

DOKUMENTATION

02/2026

Teilbericht

Behandeltes kommunales Abwasser in Oberflächengewässern in Deutschland

von:

Katharina Hinneberg, Ingo Haag
HYDRON Ingenieursgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Karlsruhe

Stefan Halbfass, Micha Gebel
VisDat geodatentechnologie GmbH, Dresden

Lukas Kopp, Stephan Fuchs

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Wasser und Umwelt (IWU),
Wassergütewirtschaft, Karlsruhe

Herausgeber:

Umweltbundesamt

DOKUMENTATION 02/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums für Umwelt,
Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3719 21 202 0
FB002052

Teilbericht

Behandeltes kommunales Abwasser in Oberflächengewässern in Deutschland

von

Katharina Hinneberg, Ingo Haag
HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und
Wasserwirtschaft mbH, Karlsruhe

Stefan Halbfass, Micha Gebel
VisDat geodatentechnologie GmbH, Dresden

Lukas Kopp, Stephan Fuchs
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Wasser
und Umwelt (IWU), Wassergütewirtschaft, Karlsruhe

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

Durchführung der Studie:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Wasser und Umwelt (IWU),
Wassergütewirtschaft
Gotthard-Franz-Str. 3
76131 Karlsruhe

Abschlussdatum:

Februar 2026

Redaktion:

Fachgebiet II 2.4 Binnengewässer
Antje Ullrich

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8338>

ISSN 2199-6571

Dessau-Roßlau, März 2026

© Alle Rechte vorbehalten

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

Kurzbeschreibung: Behandeltes kommunales Abwasser in Oberflächengewässern in Deutschland

Der Anteil behandelten kommunalen Abwassers ist ein wichtiger Indikator zur Risikoabschätzung stofflicher Einträge in Gewässer. Bislang fehlte jedoch ein deutschlandweites, modellbasiertes Tool zur Analyse und Visualisierung des Abwasseranteils in den Fließgewässern. Um ein solches Tool bereitzustellen wurde zunächst ein deutschlandweiter Kläranlagendatensatz aus der Berichterstattung der Kommunalabwasserrichtlinie herangezogen. Aus den vorliegenden Zeitreihen der Jahresabwassermengen wurden anhand der Mischsystem-Anteile der Kläranlagen zusätzlich Trockenwetteranteile abgeleitet. Anschließend wurden die bereitgestellten Kläranlagen-Daten in das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME integriert. Unter Einbindung von Pegeldaten konnten dann deutschlandweit, je Rasterzelle bzw. Gewässerteilstrecke, die natürlichen Abflüsse im Gewässer sowie die Anteile behandelten kommunalen Abwassers bzw. Trockenwetterabflusses der Kläranlagen ausgewiesen werden.

Die Ergebnisse wurden in ein interaktives Werkzeug eingebunden und stehen zur weiteren Nutzung zur Verfügung. Dieses Werkzeug erlaubt eine dynamische Verknüpfung der verfügbaren Informationen und ist für weitere fachliche Aspekte erweiterbar. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, Szenarien-Betrachtungen durchzuführen und mögliche Risiken für Fließgewässer hinsichtlich stofflicher Einträge zu identifizieren und geeignete Managementstrategien auszuweisen.

Abstract: Treated municipal wastewater in German rivers

The proportion of treated municipal wastewater represents an important indicator for assessing the risk of substance emissions into surface waters. However, until now, there has been no nationwide, model-based tool in Germany for analyzing and visualizing the share of wastewater in rivers.

To provide such a tool, a nationwide dataset of wastewater treatment plants was first compiled from the reporting within the Urban Wastewater Treatment Directive. Combined sewer system shares for each wastewater treatment plant were used to additionally derive dry weather flow shares based on the available time series of annual wastewater volumes. The resulting wastewater treatment plant data were then integrated into the water balance model LARSIM-ME. Incorporating gauging station data, it was possible to determine, for each grid cell/river segment across Germany, both the natural discharge in the watercourse and the proportions of treated municipal wastewater and dry-weather flow from the wastewater treatment plants.

The results were incorporated into an interactive tool, which is now available for further use. This interactive tool allows for dynamic linking of the available information and can be extended to include additional technical aspects. This makes it possible to conduct scenario analyses, identify potential risks to surface waters from substance inputs, and develop suitable management strategies.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	9
Formelverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Zusammenfassung.....	12
Summary	15
1 Einleitung	18
2 Modell- und Datengrundlagen	20
2.1 LARSIM-ME	20
2.2 Kommunale Kläranlagen – Datenaufbereitung	21
2.2.1 Ableitung der Trockenwetterabflüsse kommunaler Kläranlagen	22
2.2.2 Übertragung auf den deutschlandweiten Kläranlagendatensatz	24
3 Vorbereitende Arbeiten und modelltechnische Erweiterung von LARSIM-ME	30
3.1 Zuordnung von Fließgewässerabschnitten zu den LARSIM-ME-Rastern	30
3.1.1 Ungenauigkeiten in Mündungsbereichen von Flüssen.....	32
3.1.2 Ungenauigkeiten bei Kanälen und Gräben.....	34
3.2 Integration der Kläranlagen in LARSIM-ME	34
3.2.1 Zuordnung der Kläranlagen zur Modellstruktur	34
3.2.2 Berücksichtigung der Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse in LARSIM-ME.....	35
3.3 Integration und Ergänzung von Pegeln in LARSIM-ME	38
4 Räumlich differenzierte Ableitung der mittleren natürlichen Abflüsse und des mittleren Anteils behandelten Abwassers	40
4.1 Definition der verwendeten Begriffe und Abkürzungen	40
4.2 Ermittlung des mittleren Abflusses behandelten Abwassers in den Gewässern.....	40
4.3 Ermittlung und Regionalisierung des mittleren natürlichen Abflusses (MQ_{nat})	41
4.4 Besonderheiten und Auffälligkeiten.....	44
4.4.1 Pegel im Ausland.....	44
4.4.2 Pegel Rekingen am Rhein unterhalb des Bodensees.....	44
4.4.3 Bodenseewasserversorgung	44
4.4.4 Main-Donau-Kanal	45
4.5 Validierung der Ergebnisse.....	45
4.5.1 Mittlere Abflüsse an Pegeln und mittlere natürliche Abflusshöhen ($Mh_{sim,TGB}$).....	45

4.5.2	Mittlerer Anteil behandelten Abwassers am Gesamtabfluss	48
4.5.2.1	Überprüfung der Gewässerabschnitte mit sehr hohem Anteil behandelten Abwassers	48
4.5.2.2	Finale Anteile behandelten Abwassers	48
5	Interaktives Werkzeug zur Darstellung der Anteile behandelten Abwassers in Gewässern.....	52
5.1	Zugang zur MoRE-DE Toolbox und zum Tool „Abwasserbehandlung“	52
5.2	Auswahl eines Gewässerabschnittes.....	53
5.3	Beenden der Anwendung.....	57
5.4	Nutzung des Tools im Rahmen der Umsetzung von KARL.....	57
6	Fazit	59
7	Quellenverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht über LARSIM-ME-Modelle für Deutschland	20
Abbildung 2:	Methode des 21-Tage (d) gleitenden Miniums zur Abflusssparation im Zulauf kommunaler Kläranlagen (nach Weiß 2020)	23
Abbildung 3:	Beziehungen zwischen Mischsystem- und behandeltem Niederschlagswasseranteil ($Q_{R,Ka}$) in kommunalen Kläranlagen (DESTATIS 2023)	26
Abbildung 4:	Verteilung des Mischsystemanteils in Deutschland (2016)	27
Abbildung 5:	Verteilung des berechneten Trockenwetteranteils ($Q_{T,Ka}$) kommunaler Kläranlagen	28
Abbildung 6:	Darstellung der 25 km ² -Raster der hier verwendeten LARSIM-ME-Modelle	31
Abbildung 7:	Durch LARSIM-ME-Modelle abgebildetes Fließgewässernetz	32
Abbildung 8:	Beispielhafte Darstellung von Vernetzungungenauigkeiten in Mündungsbereichen	33
Abbildung 9:	Beispielhafte Darstellung von Vernetzungungenauigkeiten im Bereich des Elbe-Havel-Kanals	34
Abbildung 10:	Kommunale Kläranlagen, die in LARSIM-ME integriert wurden	37
Abbildung 11:	Lage der verwendeten Pegel	39
Abbildung 12:	Spezifische mittlere Abflusshöhen [mm/a] im Pegelkontrollbereich in einem Teil des Main-Einzugsgebiets vor der Konsistenzprüfung	42
Abbildung 13:	Spezifische mittlere Abflusshöhen [mm/a] im Pegelkontrollbereich in einem Teil des Main-Einzugsgebiets nach der Konsistenzprüfung	42
Abbildung 14:	Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Gesamtabflüsse (links) und Gesamtabflusshöhen (rechts) an den Pegeln	45
Abbildung 15:	Gesamtabflusshöhe [mm/a] aus dem Hydrologischen Atlas Deutschland auf die 25-km ² -Raster von LARSIM gemittelt und mit LARSIM simulierte mittlere natürliche Abflusshöhe [mm/a]	47
Abbildung 16:	Boxplots der simulierten Abwasseranteile an den berücksichtigten Pegeln und in den Gewässerteilstrecken, Darstellung mit unterschiedlicher y-Achse	49
Abbildung 17:	Überschreitungswahrscheinlichkeit des Anteils von Kläranlagen-Trockenwetterabfluss am mittleren Gesamtabfluss bezogen auf die gesamte betrachtete Gewässerstrecke (57.310 km)	50
Abbildung 18:	Simulierter Anteil des mittleren Trockenwetterabflusses der Kläranlagen am Gesamtabfluss [%] für die Gewässerteilstrecken in LARSIM-ME	51
Abbildung 19:	Landing Page der MoRE-DE Toolbox	52
Abbildung 20:	Startseite des Themas "Abwasserbehandlung" in der MoRE-DE Toolbox	53
Abbildung 21:	Selektierung eines Einzugsgebietes für einen ausgewählten Gewässerabschnitt	54
Abbildung 22:	Ergebnisausgabe	55
Abbildung 23:	Anzeigen eines Themas aus dem Layerbaum (hier: Anteil behandeltes Abwasser am Gesamtabfluss)	56

Abbildung 24: Ausgabe von Detailangaben und Ergebnissen für eine selektierte Kläranlage...57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anzahl kommunaler Kläranlagen in Deutschland (2022) nach Ausbaugröße und Größenklasse (GK) in Einwohnerwerten (EW); Quelle: Daten der Länder zur Berichterstattung nach EU-Kommunalabwasserrichtlinie	21
Tabelle 2:	Mischsystemanteile und in kommunalen Kläranlagen behandelter Niederschlagswasseranteil je Bundesland (Statistisches Bundesamt Destatis (2023))	25
Tabelle 3:	Vergleich der berechneten Anteile behandelten Niederschlagswassers mit den statistischen Daten (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023) je Bundesland ..	29
Tabelle 4:	Anzahl der in LARSIM-ME integrierten Kläranlagen je LARSIM-ME-Teilmodell..	36
Tabelle 5:	Anzahl der verwendeten Pegel je LARSIM-ME-Modell	38
Tabelle 6:	Gesamtabfluss im Gewässer und seine Aufteilung in den natürlichen Abfluss und den Trockenwetterabfluss für gesamt Deutschland	48

Formelverzeichnis

Formel 1:	Berechnung Kläranlagen-Trockenwetterabfluss im EZG eines Pegels.....	41
Formel 2:	Berechnung natürlicher Abfluss im EZG eines Pegels	41
Formel 3:	Berechnung mittlerer natürlicher Abfluss im PKB eines Pegels	41
Formel 4:	Berechnung mittlere natürliche Abflusshöhe im PKB eines Pegels.....	41
Formel 5:	Berechnung Korrekturfaktor der simulierten Abflüsse für den PKB eines Pegels	43
Formel 6:	Berechnung mittlere natürliche Abflusshöhe je LARSIM-Raster in einem PKB ..	43
Formel 7:	Berechnung simulierte mittlere Abflusshöhe je LARSIM-Raster	43
Formel 8:	Berechnung finaler, mittlerer natürlicher Abfluss im EZG eines Pegels	43

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
Destatis	Statistisches Bundesamt
DWD-CDC	Deutscher Wetterdienst – Climate Data Center
EZG	Einzugsgebiet
EW	Einwohnerwert
GTS	Gewässerteilstrecke - einem LARSIM-Teilgebiet zugeordneter Fließgewässerabschnitt
HAD	Hydrologischer Atlas Deutschland
HYDRON	HYDRON - Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH
KIT-IWU	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Umwelt
KARL	EU-Kommunalabwasserrichtlinie (2024/3019)
LARSIM-ME	Large Area Runoff Simulation Model - Middle Europe
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LEG	LARSIM Entwicklergemeinschaft
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
Mh [mm/a]	mittlere Abflusshöhe - Mittelwert einer Fläche (z. B. TGB, PKB, EZG)
MoRE	Modelling of Regionalized Emissions (Stoffeintragsmodell)
MQ [m³/s]	mittlerer Abfluss - Durchfluss im Gerinne (z. B. an einem Pegel, am Ende einer GTS)
MQ _{mes} [m³/s]	aus den Messungen an einem Pegel abgeleiteter mittlerer Abfluss
MQ _{EZG} [m³/s]	mittlerer Abfluss aus dem gesamten EZG eines Pegels
MQ _{PKB} [m³/s]	mittlerer Abfluss aus einem Pegelkontrollbereich
MQ _{KLA} [m³/s]	mittlerer Trockenwetterabfluss der kommunalen Kläranlagen
MQ _{nat} [m³/s]	natürlicher Abfluss aus der Abflussbildung in der Fläche
MQ _{ges} [m³/s]	Summe aus MQ _{KLA} und MQ _{nat}
PKB	Pegelkontrollbereich - Zwischeneinzugsgebiet eines Pegels
Q _F	Fremdwasserabfluss einer kommunalen Kläranlage
Q _{R,KA}	mitbehandeltes Niederschlagswasser einer kommunalen Kläranlage

Abkürzung	Erläuterung
Q_s	Schmutzwasserzufluss einer kommunalen Kläranlage
Q_{T,Ka}	Trockenwetterzufluss/Trockenwetterabfluss einer kommunalen Kläranlage
RÜB	Regenüberlaufbecken (im Mischsystem)
TGB	LARSIM-Teilgebiet (25 km ² -Raster)
VisDat	VisDat geodatentechnologie GmbH
WRRL	EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG)

Zusammenfassung

In Deutschland werden in kommunalen Kläranlagen jährlich rund 8,3 Mrd. m³ Abwasser behandelt (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023, 2024). Das behandelte Abwasser wird i. d. R. in Oberflächengewässer eingeleitet. In Regionen mit hohem Abwasseranfall oder in sehr kleinen Gewässern kann der Anteil behandelten Abwassers im Gewässer hoch sein. Hinzu kommt, dass zunehmende und länger anhaltende Trockenperioden zu häufigeren und extremeren Niedrigwassersituationen in den Gewässern führen können, bei denen der Anteil behandelten Abwassers in den Gewässern ansteigt.

Trotz der insgesamt hohen Leistungsfähigkeit kommunaler Kläranlagen wird mit dem behandelten Abwasser nach wie vor ein breites Spektrum von Stoffen in die Gewässer eingetragen. Diese Einleitungen können ein Risiko für aquatische Lebensgemeinschaften und die menschliche Gesundheit darstellen. Auch für die Trinkwassergewinnung, insbesondere aus Uferfiltrat, können negative Auswirkungen auftreten.

Aktuelle Anforderungen z. B. nach EU-Kommunalabwasserrichtlinie (2024/3019, KARL) adressieren Fragen zur Risikoabschätzung stofflicher Einträge für Gewässer. Der Anteil behandelten kommunalen Abwassers ist hier ein wichtiger Indikator zur Identifizierung der Gewässer mit erhöhtem Risiko. Diese aktuellen Anforderungen bedürfen räumlich hoch aufgelöster Aussagen sowie geeigneter Werkzeuge zur dynamischen Verknüpfung der verfügbaren Emissions- und Immissionsinformationen. Aus diesem Grund wurden die bundesweit vorliegenden Informationen zum Anteil behandelten Abwassers in Gewässern nach Drewes et al. (2018) aktualisiert und der methodische Ansatz weiterentwickelt. Drewes et al. (2018) berücksichtigten den Gewässerabfluss auf Grundlage von Pegeldaten, deren Verfügbarkeit die räumliche Aussagefähigkeit der Ergebnisse bestimmt. Die Ergebnisse liegen statisch als Kartendarstellung vor. Ziel dieses Projektes war es neben der Aktualisierung des Kläranlageninventars, sowohl den Wasserhaushalt modellbasiert abzuleiten und zu regionalisieren, als auch ein interaktives, erweiterbares Analysewerkzeug zur Darstellung und Nutzung der Ergebnisse, zu entwickeln.

Für die Abbildung des Wasserhaushalts wurde das Modell LARSIM-ME (Large Area Simulation Model – Middle Europe) der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) genutzt. LARSIM-ME modelliert den Wasserhaushalt in einer räumlichen Auflösung von 5x5 km (25 km²). Die Einleitungen kommunaler Kläranlagen wurden in LARSIM-ME bisher nicht berücksichtigt. Ein erster und wichtiger Schritt war daher die Zuordnung der kommunalen Kläranlagen zu den LARSIM-ME Rastern (Gewässerabschnitten). Dafür wurden insgesamt 8.919 Kläranlagen integriert. Für die Visualisierung der Ergebnisse wurden den Modellrastern Gewässerteilstrecken zugeordnet. Innerhalb Deutschlands umfasst das finale, zugeordnete Gewässernetz ca. 57.310 km.

Datengrundlage für das Kläranlageninventar waren die Daten der Länder, die im Rahmen der Berichterstattung nach EU-Kommunalabwasserrichtlinie bzw. zum Zweck der Stoffeintragsmodellierung bereitgestellt werden. Berücksichtigt wurden kommunale Kläranlagen ab > 50 Einwohnerwerten (EW). Für die Berechnung des Anteils behandelten Abwassers in den Gewässern mit LARSIM-ME sollten die Trockenwetterabflüsse der Kläranlagen berücksichtigt werden, da LARSIM-ME Niederschlagsabflüsse von versiegelten urbanen Flächen bereits als flächenbürtigen Abfluss berücksichtigt. Der Trockenwetterabfluss kommunaler Kläranlagen umfasst häusliches und gewerbliches/industrielles Schmutzwasser einschließlich Fremdwasser. Während Anlagen im Trennsystem hauptsächlich häusliches und

gewerbliches/industrielles Schmutzwasser einschließlich Fremdwasser behandeln, fließt den Anlagen im Mischsystem zusätzlich ein Teil des Niederschlagswasser von versiegelten Flächen zu. Dieser muss entsprechend der formulierten Anforderung für diese Arbeiten separat ausgewiesen werden.

Allerdings liegen deutschlandweit kläranlagenspezifisch keine Informationen zum Trockenwetterabfluss, sondern nur zur behandelten Jahresabwassermenge vor. Daher wurde anhand eines detaillierten Datensatzes (Zeitreihen täglicher Zulaufmessungen) von 24 kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg (BW) im Mischsystem ein Verfahren entwickelt, um den Trockenwetteranteil an der Jahresabwassermenge abzuschätzen. Es basiert auf der Methode des gleitenden Minimums, die u. a. in BW und Bayern (BY) zur Ausweisung des mittleren Fremdwasseranteils im Kläranlagenzulauf genutzt wird (21 Tage gleitendes Minimum; Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) 2007, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) 2025). In der Detailstudie wurden wegen der im Vergleich zum Fremdwasser deutlich höheren Dynamik des Niederschlagsgeschehens Zeitfenster von 3 bis 10 Tagen zur Quantifizierung des mitbehandelten Niederschlagswassers untersucht. Unter Nutzung kläranlagenspezifisch optimaler Werte für jede der 24 Anlagen wurden Niederschlagswasseranteile zwischen ca. 20 % und 43 % (Median: 29 %) berechnet. In BW wurden diese Ergebnisse unter Berücksichtigung der Ausbaugröße der Anlagen, des Jahresniederschlags und des spezifischen Volumens der Regenüberlaufbecken (RÜB) im Einzugsgebiet der Anlage landesweit auf alle Anlagen übertragen. Da das letztgenannte Kriterium bundesweit nicht verfügbar ist, musste eine weitere Vereinfachung vorgenommen werden. Der Mischsystemanteil im Einzugsgebiet der Kläranlagen hat sich als geeignetes Kriterium erwiesen, um die grundsätzlichen Befunde aus BW bundesweit anwenden zu können. So konnten deutschlandweit für jede Kläranlage mittlere Trockenwetteranteile/-abflüsse berechnet und als Grundlage für die weiteren Arbeiten bereitgestellt werden. Berücksichtigt wurden hier – soweit verfügbar – jährliche Jahresabwassermengen für den Zeitraum 2006 bis 2020.

Im nächsten Schritt wurden die aktualisierten LARSIM-ME-Modelle genutzt, um die mittleren natürlichen Abflüsse für die Fließgewässer in Deutschland für den Zeitraum 2006 bis 2015 zu ermitteln. Aus der Differenz der simulierten Abflüsse mit und ohne Berücksichtigung der Kläranlagen-Trockenwetterflüsse konnte hierfür zunächst der mittlere Abfluss der Kläranlagen an 344 Gewässerpegeln berechnet werden. Anschließend wurde dieser von den gemessenen Abflusswerten abgezogen, um den mittleren natürlichen Abfluss an den Pegeln zu ermitteln. Aus diesem mittleren natürlichen Abfluss wurde eine mittlere natürliche Abflusshöhe berechnet und für die Zwischeneinzugsgebiete der Pegel dargestellt. Anhand dieser Darstellung konnten Unsicherheiten, lokale Phänomene und räumliche Inkonsistenzen zwischen Ober- und Unterliegerpegeln sichtbar gemacht werden. Bei auffälligen Werten wurden dann teilweise Pegel aus der Regionalisierung der mittleren natürlichen Abflüsse herausgenommen oder, soweit möglich, lokale Phänomene in den Modellen berücksichtigt. Hierbei musste iterativ vorgegangen werden. Anschließend wurden die mittleren natürlichen Abflusshöhen zusätzlich zu den Zwischeneinzugsgebieten auch für die einzelnen Modell-Raster ermittelt und dargestellt. Hierfür kam ein Korrekturfaktor zur Anwendung, über den ausgeglichen wird, dass bei der Kalibrierung der Modelle die Kläranlagen nicht berücksichtigt wurden und infolge der Modellungenauigkeit zusätzlich Unterschiede zwischen den simulierten und gemessenen Abflüssen auftreten können. Bei der anschließenden Überprüfung wurden dann gegebenenfalls starke Sprünge der Korrekturfaktoren an Grenzen der Zwischeneinzugsgebiete geglättet. Schlussendlich konnte mithilfe dieser Korrekturfaktoren eine LARSIM-Simulation durchgeführt

werden, um die finalen natürlichen Abflüsse für alle 7.402 Gewässerabschnitte zu ermitteln. Für die LARSIM-ME-Raster in Deutschland wurde zudem die mittlere natürliche Abflusshöhe berechnet.

Zur Validierung der Ergebnisse wurden die mittleren natürlichen Abflusshöhen den Werten aus dem Hydrologischen Atlas Deutschland (HAD) gegenübergestellt. Insgesamt zeigten die mit LARSIM-ME regionalisierten Ergebnisse und die Werte aus dem HAD eine sehr ähnliche räumliche Verteilung, wobei mit LARSIM-ME meist etwas niedrigere Werte simuliert wurden. Dies lässt sich aber durch Unterschiede in der Methodik und vor allem einen anderen Auswertungszeitraum erklären. So wies der Zeitraum 2006 bis 2015, der für die Simulation verwendet wurde, eine um etwa 1,1°C höhere Lufttemperatur auf als der im HAD ausgewertete Zeitraum 1961 bis 1990, was zu einer deutlich höheren Verdunstungsrate und somit zu niedrigeren mittleren natürlichen Abflüssen führt.

Zuletzt wurde der Anteil des Kläranlagen-Trockenwetterabflusses am mittleren Gesamtabfluss in den Gewässern ermittelt. Der Anteil von Trockenwetterabfluss aus Kläranlagen am gesamten Abfluss aus Deutschland betrug im Zeitraum 2006 bis 2015 ca. 7,5 %. Dabei liegt der mittlere Trockenwetterabflussanteil für ca. 92 % der analysierten Gewässerstrecken unter 10 %, erreicht aber im Extremfall einen Wert von 62 %. Besonders hohe Werte werden dabei erwartungsgemäß vor allem in Ballungsräumen mit hohen Einwohnerzahlen erreicht, wie beispielsweise im Ruhrgebiet, in Berlin, Frankfurt am Main oder dem mittleren Neckarraum. In eher dünn besiedelten Gebieten erreicht der Abwasseranteil meist nur niedrige Werte.

Ausgewählte Eingangsdaten sowie die Ergebnisse wurden in die webbasierte MoRE-DE Toolbox integriert. Hierfür wurde ein spezifisches interaktives Tool „Abwasserbehandlung“ entwickelt, programmtechnisch umgesetzt und in der Produktivumgebung der MoRE-DE Toolbox ausgerollt. Der Zugang erfolgt über die Website <https://stoffeintraege-more.de>.

Mit der Anwendung wurde eine interaktive Plattform geschaffen, die genutzt werden kann, um ausgehend vom Status Quo, Fragestellungen u. a. im Zusammenhang mit der Umsetzung der KARL zu analysieren. Dies umfasst auch die Möglichkeit verschiedene Szenarien/Fallkonstellationen zu berechnen und die Simulationsergebnisse dem Status Quo gegenüberzustellen. Beispielsweise kann eine Simulation der Auswirkungen eines veränderten Gesamtabflusses in Bezug auf die Verdünnungsverhältnisse und Abwasseranteile für ein gewähltes Einzugsgebiet sowie eine selektierte Kläranlage durchgeführt werden. Das Tool ist erweiterbar für weitere Informationen und Fragestellungen.

Summary

In Germany, approximately 8.3 billion m³ of wastewater are treated annually in municipal wastewater treatment plants (WWTPs; Federal Statistical Office (Destatis) 2023, 2024). The treated wastewater is generally discharged into surface waters. In regions with high wastewater generation or in very small water bodies, the proportion of treated wastewater in the receiving waters can be high. In addition, increasingly frequent and prolonged dry periods may lead to more frequent and more severe low-flow situations in water bodies, during which the proportion of treated wastewater in the surface waters increases.

Despite the overall high performance of municipal WWTPs, a wide range of substances is still discharged into water bodies with the treated wastewater. These discharges may pose a risk to aquatic communities and human health. Negative impacts may also occur for drinking water abstraction, particularly from bank filtration.

Current requirements, for example under the EU Urban Wastewater Treatment Directive (2024/3019, UWWTD), address issues related to the risk assessment of substance inputs into water bodies. The proportion of treated municipal wastewater is an important indicator for identifying water bodies with an increased risk. These current requirements necessitate spatially highly resolved assessments as well as suitable tools for the dynamic linkage of available emission and immission information. For this reason, the nationwide information on the proportion of treated wastewater in water bodies according to Drewes et al. (2018) was updated and the methodological approach further developed. Drewes et al. (2018) considered river discharge based on gauging station data, the availability of which determined the spatial resolution of the results. The results were available as static map representations. In addition to updating the inventory of wastewater treatment plants, the objective of this project was to derive and regionalize the water balance using a model-based approach and to develop an interactive, expandable analysis tool for the visualization and use of the results.

To represent the water balance, the model LARSIM-ME (Large Area Simulation Model – Middle Europe) of the Federal Institute of Hydrology was used. LARSIM-ME models the water balance at a spatial resolution of 5 × 5 km (25 km²). Discharges from municipal WWTPs had not previously been considered in LARSIM-ME. A first and important step was therefore the allocation of municipal WWTPs to the LARSIM-ME grid cells (river reaches). In total, 8,919 WWTPs were integrated. For visualization of the results, river sub-reaches were assigned to the model grid cells. Within Germany, the final assigned river network comprises approximately 57,310 km.

The data basis for the WWTP inventory consisted of data provided by the federal states within the framework of reporting under the EU Urban Wastewater Treatment Directive and for the purpose of modeling substance inputs. Municipal WWTPs > 50 population equivalents (PE) were considered. For calculating the proportion of treated wastewater in water bodies using LARSIM-ME, dry-weather flows of the WWTPs were taken into account, since LARSIM-ME already considers runoff from precipitation on sealed urban surfaces. The dry-weather flow of WWTPs includes domestic and commercial/industrial wastewater as well as infiltration water. While plants operating in separate sewer systems mainly treat domestic and commercial/industrial wastewater including infiltration water, plants in combined sewer systems additionally receive a

portion of stormwater from sealed surfaces. In accordance with the requirements defined for this project, this portion must be identified separately.

However, nationwide, no plant-specific information on dry-weather flow is available; only the treated annual wastewater volume is reported. Therefore, based on a detailed dataset (time series of daily influent measurements) from 24 municipal WWTPs in Baden-Württemberg (BW) operating in combined sewer systems, a method was developed to estimate the dry-weather share of the annual wastewater volume. It is based on the moving minimum method, which is used, among others, in BW and Bavaria to determine the average infiltration water share in wastewater treatment plant influent (21-day moving minimum; LUBW 2007, LfU 2025). In the detailed study, time windows of 3 to 10 days were investigated to quantify the co-treated stormwater, due to the much higher dynamics of precipitation compared to infiltration water. Using plant-specific optimal values for each of the 24 plants, stormwater shares between approximately 20 % and 43 % (median: 29 %) were calculated. In BW, these results were transferred to all plants, taking into account plant capacity, annual precipitation, and the specific volume of stormwater retention basins in the plant catchment area. Since the latter criterion is not available nationwide, a further simplification was necessary. The proportion of combined sewer systems in the catchment area of the WWTPs proved to be a suitable criterion for applying the fundamental findings from BW nationwide. Thus, average dry-weather shares and flows could be calculated for each wastewater treatment plant across the entire dataset and provided as a basis for further work. Where available, annual wastewater volumes for the period from 2006 to 2020 were considered.

In the next step, the updated LARSIM-ME models were used to estimate the mean natural discharges for flowing waters in Germany for the period 2006 to 2015. From the difference between simulated discharges with and without consideration of dry-weather flows from WWTPs, the mean WWTP discharge at 344 gauging stations was initially calculated. This value was then subtracted from the measured discharge values to determine the mean natural discharge at the gauges. From this mean natural discharge, a mean natural discharge was calculated and displayed for the intermediate catchments of the gauges. This representation made uncertainties, local phenomena, and spatial inconsistencies between upstream and downstream gauges visible. In the case of conspicuous values, gauges were partially excluded from the regionalization of mean natural discharges or, where possible, local phenomena were considered in the models. This required an iterative approach. Subsequently, the mean natural discharges were also determined and displayed not only for the intermediate catchments but additionally for the individual model grid cells. For this purpose, a correction factor was applied to compensate for the fact that WWTPs were not considered during model calibration and that additional differences between simulated and measured discharges may occur due to model inaccuracies. During subsequent verification, strong jumps in correction factors at the boundaries of intermediate catchments were smoothed where necessary. Finally, using these correction factors, a LARSIM simulation was carried out to determine the final natural discharges for all 7,402 river reaches. In addition, the mean natural runoff depth was calculated for the LARSIM-ME grid cells in Germany.

To validate the results, the mean natural runoff depths were compared with values from the Hydrological Atlas of Germany. Overall, the results regionalized with LARSIM-ME and the values

from the atlas showed a very similar spatial distribution, although LARSIM-ME generally simulated slightly lower values. This can be explained by differences in methodology and, in particular, by a different evaluation period. The period from 2006 to 2015 used for the LARSIM-ME simulations exhibited an air temperature approximately 1.1°C higher than the period from 1961 to 1990 evaluated in the Hydrological Atlas, leading to significantly higher evapotranspiration rates and thus lower mean natural discharges.

Finally, the proportion of dry-weather flow from WWTPs relative to the mean total discharge in water bodies was determined. The share of dry-weather flow from WWTPs in the total discharge from Germany amounted to approximately 7.5 % in the period from 2006 to 2015. For around 92 % of the analyzed river network, the mean dry-weather flow share was below 10 %, but in extreme cases it reached values of up to 62 %. As expected, particularly high values occur mainly in densely populated metropolitan areas, such as the Ruhr area, Berlin, Frankfurt am Main, or the central Neckar region. In more sparsely populated areas, the wastewater share generally reaches only low values.

Selected input data as well as the results were integrated into the web-based MoRE-DE toolbox. For this purpose, a specific interactive tool “Wastewater Treatment” was developed, implemented programmatically, and deployed in the production environment of the MoRE-DE toolbox (in German only). Access is provided via the website <https://stoffeintraege-more.de>.

The application provides an interactive platform that can be used to analyze questions related, among other things, to the implementation of the UWWTD, starting from the status quo. This also includes the possibility to calculate various scenarios and case constellations and to compare the simulation results with the status quo, for example by simulating the effects of changes in total discharge relative with regard to dilution conditions and wastewater shares for a selected catchment area and a selected WWTP. The tool is expandable to incorporate additional information and address further questions.

1 Einleitung

Deutschland hat mit 96,8 % einen hohen Anschlussgrad der Bevölkerung an öffentliche kommunale Kläranlagen (> 50 Einwohnerwerten¹ (EW) erreicht. In diesen Anlagen werden jährlich rund 8,3 Mrd. m³ Abwasser behandelt (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023, 2024) und i. d. R. in Oberflächengewässer eingeleitet. Je nach Größe des aufnehmenden Gewässers, Abwasseranfall und regionalem Wasserdargebot (natürlichem Gebietsabfluss), ist der Anteil behandelten kommunalen Abwassers am Gesamtabfluss der Gewässer sehr unterschiedlich. In Regionen mit hoher Einwohnerdichte und hohem Abwasseranfall oder in sehr kleinen Gewässern kann dieser Anteil hoch sein. Hinzu kommt, dass zunehmende und länger anhaltende Trockenperioden zu häufigeren und extremeren Niedrigwassersituationen in den Gewässern führen können. Bei einem quasi gleichbleibenden Trockenwetterabfluss² kommunaler Kläranlagen steigt dann der Anteil von behandeltem Abwasser in den Gewässern weiter an.

Trotz der insgesamt hohen Leistungsfähigkeit der Kläranlagen wird mit dem behandelten Abwasser nach wie vor ein breites Spektrum von Stoffen in die Gewässer eingetragen (Clara und Müller-Rechberger 2023; Fuchs et al. 2020; Pistocchi et al. 2022; Toshovski et al. 2020). Diese Einleitungen können dazu führen, dass immissionsbezogene Vorgaben (z. B. Orientierungswerte, Umweltqualitätsnormen) nicht eingehalten werden können und erhöhte Stoffkonzentrationen ein Risiko für aquatische Lebensgemeinschaften und die menschliche Gesundheit darstellen. Auch für die Trinkwassergewinnung, insbesondere aus Uferfiltrat, können negative Auswirkungen auftreten.

Die aktuellen Anforderungen der EU-Kommunalabwasserrichtlinie (2024/3019, KARL) und der in Revision befindlichen EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG, WRRL) erfordern zunehmend, vorhandene Emissions- und Immissionsinformationen dynamisch zusammenzuführen. Beide Richtlinien adressieren Fragen zur Risikoabschätzung stofflicher Einträge. Der Anteil behandelten kommunalen Abwassers ist hierbei ein wichtiger Indikator. Aussagen zum Anteil behandelten kommunalen Abwassers in Gewässern wurde erstmals deutschlandweit in einer vom Umweltbundesamt (UBA) beauftragten Studie (Drewes et al. 2018) getroffen. Drewes et al. (2018) berücksichtigten den Gewässerabfluss auf Grundlage von Pegeldaten, deren Verfügbarkeit die räumliche Aussagefähigkeit der Ergebnisse bestimmt. Die Ergebnisse liegen statisch als Kartendarstellung vor. Die aktuellen Anforderungen bedürfen jedoch räumlich höher aufgelöster Aussagen sowie geeigneter interaktiver Werkzeuge zur dynamischen Verknüpfung der verfügbaren Emissions- und Immissionsinformationen. Mit den nachfolgenden Arbeiten soll diese Lücke geschlossen werden.

Ein wichtiger Schritt ist in diesem Zusammenhang die Einbindung eines Wasserhaushaltsmodells zur Ermittlung der mittleren, natürlichen Abflüsse und des Anteils behandelten Abwassers in Gewässern. Genutzt wurde das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME (Large Area Simulation Model – Middle Europe) der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Meißner et al. 2017). LARSIM-ME wird bereits für die bundesweite Stoffeintragsmodellierung in Kombination mit dem Modell MoRE (Modelling of Regionalized Emissions) genutzt (Morling et al. 2024).

Da LARSIM-ME den Niederschlagsabfluss von versiegelten Flächen bereits berücksichtigt, wurde der Trockenwetterabfluss kommunaler Kläranlagen als zusätzliche Abflusskomponente in die

¹ Einwohnerwert (EW) stellt eine Rechengröße für die Abwasserreinigung dar (siehe DIN EN 1085). Er ist ein Maß für die Belastung gewerblich-industriell genutzten Abwassers mit organisch abbaubaren Stoffen - gemessen als BSB₅, das angibt, welcher Einwohnerzahl dieser Belastung entspricht ([Einwohnerwert \(EW\)](#)).

² Trockenwetterabfluss – behandeltes häusliches und gewerbliches/industrielles Schmutzwasser einschließlich Fremdwasser

Betrachtung einbezogen. Um diese zu ermöglichen, wurde das Inventar der kommunalen Kläranlagen aktualisiert und durch die Rechengröße Trockenwetterabfluss ergänzt. Abschließend wurde ein interaktives, szenarienfähiges und erweiterbares Werkzeug entwickelt, in welches alle relevanten Ergebnisse und Datensätze eingebunden wurden.

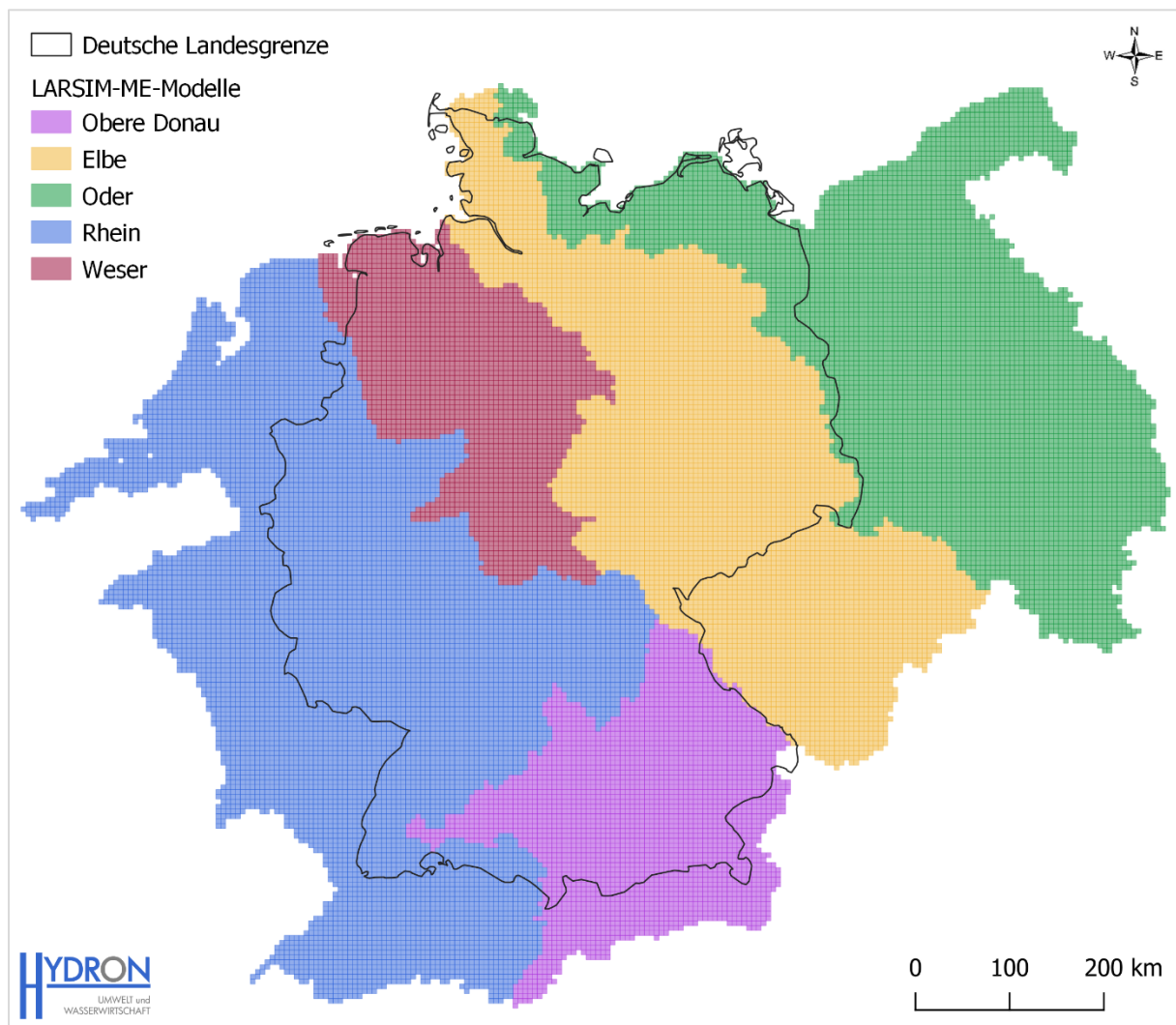
2 Modell- und Datengrundlagen

2.1 LARSIM-ME

LARSIM-ME modelliert den Wasserhaushalt räumlich differenziert und prozessbasiert für Deutschland in fünf einzugsgebietspezifischen Teilmodellen (Abbildung 1). Die Modellierung erfolgt auf Rasterebene mit einer räumlichen Auflösung von 5 x 5 km (25 km²). Die einzelnen Raster werden als LARSIM-Teilgebiete (TGB) bezeichnet. Sie sind über eine Fließvernetzung miteinander verbunden. Details zur Funktionsweise der LARSIM-Modelle sind in Bremicker (2000) und LARSIM Entwicklergemeinschaft (LEG) (2024) dokumentiert.

In LARSIM-ME wurden Einleitungen aus kommunalen Kläranlagen bisher nicht berücksichtigt. Die Integration der Kläranlagen war daher ein wichtiger Arbeitsschritt in diesem Projekt.

Abbildung 1: Übersicht über LARSIM-ME-Modelle für Deutschland



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

2.2 Kommunale Kläranlagen – Datenaufbereitung

In 2022 wurde das anfallende kommunale Abwasser deutschlandweit in 8.919 Kläranlagen > 50 EW behandelt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Anzahl kommunaler Kläranlagen in Deutschland (2022) nach Ausbaugröße und Größenklasse (GK) in Einwohnerwerten (EW); Quelle: Daten der Länder zur Berichterstattung nach EU-Kommunalabwasserrichtlinie

Bundesland	gesamt	< 1.000 EW (GK 1)	1.000 bis 5.000 EW (GK 2)	> 5.000 bis 10.000 EW (GK 3)	> 10.000 bis 100.000 EW (GK 4)	> 100.000 EW (GK 5)
Brandenburg	232	88	49	26	59	10
Berlin	1					1
Baden-Württemberg	878	171	218	144	308	37
Bayern	2.222	899	716	226	345	36
Bremen	4				1	3
Hessen		231	228	76	158	10
Hamburg	2		1			1
Mecklenburg-Vorpommern	581	428	80	23	46	4
Niedersachsen	524	68	65	99	266	26
Nordrhein-Westfalen	592	54	91	69	310	68
Rheinland-Pfalz	664	214	225	72	144	9
Schleswig-Holstein	772	506	167	32	60	7
Saarland	131	50	38	10	31	2
Sachsen	693	428	140	40	78	7
Sachsen-Anhalt	215	76	46	27	57	9
Thüringen	546	351	110	30	49	6
Deutschland	8.919	3.564	2.174	874	1.912	236

Für dieses Projekt wurde der aus der Berichterstattung nach KARL vorliegende deutschlandweite Kläranlagen-Datensatz für die Jahre 2006 bis 2020 genutzt. Nach KARL werden kommunale Kläranlagen ab einer Größe von 2.000 EW erfasst. Ab dem Jahr 2020 stellen die Bundesländer für die Stoffeintragsmodellierung darüber hinaus auch die Daten zu kommunalen Kläranlagen > 50 EW bis 2.000 EW bereit. Grundsätzlich ist das Inventar der kommunalen Kläranlagen über die letzten Jahre relativ konstant, auch wenn es regelmäßig

Stilllegungen insbesondere kleinerer Anlagen gibt, z. B. bedingt durch Überleitungen und Kläranlagenausbau. Die in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse stellen die mittleren Bedingungen in dem oben genannten Untersuchungszeitraum dar.

Das Einzugsgebiet kommunaler Kläranlagen wird mit räumlich deutlich schwankenden Anteilen an Trenn- oder Mischkanalisation, in der Regel einer Kombination beider Systeme, entwässert. In der Trennkanalisation werden Schmutzwasser und Niederschlagswasser von versiegelten Flächen in separaten Kanälen gesammelt. Den Kläranlagen wird nur das Schmutzwasser sowie ggf. vorhandenes Fremdwasser³ (Trockenwetterzufluss) zugeführt. Im Mischsystem werden Schmutzwasser und Niederschlagswasser von versiegelten Flächen in einem gemeinsamen Kanal gesammelt und den Kläranlagen als Mischwasser zugeleitet. Bei Niederschlag wird daher ein Teil des Niederschlagswassers in den Kläranlagen mitbehandelt. Ein weiterer Teil wird vor den Kläranlagen entlastet.

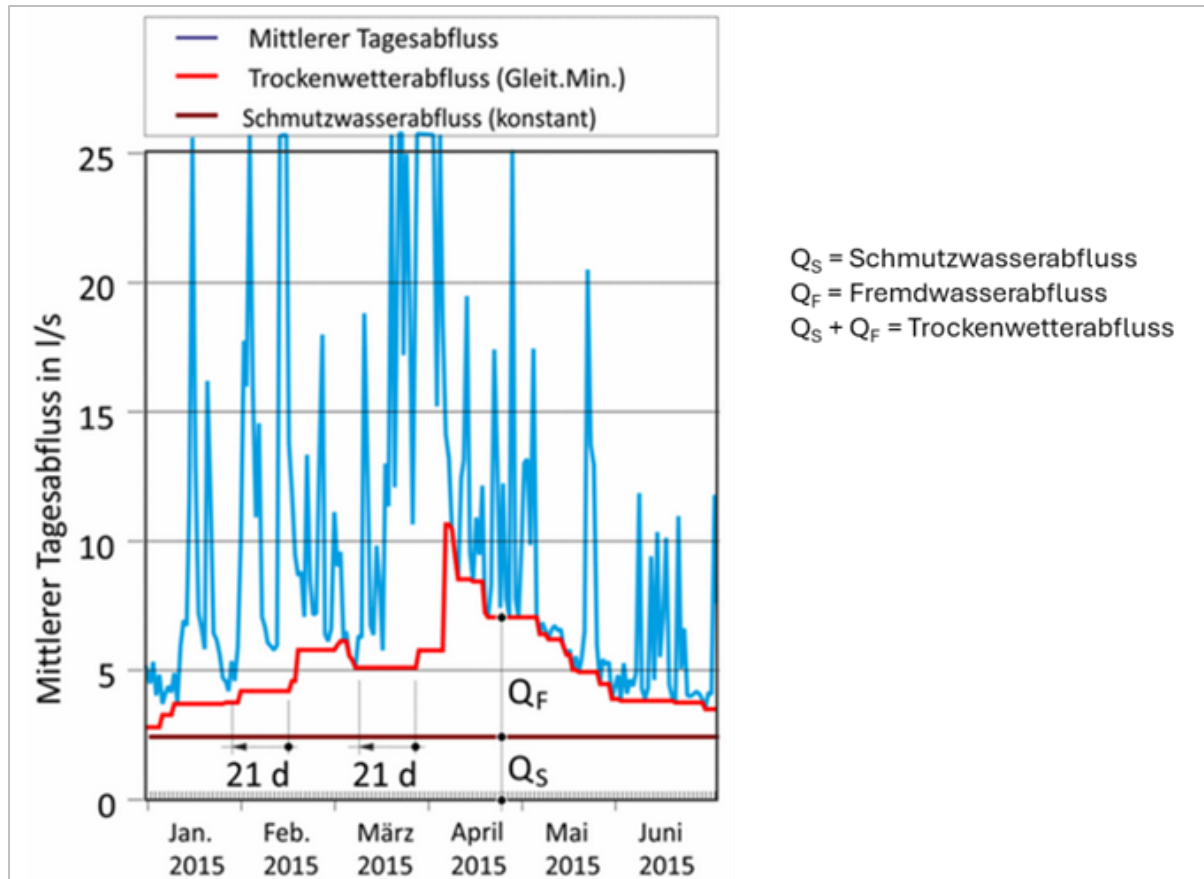
Zur Komplementierung der Wasserhaushaltsberechnungen mit LARSIM-ME ist der Trockenwetterabfluss der Kläranlagen erforderlich. Dieser Wert liegt in den verfügbaren Daten zu kommunalen Kläranlagen nicht vor, da nach KARL nur die Jahresabwassermenge pro Anlage berichtet wird. Es war daher notwendig ein Verfahren zur Ableitung der Trockenwetterabflüsse auf Grundlage der Jahresabwassermengen zu entwickeln.

2.2.1 Ableitung der Trockenwetterabflüsse kommunaler Kläranlagen

Zur Aufteilung der Jahresabwassermengen in einem Trockenwetter- und Niederschlagswasseranteil wurde ein detaillierter Datensatz (Zeitreihen täglicher Zulaufmessungen) von 24 kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg (BW) im Mischsystem genutzt. Basierend auf der Methode des gleitenden Minimums, wurden die Zuflussganglinien der Anlagen analysiert. Das Verfahren wird u. a. in BW und Bayern (BY) zur Ausweisung des mittleren Fremdwasseranteils im Kläranlagenzulauf genutzt. Zum Zweck der Fremdwasserbestimmung hat sich ein Zeitraum von 21 Tagen (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) 2025; Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) 2007) bewährt. Abbildung 2 verdeutlicht das methodische Vorgehen. Das 21-Tage-Zeitfenster wird im Tagesschritt gleitend über die Datenreihe bewegt. Für jeden Tag kann so ein Abflussminimum ausgewiesen werden. Die grundlegende Annahme ist, dass innerhalb dieses Zeitfensters ein regenfreier Tag liegt. Das ermittelte Minimum repräsentiert dann den Trockenwetterzufluss (Schmutzwasserzufluss [Q_S] einschließlich Fremdwasserzufluss [Q_F]). Wird Q_S als konstant angenommen, kann auf diese Weise der Fremdwasserzufluss zur Kläranlage, sowie dessen zeitliche Variabilität, bestimmt werden.

³ Fremdwasser: Wasser, das bspw. durch Grundwassereinsickerungen oder Undichtigkeiten in die Kanalisation eintritt.

Abbildung 2: Methode des 21-Tage (d) gleitenden Miniums zur Abflusseparation im Zulauf kommunaler Kläranlagen (nach Weiß 2020)



Quelle: Weiß 2020

Die Analyse der Zeitreihen der Zulaufwassermengen über einen Zeitraum von einem bis vier Jahre und für die 24 Kläranlagen (u. a. in Demmert 2024⁴) haben gezeigt, dass die Aufteilung der täglichen Kläranlagenzulaufwerte in einen Trockenwetter- und Niederschlagswasseranteil ein deutlich kleineres Zeitfenster erfordert. Ein 21-Tage-Zeitfenster führt bei saisonal hohen Fremdwasserzuflüssen zu einer systematischen Überschätzung des mitbehandelten Niederschlagswasseranteils. Die neu ermittelte Trockenwetterganglinie löst sich dann von der Zuflussganglinie ab (Abbildung 2, Zeitraum Jan.-April) und ein Teil des Fremdwassers wird dem Niederschlagswasser zugerechnet. Um eine plausiblere Aufteilung in Niederschlags- und Trockenwetteranteil zu erzielen, wurden in den Detailanalysen Zeitfenster zwischen drei und zehn Tagen gewählt. Eine Plausibilisierung der Ergebnisse erfolgte u. a. durch einen Abgleich mit Angaben der Trockentage der Kläranlagen. Es hat sich gezeigt, dass der optimale Betrachtungszeitraum anlagenspezifisch ist und neben der Dynamik des Niederschlagsgeschehens auch stark durch die Eigenschaften des Einzugsgebiets und des Entwässerungsnetzes der Kläranlagen beeinflusst wird. Unter Nutzung des optimalen Wertes für jede der 24 Anlagen in BW wurde schließlich ein mitbehandelter Niederschlagswasseranteil von 20 % bis 43 % (Median: 29,5 %) berechnet.

⁴ Demmert, M. A. (2024): The annual quantity of wastewater (of a WWTP) as a basis for a regional differentiated estimation of stormwater overflow volumes. Masterarbeit, unveröffentlicht

2.2.2 Übertragung auf den deutschlandweiten Kläranlagendatensatz

Für BW wurden die Ergebnisse der Detailuntersuchung über einen empirischen Ansatz, der neben dem Jahresniederschlag die Ausbaugröße der Anlagen und das RÜB-Volumen im Einzugsgebiet der Anlagen berücksichtigt, in die Fläche übertragen. Folgende funktionalen Zusammenhänge wurden dabei angenommen:

- 1) mit zunehmender, nicht durch die angeschlossenen Einwohner ausgeschöpfter hydraulischer Kapazität der Kläranlagen, kann mehr Niederschlagswasser mithandelt werden und
- 2) mit zunehmendem flächenspezifischen RÜB-Volumen der Kläranlagen, kann mehr Niederschlagswasser zwischengespeichert und mitbehandelt werden.

Da das Kläranlagen-spezifische RÜB-Volumen bundesweit nicht verfügbar ist, wurde im Weiteren geprüft, ob der mitbehandelte Niederschlagswasseranteil näherungsweise durch den Mischsystemanteil im Einzugsgebiet abgeschätzt werden kann. Die Annahme ist, dass der Anteil behandelten Niederschlagswassers ($Q_{R,Ka}$) mit dem Mischsystemanteil im Kläranlageneinzugsgebiet steigt. Diese Annahme wird durch statistische Daten auf Bundeslandebene grundsätzlich bestätigt (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023, 2024). Tabelle 2 zeigt eine Gegenüberstellung der Werte je Bundesland.

Tabelle 2: Mischsystemanteile und in kommunalen Kläranlagen behandelter Niederschlagswasseranteil je Bundesland (Statistisches Bundesamt Destatis (2023))

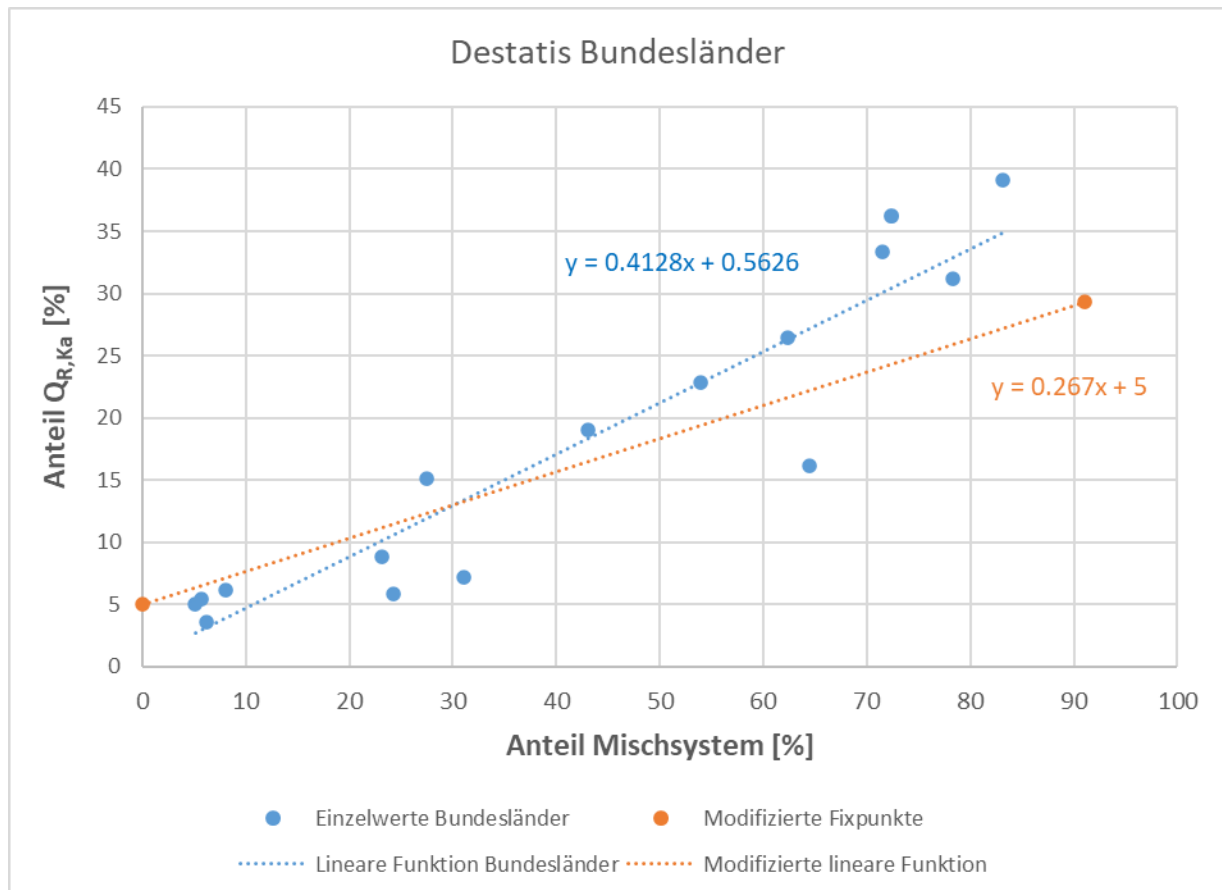
Bundesland	Anteil Mischsystem [%]	Anteil behandeltes Niederschlagswasser [%]
Baden-Württemberg	72,4	36,2
Bayern	62,4	26,5
Berlin	24,2	5,9
Brandenburg	5,1	5,0
Bremen	31,0	7,2
Hamburg	27,5	15,1
Hessen	78,3	31,2
Mecklenburg-Vorpommern	5,7	5,4
Niedersachsen	6,2	3,6
Nordrhein-Westfalen	53,9	22,8
Rheinland-Pfalz	71,5	33,3
Saarland	83,1	39,1
Sachsen	43,1	19,0
Sachsen-Anhalt	23,2	8,8
Schleswig-Holstein	8,1	6,2
Thüringen	64,4	16,2

Auffällig ist, dass der in der Statistik für BW berichtete Anteil des mitbehandelten Niederschlagswassers (36 %) höher ist als der Median (29,5 %) der Detailuntersuchung, obwohl der Mischsystemanteil der dort untersuchten Kläranlageneinzugsbiete bei 91 % lag. Für BW ist dies mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine methodenbedingte systematische Überschätzung des Niederschlagswasseranteils im Zulauf der Kläranlagen zurückzuführen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die behandelte Niederschlagswassermenge auch in anderen Bundesländern tendenziell überschätzt wird.

Trotz der bestehenden Unschärfen ist der Mischsystemanteil im Kläranlageneinzugsgebiet ein geeignetes Kriterium, um die Jahresabwassermenge bundesweit einheitlich in einen Trockenwetter- und Niederschlagswasseranteil aufzuteilen. Entsprechend der gegebenen Daten- und Kenntnislage, wurde eine einfache lineare Beziehung mit einem Minimum und Maximum für den mitbehandelten Niederschlagswasseranteil als Fixpunkte festgelegt. Der Maximalwert mit 29,5 % bei 91 % Mischsystemanteil wurde aus den Detailuntersuchungen in BW abgeleitet. Der Minimalwert 5 % für Anlagen, deren Einzugsgebiet zu 100 % im

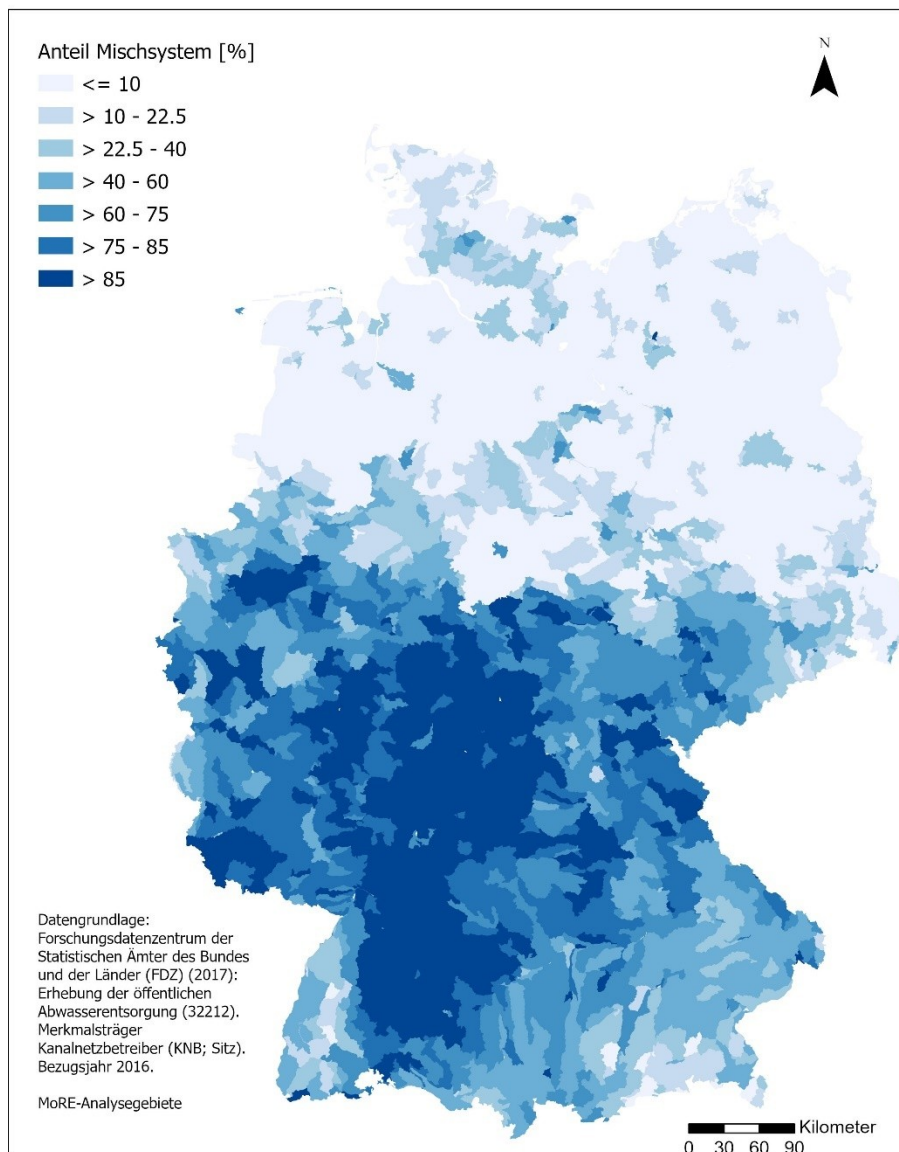
Trennsystem entwässert wird, ergibt sich aus der Überlegung, dass Niederschlagswasserzuflüsse auch in Schmutzwasserkanälen, z. B. über Schachtabdeckungen nicht komplett verhindert werden können. Der resultierende Zusammenhang ist in Abbildung 3 als orange Linie dargestellt.

Abbildung 3: Beziehungen zwischen Mischsystem- und behandeltem Niederschlagswasseranteil ($Q_{R,Ka}$) in kommunalen Kläranlagen (DESTATIS 2023)



Quelle: eigene Darstellung KIT-IWU

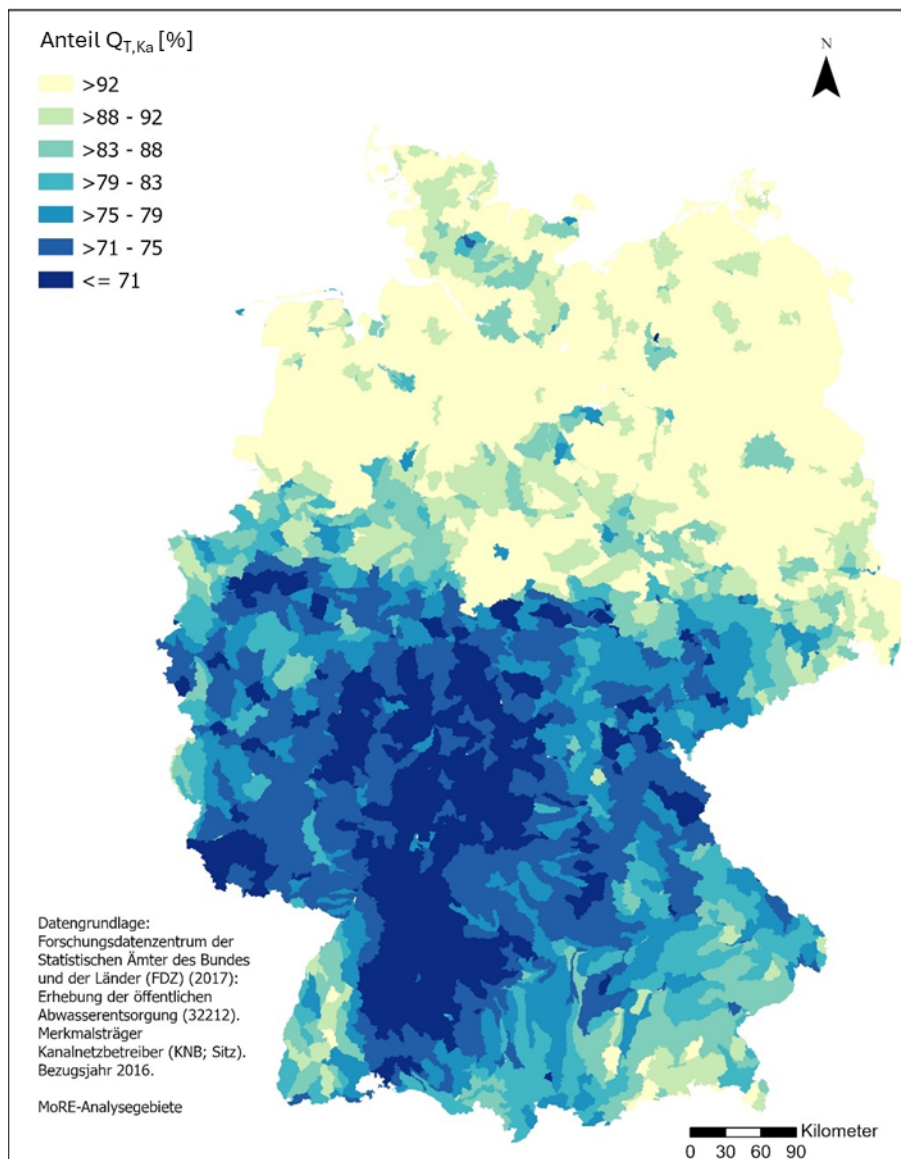
Informationen zum Mischsystemanteil im Einzugsgebiet kommunaler Kläranlagen stehen deutschlandweit nicht kläranlagenscharf zur Verfügung. Daher wurde auf einen Datensatz des Forschungsdatenzentrums (FDZ) auf Gemeindeebene (Stand 2016) zurückgegriffen (Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder (FDZ) 2017). Dieser Datensatz lag für die Nutzung im Stoffeintragsmodell MoRE aufbereitet vor. Die auf Gemeindeebene vorliegenden Daten wurden auf die räumlichen Modelleinheiten, die MoRE-Analysegebiete, übertragen (Abbildung 4). Es treten deutliche Unterschiede zwischen hohen Mischsystemanteilen im südlichen Landesteil und dem stärker durch das Trennsystem dominierten Norden/Nord-Osten hervor. Diese Daten wurden für die Jahre 2019 und 2020 übernommen.

Abbildung 4: Verteilung des Mischsystemanteils in Deutschland (2016)

Quelle: eigene Darstellung KIT-IWU

Anschließend wurden auf Grundlage der in Abbildung 3 dargestellten Beziehung kläranlagenspezifisch aus der behandelten Jahresabwassermenge der Anteil des Trockenwetterabfluss und des behandelten Niederschlagswassers und schließlich der behandelte Niederschlags- und Trockenwetterabfluss [m^3/a] berechnet. Anlagen, denen kein Mischsystem-Anteil zugeordnet werden konnte, wurde mit dem Median von 29,5 % Regenwasser aus den Detailuntersuchungen in BW angesetzt.

Mit dem beschriebenen Ansatz ergibt sich für Deutschland kläranlagenspezifisch ein Anteil von mitbehandeltem Niederschlagswasser von 5 % bis rund 32 % (Median 23 %). Der Trockenwetteranteil liegt damit zwischen 68 % und 95 %. Abbildung 5 zeigt die räumliche Verteilung des berechneten Trockenwetteranteils an der Jahresabwassermengen der Kläranlagen in Deutschland.

Abbildung 5: Verteilung des berechneten Trockenwetteranteils ($Q_{T,Ka}$) kommunaler Kläranlagen

Quelle: eigene Darstellung KIT-IWU

Die in Abbildung 5 dargestellten Berechnungsergebnisse wurden zur Plausibilitätsprüfung den auf Bundeslandebene verfügbaren statistischen Daten gegenübergestellt (Tabelle 3). Hierfür wurde der Median aller in einem Bundesland liegenden Kläranlagen gebildet. Für einzelne Bundesländer sind nur geringe Unterschiede zu beobachten (bspw. Brandenburg oder Nordrhein-Westfalen). Für andere Bundesländer ergeben sich jedoch deutliche Unterschiede. Hierbei spielt vermutlich die am Beispiel von BW erläuterte methodische Herangehensweise bei der Ermittlung des Fremdwasserzuflusses zur Kläranlage eine Rolle, die zu einer Überschätzung des mitbehandelten Niederschlagswasseranteils führt.

Tabelle 3: Vergleich der berechneten Anteile behandelten Niederschlagswassers mit den statistischen Daten (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023) je Bundesland

Bundesland	Anteil behandelten Niederschlagswassers Destatis [%]	Anteil behandelten Niederschlagswassers berechnet [%]	Relative Differenz [%]
Baden-Württemberg	36,2	28,8	-20,3
Bayern	26,5	23,5	-11,5
Berlin	5,9	12	103
Brandenburg	5	5,03	0,6
Bremen	7,2	14,2	97
Hamburg	15,1	13,8	-8,7
Hessen	31,2	29,1	-6,6
Mecklenburg-Vorpommern	5,4	5,37	-0,6
Niedersachsen	3,6	5,5	51
Nordrhein-Westfalen	22,8	21,2	-7,1
Rheinland-Pfalz	33,3	26,5	-20,4
Saarland	39,1	30,3	-22,6
Sachsen	19	19,5	2,7
Sachsen-Anhalt	8,8	9	1,7
Schleswig-Holstein	6,2	7,7	23,7
Thüringen	16,2	25	54

Zudem ergeben sich Unterschiede aufgrund der räumlichen Auflösung der verwendeten Eingangsdaten. Die mittleren Mischsystemanteile von Destatis sind Bundesland-Mittelwerte (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2023). In MoRE werden jedoch Analysegebietsdaten bzw. Daten auf Gemeindeebene mit einer räumlich höheren Differenzierung genutzt. Aufgrund der Variabilität der Mischsystemanteile innerhalb der Bundesländer (z. B. Schleswig-Holstein und Thüringen) ergeben sich dadurch zwangsläufig rechnerische Unterschiede. In den Stadtstaaten mit vergleichsweise wenigen Anlagen kann dieses Phänomen besonders stark ausgeprägt sein. Insgesamt konnte für die betrachtete Skala eine realitätsnahe Abschätzung der Trockenwetteranteile vorgenommen und zur Integration in LARSIM-ME genutzt werden.

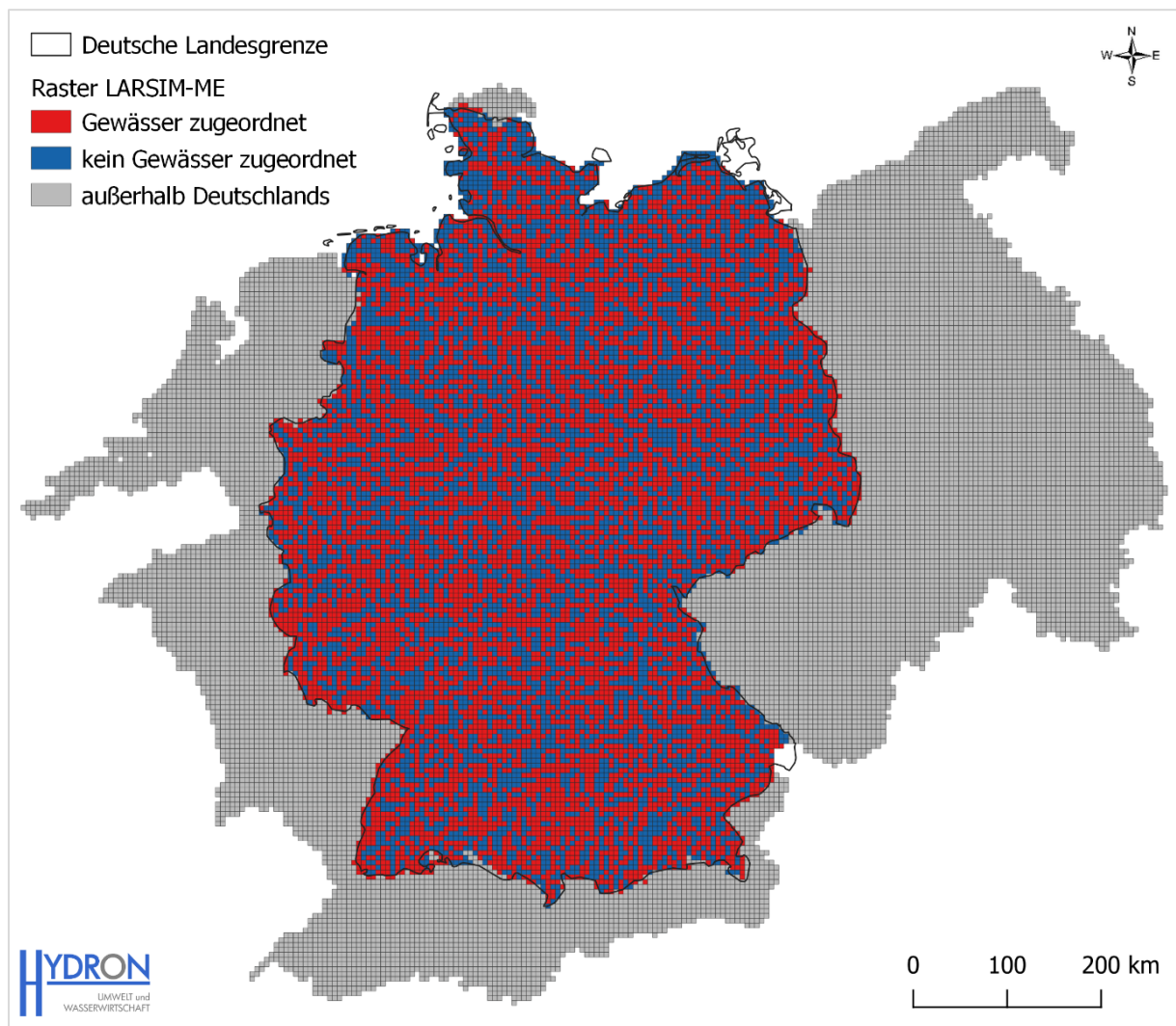
3 Vorbereitende Arbeiten und modelltechnische Erweiterung von LARSIM-ME

3.1 Zuordnung von Fließgewässerabschnitten zu den LARSIM-ME-Rastern

Für die Visualisierung der mittleren natürlichen Abflüsse wurden den LARSIM-ME-Rastern Fließgewässerabschnitte zugeordnet. Als Grundlage hierfür stand das Berichtsgewässernetze der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) Wasserkörper-DE (LAWA 2025) zur Verfügung. Die Zuordnung erfolgte über die Gewässerkennzahl. Zunächst wurden unter Berücksichtigung der Lage der Gewässer und der Fließvernetzung in LARSIM-ME die zusammenhängenden Fließgewässer zugeordnet. Anschließend wurden diese in Gewässerteilstrecken (GTS) für die einzelnen LARSIM-Raster unterteilt. Ausgenommen hiervon sind Quellelemente im Modell, da diese in LARSIM keine Fließstrecke haben. Zudem wurden nur die Raster und Gewässer innerhalb Deutschlands berücksichtigt.

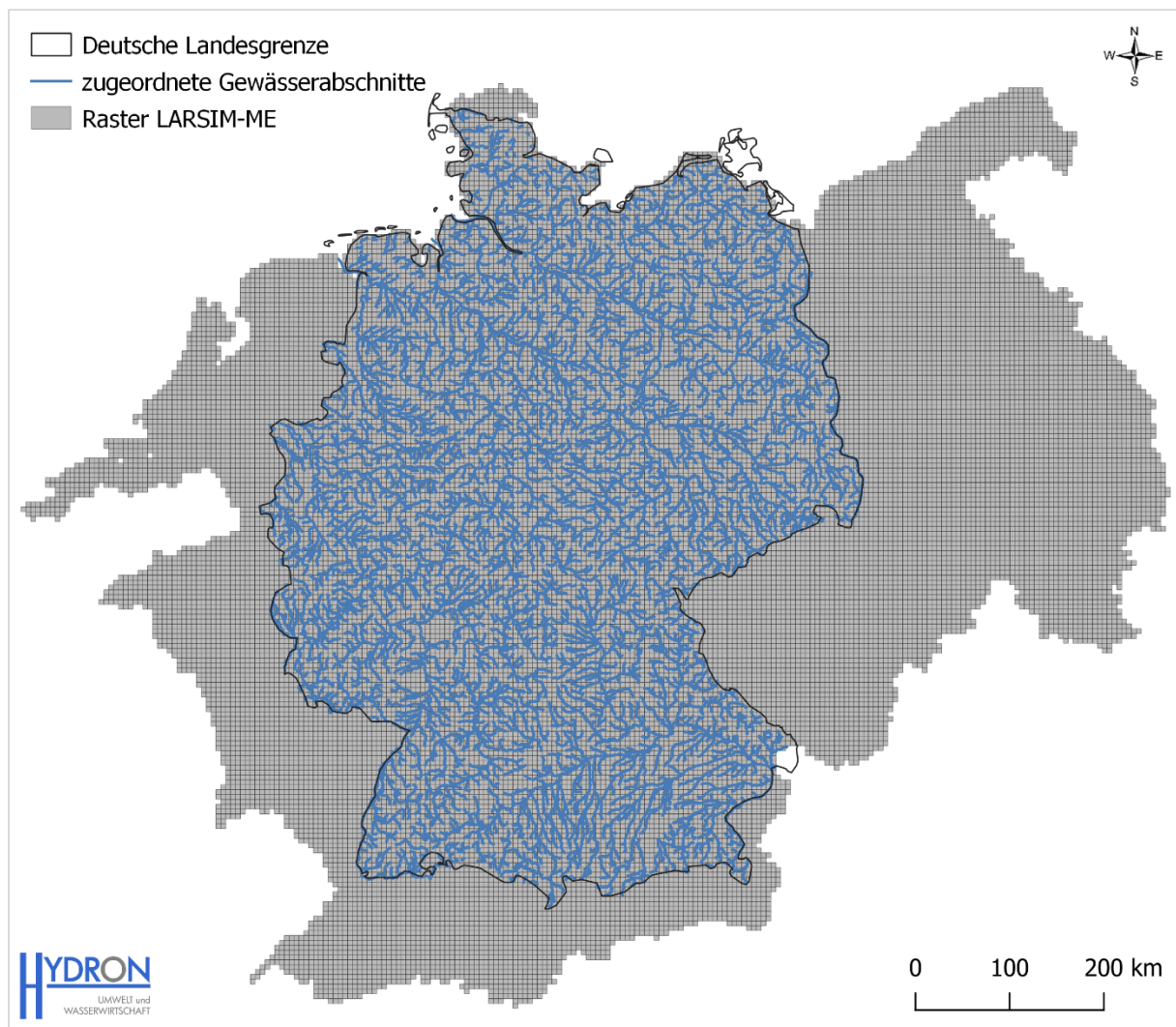
Abbildung 6 zeigt die Raster aus LARSIM-ME. Von den insgesamt 25.661 Rastern liegen 13.483 in Deutschland. Davon sind 5.731 Raster als Quellelemente festgelegt und 7.752 Raster repräsentieren eine Fließstrecke. Von diesen konnten 95 % (7.402 Raster) einem Fließgewässerabschnitt aus dem LAWA-Gewässernetz zugeordnet werden (Abbildung 6, rot).

Abbildung 6: Darstellung der 25 km²-Raster der hier verwendeten LARSIM-ME-Modelle



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

Ergebnis dieser Zuordnung ist ein „ausgedünntes“ LAWA-Gewässernetz mit den Fließgewässerabschnitten, die durch LARSIM-ME-Raster abgedeckt sind. Dieses Gewässernetz umfasst eine Gesamtlänge von rund 57.310 km (Abbildung 7).

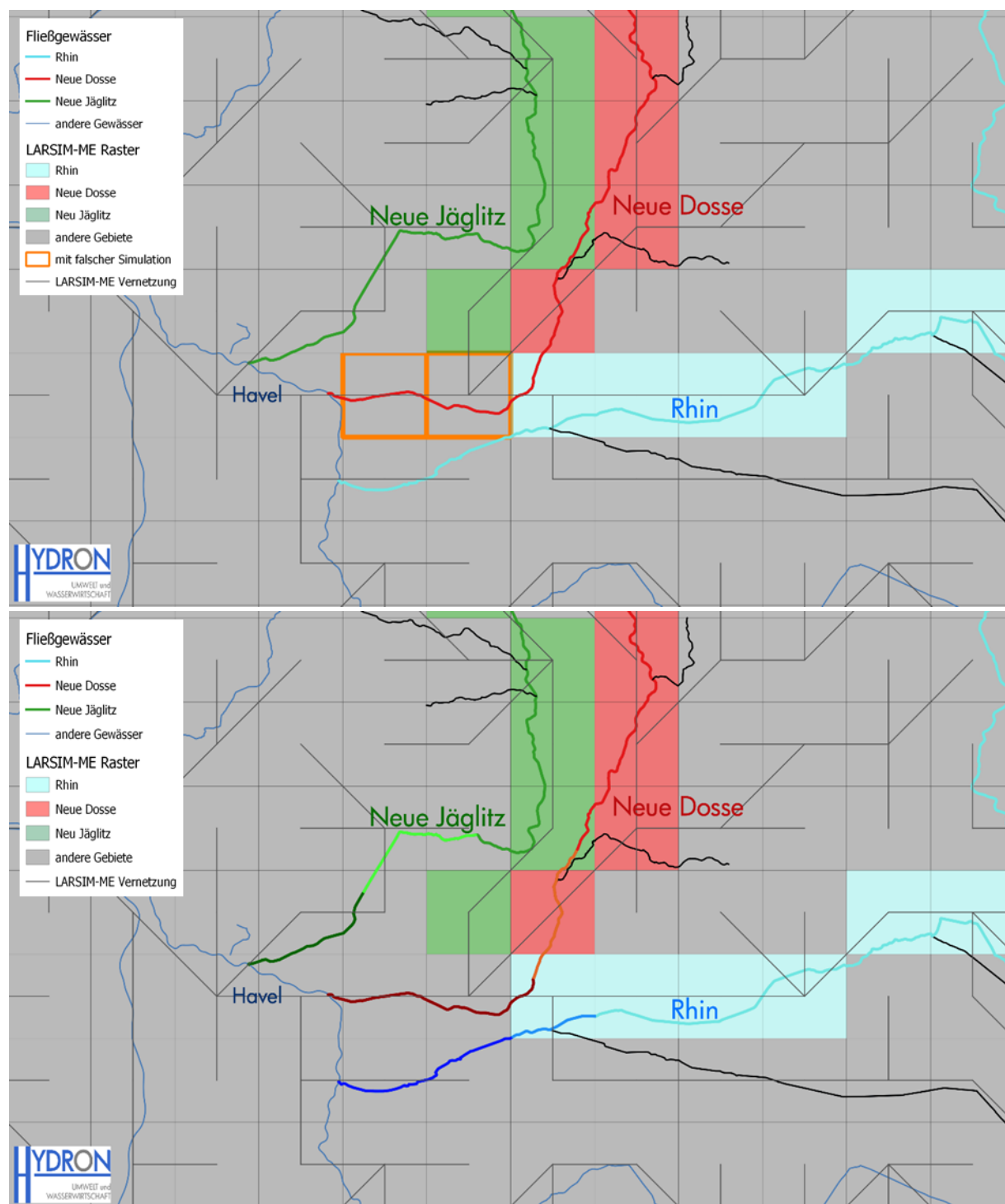
Abbildung 7: Durch LARSIM-ME-Modelle abgebildetes Fließgewässernetz

Quelle: eigene Darstellung HYDRON

Die verbleibenden 5 % der Raster (ohne Zuordnung) befinden sich zum Teil in Bereichen, in denen bspw. kein Oberflächengewässer vorliegt. Hierbei handelt es sich u. a. um Karstgebiete. Zudem wurden Bereiche identifiziert, in denen die Fließvernetzung in LARSIM-ME fehlerhaft bzw. ungenau ist und daher keine Zuordnung der Gewässer zu den Rastern möglich war. Solche Vernetzungsungenauigkeiten können in LARSIM-ME bspw. im Bereich von Flussmündungen auftreten oder bei Kanälen und Gräben.

3.1.1 Ungenauigkeiten in Mündungsbereichen von Flüssen

Ein Beispiel für Ungenauigkeiten im Modell in Mündungsbereichen zeigt Abbildung 8 für die Rhin-Mündung in die Havel. In der Realität münden die Rhin (blau), die Neue Dosse (rot) und die Neue Jäglitz (grün) flussab nacheinander in die Havel (Abbildung 8, oben). Die jeweils zugehörigen Raster dieser drei Flüsse sind gleichfarbig markiert. Die grauen Linien zeigen die Fließvernetzung des Modells an. Es wird deutlich, dass im Modell die Neue Dosse und die Neue Jäglitz fälschlich zunächst in die Rhin münden und die Rhin in die Havel. Im Modell wird daher in den beiden orange markierten Rastern im Vergleich zur Realität ein zu großes Einzugsgebiet abgebildet und folglich zu viel Abfluss simuliert.

Abbildung 8: Beispielhafte Darstellung von Vernetzungsungenauigkeiten in Mündungsbereichen

Quelle: eigene Darstellung HYDRON

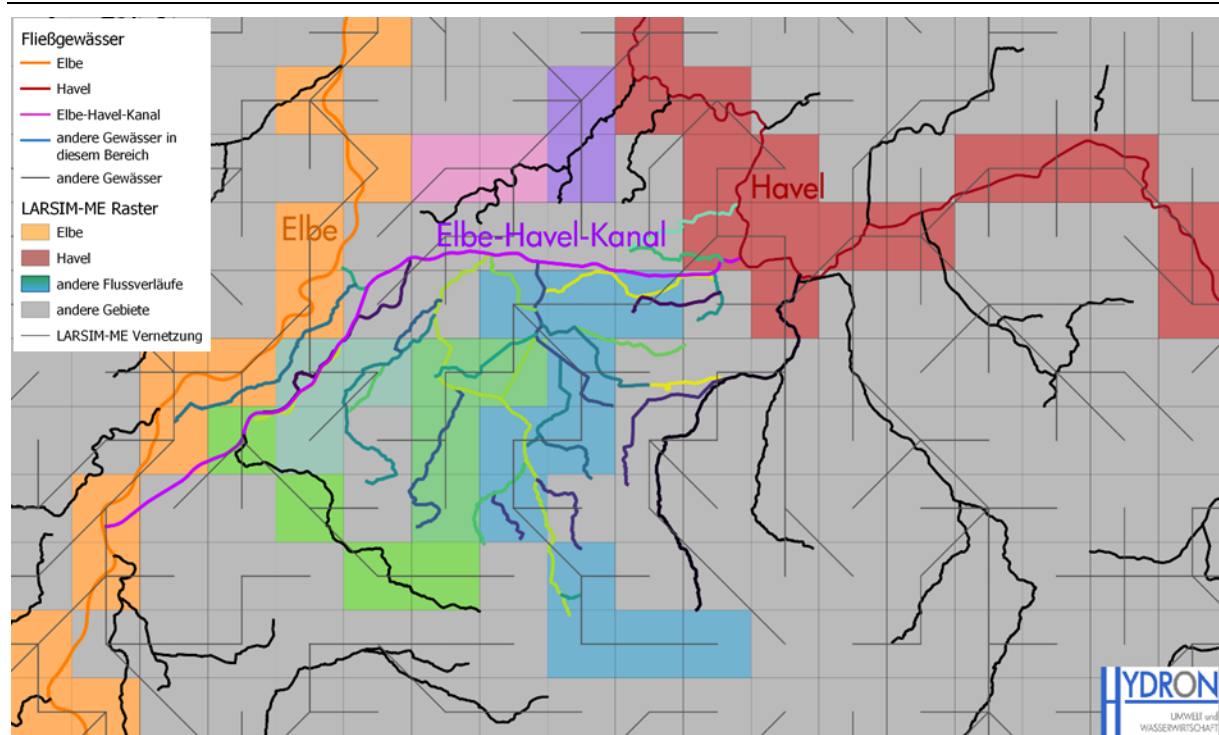
Diesen beiden Rastern wurde daher kein Fließgewässerabschnitt zugeordnet. Für die Darstellung der Ergebnisse wurden die Gewässerabschnitte jedoch beibehalten und dem jeweils letzten LARSIM-Raster zugeordnet, in dem die Simulation noch korrekt ist. In diesem Fall wurde somit der mittel- und dunkelblaue Gewässerabschnitt der Rhin dem letzten blau markierten Raster zugeordnet (Abbildung 8, unten). Beide Abschnitte erhalten dieselben Werte. Für die spätere Darstellung ist es somit möglich entweder beide Gewässerabschnitte mit denselben

Werten darzustellen oder den dunkelblauen, nicht korrekt im Modell abgebildeten Gewässerabschnitt aus der Darstellung herauszunehmen. Für die letzten beiden Gewässerabschnitte an der Neuen Dosse und der Neuen Jäglitz wurde analog vorgegangen.

3.1.2 Ungenauigkeiten bei Kanälen und Gräben

Vor allem in Norddeutschland ist das Gewässernetz durch viele Gräben und Kanäle geprägt die bisher häufig nicht im Modell enthalten sind. Ein Beispiel zeigt Abbildung 9 im Bereich des Elbe-Havel-Kanals. Die betreffenden Gewässer bzw. die LARSIM-Raster sind entsprechend der Fließvernetzung farbig markiert.

Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung von Vernetzungsungenauigkeiten im Bereich des Elbe-Havel-Kanals



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

Elbe und Havel sind erwartungsgemäß korrekt im Modell abgebildet. Nicht im Modell abgebildet ist der Elbe-Havel-Kanal. Auch die kleineren Gewässer, die teilweise in den Kanal münden, sind nicht eindeutig im Modell dargestellt. Daher konnte diesen Gewässerabschnitten kein LARSIM-Raster zugewiesen werden. Folglich befindet sich in diesem Bereich eine Lücke im korrekt abbildbaren Gewässernetz.

3.2 Integration der Kläranlagen in LARSIM-ME

3.2.1 Zuordnung der Kläranlagen zur Modellstruktur

Die Kläranlagen wurden anhand der Lage ihrer Einleitstellen möglichst fließvernetzungs-konform den 25 km²-Rastern von LARSIM-ME zugeordnet.

Gut 6.000 der Kläranlagen (Datenstand 2006 bis 2020) konnten direkt einem Fließgewässerabschnitt zugeordnet werden. Hierzu zählen zum Teil auch Kläranlagen die in

einem im Modell definierten Quellelement liegen (siehe Kapitel 3.1). Weitere 2.100 Kläranlagen leiten in kleinere Flüsse und Bäche ein, die aufgrund der räumlichen Modell-Auflösung (25 km²) nicht explizit als Fließstrecke abgebildet sind. Die Kläranlagen an diesen Gewässern wurden gemäß der Fließvernetzung im Modell dem Raster des jeweiligen Vorfluters zugeordnet. Bei den restlichen ca. 1.330 Kläranlagen traten hingegen verschiedene Auffälligkeiten auf, die im Folgenden kurz erläutert werden.

- ▶ 10 Kläranlagen hatten jeweils zwei Einleitstellen und lagen damit doppelt vor. Hier wurde jeweils nur die Einleitstelle berücksichtigt, die nach visueller Prüfung als realistischer erschien.
- ▶ 614 Kläranlagen befinden sich in Bereichen in denen kein Gewässer vorliegt (z. B. Karstgebiete) bzw. entwässern ins Grundwasser und mussten aus modelltechnischen Gründen vereinfacht in das Raster aufgenommen in dem sie liegen
- ▶ 10 Kläranlagen entwässern in den Bodensee und wurden daher in das Raster verdrahtet in dem sie liegen, wodurch sie modelltechnisch zum Abfluss des Rheins am Auslass des Bodensees beitragen.
- ▶ 14 Kläranlagen entwässern direkt ins Meer und wurden daher nicht im Modell berücksichtigt
- ▶ 81 Kläranlagen befinden sich im Bereich der Nord- und Ostseeküste in Quellgebiets-Raster, die direkt ins Meer münden. Diese Kläranlagen wurden in den Quellgebiets-Rastern eingeleitet und werden somit in der deutschlandweiten Betrachtung berücksichtigt. Da Quellgebiets-Raster aber keine Gewässerteilstrecken in LARSIM-ME haben, wird deren Wirkung auf die kleinen, direkt ins Meer mündenden Fließgewässer nicht visualisiert.
- ▶ 25 Kläranlagen befinden sich in einem Bereich des Modells, in dem die Vernetzung nicht mit der Realität übereinstimmt und wurden in das Raster verdrahtet, in dem sie liegen
- ▶ 96 Kläranlagen befinden sich in einem Bereich des Modells, in dem die Vernetzung nicht mit der Realität übereinstimmt und wurden in das Raster des jeweiligen Vorfluters verlegt
- ▶ 101 Kläranlagen befinden sich außerhalb des Modellgebiets z. B. auf Inseln, die nicht im Modell abgebildet sind und wurden daher verworfen

Insgesamt konnten somit 8.919 Kläranlagen mit dem LARSIM-ME-Raster und der zugrundeliegenden Fließvernetzung verknüpft werden.

3.2.2 Berücksichtigung der Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse in LARSIM-ME

Der Abfluss im Gewässer soll als mittlerer Gesamtabfluss berücksichtigt werden. Jede Kläranlage wurde als konstante Punktquelle mit dem mittleren berechneten Trockenwetterabfluss in die LARSIM-ME Modelle integriert. Das ist in diesem Fall ausreichend, da es nicht Ziel ist, eine hohe zeitliche Dynamik oder Tageswerte auszuwerten. Der Niederschlag von versiegelten Flächen ist in LARSIM-ME bereits enthalten.

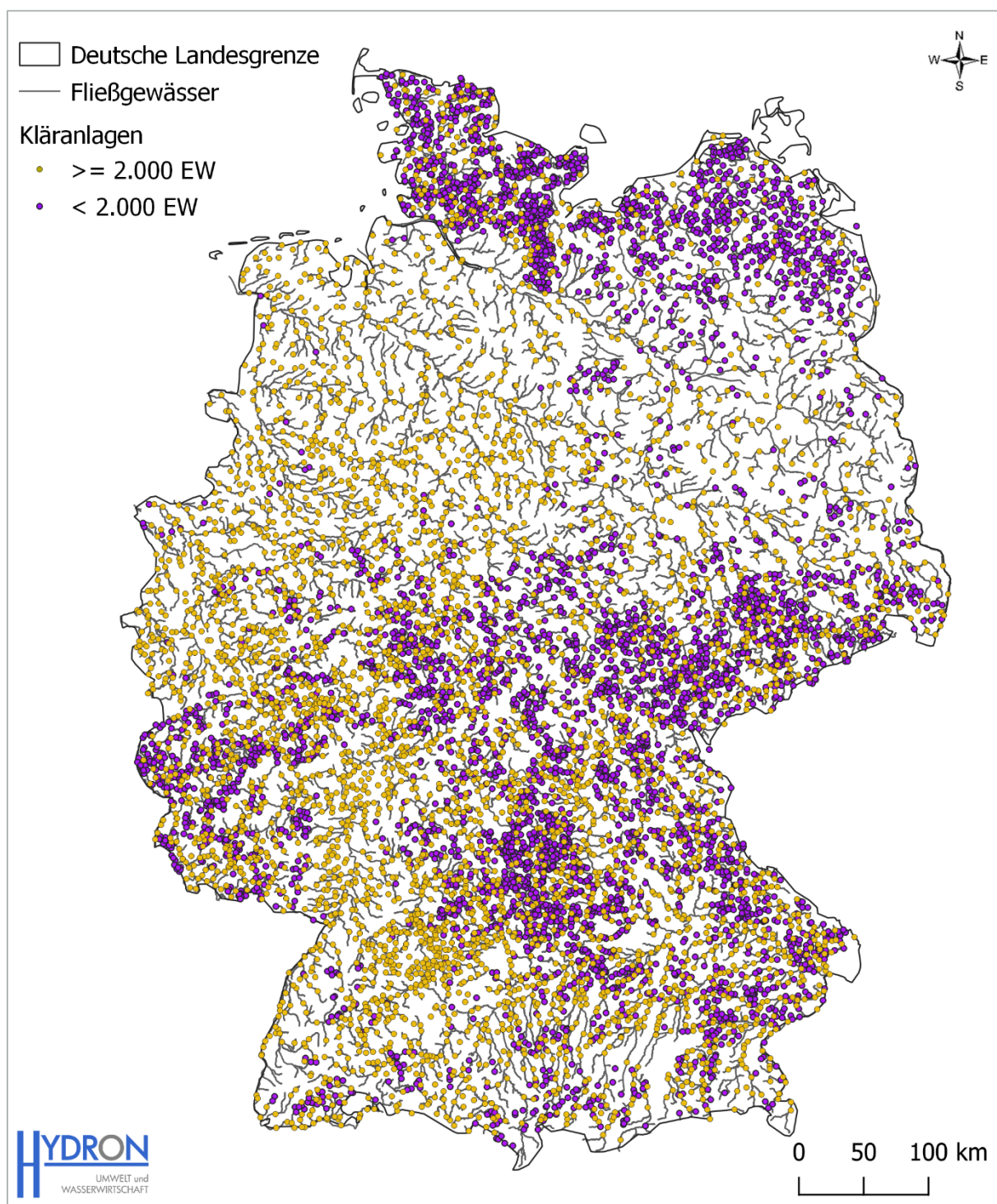
Die in LARSIM-ME integrierten Kläranlagen sind in Abbildung 10 dargestellt. Dabei wurden sowohl Kläranlagen mit einer nominalen Belastung von mindestens 2.000 EW als auch kleinere Anlagen berücksichtigt. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Anzahl der Kläranlagen je LARSIM-ME-Teilmodell (siehe auch Abbildung 1).

Tabelle 4: Anzahl der in LARSIM-ME integrierten Kläranlagen je LARSIM-ME-Teilmodell

LARSIM-ME Teilmodell	Anzahl verwendeter Kläranlagen
Obere Donau	1.654
Elbe	2.091
Oder	850
Rhein	3.314
Weser	1.010

In der derzeitigen Betrachtung konnten Kläranlagen-Abflüsse aus dem Ausland einerseits aus Kapazitätsgründen, aber auch wegen des Fehlens vollständiger Datengrundlagen nicht berücksichtigt werden. In diesem Projekt wird somit nur der Anteil behandelten Abwassers aus Deutschland betrachtet.

Abbildung 10: Kommunale Kläranlagen, die in LARSIM-ME integriert wurden



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

3.3 Integration und Ergänzung von Pegeln in LARSIM-ME

Als Grundlage für die Regionalisierung der mittleren Abflüsse kamen Pegelmessungen zum Einsatz, da diese den realen Abflüssen am nächsten kommen, auch wenn sie Unsicherheiten oder räumliche Inkonsistenzen zwischen Ober- und Unterliegerpegel aufweisen können. Aus vorherigen Projekten mit den LARSIM-ME-Modellen (Morling et al. 2024) lagen Pegelmessungen vor, die in einen Datensatz zusammengefügt wurden. Letztlich wurde der 10-Jahreszeitraum 2006 bis 2015 ausgewählt für den an insgesamt 317 Pegeln Messdaten vorlagen. In manchen Teilen Deutschlands wies dabei die Dichte der Pegel größere Lücken auf, die zu sehr großen Zwischeneinzugsgebieten - Pegelkontrollbereichen (PKB) - führten. Daher wurden weitere Pegeldaten von frei verfügbaren Plattformen verschiedener Bundesländer heruntergeladen (Gewässerkundlicher Dienst Bayern (GKD Bayern) (2025), Pegelonline (2025), Landeshochwasserzentrum Sachsen (LHWZ Sachsen) (2025), Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (2025), Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (2025), Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2025)).

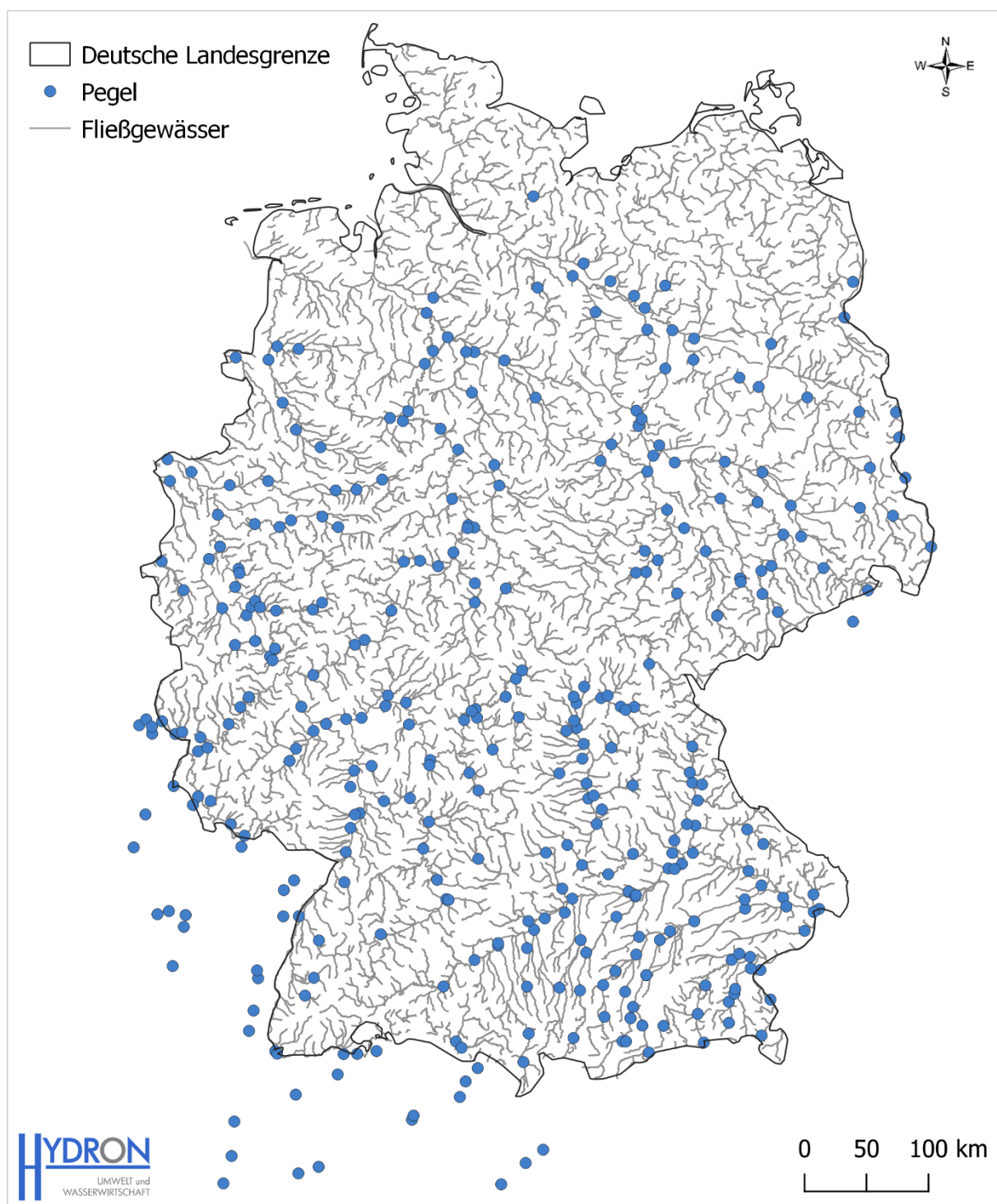
Insgesamt 27 zusätzliche Pegel konnten so für die Ermittlung der mittleren natürlichen Abflüsse verwendet werden (Tabelle 5).

Tabelle 5: Anzahl der verwendeten Pegel je LARSIM-ME-Modell

Modell	Anzahl Pegel
Obere Donau	89
Elbe	56
Oder	7
Rhein	158
Weser	34
Gesamt	344

Insgesamt wurden 344 Pegel für die weiteren Bearbeitungsschritte in LARSIM-ME verwendet, deren Lage und Verteilung in Abbildung 11 dargestellt ist. Einige dieser Pegel befinden sich im Ausland, vor allem in Frankreich, Luxemburg und der Schweiz. Der Umgang mit diesen Pegeln ist in Kapitel 4.4.1 beschrieben. Größere Lücken im Pegelnetz treten vor allem im Bereich der Nord- und Ostseeküste auf, wo vor allem kleinere Gewässer direkt ins Meer entwässern. In den restlichen Teilen Deutschlands liegt hingegen eine gute, recht gleichmäßige Verteilung der Pegel vor.

Abbildung 11: Lage der verwendeten Pegel



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

4 Räumlich differenzierte Ableitung der mittleren natürlichen Abflüsse und des mittleren Anteils behandelten Abwassers

4.1 Definition der verwendeten Begriffe und Abkürzungen

Die um die Kläranlagen und Pegel ergänzten LARSIM-ME-Modelle wurden schließlich genutzt, um die mittleren natürlichen Abflüsse der Fließgewässer in Deutschland zu bestimmen. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Schritte zur Ermittlung der mittleren natürlichen Abflüsse genauer beschrieben. Dabei werden bei der Ermittlung und Regionalisierung die folgenden beiden Ausgabegrößen verwendet:

- ▶ Mh [mm/a]: mittlere Abflusshöhe - Mittelwert einer Fläche (z. B. TGB, PKB, EZG)
- ▶ MQ [m^3/s]: mittlerer Abfluss - Durchfluss im Gerinne (z. B. an einem Pegel, am Ende einer GTS)

Es werden folgende Abkürzungen verwendet, die sich auf unterschiedliche Anteile des MQ bzw. mit unterschiedlichen Methoden ermittelte MQ-Werte beziehen:

- ▶ MQ_{mes}: aus den Messungen an einem Pegel abgeleiteter mittlerer Abfluss
- ▶ MQ_{EZG}: mittlerer Abfluss aus dem gesamten EZG eines Pegels
- ▶ MQ_{PKB}: mittlerer Abfluss aus einem einzelnen PKB
- ▶ MQ_{KLA}: Trockenwetterabfluss der kommunalen Kläranlagen
- ▶ MQ_{nat}: „natürlicher“ Abfluss, der aus der Abflussbildung in der Fläche stammt
- ▶ MQ_{ges}: Summe aus MQ_{KLA} und MQ_{nat} – sollte möglichst exakt dem MQ der Messung an einem Pegel (MQ_{mes}) entsprechen

4.2 Ermittlung des mittleren Abflusses behandelten Abwassers in den Gewässern

Die LARSIM-ME Modellierung erfolgte für den 10-jährigen Bezugszeitraum 2006 bis 2015.

In einem ersten Schritt wurde der mittlere kläranlagenbürtige Abflussanteil an den Pegeln bestimmt. Zu beachten ist, dass hierfür nur der Trockenwetterabfluss der Kläranlagen verwendet wurde, da der Niederschlagswasseranteil der Jahresabwassermenge in LARSIM-ME als Teil des in der Fläche gebildeten (natürlichen) Abflusses berücksichtigt ist (siehe Kapitel 3.2.2).

Hierfür wurden mit den LARSIM-ME-Modellen für die Pegel zunächst Ganglinien mit den ursprünglichen Modellen ohne Kläranlagen simuliert. Anschließend wurden die integrierten Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse an ihrem jeweiligen Einleitungsort berücksichtigt und erneut eine Simulation durchgeführt. Aus der Differenz der beiden Simulationsläufe, mit und ohne Kläranlagen, konnte dann der über das gesamte Einzugsgebiet akkumulierte mittlere Kläranlagen-Trockenwetterabfluss an einem Pegel MQ_{KLA, EZG} berechnet werden als:

Formel 1: Berechnung Kläranlagen-Trockenwetterabfluss im EZG eines Pegels

$$MQ_{KLA, EZG} = MQ_{sim, mit KLA} - MQ_{sim, ohne KLA}$$

$MQ_{sim, mit KLA}$: simulierter mittlerer Abfluss aus dem EZG eines Pegels mit Berücksichtigung der Kläranlagen in LARSIM-ME

$MQ_{sim, ohne KLA}$: simulierter mittlerer Abfluss aus dem EZG eines Pegels ohne Berücksichtigung der Kläranlagen in LARSIM-ME

Dasselbe Vorgehen wurde verwendet, um den MQ_{KLA} auch für jede LARSIM-GTS zu ermitteln.

4.3 Ermittlung und Regionalisierung des mittleren natürlichen Abflusses (MQ_{nat})

Abflussmessungen an Pegeln kommen den realen Abflüssen am nächsten, auch wenn es teilweise zu Unsicherheiten, lokalen Phänomenen oder räumlichen Inkonsistenzen zwischen Ober- und Unterliegerpegeln kommen kann. Daher wurden die folgenden Schritte auf Grundlage der Pegelmessungen durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurde der natürliche Abfluss an einem Pegel $MQ_{nat, EZG}$ berechnet als:

Formel 2: Berechnung natürlicher Abfluss im EZG eines Pegels

$$MQ_{nat, EZG} = MQ_{mes, EZG} - MQ_{KLA, EZG}$$

$MQ_{mes, EZG}$: gemessener mittlerer Abfluss an einem Pegel

Darauf aufbauend wurde der mittlere natürliche Abfluss in dem Zwischeneinzugsgebiet (PKB) $MQ_{nat, PKB}$ eines Pegels bestimmt:

Formel 3: Berechnung mittlerer natürlicher Abfluss im PKB eines Pegels

$$MQ_{nat, PKB} = MQ_{nat, EZG} - \sum MQ_{nat, OberliegerPKB}$$

$MQ_{nat, OberliegerPKB}$: simulierter natürlicher mittlerer Abfluss im PKB des Oberliegers

Zur Überprüfung dieser ersten Ergebnisse wurde der $MQ_{nat, PKB}$ anschließend in eine mittlere natürliche Abflusshöhe $Mh_{nat, PKB}$ [mm/a] für alle PKB umgerechnet:

Formel 4: Berechnung mittlere natürliche Abflusshöhe im PKB eines Pegels

$$Mh_{nat, PKB} [mm/a] = \frac{MQ_{nat, PKB} [m^3/s]}{Fläche_{PKB} [km^2]} \cdot 31536$$

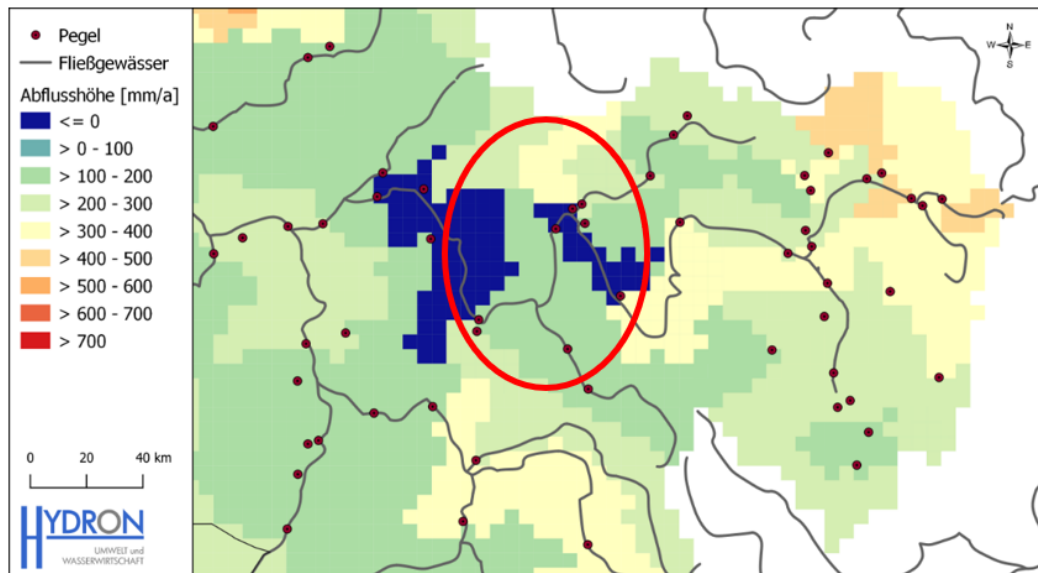
$Fläche_{PKB}$: Fläche in dem PKB des zugehörigen Pegels

Dieses Zwischenergebnis wurde in GIS für alle PKB dargestellt, um die räumliche Konsistenz der ermittelten natürlichen Abflusshöhen zu überprüfen und auf lokale Besonderheiten und mögliche Fehler aufmerksam zu werden.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt ein Beispiel im Main-Einzugsgebiet. Hier liegt am Pegel Frankfurt-Osthafen im Vergleich zu den Oberlieger-Pegeln ein unplausibel kleiner mittlerer Abfluss vor. Die Berechnung des mittleren Abflusses und der

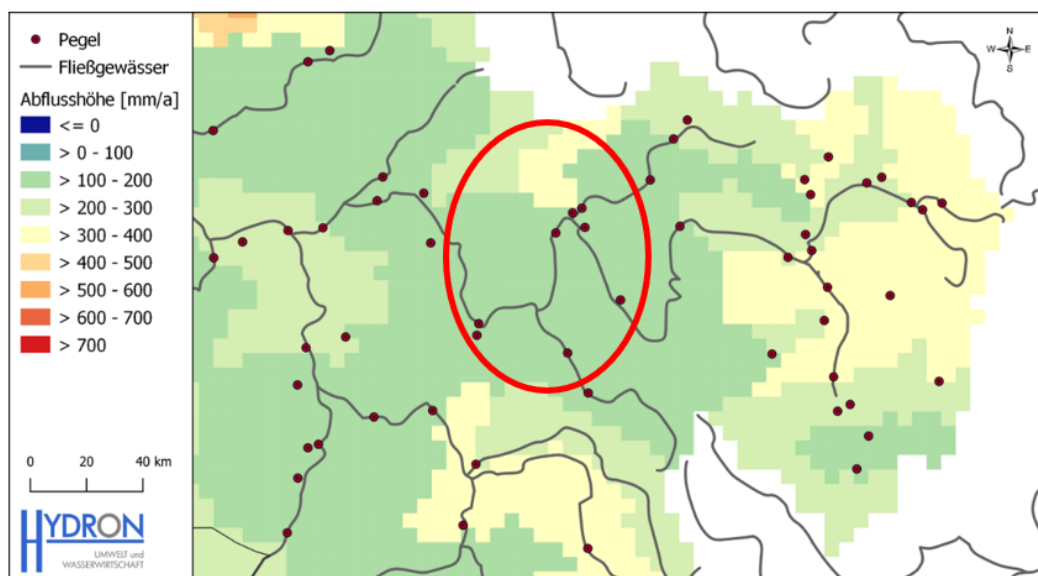
mittleren Abflusshöhe für den PKB führt daher zu negativen Werten. Wird der Pegel Frankfurt-Osthafen jedoch nicht verwendet, so kann die mittlere Abflusshöhe in diesem Bereich realistisch homogenisiert werden (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Daher wurden im nächsten Schritt die verschiedenen Einzugsgebiete und PKB manuell überprüft und auffällige Pegel, deren Messungen im Vergleich zu Ober- und Unterliegerpegeln inkonsistent sind, entfernt. Teilweise musste dabei auch iterativ vorgegangen werden.

Abbildung 12: Spezifische mittlere Abflusshöhen [mm/a] im Pegelkontrollbereich in einem Teil des Main-Einzugsgebiets vor der Konsistenzprüfung



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

Abbildung 13: Spezifische mittlere Abflusshöhen [mm/a] im Pegelkontrollbereich in einem Teil des Main-Einzugsgebiets nach der Konsistenzprüfung



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

Mit dem bislang beschriebenen Vorgehen konnten somit räumlich mittlere MQ-Werte und Mh-Werte für die PKB und die EZG der verwendeten Pegel ermittelt werden. Die mittleren Abflusshöhen sollen jedoch weiter regionalisiert und spezifisch für die einzelnen LARSIM-Raster ausgegeben und verwendet werden. Zudem ermöglicht die Ausgabe auf TGB-Ebene eine noch detailliertere Plausibilisierung der Ergebnisse. Im nächsten Schritt wurde daher ein Simulationslauf durchgeführt, bei dem für alle TGB in Deutschland Werte ausgegeben wurden. Dabei musste jedoch bedacht werden, dass die ursprünglichen LARSIM-ME-Modelle ohne Berücksichtigung der Kläranlagen in den Modellen kalibriert wurden, während die Pegelmessungen den Gesamtabfluss im Gewässer darstellen. Zudem weist das Modell naturgemäß Ungenauigkeiten auf, die zu Abweichungen zwischen den simulierten und (belastbareren) gemessenen MQ führen. Für die Simulation der Raster-spezifischen Abflusshöhen wurden daher PKB-spezifische Korrekturfaktoren $F_{kor, PKB}$ wie folgt ermittelt:

Formel 5: Berechnung Korrekturfaktor der simulierten Abflüsse für den PKB eines Pegels

$$F_{kor, PKB} = \frac{MQ_{nat, PKB}}{MQ_{sim, PKB}}$$

$MQ_{sim, PKB}$: simulierter mittlerer Abfluss in dem PKB des zugehörigen Pegels

Für alle TGB innerhalb eines PKB kann die Raster-spezifische Abflusshöhe Mh_{nat} [mm/a] dann ermittelt werden als:

Formel 6: Berechnung mittlere natürliche Abflusshöhe je LARSIM-Raster in einem PKB

$$Mh_{nat, TGB} = F_{kor, PKB} \cdot Mh_{sim, TGB}$$

Wobei die simulierte mittlere Abflusshöhe je TGB wie folgt aus den LARSIM-Ausgaben berechnet wurde:

Formel 7: Berechnung simulierte mittlere Abflusshöhe je LARSIM-Raster

$$Mh_{sim, TGB} [mm/a] = \text{Summe der Wasserabgabe aus Gebietsspeichern ins Gerinne im TGB} \\ + \text{Summe der Wasserabgabe von Wasserflächen ins Gerinne im TGB} \\ - \text{Summe der Verdunstung von abflusswirksamen Wasserflächen im TGB}$$

Bei der anschließenden Plausibilisierung wurde auf Sprünge zwischen den Korrekturfaktoren an den PKB-Grenzen geachtet, die dann auch durch deutlich unterschiedliche Werte für $Mh_{nat, TGB}$ in den verschiedenen PKB sichtbar werden. Zudem wurden die simulierten mittleren Abflusshöhen Werten aus dem Hydrologischen Atlas Deutschland (HAD) gegenübergestellt. Die finale Validierung hierzu ist in Kapitel 4.5.1 beschrieben. Bei auffälligen Sprüngen an den PKB-Grenzen oder Abweichungen vom räumlichen Muster des HAD erfolgte dann eine Glättung der Korrekturfaktoren. Auch dieses Vorgehen wurde iterativ durchgeführt.

Um schließlich nicht nur die mittlere Abflusshöhe Mh_{nat} für jedes TGB, sondern auch den mittleren Abfluss MQ_{nat} für die LARSIM-TGB und Gewässerteilstrecken zu erhalten, wurden die finalen, gegebenenfalls geglätteten, PKB-spezifischen Korrekturfaktoren und der daraus abgeleitete korrigierte $MQ_{nat, EZG, kor}$ je Pegel verwendet. Dieser wird somit berechnet als:

Formel 8: Berechnung finaler, mittlerer natürlicher Abfluss im EZG eines Pegels

$$MQ_{nat, EZG, kor} = \sum F_{kor, PKB} \cdot MQ_{sim, OberliegerPKB}$$

$MQ_{sim, OberliegerPKB}$: simulierter mittlerer Abfluss im PKB des Oberliegers

In den meisten Fällen entspricht dabei $MQ_{nat, EZG, kor}$ dem $MQ_{nat, EZG}$. Lediglich in Gebieten in denen der Korrekturfaktor $F_{kor, PKB}$ geglättet wurde, treten geringe Unterschiede auf.

Für die finale Ausgabe der mittleren Abflüsse für die LARSIM-Gewässerteilstrecken wurde schließlich der $MQ_{nat, EZG, kor}$ als „wahrer“ gemessener Abfluss vorgegeben. Anschließend wurde mit dem Modell das Wasserdargebot in jedem Pegelkontrollbereich so optimiert, dass der simulierte Abfluss dem vorgegebenen $MQ_{nat, EZG, kor}$ exakt entspricht. Hierfür werden die einzelnen Gebiete stets von der Quelle zur Mündung berechnet und der gemessene Abfluss an einem Pegel nach Unterstrom weitergegeben. Final stehen somit die natürlichen Abflüsse $MQ_{nat, GTS}$ [m^3/s] für die 7.402 Fließgewässerabschnitte bereit, die zu Beginn des Projekts den LARSIM-Rastern zugeordnet werden konnten. Zusätzlich wurde für alle LARSIM-ME-Raster die mittlere natürliche Abflusshöhe $Mh_{nat, TGB}$ [mm/h] bestimmt.

4.4 Besonderheiten und Auffälligkeiten

4.4.1 Pegel im Ausland

Da im Projekt die natürlichen Abflüsse und der Anteil behandelten Abwassers innerhalb Deutschlands betrachtet wurden, konnten die meisten Pegel im Ausland nicht zur Ermittlung und Regionalisierung der natürlichen Abflüsse herangezogen werden. Für die bestmögliche Ermittlung der Abflüsse von Flüssen, die im Ausland beginnen, wurde jedoch, falls vorhanden, der gemessene Abfluss des jeweils letzten Pegels vor der deutschen Grenze nach Unterstrom weitergegeben.

4.4.2 Pegel Rekingen am Rhein unterhalb des Bodensees

Der PKB des Pegels Rekingen am Rhein enthält den Bodensee, welcher im Modell nur vereinfacht abgebildet ist. Dies führt dazu, dass deutlich weniger Wasser an diesem Pegel simuliert als gemessen wird. Da auch die Zuflüsse zum Bodensee in diesen PKB fallen, führt die Optimierung des Wasserdargebots in diesem Bereich jedoch zu einer deutlichen Überschätzung der Abflüsse und Abflussspenden. Um diese Werte realistisch abbilden zu können, wurde für den Pegel Rekingen keine Optimierung des Wasserdargebots vorgenommen. Die gemessenen Abflüsse des Pegels Rekingen wurden nach Unterstrom weitergegeben, um die durch den Bodensee erhöhten Abflüsse im Rhein plausibel darstellen zu können.

4.4.3 Bodenseewasserversorgung

Das Wasser des Bodensees wird in mehreren Kommunen zur Trinkwassergewinnung genutzt. Es gelangt somit über Umwege über kommunale Kläranlagen teilweise zunächst in kleinere Vorfluter und schließlich in den Neckar. Zur Abbildung der Bodenseewasserversorgung ist im LARSIM-ME-Modell eine Wasserentnahme aus dem Bodensee implementiert. Im Bereich von Stuttgart wird dieses Wasser wieder in den Neckar eingeleitet. Mit der Integration der Trockenwetterabflüsse der Kläranlagen im Modell, wird die Bodenseewasserversorgung doppelt berücksichtigt. Dies führt zu einem sehr hohen Korrekturfaktor am Pegel Lauffen am Neckar. Für die korrekte Darstellung der mittleren Abflüsse und des Anteils behandelten Abwassers wurde daher die Einleitung von Wasser aus dem Bodensee in den Neckar in LARSIM-ME deaktiviert.

4.4.4 Main-Donau-Kanal

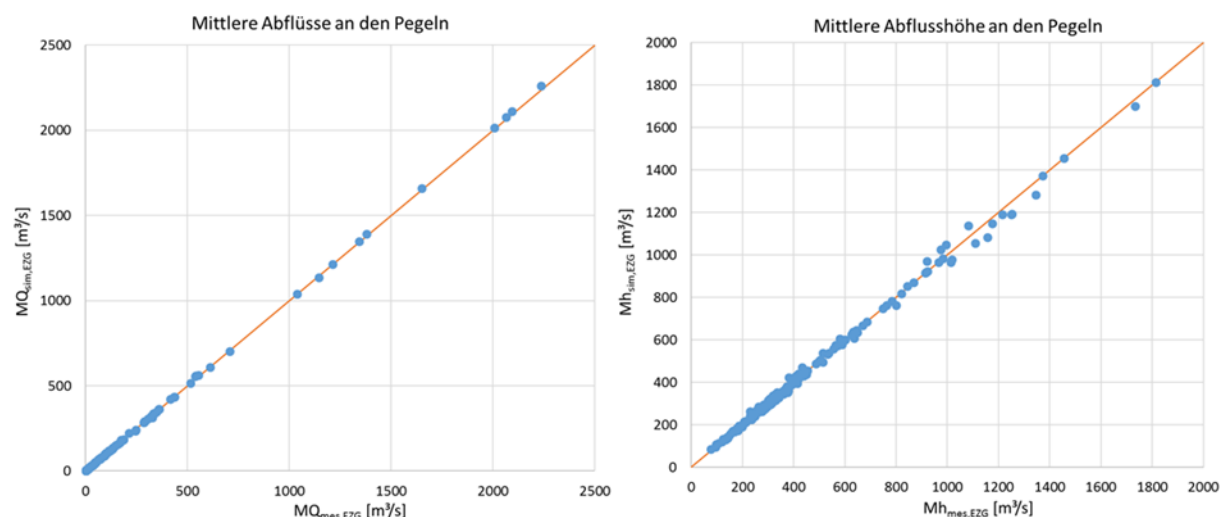
Im PKB des Pegels Kelheimwinzer an der Donau mündet der Main-Donau-Kanal, der die Donau mit dem Main verbindet. Über diesen Kanal gelangt Wasser aus dem EZG der Donau in das EZG des Mains (Rhein). Im Schnitt handelt es sich dabei um etwa 125 Mio. m³ jährlich, was ca. 4 m³/s entspricht. In LARSIM-ME wird im PKB von Kelheimwinzer dieser Kanal über eine Verzweigungsregel berücksichtigt, die 4 m³/s aus der Donau ausleitet. Somit konnte auch in diesem Bereich eine homogene Regionalisierung der Abflusshöhen erreicht werden.

4.5 Validierung der Ergebnisse

4.5.1 Mittlere Abflüsse an Pegeln und mittlere natürliche Abflusshöhen ($Mh_{sim,TGB}$)

Zur Validierung der Ergebnisse wurden in einem ersten Schritt die simulierten mittleren Abflüsse an den Pegeln den gemessenen MQ-Werten gegenübergestellt (Abbildung 14, links). Zudem wurden die mittleren simulierten und gemessenen Abflüsse an den Pegeln berechnet (Abbildung 14, rechts). Bei beiden Größen zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten mittleren Werten. Alle Punkte liegen sehr nah an der 1:1-Geraden und es treten keine Ausreißer auf.

Abbildung 14: Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Gesamtabflüsse (links) und Gesamtabflusshöhen (rechts) an den Pegeln



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

Zur detaillierteren Prüfung der räumlichen Konsistenz und Plausibilität der Ergebnisse wurden die mit LARSIM-ME simulierten mittleren, natürlichen Abflusshöhen $Mh_{sim,TGB}$ [mm/a] für alle LARSIM-TGB den Werten des HAD (BMU 2003) gegenübergestellt (Abbildung 15). Für den Vergleich wurden die Abflusshöhen aus dem HAD, die eigentlich eine Auflösung von 1 km² aufweisen, auf die 25-km²-Raster von LARSIM gemittelt. Da der HAD nur die Landesfläche von Deutschland abdeckt, mussten einige Raster am Rand von Deutschland aus dem Vergleich herausgenommen werden, da durch die Datenlücken bei der Mittelung der Werte auf die 25-km²-Raster sonst fehlerhafte Werte berechnet werden.

Insgesamt zeigt der Vergleich eine vergleichbare räumliche Verteilung der Abflusshöhen. Die Deutschen Mittelgebirge, wie der Schwarzwald, das Rothaargebirge, der Harz, der Thüringer

Wald und der Bayerische Wald sind durch höhere Abflusshöhen gekennzeichnet. Noch höhere Werte werden erwartungsgemäß im deutschen Alpenraum und an dessen Ausläufern erreicht. Niedrige Abflusshöhen treten hingegen in der Ebene entlang des Rheins und vor allem in Nordost-Deutschland auf.

Der Vergleich zeigt auch, dass die Abflusshöhen in großen Teilen Deutschlands mit LARSIM-ME niedriger ausfallen als im HAD. Der modellierte Mittelwert aller Abflusshöhen in Deutschland liegt mit 248 mm/a somit 22,9 % niedriger als der Mittelwert des HAD (323 mm/a). Lediglich in Teilen Ost-Deutschlands werden mit LARSIM-ME etwas höhere Abflusshöhen simuliert.

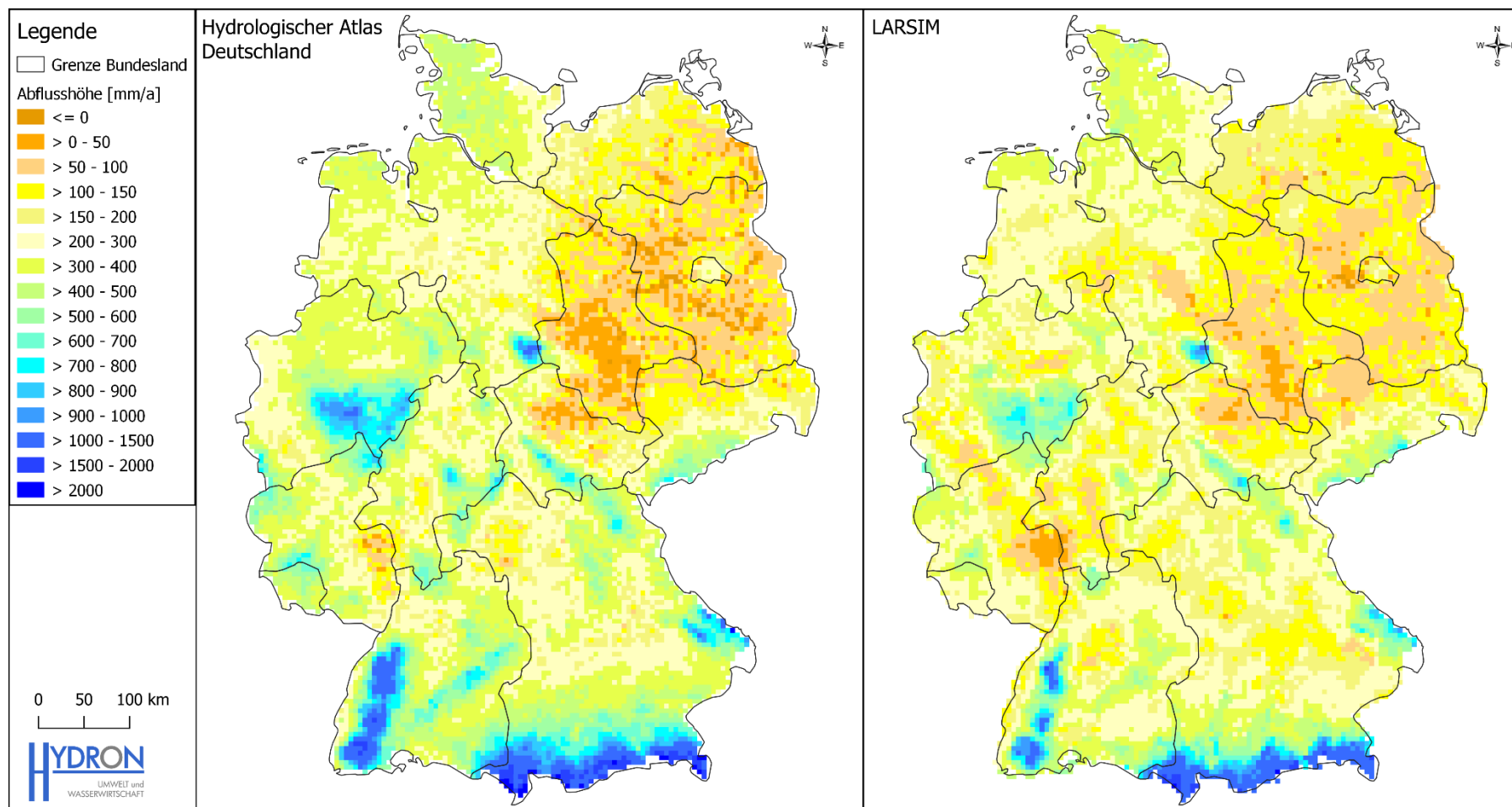
Beim Vergleich muss beachtet werden, dass die hier verwendete Methodik zur Ermittlung der Abflusshöhen von der HAD-Methodik abweicht (BMU 2003). Die Abflusshöhen im HAD wurden anhand von Messungen an Pegeln überprüft, wobei die Messungen nicht um den Einfluss der Kläranlagen-Punktquellen korrigiert wurden. Dem HAD lag der Zeitraum 1961 bis 1990 zugrunde. Für die Simulation mit LARSIM-ME wurde hingegen der aktuellere Zeitraum von 2006 bis 2015 verwendet. Zudem wurden die natürlichen Abflusshöhen ermittelt. Hierfür wurde der Trockenwetterabfluss der Kläranlagen explizit aus der Simulation der Abflusshöhen herausgenommen. Berücksichtigt man die Trockenwetterabflüsse in LARSIM, so reduziert sich die Abweichung zwischen LARSIM-ME und HAD von 22,9 % auf 16,4 %.

Im Folgenden wurde anhand von Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, Climate Data Center [CDC]) überprüft, ob sich die verbleibenden Unterschiede durch die verschiedenen Zeiträume erklären lassen. Hierfür wurden der mittlere Niederschlag und die mittlere Lufttemperatur der beiden Zeiträume für gesamt Deutschland ermittelt (CDC; CDC). Im Mittel der Jahre 1961 bis 1990 lag der Niederschlag mit einem Wert von 788,9 mm dabei fast genauso hoch wie im Mittel der Jahre 2006 bis 2015 (788,7 mm). Im Vergleich hierzu fällt der Unterschied bei der mittleren Lufttemperatur deutlicher aus. Der Mittelwert der aktuelleren Jahre liegt mit einem Wert von 9,4°C um etwa 1,1°C höher als im früheren Zeitraum. Da der Sättigungsdampfdruck laut Clausius–Clapeyron-Beziehung je 1 K Lufttemperatur um 7 % zunimmt, lässt sich bei der Annahme, dass die Verdunstung ungefähr linear mit dem Sättigungsdefizit zunimmt, durch eine Temperaturerhöhung um 1,1 K eine um ca. 8 % höhere Verdunstung erwarten. Der Unterschied zwischen LARSIM-Modellierung und den Werten im HAD lässt sich also durch die durchschnittlich höheren Lufttemperaturen im aktuelleren Zeitraum erklären.

Für die vier ostdeutschen Bundesländer Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Berlin wurde ebenfalls ein Vergleich des mittleren Niederschlags und der mittleren Lufttemperatur für die beiden verschiedenen Zeiträume durchgeführt. Auch hier ist die mittlere Lufttemperatur des aktuellen Zeitraums 1,1°C höher als die durchschnittliche Lufttemperatur zwischen 1961 und 1990. Im Vergleich zu Gesamtdeutschland ist jedoch zwischen 2006 und 2015 in diesen Bundesländern im Mittel 9,6 % mehr Niederschlag gefallen als in dem früheren Zeitraum. Dies erklärt somit die mit LARSIM-ME in diesem Bereich etwas höher simulierten Abflusshöhen.

Insgesamt kann somit davon ausgegangen werden, dass mit LARSIM-ME und der oben beschriebenen Regionalisierung realistische mittlere Abflüsse in den Gewässerabschnitten sowie plausible mittlere Abflusshöhen simuliert wurden.

Abbildung 15: Gesamtabflusshöhe [mm/a] aus dem Hydrologischen Atlas Deutschland auf die 25-km²-Raster von LARSIM gemittelt und mit LARSIM simulierte mittlere natürliche Abflusshöhe [mm/a]



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

4.5.2 Mittlerer Anteil behandelten Abwassers am Gesamtabfluss

4.5.2.1 Überprüfung der Gewässerabschnitte mit sehr hohem Anteil behandelten Abwassers

Zusätzlich zur Überprüfung der mittleren Abflüsse wurde auch der mittlere Anteil behandelten Abwassers am Gesamtabfluss betrachtet. Dabei wurden insbesondere die Gewässerabschnitte detailliert geprüft, bei denen der Anteil des behandelten Abwassers über 30 % lag. Dies umfasst in ganz Deutschland 69 Gewässerabschnitte.

Für 53 dieser Gewässerabschnitte konnten die simulierten Werte als plausibel eingestuft werden. Darunter befindet sich beispielsweise ein Gewässerabschnitt am Unterlauf der Emscher im Ruhrgebiet, in den die Emscherkläranlage entwässert, welche mit Abstand den höchsten Trockenwetterabfluss aller Kläranlagen in ganz Deutschland liefert. Durch ebenfalls recht hohe Trockenwetterabflüsse einer Kläranlage lassen sich auch die hohen Abwasseranteile am Unterlauf der Panke nordwestlich von Berlin und am Unterlauf der Erpe im Osten Berlins erklären. Ein weiteres überprüfetes Beispiel an der Schwippe in BW zeigt, dass hier zwei größere Kläranlagen in einen Gewässerabschnitt einleiten, wobei dieser ein recht kleines Einzugsgebiet und damit einen geringen Gesamtabfluss aufweist. Hier wurden die Ergebnisse zusätzlich mit der MQ-Regionalisierung der LUBW verglichen (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) 2016). Der MQ des Gesamtabflusses liegt an der Schwippe dabei mit einem Wert von $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$ leicht über dem mit LARSIM simulierten Wert von $0,58 \text{ m}^3/\text{s}$. Zudem wird ein etwas niedrigerer Anteil des Abwassers am Gesamtabfluss von 48 % im Vergleich zu 60,3 % mit LARSIM erreicht. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass der Regionalisierungsknoten an der Schwippe noch oberhalb der zweiten Kläranlage liegt, die in LARSIM berücksichtigt wird. Diese zusätzliche Kläranlage kann den etwas höheren Abwasseranteil in LARSIM erklären.

An den restlichen 16 überprüften Gewässerabschnitten fielen hingegen Unstimmigkeiten auf, bspw. eine ungenaue Zuordnung der Kläranlage, die korrigiert wurden. Ungenauigkeiten, die durch Unstimmigkeiten in der Vernetzung des LARSIM-Modells oder nicht korrekt abgebildete Kanäle entstehen, konnten in diesem Projekt nicht behoben werden. In diesen Fällen wird das Einzugsgebiet des betroffenen Gewässers vom Modell nicht korrekt abgebildet und dementsprechend der Gesamtabfluss ungenau simuliert. Diese Gewässerabschnitte (11, sechs Gewässer) wurden aus der Darstellung herausgenommen.

4.5.2.2 Finale Anteile behandelten Abwassers

Tabelle 6 zeigt im Überblick für Deutschland die einzelnen Abflusskomponenten. Insgesamt liegt für den betrachteten Zeitraum der Anteil des Trockenwetterabflusses der kommunalen Kläranlagen bei 7,5 % des Gesamtabflusses in Gewässern.

Tabelle 6: Gesamtabfluss im Gewässer und seine Aufteilung in den natürlichen Abfluss und den Trockenwetterabfluss für gesamt Deutschland

Abflusskomponente	Abfluss [km ³ /a]	Anteil am Gesamtabfluss [%]
Gesamtabfluss im Gewässer	96,4	100
Flächenbürtiger / Natürlicher Abfluss	89,1	92,5
Trockenwetterabfluss kommunaler Kläranlagen	7,24	7,50

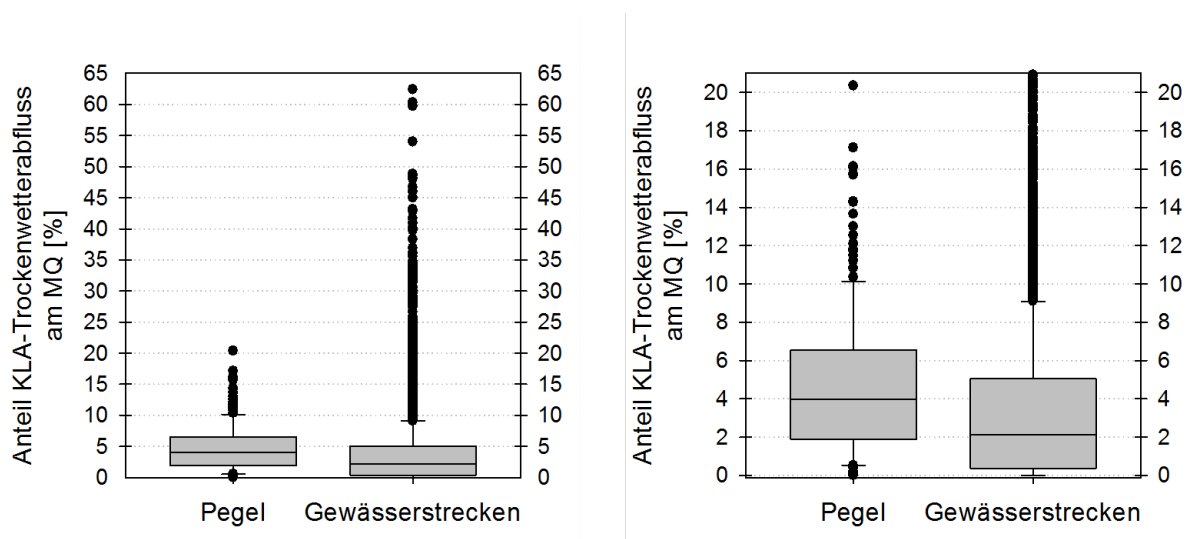
Abbildung 16 zeigt den simulierten Anteil behandelten Abwassers bei mittlerem Gesamtabfluss an den berücksichtigten Pegeln sowie für die Gewässerstrecken. Die linke Grafik zeigt den

gesamten Wertebereich des Anteils behandelten Abwassers, während in der rechten Grafik der Fokus auf niedrigeren Anteilen bis knapp über 20 % liegt.

Der Median aller Pegel liegt in einem Bereich von etwa 4 %. Etwa 90 % der Pegel weisen einen Anteil behandelten Abwassers unter 10 % auf. Bei den restlichen 10 % der Pegel liegt der Anteil über 10 %, bei einem sogar über 20 %. Anteile unter 1 % treten hingegen ebenfalls nur bei einzelnen Pegeln auf.

Bezogen auf die Gewässerstrecken liegt der Median bei ca. 2 %. Für 90 % der Strecken unter 9 %. Für einige wenige Gewässerstrecken werden jedoch auch Anteile über 50 % erreicht. Der höchste Wert liegt bei 62 %. Es gibt jedoch auch Gewässerstrecken ohne Kläranlageneinfluss (0 %). Dabei handelt es sich vor allem um die Oberläufe (Abbildung 18).

Abbildung 16: Boxplots der simulierten Abwasseranteile an den berücksichtigten Pegeln und in den Gewässerteilstrecken, Darstellung mit unterschiedlicher y-Achse

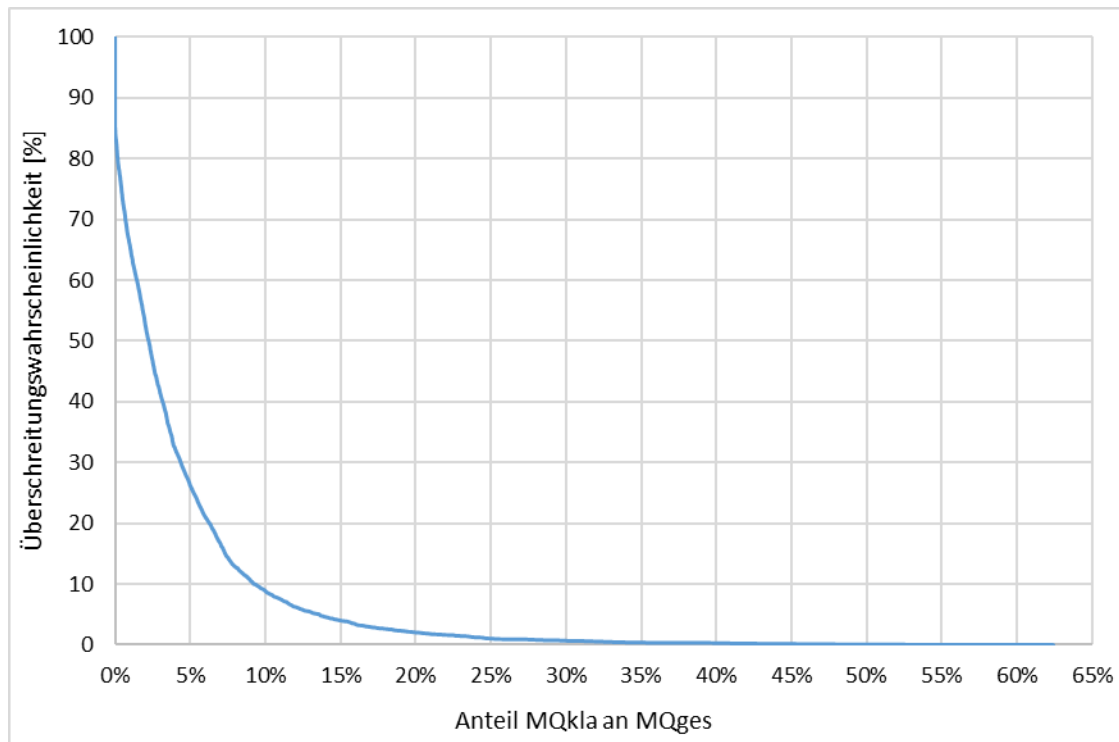


Quelle: eigene Darstellung HYDRON

Abbildung 17 zeigt die Überschreitungswahrscheinlichkeit des Anteils behandelten Abwassers bei MQ_{ges} bezogen auf die gesamte betrachtete Gewässerstrecke von ca. 57.310 km.

Für etwa 10 % der gesamten Gewässerstrecke (ca. 5.700 km) wird ein Anteil behandelten Abwassers von über 9 % erreicht. Im Umkehrschluss liegt dieser für 90 % der Gewässerstrecke in Deutschland unter 9 %. Für 50 % der Gewässerstrecke liegt er unterhalb von etwa 2,5 %. Knapp 20 % der analysierten Gewässerstrecken (ca. 11.400 km) sind frei von Kläranlageneinflüssen.

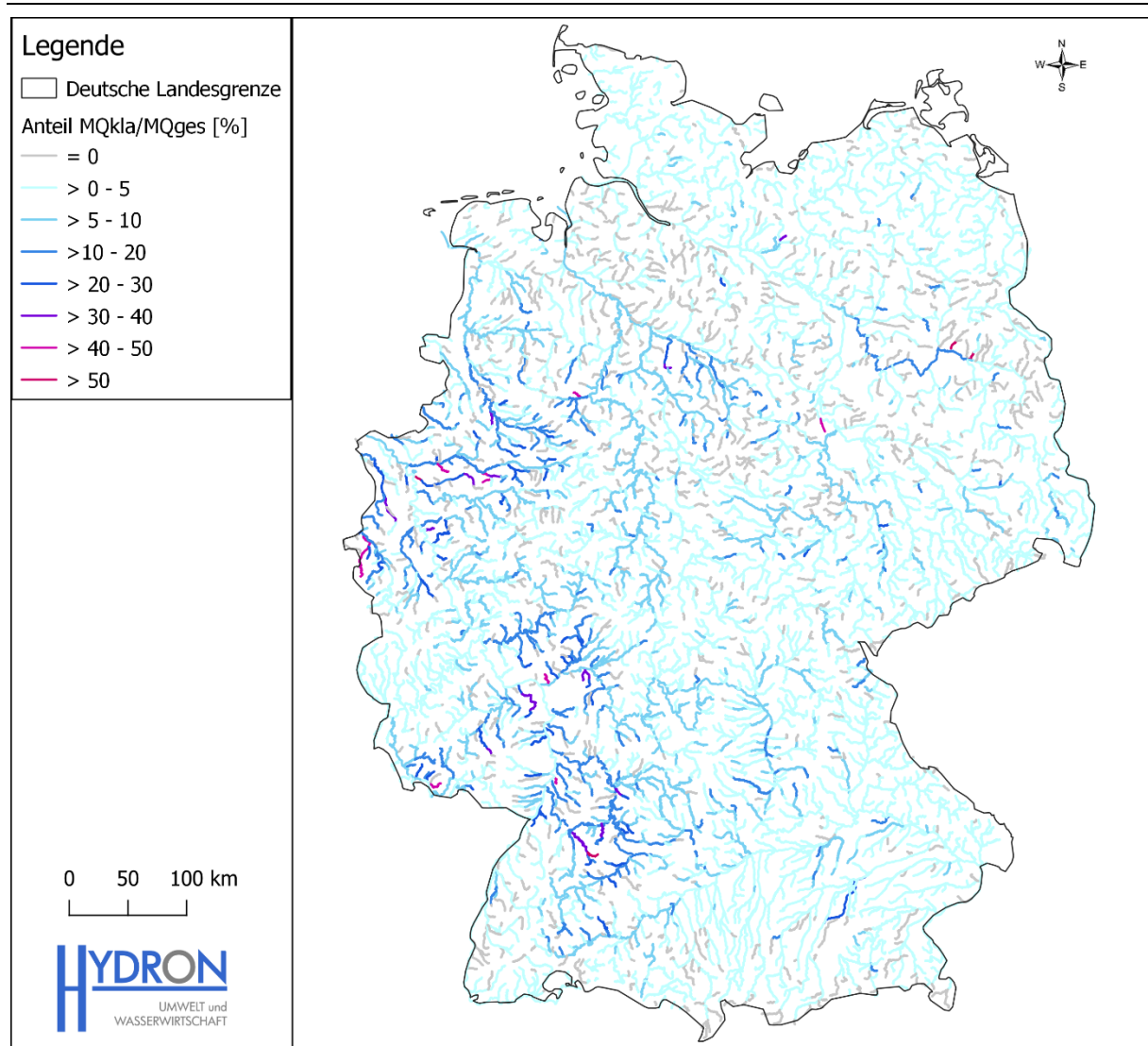
Abbildung 17: Überschreitungswahrscheinlichkeit des Anteils von Kläranlagen-Trockenwetterabfluss am mittleren Gesamtabfluss bezogen auf die gesamte betrachtete Gewässerstrecke (57.310 km)



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

Die räumlich differenzierte Darstellung der für die Gewässerstrecken mit LARSIM-ME simulierten Anteile behandelten Abwassers am Gesamtabfluss zeigt Abbildung 18. Ballungsräume mit hohen Einwohnerzahlen, wie bspw. das Ruhrgebiet, Berlin, Frankfurt am Main oder der Mittlere Neckarraum fallen dabei erwartungsgemäß mit recht hohen Anteilen in den umliegenden Gewässern auf. In eher dünn besiedelten Gebieten, wie etwa in Norddeutschland, erreicht der Anteil behandelten Abwassers hingegen meist nur niedrige Werte. Die räumliche Verteilung deckt sich gut mit den Ergebnissen von Drewes et al. (2018). Unterschied ist, dass die hier vorliegenden Ergebnisse auf einer kohärenten bundesweiten Wasserhaushaltsmodellierung basieren und wesentlich mehr (auch kleinere) Gewässer umfassen als die Analyse von Drewes et al. (2018).

Abbildung 18: Simulierter Anteil des mittleren Trockenwetterabflusses der Kläranlagen am Gesamtabfluss [%] für die Gewässerteilstrecken in LARSIM-ME



Quelle: eigene Darstellung HYDRON

5 Interaktives Werkzeug zur Darstellung der Anteile behandelten Abwassers in Gewässern

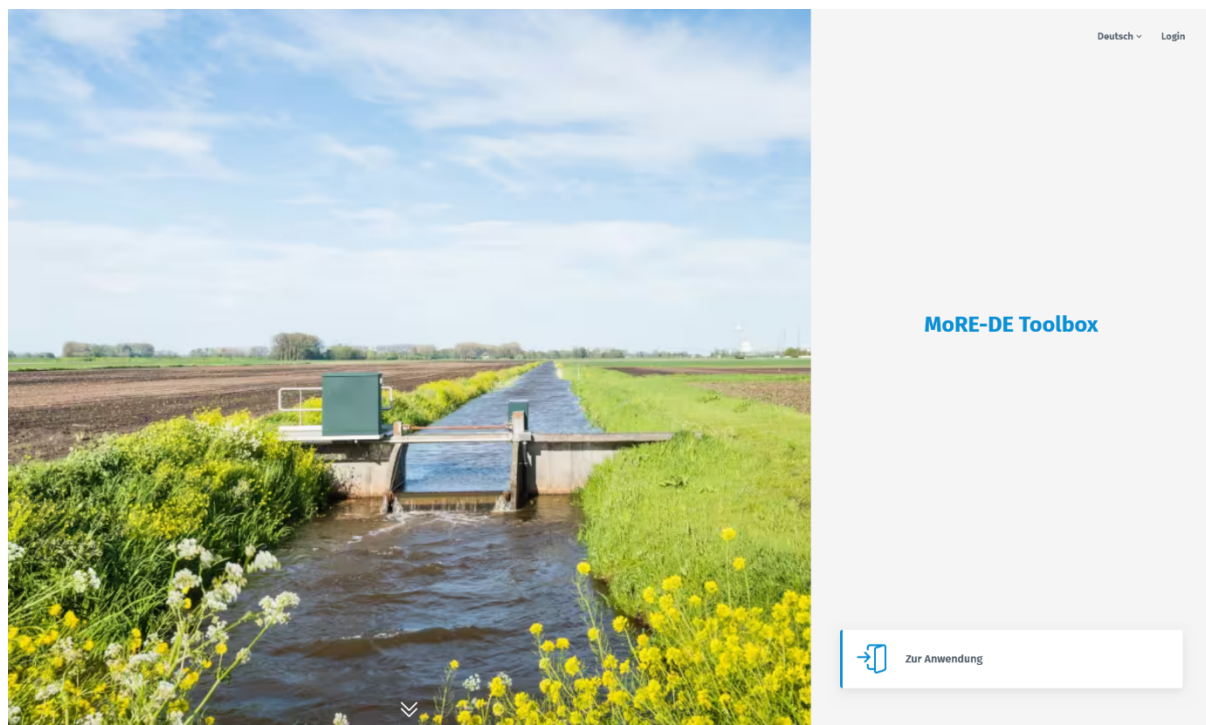
Im Rahmen des Projektes wurde die Abwasserlast der Oberflächengewässer in Deutschland modellbasiert abgeleitet und die Eingangsdaten und Modellergebnisse für eine flächendeckende und interaktive Auswertung in die webbasierte MoRE-DE Toolbox integriert. Hierfür wurde ein separates Tool „Abwasserbehandlung“ konzipiert, programmtechnisch umgesetzt und in der Produktivumgebung der MoRE-DE Toolbox ausgerollt.

5.1 Zugang zur MoRE-DE Toolbox und zum Tool „Abwasserbehandlung“

Der Zugang zur MoRE-DE Toolbox erfolgt über die Website <https://stoffeintraege-more.de>. Das Tool „Abwasserbehandlung“ ist über einen öffentlichen Zugang verfügbar.

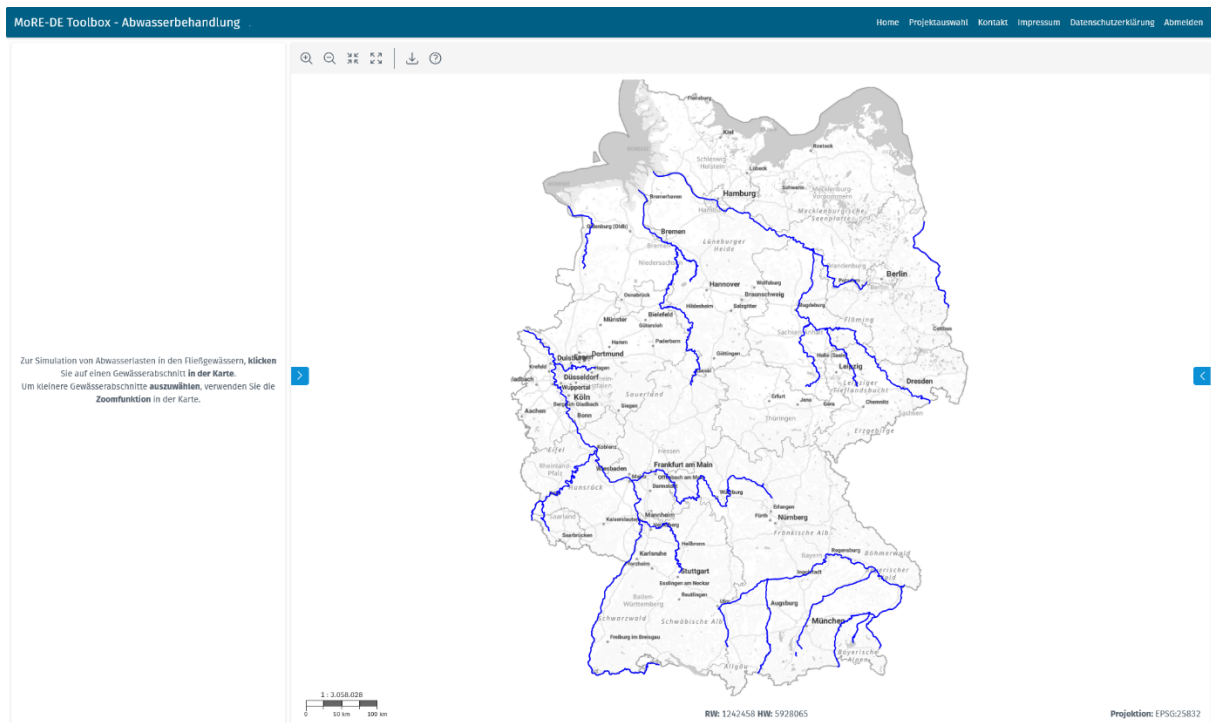
Nach Aufruf der Domain gelangt der Nutzer auf die Landing Page (Abbildung 19) und von dort (ohne Login) über die Schaltfläche „Zur Anwendung“ auf eine Unterseite, auf der die verfügbaren Themen bzw. Projekte angezeigt und per Maus-Klick aufgerufen werden können.

Abbildung 19: Landing Page der MoRE-DE Toolbox



Quelle: eigene Darstellung VisDat

Nach Maus-Klick auf die Schaltfläche „Abwasserbehandlung“ öffnet sich die zugehörige Startseite mit einer Karte von Deutschland und den im System vorgehaltenen Gewässerabschnitten aus der LARSIM-ME-Modellierung. Hier erscheinen zunächst nur übergeordnete Gewässer (Abbildung 20). Beim Hereinzoomen erhöht sich die Detailschärfe entsprechend und auch kleinere Gewässer werden angezeigt.

Abbildung 20: Startseite des Themas "Abwasserbehandlung" in der MoRE-DE Toolbox

Quelle: eigene Darstellung VisDat

Links über dem Kartenfenster befindet sich eine Werkzeugleiste mit den Standardwerkzeugen:

- „Zoom In“ (+),
- „Zoom Out“ (-),
- „Zoom zurücksetzen“ und
- „Auf Fullscreen umschalten“.

Rechts daneben befindet sich ein Werkzeug zum Download der selektierten Daten als CSV-Dateien. Hierbei kann zwischen „Einfacher Download“ (Exportiert Modelleinstellungen und Simulationsergebnisse des gewählten Einzugsgebiets als CSV) und „Komplexer Download“ (Exportiert Kläranlagendaten, Geometrien und Simulationen als GeoPackage & CSV für das gewählte Einzugsgebiet) ausgewählt werden.

5.2 Auswahl eines Gewässerabschnittes

Die Auswahl eines Gewässerabschnittes erfolgt mit Maus-Klick in die Karte auf einen Gewässerabschnitt. Daraufhin wird das dem Gewässerabschnitt zugeordnete Einzugsgebiet berechnet und angezeigt, sowie die dem Einzugsgebiet zugehörigen Kläranlagen farblich hinterlegt eingeblendet (Abbildung 21).

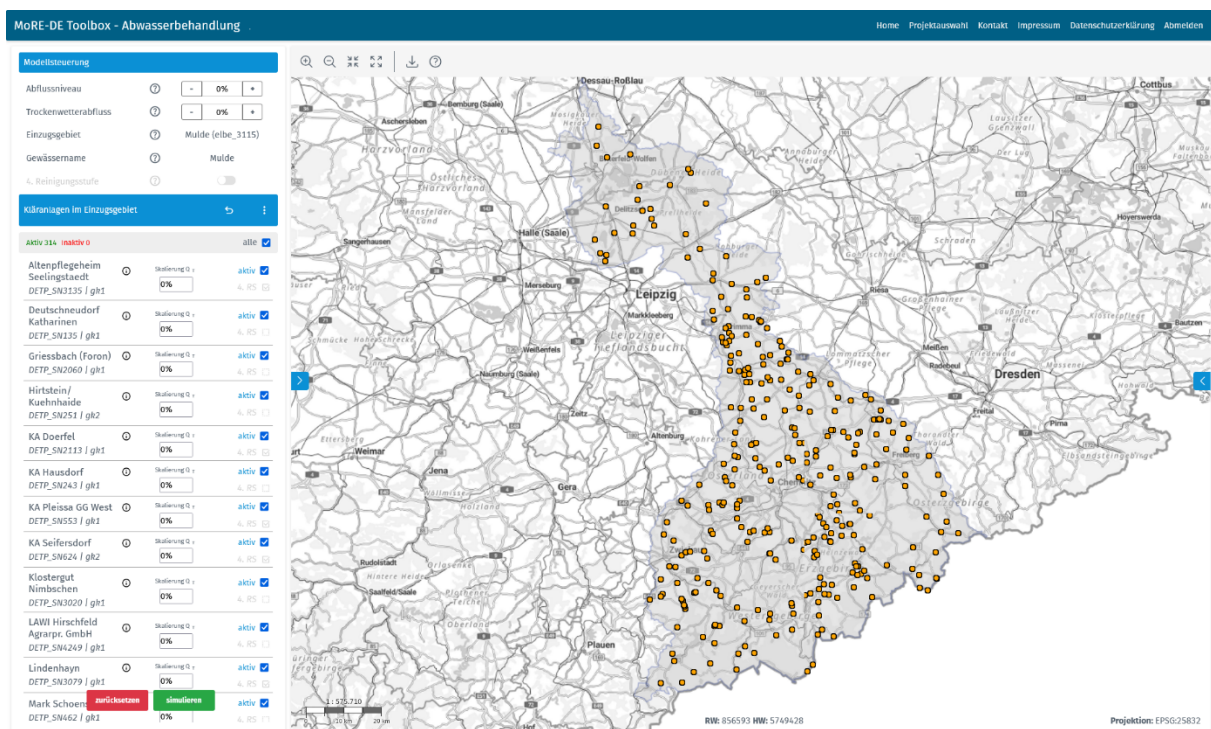
Zugleich wird auf der linken Seite der Anwendung ein Modul „Modellsteuerung“ eingeblendet. Hier besteht die Möglichkeit das Abflussniveau im Gewässer zu verändern. Ausgangspunkt (0%) ist der mit LARSIM-ME modellierte mittlere Gesamtabfluss im Gewässer für das betrachtete Einzugsgebiet. Mit dem Simulationsregler wird angegeben, welche prozentuale Verringerung oder Erhöhung des Abflussniveaus im Einzugsgebiet erfolgen soll. Mit den Schaltflächen (-)/(+) erfolgt eine Veränderung in 10er Schritten. Die manuelle Eingabe erlaubt stufenlos alle

Zahlenwerte. Im Ergebnis verändert sich der Anteil des behandelten Trockenwetterabflusses am Gesamtabfluss des Gewässers. Das Ergebnis bezieht sich auf den Gebietsauslass (den letzten Gewässerabschnitt) im Einzugsgebiet.

Weiterhin ist es möglich den Trockenwetterabfluss der kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen im betrachteten Einzugsgebiet insgesamt zu verändern. Ausgangspunkt (0%) ist der berechnete mittlere Anteil des behandelten Trockenwetterabflusses im Gewässer für das betrachtete Einzugsgebiet. Mit dem Simulationsregler wird angegeben, welche prozentuale Verringerung oder Erhöhung des Abflussniveaus im Einzugsgebiet erfolgen soll. Mit den Schaltflächen (-)/(+) erfolgt eine Veränderung in 10er Schritten. Die manuelle Eingabe erlaubt stufenlos alle Zahlenwerte. Im Ergebnis verändert sich der Gesamtabfluss des Gewässers. Das Ergebnis bezieht sich auch hier auf den Gebietsauslass (den letzten Gewässerabschnitt) im Einzugsgebiet.

Alternativ können einzelne Kläranlagen oder auch alle Kläranlagen an- bzw. ausgeschaltet werden. Diese Einstellung erfolgt im Modul „Kläranlagen im Einzugsgebiet“, welches sich unterhalb des Moduls „Modellsteuerung“ befindet. Wird eine der hier aufgeführten Kläranlagen inaktiv geschaltet (Häkchen „aktiv“ entfernt), so wird diese im Kartenfenster markiert. Für jede einzelne Kläranlage kann zudem individuell festgelegt werden, ob und wie der Trockenwetterabfluss variiert werden soll (Skalierung Q_T).

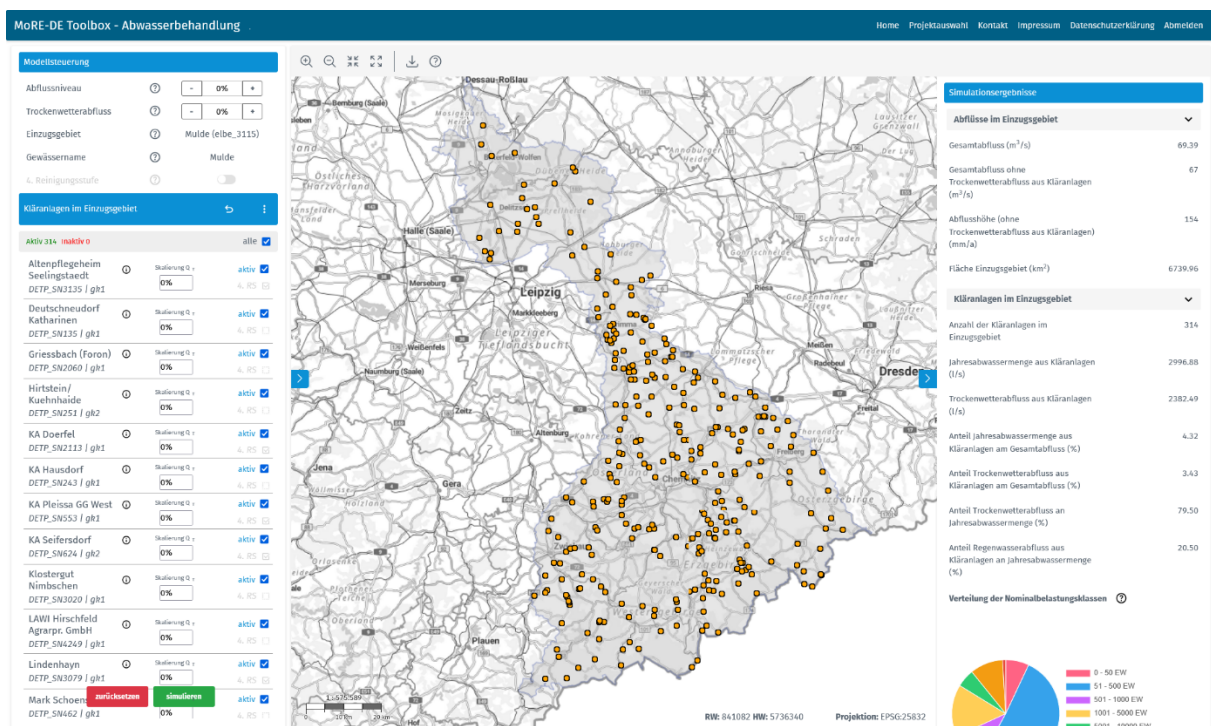
Abbildung 21: Selektierung eines Einzugsgebietes für einen ausgewählten Gewässerabschnitt



Quelle: eigene Darstellung VisDat

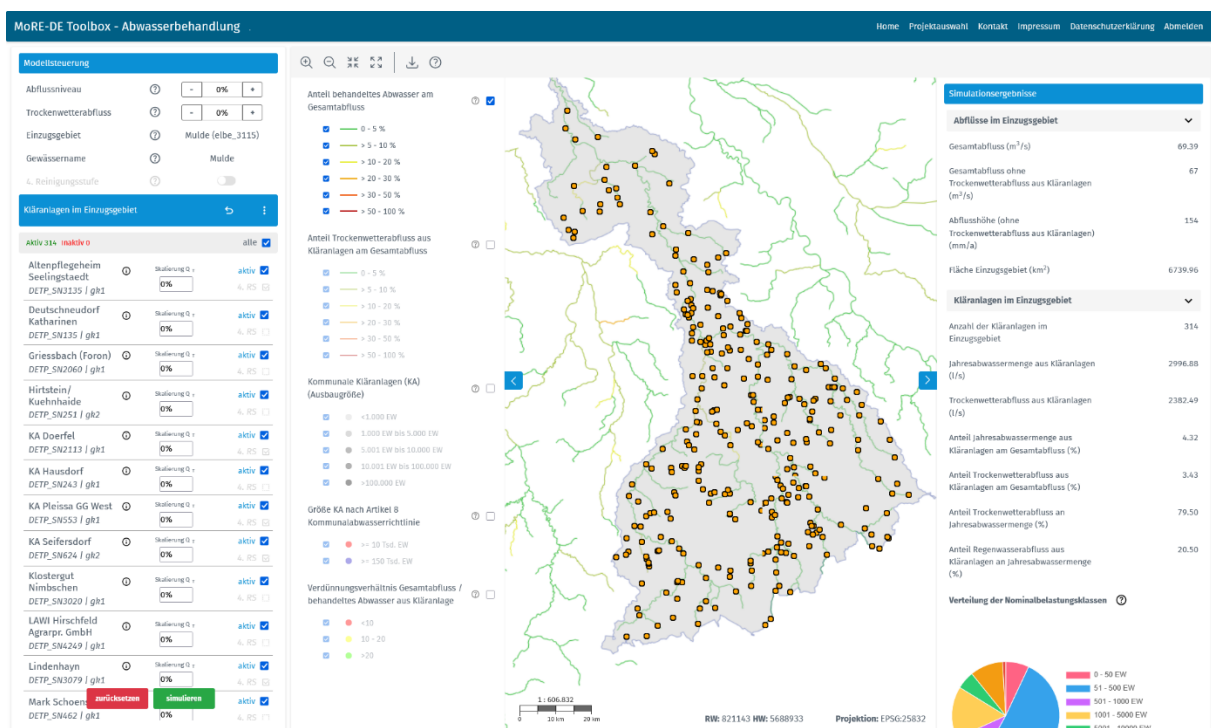
Wurden alle Einstellungen wunschgemäß vorgenommen, so kann durch Betätigung der grün eingefärbten Schaltfläche „simulieren“ (unten links) ein neuer Modelllauf durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden für das selektierte Einzugsgebiet in einem neuen Fenster auf der rechten Seite der Anwendung angezeigt (Abbildung 22). Über die rot eingefärbte Schaltfläche „zurücksetzen“ wird der Ausgangszustand gemäß Abbildung 20 wieder hergestellt.

Abbildung 22: Ergebnisausgabe



Quelle: eigene Darstellung VisDat

Neben der Modellsteuerung und dem Kläranlagenmodul kann außerdem eine Legende geöffnet werden (blau hinterlegtes Symbol „>“ bzw. „<“ zum Öffnen bzw. Schließen der Legende). Der Layerbaum enthält Topografische Layer, Layer zu Gebietsgeometrien, LARSIM-ME-Daten-Layer (nur bei Login-Zugang), Layer mit Daten zum Ist-Stand der Abwasserbehandlung sowie Layer mit Simulationsdaten. Alle Layer können unabhängig voneinander aktiviert oder deaktiviert werden. Weiterhin können einzelne Klassen an- oder ausgeschaltet werden. Abbildung 23 zeigt beispielhaft das Ergebnis für den „Anteil behandeltes Abwasser am Gesamtabfluss“ je Gewässerabschnitt. Im gewählten Einzugsgebiet muss ggf. der Layer „Gewässernetz, Gewässerabschnitte“ deaktiviert werden, damit der erstgenannte Layer sichtbar wird. Im Layerbaum wurde zudem die Hintergrundkarte per Maus-Klick deaktiviert, um die Sichtbarkeit des ausgewählten Layers zu verbessern.

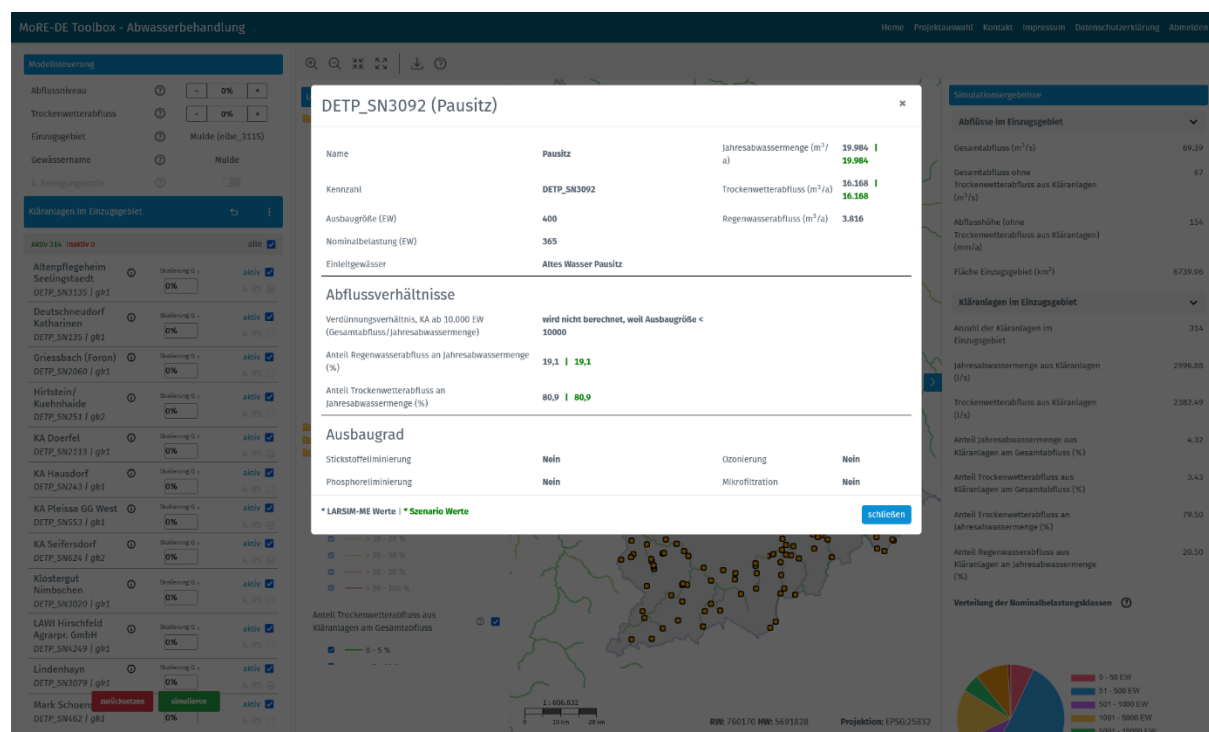
Abbildung 23: Anzeigen eines Themas aus dem Layerbaum (hier: Anteil behandeltes Abwasser am Gesamtabfluss)

Quelle: eigene Darstellung VisDat

Zu beachten ist, dass Einzugsgebiete grundsätzlich nur selektiert werden können, wenn der Layer „Gewässernetz, Gewässerabschnitte“ unter „Simulation“ aktiv geschaltet ist.

Per Maus-Klick auf eine Kläranlage in der Karte öffnet sich ein Fenster, in dem für die selektierte Kläranlage Kennwerte, Abflussverhältnisse und der bestehende Ausbaugrad sowie ggf. Informationen zu einer vierten Reinigungsstufe angezeigt werden. Sofern vorhanden bzw. sinnvoll werden hierbei Daten zum Ist-Stand (LARSIM-ME-Werte) als auch zu einer ggf. durchgeführten Simulation (Szenariowerte) ausgegeben (Abbildung 24).

Abbildung 24: Ausgabe von Detailangaben und Ergebnissen für eine selektierte Kläranlage



Quelle: eigene Darstellung VisDat

5.3 Beenden der Anwendung

Zum Verlassen des Themas / Projektes „Abwasserbehandlung“ kann in der Menüleiste wahlweise zur Projektauswahl oder zur Landing Page (Home-Seite) gewechselt werden.

5.4 Nutzung des Tools im Rahmen der Umsetzung von KARL

Die Anwendung versteht sich als eine nutzerfreundliche und interaktive Plattform, um zur Beantwortung von Fragestellungen wie sie sich bspw. aus der Umsetzung von KARL ergeben, beizutragen. Eine Weiterentwicklung ist im Zuge der fortschreitenden Konkretisierung der Umsetzung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie (KARL 2024/3019; Artikel 8) im deutschen Wasserrecht geplant.

Derzeit eröffnen sich mit der Anwendung folgende Bezüge zu Fragestellungen, die sich aus der Umsetzung der KARL ergeben:

- ▶ Ermittlung des Verdünnungsverhältnisses von Gesamtabfluss im Gewässer zur behandelten Jahresabwassermenge aus einzelnen Kläranlagen bezogen auf die Einleitstelle (Art. 8 KARL)
- ▶ Ermittlung des Anteils von behandeltem Abwasser aus Kläranlagen am Gesamtabfluss je Gewässerabschnitt
- ▶ Ermittlung des Trockenwetterabflussanteils aus Kläranlagen am Gesamtabflusses
- ▶ Simulation der Auswirkungen einer Veränderung des Gesamtabflusses gegenüber MQ in Bezug auf die Verdünnungsverhältnisse und Abwasseranteile für ein gewähltes Einzugsgebiet sowie eine selektierte Kläranlage

- ▶ Simulation der Auswirkungen einer Veränderung des Trockenwetterabflusses in Bezug auf die Verdünnungsverhältnisse und Abwasseranteile für ein gewähltes Einzugsgebiet sowie eine selektierte Kläranlage
- ▶ Simulation der Auswirkungen einer Nutzung von Abwasser für Bewässerungszwecke auf den Gesamtabfluss und mögliche Aufkonzentrierungseffekte in Bezug auf Nähr- und Schadstoffe

Im derzeitigen Umsetzungsstand der Webanwendung wird für die Kläranlagen ab 150.000 EW der Status der Umsetzung der vierten Reinigungsstufe gemäß Art. 8 KARL bereits erfasst (vorhanden, im Bau, geplant, keine Angaben) sowie ggf. das Reinigungsverfahren aufgeführt. Weiterhin werden Ablaufkonzentrationen für wichtige Spurenstoffe für die dritte und vierte Reinigungsstufe (sofern bereits realisiert) vorgehalten. Darauf aufbauend können in Verbindung mit den Jahresabwassermengen Frachten berechnet werden.

Zukünftig ist geplant diese Daten auch für alle Kläranlagen ab 10.000 EW, die eine vierte Reinigungsstufe besitzen, zu integrieren. Perspektivisch kann das Tool mit entsprechender Weiterentwicklung die zukünftig notwendige Ausweisung von Risikogebieten gemäß Art. 8 KARL unterstützen.

6 Fazit

Die Arbeiten in diesem Vorhaben erzielten die Verknüpfung und Integrierung eines flächendeckenden, deutschlandweiten Kläranlagenbestands sowie der entsprechenden Abflusskomponenten (Jahresabwassermenge, Trockenwetteranteile) mit der rasterbasierten hydrologischen Modellierung der Fließgewässer in Deutschland in LARSIM-ME.

Als ein wichtiger Indikator zur Risikoabschätzung stofflicher Einträge in Gewässer wurde damit der Anteil behandelten kommunalen Abwassers am Gesamtabfluss in Fließgewässer räumlich hoch aufgelöst ausgewiesen. Die Ergebnisse wurden in ein interaktives Werkzeug eingebunden und stehen zur weiteren Nutzung zur Verfügung.

Es wurde gezeigt, dass der Anteil von Trockenwetterabfluss aus Kläranlagen am gesamten Abfluss aus Deutschland im Zeitraum 2006 bis 2015 7,5 % betrug. Für ca. 92 % der analysierten Gewässerteilstrecken lag der Trockenwetterabflussanteil hierbei unter 10 %. Besonders hohe Trockenwetterabflussanteile (im Extremfall bis zu 62 %) werden vor allem in Ballungsräumen erreicht, die durch hohe Einwohnerdichten geprägt sind – beispielsweise das Ruhrgebiet, Berlin oder Frankfurt am Main.

Das entwickelte interaktive Werkzeug ermöglicht eine dynamische Verknüpfung der verfügbaren Informationen und ist um weitere fachliche Aspekte erweiterbar. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, Szenarien-Betrachtungen durchzuführen und mögliche Risiken für Fließgewässer hinsichtlich stofflicher Einträge zu identifizieren. Dies ist unerlässlich um geeignete Managementstrategien zu entwickeln. Als ein Beispiel für Erweiterung des Werkzeugs ist zu nennen, dass aktuell die fachlichen Voraussetzungen geschaffen werden, um die Auswirkungen der Umsetzung einer vierten Reinigungsstufe entsprechend der Anforderungen der EU-Kommunalabwasserrichtlinie (2024/3019; Artikel 8) abbilden zu können.

Weiterentwicklungen des Tools könnten beispielsweise auch die Verknüpfung mit Konzentrationen der Kläranlagen umfassen und somit die Analyse der durch Kläranlagen-Einleitungen bedingten Gewässerbelastung um stoffliche Komponenten erweitern.

7 Quellenverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2025): Fremdwasserbestimmung - Anwendung der Methode des Gleitenden Minimums und der Jahresschmutzwasser-Methode, 2025. Online verfügbar unter [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000005?SID=817375711&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27lfu_was_00361%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000005?SID=817375711&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_was_00361%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27)).
- Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM: Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburg (Freiburger Schriften zur Hydrologie, 11). Online verfügbar unter <https://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/band11.html>.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland, 2003. Online verfügbar unter http://www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/had/had_bezug.htm.
- Clara, M., Müller-Rechenberg, H. (2023): Spurenstoffe in Gewässern und bei der Abwasserreinigung: Vorschläge der Europäischen Kommission zur Aktualisierung der Umweltqualitätsnormenrichtlinie und der kommunalen Abwasserrichtlinie. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Volume 75, Issue 9-10, pp. 540-548. Doi: 10.1007/s00506-023-00972-y.
- Drewes, J. E.; Karakurt, S.; Schmid, L.; Bachmaier, M.; Hübner, U.; Clausnitzer, V. (2018): Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderungen für die Trinkwassergewinnung in Deutschland, 2018 (59/2018). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/2018_08_02_tum_abschlusserbericht_klarwasseranteile.pdf, zuletzt geprüft am 23.09.2025.
- DWD Climate Data Center (CDC): Jährliche Gebietsmittel der Lufttemperatur (Jahresmittel) in °C (2 m Höhe). Online verfügbar unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional.
- DWD Climate Data Center (CDC): Jährliche Gebietsmittel der Niederschlagshöhe (Jahressumme) in mm, Version v19.3. Online verfügbar unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/.
- Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder (FDZ) (2017): Erhebung der öffentlichen Abwasserentsorgung. Merkmalsträger Kanalnetzbetreiber. Eigene Berechnungen, 2017.
- Fuchs, S., Toshovski, S., Kaiser, M., Sacher, F., Thoma, A. (2020): Belastung der Umwelt mit Bioziden realistischer erfassen - Schwerpunkt Einträge über Kläranlagen. UBA-Texte 169/2020. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/belastung-der-umwelt-bioziden-realistischer>.
- Gewässerkundlicher Dienst Bayern (GKD Bayern) (2025): Open data. Online verfügbar unter <https://www.gkd.bayern.de/de/fluesse/abfluss>, zuletzt geprüft am 01.04.2025.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2025): Open data. Online verfügbar unter <https://www.hlnug.de/static/pegel/wiskiweb3/webpublic/#/overview/Wasserstand?period=P7D>, zuletzt geprüft am 01.04.2025.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (2007): Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Fremdwasser in kommunalen Kläranlagen - Erkennen, bewerten und vermeiden-, 2007. Online verfügbar unter https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/35669-Erkennen__bewerten_und_vermeiden._Langfassung.pdf.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (2016): Abfluss-BW, Regionalisierte Abfluss-Kennwerte Baden-Württemberg - Mittlere Abflüsse und mittlere Niedrigwasserabflüsse, 2016. Online verfügbar unter <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/>.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (2025): Open data. Online verfügbar unter <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/>, zuletzt geprüft am 01.04.2025.

Landeshochwasserzentrum Sachsen (LHWZ Sachsen) (2025): Open data. Online verfügbar <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/lhwz/gepruefte-messwerte.html>, zuletzt geprüft am 01.04.2025.

LARSIM Entwicklergemeinschaft (LEG) (2024): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, 2024. Online verfügbar unter <https://larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>.

LAWA (2025): Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser - Water body for WFD (Wasserkörper-DE) Online online verfügbar unter <https://geoportal.bafg.de/inspire/download/AM/servicefeed.xml>, zuletzt geprüft am 09.02.2026.

Meißner, D.; Klein, B.; Ionita, M. (2017): Development of a monthly to seasonal forecast framework tailored to inland waterway transport in central Europe. In: Hydrology and Earth System Sciences 21 (12), S. 6401–6423. Online verfügbar unter <https://hess.copernicus.org/articles/21/6401/2017/hess-21-6401-2017.html>.

Morling, K.; Fuchs, S.; Krumm, J.; Haag, I. (2024): Zusammenführung der bundesweiten Modellierung von Wasserhaushalt (LARSIM-ME) und Stoffeinträgen (MoRE). UBA-Texte 37/2024. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/zusammenfuehrung-der-bundesweiten-modellierung-von>.

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (2025): Open data. Online verfügbar unter <http://www.wasserdaten.niedersachsen.de/cadenza/>, zuletzt geprüft am 01.04.2025.

Pegelonline, Gewässerkundliches Informationssystem der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2025): Open data. Online verfügbar unter <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/pegeltabelle?scrollTop=0&gewaesserFilter=-&pegelnameFilter=-&pegelnummerFilter=-¶meterFilter=8>, zuletzt geprüft am 01.04.2025.

Pistocchi, A.; Alygizakis, N.A.; Brack, W.; Boxall, A.; Cousins, I.T.; Drewes, J.E.; Finckh, S.; Gallé, T.; Launay, M.A.; McLachlan, M.S.; Petrovic, M.; Schulze, T.; Slobodnik, J.; Ternes, T.; Van Wezel, A.; Verlicchi, P.; Whalley, C. (2022): European scale assessment of the potential of ozonation and activated carbon treatment to reduce micropollutant emissions with wastewater. Science of The Total Environment 848, 157124. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157124>.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023): Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung - Strukturdaten zur Wasserwirtschaft - 2019, 2023. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/wasserwirtschaft-2190213199005.html>.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024): Erhebung der öffentlichen Abwasserbehandlung Berichtszeitraum 2022, 2024. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/statistischer-bericht-abwasser-oeffentlich-219021229005.html>.

Toshovski, S.; Kaiser, M.; Fuchs, S.; Sacher, F.; Thoma, A.; Kümmel, V.; Lambert, B., (2020): Prioritäre Stoffe in kommunalen Kläranlagen - Ein deutschlandweit harmonisiertes Vorgehen. UBA-Texte 173/2020. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/prioritaere-stoffe-in-kommunalen-klaeeranlagen>.

Weiß, G. (2020): Fremdwasseranalyse. Online verfügbar unter <https://www.uft.eu/uft-wiki/eintrag/fremdwasseranalyse/>, zuletzt aktualisiert am 2020, zuletzt geprüft am 12.11.2025.