BMUV 2023: 24)

Notwendigkeit der Koordination wird u.a. mit überregionalen Auswirkungen lokaler Maßnahmen begründet.⁵⁴ Es kann regionale ‚Best-Practice‘-Beispiele geben, eine legislative Rahmensetzung der EU ist jedoch die Voraussetzung für gemeinsame Standards. Fachbehörden, wie der DWD, die BAW, BfG und das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie sammeln zentralisiert Daten und Klimaprojektionen im DAS-Basisdienst. Im Arbeitsplan der GKE Elbe werden in Sachsen-Anhalt (SH) aktuell 106 Maßnahmen entlang der Elbe dokumentiert, deren Status in „noch nicht begonnen“ bis hin zu „abgeschlossen“ unterscheiden wird. Als Projektträger werden das Biosphärenreservat Mittelelbe (28 Vorhaben), das LHW (21 Vorhaben) und die WSV (45 Vorhaben), aber auch der BUND (6 Vorhaben) und der WWF (2 Vorhaben) angeführt.⁵⁵ Als die „Spinne im Netz“ an der Elbe wird allerdings die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) bezeichnet, da an ihr als Eigentümerin der Wasserstraßen kein Weg vorbeiführt.⁵⁶

Anhand der Ansiedlung von Intel in Magdeburg werden industrielle Wasserentnahmen diskutiert, deren Relevanz für fluviale Niedrigwasser an der Elbe aufgrund der hohen Abflussvolumina allerdings verworfen wird.⁵⁷ Laut Correctiv (Joeres et al. 2022) zählten 2021 MIBRAG Mitteldeutsche Braunkohlegesellschaft mbH mit 2,97 Mio. m³, Seydaland Vereinigte Agrarbetriebe GmbH & Co.KG mit ca. 2,01 Mio. m³ und die Glücksburg Agrar e.G. Dixförda mit 1,38 Mio m³ zu den drei größten industriellen Wasserentnehmern. Eine Probandin berichtet, dass landwirtschaftliche Entnahmen oft aufgrund alter Wasserrechte getätigt werden, die zwar prinzipiell mittels Wasseruhren protokolliert werden müssten, diese aber seitens der Behörden nicht kontrolliert werden (können):

„Ich hab‘ jetzt nochmal Austausch (...) ganz intensiv mit einer Kollegin aus dem Jerichower Land, weil da die landwirtschaftlichen Betriebe halt auch unbegrenzte oder halt Rechte haben seit eh und je (...). [D]er Kreis kann, entscheiden wir geben keine neuen Wasserrechte raus. Aber weil sie natürlich die Landwirtschaft nicht ärgern wollen, machen sie das nicht, und gleichzeitig kommen sie aber auch zum Beispiel im Jerichower Land – und ich glaube, das ist gar kein Einzelfall in Sachsen-Anhalt – (...) gar nicht hinterher, die Wasseruhren zu kontrollieren. Das heißt, der Bauer macht das mal an, und dann macht das mal wieder zwei Monate ab, und dann baut man die Wasseruhr wieder ran, und so, und dass da auch quasi die Kontrolle gar nicht gegeben ist. [Man] könnte man natürlich einfach digitale eine Wasseruhr anbauen. Das wäre vielleicht einfacher für alle Beteiligten.“ (Elbe, Zweite Erhebung, #00:51:21-1#)

⁵⁴ „Also typisches Beispiel: Ich ziehe in Sachsen alle Deiche hoch, dann hat Sachsen-Anhalt das Problem (...). Also, (...) das ist schon anders zu sehen, wie jetzt Starkregen in Berlin: Ich mache Schwammstädte und so weiter. Da kann Berlin das für sich machen, da beeinflusst Berlin auch in der Regel keinen mit. Aber wenn jetzt Sachsen sagt: „Ey, wir ziehen das komplette Wasser raus, dann hat die Elbe unten in Sachsen-Anhalt halt kein Wasser mehr, ne? Deswegen ist halt gerade Niedrigwasser und Hochwasser/ Ich glaube, da sind sie sehr ähnlich, die beiden Managements, müssen doch dann immer (...) überregional, dann für größere Flüsse oder transnational sogar gesehen werden, ne?“ (Elbe, Erste Erhebung, #01:51:26-0#)

⁵⁵ Einsehbar unter: https://www.gesamtkonzept-elbe.de/SiteGlobals/Forms/Webs/Projektseite/GkElbe2020/Suche/Massnahmenkarte/Massnahmenkarte_Formular.html?nn=998080 [Zugriff: 01.09.2025]

⁵⁶ „Ja, (...) das ist eine Bundeswasserstraße, und die gehört dem Bund und demnach ist die WSV (...) eigentlich die Spinne im Netz. [D]as ist ein gesetzlicher Auftrag, dass entsprechend die, zumindest was jetzt (...) bauliche Maßnahmen etc. angeht oder alles da im schifffahrtsrelevanten Bereich, (...) da steht ganz klar, als Eigentümer und der Vertreter des Eigentums, Eigentümerbund ist die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung. Die steht ganz zentral, so nach dem Motto, da kommt kein Weg dran vorbei (...).“ (Elbe, Zweite Erhebung, #01:02:13-1#)

⁵⁷ „Die wollen ein Kubikmeter pro Sekunde ziehen, und ich glaube, wenn die Elbe extremes Niedrigwasser hat, dann hat sie 100 irgendwas. Ob das jetzt 100 oder 99 sind (...). Gut, das muss die Schifffahrt sagen, aber ich glaube, bei 100 fährt kein Schiff mehr die Elbe hoch.“ (Elbe, Erste Erhebung, #00:59:46-1#)

Für das Niedrigwasserrisiko wird herausgearbeitet, dass es sich bei Niedrigwasser um langfristige Ereignisse handelt, deren Auswirkungen weniger spektakulär und plötzlich sind, und deren mediale Rezeption und zivilgesellschaftliche Risikowahrnehmung sich daher unterscheidet.⁵⁸

Kaum diskutiert wird, welche NWRM-relevanten Konfliktlinien derzeit die Umsetzung der WRRL an der Elbe prägen. Einige Hinweise lassen sich der Dokumentation⁵⁹ des GKE Elbe-Beteiligungsprozesses entnehmen: Eine initiale Flusskonferenz fand 03/2013 statt, die 1. Regionalkonferenz 2013 und die zweite im 05/2016, auf welcher das GKE Elbe vorgestellt wurde, sowie die dritte 10/2022. Als eine primäre Konfliktlinie kennzeichnete das Beratergremium (Puhlmann et al. 2016) die eher „statischen“ und eher „dynamischen“ Anforderungen; statische Anforderungen betreffen die (bestenfalls) ganzjährige Schifffahrt der Elbe, als dynamische Anforderungen wird der Erhalt bzw. die Verbesserung des ökologischen und morphologischen Zustands der Elbe bezeichnet. Dr. Rocco Buchta des NABU resümierte: „Im GKE ist eine gleichrangige Behandlung von Naturschutz und Schifffahrt festgelegt. Die Hauptkritik der Umweltverbände besteht darin, dass den Zielen bezüglich der Schifffahrt von Beginn an messbare Parameter und eine Umsetzungsstrategie zugeordnet werden, während beides für die ökologischen Ziele bis heute fehlt.“ Umwelt- und Naturschutzverbände setzen sich für systematische Betrachtungen des Flussgebiets ein. Tobias Gierra (WSA Elbe) formuliert die Anforderungen der Schifffahrt: „Das im GKE definierte Ziel für die WSV ist, gleichwertige Fahrrinntiefenverhältnisse entlang der Binnemelbe von mindestens 1,40 Meter unter dem GIW [gleichwertiger Wasserstand, T.F.] 2010 bereitzustellen – bei einer Fahrrinnenbreite von mindestens 50 Metern bzw. mit Richtungsverkehr mindestens 35 Meter.“ (GKE 2022) Problematisiert und diskutiert wird, dass die Elbe infolge von Niedrigwasserperioden nicht ganzjährig für den Schiffsverkehr befahrbar ist, was auch den Güterverkehr von und nach Tschechien beeinflusst. Kritische Stimmen regen auch die langfristige Vermeidung des Warenverkehrs sowie Niedrigwasser-angepasste Schiffe an. Dies sei für die Schifffahrt jedoch derzeit nicht ökonomisch. (GKE 2022)

3 AP 2 Wasserhaushalt

3.1 Untersuchungsgebiet: Rur-Einzugsgebiet

Das Ziel dieses Kapitels besteht darin, die relevante Datenbasis im Rur-Einzugsgebiet im Rahmen der Entwicklung eines Niedrigwasserrisikomanagements zu erfassen und den natürlichen Wasserhaushalt unter Berücksichtigung anthropogener Einflüsse umfassend zu analysieren und zu beschreiben.

Das Rur-Einzugsgebiet gehört zur Flussgebietseinheit der Maas, einem der größten Flüsse in Nordwesteuropa. Die gesamte Flächengröße beträgt 2.361 km², von denen 90 % in Nordrhein-Westfalen (NRW) im Westen Deutschlands liegen, 4,6 % in den Niederlanden und 6,7 % in Belgien (Wolf 2023).

⁵⁸ „Beim Hochwasser es halt so, dass ein katastrophales Ereignis, da hat man einmal über ein, zwei, drei, vier Tage eine große Menge, die man sieht, wie sie anrollt, wie sie alles kaputt macht, wie sie wieder abrollt. Und beim Niedrigwasser, da wird halt der Fluss ein bisschen niedriger, naja okay, dann wird es halt noch ein bisschen niedriger. Das ist jetzt nicht so, ein großes Ereignis in der kurzen Zeit, sondern eher was, was sich so einschleicht. Also im Endeffekt, wie ein Meeresspiegelanstieg oder allgemeiner Klimawandel, ne? Das ist die Wahrnehmung nicht so da, weil es eine ganz andere Zeitskala abdeckt.“ (Elbe, Erste Erhebung, #01:47:24-4#)

⁵⁹ Die Dokumentationen lassen sich der Webseite des GKE Elbe entnehmen (GKE 2022).

Aufgrund des Einflusses des Atlantischen Ozeans weist NRW ein relativ feuchtes, aber kühles Klima auf. In der Südeifel fällt deutlich mehr Niederschlag als in den nördlichen Niederungen. Das Einzugsgebiet ist insgesamt anthropogen geprägt. Das Süd-Einzugsgebiet ist mit Forstwirtschaft in den höheren Lagen sowie Grasland und Ackerland auf den Plateaus geprägt (Kufeld et al. 2010). Der Norden des Einzugsgebiet ist durch Landwirtschaft und Braunkohletagebau gekennzeichnet (Kufeld et al. 2010). Die größten Städte im Einzugsgebiet sind Aachen, Düren, und Heinsberg in Deutschland (Wolf 2023).

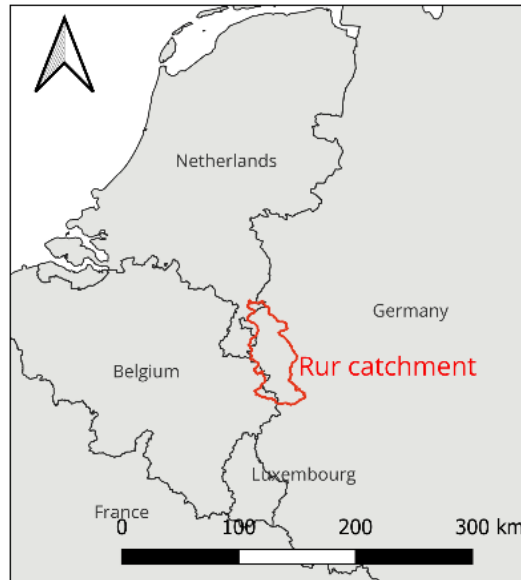


Abbildung 18: Die Lage des Einzugsgebiets des Flusses Rur mit den Staatsgrenzen (Eurostat 2024).

3.2 Datengrundlage

Die wichtige Datengrundlage im Rahmen der Niedrigwasserrisikomanagement umfasst die klimatischen Daten, hydrologischen Daten bzw. weitere biologischen Daten und sozioökonomische Daten. Eine Übersicht über die Datenkategorien mit der Beschreibung ist dargestellt in Tabelle 14.

Tabelle 14: Wichtige Datengrundlage zum Niedrigwasserrisikomanagement.

Name	Datentyp	Beschreibung
Einzugsgebietsspezifische Daten	quantitativ	die Eigenschaft von dem Einzugsgebiet
Klimatische Daten (Niederschlag, Temperatur, ET)	Quantitativ (mm, °C)	Zeitreihen von Niederschlägen, Temperaturen und tatsächlicher Evapotranspiration (ET) zur Analyse klimatischer Einflüsse.
Hydrogeologische Beschaffenheit Fließgewässersystem	Qualitativ/Quantitativ	Geologische Karten, Bodentypen, Gesteinsarten, Durchlässigkeit zur Charakterisierung der Fließgewässer.
Fließgewässer-Pegeldaten (Durchfluss, Wasserstand)	Quantitativ (m ³ /s, m)	Zeitreihen von Flussdurchflüssen und Wasserständen an Pegelstationen sowie deren geologische Lage.
Hydrogeologische Beschaffenheit Grundwassersystem	Qualitativ/Quantitativ	Aquiferencharakteristik, Fließrichtung und -geschwindigkeit des Grundwassers.
Grundwasser-Pegeldaten (Grundwasserspiegel, -flussrate)	Quantitativ (m, m ³ /s)	Zeitreihen von Grundwasserspiegeln und Flussraten an Überwachungsbrunnen sowie deren geologische Lage.
Wasserentnahmen (Fluss, Grundwasser, Talsperren)	Quantitativ (m ³ /a)	Verteilung und Menge der Wasserentnahmen aus unterschiedlichen Quellen.

Wasserwirtschaftliche Aktivitäten	Kategorisch	Räumliche Verteilung der wichtigen wasserwirtschaftlichen Aktivitäten wie Talsperren bzw. Tagebau
Sozioökonomische Daten (Bevölkerung, Wirtschaft)	Kategorisch	Bevölkerungsverteilung und wirtschaftliche Aktivitäten im Einzugsgebiet, insbesondere die Kraftwerke und Industrie
Wassernutzung (Trinkwasser, Energie, Landwirtschaft, Industrie)	Quantitativ (m ³ /a)	Daten zur Wasserverwendung für verschiedene Sektoren und deren Einfluss auf den Wasserhaushalt.
Umwelt- und Biodiversitätsdaten	Qualitativ/Quantitativ	Daten zur Biodiversität und ökologischen Zuständen der Fließgewässer.

3.3 Analyse der Wasserhaushaltskomponenten

3.3.1 Natürlicher Wasserhaushalt

Abbildung 19 veranschaulicht das Fließgewässersystem sowie das Grundwassersystem im Einzugsgebiet der Rur und zeigt die damit verbundenen menschlichen Einflüsse, wie beispielsweise Talsperren und den Tagebau.

Fließgewässersystem

Das Hauptgewässer im Rur-Einzugsgebiet ist die Rur mit einer Länge von 165 km. Die Quelle der Rur befindet sich in den Höhenlagen des Hohen Venns in Belgien auf einer Höhe von 600 Metern über dem Meeresspiegel (m.a.s.l.) (NILSON 2006a). Anschließend fließt der Fluss durch tiefe Niederungen und mündet schließlich bei einer Höhe von 30 m.a.s.l. in den Niederlanden in die Maas (NILSON 2006a). Die Rur weist ein fluvial-nivales hydrologisches Regime auf, das sowohl durch Niederschläge als auch durch Schneeschmelze beeinflusst wird. Hohe Abflüsse treten im Winter auf, während ausgedehnte Phasen mit niedrigem Abfluss in den Sommermonaten beobachtet werden (Wolf 2023).

Historische Beobachtungen zeigen, dass Überschwemmungen und Wasserknappheit an der Rur erhebliche Auswirkungen auf die entlang des Flusses gelegene Industrie, Landwirtschaft und Siedlungen haben (Johann 1994). Um diese Probleme zu mildern, wurden im nördlichen Einzugsgebiet große Talsperren errichtet (POLCZYK 1999b), die eine effektive Regulierung des Flussabflusses in die untere Rur über das Talsperrensystem ermöglichen (Kufeld et al. 2010). Die Rur ist von den Rurtalsperren gestaut, die mit zwei Staubecken kombiniert sind. Zum Ausgleich zwischen der öffentlichen Wasserversorgung und der industriellen Versorgungssicherheit wird eine Regelabgabe vom Obermaubach-Staubecken mit mindestens 5 m³/s für die Rur festgelegt.

Neben der Rur gibt es noch größere Zuflüsse von Wurm, Merzbach, Inde, Kall, Urft bzw. Ellebach sowie eine Vielzahl von kleineren Zuflüssen.

Grundwassersystem

Das Grundwassersystem im Rur-Einzugsgebiet ist von den lokalen hydrogeologischen Eigenschaften geprägt. Mithilfe der hydrogeologischen Karte HK 250 (Land NRW 2024) wird das Rur-Einzugsgebiet in zwei grundlegende hydrogeologische Bereiche unterteilt. Die nördlichen Niederungen sind ein Lockergesteinsbereich, während die südliche Nordeifel mit Festgestein geprägt ist. Dadurch variieren die Grundwasserbedingungen deutlich von Nord nach Süd. Insgesamt wurden 17 Grundwasserkörper identifiziert, die sich in Kluft-, Karst- und Porengrundwasserleiter unterscheiden.

Im nördlichen Einzugsgebiet dominiert der Porengrundwasserleiter, der hoch durchlässig ist und reiches Grundwasser aufweist, was ihn für die Wasserversorgung bedeutend macht. In Übergangsbereichen zwischen Lockergesteinsbereichen und Festgesteinsbereichen treten gelegentlich Buntsandsteinschichten auf. Diese Schichten fungieren als rissige und teilweise poröse Aquifere mit höherer Permeabilität und werden ebenfalls für die Wasserversorgung genutzt. Im Festgesteinsgebiet sind Kluft-Grundwasserleiter vorherrschend. Diese werden von zwei Kalksteinregionen durchzogen, die Karst-Grundwasserleiter enthalten, aus denen die Aachener Thermalquellen entspringen. Allerdings weisen die umliegenden Schieferberge eine geringe Permeabilität und begrenzte Durchlässigkeit auf, sodass sie keinen Beitrag zur Wasserversorgung leisten (Kufeld et al. 2010). Darüber hinaus enthält die Region Braunkohleablagerung, die durch die Tagebaue abgebaut werden. Ein prominentes Beispiel ist der Inde-Tagebau im Zentrum des Rur-Einzugsgebiets, der das lokale Grundwassersystem erheblich beeinflusst.

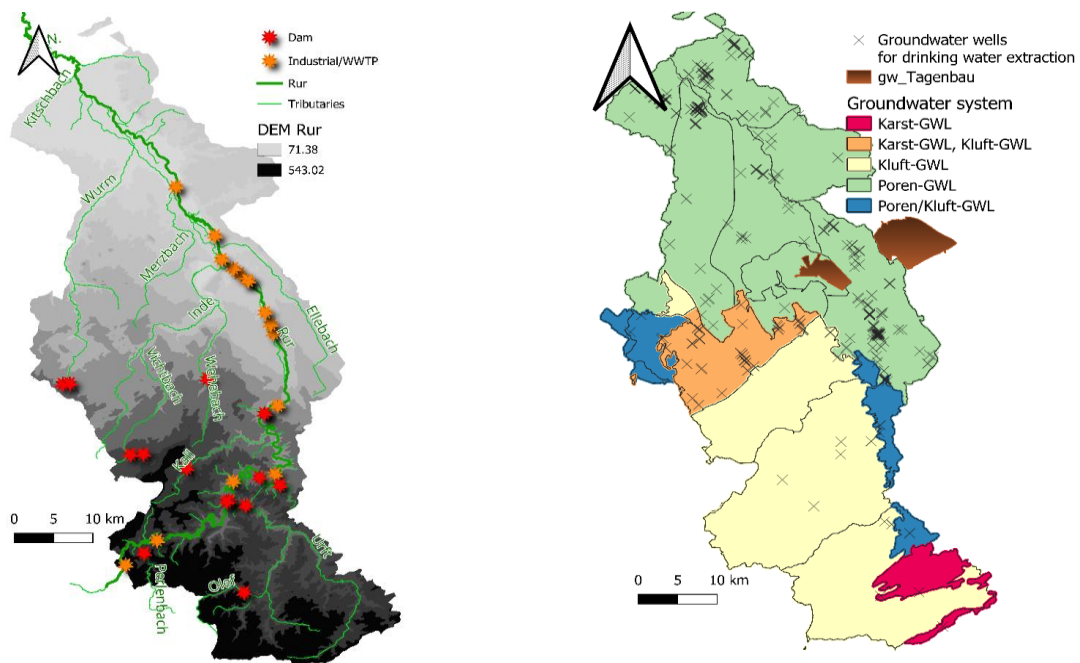


Abbildung 19: Fließgewässersystem (links) und Grundwassersystem (rechts) im Rur-Einzugsgebiet.

3.3.2 Anthropogene Einflüsse

Vom Statistikportal NRW wurden die Daten von unterschiedlichen Wassernutzungen in Bezug auf Aachen, Düren und Heinsberg recherchiert. Es umfasst den öffentlichen Sektor (Wasserabgabe an Endverbraucher insgesamt; Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe; Wasserabgabe an gewerbliche und sonstige Abnehmer) und den nicht öffentlichen Sektor (Belegschaftszwecke; Beregnung oder Bewässerung; Kühlung von Produktionsanlage und Stromerzeugungsanlagen; Produktions- und sonstige Zwecke; In die Produktion eingehendes Wasser). Die folgende Abbildung visualisiert die prozentuale Verteilung der einzelnen Wassernutzungen basierend auf der jährlichen Menge für 2022 (Landesbetrieb IT.NRW 2025).

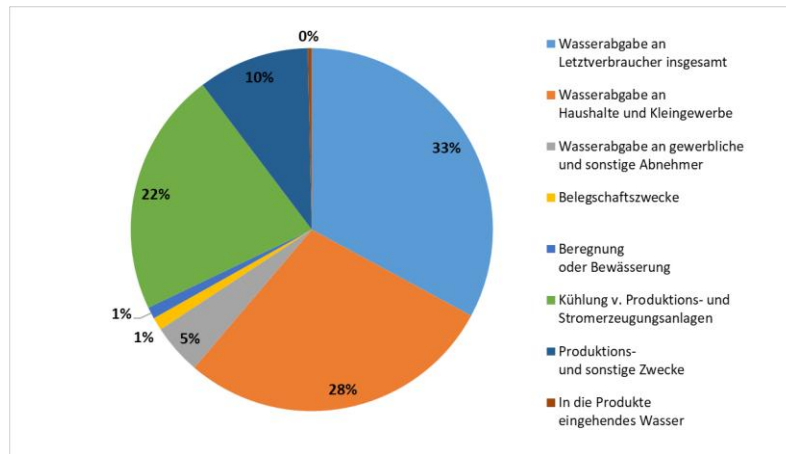


Abbildung 20: Prozentuale Verteilung der Wassernutzung in Bezug auf Aachen, Düren und Heinsberg für 2022. Eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Landesbetrieb IT.NRW (2025).

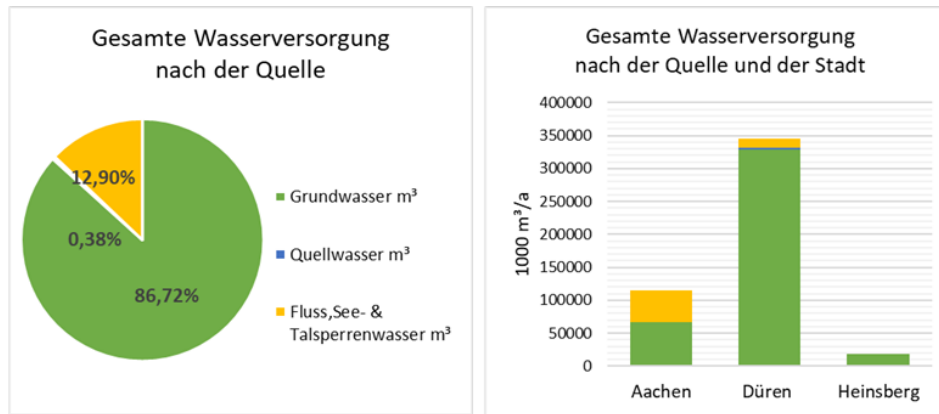


Abbildung 21: Gesamte Wasserversorgung (öffentlich + nicht öffentlich) nach der Quelle und der Stadt für das Rur-Einzugsgebiet für das Jahr 2022. Eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Landesbetrieb IT.NRW (2025).

Trinkwasserversorgung

66% der gesamten Wassernutzung dienen öffentlichen Zwecken (Abbildung 20). Laut den Statistiken von NRW wird im Rur-Einzugsgebiet eine Übersicht über die Wasserversorgung nach der Herkunft der Quelle und den drei größten Städten untersucht: Aachen mit 556.673 E, Düren mit 266.771 E und Heinsberg mit 258.306 E (Wohneinheiten) für das Jahr 2022. (Landesbetrieb IT.NRW 2025) Das Kreisdiagramm veranschaulicht die prozentuale Verteilung der gesamten Wasserversorgung nach unterschiedlichen Quellen. Mit etwa 86,7 % stellt die Quelle „Grundwasser“ den größten Anteil dar, gefolgt von „Fluss-, See- und Talsperrenwasser“ mit 12,9 % sowie „Quellwasser“ mit lediglich 0,38 % (Abbildung 21). Die räumliche Verteilung nach Städten zeigt, dass die Wasserversorgung in Aachen hauptsächlich aus „Grundwasser“ mit circa 67 Millionen m³/a und „Fluss-, See- und Talsperrenwasser“ mit etwa 48 Millionen m³/a stammt (Abbildung 21). Entlang der Rur bezieht die Stadt Düren einen großen Teil des Wassers aus „Grundwasser“ mit einer jährlichen Gewinnung von ungefähr 329 Millionen m³/a und einen geringeren Anteil aus „Fluss-, See- und Talsperrenwasser“ mit 14 Millionen m³/a (Abbildung 21). Die mengenmäßige Belastung des Grundwassers in Düren wird hauptsächlich durch die Entwässerungsmaßnahmen des Braunkohletagebaus verursacht. Die Stadt Heinsberg im Unterlaufgebiet der Rur ge-

winnt ein Wasservolumen von etwa 18 Millionen m³/a ausschließlich aus der Quelle „Grundwasser“ (Abbildung 21). Im Vergleich zu Aachen und Heinsberg weist die Stadt Düren die höchste Wassergewinnungsmenge auf.

Energieversorgung

Der Energiesektor ist auch von Niedrigwasserereignissen geprägt. 22 % der Wasserentnahmen dienen zur Kühlung der Produktions- bzw. Stromerzeugungsanlagen im Rur-Einzugsgebiet (Abbildung 20). Hier fällt das Kraftwerk Weisweiler auf, das derzeit noch als Braunkohlekraftwerk betrieben wird. Das Kraftwerk entnimmt sein Kühlwasser aus der Rur bei Rur-km 65,9 in Schophoven. Die maximale jährliche Entnahme beträgt aktuell bis zu 12 Millionen Kubikmeter Wasser (Kufeld et al. 2010). Im Zuge des Kohleausstiegs bis 2030 soll das Kraftwerk Weisweiler in ein wasserstofffähiges Gaskraftwerk umgebaut werden, um zukünftige Versorgungslücken im Stromnetz zu schließen (RWE 2024). Auch nach dem Umbau wird weiterhin Wasser aus der Rur entnommen und Abwasser in die Inde eingeleitet. Die genauen zukünftigen Entnahmemengen sind derzeit jedoch noch nicht bekannt.

Im Bereich des Rursees sowie entlang des Flussverlaufs bei Düren und Jülich, im oberen Abschnitt der Rur, konzentrieren sich zahlreiche Wasserkraftanlagen. Sie stellen eine bedeutende Quelle erneuerbarer Energie dar und nutzen das Gefälle und die Strömung der Rur zur Stromerzeugung. Diese Anlagen tragen nicht nur zur regionalen Energieproduktion bei, sondern haben auch Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und das Ökosystem der Rur.

Industrie

Die Rur spielt eine zentrale Rolle in der Wasserversorgung industrieller und kommunaler Nutzungen. Ein bedeutender Anteil der anthropogenen Wassernutzung der Rur entfällt auf die Industrie, wobei 10 Prozent des entnommenen Wassers für Produktionsprozesse sowie sonstige Zwecke genutzt werden, während 22 Prozent für die Kühlung von Produktions- und Stromerzeugungsanlagen verwendet werden (Abbildung 20). Nach dem AMICE-Bericht werden 73 Millionen Kubikmeter pro Jahr an Wasser aus der Rur entnommen, wovon etwa 34,5 Millionen Kubikmeter für die industrielle Nutzung verwendet werden. Innerhalb dieses industriellen Anteils nimmt die Papierindustrie mit circa 29,6 Millionen Kubikmetern den größten Anteil ein. Die Papierindustrie entlang der unteren Rur hat eine lange Historie. Da das dort verfügbare Wasser eine geringe Mineralienkonzentration aufweist, was für die industrielle Verarbeitung von Vorteil ist (Kufeld et al. 2010). Weitere bedeutende Nutzer sind die Chemie- und Kunststoffindustrie sowie Energieerzeuger, kommunale Wasserversorger und landwirtschaftliche Betriebe (Kufeld et al. 2010).

Sonstiges

Im Einzugsgebiet wird lediglich ein geringer Anteil des insgesamt entnommenen Wassers für landwirtschaftliche Zwecke verwendet. Konkret beträgt der Wasserverbrauch für Beregnung und Bewässerung von Ackerflächen nur etwa 1 % der gesamten Wasserentnahme (Abbildung 20).

Die Rur dient nicht als Transportweg für die kommerzielle Schifffahrt, sondern wird ausschließlich für touristische Zwecke genutzt. Der Fluss bietet zahlreiche Möglichkeiten für Freizeitaktivitäten, insbesondere für das Kanu- und Kajakfahren. Das Befahren der Rur ist in bestimmten Zeiträumen von Juli bis Februar erlaubt. Schlauchboote, Flöße und Stand-Up-Paddle Boards sind hingegen ganzjährig verboten. Bestimmte Abschnitte des Gewässers sind für diese Sportarten freigegeben, wobei das Baden

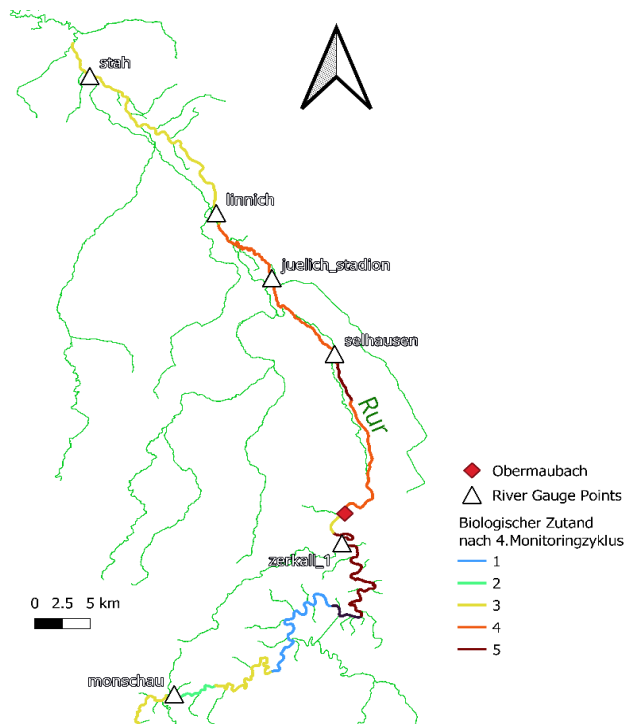
außerhalb gekennzeichneten Badestellen aus Sicherheits- und Naturschutzgründen verboten ist (Kufeld et al. 2010).

Die Darstellung weiterer anthropogener Einflüsse sowie der für die Wasserwirtschaft relevanten Akteure befindet sich in Kapitel 2.4.2.

3.3.3 Ökologischer Zustand

Die Bewertung des ökologischen Zustands von Fließgewässern ist ein essenzieller Bestandteil des Gewässerschutzes und der nachhaltigen Wasserbewirtschaftung. Der ökologische Zustand wird anhand verschiedener biologischer Qualitätskomponenten bestimmt, darunter das Vorkommen und die Zusammensetzung von Fischen, Makrozoobenthos, Phytoplankton, Makrophyten/Phytobenthos sowie der benthischen wirbellosen Fauna.

Die Abbildung 22 zeigt die räumliche Verteilung des biologischen Zustands in Bezug auf die Fischfauna und das Makrozoobenthos an der Rur nach dem 4. Monitoring-Zyklus (Land NRW 2024). Die gewonnenen Daten sind entscheidend für die Entwicklung von Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Bedingungen und zur Erfüllung der Vorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Die Kategorien des ökologischen Zustands setzen sich dabei wie folgt zusammen:



- 1 - blau** sehr guter Zustand – keine oder nur geringfügige Veränderungen des Gewässers
- 2 - grün** guter Zustand
- 3 - gelb** mäßiger Zustand
- 4 - orange** unbefriedigender Zustand
- 5 - rot** schlechter Zustand – erhebliche Veränderungen des Gewässers

Der obere Abschnitt der Rur hat eine ökologische Zustandsbewertung von gut bis mäßig. Oberhalb von Monschau wird er als gut eingestuft, während der Abschnitt darunter als mäßig gilt. Vor der Rurtalsperre verschlechtert sich der Zustand erneut auf mäßig. Der ökologische Zustand des Rursees an der Talsperre selbst ist jedoch sehr gut. Ab dem Staubecken der Rurtalsperre Schwammenauel

Abbildung 22: Ökologischer Zustand der Rur nach 4. Monitoringzyklus. Eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Land NRW 2024.

sind die ökologischen Bedingungen signifikant schlechter. Die Fischfauna wird als schlecht bewertet, was hauptsächlich auf die Wanderhindernisse durch die Talsperre zurückzuführen ist. Das Makrozoobenthos hat hier eine gute Qualität. Der Abschnitt bis kurz vor das Staubecken Obermaubach gehört zur Kategorie 5, während im Staubecken selbst der ökologische Zustand als mäßig eingestuft wird. Flussabwärts bis Düren zeigt das Makrozoobenthos einen unbefriedigenden Zustand, während die

Fischfauna mäßig ist. Zwischen Düren und Niederzier setzt sich dieser negative Trend fort. Das Makrozoobenthos erhält eine schlechte Bewertung und die Fischpopulation bleibt im mäßigen Zustand. Insgesamt gehört dieser Abschnitt bis Düren zur schlechtesten Kategorie. Bis zum Pegel Linnich weist die Rur einen unbefriedigenden Zustand auf (MULNV NRW 2021).

Im Niedrigwassermanagement ist es wichtig, den biologischen Zustand des Gewässers zu berücksichtigen, da niedrige Wasserstände Sauerstoffmangel und erhöhte Schadstoffkonzentrationen verursachen können. Eine ökologische Mindestwasserführung sowie gezielte Maßnahmen wie Wasserabgaben aus Stauseen sind notwendig, um die aquatische Biodiversität zu erhalten.

3.4 Diskussion und Fazit

Das Rur-Einzugsgebiet ist durch ein komplexes Fließgewässer- und Grundwassersystem charakterisiert, wobei die Rur als Hauptgewässer dient. Die Regulierung durch Talsperren und Stauseen der Rur dient der Minderung von Überschwemmungen und Wasserknappheiten im Unterstrombereich. Das Grundwassersystem weist unterschiedliche hydrogeologische Eigenschaften auf, mit hochdurchlässigen Porengrundwasserleitern im Norden sowie Kluft- und Karstgrundwasserleitern im Süden.

Zu den wesentlichen anthropogenen Einflüssen auf den Wasserhaushalt der Rur gehören Trinkwassernutzung, Energieerzeugung und industrielle Wasserentnahmen. Der Großteil des Trinkwassers stammt aus Grundwasserquellen. Im Bereich der Energieerzeugung sind das Kraftwerk Weisweiler, welches Kühlwasser aus der Rur entnimmt, sowie verschiedene Wasserkraftwerke entlang des Flusses von Bedeutung. Die industrielle Nutzung, insbesondere durch die Papier- und Chemieindustrie, stellt einen signifikanten Einfluss dar. Andere Sektoren wie Landwirtschaft, Tourismus und Fischerei nutzen lediglich einen geringen Anteil der Wasserressourcen. Die Bewertung des ökologischen Zustands der Rur zeigt eine variierende Qualität entlang ihres Verlaufs. Während der Rursee an der Rurtalsperre einen sehr guten Zustand aufweist, verschlechtern sich die Bedingungen flussabwärts erheblich, insbesondere bei Düren und Niederzier.

Dieses Kapitel hat sowohl natürliche als auch anthropogene Aspekte des Wasserhaushalts im Rur-Einzugsgebiet beschrieben. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zur Entwicklung eines Niedrigwasserrisikomanagements im Rahmen des AP 4 bei.

4 AP4.1 + AP4.2 Fließgewässer und Grundwasser

4.1 Theoretische Grundlage

Das Grundwassersystem spielt während Dürren eine zentrale Rolle. Dazu gleicht Grundwasser sowohl Schwankungen im Wasser- als auch Energiekreislauf aus, da es das langsam fließende Element der terrestrischen Wasserkreislaufes ist (Condon et al. 2021). Während kurzer Niederschlagsdefizite nehmen die schnellen Abflusskomponenten ab, wie der direkte Abfluss oder der Zwischenabfluss, bis der Flussabfluss durch den langsameren, verzögerten Basisabfluss aufrechterhalten wird. Diese Abflusskomponente wird durch die Grundwasserspeicherung gespeist (Zink et al. 2016; Hellwig 2019; Kelly et al. 2019). Anhaltende Niederschlagsdefizite führen hingegen zu einem Rückgang des Grundwasserspiegels und einer schrittweisen Abnahme von Boden- und Flusswasser (Mishra und Singh 2010). Im Gegensatz zum Grundwasser reagiert der Flussabfluss empfindlich auf Wetterveränderungen, wobei Einzugsgebietsmerkmale diese Reaktion weiter modifizieren können (Tallaksen und Van Lanen op.

2004; Bloomfield und Marchant 2013; Haslinger et al. 2014; van Loon und van Lanen 2012; Van Loon 2015; Chung et al. 2023). In geringdurchlässigen Grundwasserleitern versickert Niederschlag nur begrenzt, sodass ein Großteil direkt in die Flüsse abfließt (Stoelzle et al. 2014; Hellwig und Stahl 2018; Carlier et al. 2019). Poröse Grundwasserleiter hingegen ermöglichen einen höheren Basisabfluss und eine verzögerte Abflussreaktionen auf Niederschläge (van Loon und van Lanen 2012). In solchen Gebieten ist die Grundwasser-Fluss-Interaktion ein zentraler Faktor der hydrologischen Dynamik, insbesondere während Trockenperioden.

Bei den Teil-Arbeitspaketen 4.1 und 4.2 wurde die Bedeutung von Grundwasser-Fluss-Wechselwirkung bei der Simulation langfristiger Niedrigwasserphase untersucht. Damit wurde ein neues Modellkonzept im HYD-Modul im LoFloDes-Softwarepaket vorgestellt (s. Kapitel 4.2: Modellkonzept LoFloDes). Das HYD-Modell koppelt ein eindimensionales (1D) Fluss- mit einem zweidimensionalen (2D) Grundwassermodell durch eine bidirektionale Kopplungsstrategie. Seine Leistungsfähigkeit wurde im Rur-Einzugsgebiet getestet (s. Kapitel 4.3: Modell im Rur-Einzugsgebiet). Das Modell wurde anhand von Beobachtungsdaten von 2002–2005 kalibriert und mit Daten aus dem Zeitraum 1991–2020 validiert. Zur Bewertung der Modellgüte wurden statistische Maße sowie grafische Vergleiche herangezogen, um die zeitliche und räumliche Verteilung der Fluss- und Grundwasserströmungen zu analysieren. Anhand der Validierungsergebnisse kann schließlich die Fähigkeit des HYD-Modells zur Simulation langfristiger Szenarien unter Einhaltung bestimmter Anforderungen beurteilt werden:

- Effektive Simulation der zeitlichen und räumlichen Verteilung von Grundwasser und Flusströmungen bei der Berücksichtigung der Grundwasser-Fluss-Wechselwirkung.
- Konsistente Beibehaltung von Genauigkeit, Stabilität und Effizienz über längere Simulationszeiträume.

4.2 Modellkonzept LoFloDes

4.2.1 Software Struktur LoFloDes

Diese Studie konzentriert sich auf die hydrodynamische Analyse, die mithilfe des HYD-Modells innerhalb von LoFloDes durchgeführt wird. Abbildung 23 zeigt den Modellierungsrahmen des HYD-Modells. Tabelle 15 beschreibt die relevanten Modellparameter, die im HYD-Modell von LoFloDes implementiert wurden.

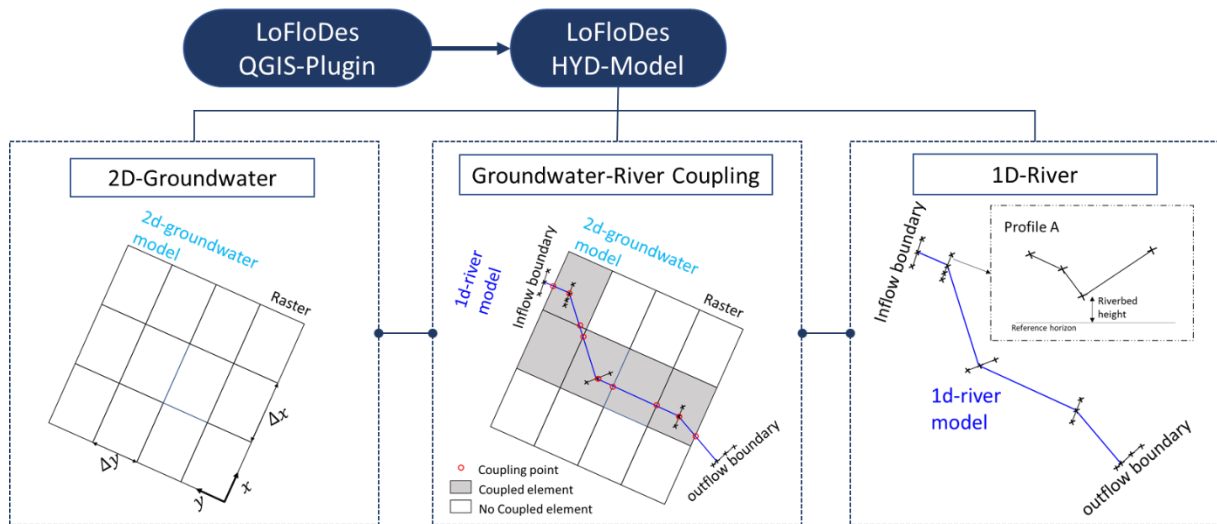


Abbildung 23: Ein konzeptioneller Modellierungsrahmen für das HYD-Modell in LoFloDes mit Integration des LoFloDes QGIS-Plugin

Tabelle 15: Übersicht über die Modellparameter des HYD-Modells in LoFloDes.

Parameter	Einheit	Erklärung	Verknüpfte Gleichung
Z_{bed}	m	Höhe des Flussbettes	b
h_{rv}	m	Absoluter Wasserstand des Flusses	b
n	s/m^3	Bemessungswert	b
A_{river}	m^2	Durchflussfläche Fluss	a, b
r_{hyd}	m	Hydraulischer Radius	b, g
Q_{gw2gw}	m^3/s	Austauschabfluss zwischen zwei benachbarten Grundwasserelementen	c, h
Q_{aw2rv}	m^3/s	Austauschabfluss zwischen Grundwasserelement und Flussprofil	g
$Q_{in/outflow}$	m^3/s	Zu- und Abfluss des Kontrollvolumens (z.B. Flussprofil oder Grundwasserelement)	a, f
$Q_{boundary}$	m^3/s	zusätzliche Quellen und Senken als Randbedingungen	a, f
$Q_{couplina}$	m^3/s	Austausch von Abflüssen aus anderen gekoppelten Teilmodellen	a, f
T	m^2/s	Transmissivität Grundwasser	c, d, e, i
h_{gw}	m	Absoluter Grundwasserstand	c, e
$k_{f_{gw}}$	m/s	Hydraulische Leitfähigkeit Grundwasser	d, e
M_{gw}	m	Mächtigkeit Grundwasser	c, d
z_{gw}	m	Höhe Grundwassersohle	c
eP	-	Effektive Porosität	f
$k_{f_{rv}}$	1/s	Leckagefaktor	g
L	m	Gekoppelte Flusslänge	g
M_{rv}	m	Mächtigkeit der Flusssohle	g
Δh	m	Hydraulischer Gradient für Grundwasser und Fluss $h_{gw} < Z_{bed}: \Delta h = h_{rv} - Z_{bed}$ $h_{gw} \geq Z_{bed}: \Delta h = h_{gw} - h_{rv}$	g

4.2.2 1D-Fließgewässermodell

Das Flussmodell von LoFloDes baut auf der Grundlage von ProMaiDes (Protection Measures against Inundation Decision Support) (Bachmann 2023) auf und erweitert dessen Funktionalitäten. Räumlich wird ein Fluss in 1D-aufeinanderfolgende Querprofile entlang der Hauptfließrichtung diskretisiert. Jeder Querschnitt (Flussprofil) wird durch eine Reihe von Höhenpunkten charakterisiert, die das rechte Vorland, das linke Vorland und das Hauptgerinne darstellen. Die wichtigsten Flussmerkmale wie Flussbreite, Stationskilometer und Manning-Wert n werden in jedes Profil integriert. Die hydrodynamischen Berechnungen erfolgen analog zur Methodik von ProMaiDes.

Durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung (Gleichung a; die Variablen sind in Tabelle 15 beschrieben) kann die Durchflussfläche A_{river} [m²] jedes Profils analysiert werden, indem die Abflüsse summiert werden: der Zu- und Abfluss des vorhergehenden Flussprofils $Q_{in/outflow}$ [m³/s], der Austauschabfluss aus anderen Systemen $Q_{coupling}$ [m³/s] (z. B. aus dem Grundwasser) sowie der Randabfluss $Q_{boundary}$ [m³/s] (z. B. aus Zuflüssen). Mit der berechneten Gesamtabflussmenge Q [m³/s] und der Durchflussfläche A_{river} [m²] können hydraulische Ergebnisse wie der Wasserspiegel h_{rv} [m] iterativ mithilfe der diffusiven Wellengleichung (Gleichung b; die Variablen sind in Tabelle 15 beschrieben) ermittelt werden (Bachmann 2023). In LoFloDes werden zusätzliche Parameter wie der Leckagefaktor kf_{rv} [1/s] und die Flussbettstärke M_{rv} [m] jedem Profil zugewiesen, um die gekoppelte Simulation mit Grundwassersystemen zu ermöglichen (Gleichung f; die Variablen sind in Tabelle 15 beschrieben).

$$\frac{\partial A_{rv}}{\partial t} = \frac{Q_{in/outflow} + Q_{coupling} + Q_{boundary}}{\partial x} \quad (a)$$

$$0 = g * \left(- \left(\frac{\partial z_{bed}}{\partial x} + \frac{\partial h_{rv}}{\partial x} \right) + \left(\frac{n * Q}{A_{rv} * \sqrt[3]{h_{hyd}}} \right) \right) \quad (b)$$

4.2.3 2D-Grundwassermodell

Im HYD-Modell von LoFloDes wird ausschließlich die oberste Grundwasserschicht simuliert, da diese in direkter Wechselwirkung mit dem Fluss steht. Diese Schicht wird räumlich als zweidimensionales, regelmäßiges Raster dargestellt, das aus mehreren rechteckigen Elementen besteht. Jedes Element repräsentiert ein homogenes Grundwasserareal, in dem hydrogeologische Eigenschaften wie die Schichtmächtigkeit M_{gw} [m], die hydraulische Leitfähigkeit kf_{gw} [m/s] und die effektive Porosität eP [-] konstant bleiben.

Zwischen jedem Element und den benachbarten Elementen findet ein interner Austausch sowohl in x- als auch in y-Richtung statt, der nach dem Darcy-Gesetz berechnet wird (Gleichung c; die Variablen sind in Tabelle 15 beschrieben). Unter gespanntem Grundwasserbedingungen wird die Transmissivität T [m²/s] als Produkt aus der hydraulischen Leitfähigkeit kf_{gw} [m/s] und der Aquifermächtigkeit M_{gw} [m] bestimmt (Gleichung d; die Variablen sind in Tabelle 15 beschrieben). Im Gegensatz dazu wird für ungespannte (freispiegelnde) Grundwasserbedingungen die Transmissivität T [m²/s] als Produkt aus der hydraulischen Leitfähigkeit kf_{gw} [m/s] und der gesättigten Mächtigkeit $h_{gw} - z_{gw}$ [m] berechnet (Gleichung e; die Variablen sind in Tabelle 15 beschrieben). Dieser Ansatz findet auch in der Grundwassermodellierungssoftware MODFLOW Anwendung (Harbaugh 2005).

Während des Simulationsprozesses wird der Grundwasserspiegel h_{gw} [m] zu Beginn jeder Iteration aktualisiert, gefolgt von einer Neuberechnung der Transmissivität T [m²/s] sowie die Ableitung des internen

Austauschabflusses $Q_{in/outflow}$ (Q_{gw2gw}) [m^3/s], des Randabflusses $Q_{boundary}$ [m^3/s] und des Kopplungsabflusses $Q_{coupling}$ [m^3/s]. Das Grundwasser verhält sich als ein diskontinuierliches Medium, das aus Festkörpern (Gesteinsmaterial) und Hohlräumen besteht; daher wird der Abfluss auf der Grundlage der Förderhöhe im Verhältnis zur Porenfläche jedes Elements berechnet (Gleichung f; die Variablen sind in Tabelle 15 beschrieben).

$$Q_{gw2gw} = \frac{2T_1T_2}{T_1+T_2} * \partial y * \frac{h_{gw,1}-h_{gw,2}}{\partial x} \quad (c)$$

$$T = kf_{gw} * M_{gw} \quad (d)$$

$$T = kf_{gw} * (h_{gw} - z_{gw}) \quad (e)$$

$$\frac{\partial h_{gw}}{\partial t} = \frac{Q_{in/outflow} + Q_{coupling} + Q_{boundary}}{\partial x * \partial y * eP} \quad (f)$$

4.2.4 Kopplung zwischen Fließgewässer- und Grundwasser-Modellen

Die räumliche Auflösung des Grundwassermodells reicht typischerweise von mehreren hundert bis tausend Metern (Zhou und Li 2011), während kleinere Flüsse oft nur wenige Meter breit sind. Aufgrund dieser räumlichen Diskrepanz wird der Fluss in eine eindimensionale Flusslinie vereinfacht. Diese wird durch Flusssohlenpunkte von aufeinanderfolgenden Querprofilen konstruiert. Das Grundwasserelement hingegen wird durch ein zweidimensionales Polygon repräsentiert. Es treten räumliche Kopplungen auf, wenn der Verlauf der Flusssohle diese Grundwasserpolygone schneidet. Die Schnittpunkte sowie die Flusssohlenpunkte innerhalb der Polygone werden als Kopplungspunkte definiert.

Während der Modellsynchronisation wird die hydraulische Austauschrate Q_{gw2rv} [m^3/s] unter Verwendung einer konstanten hydraulischen Leitfähigkeit der Flusssohle (Leitfähigkeitsfaktor kf_{rv} [m/s]) und des zeitlich variablen hydraulischen Gradienten Δh [m] berechnet (Gleichung g; die Variablen sind in Tabelle 15 beschrieben), welche ebenfalls in MODFLOW implementiert ist (Harbaugh 2005). Anschließend wird die berechnete Austauschrate Q_{gw2rv} [m^3/s] am Kopplungspunkt eingeführt, um das räumlich betroffene Grundwasserelement mit dem Flussprofil zu verbinden. Dabei stellt ein positiver Austauschfluss die Exfiltration vom Fluss ins Grundwasser dar, während ein negativer Austauschfluss die Infiltration beschreibt.

$$Q_{gw2rv} = kf_{rv} * L * \frac{r_{hyd}}{M_{rv}} * \Delta h \quad (g)$$

4.2.5 Kopplung zwischen Grundwasser-Modellen

Zusätzlich wird dieser bidirektionale Austauschansatz auch für 1D-1D-Fluss-Fluss- und 2D-2D-Grundwasser-Grundwasser-Kopplungen implementiert. Wenn sich Teilmodelle räumlich überlappen, werden die entsprechenden Kopplungstypen automatisch angewendet. An den Kopplungsgrenzen der jeweiligen Teilmodelle wird der hydraulische Austausch für jeden Synchronisationszeitschritt anhand der relevanten Steuerfunktionen bestimmt (Bachmann 2023). So verfügt das HYD-Modell beispielsweise über einen automatischen Kopplungsmechanismus, der den hydraulischen Austausch zwischen benachbarten Grundwasser-Rasterelementen gemäß dem Darcy-Gesetz ermöglicht (Gleichung c; die Variablen sind in Tabelle 15 beschrieben).

4.2.6 Numerische Berechnung

Für die räumliche Diskretisierung wird ein Finite-Volumen-Schema angewendet, um die Gleichungen des 1D-Flussmodells und des 2D-Grundwassermodells numerisch zu lösen. Zur zeitlichen Diskretisierung kommt die Rückwärtsdifferenzenformel zum Einsatz, auch bekannt als Backward Differentiation Formula (BDF). Eine Mehrschritt-Methode, die speziell für Anfangswertprobleme entwickelt wurde. Das resultierende nichtlineare Gleichungssystem für jedes Teilmodell wird mit der CVODE-Software-Suite gelöst (Hindmarsh und Serban 2009).

4.3 Modell im Rur-Einzugsgebiet

4.3.1 Modellaufbau

Workflow zur Entwicklung des gekoppelten Modells im Rur-Einzugsgebiet

In dieser Studie wurde ein gekoppeltes Grundwasser-Fluss-Modell entlang eines Abschnitts der Rur aufgebaut (mehr Information über das Rur-Einzugsgebiet s. Kapitel 3). Abbildung 24 veranschaulicht den Arbeitsablauf, der zur Entwicklung eines solchen gekoppelten Modells unter Verwendung der LoFloDes-Softwarepakete etabliert wurde. Zunächst wurden räumliche Datensätze in der QGIS-Umgebung verarbeitet und anschließend mithilfe des zugehörigen QGIS-Plugins in Textdateien exportiert. Die Modellparameter wurden daraufhin in diesen Textdateien mit einem Standard-Texteditor angepasst. Die resultierenden Dateien dienten anschließend als Eingabe für LoFloDes, um die hydrodynamischen Simulationen durchzuführen. Die Simulationsergebnisse wurden anschließend mit Python-Skripten in JupyterLab nachbearbeitet und analysiert. Parallel dazu erfolgte eine Anbindung sowohl von LoFloDes als auch von QGIS an eine PostgreSQL-Datenbank, um eine zentrale Speicherung, Verwaltung und Visualisierung der Daten innerhalb der QGIS-Oberfläche zu ermöglichen. Sämtliche Berechnungen wurden auf einer Workstation mit einem AMD Ryzen 5 PRO 6650U-Prozessor, integrierter Radeon-Grafik und 16 GB Arbeitsspeicher durchgeführt.

Fließgewässermodell im Rur-Einzugsgebiet

Diese Arbeit konzentriert sich auf den Unterlauf der Rur, der sich über eine Länge von 66,68 km vom Auslass der Stauanlage Obermaubach bis zum Abfluss an der deutsch-niederländischen Grenze erstreckt. Die geologischen Merkmale dieses Flussabschnitts, insbesondere die Informationen zum Flussbett, wurden durch die Vermessungsdaten der Kölner Stadtverwaltung aus dem Jahr 2019 (Bezirksregierung Köln 2019) bereitgestellt.

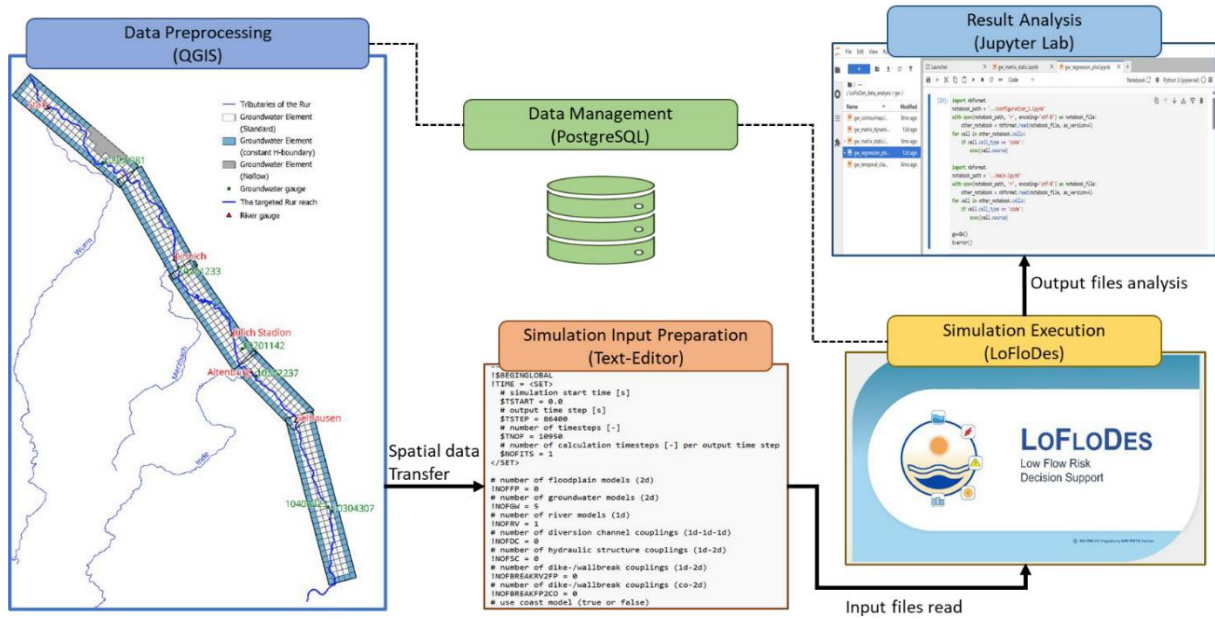


Abbildung 24: Die Entwicklung des gekoppelten Modells im Rur-Einzugsgebiet.

Darauf aufbauende wurde ein Flussmodell entwickelt, das aus 524 Querprofilen besteht und in LoFloDes implementiert wurde. Die Querprofile wurden gleichmäßig entlang des Flussverlaufs verteilt, wodurch sich ein durchschnittlicher Abstand von 100 Metern zwischen benachbarten Profilen ergibt. Der tägliche Abfluss in m^3/s aus dem Obermaubach-Stausee diene als instationäre Zuflussgröße für die Rur. Die Pegeldata der Nebenflüsse Inde, Wurm und Merzbach (Land NRW 2024) wurden als instationäre Zuflüsse verwendet und an den entsprechenden Profilen angesetzt. Anthropogene Zuflüsse, wie der Ausfluss aus Kläranlagen und Industriebetrieben, wurden aufgrund unzureichender Datenqualität nicht simuliert. Jedes Profil berücksichtigt spezifische Flusseigenschaften. Zur Reduzierung des Kalibrieraufwands wurde die Flussbettstärke M_{rv} [m] einheitlich auf 1 Meter gesetzt. Daher erfordern lediglich der Manning-Wert n [$s/m^{1/3}$] und der Durchlässigkeitsfaktor kf_{rv} eine Bestimmung.

Grundwassermodell im Rur-Einzugsgebiet

Entlang des Flusslaufs der Rur wurden fünf Grundwasserraster erstellt, die zusammen eine Gesamtfläche von $137,5 \text{ km}^2$ ergeben. Die Raster bestehen aus 550 Grundwasserelementen mit einer Einheitsgröße ($\Delta x=500 \text{ m}$ und $\Delta y=500 \text{ m}$). Jedes Element enthält spezifische Grundwassereigenschaften, wobei die effektive Porosität eP [-] und die Leitfähigkeit kf_{gw} [m/s] bei der Kalibrierung eine tragende Rolle spielten.

Für die Anfangsbedingungen wurde die interpolierte Grundwasserstands-Konturkarte von 2006-2015 verwendet (LANUV NRW 2023), die den durchschnittlichen ganzjährigen Grundwasserstand unter natürlichen Bedingungen darstellt. In Abbildung 24 wird entlang der Rastergrenzen eine konstante hydraulische Druckhöhe angesetzt, während entlang der nordöstlichen Seite des Rasters 5 eine Abflussverbotsgrenze festgelegt wird. Diese Grenze basiert auf HK250, was darauf hindeutet, dass erhebliche lithologische Variationen die Durchlässigkeit beeinträchtigen und die Fließrichtung beeinflussen können. Da sich die Grundwassermodell-Domäne in einem abgeflachten Einzugsgebiet aus Lockergesteinsformationen (z.B. Porengrundwasserleiterzone) befindet, wurde die Grundwasserneubildungsrate als Differenz zwischen der monatlichen Niederschlagsrate (DWD-Klimadatenzentrum 2018a) und der monatlichen tatsächlichen Verdunstungsrate (DWD Climate Data Center 2018b) angesetzt. Es ist zu be-

achten, dass das gekoppelte Modell auf einer täglichen Zeitskala synchronisiert wurde. Um das eingegebene Neubildungsintervall mit dem Modellzeitschritt in Einklang zu bringen, wurde der monatliche Neubildungswert gleichmäßig über einen Zeitraum von 30 Tagen disaggregiert und auf jedes Grundwasserelement als instationäre flächenhafte Randbedingung angewendet.

4.3.2 Methode zur Kalibrierung und Validierung

Initiale Simulation

Zu Beginn der Simulation wurden die Kalibrierungsparameter, darunter die hydraulische Leitfähigkeit der Aquifere kf_{gw} [m/s], die effektive Porosität des Aquifers eP [-], der Durchlässigkeitsfaktor kf_{rv} [1/s] und der Manning'sche Rauheitskoeffizient n [s/m^{1/3}], auf Grundlage der lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten sowie empirischer Werte festgelegt.

Laut der hydrologischen Karte HK 250 (BGR & SGD 2019) bestehen die Ziel-Aquifere aus mittelpermeablen Sedimenten, bei denen eine hydraulische Leitfähigkeit kf_{gw} im Bereich von $1 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $1 \cdot 10^{-4}$ m/s empfohlen wird. Daher wurde für das Grundwassermodell eine einheitliche hydraulische Leitfähigkeit kf_{gw} von $1 \cdot 10^{-3}$ m/s und eine einheitliche effektive Porosität eP von 0,25 zugewiesen. Für das Flussmodell wurde der Durchlässigkeitsfaktor kf_{rv} basierend auf den Empfehlungen von Bucher und Denneborg (1993) mit $1 \cdot 10^{-6}$ 1/s festgelegt. Sie führten ein Infiltrationsexperiment im mittleren Rurgebiet durch und schätzten einen Durchlässigkeitsfaktor kf_{rv} im Bereich von $1 \cdot 10^{-5}$ 1/s bis $5 \cdot 10^{-6}$ 1/s als angemessenen Wert an. Ein standardisierter Manning'scher Rauheitskoeffizient n von 0,04 s/m^{1/3} wurde zunächst für das Umland angewendet, während ein Wert von 0,0333 s/m^{1/3} für das Hauptgerinne gemäß den empirischen Werten von Bollrich (1996) verwendet wurde. Da sich die Simulation auf Trockenperioden konzentrierte, richtete sich die Kalibrierung hauptsächlich auf Parameter im Flussbett. Konkret wurde der n -Wert am Bettpunkt (dem tiefsten Punkt im Hauptgerinne) angepasst, während der n -Wert im Umland unverändert blieb.

Nach der ersten Simulation wurde eine Kalibrierung mittels eines Trial-and-Error-Ansatzes durchgeführt, um die Diskrepanz zwischen simulierten und beobachteten Ergebnissen zu minimieren. Die Grundwasserparameter wurden für jedes Raster kategorisiert und entsprechend den resultierenden Ergebnissen angepasst. Ebenso wurden die Flussparameter über das Segment zwischen den relevanten Pegeln verteilt und basierend auf den Simulationsergebnissen am flussabwärts liegenden Pegel modifiziert. Durch sorgfältige Anpassung der Kalibrierungsparameter wurde das endgültige Modell entwickelt, das die beste Übereinstimmung mit den beobachteten Werten erzielte.

Modellkalibrierung und Modellvalidierung

Zur Sicherstellung der Modellgüte und Übertragbarkeit wurde das Modell in einem zweistufigen Prozess aus Kalibrierung und Validierung überprüft. In der Kalibrierungsphase wurden Zeitreihendaten aus den Jahren 2002 bis 2005 herangezogen, um die Modellparameter so anzupassen, dass eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen den simulierten und den beobachteten Werten erreicht wird. Anschließend erfolgte die Validierung des Modells mit Daten aus dem Zeitraum von 1991 bis 2020, um die Verlässlichkeit der Simulationsergebnisse unter verschiedenen hydrologischen Bedingungen zu bestätigen.

Um die Anfangsbedingungen zu stabilisieren und einen realistischen Ausgangszustand für die nachfolgende Simulation zu gewährleisten, wurde gemäß den Empfehlungen von Ntona et al. (2022) das erste

Jahr der Validierungsphase (hier 1991) als Warm-up Phase definiert. Dieser Ansatz dient dazu, eventuelle Anfangsunsicherheiten zu minimieren und somit die Genauigkeit der Modellprognosen zu erhöhen.

Die hydrodynamischen Ausgaben des Modells umfassen eine Vielzahl von Parametern, die für die Analyse der hydrologischen Prozesse von zentraler Bedeutung sind. Dazu gehören insbesondere Zeitreihen der täglichen Flussabflüsse (m^3/s), sowie detaillierte Wasserstandsdaten für jedes betrachtete Profil entlang des Flussverlaufs. Darüber hinaus wurden tägliche Grundwasserpegel erfasst, die eine kontinuierliche Beobachtung der Grundwasserverhältnisse ermöglichen. Ergänzend dazu wurden tägliche Grundwassermatrizen erstellt, die eine flächenhafte Darstellung der Grundwasserstände in den einzelnen Modell-Elementen erlauben.

Zur Bewertung der Flussmodelle wurden die simulierten Werte mit den gemessenen Abflüssen und Wasserständen an mehreren ausgewählten Pegeln verglichen. Dabei kamen die Messstationen Stahl, Jülich Stadion, Altenburg und Selhausen (Land NRW 2024) zum Einsatz, deren Daten eine verlässliche Grundlage für die Modellbewertung darstellen.

Für die Grundwassermodelle wurden Rasterdaten mit einer räumlichen Auflösung von $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ genutzt. Diese Daten repräsentieren monatlich beobachtete Grundwasserstände und bieten somit eine solide Basis für den Vergleich mit den simulierten Grundwasserspiegeln. Der Rasterwert innerhalb jedes Grundwasserelements wurde gemittelt und anschließend extrahiert, um eine repräsentative Datengrundlage für die weitere Analyse zu gewährleisten. Die so gewonnenen Werte wurden in einer mathematischen Matrix zusammengeführt, die anschließend mit der entsprechenden Ausgabematrix aus der Simulation abgeglichen wurde.

Zusätzlich zur flächenhaften Betrachtung der Grundwasserstände wurden Messwerte von vier ausgewählten Grundwassermessstellen (Land NRW 2024) herangezogen, die in unterschiedlichen Rastern verteilt sind. Diese punktuellen Messungen dienen dazu, die zeitlichen Veränderungen des Grundwasserspiegels an spezifischen Standorten detaillierter zu analysieren. Durch die Kombination von flächenhaften Rasterdaten und punktuellen Messwerten konnte eine umfassende Validierung des Grundwassermodells durchgeführt und dessen Aussagekraft weiter optimiert werden.

Modellbewertung

Die Bewertung der Modellgüte basiert sowohl auf einer statistischen als auch auf einer grafischen Analyse, um die Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Daten umfassend zu beurteilen. Während statistische Kennwerte eine quantitative Einschätzung liefern, ermöglicht die grafische Analyse eine visuelle Identifikation systematischer Abweichungen und Modellfehler.

Im Rahmen der grafischen Bewertung wurden sowohl die simulierten als auch die gemessenen Daten in einem Diagramm dargestellt, um einen umfassenden Überblick über die Gesamtheit der vorliegenden Datensätze zu erhalten. Auf Grundlage dieser Visualisierung erfolgte eine Analyse hinsichtlich vorhandener Trends sowie potenzieller Abweichungen. Dabei wurde untersucht, inwiefern beide Datensätze übereinstimmende Muster aufweisen und an welchen Stellen signifikante Differenzen auftreten. Zudem wurde die Größe der Abweichungen sowohl in quantitativer Hinsicht als auch in Bezug auf mögliche zeitliche Verschiebungen bewertet.

Als weitere Bewertungsmethode erfolgte die statistische Analyse. Es wurden Fehlerstatistiken wie der Root Mean Square Error (RMSE) und der Bestimmtheitskoeffizienten (R^2) verwendet. Diese Kennwerte

ermöglichen eine quantitative Einschätzung der Modellgüte durch den Vergleich der simulierten Werte mit den beobachteten Daten. Dabei gilt:

- N ist die Gesamtanzahl der Daten
- S steht für die simulierten Werte (Simulation)
- repräsentiert die beobachteten Werte (Observation)

Der RMSE wurde berechnet, um die durchschnittliche Abweichung zwischen den simulierten und den beobachteten Werten zu quantifizieren. Er gibt somit einen Hinweis auf die Genauigkeit der Modellvorhersagen und wird folgendermaßen berechnet:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_0^N (X_s - X_o)^2}$$

Der Bestimmtheitskoeffizient (R^2) gibt die Übereinstimmung zwischen den simulierten und den beobachteten Werten zu bewerten. Er beschreibt den Anteil der Varianz der beobachteten Werte, der durch das Modell erklärt wird, wobei ein Wert nahe eins eine hohe Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung anzeigt, während ein Wert nahe null auf eine geringe Modellgüte hindeutet.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_0^N (X_o - X_s)^2}{\sum_0^N (X_o - \bar{X}_o)^2}$$

Darüber hinaus sollte die für die Datenaufbereitung und Berechnung benötigte Zeit als Kriterium zur Bewertung der Simulation erfasst werden.

4.3.3 Kalibrierungsergebnisse 2002-2005

Das gekoppelte Rur-Modell wurde für den Zeitraum von 2002 bis 2005 kalibriert, wobei das Jahr 2002 als Aufwärmphase diente. Basierend auf den Kalibrierungsergebnissen wurden die Grundwasser- und Flussparameter bestimmt, wie in Tabelle 16 dargestellt. Im Vergleich zu ihren Anfangswerten, die auf empirischen Daten oder hydrologischen Karten basierten, lagen diese Parameter im Allgemeinen innerhalb des jeweils gültigen Wertebereichs.

In Tabelle 17 zeigt die statistische Auswertung eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und beobachteten Werten sowohl für die Grundwasser- als auch für die Flussmodelle. Die RMSE-Werte der Flusspegel lagen zwischen 0,03 m und 0,08 m, während die entsprechenden R^2 -Werte konstant über 0,85 lagen, wobei ein $R^2 \geq 0,5$ als akzeptabel angesehen wird. Dies deutet darauf hin, dass die simulierten Daten den systematischen zeitlichen Trend reproduzieren können. Für das Grundwasser ergab der Vergleich mit rasterbasierten Beobachtungsdaten R^2 -Werte zwischen 0,75 und 0,98 sowie RMSE-Werte von 0,90 m bis 1,77 m, was eine zufriedenstellende Modellleistung bestätigt. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde das kalibrierte Modell als zuverlässig angesehen und für nachfolgende Langzeitsimulationen verwendet.

Tabelle 16: Die final kalibrierten Parameter für das Grundwasser- und Flussmodell

Groundwater rasters	kf_{gw} (m/s)	eP (-)		River segments	kf_{rv} (1/s)	n ($s/m^{1/3}$)
Raster_1	1e-3	0.2		inlet-Selhausen	5e-6	0.02
Raster_2	5e-4	0.2		Selhausen-Altenburg	5e-6	0.02
Raster_3	1e-3	0.2		Altenburg-Jülich Stadion	5e-6	0.01
Raster_4	1e-3	0.2		Jülich Stadion-Linnich	5e-6	0.01
Raster_5	1e-3	0.2		Linnich-Stah	5e-6	0.028
				Stah-outlet	5e-6	0.02

Tabelle 17: Statistische Kennwerte (RMSE, R^2) für die Grundwasser- und Flussmodelle im Kalibrierungszeitraum (2003–2004)

Groundwater Rasters	2003,2004		River Gauges	2003,2004	
	RMSE (m)	R^2 (-)		RMSE (m)	R^2 (-)
Raster_1	1.16	0.98	Selhausen	0.03	0.98
Raster_2	1.27	0.90	Altenburg	0.05	0.93
Raster_3	1.77	0.87	Jülich Stadion	0.08	0.88
Raster_4	1.20	0.75	Linnich	0.03	0.94
Raster_5	0.90	0.94	Stah	0.04	0.98

4.3.4 Validierungsergebnisse 1991-2020

Zur Bewertung der Langzeitsimulationsfähigkeit von LoFloDes wurde mit dem gekoppelten Rur-Modell eine 30-jährige Simulation für 1991–2021 durchgeführt (1991 als Aufwärmphase). Die Gesamtberechnungszeit betrug 193 Minuten, davon 23 Minuten für das Einlesen der Eingangsdaten, 5 Minuten für die Datenausgabe und 165 Minuten für die Berechnung.

Fließgewässer Ergebnisse

Während der Langzeitsimulation lagen die RMSE-Werte für die simulierten Wasserstände an den Pegeln Selhausen, Altenburg, Jülich, Linnich und Stah bei 0,06 m, 0,10 m, 0,08 m, 0,04 m bzw. 0,05 m. Die entsprechenden R^2 -Werte betragen 0,85 (Selhausen), 0,52 (Altenburg), 0,82 (Jülich), 0,94 (Linnich) und 0,95 (Stah). Insgesamt zeigten die Pegel Stah und Linnich mit hohen R^2 -Werten und niedrigen RMSEs die beste Modellgüte. Selhausen und Jülich folgten dahinter, insbesondere am Pegel Altenburg war die Modellleistung mit einem R^2 von nur 0,52 moderat.

Abbildung 25 zeigt den Vergleich zwischen simulierten und beobachteten Daten an verschiedenen Pegeln. Am Pegel Stah stimmen die simulierten Wasserstände während des gesamten Untersuchungszeitraums eng mit den beobachteten Werten überein. Auch am Pegel Linnich werden die allgemeinen Trends der Wasserdynamik gut erfasst, allerdings überschätzt das Modell systematisch die Hochwasserspitzen. Im Gegensatz dazu wurde an den Pegeln Selhausen und Altenburg zwar gelegentlich eine Übereinstimmung mit den Beobachtungen in bestimmten Zeiträumen festgestellt, jedoch konnte keine konsistente langfristige Übereinstimmung erreicht werden. Bemerkenswert ist, dass die Simulationen an Selhausen und Altenburg die beobachteten Wasserstände von 1992 bis 1997 unterschätzten, während am Pegel Jülich das Modell zu einer Überschätzung neigte. In anderen Zeiträumen wie 2004–2008 zeigten die simulierten zeitlichen Trends an diesen Pegeln jedoch eine starke Korrelation mit den beobachteten Daten. Darüber hinaus war ein rascher Rückgang der beobachteten Wasserstände zwischen 2002 und 2003 am Pegel Altenburg offensichtlich. Diese strukturelle Veränderung deutet darauf hin, dass die Beobachtungsdaten wahrscheinlich durch anthropogene Eingriffe beeinflusst wurden, z.B. Verlagerung von Messpunkten oder lokale Wasserentnahme- und Einleitungsaktivitäten. Das angewandte Modell reproduziert natürliche Flussdynamiken, berücksichtigt jedoch keine anthropogenen Einflüsse, was naturgemäß zu periodischen Diskrepanzen zwischen simulierten und beobachteten Daten führt.

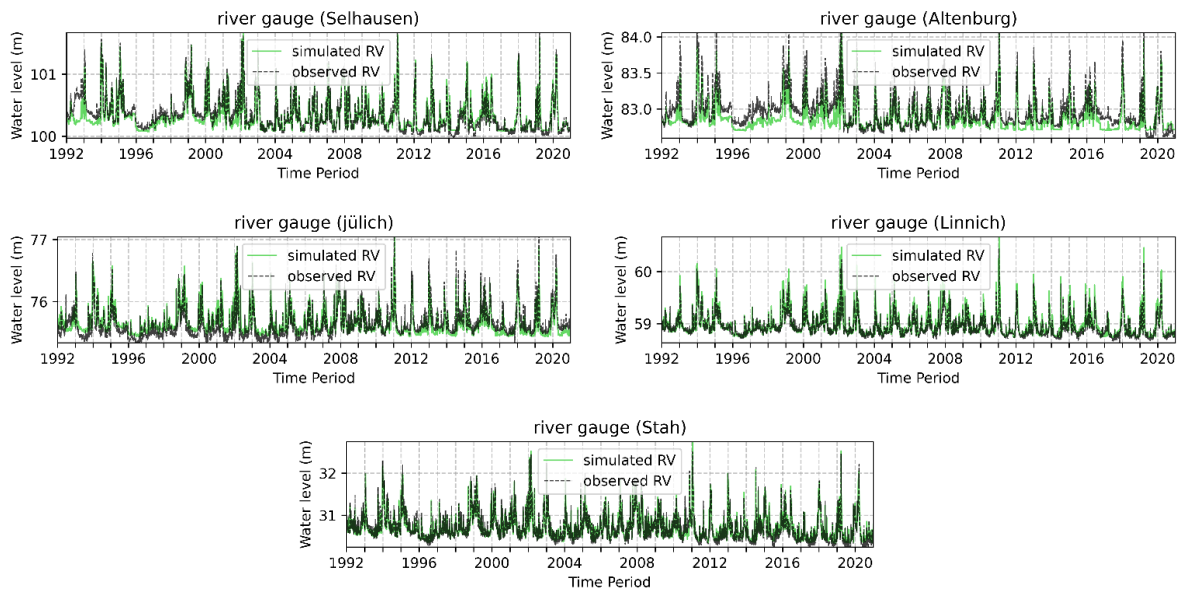


Abbildung 25: Vergleich der simulierten und beobachteten Flusswasserstände (RV) an den Pegeln Selhausen, Altenburg, Jülich, Linnich und Stah für den Zeitraum 1992–2020.

Grundwasser-Ergebnisse

Bezüglich des Grundwassermodells wurden die simulierten Grundwasserstände mit gerasterten Beobachtungsdaten verglichen. Abbildung 26 zeigt die Konturkarten der durchschnittlichen Grundwasserstände für den Zeitraum 1992–2020, basierend auf simulierten und beobachteten Datensätzen. Die berechneten R^2 -Werte für die Raster 1–5 betragen 0,97, 0,88, 0,91, 0,96 und 0,99, die entsprechenden RMSE-Werte lagen bei 0,64 m, 0,90 m, 1,29 m, 0,89 m und 0,75 m. Alle R^2 -Werte übersteigen den Schwellenwert von 0,5 und bestätigen somit eine angemessene Nachbildung der räumlichen Verteilung durch das Modell.

Die simulierten Konturkarten erfassen insgesamt das beobachtete räumliche Muster gut. In beiden Karten ist eine allmähliche Verteilung der Grundwasserstände vom Südosten zum Nordwesten erkennbar. In den Rastern 1 und 2 deuten eng beieinanderliegende Höhenlinien auf starke Gradienten hin, während von Raster 3 bis Raster 5 die Abstände zwischen den Linien zunehmen, was auf einen flacheren Verlauf hindeutet. Trotz dieser allgemeinen Übereinstimmung werden einzelne Höhenlinien in den Rastern 2 (85,4 m), 3 (72,7 m) und 4 (60 m) nicht exakt wiedergegeben. Diese Abweichungen spiegeln sich auch in den jeweils niedrigeren statistischen Gütewerten wider. Im Gegensatz dazu stimmen die simulierten Konturen in Raster 1 und 5 sehr gut mit den Beobachtungen überein.

Auch für die Jahre 2001 und 2018 zeigen die simulierten Konturkarten vergleichbare räumliche Muster. Dennoch bleiben insbesondere in den Rastern 2–4 deutliche Unterschiede zwischen Simulation und Beobachtung bestehen. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass die beobachteten Daten sowohl natürliche als auch anthropogene Einflüsse widerspiegeln, z.B. temporäre Grundwasserentnahmen, während das Modell ausschließlich natürliche hydrologische Prozesse abbildet. Besonders betroffen sind Bereiche zwischen Tagebauen (Raster 2) bzw. Gebiete mit weiteren menschlichen Eingriffen (Raster 3/4). Diese standortspezifischen anthropogenen Einflüsse führen zu einer erhöhten Diskrepanz zwischen gemessener und modellierter natürlicher Grundwasserverteilung.

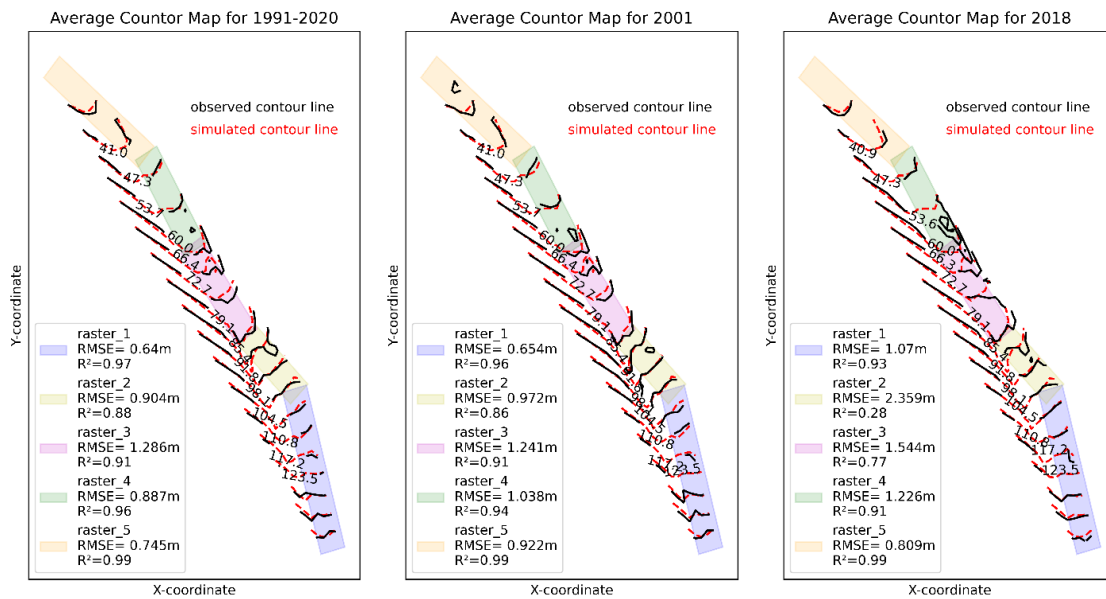


Abbildung 26: Vergleich der simulierten und beobachteten Grundwasserkonturkarten für den durchschnittlichen Grundwasserstand im Zeitraum 1991–2020 sowie für die jährlichen Grundwasserstände der Jahre 2001 und 2018.

Zur Bewertung der Modellgüte hinsichtlich der Grundwasserdynamik wurden die simulierten Grundwasserstände mit den Messdaten an sechs Beobachtungspegeln verglichen (Abbildung 27). Die räumliche Lage der Grundwassermessstellen ist in Abbildung 24 dargestellt. In Abbildung 27 zeigen die Simulationen an den Pegeln 10201233 und 10304307 eine sehr gute Übereinstimmung mit den zeitlichen Verläufen der beobachteten Grundwasserstände, was auf eine hohe Modellgüte an diesen Standorten hinweist. Auch an den Pegeln 10406323 und 10202237 werden die zeitlichen Trends im Allgemeinen gut erfasst, allerdings besteht hier ein konstanter Versatz zwischen simulierten und gemessenen Werten. Dieser beträgt im Mittel 0,14 m bei Pegel 10406323 bzw. 0,37 m bei Pegel 10202237. Solche Abweichungen lassen sich durch das im HYD-Modul verwendete Modellierungskonzept erklären, bei dem die Grundwasserzonen als vereinfachte, homogene Elemente abgebildet werden. Demgegenüber spiegeln Einzelmessstellen lokale und zeitlich variable Wasserstände wider. Diese Generalisierung kann daher zu grober Simulation der punktierten Messwerte führen, auch wenn die großräumigen dynamischen Entwicklungen gut wiedergegeben werden.

An den Pegeln 10201142 und 10305981 treten abweichende Muster auf. Bei Pegel 10201142 stimmen Simulation und Beobachtung von 1992 bis etwa 1994 gut überein. Ab 1995 sinkt der beobachtete Wasserspiegel jedoch auf etwa 77 m ab, während das Modell weiterhin höhere Werte liefert. Zwischen 2015 und 2019 nähern sich Mess- und Simulationswerte wieder an (ca. 75,5–78 m), sodass in diesem Zeitraum erneut eine gute Übereinstimmung vorliegt. Für den Pegel 10305981 fehlen Beobachtungsdaten für die Jahre 1992–2004. Anschließend zeigt sich, ähnlich wie bei 10201142, in einzelnen Zeitabschnitten (insbesondere zwischen 2004–2008 sowie 2018–2021) eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung, während das Modell von 2008 bis 2018 tendenziell unterschätzt. An beiden Pegeln fallen zudem unregelmäßige Schwankungen in den gemessenen Grundwasserständen auf, wohingegen das Modell einen gleichmäßigeren Verlauf simuliert. Diese Unterschiede sind vermutlich auf anthropogene Einflüsse in diesen Gebieten zurückzuführen, die im Modell nicht berücksichtigt wurden und somit nicht in den Simulationsergebnissen erscheinen.

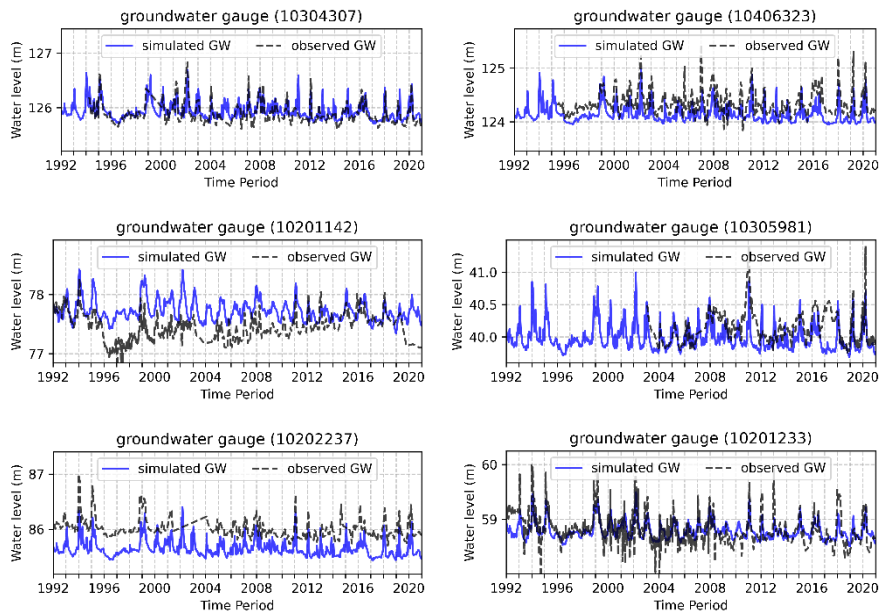


Abbildung 27: Vergleich der simulierten und beobachteten Grundwasserstände (GW) an den Messstellen 10304307, 10406323, 10201142, 10305981, 10202237 und 10201233 für den Zeitraum 1992–2020.

Interaktion zwischen Grundwasser- und Fließgewässer-Systeme

Während der Langzeitsimulation von 1991 bis 2020 ermöglicht das Modell auch die Quantifizierung der Austauschflüsse zwischen Grundwasser- und Flusssystem entlang des Rur-Abschnitts. Abbildung 28 zeigt die räumliche Verteilung der simulierten Austauschraten entlang des Flusslaufs. Im linken Teil der Abbildung werden die simulierten täglichen mittleren Austauschströme (in m³/s) an den Kopplungspunkten dargestellt. Der rechte Teil von der Abbildung zeigt die aufsummierten mittleren Austauschraten entlang des Rur-Abschnitts.

Wie im linken Panel erkennbar, weisen die mittleren Grundwasser-Fluss-Austauschströme vom Einlauf bis zum Pegel Linnich eine erhebliche räumliche Variabilität auf und schwanken etwa zwischen -0,02 m³/s und +0,02 m³/s. Einzelne Abschnitte werden von Infiltration dominiert, andere von Exfiltration. Trotz dieser lokalen Unterschiede bleibt die aufsummierte mittlere Austauschrate positiv (rechtes Panel), was auf einen langfristig positiven Beitrag des Grundwassers zum Flusssystem in diesem Abschnitt hinweist. Unterhalb des Pegels Linnich ist die mittlere Austauschrate durchgehend positiv (linkes Panel), was eine anhaltende und dominante Grundwasserausschüttung widerspiegelt. Entsprechend steigt auch die kumulierte Austauschrate (rechtes Panel) kontinuierlich flussabwärts bis zum Auslass an, was auf eine verstärkte Interaktion zwischen Grundwasser und Fluss hindeutet. Am Pegel Stah beträgt die aufsummierte Austauschrate etwa 2 m³/s, dies entspricht rund 18 % des dortigen mittleren Abflusses (10,86 m³/s) und stellt somit einen nicht zu vernachlässigenden Einflussfaktor für das lokale Fließgewässerregime dar.

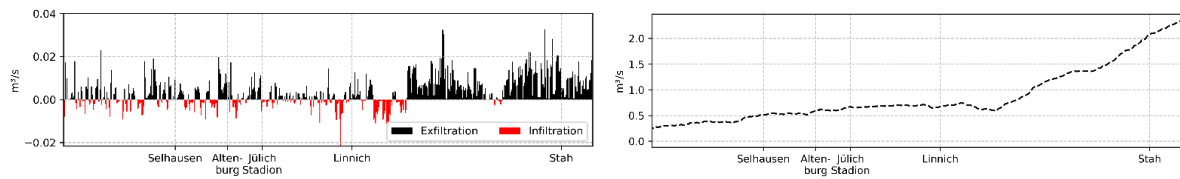


Abbildung 28: Simulierte mittlere tägliche Grundwasser–Flusswasser-Austauschraten (m/s) an den Kopplungspunkten entlang des Rur-Abschnitts für den Zeitraum 1992–2020 (links); simulierte aufsummierte mittlere tägliche Grundwasser–Flusswasser-Austauschraten entlang des Rur-Abschnitts für den Zeitraum 1992–2020 (rechts).

4.4 Diskussion

4.4.1 Diskussion der Langzeitsimulationsergebnisse

In dieser Studie wurde die Niedrigwasser-Hydrodynamik mit Grundwasser–Fluss-Interaktionen entlang eines Abschnitts der Rur mithilfe des HYD-Modells in LoFloDes simuliert.

Im Hinblick auf das Flusssystem variiert die Modellgüte an den einzelnen Pegeln deutlich. An den Stationen Selhausen, Altenburg und Jülich unterschätzt oder überschätzt das Modell die Wasserstände häufiger als in Linnich und Stah. Hauptursache hierfür ist, dass die beobachteten Wasserstände dieser drei Stationen stark durch industrielle und energetische Anlagen beeinflusst werden. Beispielsweise entnimmt das Kraftwerk Weisweiler etwa 12 Millionen m³/Jahr aus der Rur bei Flusskilometer 65,9 für Kühlzwecke. Zudem befindet sich die Kläranlage Jülich nahe dem Pegel Jülich und leitet jährlich rund 4 Millionen m³ gereinigtes Abwasser ein (Land NRW 2024). Solche anthropogenen Entnahmen und Einleitungen verändern den natürlichen Abfluss erheblich und führen zu unregelmäßigen Abflussmustern, welche durch das rein naturbasierte Modell nicht abgebildet werden können.

Am Pegel Linnich hingegen stimmen Simulationen unter Niedrigwasserbedingungen gut mit den Beobachtungen überein, während Hochwasserereignissen nimmt die Modellgüte jedoch ab. Ursache hierfür ist, dass zentrale Parameter wie der Leckagekoeffizient k_{f_rv} und der Mannings-Wert n ausschließlich für Trockenperioden 2002–2005 kalibriert wurden. Hochwasserereignisse führen zur Sedimentreinigung im Flussbett und an den Ufern, erhöhen dadurch die Durchlässigkeit sowie Leckageraten. Bucher und Denneborg 1993 berichten beispielsweise, dass der Leckagekoeffizient der Rur von $5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ bei Basisabfluss auf bis zu $1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ während Hochwassern steigen kann. Doppler et al. 2007 betonen ebenfalls die Bedeutung eines dynamischen Leckagefaktors in gekoppelten Modellen. Satzinger und Bachmann 2024 zeigen zudem, dass eine ausschließlich in Niedrigwasserphasen kalibrierte Rauheitszahl Mannings n bei höheren Durchflüssen zu Fehlern führt. Die ausschließliche Parametrisierung anhand von Trockenperiodendaten begrenzt somit die Genauigkeit des Modells bei Hochwassersituationen. Zukünftige Anwendungen sollten daher eine Kalibrierung über alle Abflussregime hinweg berücksichtigen.

Für das Grundwassersystem weisen Raster 1 und 5 geringe statistische Fehler bei der Reproduktion der Grundwasserkonturen auf, während in Raster 2, 3 und 4 größere Abweichungen in einzelnen Höhenlinien auftreten. Diese Diskrepanzen korrespondieren mit Bereichen lokal anthropogener Einflüsse. Visuelle Vergleiche an Messstelle 10201142 bestätigen solche lokalen menschlichen Eingriffe insbesondere im Bereich von Raster 3. In vielen Fällen hat die menschliche Nutzung einen stärkeren Einfluss auf die Grundwasserdynamik als klimatische Schwankungen (Li et al., 2014; Ren et al., 2024). Für eine höhere Zuverlässigkeit sollten künftige Modelle diese anthropogenen Belastungen explizit integrieren.

Das HYD-Modell quantifiziert darüber hinaus Austauschprozesse zwischen Grund- und Oberflächenwasser entlang des Rur-Abschnitts und zeigt eine starke hydraulische Verbindung. Steile Gradienten und schneller Abfluss prägen den oberen Gebirgsabschnitt der Rur. Im Unterlauf durchquert sie breite Auen mit flachen Gefällen, sandig-kiesigem Substrat sowie weitläufigen Überschwemmungsflächen (Kufeld et al., 2010). Diese Bedingungen fördern natürlicherweise den Austausch zwischen beiden Systemen. Dazu bestätigt die Langzeitsimulation einen deutlichen Anstieg der Austauschraten vom Einlauf zum Auslass hin. Die enge Übereinstimmung zwischen simulierten und beobachteten Wasserständen an den Pegeln Linnich und Stah sowie die hohe Güte bei der Nachbildung von Grundwasserkonturen für Raster 5 belegen zudem die Zuverlässigkeit des Modells hinsichtlich lokaler Flusssdynamiken infolge von Grundwasserbeiträgen.

Zusammenfassend zeigt das HYD-Modell zuverlässige Leistungen über längere Simulationszeiträume hinweg. Zukünftige Arbeiten sollten daher Folgendes berücksichtigen:

- Dynamische Kalibrierung von Leckage- und Rauheitsparametern über sämtliche Abflussregime.
- Integration anthropogener Entnahmen sowie Rückführungen als Randbedingungen ins Modell.

4.4.2 Diskussion zur Software-Benutzerfreundlichkeit und weiteren Anwendungsmöglichkeiten

Das HYD-Modell innerhalb von LoFloDes ist darauf ausgelegt, das Grundwasser- und Flusssystem unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen Grundwasser und Fluss über längere Simulationszeiträume zu modellieren.

Eine zentrale Herausforderung bei Langzeitsimulationen besteht darin, Genauigkeit und Stabilität über den gesamten Zeitraum aufrechtzuerhalten. In dieser Studie wurde das Modell anhand mehrjähriger Zeitreihen kalibriert und validiert, unter Verwendung standardisierter statistischer Gütemaße (z. B. R^2 , RMSE) sowie zeitlicher Abflussganglinien, wie von Moriasi et al. 2007; Guzman et al. 2015) empfohlen. Für die meisten Pegel liegen die Fehlermaße im akzeptablen Bereich, und die Form der Ganglinien stimmt gut mit den Beobachtungen überein. Zusätzlich bestätigen Konturkarten der simulierten Grundwasserstände eine konsistente räumliche Modellierung. Diese Ergebnisse belegen sowohl die Genauigkeit als auch die numerische Stabilität des Modells über lange Simulationsläufe hinweg.

Für praktische Anwendungen ist zudem eine hohe Recheneffizienz entscheidend. Die zeitliche und räumliche Diskretisierung beeinflussen maßgeblich die Laufzeit von Langzeitsimulationen. Viele Anwender gekoppelter Modelle nutzen monatliche oder wöchentliche Zeitschritte (Bailey et al. 2016; Hellwig 2019; Chen et al. 2020), wobei jedoch wichtige tägliche Niedrigwasserereignisse nicht erfasst werden können. Im Rahmen dieser Studie erfolgte deshalb eine Synchronisation mit täglichen Zeitschritten. Die räumliche Auflösung wurde so gewählt, dass ein ausgewogenes Verhältnis zwischen genauer Abbildung der Wasserverteilung und minimalem Rechenaufwand erreicht wird. Die effiziente numerische Lösungsverfahren steigern zusätzlich die Leistungsfähigkeit. Mit dieser Konfiguration wird eine relative Rechengeschwindigkeit von 0,9 Sekunden pro Simulationsschritt sowie ein normalisierter Performance-Index von 0,0016 Sekunden pro Schritt und Element auf einem Standard-Rechner erzielt. Zum Vergleich wurde eine beispielhafte MODFLOW-Studie herangezogen. Dort ergab sich für eine 22-jährige Simulation eines gekoppelten Grundwasser-Fluss-Modells ein Performance-Index von 0,00034 Sekunden pro Schritt und Element (siehe Tabelle 18). Obwohl MODFLOW hier recheneffizienter abschneidet als LoFloDes, ist zu beachten, dass LoFloDes eine bidirektionale Kopplung sowie eine deutlich feinere

Flussauflösung verwendet, was die Komplexität je Rechenschritt erhöht. Insgesamt kann die in dieser Fallstudie erreichte Simulationsleistung als angemessen für praktische Langzeitanwendungen bewertet werden.

Tabelle 18: Vergleich der Langzeitsimulationsergebnisse zwischen dieser Studie und Chen et al. (2020)

Study	Software	Interaction Type	spatial resolution groundwater model	spatial resolution river model	computation time	normalized computation time
this study	HYD-Model LoFloDes	bidirectional	500m (550 elements)	100m (524 profiles)	9900s for 30 years; daily time step	0.0016 s per step-element
Chen et al. 2020	MODFLOW	unidirectional (river-> groundwater)	1000m (21120 elements)	1000m (unknown)	1898s for 22 years; monthly time step	0.00034 s per step-element

Basierend auf den Langzeitsimulationen für das Rur-Einzugsgebiet bildet das HYD-Modell die gekoppelten Dynamiken von Grundwasser und Oberflächengewässer zuverlässig ab. Insbesondere der Einfluss von Fluss-zu-Grundwasser-Infiltration während Dürreperioden ist bislang wenig untersucht. (Riedel et al. 2021b) Aufgrund seiner robusten Kopplung, numerischen Stabilität und hohen Recheneffizienz über lange Simulationsläufe eignet sich das HYD-Modell ideal zur Analyse dieses Prozesses. Darüber hinaus können weitere Einflussfaktoren wie anthropogene Eingriffe (z.B. Grundwasserentnahmen) und unregelmäßige Niederschlagsereignisse flexibel als Punkt- oder Flächenrandbedingungen in die Grundwasserelemente integriert werden. Diese modulare Konfiguration ermöglicht somit detaillierte Untersuchungen komplexer Trockenheitsausbreitungsprozesse im gekoppelten Grundwasser–Fluss-Systemen unter menschlichem Einfluss.

Als Teil von LoFloDes profitiert das HYD-Modell zudem von den Eigenschaften der ProMaiDes-Plattform. LoFloDes ist eine freie und quelloffene Software, die verschiedene offene Hilfsprogramme wie QGIS oder ParaView für Datenaufbereitung und -visualisierung einbindet. Durch den modularen Aufbau können sowohl Grundwasser- als auch Flusssysteme integriert und benutzerdefinierte Modelle für prozessbasierte Basisabflussanalysen implementiert werden. Zudem ist LoFloDes Bestandteil des DRYRIVERS -Projekts, das einen ganzheitlichen Ansatz zur Niedrigwasserrisikoanalyse verfolgt. Die hydrodynamischen Simulationsergebnisse des HYD-Modells fließen dabei direkt in sozioökonomische Bewertungen, etwa zur Schifffahrt (Folkens et al. 2024) sowie in ökologische Analysen (Satzinger und Bachmann 2024) ein, was einen fehleranfälligen Datenaustausch zwischen Modulen vermeidet.

Für eine breitere Anwendung und Weiterentwicklung sind jedoch zusätzliche Entwicklungen notwendig: Ein Schwerpunkt liegt auf der Anbindung an hydrologische Modelle, um insbesondere die Grundwasserneubildung durch Berücksichtigung von Schneeschmelze und Landnutzung besser abzubilden. Darüber hinaus sollten verschiedene Kopplungsmethoden, wie der nichtlineare Rushton-Ansatz oder dynamische Kopplungsverfahren, getestet werden, um die Modellgüte weiter zu verbessern.

4.5 Fazit und Ausblick

Im HYD-Modell der Software LoFloDes wurde ein physikalisch basierter Modellierungsansatz entwickelt, der ein 1D-Flussmodell, ein 2D-Grundwassermodell sowie eine bidirektionale Kopplungsstrategie umfasst. Diese integrierte Struktur ermöglicht die Simulation von langfristigen Niedrigwasserszenarien unter Berücksichtigung dynamischer Austauschprozesse zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer. Das Modell wurde anhand einer Fallstudie an der Rur getestet, wobei die Kalibrierung für den Zeitraum 2002–2005 und die Validierung für den erweiterten Zeitraum 1991–2020 erfolgte.

Während der Langzeitsimulation (1991–2020) zeigten die Ergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung zwischen simulierten und beobachteten Daten sowohl an Fluss- als auch an Grundwasserpegeln. Die R^2 -Werte für die simulierten Wasserstände an den Pegeln Selhausen, Altenburg, Jülich, Linnich und Stah lagen bei 0,85, 0,52, 0,82, 0,94 bzw. 0,95. Die vergleichsweise geringere Modellgüte an Selhausen, Altenburg und Jülich ist vermutlich auf nicht abgebildete anthropogene Einflüsse zurückzuführen. Für die mittleren Grundwasserstände wurden über fünf Raster hinweg R^2 -Werte zwischen 0,85 und 0,98 erreicht. Darüber hinaus berechnet das Modell zeitlich variable Austauschraten zwischen Fluss- und Grundwassermodell. Die Ergebnisse zeigen, dass der betrachtete Abschnitt der Rur überwiegend als Gewinnstrecke fungiert. Das Grundwasser stellt somit einen wesentlichen Steuerungsfaktor des Abflussregimes dar. Der berechnete Anteil des Grundwasserzustroms nimmt entlang des Flusslaufs zu und erreicht am Pegel Stah etwa $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Hinsichtlich der Rechenleistung erzielt das Modell einen normalisierten Performance-Index von 0,0016 s pro Schritt pro Element auf einer Standard-Arbeitsstation. Es belegt seine Praxistauglichkeit für jahrzehntelange Niedrigwassersimulationen.

Insgesamt machen die robuste Kopplung von LoFloDes sowie seine numerische Stabilität und Effizienz das System zu einem wertvollen Werkzeug für Untersuchungen langfristiger Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächengewässern. Zukünftig sollten bislang unberücksichtigte lokale anthropogene Prozesse wie Grundwasserentnahmen oder Flusswasserentnahmen explizit integriert werden, um die Modellgüte unter menschlichen Einflussbedingungen weiter zu verbessern.

5 AP4.3 Niedrigwasserrisikoanalyse

5.1 Theoretische Grundlage

Die Auswirkungen von Niedrigwasser und damit einhergehende Folgen erstrecken sich über eine Vielzahl von essenziellen Sektoren. Die Verringerung der Wasserverfügbarkeit hat nicht nur direkte Folgen für Ökosysteme, sondern beeinträchtigt auch die industrielle Nutzung von Wasser sowie die Energieversorgung. Darüber hinaus können Wassertransportwege und die damit verbundene Binnenschifffahrt erheblich beeinträchtigt werden.

Bei einer Niedrigwasserperiode mit dem verringerten Fließquerschnitt nimmt die Fließgeschwindigkeit allerdings zu (Riedel et al. 2021a). Die erhöhte Geschwindigkeit führt zu einer weiteren Anforderung für die dort lebenden Organismen. Dadurch kann auch der Eintrag von Sauerstoff reduziert werden (Koop et al. 2007). Niedrige Wasserstände verändern außerdem die physikalische Beschaffenheit der Habitate, die Habitat-Bedingungen sowie die Wasserqualität. Auch eine Veränderung der Stoffflüsse und eine Anreicherung von Schadstoffen kann durch Niedrigwasser hervorgerufen werden. Insgesamt wird die gesamte Wasserqualität durch ein Niedrigwasserereignis negativ beeinflusst.

Neben der Ökologie eines Gewässers ist auch der Energiesektor von einem Niedrigwasserereignis stark betroffen. Bei der Wasserkraft ist die gesamte Energieproduktion beeinträchtigt. Auch eine Leistungseinschränkung bei thermischen Kraftwerken wird von Niedrigwasser hervorgerufen. Bei dem Niedrigwasserperioden in Sommermonaten kann die Temperatur des Wassers im Fluss ansteigen. Eine erhöhte Temperatur des Kühlwassers für das Kraftwerk führt dabei zu Einbußen in der Effizienz der Kühlleistung, sodass ein Mehrbedarf der Kühlwassermenge entsteht, der aber ggf. durch Einschränkungen der Entnahmemenge bei Niedrigwasser nicht gedeckt werden kann (Riedel et al. 2021a).

Wie in Kapitel 3.3 dargestellt, befindet sich im Rur-Einzugsgebiet das Kraftwerk Weisweiler, das Flusswasser zur Kühlung entnimmt. Zudem weist die untere Rur einen vergleichsweise ungünstigen ökologischen Zustand auf. Vor diesem Hintergrund wird eine Niedrigwasseranalyse für die untere Rur durchgeführt, die die Auswirkungen auf die Fischpopulationen und die Kühlwasserversorgung berücksichtigt. Darüber hinaus erfolgt ein Vergleich der Risikoanalysen mit und ohne Berücksichtigung des Grundwassereinzugs, um den Einfluss des Grundwassers auf die Ergebnisse der Niedrigwasseranalyse zu quantifizieren.

5.2 Daten und Methode

5.2.1 Workflow für die Niedrigwasserrisikoanalyse

Die Abbildung 29 zeigt den Workflow der Niedrigwasserrisikoanalyse, bestehend aus hydrodynamischer Analyse, Konsequenz- und Risikoanalyse. Grundlage bilden simulierte Wasserstände, Wassertemperaturen und Fließgeschwindigkeiten für den Zeitraum 01.01.1991 bis 31.12.2020 aus der Simulation in LoFloDes (s. Kapitel 4). Dabei werden sowohl Daten aus dem gekoppelten Rur-Modell, das den Einfluss des Grundwassers berücksichtigt, als auch aus dem nicht gekoppelten Modell, das diesen Einfluss nicht berücksichtigt, verwendet. Da LoFloDes kein Temperaturmodell enthält, wird die Wassertemperatur mithilfe der Tageslufttemperatur der Messstation Heinsberg abgeschätzt. Die Basisdaten gehen anschließend in die Konsequenzenanalyse hinsichtlich der Auswirkungen auf Fischpopulationen und Kühlwasserentnahme ein.

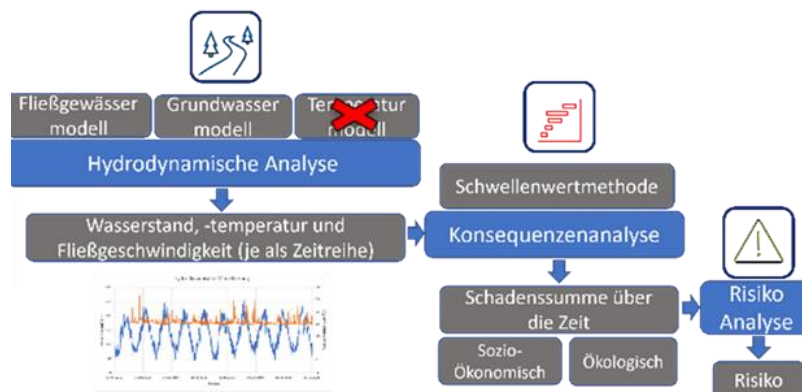


Abbildung 29: Workflow zur Berechnung der Niedrigwasserrisikoanalyse (Satzinger und Bachmann 2024)

Als Ergebnis wird die Zeitreihe der Konsequenz für jede Analyse erhalten. Zuletzt werden die Zeitreihe der Konsequenz K über die simulierten Jahre n erfasst, um den Gesamtschadenswert R zu berechnen.

$$R = \frac{\text{Schaden}}{\text{simulierter Zeitraum}} = \frac{\sum K}{n}$$

5.2.2 Konsequenzenanalyse auf Fischpopulationen

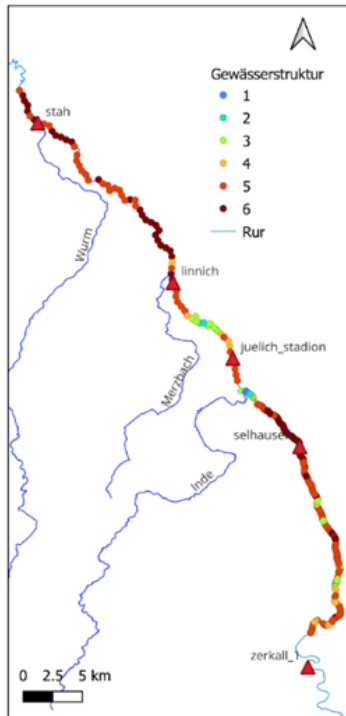


Abbildung 30: Gewässerstruktur entlang der unteren Rur. Eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Land NRW 2024.

Zur Bewertung der Niedrigwasserauswirkungen auf die Fischpopulationen wird die Methode des Projektpartners LimnoPlan – Fisch- und Gewässerökologie (Erfstadt) angewendet. Dafür werden Gewässerstrukturdaten sowie Fischpopulationsdaten für die untere Rur herangezogen.

Die Abbildung 30 zeigt die räumliche Verteilung der Gewässerstrukturklassen entlang des Zielabschnitts der Rur. Der Grad der Abweichung vom natürlichen Zustand wird in Strukturklassen von 1 bis 7 eingeteilt: Strukturklasse 1 steht für naturnahe, weitgehend unbeeinflusste Gewässerabschnitte, während Strukturklasse 7 stark veränderte, kaum noch natürliche Abschnitte kennzeichnet. Der überwiegende Teil der untersuchten Abschnitte fällt in die Strukturklassen 4 bis 6 und weist somit deutliche anthropogene Einflüsse auf. Eine Ausnahme bildet der Abschnitt zwischen den Stationen „Linnich“ und „Jülich Stadion“, der sich durch einen vergleichsweise guten ökologischen Zustand auszeichnet.

Die Fischpopulationsdaten stammen aus Beprobungen, die vom Projektpartner Umweltbüro Essen, Bolle & Partner GbR durchgeführt wurden. Als Ergebnis wird ein sogenannter „Fisch-Score“ berechnet, der Werte zwischen 0 und 1 annimmt. Ein Wert von 0 steht für einen guten Zustand der Fischpopulation, ein Wert von 1 für einen schlechten Zustand.

5.2.3 Risikoanalyse auf Kühlwasserentnahme

Zur Risikoanalyse im Bereich Kühlwasser wird das Kraftwerk Weisweiler als Beispiel herangezogen. Auf der Rur befindet sich bei 66 km das Pumpwerk Schophoven, welches das Kühlwasser zum Weisweiler Kraftwerk transportiert. Daher werden hier ausschließlich die Zeitreihenwerte der Rur an Fluss-km 66 verwendet. Nach dem Stand von 2010 kann das Kühlwasser mit einem Volumen von 12 Mio. m³ pro Jahr aus der Rur entnommen (Kufeld et al. 2010). Bei einer angenommenen Betriebszeit von 10 Stunden pro Tag entspricht dies 0,913 m³/s. Außerdem wird die jährliche Energieproduktion des Kraftwerks berücksichtigt. Diese betrug 13,4 TWh/a zwischen 2015 und 2020, wobei der Marktpreis für die Energie 37,1 €/MWh erreicht.

Der Ansatz zur Risikoanalyse des Kühlwassers stammt aus dem AMICE-Projekt, welcher auf Förster und Lilliestam (2010) und Vögele und Koch (2009) basiert. Förster und Lilliestam (2010) quantifizieren den Rückgang der Stromerzeugung, indem sie den Energieumsatz und die Wärmestrahlungsbilanz unter veränderten mittleren Jahreswassertemperaturen sowie Flussabflüssen modellieren. Anschließend wird der Rückgang der Stromproduktion mithilfe der Formel von Vögele und Koch (2009) bewertet.

$$Loss = \frac{\text{Rückgang der Stromerzeugung}[\%]}{100} * \text{Marktpreis} \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] * \text{durchschnittliche jährliche Stromerzeugung}[\text{MWh}]$$

1000000

Diese Formel berücksichtigt den Marktpreis sowie die durchschnittliche jährliche Stromerzeugung, um die jährlichen monetären Verluste infolge von Kühlwassereinschränkungen während Niedrigwasserphasen zu berechnen.

5.3 Ergebnisse und Diskussion

5.3.1 Risikoanalyse auf Fischpopulationen

Mit den simulierten Daten wurde das Niedrigwasserrisiko für die Fischpopulation berechnet. Der resultierende Risiko-Index beträgt 0,80 (-)/Jahr im gekoppelten Modell und 0,97 (-)/Jahr im ungekoppelten Modell. Der berechnete Index des gekoppelten Modells ist damit signifikant geringer als jener des ungekoppelten Modells. Ein möglicher Grund ist, dass die simulierten Wasserstände des gekoppelten Modells aufgrund der Berücksichtigung der Grundwassereinspeisung generell höher liegen als jene des ungekoppelten Modells. Dadurch ist die Niedrigwassersituation im gekoppelten Modell weniger ausgeprägt als im ungekoppelten Modell, was zu einem geringeren Risikoindex im gekoppelten Modell führt.

Zusätzlich veranschaulicht Abbildung 31 die zeitliche Entwicklung des Risiko-Scores im Zeitraum 1991–2020 für beide Modelle. Im ungekoppelten Modell bleibt der Score weitgehend stabil und liegt kontinuierlich im Bereich zwischen 0,95 und 1,0. Dies weist auf eine dauerhaft starke Beeinträchtigung der Fischpopulationen hin. Im Gegensatz dazu zeigt das gekoppelte Modell eine stärkere zeitliche Variabilität des Risiko-Scores, mit Werten zwischen 0,6 und 1,0. Der höchste Score tritt im Jahr 2019 auf, während der niedrigste Wert in den Jahren 1998–1999 beobachtet wird. Dies deutet darauf hin, dass die Berücksichtigung des Grundwassers den Einfluss von Niedrigwasserereignissen auf die Fischpopulationen deutlich abmildern kann.

In Bezug auf die Diskussion in Kapitel 4 weisen die simulierten Daten des gekoppelten Modells eine enge Übereinstimmung mit den gemessenen Daten auf. Daher kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Risikoanalyse des gekoppelten Modells den tatsächlichen Zustand adäquat widerspiegeln. Das berechnete Risiko von 0,8 (-)/Jahr liegt nahe an 1,0 und deutet darauf hin, dass der ökologische Zustand hinsichtlich der Fischpopulation im Zielabschnitt der Rur sehr empfindlich gegenüber Niedrigwasserereignissen ist.

Der Einfluss des Grundwassers ist während der Niedrigwasserphase von großer Bedeutung, da der Flusssdurchfluss maßgeblich durch den Grundwasserzufluss bestimmt wird. In diesem Zusammenhang sind die simulierten Durchflüsse des ungekoppelten Modells grundsätzlich niedriger als die des gekoppelten Modells. Es führt zu einer signifikanten Differenz in den Ergebnissen der Risikoanalysen zwischen beiden Modellen, wie das rote Balkendiagramm in Abbildung 31 gezeigt wird. Die durchschnittliche Differenz beträgt 0,2 (-)/Jahr und wird als ein nicht zu vernachlässigender Faktor betrachtet. Dadurch kann die Rolle des Grundwassers in der Niedrigwasserrisikoanalyse für die Fischpopulation hervorgehoben werden.

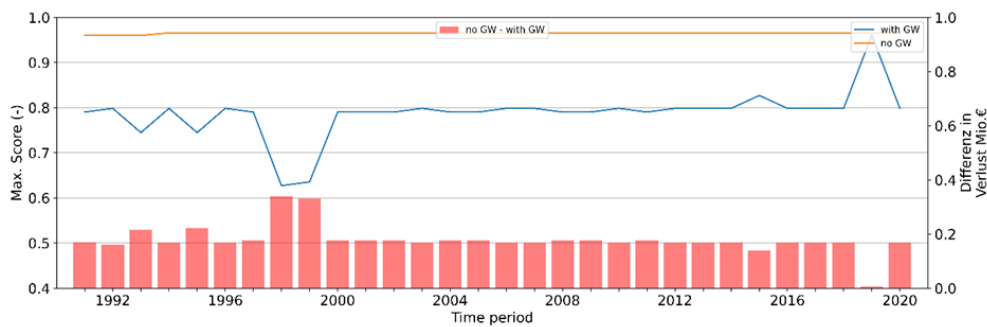


Abbildung 31: Simulierte Niedrigwasserauswirkungen auf die Fischpopulation entlang der unteren Rur (1991-2020) im Vergleich zwischen Modellen mit Grundwasserzufluss (mit GW) und ohne Grundwasserzufluss (ohne GW)

5.3.2 Risikoanalyse auf Kühlwasser

Analog zur Risikoanalyse der Fischpopulation wird die Risikoanalyse für das Kühlwasser im Hinblick auf das Weisweiler Kraftwerk für das gekoppelte und das ungekoppelte Modell durchgeführt. Die Ergebnisse des gekoppelten Modells spiegeln den realen Zustand wider, wobei das Risiko bei 6,87 Mio. €/Jahr liegt. Dies ist deutlich geringer als beim ungekoppelten Modell, dessen Risiko 7,77 Mio. €/Jahr beträgt. Abbildung 32 zeigt die zeitliche Verteilung der Schäden im Zeitraum von 1991 bis 2020 in Bezug auf beide Modelle. Hier weisen beide Modelle eine ähnliche Schadensentwicklung auf. Die höchsten Schäden (über 10 Mio. €) traten in den Jahren 1996, 2003, 2011-2012, 2014 sowie zwischen 2017 und 2020 auf, wobei der höchste Schaden im Jahr 1996 mit einem Wert von 20 Mio. € im gekoppelten Modell verzeichnet wurde. Im Rahmen des AMICE-Projekts wird für das Tihange Kraftwerk ein Verlust von 17,2 Mio. € pro Jahr für den Zeitraum von 2021 bis 2050 und von 66,16 Mio. € für den Zeitraum von 2071 bis 2100 berechnet. Im Vergleich dazu wird der Verlust beim Weisweiler Kraftwerk als gering eingeschätzt.

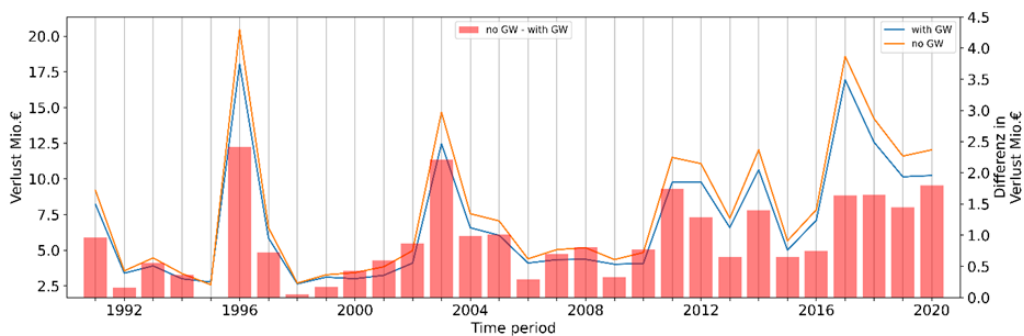


Abbildung 32: Simulierte Niedrigwasserauswirkungen auf die Kühlwasserentnahme bei der Weisweiler Kraftwerk (1991-2020) im Vergleich zwischen Modellen mit Grundwasserzufluss (mit GW) und ohne Grundwasserzufluss (ohne GW)

Das rote Balkendiagramm in der Abbildung zeigt die zeitliche Entwicklung der Risikodifferenz zwischen dem gekoppelten und dem ungekoppelten Modell. Die durchschnittliche Differenz beträgt 0,9 Mio. €/Jahr. Diese Differenz wird sich insbesondere in den Jahren 1996, 2003 sowie zwischen 2017 und 2020 vergrößern und kann in 1996 sogar bis zu 2,5 Mio. € erreichen. Daher spielt das Grundwasser in der Niedrigwasserrisikoanalyse für die Kühlwasserentnahme zur Energieerzeugung eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

5.4 Fazit

Im Rahmen des Arbeitspakets wird das Niedrigwasserrisiko im Rur-Einzugsgebiet für den Zeitraum 1991–2020 auf Grundlage der hydrodynamischen Simulationen aus AP 4.1 und AP 4.2 berechnet. Für die Fischpopulation ergibt sich ein Risiko von 0,8 (–)/Jahr, was auf eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Niedrigwasserereignissen im betrachteten Abschnitt der Rur hinweist. Darüber hinaus wurde für die Kühlwasserentnahme des Kraftwerks Weisweiler ein wirtschaftliches Risiko von 6,87 Mio. €/Jahr ermittelt, was als ein nicht zu vernachlässigender Faktor einzustufen ist. Da es sich bei der unteren Rur um einen nicht schiffbaren Abschnitt handelt, wurde das Risiko für die Binnenschifffahrt nicht berücksichtigt.

Zudem ist bei beiden Sektoren (Fischpopulation und Kühlwasserentnahme) zu beobachten, dass sich die Risikowerte des gekoppelten Modells (mit Grundwassereinfluss) deutlich von denen des ungekoppelten Modells (ohne Grundwassereinfluss) unterscheiden. Es hebt die zentrale Bedeutung des Grundwassereintrags für die Niedrigwasserrisikoanalyse hervor.

6 AP 4.4 Niedrigwasserrisikomanagement

6.1 Literaturrecherche zur Risikomanagement & -kommunikation

Seit Einführung der WRRL werden wasserwirtschaftliche Fragestellungen zunehmend holistisch unter Einbeziehung der Öffentlichkeit und Stakeholdern bearbeitet. Es erscheint sinnvoll, diesen Ansatz auch beim Niedrigwasser-/Dürremanagement zu verfolgen. Dürremanagement sollte wie auch Hochwassermanagement auf Ebene von Einzugsgebieten erfolgen, da Maßnahmen im Dürremanagement, wie z. B. zusätzliche Wasserspeicherung in Staubecken zwangsläufig Auswirkungen auf verschiedene Teile des Einzugsgebietes haben. Ebenso müssen andere Bewirtschaftungsziele, z.B. Hochwasserschutz, insbesondere bei der Niedrigwasser-Bewirtschaftung von Talsperren berücksichtigt werden. Es erscheint daher sinnvoll, der Empfehlung der Europäischen Kommission folgend (European Commission 2007), Dürremanagementpläne in bestehende Bewirtschaftungspläne für Fließgewässer einzubinden.

Weltweit wird Dürremanagement auf internationaler, nationaler, regionaler und Einzugsgebietsebene betrieben. Im Arbeitspaket 4.4 wird zuerst die vorhandene Dürremanagementplan recherchiert und ausgewertet, nachfolgend wird die relevanten Elemente für die Entwicklung eines sinnvollen Dürremanagementplans diskutiert und aufgelistet.

6.1.1 Europäischer Niedrigwasserrisikomanagementplan

Die europäische Kommission (European Commission 2007) liefert ein Schema, wie Dürremanagement ablaufen könnte. Dieses Schema wurde in Spanien bereits konkret umgesetzt (Estrela und Vargas 2012; Garrote et al. 2007; Hervás-Gámez und Delgado-Ramos 2019). Spanien besitzt bereits langjährige Erfahrung im Umgang mit Dürren, sodass DMPs (Drought Management Plans) fester Bestandteil des Wassermanagements sind.

Die spanischen DMPs bestehen aus der Dürrediagnose, einem Maßnahmenprogramm und einem Nachverfolgungssystem. Die Dürrediagnose untersucht historische Dürren, wobei lokales und regionales Wissen sowie technische Erfahrungen berücksichtigt werden. Hierzu wird die Dürresituation mittels Indikatoren in unterschiedliche Phase unterteilt. Nachfolgend werden die Maßnahmen je nach Phase aktiviert. (1)

- In der normalen Situation (kein Wassermangel) erfolgt strategische Planung und Überwachung.
- In der Vorwarnstufe werden Wassersparmaßnahmen, Überwachung und Öffentlichkeitsarbeit umgesetzt.
- Im Alarmzustand wird das Management von Angebot und Nachfrage sowie Kontrolle und Monitoring durchgeführt.
- Im Notfall kommt es zu einer Intensivierung der Maßnahmen und möglichen außergewöhnlichen Aktionen.

Das Maßnahmenprogramm umfasst eine Liste von Aktionen, die von der Reduzierung des Wasserbedarfs bis hin zur Priorisierung und Notfallmaßnahmen von Wassernutzungen bei knappen Wasserressourcen reichen. Die wichtigsten Minderungsmaßnahmen in den DMPs lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: strukturelle Maßnahmen (wie neue Pumpbrunnen, neue Rohrleitungen, verstärkter Einsatz von Entsalzungsanlagen für die öffentliche Wasserversorgung und Wiederverwendung von Wasser in der Landwirtschaft) und nicht-strukturelle Maßnahmen (wie Änderung der Nutzerprioritäten, Wassersparmaßnahmen und Reduzierung des Bedarfs). Schließlich kommt ein Management- und Nachverfolgungssystem, das es ermöglicht, die Umsetzung der Maßnahmen zu analysieren und ggf. korrigierende Maßnahmen zu ergreifen, falls die festgelegten Ziele nicht erreicht werden (Estrela und Sancho 2016).

Seit den 1940er Jahren gibt es eine gesetzliche Regelung für Dürremaßnahmen im Vereinigten Königreich, die sich an Dürreindikatoren orientiert. Diese Indikatoren werden unabhängig von Jahreszeit und Wetter fortlaufend gemessen. Zur Vorhersage einer Dürre werden Flusswasserstände und Grundwasserspiegel genutzt, während kumulierte Niederschläge mit früheren Dürreperioden verglichen werden, um die Schwere der Dürre einzuschätzen. In England und Wales werden hydrologische und ökologische Bedingungen unter Normalbedingungen überwacht. Bei ersten Anzeichen von Dürre wird das Bewässern von Gärten und das Waschen von Autos verboten, ohne dass eine Genehmigung erforderlich ist. Bei Niedrigwasser kann die Umweltagentur (EA) die landwirtschaftliche Bewässerung einschränken oder verbieten. Weitere Maßnahmen benötigen eine gesetzliche Genehmigung durch die EA oder Ministerien und werden nur bei nachweislichem Niederschlagsmangel erteilt, wenn dies die Umwelt oder Wasserversorgung gefährdet. Dazu gehören Einschränkungen bei der Wasserentnahme sowie das Streichen nicht lebensnotwendiger Wasserverwendungen. Bei schwerem Wassermangel kann die Wassernachfrage durch Zapfstellen oder turnusmäßige Lieferkürzungen eingeschränkt werden (Environment Agency 2017; European Commission 2007).

Die Niederlande beobachten nur im Zeitraum von April bis Ende September das Dürregeschehen. Zur Einschätzung wird in diesem Zeitraum hauptsächlich mit den Messdaten zum Abfluss von Rhein und Maas gearbeitet. Der Abfluss der beiden Flüsse wird als Hauptindikator genommen. Bei dem Niedrigwasserfall koordiniert die Landelijke Coördinatiecommissie Waterverdeling (LCW) die Wasserversorgung für Flüsse, Seen und Kanäle in den Niederlanden. Bei Flusseinzugsgebiet der Maas wird die LCW aktiv, wenn:

- der Abfluss am Pegel Maastricht-St. Pieter unter $25 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt,
- die Wassertemperatur über $23 \text{ }^\circ\text{C}$ steigt oder
- eine supra-regionale Wasserknappheit auftritt.

Die Handlungsempfehlungen basieren auf dem nationalen Verteilungsgesetz, („Verdringingsreeds“). Mit dem Gesetz werden die verschiedenen Wasserverbraucher in vier Kategorien von hoher bis zu niedriger Priorisierung eingeteilt:

- Sicherheit und Möglichkeit irreversibler Schäden
- Öffentliche Dienstleistungen
- kleinskalige Nutzung für höherwertige Güter
- Sonstiger

Kategorie eins umfasst Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit gegen Überschwemmungen und irreversible Schäden an Deichen und Natur. Kategorie zwei betrifft die öffentliche Wasserversorgung (z.B. Trinkwasser). Kategorie drei umfasst die temporäre Bewässerung wertvoller Pflanzen und industrielle Prozesswasserversorgung. Kategorie vier beinhaltet Ansprüche aus Navigation, Landwirtschaft, Natur (ohne irreversible Schäden), Industrie, Freizeit und Binnenfischerei. Die ersten beiden Kategorien haben Priorität; innerhalb der Kategorien drei und vier kann regional differenziert werden, um öffentliche und wirtschaftliche Schäden zu minimieren (Rijkswaterstaat 2024).

6.1.2 Kritische Fragen zum Niedrigwasserrisikokommunikationsplan

Niedrigwasser (engl. ‚low flow‘) ist kein außergewöhnliches Ereignis, sondern ein saisonales, natürliches Phänomen, das häufig in Verbindung mit Dürren auftritt. Je nach der Entwicklung der Dürre kann die Schwere des Niedrigwassers zunehmen. Daher sollte das Niedrigwasserrisikomanagement beziehungsweise das Dürremanagement nicht als Bewältigung einer vorübergehenden Krise, wie etwa bei dem Hochwasser, betrachtet werden, sondern vielmehr als ein fortlaufender Risikomanagementprozess. (European Commission 2007)

Ein Niedrigwasserrisikomanagementplan bzw. ein Dürremanagementplan besteht aus drei Grundelementen: 1) einem Dürre-Frühwarnsystem, 2) Dürre-Indikatoren in Verbindung mit Schwellenwerten für die verschiedenen Schweregrade der Dürre und 3) Maßnahmen zur Erreichung spezifischer Ziele in jeder Dürrephase. (European Commission 2007) Das Frühwarnsystem bildet die wichtige Grundlage des Niedrigwassermanagementplans. Es ermöglicht die frühzeitige Erkennung von Dürre und informiert über ein Kommunikationssystem die Öffentlichkeit und Behörden über die zu erwartende Entwicklung. Die Dürreindikatoren dienen als Mechanismen zur Einschätzung der Intensität von Niedrigwasserereignissen. Jeder Schwellenwert entspricht einem bestimmten Schweregrad der Dürre. Bei Erreichen eines Schwellenwerts werden die betroffenen Stakeholder informiert, und die von ihnen verantwortlichen Maßnahmen werden umgesetzt. Die Maßnahmen sollten sich an rechtlichen Grundlagen orientieren, wie beispielsweise der Wasserrahmenrichtlinie. Neben den gesetzlichen Vorgaben müssen auch wirtschaftliche Aspekte, das Wohl der Bevölkerung und der Naturschutz berücksichtigt werden.

Aufgrund steigender (Klima-)Datenverfügbarkeiten und klimawandelbedingt dynamischer Dürrefrequenzen, -verläufe und -intensitäten, ist es entscheidend, dass Dürremanagementpläne (DMPs) regelmäßig überprüft und aktualisiert werden. Eine Neubewertung alle 5 bis 10 Jahre wird empfohlen, um sicherzustellen, dass die Pläne den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und den sich verändernden klimatischen Bedingungen Rechnung tragen. (Riedel et al. 2021: 21) Die regelmäßige Überprüfung der DMPs fördert somit nicht nur die Resilienz gegenüber zukünftigen Dürren, sondern trägt auch zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Wasserressourcen bei.

Für den Niedrigwasserrisikomanagementplan ist es entscheidend, die Schwachstellen der Bewirtschaftungssysteme im Hinblick auf Dürre und Niedrigwasser zu identifizieren. Dazu gehört eine umfassende Charakterisierung des Einzugsgebiets, die eine detaillierte Analyse der hydrologischen Bedingungen sowie der landnutzungs- und klimatischen Faktoren umfasst. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Dokumentation historischer Dürre- und Niedrigwasserereignisse. Diese historischen Daten bieten wertvolle Einblicke in vergangene Muster und Trends, die für das Verständnis zukünftiger Risiken von großer Bedeutung sind. Durch die Analyse dieser Ereignisse können spezifische Vulnerabilitäten erkannt werden, die bei der Entwicklung von Strategien zur Risikominderung berücksichtigt werden sollten. Zusätzlich spielt die Niedrigwasserrisikoanalyse (AP 4.3) eine zentrale Rolle im Einzugsgebiet. Sie ermöglicht es, potenzielle Risiken systematisch zu bewerten und deren Auswirkungen auf verschiedene Sektoren wie Landwirtschaft, Trinkwasserversorgung und Ökosysteme zu quantifizieren. Eine fundierte Risikoanalyse hilft dabei, geeignete Maßnahmen zur Anpassung und Resilienzsteigerung zu entwickeln. Insgesamt tragen diese Elemente dazu bei, ein effektives Niedrigwasserrisikomanagement zu gewährleisten, dass sowohl präventive als auch reaktive Ansätze integriert und somit besser auf zukünftige Herausforderungen vorbereitet ist.

Die Anforderungen an eine nachhaltige NWRM-Risikokommunikation unterscheiden sich z.T. eklatant von denen der HWRM-Risikokommunikation. Unterschiede sind dabei auf die Natur der Ereignisse zurückzuführen, weshalb eine ereignisadäquate Risikokommunikation naheliegend ist.

Hochwasserereignisse sind oft besonders schadensintensive, plötzlich auftretende Ereignisse⁶⁰, weshalb hier kurzfristige, katastropheninduzierte Risikokommunikationsmaßnahmen⁶¹ entscheidend sind. Zentral ist hier zunächst ein unsicherheits-reduzierendes, „technisches“ Verständnis der Gefahrenlage und die Initiierung kurzfristiger Handlungsmaßnahmen (Renn 2010: 83). Hier bieten sich möglichst frühzeitige, eindeutige, standardisierte, digitale, konsistente und transparente sog. „multi-channel“-Warnsysteme (z.B. NINA/KATWARN, aber auch Sirenen) mit großen Reichweiten an, die instruktive Informationen zum Umgang mit der Notfallsituation zur Verfügung stellen (Reuter 2017). Zeitkritische Koordinationsfunktionen innerhalb der Risikokommunikation richten sich an verschiedene Anspruchsgruppen: neben professionellen Akteuren und Einsatzkräften, wie Feuerwehr, THW und Polizei gilt es auch die Zivilbevölkerung schnell und effektiv zu erreichen. Aufgrund schadensintensiver, z.T. katastrophaler Folgen von Hochwasserereignissen wie bspw. im Ahrtal 2021, ist davon auszugehen, dass diese eher im kollektiven Gedächtnis verankert sind als langfristige Folgen hydrologischer Dürren, und sich Gefahren unmittelbar ersichtlich sind. Entsprechende Kommunikationsinfrastrukturen, die hohe Ausfallsicherheiten aufweisen müssen, idealerweise flächendeckend und dauerhaft einsatzfähig sind, sind technisch und ökonomisch aufwendig und pflegeintensiv.

Die Niedrigwasserrisikokommunikation ist an langfristigeren Trockenperioden ausgerichtet (s. Kap. 1.2.1.). Statt instruktiver Informationen in Notfallsituationen lägen Schwerpunkte der Risikokommunikation daher in Phasen der „Prävention“ (s. Kap. 5.3.2.). Zunächst kündigen sich hydrologische Dürren durch vorhergehende, meteorologische und landwirtschaftliche Dürren an – von hydrologischen Dürren wird laut DWD erst ab viermonatigen Trockenphasen gesprochen. Renn (2010: 83) folgend betreffen

⁶⁰ Auch Hochwasser können längerfristige Ereignisse sein, wie das Weihnachtshochwasser 2023/2024 zeigte.

⁶¹ Es ist eher den Risikomanagementphasen „Voralarm“, „Alarm“ und „Notfall“ zugeordnet (s. Kap. 5.2.3.).

sie ein anders ‚level of concern‘, da institutionelle und individuelle Akteure in Zeiten knapper Wasserressourcen ihre mittel- bis langfristigen Wassernutzungs- und Entnahmepraktiken anpassen müssen. Risikokommunikationsstrategien sollten daher langfristig und präventiv angelegt sein, um ein Bewusstsein im Umgang mit der Ressource zu schaffen und Akzeptanz gegenüber Notfallmaßnahmen, die etwa die Einschränkung von Entnahmen bedeuten, vorbereiten. Risikokommunikationsstrategien sollten dahingehend einzugsgebietsspezifisch ausgerichtet sein, dass einige Gebiete stärker und häufiger von Dürren betroffen sein können, als andere. Darüber hinaus sind die Anforderungen an die Kommunikationskanäle aber geringer; die Informationsvermittlung ist zwar flächendeckend notwendig (etwa, wenn Entnahmeverbote ausgesprochen werden), allerdings oft weniger zeitkritisch. Es bestehen eher Möglichkeiten, in nachhaltigeren Informationsvermittlungsformaten (etwa in Form von Experimenten oder Reallaboren) Expertise und Erfahrungen im Umgang mit Wasserknappheiten aufzubauen. Wichtig ist es jedoch, die meteorologischen und hydrologischen Kontexte zu berücksichtigen: Zwar blieben Deutschland länger anhaltende Dürreperioden bisher erspart, dennoch zeigen die Trockenjahre 2017-2022 dass es sich bei Dürren um sich über die Zeit verstärkende Phänomene handelt, in denen wiederholte Dürrephasen zu spontaneren und extremeren Folgen führen (z.B. bei wiederholter Belastung der Grundwasserspiegel, die zu Wasserstress führen, welcher durch Niederschläge etc. kurzfristig nicht auszugleichen ist).

6.2 Grobe Strategie zur Niedrigwasserrisikomanagement & -kommunikation

In diesem Kapitel wird eine grundlegende Strategie für das NRW und die NRW-Kommunikation im Rur-Einzugsgebiet vorgestellt. Dazu zählen die Kategorisierung der Nutzungsgruppen, die vorläufige Bewertung des Niedrigwasserrisikos, die Einführung potenzieller Frühwarnsysteme sowie die Entwicklung des Niedrigwasserrisikomanagementplans.

6.2.1 Niedrigwasser und Dürre

Niedrigwasser wird durch jährlich auftretende minimale Abflusswerte charakterisiert (Van Loon 2015). Es tritt typischerweise in den Trockenperioden des Jahres wiederkehrend auf (Cenobio-Cruz et al. 2023) und kann über mehrere Monate anhalten (Laaha et al. 2013). Auffallend ist, dass der Begriff „Niedrigwasser“ in wissenschaftlichen wie in praktischen Kontexten häufig mit „Dürre“ gleichgesetzt wird. Dürre wird üblicherweise als ein länger andauernder Zeitraum unterdurchschnittlicher Wasserverfügbarkeit definiert, der durch seine Schwere, räumliche Ausdehnung und Dauer gekennzeichnet ist (van Loon und van Lanen 2012). Im Gegensatz dazu bezeichnet Niedrigwasser die saisonal wiederkehrenden Phasen reduzierten Abflusses im Rahmen des natürlichen Abflussregimes eines Fließgewässers. Während Dürren oftmals mit Niedrigwasserbedingungen einhergehen, qualifizieren sich nicht alle Niedrigwasserereignisse als Dürren.

6.2.2 Niedrigwasserrisiko definieren

Die Niedrigwasser-Risikoanalyse dient als die Grundlage für die Risikokommunikation und das Risikomanagements. Eine zentrale Frage des Projektes war, wie man Niedrigwasserrisiko definieren kann. Die im Hochwasserbereich gängige Definition als Eintrittswahrscheinlichkeit multipliziert mit dem Schaden kann nicht ohne weiteres auf Niedrigwasser übertragen werden. Bei Hochwasser kann durch einen festgelegten Abfluss mit den zugehörigen Wassertiefen und zu erwartenden Schäden ausreichend beschrieben werden. Dahingegen sind bei einem Niedrigwasser weitere Faktoren zu berücksichtigen. Die Länge des Ereignisses hat dabei maßgeblichen Einfluss auf den verursachten Schaden. Außerdem

können mehrere rasch aufeinanderfolgende kurze Niedrigwasserperioden bedeutend mehr Schaden verursachen als ein einzelnes langes Ereignis.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Problematik wurde im Rahmen des Projekts eine neue Methode zur Berechnung des Niedrigwasserrisikos entwickelt. Wie in Kapitel 5 beschrieben, werden Abflüssen Schadensfunktionen ähnlich wie im Hochwasserrisikomanagement zugeordnet. Jedoch wird hier das einzelne Ereignisse nicht explizit berücksichtigt. Stattdessen erfolgt die Risikoberechnung auf Grundlage langfristiger, vorläufiger hydrologischer und hydrodynamischer Simulationen, indem die über aufsummierten Schäden über den Simulationszeitraum hinweg aufsummiert werden. Auf diese Weise bleibt die übliche Einheit des Risikos [€] erhalten, gleichzeitig wird jedoch das Problem der Ereignisdefinition in Bezug auf die rasch aufeinanderfolgende kurze Niedrigwasserperioden umgangen. Die Ergebnisse der Niedrigwasserrisiko auf das Rur-Einzugsgebiet befindet sich im Kapitel 5.

6.2.3 Frühwarnsystem und Indikator

Bei dem Frühwarnsystem vom Niedrigwasser kann das Frühwarnsystem der Dürre vergleichbar umgesetzt werden. Das Frühwarnsystem der Dürre nutzt die Klimamodelle bzw. langfristige Daten mit Methoden der Statistik, um die zukünftige Entwicklung zu prognostizieren. Dazu ist die Berechnung der Standardized Precipitation Index SPI die an der häufigsten verwendeten Methode zur Erkennung und Charakterisierung unterschiedlicher Dürren.

Der SPI misst Abweichungen des kumulierten Niederschlags über einen bestimmten Zeitraum. Wenn der SPI für Akkumulationszeiträume von 3 bis 12 Monaten berechnet wird, kann er als Indikator für einen verringerten Durchfluss in Bächen und Stauseen dienen. Bei Berechnungen des SPI für Zeiträume von 12 bis 48 Monaten kann er als Indikator für eine reduzierte Speicher- und Grundwasserneubildung verwendet werden (European Drought Observatory 2020, S. 2–5). Ein negativer Wert weist auf ein Niederschlagsdefizit hin, dessen Schweregrad nach bestimmten Bereichen definiert wird (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Einteilung der Dürrekategorien anhand des SPI-Werts. (McKee et al. 1993)

SPI	(0,-1)	(-1,-1.5)	(-1.5,-2)	(-2,-..)
Dürre Kategorie	leichte Dürre	Mäßige Dürre	Schwere Dürre	Extreme Dürre

Zur Berechnung der SPI wird die Methode von McKee et al. 1993 angewendet. Als Eingabedaten werden die Zeitreihen der monatlichen Niederschlagsraster vom DWD-Portal verwendet. Zunächst werden die Zeitreihendaten schrittweise über den gewünschten Zeitraum (z.B. 24 Monate) akkumuliert. Anschließend werden die Parameter der Gamma-Funktion anhand der akkumulierten Daten bestimmt. Daraufhin wird die entsprechende kumulative Verteilungsfunktion genutzt, um die kumulative Wahrscheinlichkeit eines beobachteten Wertes der Variablen zu berechnen. Schließlich wird die inverse normale kumulative Verteilungsfunktion mit einem Mittelwert von null und einer Varianz von eins angewendet, um die kumulative Wahrscheinlichkeit des beobachteten Wertes in den SPI umzuwandeln.

Die Abbildung zeigt die berechnete SPI auf 6 Monate und 12 Monate in Rur-Einzugsgebiet basiert auf die Niederschlagsdaten 1991.1.1-2020.12.31. Es ist erkennbar, dass mit zunehmender Akkumulationsdauer die SPI-Trends geglättet und kurzfristige Schwankungen reduziert werden. In SPI-6 sind extreme Dürreperioden (SPI < -2) in den Jahren 1996, 2014, 2017 und 2019 zu erkennen, während im SPI-12 extreme Dürreereignisse vor allem in den Jahren 1996 und 2017 beobachtet wurden.

Mithilfe der Indikatoren können verschiedene Dürrestufen anhand definierter Schwellenwerte bestimmt werden. Diese Dürrestufen dienen als Grundlage für die Umsetzung von Maßnahmen im Rahmen des Niedrigwassermanagements.

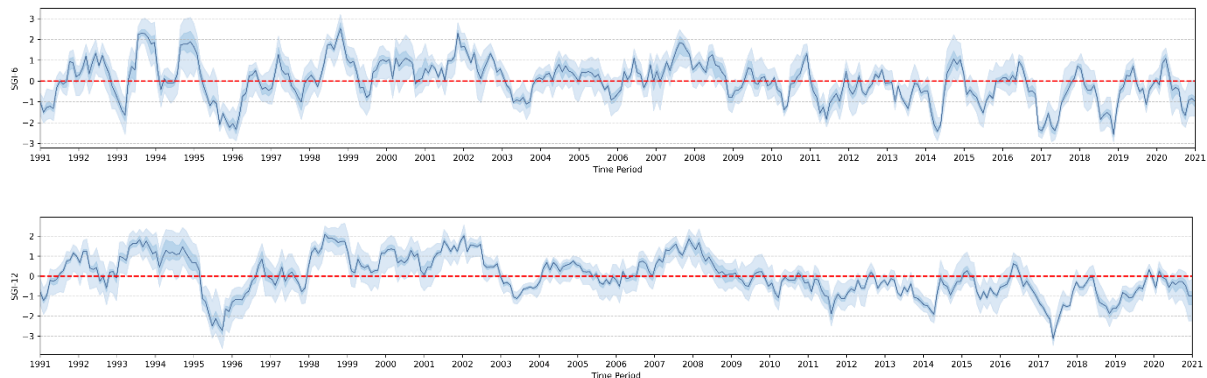


Abbildung 33: Die Zeitreihe von SPI 6 und SPI 12 für den Rur-Einzugsgebiet zwischen 1991-2021 (von oben nach unten)

6.2.4 Risikomanagementplan

Zur Verminderung der Auswirkung von Niedrigwasser wurde ein zyklisches und ereignisorientiertes Dürrestufen-Konzept für ein holistisches, hydrologisches Risikomanagement erstellt. Hoch- und Niedrigwasserereignisse werden nicht als separate Extremereignisse betrachtet, sondern als sich abwechselnde Phasen hydrologischer Zyklen. Dieser Perspektive folgend können Maßnahmen (exemplarisch) betrachtet werden, die ein synergetisches Risikomanagement von Hoch- und Niedrigwasser anstreben.

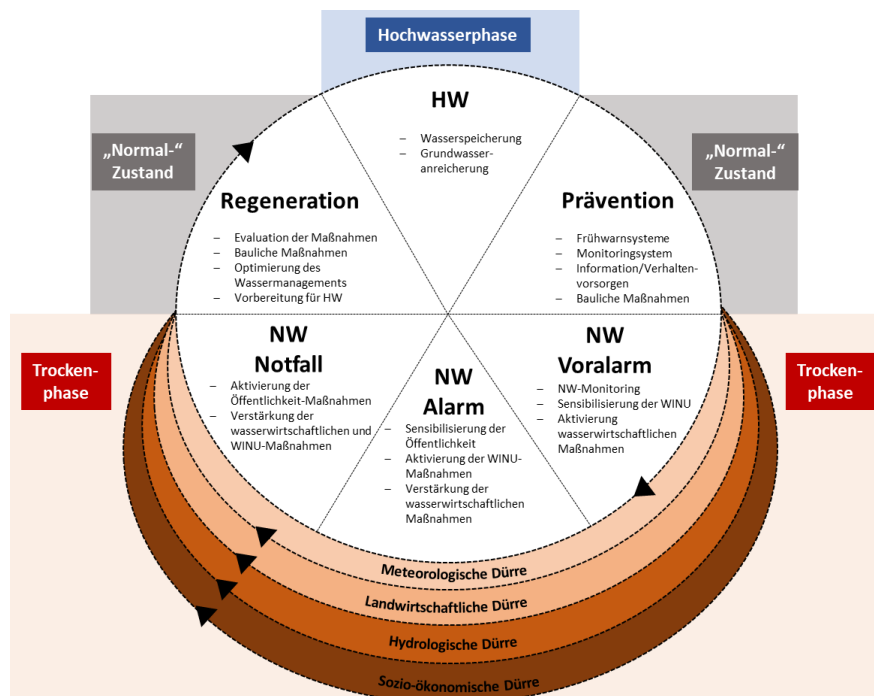


Abbildung 34: Schematische Darstellung des Niedrigwasserrisikomanagements in DRYRIVERS.

Es berücksichtigt hauptsächlich 6 Stufen: die Hochwasser-Stufe bei dem Hochwasserfall, die Prävention bzw. Regeneration-Stufen in „normalen“ Phasen sowie Voralarm, Alarm und Notfall-Stufe bei Niedrigwasser. Der Dürreindikator (s. Kap 5.2.2.) bildet die numerisch-messbare Grundlage der jeweiligen

Dürrestufen. Wichtig ist, dass sich das Risikomanagement nicht ausschließlich auf Phasen des Voralarms, Alarms und des Notfalls beschränkt, sondern als kontinuierlicher Prozess betrachtet und betrieben wird. Je nach Art und Intensität der Dürre (meteorologisch, landwirtschaftlich, hydrologisch, oder sozio-ökonomisch) können unterschiedliche Maßnahmen des Risikomanagements sinnvoll und notwendig sein. Das Modell ist angelehnt an das „adaptive and integrated risk governance model“ (Renn 2020; Klinke/Renn 2012; IRGC 2017).

Phase 0: Prävention

Die Präventionsphase entspricht dem „Normalzustand“, in dem keine Dürre vorliegt. Dennoch spielt sie eine zentrale Rolle im Niedrigwasserrisikomanagement. Sie dient der wissenschaftlichen und sozialpolitischen Identifikation von Risiken, dem Monitoring und der Risikoprävention. In dieser Phase stehen folgende Aufgaben im Vordergrund: 1) Aufbau eines Informationsportals zur effizienten Überwachung und frühzeitigen Erkennung von Niedrigwasserphasen. 2) Planung wirksamer Maßnahmen sowie Klärung potenzieller Nutzungskonflikte, um eine effektive Koordination, Kommunikation und Reaktion während zukünftiger Niedrigwasserphasen zu gewährleisten. 3) Entwicklung und Umsetzung langfristiger Strategien und Vorsorgemaßnahmen, um die Auswirkungen zukünftiger Niedrigwasserereignisse bereits im Vorfeld zu minimieren.

Öffentlich zugängliche und nachvollziehbare Monitoring-Infrastrukturen und Routinen, Frühwarnsystem und Informationsportale sind ein zentraler Baustein der Risikokommunikation. Der Standardized Precipitation Index (SPI) auf Basis von Niederschlagsdaten kann als Frühwarnindikator dienen (s. Kap. 6.2.3). Das Monitoringsystem ist für die Überwachung sowohl quantitativer als auch qualitativer Wasserparameter notwendig, wobei sich als relevant erachtete Indikatoren in den europäischen Mitgliedstaaten unterscheiden (s. Kap. 5.1.1.). Hierzu zählen die Wassertemperatur, der Abfluss und der Wasserstand der Fließgewässer, die dauerhaft erfasst und anhand von Schwellenwerten, die aus historischen Zeitreihen abgeleitet werden, überwacht werden sollten. Die Überwachung der Wasserqualität kann, wie es beispielsweise in den Niederlanden praktiziert wird, aus wirtschaftlichen Gründen auf die dürreanfälligen Sommermonate von April bis Ende September beschränkt werden. Die Sauerstoff- und Schadstoffkonzentrationen liefern zentrale Hinweise auf die Wasserqualität, die auch für nicht-menschliche Lebewesen entscheidend sind.

Informations- und Verhaltensvorsorge nehmen eine zentrale Rolle in der Präventionsphase ein. Um Akzeptanz und Verständnis für Niedrigwassermanagementmaßnahmen in der Bevölkerung zu fördern, sollte eine frühzeitige und kontinuierliche Kommunikation erfolgen – noch bevor ein tatsächliches Niedrigwasserereignis eintritt. Zunächst müsste das Risiko-*Framing* zielgruppenspezifisch orientiert sein: Wer wird wie erreicht und wie (z.B. drastisch) werden die Informationen kommuniziert (Renn 2020: 98). Es folgen Maßnahmen zur Sensibilisierung verschiedener Zielgruppen, etwa der Öffentlichkeit und wirtschaftlicher Akteure. Dies kann beispielsweise über Warntage zur Niedrigwasserproblematik, Informationsbroschüren oder Rundfunkdurchsagen erfolgen. Dabei ist zu vermitteln: 1) was Niedrigwasser bedeutet, 2) welche Auswirkungen es haben kann und 3) wie in den verschiedenen Phasen eines Niedrigwassers angemessen gehandelt werden sollte. Applikationsbasierte Risikokommunikation bietet zusätzliche Möglichkeiten und Informationsangebote, die Reuter et al. (2017: 11) zwar für Katastrophenslagen entwickeln, die aber auch für Dürren relevant sein können: Etwa Notfallkontakte, „All-Clear“-Meldungen, Chatfunktionen und Checklisten.

Die Planung langfristiger Strategien basiert auf den Ergebnissen der Risikoanalyse unter Berücksichtigung sowohl historischer Entwicklungen als auch von Klimawandelprojektionen. Zentrale Fragestellungen sind, ob und wenn welche Sektoren (Trinkwasserversorgung, Energieversorgung oder andere kritische Infrastrukturen) im Einzugsgebiet besonders vulnerabel gegenüber Dürreereignissen und ob entsprechende Maßnahmen der Dürreprävention erforderlich sind. In Regionen mit langfristigem Grundwasserdefizit, etwa in urbanen Räumen, können bauliche Maßnahmen wie die dezentrale Versickerung oder Entsiegelung von Flächen dazu beitragen, die natürliche Grundwasserneubildung zu fördern. In Gewässern, deren ökologischer Zustand besonders sensibel auf Niedrigwasser und erhöhte Wassertemperaturen reagiert, sollten Maßnahmen zur Gewässerbeschattung, wie etwa Baumpflanzungen im Uferbereich, in Betracht gezogen werden. Für schiffbare Gewässer mit hoher Bedeutung für die Binnenschifffahrt kann eine Anhebung definierter Zielabschnitte helfen, die Mindestwassertiefe während Niedrigwasserperioden aufrechtzuerhalten und die Nutzbarkeit für den Schiffsverkehr sicherzustellen. Um grundsätzlich Wasserdefiziten vorzuzugreifen, können vulnerable Kommunen und Städte auch Wasserkooperationen initiieren, die in Trockenphasen die Wasserversorgung aus wasserreicheren Regionen gewährleisten.

Phase 1: Niedrigwasser Voralarm

Im Status des „Voralarms“ zeigen sich bereits erste Anzeichen einer Dürre, beispielsweise durch das Unterschreiten definierter Schwellenwerte beim Abfluss. Konkrete Auswirkungen auf die Wasserversorgung oder Umwelt treten noch nicht auf. In dieser Phase steht die Intensivierung des Monitorings im Vordergrund. Sowohl wasserquantitative (z. B. Abfluss, Wasserstand) als auch wasserqualitative Parameter (z. B. Sauerstoff- oder Schadstoffkonzentrationen) sollten nun kontinuierlich und in erhöhter Frequenz überwacht werden. Zur Quantifizierung eines Niedrigwasserereignisses sind dabei nicht nur niedrige Abflüsse, sondern auch die Dauer der Unterschreitung relevanter Grenzwerte zu berücksichtigen.

Darüber hinaus werden in dieser Phase erste wasserwirtschaftliche Maßnahmen akut, die die zuständigen Wasserbehörden veranlassen. In talsperrengeregelten Gewässerabschnitten sollte die Talsperrenbewirtschaftung effizient angepasst werden. Dabei ist eine flexible Steuerung anzustreben, die sich an aktuellen Pegelständen orientiert. Wenn möglich, sollte durch gezielte Abgaben aus dem Speicherraum ein Mindestabfluss im Unterlauf sichergestellt werden. Weitere Maßnahmen beinhalten: 1) Temporäre Schließung von Fischaufstiegsanlagen, um die Fischfauna während extremer Niedrigwasserbedingungen zu schützen. 2) Gewässerbelüftung in dürregefährdeten Abschnitten, um einer Verschlechterung des ökologischen Zustands entgegenzuwirken.

In Bezug auf die Risikokommunikation konzentriert sich die Sensibilisierung in dieser Phase vor allem auf wasserintensive Nutzungssektoren wie Industrie, Landwirtschaft und Energieversorgung. Mit dem Informationsportal werden die aktuellen Entwicklungen transparent kommuniziert, und auf potenzielle Risiken wird frühzeitig hingewiesen.

Phase 2: Niedrigwasser Alarm

Im „Alarm“-Status ist die Dürre bereits eingetreten, und konkrete Auswirkungen auf Wassernutzende sowie auf die Umwelt sind in absehbarer Zeit zu erwarten. Die Bevölkerung wird über die aktuelle Niedrigwassersituation sowie das damit verbundene Risikopotenzial informiert. Ziel ist es, zum verantwortungsvollen Umgang mit Wasser aufzurufen, insbesondere durch Wassersparmaßnahmen im Alltag oder die Akzeptanz gegenüber einschränkenden Maßnahmen zu stärken.

Gleichzeitig treten spezifische Maßnahmen für wasserintensive Nutzergruppen wie Industrie, Landwirtschaft und Energiewirtschaft in Kraft. Diese beinhalten beispielsweise: 1) Wassereinsparung sowie gegebenenfalls die Einschränkung der Wasserentnahme, unter Berücksichtigung sozioökonomischer Auswirkungen, 2) den Einsatz von Tröpfchenbewässerung anstelle konventioneller Beregnungssysteme in der Landwirtschaft, 3) die verstärkte Nutzung von Wind- und Solaranlagen als Alternative zur Wasserkraft, um eine kontinuierliche Energieversorgung sicherzustellen, sowie 4) die Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser in der Industrie, sofern dies mit geltenden rechtlichen Vorgaben vereinbar ist. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Vermeidung einer Verschlechterung des ökologischen Zustands der Gewässer. Entsprechend werden wasserwirtschaftliche Maßnahmen flächendeckend intensiviert und angepasst.

Phase 3: Niedrigwasser Notfall

Im „Notfall“-Status sind die negativen Auswirkungen der Dürre bereits eingetreten. In dieser Phase reicht die Wasserverfügbarkeit, selbst unter Aufrechterhaltung aller bisherigen Maßnahmen, nicht mehr aus, um den Bedarf zu decken, insbesondere im Bereich der öffentlichen Wasserversorgung. Dementsprechend werden Notfallmaßnahmen für die Bevölkerung aktiviert, darunter: 1) die Umsetzung der bundesweiten Trinkwassernotversorgung, 2) die aktivierte Nutzung von Grundwasserreserven anstelle der Entnahme aus Oberflächengewässern – unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen, 3) der Aufbau von Notbrunnen sowie Notstromversorgungen, um die grundlegende Wasserbereitstellung für die Bevölkerung sicherzustellen. In besonders extremen Fällen kann es zudem erforderlich sein, Wasser aus anderen Regionen oder Ländern zuzukaufen. Parallel dazu werden auch Maßnahmen für wasserintensive Unternehmen sowie die wasserwirtschaftlichen Steuerungsmaßnahmen weiter intensiviert, sofern dies im Rahmen rechtlicher, ökologischer und technischer Möglichkeiten vertretbar ist.

Phase 4: Regeneration und Reflexion

In der Regenerationsphase ist die Niedrigwasserperiode beendet und der Übergang in den Normalzustand beginnt. Ziel der Maßnahmen in dieser Phase ist, die Wasserressourcen nach einer Dürre- oder Niedrigwasserperiode wiederherzustellen und zu stabilisieren, um künftigen Wasserknappheiten vorzubeugen und gleichzeitig das Risiko von anschließenden Hochwasserereignissen zu minimieren.⁶² Besonderes Augenmerk liegt auf der systematischen Datenanalyse und Dokumentation. Das zurückliegende Niedrigwasserereignis wird umfassend erfasst, und die umgesetzten Maßnahmen werden hinsichtlich ihrer Wirksamkeit reflektiert, um das zukünftige Wassermanagement gezielt zu verbessern. Betrachtet werden müssen dabei auch Risiken, die sich aus den Maßnahmen selbst ergeben. Etwa die Folgen baulicher Maßnahmen oder Konflikte, die sich aus Wassernutzungseinschränkungen ergeben.

Zudem werden technische Maßnahmen wie die Wiederauffüllung von Speicherbecken und eine gezielte Wasserentnahme aus Flüssen durchgeführt, um ein stabiles Gleichgewicht im Wasserdargebot wiederherzustellen. Auch die Ökosysteme gilt es ggf. zu revitalisieren und zu einem guten ökologischen Zustand zurückzuführen, sodass sie Resistenzen gegenüber zukünftigen Trockenphasen aufbauen können.

⁶² Hier gilt es, „Domino-Effekten“ (Lawrence et al. 2024: 9) vorzubeugen; etwa, wenn Starkniederschlagsereignisse auf besonders trockene Böden treffen, die den oberflächlichen Abfluss und somit Hochwasser begünstigen.

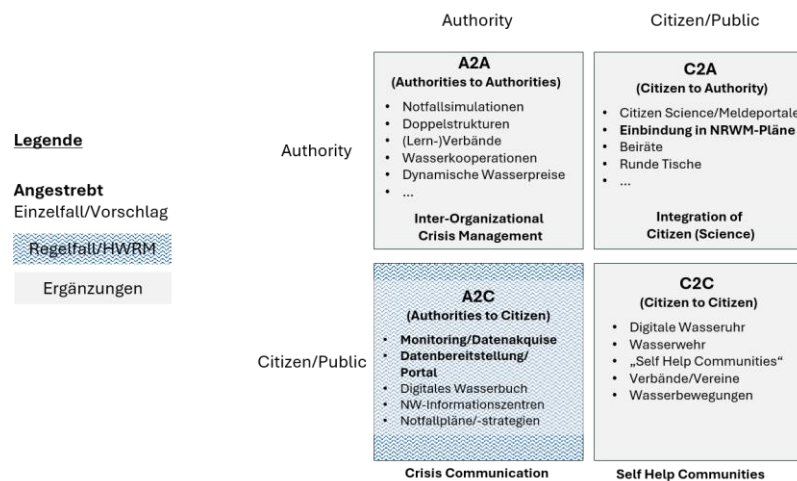
Phase 5: Hochwasser

Hochwasser und Niedrigwasser stellen zwar zwei separate hydrologische Extremereignisse dar, sind jedoch über die gemeinsamen Wasserressourcen und den Gesamtwasserhaushalt eines Flusssystems funktional verknüpft. In Hochwasserperioden besteht die Möglichkeit, Wasser gezielt zu speichern, um während nachfolgender Niedrigwasserphasen eine ausreichende Wasserverfügbarkeit sicherzustellen. Dies kann beispielsweise durch die Einleitung von Hochwasser in Rückhaltebecken oder durch kontrollierte Flächenüberschwemmungen erfolgen. Darüber hinaus kann durch Maßnahmen wie die Renaturierung von Auenlandschaften und den Ausbau von Versickerungssystemen eine künstliche Anreicherung des Grundwassers unterstützt werden. Auch das Talsperrenmanagement ist in entsprechenden Flusseinzugsgebieten an der hydrologischen Situation auszurichten (falls dies nicht schon geschieht). Solche Maßnahmen tragen zur Stärkung der Resilienz des lokalen Grundwassersystems gegenüber Dürreereignissen bei.

6.2.5 Akteure im NWRM und die Frage priorisierter Nutzungen

Dezentrale, multidirektionale Kommunikationsstrategien für nachhaltige Risikokommunikation

Aufgrund der *Temporalität* von Niedrigwasserphasen eröffnen sich in der Risikokommunikation größere Spielräume, von der katastropheninduzierten und funktionalen HWRM-Kommunikation abzuweichen und innovative Lösungen zu erproben. Die folgenden Vorschläge zur Dezentralisierung bestehender Risikokommunikationsansätze ist angelehnt an Reuter et al. (2018).⁶³ Wann sich welche Krisenkommunikationsstrategien anbieten, ist dabei von der Phase des Risikomanagements (s. Kap. 5.3.2) ebenso



Angelehnt an Reuter et al. (2018)

Abbildung 35: Darstellung von Risikokommunikationsstrategien zwischen diversen Stakeholder-Gruppen.

abhängig, wie von bestehenden Kommunikationskanälen und Adressaten, die erreicht werden sollen. Reuter et al. (2018) verdeutlichen anhand des Konzepts, wie Krisenkommunikation multidirektional und dezentral gedacht werden kann.

Authorities to Citizen (A2C)

A2C umfasst Risikokommunikationsprozesse analog zur Warnkette: Typischerweise kaskadieren ausgehend von Prognosen und Analysen die DWD Warnungen in die zu-

ständigen Behörden und Institutionen des Bundes (z.B. Bundesministerium des Inneren und Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe), die Ministerien der Länder und werden anschließend

⁶³ Reuter et al. (2018) fokussieren ihre Forschung hier auf Social-Media-basierte Risikokommunikationsstrategien, die hier auf generelle Risikokommunikationsstrategien übertragen werden.

über untergeordnete Behörden verbreitet. Im Falle katastropheninduzierter Risikokommunikation werden parallel Nachrichtenportale, die Öffentlich-Rechtlichen und Warnapps aktiviert sowie Feuerwehren und das Technische Hilfswerk mobilisiert, die sich an die Bevölkerung wenden.⁶⁴ Auch außerhalb der Notfallkommunikation erfolgt A2C über typische Kommunikationskanäle und Informationsportale der Behörden und wissenschaftlicher Einrichtungen. Hierzu zählen wissenschaftliche Informationsportale, wie der Dürremonitor (UFZ 2025), angestrebte Niedrigwasserinformationsportale (NIWIS) sowie die Gefahrenkarten, die seitens der Ministerien angeboten werden. A2C-Kommunikation muss dabei kurzfristig Funktionen unidirektionaler Informationsbereitstellung erfüllen⁶⁵, d.h. technische Informationen zur gegenwärtigen (Gefahren-)Lage abbilden. Mittel- und langfristig ist entscheidend, dass die Risikokommunikation sich auch an den Bedürfnissen adressierter Akteursgruppen orientiert und idealerweise ein Empowerment bzw. eine Bewusstseinsbildung seitens der Adressaten initiieren. Beteiligungsprozesse, wie sie im Rahmen der Umsetzung der WRRL vorgesehen sind, sollten dabei über A2C-Kommunikation hinausgehen, d.h. Informationen nicht nur bereitstellen, sondern Räume für bilaterale Kommunikationsprozesse öffnen.

Citizen to Authorities (C2A)

Umgekehrt können entscheidungsbefugte Behörden das Wissen und die Anliegen der Zivilbevölkerung aufnehmen. Je nach NWRM-Maßnahme ist diese Art von Verfahren legislative Prämisse zur Durchführung der Maßnahme (etwa in der WRRL) – ob und inwiefern die kommunizierten Anliegen tatsächlich berücksichtigt und eingebunden werden (können) hängt von spezifischen Maßnahmen, Einzugsgebieten, Beteiligungsverfahren und Phasen des Risikomanagements ab.⁶⁶ In Notfällen kann C2A-Kommunikation dazu beitragen, das akute Risikomanagement zu koordinieren. Hierzu müssen nicht notwendigerweise kommunikationsaufwendige Verfahren gewählt werden, sondern auch die Informationsbereitstellung und Dokumentation in Katastrophensituationen stellt eine Form automatisierter C2A-Kommunikation dar.⁶⁷ Im Fall Niedrigwasser werden seitens wissenschaftlicher Institutionen sog. *Citizen Science*-Projekte angestoßen, in welchen Melde- und Dokumentationsportale die dezentralen Informations- und Datengewinnung unterstützen. In langwierigen Transformationsprozessen und baulichen Vorhaben können auch institutionalisierte Austauschformate, wie bspw. sog. „Runde Tische“ und „Beiräte“ Beiträge zur bilateralen Risikokommunikation bilden. An der Selke zeigte sich, dass administrative Institutionen von Beiräten profitieren können, weil die frühzeitige Abstimmung mit der Zivilgesellschaft Planungsprozesse beschleunigt (Franke 2024).

Authorities to Authorities (A2A)

⁶⁴ Für eine Übersicht über den Informationsverbreitungs- und Verarbeitungsprozess, sowie Vor- und Nachteile verschiedener Warnkanäle siehe Klafft (2021: 345-351).

⁶⁵ „Im Katastrophenfall müssen gefährdete Teile der Bevölkerung möglichst schnell, möglichst verständlich, möglichst glaubwürdig und möglichst vollständig erreicht werden, um eine maximale Wirkung der Warnung zu erzielen.“ (Klafft 2021: 344)

⁶⁶ Wenn etwa behördlich initiierte „Dialoge“ im Wesentlichen Konferenzformate beibehalten, d.h. (wissenschaftliche) Fachvorträge die Veranstaltung strukturieren, dann sind die Anknüpfungsmöglichkeiten Laien mit entsprechender Expertise vorbehalten und Austausch entsteht lediglich in den Diskussionsphasen.

⁶⁷ „The use of citizen-generated content by authorities is also important, because there is great potential to analyze problematic situations basen on diverse citizen-generated content, including texts, pictures, and videos taken by mobile phones.“ (Reuter et al. 2018, 287)

A2A adressiert die Krisenkommunikation zwischen zuständigen Behörden. Die KWRA (UBA 2021: 75) betont die Interdependenz des Wasserhaushalts mit anderen sozial-ökologischen Sphären (etwa den Handlungsfeldern Boden, Landwirtschaft, biologische Vielfalt und Verkehr), weshalb ein Fachbereichs- und Ministerien-übergreifender Austausch besonders angebracht erscheint. Aus netzwerktheoretischer Perspektive sind interorganisationale ‚structural holes‘ (Burt 1992) der Krisenkommunikation und des Krisenmanagements zu vermeiden. In Notfällen und zeitkritischen Großschadenslagen raten Dittmer et al. (2024: 35) mit Blick auf das Hochwasserereignis im Ahrtal zu plattformbasierten, technologischen Lösungen, die behördeninterne und behördenübergreifende Kommunikationsprozesse flexibilisieren und beschleunigen. Der DKKV (2022: 32f.) ergänzt, dass neben verlässlichen Warnketten zwischenmenschlicher Austausch entscheidend ist, um zu sensibilisieren und Kompetenzen im Umgang mit Risiko- und Gefahrenlagen zu erlernen.⁶⁸ Bei NW-Ereignissen ist der Informationsfluss weniger zeitkritisch, da es sich um langfristige Ereignisse handelt. Zwar lassen sich Erkenntnisse bezüglich des Kompetenz- und Kapazitätenaufbaus übertragen, dennoch besteht die Herausforderung im NW-Risikomanagement andersherum darin, Kommunikationsflüsse nicht abreißen zu lassen, sobald unkritische Wasserstände erreicht sind. Mit Blick auf Krisenkommunikationsprozesse schreibt Schrauben (2011: 74), dass bürokratischen und hierarchische Strukturen limitierenden Einfluss auf die Informationsverbreitung außerhalb eigener Befehlsketten haben.⁶⁹ Um den interorganisationalen Informationsaustausch aufrecht zu erhalten und langfristige Prozesse im NW-Risikomanagement zu verfolgen, können institutionalisierte Intermediäre zielführend sein, wie sie sich bereits an der Elbe (FGG Elbe) und an der Selke (Selke-Beirat) finden lassen (s. Kap. 1.5.1). Wichtig ist es hier, NW auch über saisonale und ereignisinduzierte Anlässe hinaus zu thematisieren. Um in akuten Trockenperioden handlungsfähig zu bleiben, können vorgreifende Vereinbarungen (z.B. im Umgang mit Wasserknappheiten, aber auch alternative Transportrouten), wie sie an der Rur bestehen, als Orientierung dienen.

Citizen2Citizen (C2C)

C2C beschreibt ‚self-help communities‘, also Akteure, Institutionen und Kommunikationsstrukturen, die die Zivilgesellschaft im Katastrophenfall initiiert. Reuter et al. (2018) unterscheiden zwischen ‚digital volunteers‘ und ‚emergent groups‘⁷⁰. Bei digital Helfenden handelt es sich um Online-Communities, die

⁶⁸ Ein derartiges ‚capacity building‘ reicht vom Lesen und (richtigem) Interpretieren der Warnnachricht bis hin zu individuellem und kollektivem Verhalten in Gefahrenlagen. Zu berücksichtigen ist, dass lokale und regionale Unterschiede vom Stand der technischen Ausrüstung, über die Expertise im Umgang mit Warnmeldungen bis zu Erfahrungen mit Gefahrensituationen anzunehmen sind.

⁶⁹ „Bureaucratic and hierarchical structures within organizations have a limiting role on the ability of employees to freely convey information to administrators outside their chain of command, and even at times to their own supervisors. This negative aspect of the organizational structure is heightened during times of crisis, when critical information is often time-sensitive and when easy access to information is often essential.” (Schrauben 2011: 74)

⁷⁰ Im Anschluss an Stallings/EI Quarantelli (1985: 94) werden ‚emergent groups‘ definiert: „Emergent groups can be thought of as private citizens, who work together in pursuit of collective goals relevant to actual or potential disasters but whose organization has not yet become institutionalized. As such they are less than bureaucracies but more than independently acting, isolated private persons converging on the same problem. Such groups are considered emergent in two respects: the relationship among the individuals pursuing the collective goals are new (the group has an internal structure that did not exist before) and the tasks being undertaken in the pursuit of these goals are new for individuals so joined. In its purest form an emergent group has a new structure (i.e., social relations) and a new function (i.e., goals or tasks). Emergent citizen groups appear in both the emergency phase of disasters, as well as during the less crisis like preparedness and recovery phases.”

insbesondere im Katastrophenfall aktiv werden, indem beispielsweise Katastrophenlagen ausgehend von digitalen Daten und Social-Media Beiträgen ‚gemappt‘ werden, Informationen zur Situation lokaler Gefahrenlagen zur Verfügung gestellt oder Spenden akquiriert werden (ebd.). „Emergent groups“ sind oft spontan Helfende, die sich i.d.R. in der Nähe der Ereignisse befinden. Die Form von ‚ungebundenen‘ Helfenden, die also nicht bereits in freiwilliges Engagement bei der Feuerwehr o.Ä. eingebunden sind, lässt sich weiter differenzieren (Sackmann et al. 2021: 561ff.): In Notfallphasen können sich Helfende auf Plattformen oder bei lokalen Kräften als solche melden/registrieren; als (spontan) registrierte Helfende sind sie dann für koordinierende Stellen prinzipiell greifbar. Nichtregistrierte Helfende, Selbsthelfende und Nachbarschaftshelfende sind hingegen schwieriger für die koordinierenden Stellen zugänglich.⁷¹ In der jüngeren, soziologischen (Governance-) Literatur werden Spontanhelfende als ‚resilientes Selbst‘ einerseits verstanden, welches sich – angesichts schwindender organisierter Helfer*innen im Katastrophenschutz etc. – durch eine normalisierte, „katastrophalen Erwartungshaltung“ auszeichnet und zu schützen versucht. Gleichzeitig zeigen die Formen der Vergemeinschaftung, die aus den Spontanhelfenden entstehen, Lücken staatlicher Versorgungs- und Schutzpflichten infolge einer kapitalistisch motivierten „Verzivilgesellschaftlichung“ sozialer Fragen auf (Richterich 2024; Dyk /Haubner 2021). An anderer Stelle zeichnen sich jedoch bereits Tendenzen der Institutionalisierung von ‚self-help-communities‘ ab: Im Wassergesetz Sachsen-Anhalts (§14 WG LSA) sowie Thüringens (§55 ThürWG) ist die Einrichtung von Wasserwehren vorgesehen, die – analog zur Feuerwehr – vor allem den Hochwasserschutz gewährleisten sollen. Sie könnten auch für NW-Ereignisse als lokale Ansprechpartner auftreten, die neben der praktischen auch eine symbolische Funktion erfüllen, indem sie den Schutz gegenüber hydrologischen Extremen suggerieren, lokale Informations- und Austauschprozesse eine Plattform bieten, und auch außerhalb von Notlagen den Hoch- und Niedrigwasserschutz fördern. Schließlich ist davon auszugehen, dass europaweit Wasserverteilungs- und Wassergerechtigkeitsfragen zunehmend nicht nur von bestehenden Umwelt- und Klimaschutzbewegungen aufgegriffen werden, wie es bei Protesten gegen den Wasserverbrauch Teslas in der Grünheide der Fall war, sondern explizite Wasserbewegungen entstehen.

Identifizierung relevanter Akteure im NWRM

In einem ersten Schritt sollte ein Gremium für die Ausarbeitung eines Risikomanagementplans geschaffen werden. In diesem Gremium sollten alle relevanten Entscheidungsträger und Stakeholder repräsentiert sein. Welche Stakeholder inwiefern in welchem FEG relevant sind, hängt dabei vom betrachteten FEG ab. Net-Maps können ein pragmatisches und effektives Instrument sein, um sich einen Überblick über relevante Akteursgruppen in den FEGs zu verschaffen (s. Kap. 2.4). Um die Stakeholder während des Niedrigwasserereignisses besser zu koordinieren, lassen sich prinzipiell Hauptgruppen identifizieren, die Kompetenzen in wesentlichen Themenbereichen umfassen:

- Verwaltungsbehörden, d.h. je nach FEGs Untere, Obere und/oder Oberste Wasserbehörden
- Wasserintensive Nutzungsunternehmen, wenn das Fließgewässer durch industrielle Entnahmen beansprucht wird, sowie Transportunternehmen und Warenverkehr
- Trinkwasserversorger, sofern für das Fließgewässer relevant

⁷¹ Insbesondere in Hochwassersituationen können Helfende auch zur Gefahr werden, etwa wenn sie sich (bewusst oder unbewusst) in Gefahr begeben, somit Mehraufwand verursachen, oder bereits stattfindende Prozesse behindern.

- Umwelt- und Naturschutzverbände, falls Schutzgebiete ausgewiesen sind
- Eigentümerverbände, sofern bauliche Maßnahmen in Betracht gezogen werden
- Tourismus- und Freizeitverbände, sofern Eingriffe in die Landschaft absehbar sind

Die Wasserbehörden nehmen als Institutionen hoheitliche Aufgaben wahr, d.h. sie beschäftigen sich unmittelbar mit der Verwaltung und dem Schutz der Fließgewässer und werden idealerweise bei dem ersten Anzeichen des Niedrigwassers benachrichtigt und einbezogen. Wasserintensive, entnehmende Institutionen umfassen produzierende Unternehmen und Betriebe, die einen hohen Wasserverbrauch aufweisen und über entsprechende Entnahmerechte verfügen, somit ein wirtschaftliches Interesse am NWRM haben. Sobald die Wasserversorgung für die Produktion nicht weiter sichergestellt ist, ist es von Vorteil, wenn Unternehmen eigene Strategien für die Aufrechterhaltung des Betriebs bzw. ggf. Schlichtungsmechanismen zwischen mehreren Unternehmen implementiert haben. Ist dies nicht der Fall drohen temporäre Betriebsschließungen und ggf. der Verlust von Arbeitsplätzen in der Region. Unmittelbar betroffen von Niedrigwasser sind darüber hinaus Transportunternehmen, die Wasserstraßen nutzen. Bereits wenn kritische Passagen Niedrigwasser führen und unpassierbar werden, können Umsatzverluste auftreten (Folkens et al. 2024). Hier ist es ebenfalls von Vorteil, wenn sowohl seitens der Gewässerunterhaltung als auch seitens der Unternehmen präventive Maßnahmen (wie z.B. niedrigwasserangepasste Transportschiffe) eingeleitet werden.

Sobald das Wasserdargebot nicht zur Deckung der Nachfrage der Öffentlichkeit ausreicht, müssen Notfallpläne großräumig und öffentlichkeitswirksam um- und politisch durchgesetzt werden. Je nach Intensität und Dauer des Dürreereignisses werden die entsprechenden Stakeholder informiert und entsprechende Maßnahmen aktiviert bzw. intensiviert. Potentielle bzw. repräsentative Stakeholder wären im Rur-Einzugsgebiet folgende:

- Wasserverbände (Wasserverband Eifel-Rur WVER und Erftverband)
- Wasserversorger
- Kommunen
- Bezirksregierung Köln
- Talsperrenbetreiber (falls nicht identisch mit Wasserverband)
- Industrie (Papierindustrie, Chemieindustrie, Lebensmittelindustrie)
- Umweltschutzbehörden (Landesamt für Natur, Umwelt und Klima LANUK)
- Umwelt NGOs
- Stromproduzenten
- Kläranlagenbetreiber (falls nicht identisch mit Wasserverband)
- Fischerei
- Freizeit (Segeln, Kanu etc.)

Abhängig vom Pilotgebiet variieren jedoch die Stakeholder; etwa, wenn das Fließgewässer nicht industriell (produzierendes Gewerbe oder Stromerzeugung) genutzt wird oder zu wenig Wasser für bestimmte Freizeitaktivitäten führt. Neben Entnahmen und Wassernutzungen sind im Niedrigwasserfall auch Einleitungen (z.B. von Sumpfung- oder Abwässern) zu bedenken, die die Wasserqualität beeinträchtigen.

Priorisierung der Wassernutzung

Stakeholder repräsentieren in der Regel eine oder mehrere Arten (un-)mittelbarer Wassernutzungen. Die Priorisierung von Wassernutzungen über die gesetzlichen Vorgaben hinaus ist stets eine politische Frage. In erster Linie müssen die grundlegenden Bedürfnisse der Bevölkerung hinsichtlich der Wasserversorgung gedeckt werden. Auch die Kühlwasserversorgung für die Energieversorgung kann hohe Priorität genießen und sollte sichergestellt werden. Außerdem sollte in größeren Fließgewässersystemen

die Schifffahrt als bedeutende Nutzungsart berücksichtigt werden, um wirtschaftliche und infrastrukturelle Anforderungen zu erfüllen. Fragen des ökologischen Schutzes sind essenziell für die langfristige Stabilität der Wasserressourcen und die Erhaltung der Biodiversität. Sie stehen im Niedrigwasserfall oft in Konkurrenz zur industriellen Nutzung (Entnahmen und Einleitungen). Die landwirtschaftliche Bewässerung von Nutzpflanzen und die Versorgung von Viehbeständen ist ausgehend von benötigten Volumina meist weniger kritisch. Auch hier empfiehlt es sich dennoch, diverse Präventionsmaßnahmen seitens der Landwirtschaft und der Gewässerbewirtschaftung vorzubereiten. Eine niedrigere Priorität weisen die Fischerei und Freizeitaktivitäten auf, da sie im Vergleich zu systemrelevanten Nutzungen weniger dringlich sind. Diese Bereiche können nachrangig bedient werden, ohne dass grundlegende Versorgungsbedarfe oder ökologische Integrität gefährdet werden.

Die exemplarische Priorisierung reflektiert den aktuellen Zustand des Rur-Einzugsgebiets. In anderen Flusseinzugsgebieten muss die Reihenfolge der Prioritäten entsprechend den lokalen Gegebenheiten und der aktuellen Situation angepasst werden, insbesondere in Bezug auf die Stromversorgung und die Landwirtschaft. Der Ausbau erneuerbarer Energien sowie der Kohleausstieg könnten regelmäßige Überprüfungen und Anpassungen der Prioritäten in der Stromversorgung erforderlich machen. Im Rur-Einzugsgebiet wird derzeit nur wenig bewässerte Landwirtschaft betrieben. Dies könnte sich jedoch durch freiwerdende Flächen zukünftig ändern, wodurch die Landwirtschaft eine höhere Priorität in der Wassernutzung einnehmen müsste. Die im Rahmen dieser Arbeit beschriebene Priorisierung für das Rur-Einzugsgebiet basiert auf der Risikoanalyse (AP 4.3) und der Wasserhaushaltsanalyse (AP 2) und dient lediglich als Grundlage für Handlungsempfehlungen. Die präventive Identifizierung von relevanten Stakeholdern (s. Kap. 2.3) hilft bei dem Entwickeln von Managementplänen sowie dabei, die Stakeholder je nach Dürrestufe zu informieren bzw. zu koordinieren.

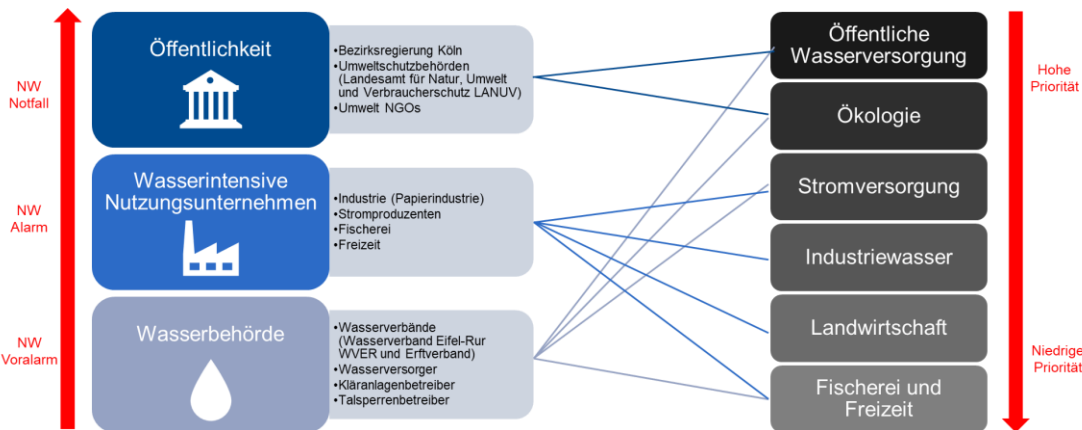


Abbildung 36: Identifizierung der organisatorischen Gruppe und Priorisierung der Wassernutzung im Rur-Einzugsgebiet. (Hinweis: Die Priorisierung der Wassernutzungen ist flusseinzugsgebietsspezifisch. Die dargestellte Priorisierung bezieht sich ausschließlich auf das Rur-Einzugsgebiet.)

6.3 Bewertung der geplanten Strategie zur Risikomanagement & -kommunikation

Im Vergleich zu anderen Naturgefahren wie Hochwasser entwickelt sich eine Dürre langsamer über einen längeren Zeitraum und erstreckt sich häufig über großräumige Gebiete. Dadurch ist der Beginn einer Dürre oft schwer zu erkennen und wird von der Öffentlichkeit erst spät wahrgenommen. Die Überwachung von Dürren erfordert insbesondere langfristige Datenreihen zu Klima- und Bodenfeuchte, während die Hochwasserüberwachung auf Echtzeitdaten zu Niederschlag und Wasserständen angewiesen ist. In diesem Kontext unterscheidet sich auch das Management beider Extremereignisse deutlich: Das

Dürremanagement fokussiert auf die vorausschauende Wasserressourcen-Planung und nachhaltige Nutzung, während der Hochwasserschutz vor allem auf Sofortmaßnahmen und Notfallpläne abzielt.

Die im Arbeitspaket 4.4 entwickelte Strategie verfolgt einen zyklischen, stufenbasierten Ansatz des Niedrigwassermanagements, der dauerhaft und anpassungsfähig gestaltet ist. Die Maßnahmen und deren Intensität variieren dabei in Abhängigkeit von Dauer und Schwere der Niedrigwasserphase: Je länger und intensiver das Niedrigwasser anhält, desto umfassender und flächendeckender müssen die Maßnahmen ausfallen. Darüber hinaus sind auch bei Normalbedingungen unterschiedliche Managementphasen zu berücksichtigen, wie etwa die Präventions- und Regenerationsphase. Die Einbindung des Hochwassermanagements in das Gesamtkonzept ermöglicht es zudem, Hochwasserphasen gezielt zur Wasserressourcenspeicherung zu nutzen – und somit die Verfügbarkeit während nachfolgender Dürreperioden zu erhöhen, was dem natürlichen Flussregime besser entspricht und die Resilienz des Systems stärkt.

7 AP 5.1 Maßnahmen

7.1 Maßnahmenkatalog für das Rur-Einzugsgebiet

Der Maßnahmenkatalog stellt einen zentralen Bestandteil des Risikomanagementzyklus dar und dient dazu, Risiken gezielt zu verringern oder zu vermeiden. Im Hinblick auf die Minderung von Niedrigwasserereignissen hat Riedel et al. (2021) in seinem Bericht einen umfassenden Maßnahmenkatalog vorgelegt. Dieser unterscheidet zwischen allgemeinen Maßnahmen sowie sektorspezifischen Maßnahmen in Bereichen wie Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Ökologie, öffentliche Trinkwasserversorgung, Abwasserentsorgung, Transport, Energie sowie Industrie und Gewerbe. Dieser Katalog kann als Grundlage für die Auswahl geeigneter Maßnahmen im Rur-Einzugsgebiet herangezogen werden. Die nachfolgende Tabelle fasst eine Auswahl relevanter und umsetzbarer Maßnahmen zur Minderung von Niedrigwasser im Rur-Einzugsgebiet zusammen. Dabei wird die jeweilige Maßnahme kurz beschrieben und standortspezifische Herausforderungen werden identifiziert, die bei der Umsetzung zu berücksichtigen sind.

Tabelle 20: ausgewählte Maßnahmen zur Niedrigwasserminderung von Riedel et al. (2021) für das Rur-Einzugsgebiet

Sektor	Maßnahme	Maßnahmenbewertung
Allgemeine Maßnahme	Verbraucherverhalten steuern	Gut umsetzbar, z. B. durch Bewusstseinsbildung. Bereitstellung leicht zugänglicher Informationen für Verbraucher darüber, wie Wasser eingespart werden kann.
	Aufstellung eines nationalen Dürremanagementplans	Schwer umsetzbar, da das Rur-Einzugsgebiet Deutschland, Belgien und die Niederlande umfasst. Es müssen wasserrechtliche Rahmenbedingungen sowie die Koordination zwischen Wasserbehörden aller drei Länder berücksichtigt werden.
	Informationsplattform zur Darstellung der Dürrezustand	Umsetzbar. Es bestehen bereits erste Ansätze, z. B. das Deutschland Dürremonitoring.
	Prognosemodelle verbessern	Gut umsetzbar, insbesondere durch den Einsatz KI-gestützter Analysen auf Grundlage langfristiger historischer Daten.
	Gesamtheitliche Bewertung der Speicher- und	Sehr relevant und umsetzbar. Im Rur-Einzugsgebiet existiert ein komplexes Talsperrensystem. Eine systematische Bewertung ist

	Ausgleichsfunktion von Talsperren	erforderlich, um zu prüfen, ob die Speicher- und Ausgleichsfunktionen flexibel und dürreresistent sind.
Öffentliche Trinkwasserversorgung	Erschließung neuer Ressourcen	Umsetzbar. Maßnahmen zur Erschließung neuer Quellen, z. B. Anbindung neuer Talsperren in Belgien oder verstärkte Nutzung von Grundwasser, sind bereits in Planung oder teilweise implementiert.
Ökologie	Verbesserung und Monitoring der Wasserqualität	Gut umsetzbar. Die Überwachung sollte intensiviert werden, z. B. hinsichtlich Sauerstoffgehalt, Nährstoffbelastung und Fischverhalten.
	Temperaturregulation durch Verringerung der Kraftwerkeinleitung	Wirksam, jedoch schwer umsetzbar. Entlang der Rur befinden sich das Großkraftwerk, das Flusswasser zur Kühlung entnimmt. Eine Reduktion ist technisch und politisch anspruchsvoll, könnte jedoch zu einer spürbaren Temperaturminderung führen.
	Talsperrenmanagement und Abflussregulierung	Gut umsetzbar und sehr wirksam. Da der Abfluss der Rur stark durch das Talsperrensystem kontrolliert wird, ist ein effektives und reaktionsschnelles Talsperrenmanagement entscheidend.
	Gewässerbeschaffung	Gut umsetzbar und wirksam. Durch Maßnahmen wie die Pflanzung von Bäumen entlang der Rur kann die Gewässerstruktur verbessert und das Mikroklima positiv beeinflusst werden.
Energie	Diversifizierung der Energiequelle ausbauen	Umsetzbar. Der Ausbau erneuerbarer Energien (z. B. Solar- und Windkraft) reduziert die Abhängigkeit von wasserintensiven Kraftwerken und kann zur Reduktion des Wassernutzungsdrucks beitragen.

7.2 Maßnahmen zur Steigerung der Grundwasserneubildung

Neben dem allgemeinen Maßnahmenkatalog wurden weitere gezielte Maßnahmen zur Förderung der Grundwasserneubildung identifiziert. Wie in Kapitel 3 erläutert, spielt die Interaktion zwischen Grundwasser und Oberflächengewässern eine zentrale Rolle während Niedrigwasserperioden. Insbesondere trägt der Grundwasserzustrom zur Stabilisierung des Abflusses in Flusssystemen bei. Eine gezielte Erhöhung der Grundwasserneubildung kann daher wesentlich zur Verringerung des Niedrigwasserrisikos beitragen. Verschiedene Maßnahmen zur Förderung der Grundwasserneubildung sind bereits bekannt und wurden in der Praxis teilweise erfolgreich erprobt.

Dezentrale Versickerung der Niederschläge

Eine effektive Methode zur Steigerung der Grundwasserneubildung ist die dezentrale Versickerung von Niederschlägen. Dabei wird Regenwasser direkt vor Ort in Mulden oder Rigolen versickert. Studien zeigen, dass 76 % des Niederschlags von Dächern, der in Mulden versickert wird, dem Grundwasser zugeführt wird (Engelhard et al.). Die Rigolenversickerung kann eine Grundwasserneubildungsrate von bis zu 89 % erreichen. Im Vergleich dazu beträgt die Neubildungsrate im unbebauten Zustand lediglich 36 %. Um eine konstante Grundwasserneubildung zu erzielen, wird ein Gründachanteil von mindestens 30 % empfohlen (Kersting 1996). Mulden sind besonders geeignet für die Versickerung von Niederschlägen auf Verkehrsflächen und sollten mit humushaltigem Oberboden sowie einer Mischung aus Feinsand und Schluff unterlegt sein.

Entsiegelung von Flächen

Auch die Entsiegelung versiegelter Flächen hat einen positiven Einfluss auf die Grundwasserneubildung. Ein Zusammenhang zwischen dem Versiegelungsgrad und der GWN wurde bereits von der DWA veröffentlicht (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall 2007). Die Verringerung des Versiegelungsgrads ist somit eine geeignete Maßnahmen zur Erhöhung der GWN. Teildurchlässige Oberflächen wie Rasengittersteine ermöglichen eine verbesserte Infiltration. Durch die entstehenden Fugen bei solchen Oberflächen kann eine Infiltrationsrate von 60% erzielt werden (Kersting 1996)

Nutzung von gereinigtem Abwasser

Die Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser stellt eine innovative Maßnahme dar, um das Grundwasser aufzubereiten und dessen Speicherfähigkeit zu nutzen (Schulz 2014). Dabei wird das gereinigte Abwasser nicht dem Vorfluter wie sonst üblich zugeführt, sondern in Wäldern versickert oder zur Beregnung landwirtschaftlicher Flächen genutzt. Ein Problem dabei sind allerdings Rückstände wie Arzneimittel oder Hormone.

Waldumstrukturierung

Die Baumartenwahl eines Waldes hat einen signifikanten Einfluss auf die Grundwasserneubildungsrate durch Transpiration und Interzeption der Blätter. Kiefernwälder zeigen beispielsweise eine um 19 % geringere Neubildungsrate auf Böden mit anlehmigem Sand im Vergleich zu Reinsand (Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen 2008). Eine bewusste Waldumstrukturierung kann daher auch ein positiver Effekt auf die Grundwassersituation haben. Ein Problem dabei ist allerdings, dass in Deutschland viele Wälder in privatem Besitz sind.

Querfeldebewirtschaftung

Ein weiterer Ansatz ist die Querfeldebewirtschaftung: Durch Bearbeitungslinien quer zum Gefälle entstehen Rillenstrukturen, die als Barrieren gegen Oberflächenabfluss wirken und somit die Infiltration erhöhen können (Hildmann et al. 2022). Studien zeigen dabei einen signifikanten Anstieg der Infiltration bei Hangneigungen von unter 9 % (Seibert und Auerswald 2020). Dabei könnten jedoch Ernteeinbußen und somit Umsatzverluste entstehen.

7.3 Evaluierung der Maßnahme (Entsiegelung) in Rur-Einzugsgebiet

In diesem Kapitel wird die Wirksamkeit der Entsiegelung als Maßnahme zur Steigerung der Grundwasserneubildung und zur Minderung des Niedrigwassers analysiert. Hierbei werden drei unterschiedliche Ansätze zur Berechnung der Grundwasserneubildung (GWN) entwickelt. Der erste Ansatz ermittelt die Grundwasserneubildung aus der Differenz zwischen Niederschlag und Evapotranspiration (Kontrollmodell). Der zweite Ansatz baut auf dem ersten auf und berücksichtigt zusätzlich den Einfluss von Schnee. Der dritte Ansatz basiert ebenfalls auf dem ersten Modell, bezieht aber den Faktor Landnutzung mit ein.

Die mit den verschiedenen Ansätzen berechnete Grundwasserneubildung wird anschließend in das gekoppelte Rur-Modell integriert, um die unterschiedlichen Dynamiken von Grund- und Flusswasser zu untersuchen. Das Modell, welches den Landnutzungsansatz verwendet, simuliert den Ist-Zustand mit versiegelten Flächen, während das Kontrollmodell einen idealerweise vollständig entsiegelten Zustand darstellt. Durch einen Vergleich der Ergebnisse beider Modelle kann die Wirkung der Entsiegelung eingehend untersucht werden.

7.3.1 Methode

In diesem Bericht wird ausschließlich der Landnutzungsansatz detailliert erläutert, während der Ansatz zur Berücksichtigung von Schneeeffekten an anderer Stelle im Bericht (Urmetzer 2025) behandelt wird. Die Grundwasserneubildung im Modellansatz Landnutzung wurde wie folgt definiert:

$$GWN_{LN} = P - E - A_o$$

GWN_{LN} = Grundwasserneubildung Landnutzung (m/s)

P = Niederschlag (m/s)

E = Evapotranspiration (m/s)

A_o = flächenhafter Oberflächenabfluss (m/s)

Zur Berechnung des flächenhaften Oberflächenabflusses wurde ein Abflussbeiwert-Raster erstellt, das auf dem Digitalen Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM) des Landes Nordrhein-Westfalen basiert. Jedem Rasterzellwert wurde ein spezifischer Abflussbeiwert ψ in Abhängigkeit von der jeweiligen Landnutzungsart zugeordnet, welcher den Anteil des Niederschlags beschreibt, der nicht infiltriert, sondern unmittelbar oberflächlich abfließt. Die Berechnung des Oberflächenabflusses erfolgt nachfolgender Formel:

$$A_o = P \times \psi$$

Ein ψ -Wert von 0 impliziert eine vollständige Infiltration des Niederschlags ohne Oberflächenabfluss, während ein Wert von 1 bedeutet, dass der gesamte Niederschlag als Oberflächenabfluss verloren geht. Hohe ψ -Werte treten typischerweise in stark versiegelten Flächen wie Industrie- und Siedlungsgebieten auf, wohingegen landwirtschaftlich genutzte oder naturnahe Flächen geringere Abflussbeiwerte aufweisen. Es ist anzumerken, dass in diesem Modellansatz der berechnete Oberflächenabfluss nicht in benachbarte Zellen überführt wird. Stattdessen wird jeder Zellwert ausschließlich lokal betrachtet und der entsprechende Oberflächenabfluss direkt von der monatlichen Niederschlagssumme subtrahiert. Abbildung 37 zeigt die Karte des DLM sowie die Verteilung der Abflussbeiwerte im Einzugsgebiet der Rur.

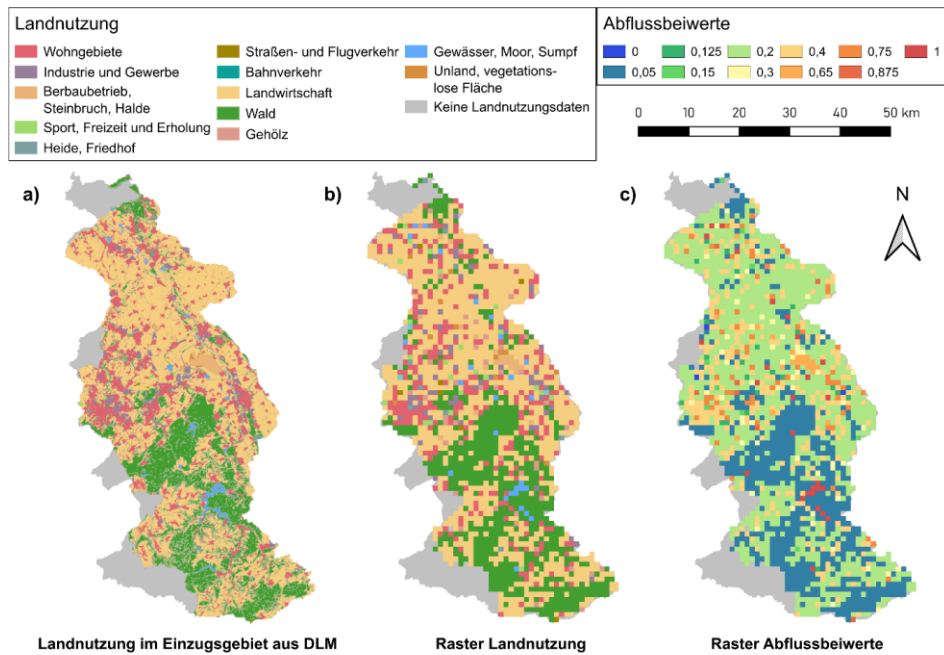


Abbildung 37: Landnutzung des Einzugsgebiets und resultierende Abflussbeiwert-Raster (Urmetzner 2025)

Die mit dem Landnutzungsmodell berechnete Grundwasserneubildung wurde in das gekoppelte Rur-Modell (AP 4.1 und AP 4.2) integriert, um Simulationen für die Zeiträume 2010–2012 durchzuführen. Ziel war es, die Dynamik von Fluss- und Grundwasser unter Berücksichtigung der Landnutzungseffekte zu analysieren. Die Simulationsergebnisse wurden anschließend mit denen des Kontrollmodells verglichen, bei dem keine Landnutzungseffekte berücksichtigt wurden (vollständig entsiegelte Bedingungen).

7.3.2 Ergebnis

Vergleich der GWN mit und ohne Landnutzungseffekt

Abbildung 38 zeigt die Jahressummen der modellierten GWN sowohl für das Kontrollmodell als auch für den landnutzungsbasierten Ansatz im Verlauf des Jahres 2011. Es wird deutlich, dass die GWN im Landnutzungsmodell insbesondere in stark versiegelten Bereichen erheblich reduziert ist. In einzelnen Rasterzellen treten Extremwerte von bis zu -421 mm auf. Solch niedrige oder negative Werte weisen darauf hin, dass Evapotranspiration und Oberflächenabfluss den Niederschlag lokal übersteigen. In Wald- und landwirtschaftlich genutzten Flächen fallen die Veränderungen der GWN hingegen geringer aus, da diesen Gebieten niedrigere Abflussbeiwerte von 0,05 bzw. 0,2 zugeordnet wurden.

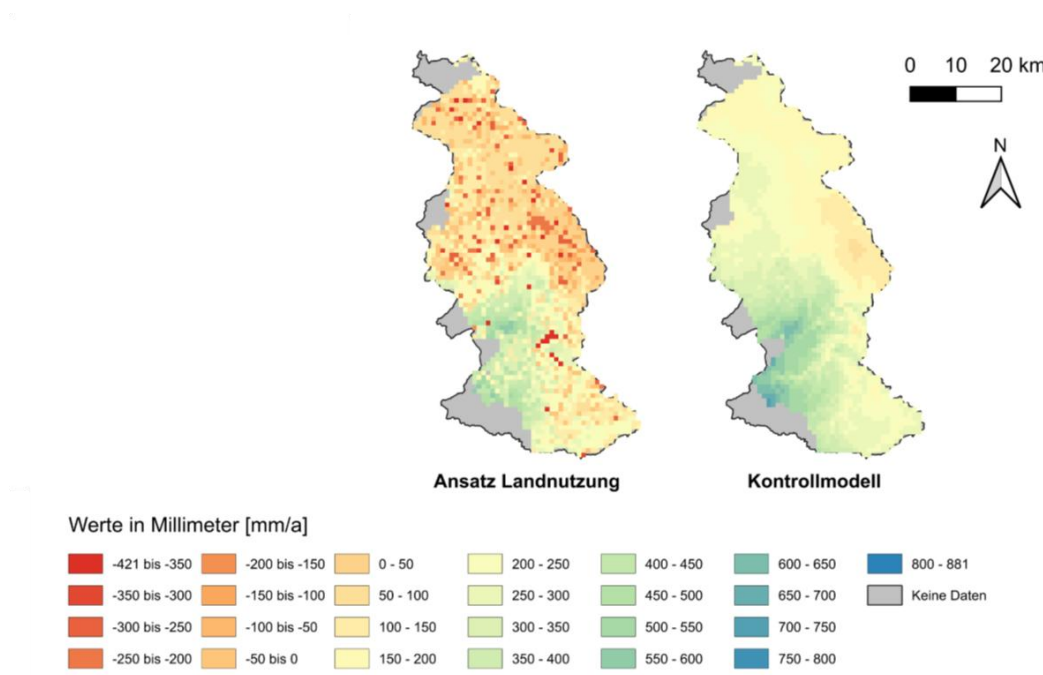


Abbildung 38: Jahressummen der GWN für 2011 (Urmetzner 2025)

Vergleichen der Grundwasser- und Flusswasserdynamik mit und ohne Landnutzungseffekt

Neben der flächenhaften Analyse des Einzugsgebiets wurden auch Grundwasserstände und Flusswasserstände simuliert. Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen die modellierten Grundwasserstände (GWS) und Flusswasserstände (FWS) am Beobachtungspunkt in Jülich und Linnich für den Zeitraum von 2010 bis 2012.

Zu Beginn der Simulation ist an der Station Jülich ein Rückgang des GWS in allen Modellansätzen bis Mitte Februar 2010 zu beobachten, wobei der Ansatz mit Schneeablage den stärksten Rückgang aufweist. Ab Februar steigen die GWS in allen Ansätzen an und stabilisieren sich im März. Von März bis Mai liegen die GWS über dem Niveau des Kontrollmodells. Der landnutzungs-basierte Ansatz weist während des gesamten Zeitraums niedrigere GWS auf als die anderen Ansätze, wobei die größten Abweichungen zwischen September und November auftreten. Ab November steigen alle GWS erneut an und erreichen ihre Maxima im Januar: Der Kontrollansatz erreicht einen Wert von 77 m, der Schneean-satz liegt etwa 10 cm darüber, während der Landnutzungsansatz etwa 15 cm darunterbleibt. Zwischen Februar und Mai 2011 sinken alle GWS ab, stabilisieren sich von Juni bis Dezember und steigen zu Beginn des Jahres 2012 erneut an, jedoch nicht mehr auf das Niveau des Vorjahres.

Die Unterschiede der GWS zwischen dem landnutzungs-basierten Ansatz und dem Kontrollmodell fallen in Linnich geringer aus als in Jülich. Während in Jülich vorwiegend Landnutzungsarten wie Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft und Wohngebiete vorherrschen, sind in Linnich überwiegend Wälder und landwirtschaftliche Flächen vertreten. Aufgrund dieser unterschiedlichen Landnutzungsverteilung zeigen die GWS des Kontrollmodells und des Landnutzungsmodells in Jülich größere Abweichungen als in Linnich.

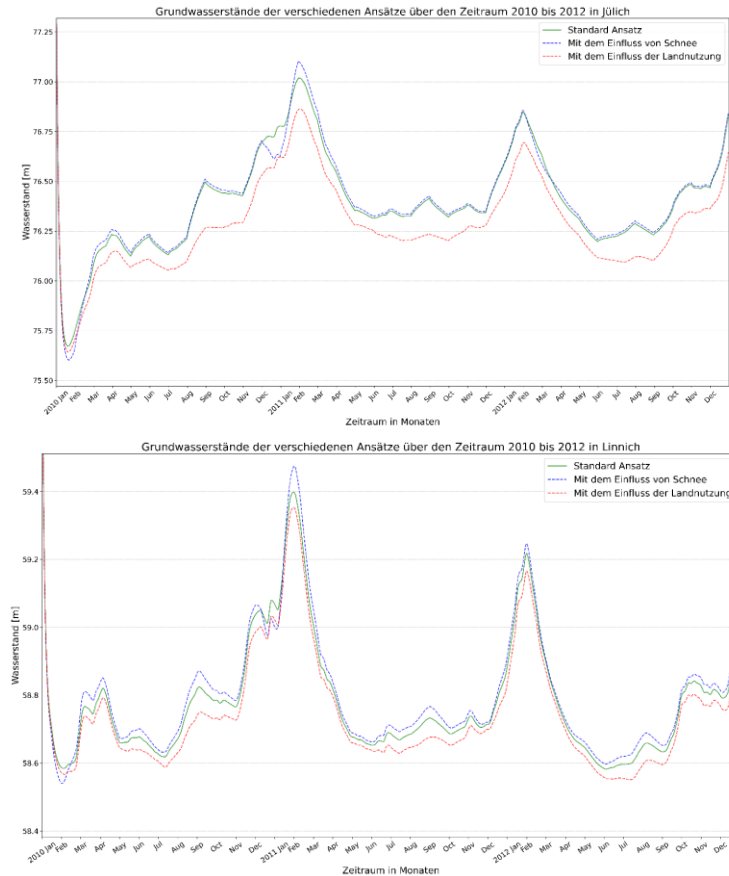


Abbildung 39: Simulierte Grundwasserstände am Beobachtungspunkt in Jülich und Linnich im Zeitraum von 2010 bis 2012 (Urmetzner 2025)

Im Gegensatz zu den GWS zeigen die simulierte FWS der verschiedenen Ansätze einen sehr ähnlichen Verlauf, sodass sie in dieser Darstellung nicht voneinander unterschieden werden können. In Jülich schwanken die FWS während des dreijährigen Simulationszeitraums zwischen etwa 75,4 und 76,6 Metern. Die FWS weisen ausgeprägtere Schwankungen zwischen den Spitzenwerten auf, zeigen jedoch zu ähnlichen Zeitpunkten erhöhte Werte wie die Grundwasserstände. In Linnich liegen die FWS etwa 17 Meter unter denen in Jülich und erreichen ebenfalls in denselben Zeiträumen Wasserstandsspitzen. Auch hier sind zwischen den FWS der drei Ansätze keine signifikanten Unterschiede erkennbar.

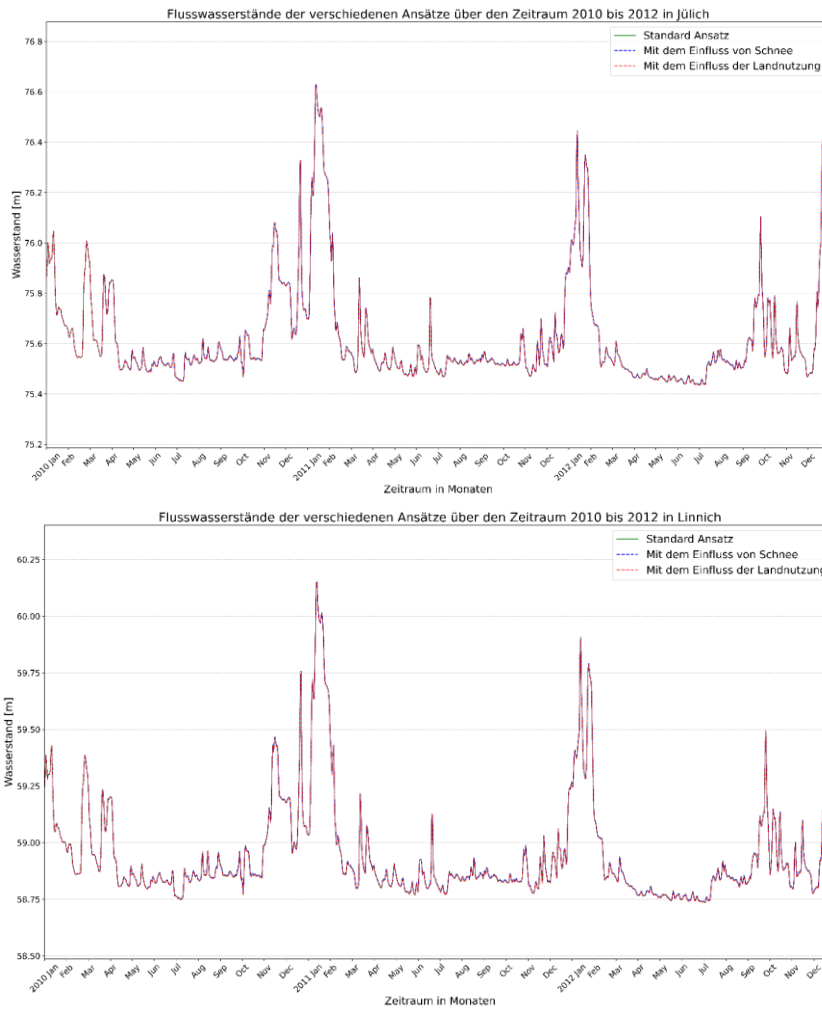


Abbildung 40: Simulierte Flusswasserstände am Beobachtungspunkt in Jülich und Linnich im Zeitraum von 2010 bis 2012 (Urmeter 2025)

7.3.3 Diskussion

Im Vergleich zum Kontrollmodell weist die GWN im landnutzungsdifferenzierten Modell flächendeckend niedrigere Werte auf, insbesondere in Gebieten mit hohen Abflussbeiwerten wie Gewerbe- oder Bergbauflächen. Eine zentrale Schwäche des Modells zeigt sich bei Zellen mit Gewässern, Mooren oder Sümpfen. Da diesen Landnutzungsarten ein Abflussbeiwert von 1 zugeordnet wird, wird der gesamte Niederschlag als Oberflächenabfluss abgeleitet, was rechnerisch stets zu negativer GWN führt. Ob dies den tatsächlichen hydrologischen Verhältnissen entspricht, ist fraglich. Eine Anpassung der Abflussbeiwerte für diese Flächen erscheint daher notwendig. Eine weitere Limitation besteht darin, dass Oberflächenabflüsse ausschließlich lokal berücksichtigt werden und keine laterale Wasserverlagerung in benachbarte Zellen erfolgt. Diese Vereinfachung vernachlässigt Prozesse wie die Infiltration entlang von Fließwegen, obwohl Studien belegen, dass ein Teil des Abflusses auf dem Weg durch die Landschaft versickern kann. Für eine realistischere Modellierung wäre es erforderlich, den Oberflächenabfluss entlang des natürlichen Gefälles weiterzuleiten und dort erneut dessen Beitrag zur GWN zu prüfen. Ein solch dynamischer Ansatz würde die Realität besser abbilden, allerdings auch die Komplexität und den Rechenaufwand erhöhen.

Um die Wirksamkeit der Entsiegelungsmaßnahme nachzuweisen, wird erwartet, dass die FWS im Kontrollmodell (vollständig entsiegelt) höher als die FWS im Landnutzungsmodell ist. Die Simulationsergebnisse für Linnich und Jülich im Zeitraum 2010 bis 2012 zeigen, dass die GWS im landnutzungsbasierten Modell durchgehend niedriger sind als im Kontrollmodell. Die Flusswasserstände GWS weisen trotz der Wechselwirkungen mit den GWS zwischen beiden Modellansätzen kaum Unterschiede auf. Jedoch kann daraus nicht geschlossen werden, dass Entsiegelungsmaßnahmen keine wirksame Auswirkung auf die Minderung von Niedrigwasser haben, da das verwendete Modell weiterhin Verbesserungspotenzial bietet. Es wird daher empfohlen, weiterführende Langzeitsimulationen (über mindestens 30 Jahre) für das gesamte Einzugsgebiet durchzuführen. Dies ermöglicht eine umfassende Analyse der langfristigen Entwicklung des Grundwassersystems sowie der Veränderung der Speicherkapazität infolge der Entsiegelungsmaßnahmen. Insbesondere sollte geprüft werden, ob über einen längeren Zeitraum eine Erhöhung der FWS im Kontrollmodell gegenüber dem Landnutzungsmodell nachweisbar ist.

8 AP 5.4 Zukunftswerkstatt

Das Ziel des AP 5.4. bestand in der Entwicklung von Szenarien, die die in AP 5.1. entwickelten Handlungsmaßnahmen und in AP 5.3. entwickelten sozio-ökonomischen Szenarien der Konsortialpartner ergänzen. Zukunftswerkstätten stellen ein dreistufiges Verfahren dar, in welchen (1) in einer Beschwerde- und Kritikphase der Ist-Zustand ermittelt wird, (2) ein optimales Szenario skizziert wird (Utopiephase) und (3) Maßnahmen, die den Weg zum optimistischen Szenario bilden, identifiziert werden.

Die Entwicklung von Szenarien eines zukünftigen NWRM wird durch folgende Prämissen beeinflusst:

- der Klimawandel und dessen Folgen sind nur begrenzt prognostizierbar. Zwar ist im Allgemeinen von einer steigenden Durchschnittstemperatur und einer lokal variierenden Zunahme meteorologischer und hydrologischer Hoch- und Niedrigwasser auszugehen (IPCC 2023). Wie sich lokale Regime verändern, lässt sich allerdings kaum vorhersagen (Jacob et al. 2017).⁷²
- da meteorologische und hydrologische Regime variieren und die betrachteten Flüsse und Pilotgebiete erhebliche regionale Varianzen (vom Flussbett, über assoziierte Institutionen und Wassernutzungen, bis hin zu Infrastrukturen bzw. Talsperren) aufweisen, lassen sich keine übergreifenden Dynamiken oder Szenarien identifizieren.
- Hydrososiale Transformationsprozesse, vor allem die geplante Anpassung der Flusseinzugsgebiete befindet sich aufgrund der WRRL im dritten Bewirtschaftungszeitraum 2022-2027. Daher liegen Pläne der zuständigen Ministerien vor und in einigen Ländern liegen bereits Niedrigwasserstrategien und Konzepte vor, etwa in Bayern (LfU 2016) und in Brandenburg (MLUK 2021), oder sind vorgesehen (MUNV 2024). Mögliche Maßnahmen zur Minimierung des Niedrigwasserrisikos beginnen meist mit dem flächendeckenden Monitoring, über die Rückhaltung von Wasser in der Fläche bis hin zu kurzfristigen (Bewässerungs-) Verboten.

⁷² Die Kontingenz ist auch auf diverse ‚tipping elements‘ oder Kipppunkte (z.B. Zerstörung des Regenwaldes, Verlangsamung und Auflösung des ‚Jet Streams‘, das Schmelzen polarer Eiskappen etc.) zurückzuführen, bei deren Überschreiten sich unabsehbare Dynamiken im Klimawandel entfalten können (Folke et al. 2021: 841).

- Sog. „Wild Cards“, also Ereignisse mit kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit bei gleichzeitig großer Auswirkung, sind vielseitig denkbar; etwa als katastrophale, kumulierende oder sich abwechselnde Wetterextremereignisse, technologische Lösungen zur Verlangsamung oder Beschleunigung der Klimawandelfolgen (etwa durch „Carbon-Capturing“-Technologien), bis hin zu Wasserbewegungen und -konflikten.

Während die politischen Treiber identifiziert wurden (AP 1.2.), sich technologische, bauliche und politische Maßnahmen bereits abzeichnen, und die Richtung klimatischer Trends abzuschätzen ist, treten Fragen insbesondere in der regionalen Umsetzung und in der Art und dem Ausmaß sozial-ökologischer Wassernutzungen auf. Bei lokalen Wassernutzungen sind hydrologische (Grund- und Oberflächen) Wasserdefizite dann relevant, wenn sie die Energieversorgung, industrielle oder landwirtschaftliche Produktionen betreffen. Die öffentliche Trinkwasserversorgung ist gesetzlich priorisiert. Auf Bundeswasserstraßen tritt die Befahrbarkeit der Oberflächengewässer hinzu. Aus ökologischer Perspektive sieht die WRRL die Gewährleistung der Durchgängigkeit der Gewässer, den Erhalt bzw. die Optimierung ihrer ökologischen Qualität und ggf. Renaturierung der Gewässer vor. In Niedrigwasserphasen könnten sowohl Entnahmen (Wasserquantität) als auch Einleitungen (Wasserqualität) auf kommunaler Ebene limitiert werden. Wie anhand der Selke (Franke 2024) und anhand der Elbe (s. Hein/Thomsen 2023) gezeigt wurde, finden sozio-hydrologische Transformationsprozesse bereits statt; sie enthalten jedoch verschiedene Zukunftsperspektiven, um dessen Umsetzung gerungen wird. Konkrete Szenarien sind stets situiert, d.h. sie richten sich am Fließgewässer aus und lassen sich nicht verallgemeinern.

Für die Pilotgebiete zeichnen sich daher spezifische Herausforderungen ab, die z.T. bereits in den Net-Map-Erhebungen diskutiert wurden (s. Kap. 1.5.). Eine Zukunftswerkstatt wurde am 07. Februar 2025 mit drei Teilnehmern aus der Rur-Region durchgeführt und bildet eine weitere Grundlage. Szenarien des Niedrigwasserschutzes sind eng verbunden mit denen des Hochwasserschutzes. Wie optimale Lösungen aussehen (sollten), ist eine politische Frage und Teil gegenwärtiger Aushandlungsprozesse, weshalb je Flussgebiet Schwerpunkte gesetzt wurden. Für die Selke wurde die Relevanz der Niedrigwasserfrage diskutiert, da der HWS hier Priorität hatte und HWS-Lösungen auch Antworten auf Niedrigwasserfragen enthalten. An der Elbe wird die Wasserführung insbesondere in wärmeren Sommermonaten diskutiert. (Folkens 2024) Hier stehen Argumente für eine Flussvertiefung denen des ökologischen Erhalts der Elbe gegenüber. Die Grundlage für Szenarien an der Elbe bilden Dokumentationen zur öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen des GKE Elbe (GKE 2022).

Folgende Szenarien werden für die Pilotgebiete diskutiert:

- Für die Selke (Kap. 8.1.) wird anschließend an die Net-Map-Erhebung erörtert, wie alternative Flächennutzungskonzepte bestehende (NWRM-) Planungen beeinflussen und sich Zielkonflikte entwickeln.
- Für die Rur (Kap. 8.2.) werden Szenarien des Trockenfallens der Rur sowie der Tagebausee-flutung diskutiert.
- Am Beispiel der Elbe (Kap. 8.3.) wird diskutiert, wie Wasserstraßen mit großen Abflussmengen zum Ausgleich für naheliegende, niedrigwasserbedrohte Regionen genutzt werden könnten.

8.1 Selke

An der Selke finden durch ein Hochwasser 1994 initiierte Anpassungsprozesse statt, die seither Thema im „Selke-Beirat“ sind. Um den HQ₁₀₀-Hochwasserschutz zu gewährleisten, wurden (zum Zeitpunkt der

Erhebung) zwei Hochwasserrückhaltebecken (HRBs) diskutiert: eines sollte bei Straßberg und eines vor Meisdorf errichtet werden. Das Meisdorfer HRB mobilisierte lokale Widerstände der Naturschutzverbände, der Bürgerinitiativen, sowie der Anwohner*innen. Grundlegender Konsens bestand darin, dass das Straßberger HRB für den Hochwasserschutz unerlässlich ist. Ein Erfolg des lokalen Selke-Dialogs besteht darin, dass seit 05/2022 die Ausführungsplanung des Straßberger HRBs begonnen hat (TSB, o.A., a.). Beide HRBs stellen weitreichende bauliche Eingriffe und somit ‚technokratische Lösungen‘ dar, die den HWS zwar gewährleisten, aber ggf. ökologische Faktoren vernachlässigen. Die „Hochwasserschutz Jetzt!“-Bürgerinitiative symbolisierte den Frust von Bürger*innen gegenüber der Langwierigkeit des Verfahrens, in welchem dreißig Jahre nach dem 1994er Hochwasser noch keine Lösung erzielt werden konnte. Sie pochten auf eine zeitnahe Umsetzung der HRBs. Ihr gegenüber stehen Forderungen einer Bürgerinitiative, die den naturnahen HWS einfordert.⁷³ Der Selke-Beirat bildet die Plattform für Diskussionen über den zukünftigen HWS an der Selke, die alle relevanten Akteure impliziert (s. Kap. 1.5.). Nach derzeitigem Stand werden an der unteren Selke für das Meisdorfer Rückhaltebecken laut Talsperrenverband (TSB o.A., b.) Alternativen geprüft. Eine Ausstellung im Museumshof Meisdorf verdeutlicht die Aktualität des Themas (TSB 2025b). Im November 2025 berichtet das MWU (2025) von einem Rückhaltebecken bei Ermsleben, das – anschließend an Gespräche im Selke-Dialog – den HQ₁₀₀-HWS an der Selke gewährleisten soll und für das eine öffentliche Informationsveranstaltung im Frühjahr 2026 geplant ist. In Straßberg soll 2026 mit der Errichtung des HRBs begonnen werden. Der HWS überschatten an der Selke Niedrigwasserfragen. Geplante HWS-Maßnahmen beeinflussen den Niedrigwasserschutz, denn durch die geplanten HRBs ließe sich unter Umständen der Wasserstand der Selke in Niedrigwasserphasen auffüllen.

Darüber hinaus beeinflussen Überlegungen zum Ausbau von erneuerbaren Energien den Niedrigwasserschutz. Es wird berichtet, dass an der Selke Potenzialflächen ausgewiesen wurden, was für lokale Flächeneigentümer*innen und Ortschaften⁷⁴ in erster Linie finanziell attraktiv ist.⁷⁵ Historisch bedingt sind die Flächeneigentumsverhältnisse an der Selke, wo diverse (ehemals) landwirtschaftliche Betriebe über Flächen verfügen, stark fragmentiert, was Bauvorhaben erschwert.

⁷³ Aufschluss über die derzeitigen Entwicklungen und die Positionen der Bürgerinitiative „Naturnaher Hochwasserschutz Selke“ gibt die Webseite der Bürgerinitiative: <https://www.rettet-das-selketal.de/>

⁷⁴ „[W]ir wissen, dass die Kommunen alle klamm sind (...), ja? [N]atürlich lässt sich mit erneuerbaren Energien momentan sehr, sehr viel Geld verdienen. (...). Ja, also, wenn man mit dem Bürgermeister redet, der sagt: Ja, klar möchte er nicht unbedingt, dass alles in Industrieanlagen umwandeln. Aber er kann natürlich auch nicht sagen, er verzichtet auf die Einnahmen für die Kommune, ja? Und deswegen ist das auch zu verstehen, dass die Kommunen interessiert sind (...). Aber die Forstverwaltung unterstützt letztendlich auch den Waldumbau und die Errichtung von Windkraftanlagen im Wald. Also da, da ist ganz viel Geld sozusagen im Spiel, und es ist natürlich gut, wenn die Gelder auch in der Region bleiben, und bei den Kommunen, (...) und nicht an irgendwelche größeren Energiekonzerne vielleicht fließen, oder eben an Hedgefonds oder sowas. (...) [A]uch die Anwohner und die Kommunen vor Ort [sind] halt auch daran interessiert (...), das zu unterstützen halt, ja? Um also auch diese Geldquellen im Prinzip sich zu erschließen. (Selke, Zweite Erhebung, #00:43:40-2#)

⁷⁵ „Also, viele Einwohner haben dort eigene Flächen. Relativ kleine Flächen, und so, das sind also dann oft mehrere 100 Eigentümer, die die Flächen dort besitzen. Und ähm um diese Freiflächen herum, die landwirtschaftlich genutzt werden, sind dann die Wälder (...). Diese Freiflächen, die sind jetzt quasi in Planung. Also da sind teilweise jetzt Potenzialgebiete ausgewiesen wurden (...). Und die Arbeiten dazu sind in vollem Gange, würde ich sagen.“ (Selke, Zweite Erhebung, #00:30:09-4#)

Der prospektive Ausbau erneuerbarer Energien entlang der Selke beeinflusst den Wasserhaushalt, wie ein Teilnehmer beschreibt. Er entwirft ein hydrologisch-relevantes Szenario zu Niedrig- und Hochwasserphasen, dass auf den Zusammenhang der Bodenbewirtschaftung und Niedrigwasserereignisse hinweist, vorausgesetzt die umliegenden Flächen werden für erneuerbaren Energien genutzt. Zuerst sei zu bedenken, dass bei ca. 9 geplanten Windrädern Fundamente von „20 mal 20 Meter in der Fläche und dann nochmal in die Tiefe, vielleicht sechs bis acht Meter oder so, damit die Dinger nicht umkippen“ (Selke, Zweite Erhebung, #00:41:03-6#) eingeplant werden müssten. Die Fundamente sorgen für den Verlust der Speicherfähigkeit des Bodens, wobei sich die Größenordnung des Verlustes an Speicherfähigkeit berechnen lässt.

„[D]as kann man ja ausrechnen, (...) wie viel Volumen Speicherfähigkeit (...) uns durch ein so ein Fundament verloren geht. Und wenn man das in so kleinen Einzugsgebieten (...), die vielleicht anderthalb, zwei Quadratkilometer haben, wenn man dort also mehrere Windräder aufstellt, dann kann das durchaus schon ein nennenswerter Verlust an Speicherfähigkeit hervorrufen, also Rückhaltefähigkeit des Bodens, ne? Die Rückhaltefähigkeit des Bodens ist letztendlich ja die Voraussetzung dafür, dass wir praktisch in Dürreperioden (...) dann natürlich noch Wasser haben, was dann aus dem Boden in die Gewässer eingespeist wird. (...) Und wenn das nicht mehr da ist, dieses Speichervolumen, dann würde natürlich eine (...) Trockenperiode hinsichtlich der Abflüsse verschärft werden.“ (Selke, Zweite Erhebung, #00:41:03-6#)

Der Teilnehmer skizziert Zielkonflikte zwischen dem Erhalt der natürlichen Umwelt und dem Ausbau erneuerbarer Energien in sozial-ökologischen Adaptionsprozessen. Die Freiflächen nahe der Selke stellen Potenzialflächen dar, die auch für PV-Anlagen genutzt werden könnten, die ebenfalls die Speicherfähigkeit des Bodens beeinflussen;

„Bei den PV-Anlagen ist es so (...). Die werden natürlich flächenhaft ausgebaut. Dann ist es natürlich sinnvoll, dass man zum Beispiel (...) die südexponierten Hänge mit den Anlagen bestückt, und die sind dann halt flächenhaft natürlich mit den Solarzellen belegt. Dort (...) kann natürlich kein Regen mehr in den Boden sickern. Der Regen fällt also quasi auf die Solarpanels und fließt auf die Solarpanels ab und wird dann quasi dort abtropfen (...). Die sind ja alle schräg aufgestellt. Und natürlich würde die Wassermenge dann dem Boden auch zur Verfügung stehen, der ist aber dann sozusagen auf einen kleinen Bereich beschränkt. Der Boden würde sich einen kleinen Bereich sehr stark auf aufsättigen und das Wasser würde dort bevorzugt praktisch in die Tiefe transportiert werden. Die restliche Fläche unter den Panels bleibt trocken. Deswegen ist das quasi zwar Versiegelung der Flächen, aber so eine Art Teilversiegelung (...).“ (Selke, Zweite Erhebung, #00:41:03-6#)

Relevant ist der Verlust an Speicherfähigkeit des Bodens aber auch für Hochwasserlagen: Auch hier wäre der Abfluss durch PV-Anlagen oder Windräder beeinflusst, da Niederschläge auf kleinerer Fläche versickern und abfließen, und Wassermengen nicht mehr (in dem Umfang) im Boden zurückgehalten werden können. Durch den Ausbau der Erneuerbaren gingen wäre nicht nur die Böden betroffen, sondern auch die Waldflächen und die Vegetation, die nicht aufgeforstet würde.

„D]as Waldgesetz hat in Sachsen-Anhalt bisher quasi vorgesehen, dass dort Windkraftanlagen im Wald verboten waren. (...) Das heißt also, praktisch diese Flächen, die jetzt also praktisch durch die Trockenheit geschädigt sind, die werden dann teilweise nicht mehr aufgeforstet, weil sie praktisch dann in Standorte für Windkraftanlagen umgewandelt werden können. (...) Das heißt also, praktisch auch im Wald geht uns diese Speicherkapazität der Böden verloren und auch natürlich die Speicherkapazität der Vegetation. (...) Jeder weiß, dass Wald ja ein hervorragender Wasserspeicher ist. Eigentlich der beste, den wir haben, in der Fläche ja. Und der geht dann auch verloren, dort, wo dann Freiflächen entstehen. (Selke, Zweite Erhebung, #00:41:03-6#)

Während die HRBs im unteren Selke-Unterlauf geplant werden, können Maßnahmen, die im Oberlauf erörtert werden, die Hoch- und Niedrigwasserrisiken zu verschärfen:

„Wir versuchen natürlich jetzt gerade, Hochwasserrückhaltebecken zu errichten, aber oberhalb dieser Becken machen wir eigentlich Maßnahmen, die sozusagen die Situation verschärfen.“ (Selke, Zweite Erhebung, #00:41:03-6#)

Das Szenario des Ausbaus erneuerbarer Energien an der Selke verdeutlicht Zielkonflikte in sozial-ökologischen Transformationsprozessen: der Ausbau erneuerbarer Energien würde Speicher- und Abflusskapazitäten der Böden und Wälder reduzieren, weshalb die Schutzmaßnahmen gegenüber Wetter- und Wasserextremen im Unterlauf umso dringlicher werden. Außerdem wird deutlich, wie eng soziale und hydrologische also „hydrosoziale“ (Schulz/Gros 2024, Linton/Budds 2014) Prozesse miteinander verknüpft sind. Eine alleinige Betrachtung hydrologischer Prozesse, auch inklusive angrenzender terrestrischer und ökologischer Prozesse, ist nicht ausreichend, da soziale Prozesse erneut hydrologische, ökologische und terrestrische Prozesse in Gang setzen. An der Selke zeigt sich, dass potenziell ressourcenarme Kommunen durch den Ausbau erneuerbarer Energien Treibhausgas-Emissionen reduzieren (sog. Mitigation) und finanziell profitieren können, gleichzeitig aber durch den Verlust an Speicherkapazitäten der Böden und Wälder die Risiken von Wasserextremen erhöhen (sog. „Adaption“).

8.2 Rur

Anders als an der Selke stehen an der Rur Fragen zukünftiger industrieller Wassernutzungen im Fokus. An der Rur spielen Szenarien zukünftiger Niedrigwasser (zumindest aus Sicht der Befragten) eine untergeordnete Rolle. Ein Niedrigwasserereignis ist an der Rur durch die 5 m³/s Mindestabgabe nicht zu erwarten, es sei denn, die Talsperren-Füllstände erreichen ein kritisches Maß. Industrielle Wassernutzer*innen bereiten sich auf trockenere Zukünfte vor oder versuchen durch inkrementelle Innovationen den Wasserverbrauch zu minimieren, wie sich an der Modellfabrik Papier zeigt.⁷⁶ Das Talsperrensystem sei darauf ausgelegt, bis zu zwei Jahre ohne Niederschläge auszukommen und Wasserverbrauchseinsparungen haben in der Weiterentwicklung des Produktionsprozess keine Priorität, sondern sind Teil einer insgesamt ressourcenschonenderen Produktion:

„Also (...) es [ist] immer so, wenn sie in eine neue Anlage investieren, dann ist die neue Anlage automatisch effizienter als die alte. Das heißt, sie brauchen weniger Strom beziehungsweise grundsätzlich weniger Energie, und sie brauchen weniger Wasser. (...) Aber es ist jetzt nicht so, dass sich Unternehmen intensiv mit der Frage befassen: „Wie kann ich den Wassereinsatz reduzieren, sodass ich im Niedrigwasserfall noch, ähm noch Wasser zur Verfügung habe?“ Also, das sind Prozesse, die laufen by the way aber jetzt nicht unter dem Gesichtspunkt: „Hilfe! Wir haben weniger Wasser zur Verfügung zukünftig. Wie produziere ich dann noch Papier mit weniger Wasser?“ Also das nicht. Zumal wir sind hier (...) sowieso privilegiert dadurch, dass wir das geregelte Talsperrensystem haben. Das gibt, das gibt es ja auch nicht umsonst. Also mit einer Mindestwasserführung von fünf Kubikmetern in der Rur sind wir sehr gut bestellt und unser Talsperrensystem (...) kann bei der aktuellen Talsperrenführung für zwei Jahre kann das Wasser speichern, und wir könnten zwei Jahre lang ohne Niederschläge auskommen. Also, da sind wir hier in der Rur wirklich sehr, sehr privilegiert im Vergleich zu anderen Regionen Deutschlands.“ (Rur, Zweite Erhebung, #00:52:02-0#)

An der Rur wird industriellen Wassernutzungskonflikten auch für den unwahrscheinlichen Fall von Niedrigwasser vorgebeugt, da im Industrieverband Regeln für Streitschlichtungen vorgesehen sind. Sollte die Wasserzufuhr ausfallen und keine Reserven vorliegen – auch wenn es diesen Fall in der jüngeren Vergangenheit nicht gab – käme es zu temporären Produktionsstopps, wie es sie in trockeneren Regionen Europas schon gab, und, wie sie aus der Historie bekannt sind:

⁷⁶ „Gut 60 % des gesamten Energieverbrauchs fallen bei der Papierfertigung allein beim Trocknungsprozess an. Könnte Papier auch gänzlich ohne Wasser für den Fasertransport hergestellt werden? Erforscht werden die Einsatz- und Anwendungspotenziale alternativer Trägermedien wie Luft und verschiedene nicht-wässrige Flüssigkeiten, um Papier trocken oder mit deutlich geringerem Energiebedarf herzustellen.“ (Modellfabrik Papier 2025) Einsehbar unter: modellfabrikpapier.de/fomop/

„In Italien (...) war es allerdings so, dass während der letzten Dürrephase in manchen Regionen die Papiermaschinen abgestellt werden mussten, weil nicht mehr genug Wasser zur Verfügung war. Und früher, bevor es die Talsperren gab hier in Düren, war es im Übrigen auch so, dass im Sommer die Papiermaschinen nicht laufen konnten, zum Teil, weil zu wenig Wasser in der Rur war. Also das ist keine Situation, die jetzt völlig neu wäre für die älteren Semester in den Papierfabriken. Da sind sie aber weit vor der vor der Kriegszeit angelangt.“ (Rur, Zweite Erhebung, #00:52:02-0#)

Den größten Verbrauch und somit hydrologischen Einfluss auf Oberflächen- und Grundwasser hat der Energiekonzern RWE sowie anliegende Braunkohlekraftwerke. Der Braunkohleausstieg ist laut RWE für 2030 vorgesehen (RWE 2022). Wasserwirtschaftlich relevant sind in der (umstrittenen) Entscheidung zur Braunkohleverstromung bis 2030 insbesondere

- a. die Einleitung der Sumpfungsgewässer: Wie zunächst aus einem Gutachten des MWKIE Nordrhein-Westfalens (zur Zukunft Lützeraths) hervorgeht, stützen die Sumpfungsgewässer den Wasserstand u.a. im Rurverlauf. Gleichzeitig verschlechtern sie aufgrund chemischer Belastungen und hoher Temperaturen die Gewässerqualität („Hintergrundpapier Braunkohle“; MULNV 2022), und verhindern dadurch das Erreichen der in der WRRL vorgesehenen Ziele zur Gewässergüte.
- b. Die Absenkungen der Grundwasserkörper tragen zur Stabilisierung der Abbruchkanten bei und werden daher auch nach dem Ausstieg beibehalten. RWE geht davon aus, dass die Grundwasserkörper eine gute Wasserqualität aufweisen und nur geringfügig durch den Tagebau chemisch belastet sind.
- c. Um die Tagebaue zu füllen, soll über eine Transportleitung Wasser aus dem Rhein entnommen werden. Die Bezirksregierung Arnsberg genehmigte RWE hierfür den Bau eines 45km langen Rohrleitungssystems sowie die Entnahme von bis zu 18m³/s. Für die Tagebauseeflutung ist ein Zeitraum von 40 Jahren vorgesehen und soll weitere 30 Jahre betrieben werden, um Versickerungsverluste auszugleichen (Bezirksregierung Arnsberg 2024).

Durch den Braunkohlestop, die geplante Tagebauseeflutung, die Rheinwassertransportleitung und den sukzessiven Anstieg des Grundwassers sind die ökologischen, hydrologischen und sozialen Folgen für die Region – im Zeitraum von 40 plus 30 Jahren – nur begrenzt absehbar. Mit dem Braunkohlestop wird der Strukturwandel der Region vorangetrieben, in dessen Folge RWE auf Wasserstoffkraftwerke will. Die Tagebauflächen könnten auch anderen Nutzungen zugeführt werden, etwa der Energiegewinnung durch erneuerbare Wind- und Solarenergie (RWE 2022). Wasserwirtschaftlich relevante Zielkonflikte, die sich zwischen der Nutzung erneuerbarer Energien und der Bodenbewirtschaftung ergeben können, wurden am Beispiel der Selke diskutiert (s. Kap. 8.1.).

Im ‚**best-case**‘-Szenario erholen sich die regionalen Grundwasserkörper. Die an der Rur gelegene Industrie könnte, falls notwendig, durch Grundwassernutzungen und entsprechende Entnahmegenehmigungen die Ausfallsicherheit in sehr trockenen Jahren erhöhen. Der Tagebausee würde zum Naherholungs- und Tourismusziel (Stichwort: „Rheinische Seenplatte“), Feuchtgebiete, Auen und ein insgesamt klimaresilienteres Ökosystem würden rund um den See entstehen. Das Rheinische Revier wäre dann ein Beispiel für den gelungenen Strukturwandel, dessen Kosten nicht nur durch öffentliche Gelder, sondern auch durch den Konzern getragen würden. Soziale Bewegungen und zivilgesellschaftlichen Initiativen könnten sich an der Gestaltung des Raumes beteiligen und das öffentliche Wasserbewusstsein fördern.

Bei der Tagebauseeflutung handelt es sich aber auch um ein weitreichendes und langfristiges sozial-ökologisches Infrastrukturvorhaben. Im ‚**worst-case**‘-Szenario beansprucht die Tagebauseeflutung sich verknappende Wasserressourcen, sodass Wassernutzungskonflikten in der Region zwischen der

industriellen Wasserentnehmer*innen, der Tagebauseeflutung und der Rheinschifffahrt wahrscheinlicher werden. Verzögerungen der Tagebauseeflutung treten aufgrund von Wassermangel auf, etwa weil sommerliche Waldbrände in der Eifel oder im Hochmoor Hohe Venn mit Seewasser bekämpft werden müssen. Die Tagebaugruben bilden sich Wasserwüsten, die aufgrund der Altlasten des Tagebaus chemisch belastet sind und kaum Habitate bieten. Mit zunehmenden Füllständen können riskante und kostenintensive Böschungs- und starkregenbedingten Erdrutsche in Tagebaunähe auftreten (SZ 2022), die eine touristische Nutzung immer wieder verzögern. Stetig steigenden Kosten zur Befüllung des Sees bergen Konfliktpotenzial zwischen Bezirksregierung und Unternehmen. Soziale Bewegungen greifen die Wasserkonflikte auf und eskalieren Demonstrationen.

Grundsätzlich besteht bei der zukünftigen Nutzung der Tagebauflächen ein großes Potenzial zur Entwicklung nachhaltiger, aquatischer Ökosysteme und Wasserspeicher, sofern die Flächen entsprechend bewirtschaftet und die Finanzierung sichergestellt ist. Gleichzeitig stellt das zukünftig verfügbare Wasservolumen eine kritische Variable dar. Die Finanzierung der Anpassungsvorhaben birgt Konfliktpotenzial und vergangene Böschungs- und Erdrutsche zeigen Risiken auf, die von den Tagebauen im Kontext von Wetterextremen ausgehen. Schließlich hat die Absenkung der Grund- und die Einleitung der Sumpfungsgewässer einen großen Einfluss auf den regionalen Wasserhaushalt. Die Folgen für die Region insgesamt sind komplex, sodass es hier auf die Umsetzung konkreter Maßnahmen ankommen wird.

8.3 Elbe

Auch für die Elbe werden in den Net-Map-Erhebungen zukunftsrelevante Fragen aufgegriffen. In der bestehenden Literatur ist es unklar, ob und wie sich das Abflussregime an der Elbe aufgrund steigender Durchschnittstemperaturen verändert. Sich verkürzende Schneebedeckungsdauer könnte zu früheren winterlichen Abflüssen führen. In den Sommermonaten ist mit höheren Verdunstungsraten und einem Rückgang des Jahresniederschlags zu rechnen, die tendenziell zu niedrigeren Abflüssen führen (Bronstert et al. 2017: 95). Erforscht wird auch, ob und inwiefern Starkniederschläge in Sommermonaten die Hochwassergefahr erhöhen (ebd.).

Lokalpolitisch wurde die **Einschränkung von Wasserentnahmen** in Trockenperioden diskutiert, zu denen es bereits kam (Landkreis Jerichoer Land 2025). Wasserdemonstrationen wurden zunächst scherzhaft angesprochen:

„Es gab natürlich dann auch wieder Leute, die sagen: "Wir lassen uns doch nichts vorschreiben! Wir bewässern unseren Garten wann wir wollen!". Und ich glaube, die sind dann halt echt rausgegangen, mittags in der Mittagshitze und haben bewässert. Aber das sind ja eigentlich auch nur logische Anweisungen, ne? Klar, es gibt dann wahrscheinlich irgendwann mal eine Demonstration gegen gegen "Für Gartenbewässerung um zwölf Uhr!" (Elbe, Erste Erhebung, #00:43:58-9#)

Dennoch könnten Wasserverteilungsfragen in längeren Trockenperioden zum Politikum werden, welches Land- und Energiewirtschaft, die industrielle Produktion und private Verbraucher betrifft. Wird Wasser knapp, ist nicht auszuschließen, dass die als selbstverständlich erachtete Wasserverfügbarkeit symbolisches Konfliktpotenzial birgt (Stichwort: Poolshaming). Denkbar ist auch, dass in niederschlagsreicheren Phasen individuelle Nutzer*innen Wasser (etwa in privaten Zisternen) zurückhalten.

Im Kontext industrieller Nutzungen werden weniger zukünftige Wasserentnahmen diskutiert, als vielmehr die Nutzung der Elbe als Wasserstraße. Anhand der Diskussionen in der GKE Elbe (GKE 2022) zeigt sich, dass die Schiffbarkeit der Elbe diskutiert wird, weil sie eine wichtige Wasserstraße (auch für Tschechien) darstellt. Niedrigwasser-angepasste Schiffe werden zwar in den Net-Map-Erhebungen und

in den GKE-Bürgerbeteiligungsverfahren diskutiert, sie schienen derzeit jedoch wenig aussichtsreich. Martin Bock von der Elbe Allianz e.V. wird wie folgt zitiert: „Die Anschaffung flussangepasster Schiffe sei für die Schifffahrt derzeit nicht ökonomisch.“ (ebd.) Hier spielen auch grundsätzlichere Fragen zur Entwicklung des europäischen Warentransports eine Rolle – einerseits zur Art des Warentransports über Schiene, Straße oder Wasser, andererseits auch grundlegend bezüglich globaler Lieferketten.

Elbvertiefungen werden oberhalb des betrachteten Elbabschnitts in Hamburg diskutiert, wobei aufgrund der Stagnation des Containerschiff-Warenverkehrs der Nutzen neuerlicher Elbvertiefungen in Frage gestellt wird (Vöpel/Wolf 2025). Hein/Thompson (2023) bezeichnen die Elbvertiefung als einen der langwierigsten umweltpolitischen Konflikte Deutschlands. Sie heben hervor, dass die Elbvertiefungen und das damit verbundene Wachstumsversprechen für Hamburg ein einflussreiches und historisch-dominantes Narrativ ist, das langsam durch ökologisch-inklusive (Postwachstums-)Perspektiven herausgefordert wird. Als wasserwirtschaftlich- und zukunftsrelevant wurde in DRYRIVERS auch die geplante Intel-Ansiedlung diskutiert; etwa im Hinblick auf mögliche Parallelen zur Tesla-Ansiedlung in der Grünheide und deren Folgen. Allerdings gab Intel die Pläne für die geplante Chipfabrik im Sommer 2025 auf (Dampz 2025).

Auch die Elbe beeinflusst der Braunkohleausstieg.⁷⁷ Die Berliner Trinkwasserversorgung und Abwassertaufbereitung stützt sich stark auf Spreewasser – einem Fluss, der in Niedrigwasserperioden zu 75% aus Sümpfungsgewässern mitteldeutscher Tagebaue gefüllt wird, die (größtenteils) die LEAG betreibt (UBA 2023). Bleiben Sümpfungsgewässer ab ca. 2038 aus, sinkt der Spreeabfluss und es könnten Engpässe entstehen. Zur Lösung der zukünftiger Wasserknappheit werden diverse Szenarien diskutiert, die die Verdreifachung derzeitiger Berliner Entnahmeentgelte (auf 93ct) ebenso betrachten, wie ein „Elüberleiter“, der 3-4 Kubikmeter Elbewasser in die Spree umleitet. Je nach Ausgestaltung handelt es sich um weitreichende Transformationsvorhaben. Auch ein Elbwassertunnel unter dem Elbsandsteingebirge, dessen Bau mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen würde, wird diskutiert (Menzel et al. 2024, Menzel 2024, Happ-Frank 2025).⁷⁸ Für die Elbe zeichnet sich daher eine steigende Konkurrenz um Wasser und die Zunahme des anthropogenen Niedrigwasserrisikos ab. Die Umgestaltung der Elbe betrifft mehrere Bundesländer. Auch deshalb werden Finanzierungsfragen auftreten, da Kosten entweder durch öffentliche Gelder oder seitens der (Bergbau-)Unternehmen getragen werden müssten.

Grundsätzlich ist das FEG Elbe zu komplex, als dass es sich auf eindeutige Zukunftsszenarien reduzieren ließe. Während maßgeblich Treiber und Dynamiken oben beschrieben werden, betreffen konkrete Szenarien eher Flussabschnitte (wie die Elbe bei Hamburg oder den Elbeüberleiter). Da aufgrund des Klimawandels und einer Vielzahl weiterer Variablen keine einheitlichen Szenarien bestehen, eignen sich Flüsse eher dazu aufzuzeigen, welche Varianz an Zukunftsszenarien und Erwartungshaltungen besteht.

⁷⁷ „Ich glaube, wenn die halt die Tagebaue zumachen, dann geht halt die Grundwassersümpfung weg, und dann hat die Spree drei, vier Kubikmeter weniger, und das könnte für die Bundeshauptstadt durchaus problematisch werden. Was meinte sie plakativ? Dann entweder mehr Wasser reinpumpen oder Spreewald abreißen oder Trinkwasserversorgung, Berlin oder Spreewald, weil im Spreewald halt auch viel Wasser verloren geht, ne?. Also verdunstet viel. (...) [D]a gibt es dann die Überlegung, oben bei Sachsen, glaube ich, die Talsperren zu füllen in der in der Spree. [A]ber das sind, das sind Überlegungen, ne. Aber da geht es auch um drei, vier Kubikmeter.“ (Elbe, Zweite Erhebung, #00:47:30-0#)

⁷⁸ Ausführlich untersucht werden die Vorhaben im WaX-Verbundprojekt SpreeWasser:N, online einsehbar unter: <https://www.spreewasser-n.de/>

9 Literaturverzeichnis

- Alan C. Hindmarsh, A. C., Serban. R. (2009): User Documentation for CVODES v2.1.0
- Bachmann, D. (2023): ProMaIDes: Protection Measures against Inundation Decision Support. Research group Flood Risk Management, University of applied sciences Magdeburg-Stendal; Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, RWTH Aachen University, Research group Flood Risk Management, University of applied sciences Magdeburg-Stendal. <https://pro-maides.myjetbrains.com/youtrack/articles/PMID>
- Ball, J., Hauck, J., Holland, R. A., Lovegrove, A., Snaddon, J., Taylor, G., & Peh, K. S. -H. (2022): Improving governance outcomes for water quality: Insights from participatory social network analysis for chalk stream catchments in England. *People and Nature*, 4(5), 1352–1368. <https://doi.org/10.1002/pan3.10390>
- Bailey, R.T., Wible, T.C., Arabi, M., Records, R.M., Ditty, J. (2016): Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. In: *Hydrological Processes* 30, pp. 4420–4433. <https://doi.org/10.1002/hyp.10933>
- Beguiría, S., Latorre, B.; Reig, F., Vicente-Serrano, S. M. (o.A.): SPEI Global Drought Monitor. Online: <https://spei.csic.es/map/maps.html#months=1#month=5#year=2025> [geprüft:16.12.2025].
- Rothstein, B., Müller, U., Greis, S., Scholten, A., Nilson, E. (2008): Elektrizitätsproduktion im Kontext des Klimawandels – Auswirkungen der sich ändernden Wassertemperaturen und des sich verändernden Abflussverhaltens
- Bezirksregierung Arnsberg (2021): Wasserrechtsverfahren für den Braunkohlentagebau Hambach [Pressemitteilung]. Online: <https://www.bra.nrw.de/presse/wasserrechtsverfahren-fuer-den-braunkohlentagebau-hambach-0>. Geprüft: 15.01.2026.
- Bezirksregierung Arnsberg (2024): Antrag der RWE Power AG auf „Zulassung des Rahmenbetriebsplans für den Bau und Betrieb der Rheinwassertransportleitung zu den Tagebauen Garzweiler und Hambach einschließlich Rheinwasserentnahme“. Online: <https://www.bra.nrw.de/bekanntmachungen/antrag-der-rwe-power-ag-auf-zulassung-des-rahmenbetriebsplans-fuer-den-bau-und-betrieb-der>. Geprüft: 15.01.2026.
- Bezirksregierung Köln (o.A.): Genehmigung von Wasserentnahmen aus Grund- und Oberflächenwasser. Online: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/themen/umwelt-und-natur/wasserwirtschaft/wasserversorgung/genuehmigung-von-wasserentnahmen-aus-grund>. Geprüft: 15.01.2026.
- Bezirksregierung Köln (2019): Hydraulik Rur: Hydraulischer Längsschnitt.
- BGR & SGD (2019): Hydrogeological Map of Germany 1:250,000 (HÜK250). Unter Mitarbeit von Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland (SGD)
- Bloomfield, J.P., Marchant B.P. (2013): Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 17, pp. 4769–4787. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>
- BMEL, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2019): Agenda Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel. BMEL. Online: https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/AMK-12-04-19-Agenda-Anpassung-Klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Geprüft: 15.01.2026.
- BMUB, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Anpassung an den Klimawandel. Erster Fortschrittsbericht der Bundesregierung zur Deutschen Anpassungsstrategie Erster Fortschrittsbericht der Bundesregierung zur Deutschen Anpassungsstrategie.

- BMUB. Online: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/fortschrittsbericht_anpassung_klimawandel_bf.pdf. Geprüft: 15.01.2026.
- BMUKN, Bundesministerium für für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (o.A.): Das Wasserhaushaltsgesetz. Online: <https://www.bundesumweltministerium.de/themen/wasser-und-binnengewasser/gewaesserschutzrecht/deutschland/das-wasserhaushaltsgesetz>. Geprüft: 15.01.2026.
- BMUKN, Bundesministerium für für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2024): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. BMUKN. Online: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaanpassung/das_2024_strategie_bf.pdf. Grprüft: 16.01.2026.
- BMUV, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): Nationale Wasserstrategie. BMUV. Online: <https://www.bundesumweltministerium.de/download/nationale-wasserstrategie-2023>. Geprüft: 15.01.2026.
- BMUV, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, BfN, Bundesamt für Naturschutz (2023b): NATURA 2000 IN DEUTSCHLAND (3. Aufl.). BfN. <https://doi.org/10.19217/brs216>
- Bollrich, G. (1996) Technische Hydromechanik, 4th edn. Verl. Bauwesen, Berlin
- Bronstert, A., Bormann, H., Bürger, G., Haberlandt, U., Hattermann, F., Heistermann, M., Huang, S., Kolokotronis, V., Kundzewicz, Z. W., Menzel, L., Meon, G., Merz, B., Meuser, A., Paton, E. N., & Petrow, T. (2017). Hochwasser und Sturzfluten an Flüssen in Deutschland. In: Brasseur, G.P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Springer: Berlin/Heidelberg, S. 87–101. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_10
- Bucher, B., Denneborg, M. (1993): Infiltrationsverhalten der Rur. In: Wasser und Boden (45), S. 173–177. Online: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6486104>. Geprüft: 26.01.2026.
- BUND, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (2025): Grundwasserstress in Deutschland. Online: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/fluesse/grundwasserstress-deutschland-studie-wasser-analyse-strukturell-entnahme-landkreise-bund-isoe-2025.pdf. Geprüft: 15.01.2026.
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bundesregierung. Online: https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaanpassung/das_gesamt_bf.pdf. Geprüft: 16.01.2026.
- Burt, R. S. (1992): Structural holes: The social structure of competition. Harvard: Harvard University Press.
- Buskamp, R., Schmidt, K.-H. (2003): Mittlerer jährlicher Abfluss und Abflussvariabilität. Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland: Relief, Boden und Wasser. Online: https://archiv.nationalatlas.de/wp-content/art_pdf/Band2_126-129_archiv.pdf. Geprüft: 15.01.2026
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023): IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Carlier, C., Wirth, S. B., Cochand, F., Hunkeler, D., Brunner, P. (2019): Exploring Geological and Topographical Controls on Low Flows with Hydrogeological Models. In: Ground Water 57:48–62. <https://doi.org/10.1111/gwat.12845>

- Cenobio-Cruz, O., Quintana-Seguí, P., Barella-Ortiz, A., Zabaleta, A., Garrote, L., Clavera-Gispert, R., Habets, F., Beguería, S. (2023): Improvement of low flows simulation in the SASER hydrological modeling chain. In: *Journal of Hydrology X* 18:100147. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100147>
- Chen, C., He, W., Zhou, H., Xue, Y., Zhu, M. (2020): A comparative study among machine learning and numerical models for simulating groundwater dynamics in the Heihe River Basin, northwestern China. In: *Sci Rep* 10:3904. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60698-9>
- Chung, S.Y., Kim, G.-B., Senapathi, V (2023): Drought and Groundwater Development. In: *Water* 15:1908. <https://doi.org/10.3390/w15101908>
- Condon, L.E., Kollet, S., Bierkens, M.F.P., Fogg, G.E., Maxwell, R.M., Hill, M.C., Fransen, H.-J.H., Verhoef, A., Van Loon, A.F., Sulis, M., Abesser, C. (2021): Global Groundwater Modeling and Monitoring: Opportunities and Challenges. In: *Water Resources Research* 57. <https://doi.org/10.1029/2020WR029500>
- Dampz, N. (2025, Juli 25): Konzern macht Milliardenverlust: Intel gibt Pläne für Chipfabrik in Magdeburg auf. *Tagesschau*. Online: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/intel-chipfabrik-100.html>. Geprüft am: 15.01.2026.
- Deutsches TalsperrenKomitee e.V. (2013): Talsperren in Deutschland. Springer Fachmedien: Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2107-2>
- Deutscher Bundestag (2019): Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018. Drucksache 19/9521. Online: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/095/1909521.pdf>. Geprüft: 16.01.2016.
- Diaz-Bone, R. (2008): Gibt es eine qualitative Netzwerkanalyse? In: *Historical Social Research* 33, S. 311-343. <https://doi.org/10.12759/HSR.33.2008.4.311-343>
- Dittmer, C., Drews, K., Eversheim, A., Heidenreich, A., Klopries, E.-M., Lindenlaub, S., Lobnig, C., Lorenz, D. F., Murdock, H., Reinert, J., Rusch, G., Schomaker, R. M., Schopp, N., Schüttrumpf, H., Skudelny, S., Thieken, A., & Voss, M. (2024): Governance und Kommunikation im Krisenfall des Hochwasserereignisses im Juli 2021 (No. 63; DKKV Schriftenreihe). Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V. (DKKV). Online: https://dkkv.org/wp-content/uploads/2024/08/HoWas2021_DKKV_Schriftenreihe_63.pdf. Geprüft am: 15.01.2026.
- DKKV Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (2022): Die Flutkatastrophe im Juli 2021 in Deutschland: Ein Jahr danach: die Aufarbeitung und erste Lehren für die Zukunft (2., überarbeitete Auflage). DKKV, Bonn.
- DKKV, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (2024): Governance und Kommunikation im Krisenfall des Hochwasserereignisses im Juli 2021. DKKV Schriftenreihe No. 63, DKKV. Online: https://dkkv.org/wp-content/uploads/2024/08/HoWas2021_DKKV_Schriftenreihe_63.pdf. Geprüft: 15.01.2026.
- Dolata, U. (2007): Technik und sektoraler Wandel: Technologische Eingriffstiefe, sektorale Adaptionsfähigkeit und soziotechnische Transformationsmuster (Working Paper). In: *MPIfG Discussion Paper*, No. 07/3. Online: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/19940/1/dp07-3.pdf>. Geprüft: 15.01.2026.
- Doppler, T., Fransen, H.-J.H., Kaiser, H.-P., Kuhlman, U., Stauffer, F. (2007): Field evidence of a dynamic leakage coefficient for modelling river–aquifer interactions. In: *Journal of Hydrology* 347:177–187. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.017>
- Droste, P. J. (2003): Wasserbau und Wassermühlen an der Mittleren Rur: Die Kernlande des Herzogtums Jülich 8.-18. Jahrhundert. Shaker: Düren.

- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2007): Merkblatt DWA-M 153 Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, 2007th edn. DWA-Regelwerk, vol 153. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef
- DWD, Deutscher Wetterdienst (o.A.): Dürre. Online: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=603288&lv2=100578>. Geprüft: 15.01.2026.
- Dyk, S. van, Haubner, T. (2021): Community-Kapitalismus. Hamburger Edition: Hamburg.
- Engelhard, C., Fach, S., Rauch, W. (2012): Langzeitverhalten der hydraulischen und stofflichen Leistungsfähigkeit von Muldenversickerungen im Sommer- und Winterbetrieb 2012
- Environment Agency (2017): Drought response: our framework for England. Online verfügbar unter <https://www.gov.uk/search/all>.
- Estrela, Teodoro; Sancho, Tomás A. (2016): Drought management policies in Spain and the European Union: from traditional emergency actions to Drought Management Plans. In: *Water Policy* 18 (S2), S. 153–176. DOI: 10.2166/wp.2016.018.
- Estrela, Teodoro; Vargas, Elisa (2012): Drought Management Plans in the European Union. The Case of Spain. In: *Water Resour Manage* 26 (6), S. 1537–1553. DOI: 10.1007/s11269-011-9971-2.
- European Commission (2007): Drought Management Plan Report. Including Agricultural, Drought Indicators and Climate Change Aspects. Online: [http://fis.freshwatertools.eu/files/MARS_resources/Info_lib/EEA\(2007\)Drought%20Management%20Plan%20Report.pdf](http://fis.freshwatertools.eu/files/MARS_resources/Info_lib/EEA(2007)Drought%20Management%20Plan%20Report.pdf). Geprüft: 16.01.2026.
- Eurostat (2024): CNTR_RG_20M_2024_4326.shp. Online: <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/gisco/geodata/administrative-units/countries>. Geprüft: 15.01.2026
- FGG Elbe (2021): Zweite Aktualisierung des Bewirtschaftungsplans nach § 83 WHG bzw. Artikel 13 der Richtlinie 2000/60/EG für den deutschen Teil der Flussgebietseinheit Elbe für den Zeitraum von 2022 bis 2027. Online: <https://www.fgg-elbe.de/berichte/aktualisierung-nach-art-13-2021.html>. Geprüft: 15.01.2026.
- Florin, M.-V., & Bürkler, M. T. (2017): Introduction to the IRGC Risk Governance Framework (revisited version). EPFL International Risk Governance Center: Lausanne. <https://doi.org/10.5075/EPFL-IRGC-233739>
- Franke, K., Wald, A. (2006): Möglichkeiten der Triangulation quantitativer und qualitativer Methoden in der Netzwerkanalyse. In: Hollstein, B., Straus, F. (Hrsg.): *Qualitative Netzwerkanalyse*. VS Verlag für Sozialwissenschaften: Wiesbaden, S. 153–175. https://doi.org/10.1007/978-3-531-90074-2_6
- Franke, T. (2024): Flusspolitische Konflikte im Selketal: Transformative Zukunftsnarrative in hydro-soziologischen Netzwerken. In: *Berliner Debatte Initial* 35(4), S. 477–96. doi:10.25162/bdi-2024-0029.
- Franke, T. (2025): Stadt, Land, Fluss. Transformative Netzwerke und schwierige Triaden in hydrosozialen Transformationsprozessen an der Rur. In: *Soziologie und Nachhaltigkeit (SuN)*, Bd. 11, H. 2, S. 86-108. <https://doi.org/10.17879/sun-2025-9182>
- Folkens, L., Bachmann, D., Satzinger, U., Schneider, P. (2024): The Hydro-Economic Modeling of Low-Flow Events on the Middle Elbe: Assessing Socio-Economic Impacts on River Navigation. In: *Water* 16:3497. <https://doi.org/10.3390/w16233497>
- Förster, H., Lilliestam, J. (2010): Modeling thermoelectric power generation in view of climate change. In: *Regional Environmental Change* 10, pp. 327–338. <https://doi.org/10.1007/s10113-009-0104-x>
- Garrote, Luis; Martin-Carrasco, Francisco; Flores-Montoya, Francisco; Iglesias, Ana (2007): Linking Drought Indicators to Policy Actions in the Tagus Basin Drought Management Plan. In: *Water*

- Resour Manage* 21 (5), S. 873–882. DOI: 10.1007/s11269-006-9086-3.
- Geels, F. W. (2002): Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. In: *Research Policy*, 31(8–9), pp. 1257–1274. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Geels, F. (2005): Co-evolution of technology and society: The transition in water supply and personal hygiene in the Netherlands (1850–1930) - a case study in multi-level perspective. In: *Technology in Society* 27(3), pp. 363–397. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2005.04.008>
- Geels, F. W. (2011): The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. In: *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), pp. 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>
- Geels, F. W. (2014): Regime Resistance against Low-Carbon Transitions: Introducing Politics and Power into the Multi-Level Perspective. In: *Theory, Culture & Society* 31(5), pp. 21–40. <https://doi.org/10.1177/0263276414531627>
- Geels, F. W., Schot, J. (2007): Typology of sociotechnical transition pathways. In: *Research Policy* 36(3), pp. 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- GKE, Gesamtkonzept Elbe (2022): Dokumentation der 3. Regionalkonferenz. BMV/BMUKN. Online: https://www.gesamtkonzept-elbe.de/Webs/Projektseite/GkElbe2020/DE/Zusammenarbeit/Regionale_Beteiligung/3_Regionalkonferenz_2022/Dokumentation/RK3-Uebersichtsseite-node.html. Geprüft: 15.01.2026.
- Gottschlich, D., Hackfort, S., Schmitt, T., von Winterfeld, U. (2022): *Handbuch Politische Ökologie: Theorien, Konflikte, Begriffe, Methoden*. Bielefeld: Transcript.
- Guzman, J.A., Moriasi, D.N., Gowda, P.H., Steiner, J.L., Starks, P.J., Arnold, J.G., Srinivasan, R. (2015): A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. In: *Environmental Modelling & Software* 73, pp. 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.011>.
- Hansen-Ampah, A. T. (2022): *Gemeinsam scheitern: Entwicklung eines netzwerkbasiereten Innovationsmodells zur prognostizierenden (Nachhaltigkeits-)Analyse soziotechnischer Neuerungen* [RWTH Aachen University]. In *Dissertation: Bd. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen* <https://doi.org/10.18154/RWTH-2023-03546>
- Happ-Frank, E. (2025, Mai 30): Statt Elbe-Umleitung: DIW setzt auf teureres Wasser gegen Spree-Notstand. *ZfK Zeitung für kommunale Wirtschaft*. Online: <https://www.zfk.de/wasser-abwasser/statt-elbe-umleitung-diw-setzt-auf-teureres-wasser-gegen-spree-notstand>. Geprüft: 15.01.2026.
- Harbaugh, A.W. (2005): MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model-- the ground-water flow process: Techniques and Methods. In: *Techniques and Methods* 6-A16. <https://doi.org/10.3133/tm6A16>
- Härpfer, C., Franke, T. (2024): Akteur-Netzwerk-Theorie und Post Akteur-Netzwerk-Theorie. In: Stegbauer, C./ Häußling, R. (Hrsg.): *Handbuch Netzwerkforschung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-658-37507-2_29-1
- Haslinger, K., Koffler, D., Schöner, W., Laaha, G. (2014): Exploring the link between meteorological drought and streamflow: Effects of climate-catchment interaction. In: *Water Resources Research* 50, pp. 2468–2487. <https://doi.org/10.1002/2013WR015051>.
- Häußling, R. (2006): Ein netzwerkanalytisches Vierebenenkonzept zur struktur- und akteursbezogenen Deutung sozialer Interaktionen. In: Hollstein, B., Straus, F. (Hrsg.): *Qualitative Netzwerkanalyse*. VS Verlag für Sozialwissenschaften: Wiesbaden, S. 125–151. https://doi.org/10.1007/978-3-531-90074-2_5

- Häußling, R. (2021): Social Networks. In: Hollstein, B., Greshoff, R., Schimank, U., Weiß, A. (Hrsg.): *Sociology in the German-Speaking World* (S. 415–428). De Gruyter: Berlin. <https://doi.org/10.1515/9783110627275-028>
- Hein, J., & Thomsen, J. (2023): Contested estuary ontologies: The conflict over the fairway adaptation of the Elbe River, Germany. In: *Environment and Planning E: Nature and Space*, 6(1), pp. 153–177. <https://doi.org/10.1177/25148486221098825>
- Hellwig, J. (2019): Grundwasserdürren in Deutschland von 1970 bis 2018. In: *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 12 (10), S. 567–572. Online: https://www.researchgate.net/publication/337243724_Grundwasserdurren_in_Deutschland_von_1970_bis_2018. Geprüft: 26.01.2025
- Hellwig, J., Stahl, K. (2018): An assessment of trends and potential future changes in groundwater-baseflow drought based on catchment response times. In: *Hydrology and Earth System Science* 22, pp. 6209–6224. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6209-2018>
- Hervás-Gámez, C.; Delgado-Ramos, F. (2019): Drought Management Planning Policy: From Europe to Spain. In: *Sustainability* 11 (7), S. 1862. DOI: 10.3390/su11071862.
- Hildmann, C., Zimmermann, B., Schleppehorst, R., Lukas, S., Rösel, L., Kleinschmidt, F., Kruber, S. (2022): Maßnahmen zur Klimaanpassung über Wasserrückhalt und Kühlung durch Verdunstung für eine dürrefähige Region in Ostdeutschland. Working Paper. Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB). <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6866030>
- Hindmarsh, A. C.; Serban, R. (2009): User Documentation for CVODES v2.1.0. Online: https://www.researchgate.net/publication/239581887_User_Documentation_for_CVODES_v210. Geprüft: 26.01.2026.
- Hollstein, B. (2006): Qualitative Methoden und Netzwerkanalyse - Ein Widerspruch? In: Hollstein, B., Straus, F. (Hrsg.): *Qualitative Netzwerkanalyse*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 11–35. https://doi.org/10.1007/978-3-531-90074-2_1
- Hollstein, B. (2010): Qualitative Methoden und Mixed-Methods Designs. In: Stegbauer, C., Häußling, R. (Hrsg.) *Handbuch Netzwerkforschung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften: Wiesbaden, S. 459–471
- Hollstein, B. (2024): Mixed-Method-Designs in der Netzwerkforschung. In: Stegbauer, C., Häußling, R. (Hrsg.): *Handbuch Netzwerkforschung*. Springer Fachmedien: Wiesbaden, S. 1–11. https://doi.org/10.1007/978-3-658-37507-2_40-1
- Hollstein, B., & Straus, F. (2006): *Qualitative Netzwerkanalyse*. VS Verlag für Sozialwissenschaften: Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-90074-2>
- IRGC (2017): Introduction to the IRGC Risk Governance Framework, revisited version. EPFL International Risk Governance Center: Lausanne. DOI: 10.5075/epfl-irgc-233739
- Jacob, D., Kottmeier, C., Petersen, J., Rechid, D., & Teichmann, C. (2017): Regionale Klimamodellierung. In: Brasseur, G. P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland*. Springer: Berlin Heidelberg, S. 27–35. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_4
- Joeres, A., Steeger, G., & Huth, K. (2022, Juni 24): Die größten Wasserschlucker Deutschlands. CORRECTIV – Recherchen für die Gesellschaft gemeinnützige GmbH. Online: <https://correctiv.org/aktuelles/klimawandel/2022/06/24/wasser-verbrauch-unternehmen-private-haushalte/>. Geprüft: 15.01.2026.
- Johann, P. (1994): Grenzen der Belastbarkeit: Die Flüsse Rur (Roer) und Inde im Industriezeitalter. *Forum Jülicher Geschichte*. Vol. 10. Verlag der Joseph-Kuhl-Gesellschaft: Jülich.
- Kelly L., Kalin, R.M., Bertram D., Kanjaye, M., Nkhata, M., Sibande, H. (2019): Quantification of Temporal Variations in Base Flow Index Using Sporadic River Data: Application to the Bua Catchment,

- Malawi. In: *Water* 11:901. <https://doi.org/10.3390/w11050901>
- Kersting, A. (1996): Städtischer Bodenwasserhaushalt - Merkmale und Maßnahmen zu seiner Verbesserung.- In: *AK Stadtböden der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (Hrsg.): Urbaner Bodenschutz.*- 217 -227, Springer: Berlin-Heidelberg.
- Klauff, M. (2021): Die Warnung der Bevölkerung im Katastrophenfall. In: Reuter, C. (Hrsg.): *Sicherheitskritische Mensch-Computer-Interaktion.* Springer Fachmedien: Wiesbaden, S. 341–362. https://doi.org/10.1007/978-3-658-32795-8_16
- Klinke, A., & Renn, O. (2012): Adaptive and integrative governance on risk and uncertainty. In: *Journal of Risk Research* 15(3), S. 273–292. <https://doi.org/10.1080/13669877.2011.636838>
- Koop, J.H., Bergfeld-Wiedemann, T., Keller, M. (2007): Einfluss von extremen Niedrigwasser-Ereignissen und gleichzeitigen "Hitzeperioden" auf die Ökologie von Bundeswasserstraßen. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 51, pp. 202–209.
- Kropp, C. (2018): Infrastrukturierung im Anthropozän. In: H. Laux, H., Henkel, A. (Hrsg.): *Die Erde, der Mensch und das Soziale. Zur Transformation gesellschaftlicher Naturverhältnisse im Anthropozän.* transcript Verlag: Bielefeld, S. 181–204. <https://doi.org/10.14361/9783839440421-010>
- Kufeld, M., Lange, J., Hausmann, B. (2010): Das Einzugsgebiet der Rur: Ergebnisbericht der im Rahmen des AMICE-Projekts durchgeführten Literaturrecherche ; AMICE, meus, maas ; INTERREG IVB North West Europe Project (number 074C). Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft. <https://publications.rwth-aachen.de/record/48070>
- Laaha, G.; Demuth, S.; Hisdal, H.; Kroll, C. N.; van Lanen, H. A. J.; Nester, T. et al. (2013): Prediction of low flows in ungauged basins. In: Günter Blöschl, Murugesu Sivapalan, Thorsten Wagener, Alberto Viglione und Hubert Savenije (Hg.): *Runoff Prediction in Ungauged Basins:* Cambridge University Press, S. 163–188.
- Land NRW (2024): ELWAS-WEB. Online: <https://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.xhtml;jsessionid=B23452E6234727BFB72FCBA00E256060>. Geprüft: 10.12.2024.
- Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (2025): NRW Statistik. Statistikportal NRW. Online: <https://www.it.nrw/statistik>. Geprüft: 15.01.2026.
- Landkreis Jerichoer Land (2025, Juli 25): Allgemeinverfügung zur Wasserentnahme. Online: <https://www.lkj.de/de/artikel/konkretisierung-der-allgemeinverfuegung-zur-wasserentnahme.html>. Geprüft: 15.01.2026.
- Latour, B. (2009): *Das Parlament der Dinge: Für eine politische Ökologie.* 6. Auflage, Suhrkamp: Berlin.
- LANUV NRW (2023): Landesweite Grundwasseroberfläche (Grundwassergleichen) für mittlere Verhältnisse (2006-2015)
- LAWA Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2024): *Wassersensible Stadtentwicklung. Strategie und Handlungskonzept.* LAWA: Potsdam. Online: https://www.lawa.de/documents/lawa-strat-wasent-final-12-2024_2_1739787486.pdf. Geprüft: 16.01.2026.
- LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016): *Niedrigwasser in Bayern. Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen.* Online: <https://www.nid.bayern.de/files/docs/niedrigwasserbericht.pdf>. Geprüft: 15.01.2026.
- LHW Landesamt für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (2002): *Hochwasser-Aktionsplan Selke.* Online: <https://www.rettet-das-selketal.de/4-texte-ereig-dok/4-021-HW-Aktionsplan.htm>. Geprüft: 15.01.2026.
- Linton, J., Budds, J. (2014): The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. In: *Geoforum* 57, pp. 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008>
- Marx, A., Blauhut, V., Boeing, F., Forkel, M., Hagenlocher, M., Herbst, M., Hoffmann, P., Kuhlicke, C.,

- Kumar, R., De Brito, M. M., Samaniego, L., Thonicke, K., & Ziese, M. (2023): Dürren und Waldbrände unter Klimawandel. In: Brasseur, G. P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Springer: Berlin Heidelberg, S. 131–142. https://doi.org/10.1007/978-3-662-66696-8_11
- Menzel, B. (2024, Mai 17): Nach Kohle-Aus Elbe-Wasser soll Spree auffüllen. MDR Aktuell. Online: <https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/panorama/wassermangel-spree-kohleausstieg-elbe-rohr-elbsandsteingebirge-100.html>. Geprüft: 15.01.2026.
- Menzel, B., Grothe, L., Veltzke, B., Werner, A. (2024, Juni 13): Wassermangel: Die Elbe soll Wasser für Berlin liefern. Tagesschau. Online: <https://www.tagesschau.de/wissen/klima/wassermangel-berlin-100.html>. Geprüft: 15.01.2026.
- Mishra, A.K., Singh, V.P. (2010): A review of drought concepts. In: Journal of Hydrology 391, pp. 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007): Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885–900.
- MLUK Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (2021): Landesniedrigwasserkonzept Brandenburg. Ministerium für Land- und Ernährungswirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg. Online: <https://mleuv.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Landesniedrigwasserkonzept-Brandenburg.pdf>. Geprüft: 15.01.2026.
- MULNV Ministerium für Umwelt, Natur- und Verbraucherschutz NRW (2021): Steckbriefe der Planungseinheiten Maas Süd NRW: in den nordrhein-westfälischen Anteilen von Rhein, Weser, Ems und Maas Bewirtschaftungszeitraum 2022-2027. Online: <https://www.flussgebiete.nrw.de/planungseinheiten-steckbriefe-2022-2027>. Geprüft: 15.01.2026.
- MULNV, Ministerium für Umwelt, Natur- und Verbraucherschutz NRW (2022): Hintergrundpapier Braunkohle. Begründung für die Inanspruchnahme von Ausnahmen von den Bewirtschaftszielen. Online: https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/2022-02-09_final_hgp_braunkohle.pdf. Geprüft am: 15.01.2026.
- MUNV, Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW (2024): H2O - NRW. Wasserwirtschaft im Klimawandel. Eckpunkte auf dem Weg zur Zukunftsstrategie Wasser. Online: <https://www.umwelt.nrw.de/system/files/media/document/file/eckpunkte-auf-dem-weg-zur-zukunftsstrategie-wasser.pdf>. Geprüft: 15.01.2026.
- MUNV, Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW (2025): Zukunftsstrategie Wasser [Referentenentwurf]. Online: <https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMV18-4677.pdf>. Geprüft: 16.01.2026.
- MWIKE, Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie NRW (o.A.): Braunkohleausstieg 2030 im Rheinischen Revier. MWIKE. Online: <https://www.wirtschaft.nrw/themen/energie/braunkohleausstieg-2030-im-rheinischen-revier>. Geprüft am: 15.01.2026.
- MWU, Ministerium für Wirtschaft, Energie, Klimaschutz und Umwelt SH (o.A.): Wassergesetz Sachsen-Anhalt. Modernes Wassermanagement im Fokus. Online: <https://mwu.sachsen-anhalt.de/umwelt/wasser/wassergesetz>. Geprüft: 16.01.2026.
- MWU, Ministerium für Wirtschaft, Energie, Klimaschutz und Umwelt SH (2021): Hochwasserrückhaltebecken oberhalb von Straßberg kann gebaut werden. Online: <https://mwu.sachsen-anhalt.de/artikel-detail/hochwasserrueckhaltebecken-oberhalb-von-strassberg-kann-gebaut-werden/-/willingmann-wichtiger-meilenstein-erreicht>. Geprüft: 15.01.2026.

- MWU, Ministerium für Wirtschaft, Energie und Umweltschutz SH (2025, 11. November): Neues Rückhaltebecken bei Ermsleben soll Hochwasserschutz an der unteren Selke stärken. Pressemitteilung. Online: mwu.sachsen-anhalt.de/artikel-detail/neues-rueckhaltebecken-bei-ermsleben-soll-hochwasserschutz-an-der-unteren-selke-staerken Geprüft: 16.12.2025
- Nilson, E. (2006): Flusslandschaften im Wandel. In: Reinecke, T., Lehmkuhl, F., Blümel, H. (Hrsg.): Grenzüberschreitendes integratives Gewässermanagement. Academia-Verlag: Sankt Augustin.
- Ntona, M.M., Busico, G., Mastrocicco, M., Kazakis, N. (2022): Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges. In: *Sci Total Environ* 846:157355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157355>
- Orlove, B., & Caton, S. C. (2010): Water Sustainability: Anthropological Approaches and Prospects. In: *Annual Review of Anthropology* 39(1), pp. 401–415. <https://doi.org/10.1146/annurev-anthro.012809.105045>
- Otto, A., Göpfert, C., & Thieken, A. H. (2021): Are cities prepared for climate change? An analysis of adaptation readiness in 104 German cities. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 26(8), 35. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09971-4>
- Parra, V., Arumí, J.L., Muñoz, E. (2019): Identifying a Suitable Model for Low-Flow Simulation in Watersheds of South-Central Chile: A Study Based on a Sensitivity Analysis. In: *Water* 11:1506. <https://doi.org/10.3390/w11071506>
- Peters, E., van Lanen, H., Torfs, P., Bier, G. (2005): Drought in groundwater - drought distribution and performance indicators. In: *Journal of Hydrology* 306, pp. 302–317. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.09.014>
- Polczyk, H. (1999): Die Talsperren in der Nordeifel. In: Böckels, L., Butz, D., Heuter, H.J. (Hrsg.): 100 Jahre Wasserwirtschaft in der Nordeifel. Wasserverband Eifel-Rur (WVER), S. 64–72.
- Poole, M. (1981): Maritime sociology: Towards a delimitation of themes and analytical frameworks. In: *Maritime Policy & Management* 8(4), pp. 207–222. <https://doi.org/10.1080/03088838100000046>
- Puhmann, G., Lück, I., Hursie, U., Kies, J., Bärthel, H. (2016): Kurzstatement zum Beratergremium. Online: https://www.gesamtkonzept-elbe.de/Webs/Projektseite/GkElbe2020/SharedDocs/Downloads/1Regionalkonferenz_KurzstatementzumBeratergremium_Vortrag_Puhmann.html?nn=998926. Geprüft: 15.01.2026.
- Renn, O. (2010): Risk Communication: Insights and Requirements for Designing Successful Communication Programs on Health and Environmental Hazards. In: Heath, R. L., O’Hair, H. D. (Hrsg.): *Handbook of Risk and Crisis Communication* (1st Edition), London: Routledge, S. 81–99.
- Renn, O. (2020): Risk Governance: From Knowledge to Regulatory Action. In: Glückler, J., Herrigel, G., Handke, M. (Hrsg.): *Knowledge for Governance*, Bd. 15., Springer International Publishing: Cham, S. 93–111. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47150-7_5
- Reuter, C., Hughes, A. L., Kaufhold, M.-A. (2018): Social Media in Crisis Management: An Evaluation and Analysis of Crisis Informatics Research. In: *International Journal of Human–Computer Interaction* 34(4), pp. 280–294. <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1427832>
- Reuter, C., Kaufhold, M.-A., Leopold, I., & Knipp, H. (2017): KATWARN, NINA, or FEMA? Multi-Method Study on Distribution, Use, and Public Views on Crisis Apps. In: *Proceedings of the 25th European Conference in Information Systems (ECIS)*, 1–16. <https://d-nb.info/127633169X/34>
- Richterich, N. (2024): Spontanhelfende als Vergemeinschaftung des resilienten Selbst? Eine ethnografische Spurensuche im Kontext des „Jahrhunderthochwassers 2021“. In: *Behemoth Journal* 17 (1), S. 115-132. <https://doi.org/10.6094/BEHEMOTH.2024.17.1.1112>
- 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
- Rijkswaterstaat (2024): Droogtemonitor. Online: <https://waterberichtgeving.rws.nl/owb/droogtemonitor>, Geprüft: 22.01.2026.
- RP Rheinische Post (2025, April 21): Renaturierung der Rur wird Jahrzehnte dauern. Online: https://rp-online.de/nrw/staedte/wassenberg/bei-ophoven-renaturierung-der-rur-wird-jahrzehnte-dauern_aid-126441535. Geprüft: 15.01.2026.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen (2008): No Regret – Genug Wasser für die Landwirtschaft?! Projektbericht – Kurzfassung. Uelzen. Online: https://wasserblick.bafg.de/servlet/is/91522/gk14_9-sitzg_top1_noregret-broschuere.pdf?command=downloadContent&filename=gk14_9-sitzg_top1_noregret-broschuere.pdf. Geprüft: 15.01.2026.
- RWE/IFOK (2016): Die RWE Power AG informiert frühzeitig über das Verfahren. Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung: Verlängerung der wasserrechtlichen Erlaubnis zur Sümpfung des Tagebaus Hambach (2020 – 2030). Online: <https://www.rwe.com/-/media/RWE/documents/02-unsere-energie/braunkohle/wasserwirtschaft/DokumentationderFAQVerlaengerungderwasserrechtlichenErlaubniszurSuempfungdesTagebausHambach20202030.pdf#:~:text=Grundwasser?%20Antwort:%20RWE%20Power%20bezahlt%20neben%20den,von%20Grundwasser%20und%20Oberfl%C3%A4chenwasser%20erhobene%20Entgelt%20bezeichnet>. Geprüft: 15.01.2026.
- RWE (2022, Oktober 4): Verständigung auf Kohleausstieg 2030 und Stärkung der Versorgungssicherheit in der Energiekrise. RWE. Online: <https://www.rwe.com/-/media/RWE/documents/07-presse/rwe-ag/2022/2022-10-04-verstaendigung-auf-kohleausstieg-2030-staerkung-der-versorgungssicherheit-in-energiekrise.pdf>. Geprüft: 15.01.2026.
- RWE (2023a, Januar 11): RWE zieht Kohleausstieg auf 2030 vor: 5 bewohnte Dörfer und 3 bewohnte Höfe bleiben erhalten, ehemalige Siedlung Lützerath muss weichen. Online: <https://www.rwe.com/-/media/RWE/documents/07-presse/rwe-power-ag/2023/2023-01-11-5-dorfer-und-3-hoefe-bleiben-erhalten-ehemalige-siedlung-luetzerath-muss-weichen.pdf>. Geprüft: 15.01.2026.
- RWE (2023b, Dezember 11): Europäische Kommission gibt Entschädigung für vorzeitigen Kohleausstieg frei. Online: <https://www.rwe.com/-/media/RWE/documents/07-presse/rwe-ag/2023/2023-12-11-europaeische-kommission-gibt-entschaedigung-fuer-vorzeitigen-kohleausstieg-frei.pdf>. Geprüft: 15.01.2026.
- RWE (2024): H2-Ready GuD-Anlage Weisweiler. Online: <https://www.rwe.com/-/media/RWE/documents/01-der-konzern/betriebsstandorte/kraftwerk-weisweiler/rwe-weisweiler-oefentlichkeitsbeteiligung-eingangspraesentation.pdf>. Geprüft: 15.01.2026.
- Sackmann, S., Lindner, S., Gerstmann, S., Betke, H. (2021): Einbindung ungebundener Helfender in die Bewältigung von Schadensereignissen. In: Reuter, C. (Hrsg.): Sicherheitskritische Mensch-Computer-Interaktion. Springer Fachmedien: Wiesbaden, S. 559–580 https://doi.org/10.1007/978-3-658-32795-8_26
- Samadi-Foroushani, M., Keyhanpour, M. J., Musavi-Jahromi, S. H., & Ebrahimi, H. (2022): Integrated Water Resources Management Based on Water Governance and Water-food-energy Nexus through System Dynamics and Social Network Analyzing Approaches. In: Water Resources Management 36(15), pp. 6093–6113. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03343-6>
- Satzinger, U., Donner, R., V., Ettmer, B., Folkens, L., Müller, S., Reinstorf, F., Schneider, P., Suarez, J. A. S., Wiese, J., Zarate, K., Bachmann, D., Wiedemer, V., Staas, S., Sollinger, L., Heermann, L.,

- Halle, M., Oetjen, J., Schüttrumpf, H., Winkels, S., ... Schmitt, M. (2023): Die Niedrigwasserrisikoanalyse als ein Instrument für das Niedrigwasserrisikomanagement. In: *Wasser & Abfall*, 05/2023.
- Satzinger, U., Bachmann, D. (2024): Conceptual approach for a holistic low-flow risk analysis. In: *Hydrological Processes* 38. <https://doi.org/10.1002/hyp.15217>
- Satzinger, U., Bachmann, D., Schüttrumpf, H., Franke, T., Staas, S., & Halle, M. (2025): DRYRIVERS - Ziele, Anforderungen, Strategien und Werkzeuge für ein zukunftsfähiges Niedrigwasserrisikomanagement (NWRM). In: *Korrespondenz Wasserwirtschaft KW* 18(12), S. 687–691.
- Schaupp, S. (2024): *Stoffwechselfolitik: Arbeit, Natur und die Zukunft des Planeten*. Suhrkamp: Berlin.
- Schiffer, E., Hauck, J. (2010): Net-Map: Collecting Social Network Data and Facilitating Network Learning through Participatory Influence Network Mapping. In: *Field Methods* 22(3), pp. 231–249. <https://doi.org/10.1177/1525822X10374798>
- Schiller, M., Sander, L. (2025, 07. Juli): Wegen Trockenheit: Extrem niedrige Wasserstände an der Elbe. NDR. Online: <https://www.ndr.de/nachrichten/info/wegen-trockenheit-extrem-niedrige-wasserstaende-an-der-elbe,niedrigwasser-138.html>. Geprüft: 16.01.2026.
- Schmitt, T. (2022): Umkämpfte(s) Wasser. In: Gottschlich, D., Hackfort, S., Schmitt, T., Winterfeld, U. V. (Hrsg.): *Handbuch Politische Ökologie. Edition Politik*, Bd. 110., Bielefeld: transcript Verlag, S. 287–298. <https://doi.org/10.14361/9783839456279-025>
- Schrauben, E. (2011): Communication in Crisis: An Analysis of the Role Organizational Structures Play in the Effectiveness of Crisis Communication. In: *SPNHA Review*, 7(1), pp. 71–86.
- Schroer, M. (2022): *Geozozoologie: Die Erde als Raum des Lebens*. Suhrkamp: Berlin.
- Schulz, E. (2014): Strategien zur Grundwasseranreicherung. In: *Landwirtschaft im Klimawandel: Wege zur Anpassung – Forschungsergebnisse zu Anpassungsstrategien der Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg an den Klimawandel*, Teil 6. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen, Mai 2014.
- Schulz, P., Gros, A. (2024): Toward a Sociology of Water: Reconstructing the Missing “Big Picture” of Social Water Research. In: *Water* 16(13), 1792. <https://doi.org/10.3390/w16131792>
- Schütze, N. (2023): *Polycentric Water Governance in Spain: Understanding Determinants, Patterns, and Performance of Coordination*. transcript: Bielefeld.
- Seibert, S.P., Auerswald, K. (2020): *Hochwasserminderung im ländlichen Raum*. Springer: Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61033-6>
- Stallings, R. A., & Quarantelli, E. L. (1985): Emergent Citizen Groups and Emergency Management. *Public Administration Review* 45, S. 93-100. <https://doi.org/10.2307/3135003>
- Starr, J. R. (1991): Water Wars. In: *Foreign Policy* 82, pp. 17-36. <https://doi.org/10.2307/1148639>
- Stoelzle, M., Stahl, K., Morhard, A., Weiler, M. (2014): Streamflow sensitivity to drought scenarios in catchments with different geology. In: *Geophysical Research Letters* 41, pp. 6174–6183. <https://doi.org/10.1002/2014GL061344>
- SZ, Süddeutsche Zeitung (2022, Januar 11): Flutkatastrophe in Erftstadt: Durchsuchungen bei Tagebau-Betreiber nach Erdbeben. Online: <https://www.sueddeutsche.de/panorama/flutkatastrophe-erftstadt-ermittlungen-1.5505117>. Geprüft: 15.01.2026.
- Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A.J (2004): Hydrological drought: Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. In: *Developments in water science* 48, Elsevier: Amsterdam.
- Riedel, T., Nolte, C., Beek, T.a.d., 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: Des-sau-Roßlau. Online: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdaten-bank/fkz_3719482060_niedrigwasserrisikomanagement_bf.pdf. Geprüft am: 15.01.2026.
- Thüringer Wassergesetz, §55 (2019): Gemeindlicher Wasserwehrdienst. Online: <https://landesrecht.thueringen.de/bsth/document/jlr-WasGTH2019pP55>. Geprüft am: 15.01.2026.
- TSB, Talsperren-Betrieb SH (2025, August 15): Ausstellung zum Hochwasserschutz im Selketal eröffnet. Online: <https://www.talsperrenbetrieb-lsa.de/aktuelles/>. Geprüft am: 15.01.2026.
- TSB, Talsperren-Betrieb SH (o.A., a.): Hochwasserrückhaltebecken Straßberg. Online: <http://www.rueckhaltebecken-lsa.de/hrb-strassberg/projektstand.php>. Geprüft am: 15.01.2026.
- TSB, Talsperren-Betrieb SH (o.A., b.): Hochwasserschutz untere Selke: Projektstand. Online: <http://www.rueckhaltebecken-lsa.de/hrb-meisdorf/projektstand.php>. Geprüft: 15.01.2026.
- UBA, Umweltbundesamt (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland (Kurzfassung No. 26/2021; Climate Change). Umweltbundesamt. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung>. Geprüft: 15.01.2026.
- UBA, Umweltbundesamt (2022): Die Nutzung natürlicher Ressourcen Ressourcenbericht für Deutschland 2022. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/ressourcenbericht2022>. Geprüft: 15.01.2026.
- UBA Umweltbundesamt (2023): Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz. 90/2023. Umweltbundesamt. Online: https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/90_2023_texte_wasserwirtschaftliche_folgen.pdf. Geprüft: 16.01.2026.
- UBA, Umweltbundesamt (2025a): Indikator: Nutzung der Wasserressourcen. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-nutzung-der-wasserressourcen>. Geprüft: 16.01.2026.
- UBA Umweltbundesamt (2025b): Wasserressourcen und ihre Nutzung. Umweltbundesamt. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#wassernachfrage>. Geprüft: 16.01.2026.
- UBA Umweltbundesamt (2025c): Nichtöffentliche Wasserversorgung. Umweltbundesamt. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserwirtschaft/nichtoeffentliche-wasserversorgung#sinkender-wasserbedarf-sinkende-wasserentnahmen>. Geprüft: 16.01.2026.
- UFZ, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (2025): Dürremonitor. Online: <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>. Geprüft am: 15.01.2026.
- Uhlmann, W., Kaltofen, M., Gerstgraser, C., Grosser, F., Schützel, C. (2023): Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz (Abschlussbericht No. 90/2023). Umweltbundesamt. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/wasserwirtschaftliche-folgen-des>. Geprüft: 15.01.2026.
- Urmeter H.-A. (2025): Untersuchung verschiedener Ansätze zur Grundwasserneubildung für die Fluss- und Grundwassermodellierung mit der Software LoFloDes, RWTH Aachen University.
- van Loon, A.F., van Lanen, H.A.J. (2012): A process-based typology of hydrological drought. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 16, pp. 1915–1946. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1915-2012>
- van Loon, A.F. (2015): Hydrological drought explained. In: *WIREs Water* 2, pp. 359–392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
- VKU, Verband kommunaler Unternehmen (2025): Wasserversorgung bei Hitze und Trockenheit – Versorgung gesichert, aber Druck steigt. Online: <https://www.vku.de/presse/pressemitteilungen/vku-umfrage-wasserversorgung-bei-hitze-und-trockenheit-versorgung-gesichert-aber-druck-steigt/>.

- Geprüft: 15.01.2026.
- Vöpel, H., Wolf, A. (2025): Die Volkswirtschaftliche Bilanz von Flussvertiefungen: Eine Analyse am Beispiel der Elbvertiefung. Zentrum für Europäische Politik, WWF. Online: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/S%C3%BC%C3%9Fwasser/cepStudie-Volkswirtschaftliche-Bilanz-von-Flussvertiefungen.pdf>. Geprüft: 15.01.2026.
- Vögele, S., Koch, H. (2009): Dynamic modelling of water demand, water availability and adaptation strategies for power plants to global change. In: *Ecological Economics* 68, pp. 2031–2039. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.02.015>
- Wanders, N., Wada, Y., van Lanen, H.A.J. (2015): Global hydrological droughts in the 21st century under a changing hydrological regime. In: *Earth System Dynamics* 6, pp. 1–15. <https://doi.org/10.5194/esd-6-1-2015>
- WG LSA (2011): Wassergesetz für das Land Sachsen-Anhalt. Online: <https://www.landesrecht.sachsen-anhalt.de/bsst/document/jlr-WasGST2011rahmen>. Geprüft am. 15.01.2026.
- Wesche, T. (2023): *Die Rechte der Natur: Vom nachhaltigen Eigentum*. Suhrkamp: Berlin.
- Wilson, N. J., Harris, L. M., Nelson, J., Shah, S. H. (2019): Re-Theorizing Politics in Water Governance. In: *Water* 11(7), 1470. <https://doi.org/10.3390/w11071470>
- Wolf, S.S. (2023): *The long-term-memory of a typical mid-European upland to lowland river |b or why we struggle to reach a good ecological state for our rivers*. Dissertation. RWTH Aachen University: Aachen. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2023-05753>
- WVER, Wasserverband Eifel-Rur (2025): Pegelstände [Dataset]. Online: <https://wver.de/service/#pegelstaende>. Geprüft: 15.01.2026.
- Zhou, Y., Li, W. (2011): A review of regional groundwater flow modeling. In: *Geoscience Frontiers* 2, pp. 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.03.003>
- Zink, M., Samaniego, L., Kumar, R., Thober, S., Mai, J., Schäfer, D., Marx, A. (2016): The German drought monitor. In: *Environmental Resource Letters* 11, 74002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074002>
- Zehetmair, S. (2012): *Zur Kommunikation von Risiken: Eine Studie über soziale Systeme im Hochwasserrisikomanagement*. VS Verlag für Sozialwissenschaften: Wiesbaden.
- Zehetmair, S. (2013): *Interessengegensätze im Hochwasserschutz*. Bundeszentrale für politische Bildung. Online: <https://www.bpb.de/themen/umwelt/hochwasserschutz/172870/interessengegensaezte-im-hochwasserschutz/>. Geprüft: 16.01.2026.