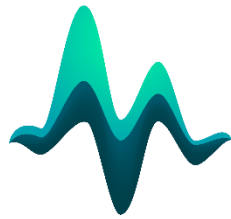


Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt:



DigiWaVe

Digitale Lösungen für eine ressourceneffiziente und sichere Wasserwiederverwendung im urbanen Raum (DigiWaVe)

Fördermaßnahme: Digital Greentech

Projektlaufzeit: 01.09.2023 – 28.02.2026

Erstellungsdatum: August 2026



Projektpartner	Kürzel	Förderkennzeichen
Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH	KWB	02WDG1687A
Stadtwerke Bad Oeynhausen AöR	SBO	02WDG1687B
Schölzel Consulting	SC	02WDG1687C
Xylem Water Solutions Herford GmbH	XYL	02WDG1687D
Masasana GmbH	MAS	02WDG1687E

Gefördert durch:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Zitiervorschlag

Die Autorinnen und Autoren empfehlen diesen Bericht wie folgt zu zitieren:

DigiWaVe (2026): Digitale Lösungen für eine ressourceneffiziente und sichere Wasserwiederverwendung im urbanen Raum. Abschlussbericht zum BMFTR Vorhaben 02WDG1687A-E, Projektlaufzeit 09/2023 – 02/2026

Erklärung zum Einsatz von KI

Die Autoren und Co-Autoren versichern hiermit, dass sie den vorliegenden Bericht selbstständig erarbeitet haben. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderweitigen fremden Äußerungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Im Falle des Einsatzes von generativen IT-/KI-gestützten Sprachmodellen sind diese Werkzeuge in der Übersicht verwendeter Hilfsmittel mit ihrem Produktnamen, der Art des Hilfsmittels und der Art der Verwendung vollständig aufgeführt.

Danksagung

Wir bedanken uns recht herzlich bei den Projektpartnern, assoziierten Partnern und Unterauftragnehmern für die stets produktive und freundschaftliche Zusammenarbeit, welche zu einem erfolgreichen Projektabschluss beigetragen hat. Für die Förderung bedanken wir uns beim Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR). Beim Projektträger Karlsruhe (PTKA) für eine klare Linie mit gleichzeitig notwendigen Freiräumen um ergebnisorientierte und anwendungsrelevante Forschung betreiben zu können. Bei Partnervorhaben aus der Fördermaßnahme Digital Greentech für den offenen Austausch. Bei allen Teilhabern am Projekt, die zuvor nicht erfasst sind.

Durch das harmonische Zusammenspiel konnten zahlreiche wertvolle Ergebnisse erzielt und disseminiert werden, welche in Deutschland die angesichts sich wandelnden Klimas notwendig werdende, sichere Erschließung der Ressource kommunales Abwasser zur Wiederverwendung im urbanen Raum voranbringt.

Inhaltsverzeichnis

Autorenübersicht	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Kurzfassung	1
1 Ziel und Projektstruktur	2
2 Wissenschaftlicher Stand zu Beginn des Vorhabens	3
3 Rechtliche Randbedingungen	4
4 Eingehende Darstellung der Verwendung und erzielte Ergebnisse	7
4.1 AP1: Technische Ausstattung und Erhebung von Trainingsdaten	7
4.1.1 AP1.1: Installation und Inbetriebnahme der Versuchsanlage	7
4.1.2 AP1.2: Anlagenbetrieb und Generierung Trainingsdatensatz	14
4.2 AP2: Wasserqualitätsprognose, Risikomanagement und digitale Unterstützung	22
4.2.1 AP2.1: Prognosemodell für Wasserqualität	22
4.2.2 AP2.2: Cloud-basiertes Informationssystem	33
4.3 AP3: KI-basierte Wasserbedarfsprognose, Routenplanung und cloudbasiertes Datenmanagement-system	41
4.3.1 AP3.1: KI-basierte Wasserbedarfsprognose	41
4.3.2 AP3.2: Routenplanung & Entnahmepunktoptimierung	52
4.4 Arbeitspaket 4: Vorbereitung der Umsetzung und Ergebnisverbreitung	57
4.5 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse	61
5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet	63
6 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes	63
7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes	63
8 Dissemination der Ergebnisse	63
9 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	64
10 Literaturverzeichnis	65

Autorenübersicht

Projektpartner	Autoren	Federführende Beteiligung
 Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH Grunewaldstr. 61-62 10825 Berlin www.kompetenz-wasser.de	Dipl.-Ing. Michael Stapf Dipl.-Ing. Wolfgang Seis M.Sc. Jonas Hunsicker Dr.-Ing. Ulf Mieke	Koordination Gesamtbericht, AP1.2, AP2.1
 STADTWERKE® BAD OEYNHAUSEN ... und es läuft! Stadtwerke Bad Oeynhausen (AöR) Weserstr. 23 32547 Bad Oeynhausen https://www.stadtwerke-badoeynhausen.de/	Susanne Brants Stefan Dück Christopher Seele Christian Kowe	AP4.1 AP4.2
 Schölzel Consulting Alt-Pempelfort 2 40211 Düsseldorf https://www.schoelzelconsulting.de/	Swetlana Schölzel	AP4.1 AP4.2
 xylem Let's Solve Water Xylem Water Solutions Herford GmbH Boschstr. 4 – 14 32051 Herford https://www.xylem.com/de-de/	Dr. Achim Ried M.Sc. Jens Gebhardt	AP1.1, AP2.2
 MASASANA DEEPER LEARNING Masasana GmbH Enscheder Str. 9 41069 Mönchengladbach https://masasana.ai/	Tobias Freund	AP3.1 AP3.2

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die vier Lösungsbausteine und deren Zusammenspiel im Projekt DigiWaVe....	2
Abbildung 2: Projektstruktur und Übersicht der Arbeitspakete.	3
Abbildung 3: Übersicht der bestehenden Kläranlage Bad Oeynhausen.	7
Abbildung 4: UV-Desinfektionsanlage LBX90e in Seecontainer.	9
Abbildung 5: UV-Desinfektionsanlage Spektron 2e.	10
Abbildung 6: Übersicht der Messstellen für eine manuelle Probenahme und der Onlinemessungen während der Phase des Modellaufbaus (oben) sowie der Modellvalidierung (unten).	11
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Schnittstellen der Datenübertragung.	12
Abbildung 8: Schnellmessgerät für E. coli im Keller des Filtrationsgebäudes. In der Flasche befindet sich das Nährmedium; in den Kanistern eine saure Desinfektionslösung.	12
Abbildung 9: Beispiel einer Einzelmessung mit dem aquaBio, Signalausgabe als Spannungswert (V).	13
Abbildung 10: Konzentrationen der vier mikrobiologischen Indikatororganismen an den fünf Probenahmestellen vom Mai bis November 2024. Ein Dreieck markiert eine Über- bzw. Unterschreitung der Bestimmungsgrenze.	15
Abbildung 11: Konzentrationen der vier mikrobiologischen Indikatororganismen im Zu- und Ablauf der UV-Anlage im Zeitraum vom November 2024 bis Juli 2025.	16
Abbildung 12: Boxplot mit allen Messdaten im Zeitraum vom Mai 2024 bis Juli 2025.	17
Abbildung 13: Ergebnisse der Beprobung zur Prozessvalidierung.	19
Abbildung 14: Vergleich der Messwerte des aquaBio Schnellmessgeräts mit der Labormessung (DIN ISO 9308-3).	23
Abbildung 15: Abhängigkeit der Modellgüteparameter von der Anzahl der genutzten Vorhersagevariablen.	26
Abbildung 16: Prozessparameter, geordnet nach der Wichtigkeit der Variablen für das QRF-Modell.	26
Abbildung 17: Zusammenhang zwischen applizierter UV-Dosis (PSS) und erreichter Log ₁₀ -Reduktion von E. Coli.	27
Abbildung 18: Vergleich verschiedener Modellierungsansätze.	29
Abbildung 19: Vergleich der Vorhergesagten E. coli Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit der prognostizierten Zulaufkonzentration und der eingetragenen UV-Dosis. Unterschiedliche blaue Schattierung zeigen verschiedene Unsicherheitsbänder. Die graue Hintergrundschattierung zeigt die unterschiedliche UV-Dosis an.	31
Abbildung 20: Schema Informationsmanagement: Bereitstellung der erforderlichen Informationen für verschiedene Anwendergruppen.	35
Abbildung 21: Dashboard 1: Übersicht	36
Abbildung 22: Dashboard zur Darstellung ausgewählter Betriebsparameter der Kläranlage mit Übersicht über aktuelle Messwerte.	37
Abbildung 23: Beispielhaft Darstellung der Ganglinie des Wasserdurchfluss.	37
Abbildung 24: Dashboard UV-Anlage	38
Abbildung 25: Dashboard kartografische Darstellung der Messstandorte	39

Abbildung 26: Dashboard Bodenfeuchtesensoren.....	39
Abbildung 27: Impressionen vom Einbau eines Bodenfeuchtemessgeräts	42
Abbildung 28: Details der fünf Standorte mit den Bodenfeuchtemessungen sowie eine Übersicht der Verteilungen über das Stadtgebiet. Zur Orientierung ist auch der Standort der Kläranlage (KA) hervorgehoben.	43
Abbildung 29: Beispielhafter Wasserspeicher-Steckbrief eines Baumstandorts (hier: Georgstraße, Baumsubstrat) mit Bodenart, Porenvolumina und nutzbarer Wasserspeicherkapazität.	44
Abbildung 30: Geplanter Einsatz des Prognosemodells: Wetterdaten speisen das KI-Modell, dessen Wasserbedarfsprognose über die Idrica-API an das Routenplanungstool (AP 3.2) übergeben wird und dort in eine Bewässerungsrouten mündet.	46
Abbildung 31: Datenpipeline der KI-basierten Wasserbedarfsprognose – von der Datenbeschaffung über Aufbereitung und Normalisierung bis zu Modelltraining, -evaluation und Auswahl des besten Modells.	47
Abbildung 32: Sensorverläufe im April 2024 (Standort 846, zwei Bäume, drei Messtiefen). Bereits zu Saisonbeginn zeigen die Messreihen deutliche, hochfrequente Sprünge über den gesamten Wertebereich.	48
Abbildung 33: Sensorverläufe im August (oben) 2025 und September (unten) 2025. Bäume desselben Standorts und damit desselben Bodenprofils – reagieren über dieselben Tage hinweg deutlich unterschiedlich; einzelne Sensoren zeigen unplausible Ausschläge (z. B. Standort 846).	49
Abbildung 34: Korrelationsmatrix der erfassten Größen (V0–V3 Niederschlag, V4/V5 Satellit/Sentinel, V6–V21 Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchte inkl. Zeitversatz und Prognose; value = Sensormesswert). Die Sensormesswerte weisen keine nennenswerte Korrelation mit den Wettermerkmalen auf.....	50
Abbildung 35: Stadtgebiet Bad Oeynhausen, eingeteilt in Wetterstationsgebiete (farbige Sektoren), zur räumlichen Zuordnung von Prognose- und Wetterdaten. Kartengrundlage: © OpenStreetMap-Mitwirkende.	53
Abbildung 36: Routenplaner mit Wasserbedarfs-Heatmap für Bad Oeynhausen. Einstellbar sind u. a. die Wassertank-Kapazität sowie die Berücksichtigung von Nachfüllungen. Kartengrundlage: © OpenStreetMap-Mitwirkende.	54
Abbildung 37: Beispielhaft geplante Route (Wegpunkte, Bäume entlang der Strecke, Wasserbedarf, Tankstatus/Nachfüllungen, Strecke und Fahrzeit). Kartengrundlage: © OpenStreetMap-Mitwirkende.	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tabelle mit verwendeten Abkürzungen.	VIII
Tabelle 2: Auszug der Mindestanforderungen an die Qualität von aufbereitetem Wasser für die landwirtschaftliche und urbane Wasserwiederverwendung gemäß DWA-M 1200 (Gelbdruck). B-1/C-1: Bewässerung für Nahrungsmittelpflanzen und B-2/C-2: Urbane Bewässerung sowie Non-Food Kulturen und Nahrungsmittelpflanzen, die einer Pasteurisierung entsprechend verarbeitet werden.....	6
Tabelle 3: Mittlere Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage im Zeitraum 2023 – 2025. Mit (*) markierte Werte sind Onlinewerte im Zeitraum vom 01/2023 – 07/2025.	8
Tabelle 4: Mikrobiologischer Parameterumfang der akkreditierten Labore. Zur Quantifizierung der ersten beiden Parameter wurde in Abhängigkeit der erwartbaren Konzentration an den jeweiligen Probenahmestellen (PNS) eine andere Methode verwendet.	14
Tabelle 5: Ergebnisse der Messungen bezüglich mikrobiologischer Parameter für Fragen zur Arbeitssicherheit. n.a. = nicht auswertbar, neg. = negatives Ergebnis (= nicht nachweisbar), graue Felder = Probe nicht angesetzt.....	18
Tabelle 6: Spurenstoffelimination zwischen dem Zu- und Ablauf der Kläranlage bezüglich der in der Kommunalabwasserrichtlinie (KARL) definierten 12 Indikatorsubstanzen. Grün hervorgehobene Felder markieren eine Überschreitung der in KARL geforderten 80-prozentigen Entfernung.	20
Tabelle 7: Gemessene PFAS-Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage (24-h Mischproben).	20
Tabelle 8: Vergleich der verschiedenen Modellgüteindikatoren berechnet aus Vorhersagen und unabhängigen.....	30
Tabelle 9: Charakteristika der verschiedenen Validierungsdatensätze.	30
Tabelle 10: Abschätzung des Energieeinsparpotentials im Vergleich zur fluenzbasierten Regelung bezogen auf das 95. Perzentil der gemessenen E. coli Werte.....	32
Tabelle 11: Ergebnisse der Bodenproben an den Baumstandorten (ARBOR revival): Bodenart, Gesamtporenvolumen, Luftporenvolumen, nutzbare Wasserspeicherkapazität (nWSK) und Totwasseranteil.	44
Tabelle 12: Übersicht aller kommunikativer Maßnahmen im Projekt DigiWaVe.	63

Abkürzungsverzeichnis

Tabelle 1: Tabelle mit verwendeten Abkürzungen.

Abkürzung	Beschreibung
AG	Arbeitsgemeinschaft
AIC	Akaike-Informationskriterium
AP	Arbeitspaket
DST	Defined Substrate Technology
DWA	Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
GAK	Granulierte Aktivkohle
HQSG	Heilquellenschutzgebiet
KA	Kläranlage
KARL	Kommunalabwasserrichtlinie (EU 2024/3019)
KI	Künstliche Intelligenz
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LB	(digitaler) Lösungsbaustein
LM	Lineares Modell
ML	Maschinelles Lernen
MUG	4-Methylumbelliferyl- β -D-glucuronid
nWSK	nutzbare Wasserspeicherkapazität
ONPG	o-Nitrophenyl- β -D-galactopyranosid
OPC-UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
PNS	Probenahmestellen
QRF	Quantile Random Forest
R^2	Varianz
RMSE	Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers
SD	Standardabweichung
T	Temperatur
UBA	Umweltbundesamt
UV-Desinfektion	Verfahren zur Desinfektion mittels ultravioletten (UV) Licht
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WSG	Wasserschutzgebiet

Kurzfassung

Ziel des Vorhabens DigiWaVe war es, Kommunen durch die Entwicklung und Erprobung digitaler Lösungen bei der Planung und Umsetzung einer ressourceneffizienten und sicheren Wasserwiederverwendung für die Bewässerung urbaner Grünflächen zu unterstützen. Am Beispiel der Stadt Bad Oeynhausen wurden die Anforderungen an die Umsetzung einer Wasserwiederverwendung sowie die digitale Unterstützung von Wasseraufbereitung und Verteilung untersucht.

Ein Fokus lag auf dem Einsatz datengetriebener Modelle zur Prognose der mikrobiologischen Wasserqualität um einen bedarfsgerechten Betrieb der UV-Desinfektionsanlage zu ermöglichen. Darüber hinaus wurde betrachtet, wie Betriebs-, Qualitäts-, Bedarfs- und Logistikdaten in einem cloudbasierten Informationssystem zusammengeführt, verarbeitet und nutzbar gemacht werden können. Des Weiteren wurden Methoden des Maschinellen Lernens zur Ermittlung und Prognose des Bewässerungsbedarfs urbaner Grünflächen verwendet und Algorithmen zur automatisierten Planung von Routen für die Bewässerungsfahrzeuge entwickelt. Dabei wurden sowohl die erforderliche Datengrundlage als auch die technischen und organisatorischen Voraussetzungen für eine integrierte kommunale Anwendung geschaffen.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts war die Kommunikation der Projektfortschritte über verschiedene Plattformen und Medien sowie die Durchführung von Infoveranstaltungen (online und offline). Die Kommunikationsmaßnahmen im Projekt informierten verschiedenste Akteure aus Politik, Behörden, Fachöffentlichkeit und interessierter Bürgerschaft über die Projekterkenntnisse und ermöglichte durch die Veranstaltungen einen aktiven Austausch zwischen diesen Akteuren zu offenen Fragen beim Thema urbane Wasserwiederverwendung.

DigiWaVe trägt dazu bei, die Umsetzung urbaner Wasserwiederverwendungsprojekte in Deutschland durch ein verbessertes Verständnis der technischen und organisatorischen Anforderungen, neue Möglichkeiten der digitalen Prozessunterstützung und die Betrachtung eines realen kommunalen Anwendungsfalls voranzubringen. Durch die Verknüpfung von Wasseraufbereitung, Qualitätsüberwachung, Bedarfsprognose, Informationsmanagement und Logistik liefert das Vorhaben einen wichtigen Beitrag zu offenen Fragestellungen der kommunalen Wasserwiederverwendung und unterstützt die weitere Ausgestaltung geeigneter technischer, organisatorischer und regulatorischer Rahmenbedingungen.

1 Ziel und Projektstruktur

Um die Planung und Implementierung der urbanen Wasserwiederverwendung zu beschleunigen wurden im Projekt DigiWaVe digitale Lösungsbausteine (LB) entwickelt und erprobt. Die vier Lösungsbausteine und deren Zusammenspiel sind in Abbildung 1 dargestellt.

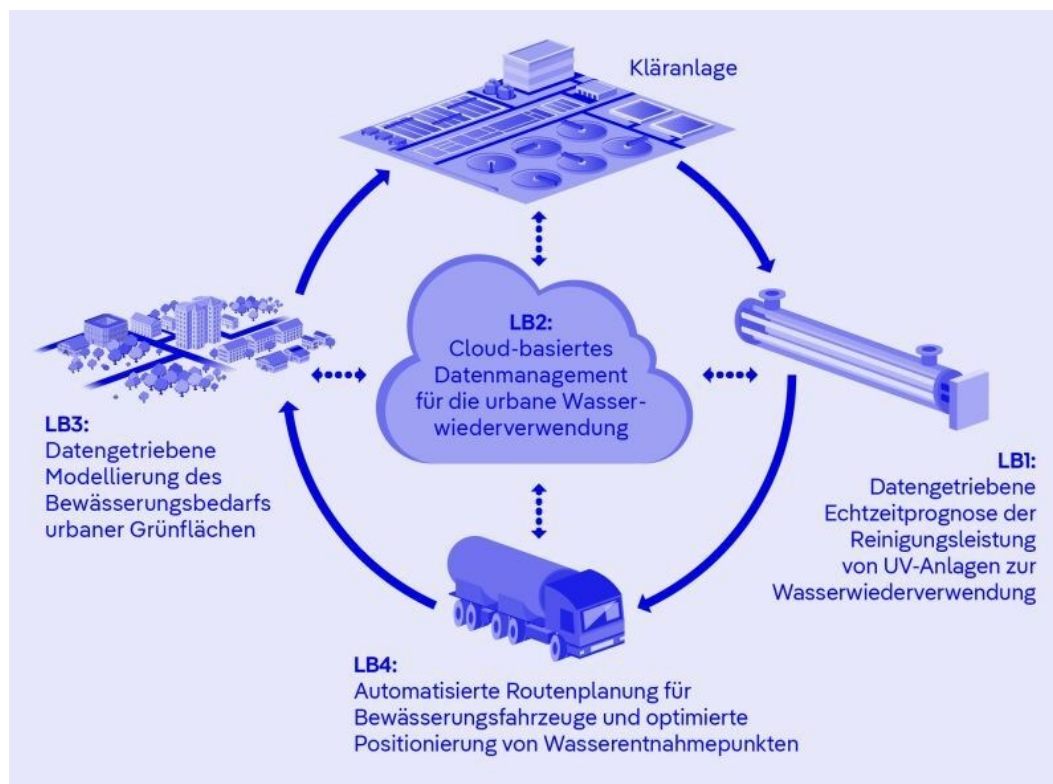


Abbildung 1: Die vier Lösungsbausteine und deren Zusammenspiel im Projekt DigiWaVe.

Der Lösungsweg zur Umsetzung der vier Lösungsbausteine gliederte sich in vier Arbeitspakete (APs) mit jeweils zwei Unter-Arbeitspaketen auf, siehe Abbildung 2. In einem fünften Arbeitspaket wurde das Projektmanagement zusammengefasst. Die Pfeile beschreiben die Weitergabe von Daten oder Modellen an ein anderes Arbeitspaket.

In AP1 wurde die UV-Anlage installiert (AP1.1) und anschließend deren Leistungsfähigkeit untersucht sowie Trainingsdaten für das Prognosemodell erhoben (AP1.2). In AP2 wurde das Wasserqualitätsprognosemodell entwickelt und getestet (AP2.1) sowie das cloud-basierte Informationssystem aufgebaut (AP2.2.). In AP3 wurden Sensoren für das Training und die Validierung der Wasserbedarfsprognosemodelle installiert und ausgewertet sowie verschiedene Ansätze zur KI-basierten Wasserbedarfsprognose untersucht (AP3.1). Darüber hinaus wurde im AP3 das Routenplanungstool für die Bewässerungsflotte der Stadtbildpflege in Bad Oeynhausen entwickelt (AP3.2). In AP4 wurden Projektergebnisse in sozialen Medien, Seminaren und Fachvorträgen sowie in Fachartikeln verbreitet. Neben einem engen Austausch mit Behörden und Politik, wurde eine öffentliche Abschlussveranstaltung in Bad Oeynhausen über DigiWaVe und den Stand der Wasserwiederverwendung durchgeführt.

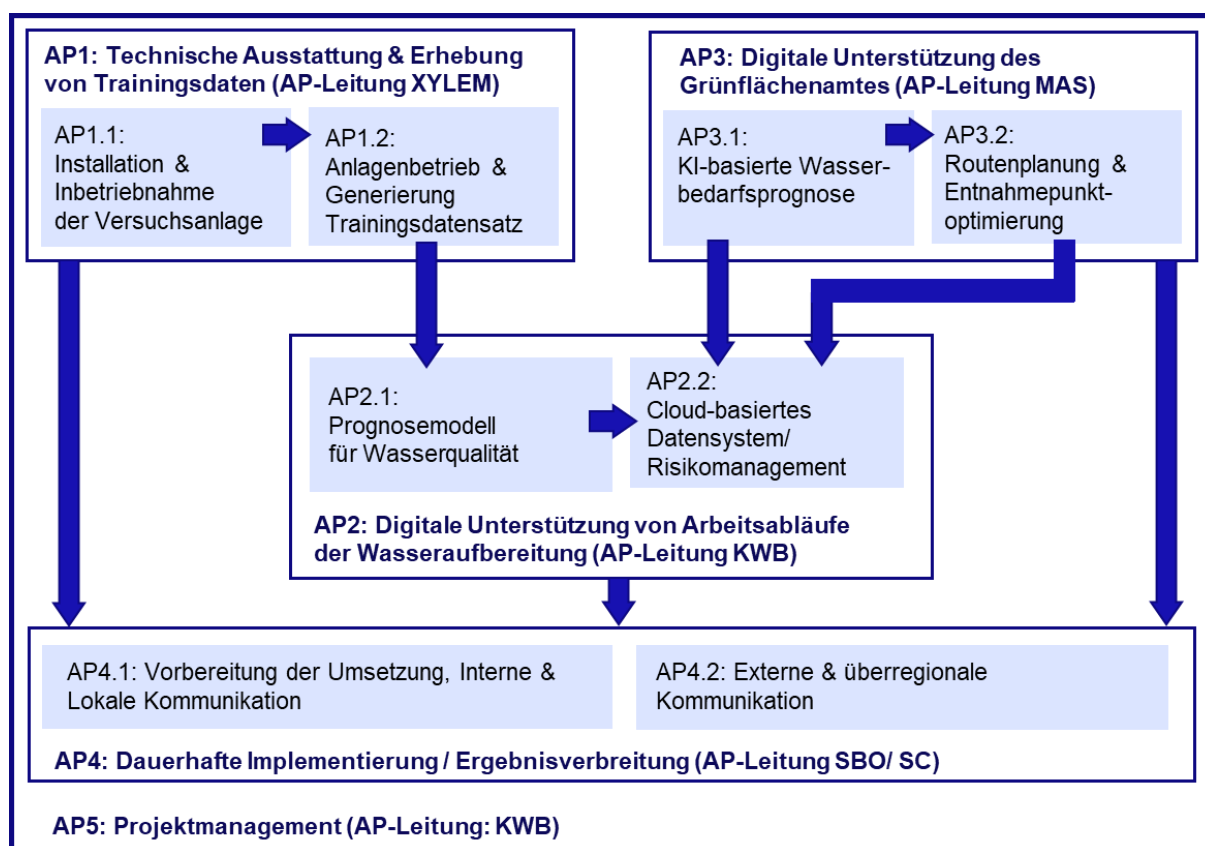


Abbildung 2: Projektstruktur und Übersicht der Arbeitspakete.

2 Wissenschaftlicher Stand zu Beginn des Vorhabens

Der wissenschaftliche Stand zu Beginn von DigiWaVe wird entsprechend der vier Lösungsbausteine gegliedert.

LB 1 - Datengetriebene Echtzeitprognose der Reinigungsleistung von UV-Anlagen zur Wasserwiederverwendung:

Die UV-Behandlung war bereits ein etabliertes und breit eingesetztes Desinfektionsverfahren. Die Steuerung von UV-Anlagen erfolgte dabei u.a. anhand der vorliegenden Transmission, jedoch nicht anhand der aktuell vorliegenden mikrobiologischen Belastung. In Publikationen [1] wurden Energieeinsparpotentiale durch den Einsatz datengetriebener Modellierungsansätze zur Prognose der mikrobiologischen Wasserqualität im Zulauf von UV-Anlagen beschrieben. Für den Aufbau eines solchen Modells wird jedoch ein umfangreicher Datensatz des mikrobiologischen Geschehens auf der Kläranlage benötigt. Zur Generierung dieses Datensatzes wurde in DigiWaVe ein *E. coli* Schnellmessgerät in Kombination mit Labormessungen verwendet. Die Akzeptanzhürde durch fehlende Nachvollziehbarkeit vieler datengetriebener Modelle wurde zu Beginn herausgestellt und durch Betrachtung von Methoden erklärbarer KI (Quantile Random Forest, Multiple lineare Regression) bei der Entwicklung der Wasserqualitätsprognose adressiert.

LB 2 - Cloubasiertes Datenmanagement für die urbane Wasserwiederverwendung:

Wasserversorgung und Abwasserreinigung wurden weitgehend getrennt organisiert. Mit der Wasserwiederverwendung wird die Abstimmung zwischen Kläranlagenbetrieb, kommunalen Nutzern und weiteren Beteiligten erforderlich. Für effiziente Abläufe wurde daher ein integrales Datenmanagement als Voraussetzung benannt, um Informationsflüsse zu automatisieren und

bereichsübergreifend nutzbar zu machen. Cloudbasierte Plattformen sind in vielen Wirtschaftssektoren etabliert, im Kontext kritischer Infrastruktur (KRITIS) gelten jedoch erhöhte Anforderungen an Zugriffsrechte, Governance und Cyber-Sicherheit. Für die Wasserwirtschaft zeigten Bestandsaufnahmen, dass Konzepte einer vernetzten Wasserwirtschaft erst in Ansätzen umgesetzt sind [2]. In DigiWaVe wurde ein cloud-basiertes Informationssystem aufgebaut, um Informationen über die Wasserwiederverwendung in Bad Oeynhausen hinsichtlich des Angebots (Menge und Wasserqualitätsprognose), des Bedarfs (Wasserbedarfsprognose) sowie der optimierten Verteilung (Routenplanungstool) zentral bereitzustellen.

LB 3 - Datengetriebene Modellierung des Bewässerungsbedarfs urbaner Grünflächen:

Die Bedeutung urbaner Grünflächen für Klimaanpassung, Hitzeminderung, Starkregenpufferung und Biodiversität war wissenschaftlich gut belegt [3-5]. Längere Trockenperioden wurden als wahrscheinliche Entwicklung beschrieben, wodurch der Bewässerungsbedarf zunimmt, welcher im optimalen Fall bedarfsgerecht erfolgt, um Wasserressourcen zu schonen. Digitale Verfahren zur Bestimmung des Wasserbedarfs waren vor allem aus der Landwirtschaft bekannt. Im urbanen Bereich wurden bereits vereinzelte Pilotprojekte durchgeführt, die vernetzte Bodenfeuchtesensoren zur bedarfsgerechten Bewässerung nutzten. Als innovativer Ansatz in DigiWaVe war angedacht ein Prognosemodell auf Basis vorhandener Datenquellen wie Wetterdaten, Katasterdaten und Satellitenbilder zu erzeugen, welches auf Sensoren im Stadtgebiet trainiert und validiert wird.

LB 4 - Automatisierte Routenplanung und optimierte Positionierung von Wasserentnahmepunkten:

Von den Mitarbeitern der Stadtbildpflege wurden Bewässerungspläne einmal im Jahr erstellt und wiederholt abgefahren. Die Bewässerung wurde nur auf Jungbäume fokussiert wobei mit diesem Ablauf bereits Kapazitätsengpässe bei Fahrzeugen und Personal auftraten. Unter diesen nicht optimalen Bedingungen konnte auch Wassermangel an bereits bewässerten Bäumen festgestellt werden. Darüber hinaus wurde die Bewässerung auch für ältere Bäume und weitere Vegetationsflächen im urbanen Raum aufgrund der oben beschriebenen klimatischen Prognosen zunehmend relevanter. Um den fehlenden Kapazitäten entgegenzuwirken, sollte in Kombination mit der Wasserbedarfsprognose (LB 3) ein automatisiertes Routenplanungstool die Arbeitsabläufe der Stadtbildpflege unterstützen und die Bewässerung optimieren.

3 Rechtliche Randbedingungen

Nachfolgend sind die rechtlichen Randbedingungen sowie die für die Wasserwiederverwendung im urbanen Raum relevanten Aufbereitungsziele während des Projektzeitraums zusammengefasst.

Die seit dem 26. Juni 2023 gültige EU-Verordnung 2020/741 zu Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung zur landwirtschaftlichen Bewässerung bildet derzeit den rechtlichen Rahmen für die Wasserwiederverwendung auf europäischer Ebene. Im Jahr 2022 wurden von der EU zudem zusätzliche Leitlinien [6], eine technische Anleitung [7] sowie eine delegierte Verordnung zum Risikomanagement [8] veröffentlicht, um die praktische Anwendung der EU VO 2020/741 zu unterstützen.

Zur Erarbeitung von Lösungs- und Regelungsvorschläge für die Anwendung und Umsetzung der EU VO 2020/741 in nationales Recht, wurde im Jahr 2020 eine länderoffene übergreifende Ad-hoc AG/Kleingruppe der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) eingerichtet. Diese AG veröffentlichte im Februar 2022 ihren Endbericht [9], welcher eine wesentliche

Grundlage für die Entwicklung von nationalen Regelungen zur Wasserwiederverwendung darstellt. Im Vergleich zur EU VO 2020/741 wurden strengere Anforderungen gestellt, wie beispielsweise eine Erweiterung der Qualitätsanforderungen aus Güteklasse A auf Güteklasse B und C (z. B. Prozessvalidierung, obligatorische Filtration, niedrigere Grenzwerte für die Trübung), ein Ausschluss der Wasserwiederverwendung in Schutzzonen I und II in Wasserschutzgebieten (WSG) sowie in Heilquellenschutzgebieten (HQSG) und Grenzwerte für PFAS-Konzentrationen im Wasser ($\text{PFAS}_{\Sigma 20} = 0,10 \mu\text{g/l}$). Aufbauend auf dem Bericht der LAWA sollte eine Anpassung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) und die Erarbeitung einer Bundesverordnung erfolgen. Dazu wurde bereits ein Referentenentwurf erarbeitet [10], wobei die weitere Bearbeitung noch nicht umgesetzt wurde.

Unter Berücksichtigung der LAWA-Empfehlungen und in enger Abstimmung mit dem Umweltbundesamt (UBA) wurde durch die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) eine Merkblattreihe DWA-M 1200 zur „Wasserwiederverwendung für landwirtschaftliche und urbane Zwecke in Deutschland“ erarbeitet und im Juli 2025 als Entwurf (Gelbdruck) veröffentlicht. Die wesentlichen Inhalte und Zwischenstände der Arbeiten an der Merkblattreihe wurden bereits vorab auf diversen Konferenzen und Veranstaltungen der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Merkblattreihe unterteilt sich in die folgenden drei Teile:

- Teil 1: Grundsätze zur Wasserwiederverwendung für unterschiedliche Nutzungen
- Teil 2: Anforderungen an die weitergehende Wasseraufbereitung
- Teil 3: Verwertung von aufbereitetem Wasser für die Bewässerung in Landwirtschaft, Gartenbau und Grünflächen

In Tabelle 2 sind die Anforderungen des DWA-M 1200 (Gelbdruck) zusammengefasst, da diese die Grundlage für die Anforderungen an die Wasseraufbereitung für die urbanen Wasserwiederverwendung im Projekt DigiWaVe darstellen. Im Vergleich zur EU VO 2020/741 sind folgende Abweichungen festzustellen:

- Für die Güteklassen B und C ist eine Filtrationsstufe erforderlich und es müssen (niedrigere) Ablaufwerte für Trübung und Feststoffe erreicht werden,
- für die Güteklasse C wurden die Ablaufwerte für *E. coli* von 1000 auf 100 KBE/100 ml reduziert,
- für Güteklassen A – C sind in Anlehnung an DIN 19650:1999 nun auch Ziele für intestinale Enterokokken einzuhalten,
- die Güteklassen B und C werden in B-1/B-2 bzw. C-1/C-2 unterteilt, wobei sich die Unterteilung grob in die Bewässerung für Nahrungsmittelpflanzen und B-2/C-2 in die Bewässerung im urbanen Kontext bzw. für Non-Food Kulturen und Nahrungsmittelpflanzen, die einer Pasteurisierung entsprechend verarbeitet werden, unterteilen lässt,
- für B-1 und C-1 ist im DWA-M 1200 ebenfalls eine Prozessvalidierung erforderlich. Zudem ist bei der Prozessvalidierung eine Log_{10} -Reduktion ≥ 6 sowohl für somatische als auch für F-spezifische Coliphagen nachzuweisen und nicht nur für die Summe der beiden Coliphagengruppen,
- bei einer nachgewiesenen Korrelation kann der BSB_5 durch den TOC ersetzt werden; bei einer kontinuierlichen Trübungsüberwachung kann auf den AFS verzichtet werden.

Tabelle 2: Auszug der Mindestanforderungen an die Qualität von aufbereitetem Wasser für die landwirtschaftliche und urbane Wasserwiederverwendung gemäß DWA-M 1200 (Gelbdruck). B-1/C-1: Bewässerung für Nutzpflanzen und B-2/C-2: Urbane Bewässerung sowie Non-Food Kulturen und Nutzpflanzen, die einer Pasteurisierung entsprechend verarbeitet werden.

Güteklasse	Zielvorgabe für Aufbereitung	<i>E. coli</i> (KBE/100 ml)	Intestinale Enterokokken (KBE/100 ml)	Chemisch-physikalische Parameter	Prozessvalidierung erforderlich ¹
A	Mech.-biolog. Behandlung, Filtration, Desinfektion	≤ 10	≤ 100	BSB ₅ ≤ 10 mg/l AFS ≤ 10 mg/l Trübung ≤ 2 NTU ²	Ja
B (B-1/B-2)	Mech.-biolog. Behandlung, Filtration, Desinfektion	≤ 100	≤ 100	BSB ₅ gem. RL 91/271/EWG, AFS ≤ 10 mg/l Trübung ≤ 2 NTU ²	B-1 = Ja B-2 = Nein
C (C-1/C-2)	Mech.-biolog. Behandlung, Filtration, Desinfektion	≤ 100	≤ 400	BSB ₅ gem. RL 91/271/EWG, AFS ≤ 10 mg/l Trübung ≤ 2 NTU ²	C-1 = Ja C-2 = Nein
D	Mech.-biolog. Behandlung, Desinfektion	≤ 10.000	-	BSB ₅ und AFS gem. RL 91/271/EWG	Nein

Fallspezifische Anforderungen: Bei Risiko einer Aerosolbildung: *Legionella* spp. < 1.000 KBE/l; Bei der Bewässerung von Weideflächen oder Futterpflanzen: intestinale Nematoden (Eier von Helminthen): ≤ 1 Ei/Liter. ¹ Prozessvalidierung: Nachweis einer relativen Log₁₀-Reduktion von Indikatororganismen für Bakterien (*E. coli*, ≥ 5), Viren (somatische und f-spez. Coliphagen, jeweils ≥ 6) und Protozoen (*Clostridium perfringens* Sporen, ≥ 4 oder sulfat-reduzierende Sporenbildner ≥ 5). ² Durchschnittswert über 24 Stunden für nicht-Membranverfahren; für Membranverfahren darf die Trübung innerhalb von 24 Stunden nie über 0,5 NTU liegen.

4 Eingehende Darstellung der Verwendung und erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden der Projektstruktur folgend, also nach den Arbeitspaketen unterteilt die Ergebnisse der Arbeiten in DigiWaVe eingehend dargestellt und diskutiert.

4.1 AP1: Technische Ausstattung und Erhebung von Trainingsdaten

Die wesentlichen Ziele von Arbeitspaket 1 umfassen die Implementierung und den Betrieb der UV-Desinfektionsanlage sowie die Erfassung bzw. Sammlung von Labor- und Onlinewerten für das Training des Prognosemodells (AP2.1, Abschnitt 4.2.1) und der Überprüfung der Einhaltung der geforderten Wasserqualitätskriterien.

4.1.1 AP1.1: Installation und Inbetriebnahme der Versuchsanlage

Kläranlage Bad Oeynhausen

Die kommunale Kläranlage in Bad Oeynhausen hat eine Belastung von ca. 63.000 Einwohnerwerten und verfügt über eine mehrstufige Abwasserbehandlung (Abbildung 3). Diese besteht aus einer mechanisch-biologischen Reinigungsstufe (vorgeschaltete Denitrifikation, zwei parallele Linien), einer Raumfiltration (Sand/Anthrazit) zur Abscheidung von Schwebstoffen und Partikel sowie einem Filter mit granulierter Aktivkohle (GAK-Filter) zur gezielten Spurenstoffelimination (z.B. Medikamente, Hormone, Industriechemikalien). Die Aktivkohlefilterstufe ist hydraulisch auf einen maximalen Durchfluss von 720 m³/h ausgelegt und seit Februar 2023 vollständig in Betrieb. Zur Verbesserung der Phosphor-Konzentration im Ablauf der Kläranlage, findet eine Phosphat-Fällung (Eisen(II)-sulfat) im Zulauf der Nachklärung statt. Bei Bedarf kann eine zusätzliche Zugabe von Fällungsmittel im Zulauf des Sandfilters erfolgen.

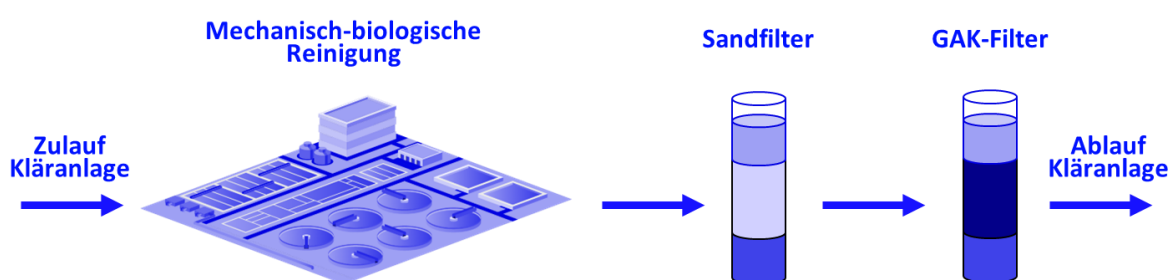


Abbildung 3: Übersicht der bestehenden Kläranlage Bad Oeynhausen.

Bei Trockenwetter werden im Mittel ca. 11.000 m³/d Abwasser behandelt; bei Regenwetter bis zu 58.800 m³/d. Die Jahresabwassermenge beträgt ca. 6 Millionen m³. Bei Zuflüssen, die diesen Bemessungswert des GAK-Filters überschreiten (720 m³/h), wird das gereinigte Abwasser nach der Sandfiltration ohne Passage der Aktivkohlefilter direkt in den Vorfluter abgeschlagen. Dadurch wird ein sicherer Betrieb der Aktivkohlefilter gewährleistet und eine Überlastung der Adsorptionsstufe vermieden. In der nachfolgenden Tabelle 3 findet sich eine Zusammenstellung ausgewählter Wasserqualitätsparameter im Ablauf der Kläranlage. Die sehr hohe UV-Transmission (UVT) von 70 – 83% und die niedrigen Trübungswerte (i.d.R. < 1,5 NTU) bieten hervorragende Voraussetzungen für den Betrieb einer UV-Desinfektion.

Tabelle 3: Mittlere Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage im Zeitraum 2023 – 2025. Mit (*) markierte Werte sind Onlinewerte im Zeitraum vom 01/2023 – 07/2025.

Parameter	Messwert	Einheit
CSB	> 20	mg/l
N-anorg	8,0	mg/l
NH ₄ -N	0,8	mg/l
P-gesamt	0,14	mg/l
SAK ₂₅₄ *	8,0 – 15,5	1/m
UVT*	70 – 83	%
Trübung*	Mittelwert: 0,5 95%-Quantil: 1,5 Maximum: 4,0	NTU

Versuchsanlage zur UV-Desinfektion

Die Versuchsanlage umfasst folgende Hauptkomponenten:

- Frequenzgeregelter Tauchpumpe zur Förderung und Beschickung der UV-Desinfektionsanlage
- Druckerhöhungspumpe zur Abgabe des aufbereiteten Wassers an Tankwagen oder zur Einspeisung in die betriebseigene Ringleitung
- UV-Desinfektionsanlage des Typs LBX90e einschließlich Containeraufbau
- Zentraler Steuerschrank zur Ansteuerung der UV-Anlage, der Pumpen und der zugehörigen Ventiltechnik
- Messtechnik zur kontinuierlichen Erfassung von Betriebsparametern (Durchfluss, Trübung und UV-Transmission)
- Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) zur Datenerfassung und als Schnittstelle für externe Systeme
- PC zur Datenaufbereitung und -übertragung
- 5G-Router zur Fernüberwachung und zum Fernzugriff auf die Anlage

Der Anlagenaufbau sowie die Auslegung der Komponenten wurden standortspezifisch an die hydraulischen und betrieblichen Gegebenheiten der Kläranlage Bad Oeynhausen angepasst. In dieser Konfiguration wurde die Anlage erstmals von der Firma Xylem realisiert. Sämtliche Aggregate, mit Ausnahme der Zulaufpumpe, sind in einem 15-Fuß-Seecontainer untergebracht, wodurch ein kompakter, witterungsgeschützter und modularer Versuchsbetrieb ermöglicht wird. Ein Foto der Anlagentechnik auf Rahmen ist folgend in Abbildung 4 zu sehen.



Abbildung 4: UV-Desinfektionsanlage LBX90e in Seecontainer.

Der maximale Volumenstrom durch die UV-Desinfektionsanlage wurde auf 60 m³/h ausgelegt und ist durch die maximale Förderleistung der Zulaufpumpe begrenzt. Die eingesetzte Zulaufpumpe ist frequenzgeregelt, wodurch eine stufenlose Einstellung des Durchflusses im Bereich von ca. 15 bis 60 m³/h realisiert werden konnte. Dies ermöglichte eine flexible Anpassung der hydraulischen Belastung an die jeweiligen Versuchsbedingungen.

Die Leistung der UV-Strahler ist über eine Dimmfunktion im Bereich von 50 bis 100 % regelbar. Durch diese Leistungsregelung kann auch bei variierenden UV-Transmissionen des Wassers eine konstante applizierte UV-Dosis sichergestellt werden. Auf diese Weise wird eine reproduzierbare Desinfektionsleistung unter wechselnden Betriebsbedingungen gewährleistet.

Das zu behandelnde Wasser wurde dem Ablaufbecken des Aktivkohlefilters entnommen, anschließend durch die UV-Desinfektionsanlage geführt und im Regelbetrieb dem Ablauf der Kläranlage zugeführt. Alternativ bestand die Möglichkeit, den Ablauf der UV-Anlage mittels eines 3/2-Wegeventils umzuschalten und das aufbereitete Wasser einer externen Nutzung zuzuführen. Für diesen Zweck war eine Druckerhöhungsanlage installiert, mit der der Anlagenablauf auf einen Betriebsdruck von etwa 6 bar (relativ) angehoben werden konnte. Dadurch wurde sowohl die Befüllung von Tankwagen als auch die Einspeisung in eine Druckleitung ermöglicht.

Im zweiten Quartal 2025 wurde ergänzend eine kleinere UV-Desinfektionsanlage des Typs Spektron 2e installiert (Abbildung 5). Diese ist mit einer separaten Zulaufpumpe sowie einer eigenständigen Schlauchführung ausgestattet und dient der Durchführung zusätzlicher Versuche im niedrigen UV-Dosisbereich. Untersuchungen in diesem Dosisbereich konnten mit der bestehenden UV-Anlage LBX90 nicht realisiert werden. Ursache hierfür waren insbesondere die im Versuchsbetrieb vorliegenden hohen UV-Transmissionen von über 75 % sowie der maximale Durchfluss von 60 m³/h. Auch bei einer Dimmung der UV-Strahler auf den minimal zulässigen Leistungswert von 50 % konnten mit der LBX90 die angestrebten niedrigen applizierten UV-Dosen nicht erreicht werden. Die UV-Anlage Spektron 2e ist mit einem einzelnen UV-Strahler ausgestattet. Pumpenbedingt lag der maximale Durchfluss bei ca. 5 m³/h. Die Ein-

stellung der gewünschten applizierten UV-Dosis erfolgte manuell durch Variation des jeweiligen Durchflusses, wodurch eine gezielte Anpassung der applizierten UV-Dosis ermöglicht wurde.



Abbildung 5: UV-Desinfektionsanlage Spektron 2e.

Bei dem Vergleich der Ergebnisse mit beiden UV-Anlagen ist zu berücksichtigen, dass die angegebenen UV-Dosen auf eine unterschiedliche Art ermittelt wurden. Die UV-Dosen für den LBX90e werden als Reduktions-Äquivalenz-Dosis für die Reduktion von UV-resistenten MS2-Phagen (MS2RED-UV-Dosis) angegeben, welche im Rahmen der Validierung des UV-Reaktors experimentell für unterschiedliche Randbedingungen bestimmt wurde. Für den Spektron 2e wurde die UV-Dosis anhand des Durchflusses und der UV-Intensität an der Reaktorinnenwand ermittelt, welche beide kontinuierlich gemessen wurden. Mit einem Reaktorvolumen von 8 Liter ergab sich die PSS-UV-Dosis (Point Source Summation) gemäß:

$$UV_{Dosis} = \frac{UV_{Int} * V_{UV}}{Q_{UV}} * 3600$$

Mit:

$UV_{PSS-Dosis}$ = UV-Dosis [J/m^2], berechnet

UV_{Int} = UV-Intensität [W/m^2], Messwert

V_{UV} = UV-Reaktorvolumen [m^3], Modellspezifikation (0,008 m^3)

Q_{UV} = Durchfluss durch den UV-Reaktor [m^3/h], Messwert

Die PSS-Dosis kann im Vergleich zur MS2RED-Dosis wesentlich höher ausfallen und ist daher nicht direkt vergleichbar.

Messkonzept und Analytik

In der nachfolgenden Abbildung 6 sind die Messstellen für die manuellen Probenahmen sowie diverse Onlinemessungen in den beiden Phasen (Aufbaus des Modells der Wasserqualitätsprognose bzw. der Phase der Modellvalidierung, siehe Abschnitt 4.2.1) dargestellt.

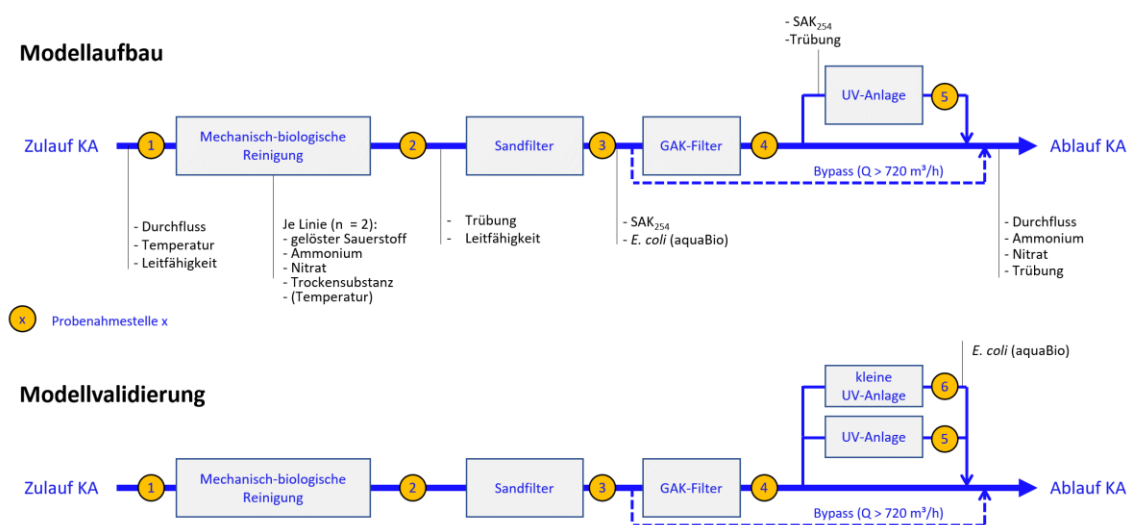


Abbildung 6: Übersicht der Messstellen für eine manuelle Probenahme und der Onlinemessungen während der Phase des Modellaufbaus (oben) sowie der Modellvalidierung (unten).

Onlinemessungen

Im Zulauf der Kläranlage werden Durchfluss, Wassertemperatur und die Leitfähigkeit erfasst. In der mechanisch-biologischen Reinigung werden in beiden Linien gelöster Sauerstoff, Ammonium, Nitrat, Trockensubstanz und ebenfalls die Temperatur gemessen. Im Ablauf der Nachklärung vor dem Zulauf des Sandfilters werden wieder Trübung und Leitfähigkeit gemessen. Der SAK₂₅₄ wird alternierend durch dasselbe Messgerät im Zu- und Ablauf des GAK-Filters gemessen. Im Ablauf der Kläranlage wird erneut der Durchfluss, der Ammoniumgehalt sowie die Nitratkonzentration und die Trübung erfasst.

Zur kontinuierlichen Erfassung relevanter Wasserqualitätsparameter wurden im Ablaufbauwerk des GAK-Filters eine Trübungsmesssonde des Typs WTW VisoTurb 700 IQ SW sowie eine digitale UV/VIS-Spektralsonde WTW CarboVis 700 IQ installiert. An der UV-Desinfektionsanlage ist zusätzlich ein UV-Intensitätssensor integriert, der die aktuell applizierte UV-Intensität erfasst. Auf Grundlage der gemessenen UV-Intensität sowie der jeweiligen Durchflussparameter wird die aktuell applizierte UV-Dosis (MS2RED) berechnet. Die von den Online-sensoren erfassten Messwerte sowie die relevanten Anlagen- und Betriebsparameter werden zentral auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) zusammengeführt und gespeichert. Diese SPS fungiert als zentrale Datensammelstelle innerhalb der Versuchsstruktur.

Als Schnittstelle zur Informationsplattform dienen die sogenannte „Sammel-SPS“ sowie die Masasana-API (siehe Abschnitt 4.3.1). Auf der Sammel-SPS werden die Daten der Online-Messtechnik, ausgewählte Online-Betriebsdaten der Kläranlage sowie Ergebnisse aus der Modellierung zusammengeführt und zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt. Die Schnittstellen der Datenübertragung sind schematisch in Abbildung 7 dargestellt. Die Sammel-SPS (PLC_1) ist mit einem lokalen PC sowie einem 5G-Router verbunden, wodurch ein Fernzugriff auf die Anlage und die Messdaten über eine LTE-Verbindung ermöglicht wird.

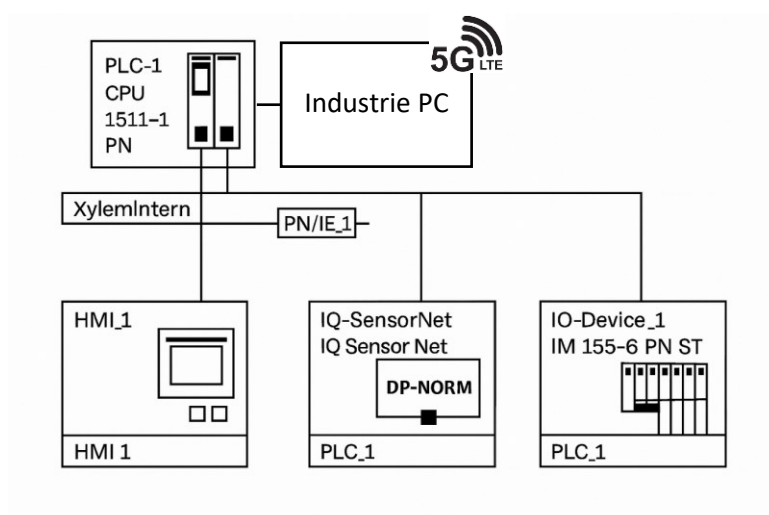


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Schnittstellen der Datenübertragung.

Schnellmessgerät für *Escherichia coli* (*E. coli*)

Um für den Überwachungsparameter *E. coli* auf einen ausreichend großen Trainingsdatensatz für das Modell zur Wasserqualitätsprognose zurückgreifen zu können, wurde ein *E. coli* Schnellmessgerät (aquaBio B503, adasa) eingesetzt, welches im Gebäude der Filtration untergebracht war (Abbildung 8). Dieses Messgerät ermöglicht die parallele Quantifizierung von *E. coli* und Gesamtcoliforme mit einer Detektionsgrenze von 1 MPN/100 ml. Die Messungen wurden zunächst im Ablauf des Sandfilters durchgeführt und im weiteren Versuchsverlauf auf den Ablauf der UV-Anlage Spektron 2e verlagert (siehe Abbildung 6).



Abbildung 8: Schnellmessgerät für *E. coli* im Keller des Filtrationsgebäudes. In der Flasche befindet sich das Nährmedium; in den Kanistern eine saure Desinfektionslösung.

Gemäß Handbuch arbeitet das Messgerät nach der Defined Substrate Technology (DST), einem kulturbasierten mikrobiologischen Nachweisverfahren, bei dem definierte Nähr- und Indikatortsubstrate eingesetzt werden. Zielorganismen wie beispielsweise *E. coli* werden durch ihr spezifisches Enzymspektrum identifiziert. Beim Wachstum setzen sie die enthaltenen Substrate um und erzeugen dabei messbare Farb- oder Fluoreszenzsignale. Der Nachweis von

Gesamtcoliformen erfolgt über die Aktivität des Enzyms β -Galactosidase, welche das Substrat o-Nitrophenyl- β -D-galactopyranosid (ONPG) umsetzt und eine Gelbfärbung erzeugt, die wiederum über die Absorption bei 405 nm gemessen wird. Durch *E. coli* wird neben β -Galactosidase auch das Enzym β -Glucuronidase synthetisiert, um 4-Methylumbelliferyl- β -D-glucuronid (MUG) zu metabolisieren, welches Fluoreszenzeigenschaften hat. Diese Fluoreszenz wird bei einer Anregungswellenlänge von 365 nm und einer Emissionswellenlänge von 450 nm erfasst. Die Konzentration der Zielorganismen ergibt sich dabei aus der Zeit seit Beginn der Inkubation und dem Erreichen eines Signalgrenzwerts (Absorption bzw. Fluoreszenz) und der spezifischen Wachstumsrate der Zielorganismen bei einer definierten Temperatur (hier 37 °C). Die Dauer einer Einzelmessung ist daher abhängig von den Ausgangskonzentration in der Wasserprobe: je geringer, umso länger dauert die Messung. Bei den erwarteten Konzentrationen im Ablauf des Sandfilters ($10^2 - 10^5$ MPN/100 ml), können etwa zwei bis drei Proben pro Tag analysiert werden. Nach jeder erfolgten Messung desinfiziert sich das Gesamtsystem automatisch mit einer Desinfektionslösung (basierend auf Schwefel- und Salzsäure, ~ pH 2), um Fehlmessungen durch Verkeimungen im System zu vermeiden. Ein Beispiel des Signalverlaufs einer Einzelmessung ist in der nachfolgenden Abbildung 9 dargestellt.

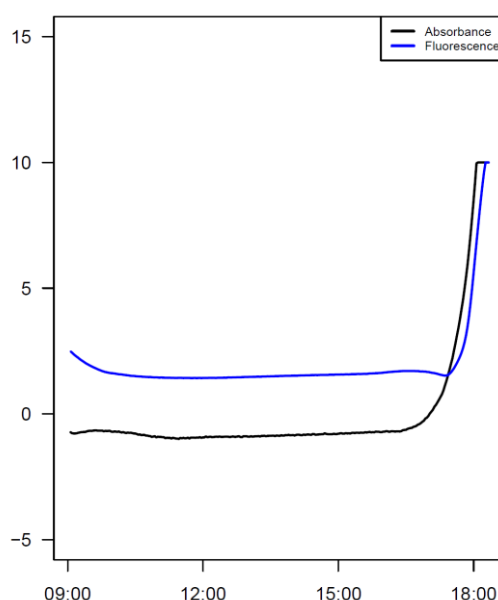


Abbildung 9: Beispiel einer Einzelmessung mit dem aquaBio, Signalausgabe als Spannungswert (V).

Der Einsatz des *E. coli*-Schnellmessgeräts aquaBio auf Kläranlagen mit üblichem Anlagenpersonal ist grundsätzlich möglich, setzt jedoch bestimmte organisatorische und personelle Voraussetzungen voraus. Zum einen müssen geeignete Laboreinrichtungen vorhanden sein, um das benötigte Nährmedium unter sterilen Bedingungen sowie die saure Desinfektionslösung herstellen zu können. Im Projekt wurde die Nährlösung (Colilert-18® von IDEXX) regelmäßig (ca. alle 3 Wochen) am KWB hergestellt (Autoklav vorhanden), verpackt und an die Kläranlage versandt, wo sie bis zum Einsatz kühl (8 – 10 °C) gelagert wurde. Zum anderen erfordert der Betrieb des Geräts Personal, das sorgfältig eingewiesen wurde und über ein grundlegendes Verständnis steriler Arbeitsweisen verfügt. Dies ist insbesondere für die regelmäßige Wartung des Systems sowie den Austausch der Nährlösung erforderlich, da in diesem Moment das sterile bzw. desinfizierte (Schlauch-)System geöffnet wird und Luftkeime eindringen können. Werden Störungen zu spät erkannt oder ist das Messgerät aus anderen Gründen im Stillstand, können Luftkeime in das System gelangen und dort aufwachsen, da die regelmäßige Desin-

fektion mit der sauren Desinfektionslösung fehlt. In diesem Fall sowie im Rahmen einer halbjährlichen Komplettwartung ist ein Austausch der Schläuche (inkl. Desinfektion mit Chlorlösung) notwendig. Werden diese Arbeiten gewissenhaft und hygienisch einwandfrei durchgeführt und ist zudem eine regelmäßige Kontrolle der Gerätefunktion (Aufwand ca. 2 – 3 Stunden pro Monat) gewährleistet, eignet sich das aquaBio-System für eine dauerhafte Messung von *E. coli* auf Kläranlagen. Die Materialkosten liegen bei etwa 10 € pro Messung. Darüber hinaus sollte sichergestellt werden, dass mehrere Mitarbeiter umfassend in die Bedienung und Wartung des Geräts eingewiesen sind. Dadurch kann die fachgerechte Betreuung auch bei Urlaub, Krankheit oder Personalwechsel jederzeit gewährleistet werden und das Risiko von Bedienfehlern oder Ausfallzeiten wird reduziert.

4.1.2 AP1.2: Anlagenbetrieb und Generierung Trainingsdatensatz

Mikrobiologisches Messprogramm

Das mikrobiologische Messprogramm für das Modelltraining und die Überprüfung der Reinigungsleistung unterteilte sich in das Monitoring des Kläranlagenprozesses, dem Monitoring der UV-Desinfektion und der Validierung der Verfahrenskette.

Die manuellen Probenahmen erfolgten als Stichproben an den jeweiligen Probenahmestellen. Die Proben wurden in isolierten Boxen gekühlt mittels Expresslieferung an die beiden akkreditierten Labore (Eurofins, IHPH Bonn) versendet. Der mikrobiologische Parameterumfang und die verwendeten Methoden sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Zu Beginn des Messprogramms wurde teilweise eine unzureichende Kühlung festgestellt, da die Stichproben vor dem Versand nicht hinreichend abgekühlt wurden. Nach einer entsprechenden Korrektur der Arbeitsprozesse konnte dies behoben werden.

Tabelle 4: Mikrobiologischer Parameterumfang der akkreditierten Labore. Zur Quantifizierung der ersten beiden Parameter wurde in Abhängigkeit der erwartbaren Konzentration an den jeweiligen Probenahmestellen (PNS) eine andere Methode verwendet.

Parameter	Labor	Verfahren bzw. Material
<i>Escherichia coli</i>	Eurofins	PNS 1 – 4: DIN EN ISO 9308-3: 1999-07 PNS 5: DIN EN ISO 9308-2 (K6-1): 2014-06
Intestinale Enterokokken	Eurofins	PNS 1 – 4: DIN EN ISO 7899-1: 1999-07 PNS 5: DIN EN ISO 7899-2 (K15): 2000-11
<i>Clostridium perfringens</i> Sporen	IHPH	Anlehnt an DIN EN ISO 14189:2016-11*
<i>Clostridium</i> spp. Sporen	IHPH	Anlehnt an DIN EN ISO 14189:2016-11*
Somatische Coliphagen	IHPH	ISO 10705-2:2002-01
F-spezifische Coliphagen	IHPH	ISO 10705-1:2002-01
Salmonellen spp.	IHPH	DIN EN ISO 19250:2013-06
Legionella spp.	IHPH	DIN EN ISO 11731:2019-03
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	IHPH	DIN EN ISO 16266:2008-05

* Die Methode wurde modifiziert, indem die saure Phosphatase durch die Zugabe eines *Clostridium perfringens* Selektiv-Supplements (Fa. Merck, Art.-Nr.: 1008880010) nachgewiesen wurde.

Monitoring des Kläranlagenprozesses

Die Konzentrationen der vier mikrobiologischen Indikatororganismen *E. coli*, intestinale Enterokokken, somatische Coliphagen sowie *Clostridium perfringens* Sporen sind für den Zeitraum Mai bis November 2024 nachfolgend dargestellt (Abbildung 10).

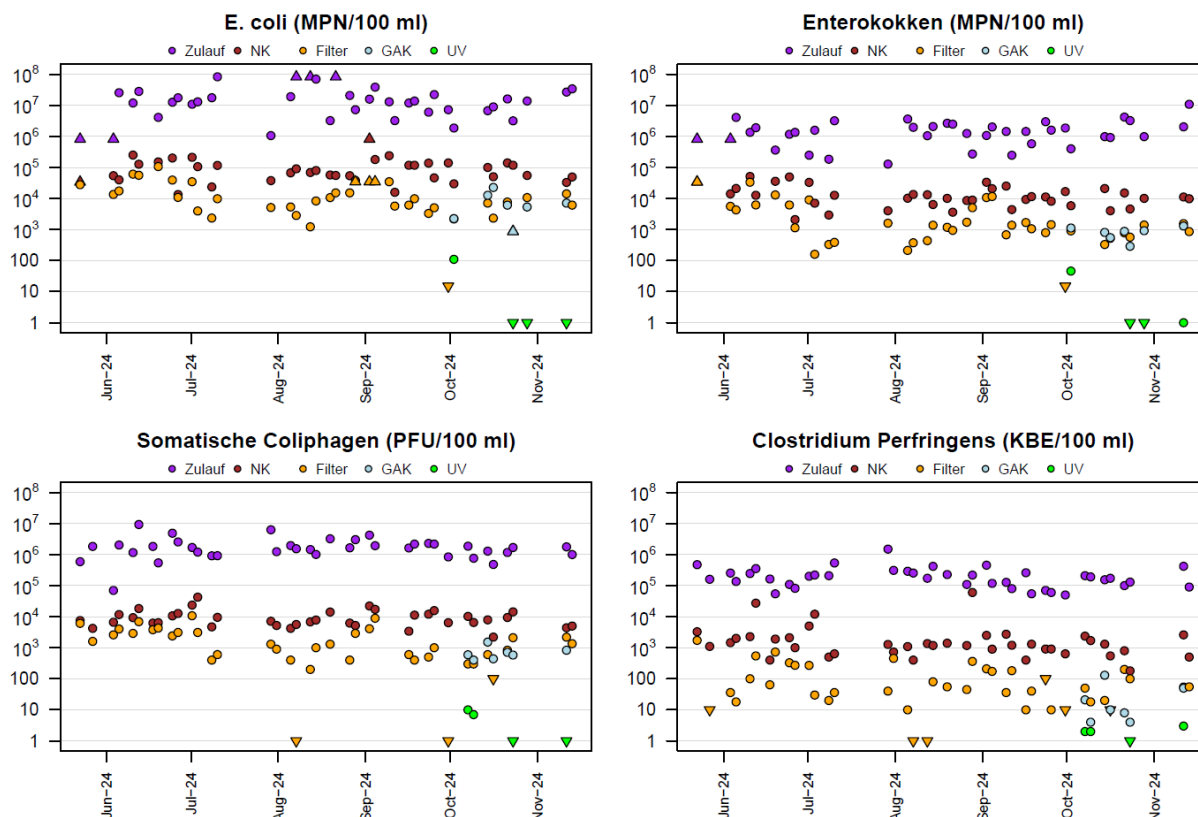


Abbildung 10: Konzentrationen der vier mikrobiologischen Indikatororganismen an den fünf Probenahmestellen vom Mai bis November 2024. Ein Dreieck markiert eine Über- bzw. Unterschreitung der Bestimmungsgrenze.

Für den Zulauf der Kläranlage ergibt sich dabei folgendes Bild: Die höchsten Konzentrationen finden sich für *E. coli* ($10^6 - 10^8$ MPN/100 ml), gefolgt von intestinalen Enterokokken und somatischen Coliphagen, die eine um etwa 1 $\log_{10}$ -Stufe niedrigere Konzentrationspanne als *E. coli* aufweisen ($10^5 - 10^7$ MPN bzw. PFU/100 ml). Die *Clostridium perfringens* Sporen lagen im Zulauf der Kläranlage vorrangig im Bereich von $10^5 - 10^6$ KBE/100 ml vor. Im mechanisch-biologischen Reinigungsprozess werden alle Indikatororganismen gleichermaßen verringert (ca. 2 $\log_{10}$ -Stufen) und ein vergleichsweise stabiles Konzentrationsniveau erreicht. Diese Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit denen aus dem Projekt FlexTreat [11]. Durch die Filtration im Sand-/Anthrazitfilter konnten die Konzentrationen weiter reduziert werden, jedoch nicht im selben Ausmaß wie in der vorherigen Behandlungsstufe. Der größte Reinigungseffekt wurde dabei für die *Clostridium perfringens* Sporen festgestellt. Die zusätzliche Filtration im GAK-Filter hatte hingegen kaum einen Effekt auf die Konzentration der Indikatororganismen, was sich jedoch durch den weitestgehenden Feststoffrückhalt im Sand-/Anthrazitfilter sowie die gröbere Körnung des Filtrationsmediums erklären lässt. Die vereinzelt Messungen im Ablauf der UV-Anlage in diesem Zeitraum zeigen eine deutliche Reduzierung der Indikatororganismen, wobei diese für die *Clostridium perfringens* Sporen aufgrund ihrer Resistenz gegenüber UV-Strahlen erwartungsgemäß geringer ausfällt.

Monitoring der UV-Desinfektion

Im Zeitraum vom November 2024 bis Juli 2025 lag der Fokus des Monitoringprogramms auf der Evaluation der Leistungsfähigkeit der UV-Desinfektion und der Erfassung von Referenzwerten für das Wasserqualitätsprognosemodell, weswegen nur Proben vom Zu- und Ablauf der UV-Desinfektion untersucht wurden. Um im Trainingsdatensatz eine möglichst große Dynamik der *E. coli*-Konzentration im Ablauf der UV-Anlage nachweisen zu können, wurde die UV-Anlage mit dem höchsten Durchfluss (ca. 60 m³/h) und gleichzeitig mit der niedrigsten Strahlerleistung (50 %) betrieben. Trotz der konstanten Betriebseinstellung variierte die erzielte UV-Dosis (MS2RED) aufgrund der dynamischen UV-Transmission im Zulauf der UV-Anlage (70 – 83 %) zwischen 270 und 440 J/m² (Mittelwert: ca. 360 J/m²). Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt, dass die Konzentrationen von *E. coli*, Enterokokken und somatischen Coliphagen im Ablauf der UV-Anlage durchgehend unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen. Die Konzentrationen der *Clostridium perfringens* Sporen befanden sich überwiegend im niedrigen einstelligen Bereich oder waren nicht nachweisbar. Diese Ergebnisse zeigen, dass mit der UV-Anlage eine hervorragende Ablaufqualität gewährleistet werden kann. Trotz der variierenden Konzentrationen im Ablauf des GAK-Filters wurden die Anforderungen an die Überwachungswerte der Wasserqualitätsstufe A im Ablauf der UV-Anlage jederzeit eingehalten. Das Ziel einer dynamischen *E. coli* Konzentration im Ablauf der UV-Anlage für das Modelltraining konnte aufgrund der guten Performance des Systems und der sehr guten Wasserqualität nicht erreicht werden, weswegen zusätzlich eine kleinere UV-Anlage (Spektron 2e) parallel betrieben wurde (siehe Abschnitt 4.1.1).

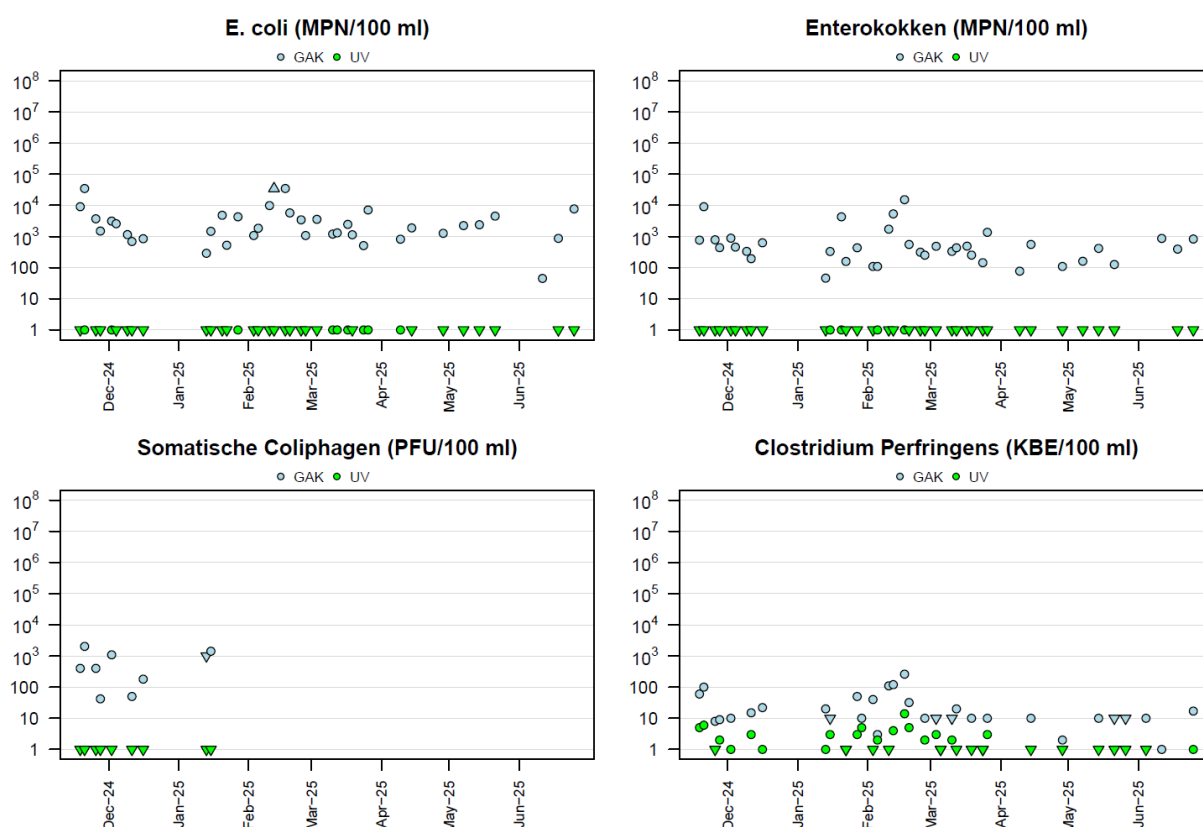


Abbildung 11: Konzentrationen der vier mikrobiologischen Indikatororganismen im Zu- und Ablauf der UV-Anlage im Zeitraum vom November 2024 bis Juli 2025.

In der nachfolgenden Abbildung 12 sind die Boxplots aller Messdaten im Zeitraum von Mai 2024 – Juli 2025 zusammengefasst. Hier wird besonders deutlich, dass jede Verfahrensstufe zu einer Konzentrationsverringerung beiträgt, wobei die größten Veränderungen durch die mechanisch-biologische Reinigung sowie durch die UV-Desinfektion erzielt werden.

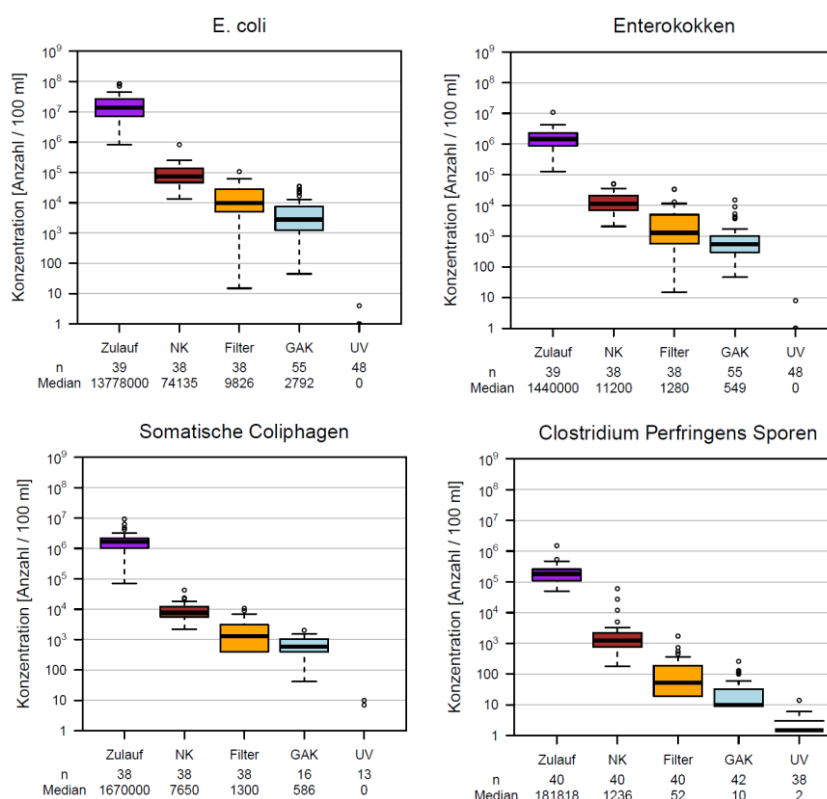


Abbildung 12: Boxplot mit allen Messdaten im Zeitraum vom Mai 2024 bis Juli 2025.

Im Nachgang eines Austauschs mit der unteren Wasserbehörde und dem zuständigen Gesundheitsamt wurden zusätzliche mikrobiologische Parameter untersucht. Ziel war es, Fragestellungen hinsichtlich möglicher Anforderungen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes bei einer späteren Nutzung des Wassers (z.B. Bewässerung, Einsatz als Betriebswasser) zu adressieren. Hierzu wurden im Zeitraum von November 2024 bis Januar 2025 zusätzliche Proben im Zu- und Ablauf der UV-Anlage entnommen und vom IHPH auf *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella* spp. und *Legionella* spp. untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt. Im Zulauf der UV-Anlage konnten *Pseudomonas aeruginosa* und *Legionella* spp. lediglich vereinzelt quantifiziert werden. *Salmonella* spp. wurden in keiner der untersuchten Proben nachgewiesen. Im Ablauf der UV-Anlage lagen sämtliche untersuchten Parameter unterhalb der Nachweisgrenze bzw. waren nicht nachweisbar. Die Analyse der einzelnen Proben (insbesondere im Zulauf der UV) war insgesamt herausfordernd, da die eingesetzten Messmethoden eigentlich für die Untersuchung von Trinkwasser genutzt werden. In der untersuchten Wassermatrix befinden sich hingegen noch hinreichend Mikroorganismen im Wasser, welche als Begleitflora die Quantifizierung der Ergebnisse erschwert. Die Ergebnisse zeigen, dass die UV-Anlage die vereinzelt vorkommenden hygienisch relevanten Mikroorganismen wirksam reduzieren kann.

Tabelle 5: Ergebnisse der Messungen bezüglich mikrobiologischer Parameter für Fragen zur Arbeitssicherheit. n.a. = nicht auswertbar, neg. = negatives Ergebnis (= nicht nachweisbar), graue Felder = Probe nicht angesetzt

#	Pseudomonas aeruginosa [KBE/100 ml]		Salmonella spp. [pos./neg. in 100 ml]		Legionella spp. [KBE/100 ml]	
	Zulauf UV	Ablauf UV	Zulauf UV	Ablauf UV	Zulauf UV	Ablauf UV
1	300	< 1	neg.	neg.	n.a.	< 2
2	> 10	< 1	neg.	neg.	n.a.	< 2
3	< 10	< 1	neg.	neg.	n.a.	< 2
4	20	< 1	neg.	neg.	25	< 5
5			neg.	neg.		
6		< 1				
7		< 1			15	< 5
8		< 1	neg.	neg.	30	< 5

Validierung der Verfahrenskette:

Zur Sicherstellung der Wasserqualität A ist neben der Einhaltung der Überwachungsparameter auch eine zusätzlich Prozessvalidierung erforderlich. Im Rahmen dieser Validierung muss nachgewiesen werden, dass die gesamte Aufbereitungskette die relevanten Indikatororganismen um eine definierte Größenordnung reduzieren kann (siehe Abschnitt 3). Als Indikatororganismen dienen *Escherichia coli* (*E. coli*), *Clostridium perfringens*-Sporen sowie Gesamt-Coliphagen, die sich aus der Summe der somatischen und F-spezifischen Coliphagen zusammensetzen. Die geforderten Reduktionsleistungen betragen 5 Logstufen für *E. coli*, 4 Logstufen für *Clostridium perfringens*-Sporen und 6 Logstufen für die (Gesamt-)Coliphagen. Die Prozessvalidierung wurde im Zeitraum von Juli bis Dezember 2025 durchgeführt. An jedem Probenahmetag wurden jeweils eine Stichprobe am Zulauf der Kläranlage sowie am Ablauf der UV-Anlage entnommen. Für die Versuchsreihen wurde die UV-Anlage auf Dosen von 500, 600 bzw. 780 J/m² (MS2RED) eingestellt. Da die Zulaufkonzentration der Coliphagen zu gering war, um eine Reduktion von 6 Logstufen direkt nachweisen zu können, wurde gemäß dem FlexTreat-Leitfaden zur Validierung [12] eine Aufkonzentrierung der Ablaufprobe durchgeführt. Hierzu wurden 15 Liter Ablaufwasser mithilfe einer Schlauchpumpe über eine Hohlfaser-Ultrafiltrationsmembrankartusche (REXEED-25A) filtriert. Die Membrankartuschen wurden anschließend gemeinsam mit den übrigen Wasserproben gekühlt per Expressversand an das IHPH versendet, wo sie eluiert und mikrobiologisch analysiert wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die geforderten Zielwerte für *E. coli* und *Clostridium perfringens*-Sporen bei allen untersuchten UV-Dosen erreicht werden. Für die Coliphagen ergibt sich hingegen ein differenzierteres Bild. Die somatischen Coliphagen waren im Eluat der aufkonzentrierten Proben in der Regel nicht mehr nachweisbar, während F-spezifische Coliphagen noch in niedrigen ein- bis zweistelligen Konzentrationen vorlagen. Für die somatischen Coliphagen ergibt sich somit eine Reduktionsleistung von etwa 7 bis 8 Logstufen, während für die F-spezifischen Coliphagen lediglich eine Reduktion von etwa 5 bis 6 Logstufen erreicht wurde. Für die Gesamt-Coliphagen, die sich aus der Summe beider Fraktionen ergeben, konnte eine Reduktionsleistung zwischen 6 und 7 Logstufen nachgewiesen werden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass mit der untersuchten Aufbereitungskette die Anforderungen an die Prozessvalidierung gemäß der EU VO 2020/741 prinzipiell erfüllt werden können. Die im DWA-M 1200 formulierten weitergehenden Anforderungen, wonach sowohl für die somatischen als auch für

die f-spezifischen Coliphagen eine Reduktion von 6 Logstufen nachgewiesen werden muss, können hingegen unter den untersuchten Randbedingungen nicht erreicht werden. Zur Erfüllung dieser zusätzlichen Anforderungen wäre eine höhere UV-Dosis erforderlich.

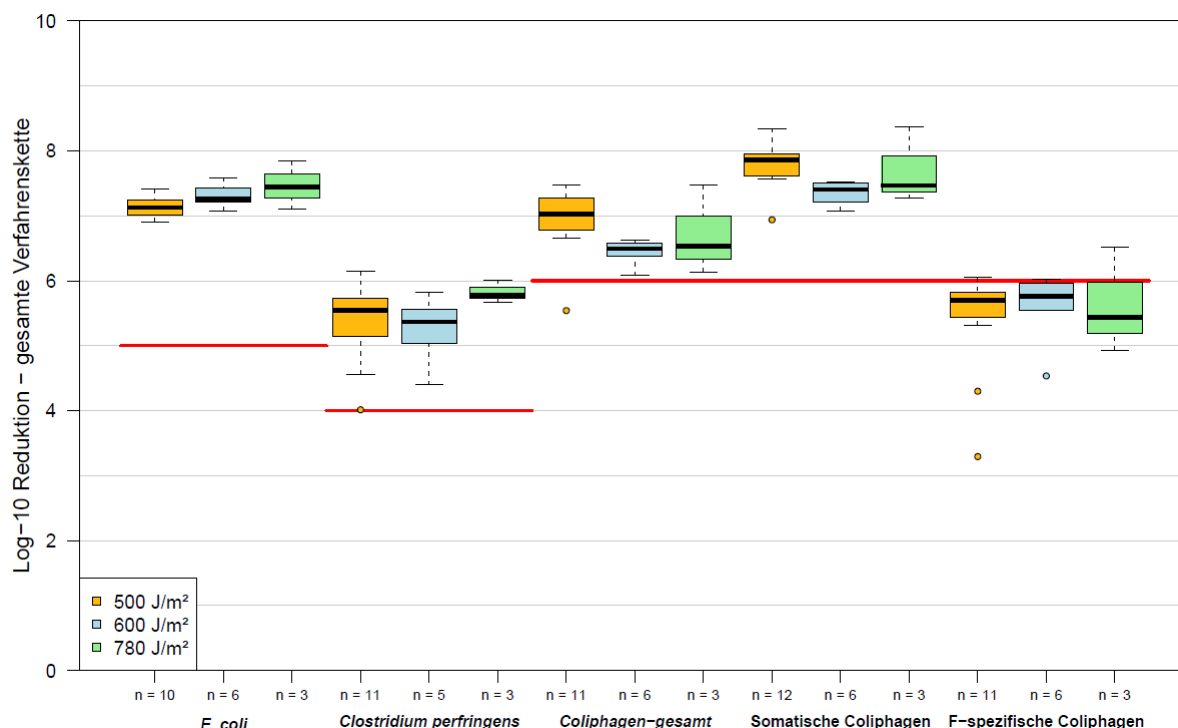


Abbildung 13: Ergebnisse der Beprobung zur Prozessvalidierung.

Stoffliches Messprogramm

Für eine erste stoffliche Bewertung des aufbereiteten Wassers, wurde punktuell die Leistungsfähigkeit der 4. Reinigungsstufe anhand der in der aktuellen Kommunalabwasserrichtlinie (KARL, EU 2024/3019) festgelegten 12 Indikatorsubstanzen überprüft sowie die PFAS-20 Konzentration bestimmt.

In Tabelle 6 sind die Spurenstoffeliminationen zwischen dem Zu- und Ablauf der Kläranlage bezüglich der Einzelsubstanzen sowie des Mittelwerts aller 12 Substanzen aufgeführt. Bei der Messung im Juni 2025 wurde die geringste Spurenstoffelimination (Mittelwert = 49 %) sowie eine Desorption von Einzelsubstanzen wie Candesartan und Sulfamethoxazol (nicht aufgeführt) festgestellt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass kurz nach der Probenahme im Juni die GAK in der ersten der drei Filterzellen ausgetauscht wurde. Mit der frischen GAK wurde daher im August eine deutlich bessere Spurenstoffelimination im Gesamtablauf erzielt (Mittelwert = 92 %), wohingegen die Elimination im September mit 68 % wieder etwas schlechter war.

Tabelle 6: Spurenstoffelimination zwischen dem Zu- und Ablauf der Kläranlage bezüglich der in der Kommunalabwassertrichtlinie (KARL) definierten 12 Indikatorsubstanzen. Grün hervorgehobene Felder markieren eine Überschreitung der in KARL geforderten 80-prozentigen Entfernung.

Substanz	Kategorie	06/2025	08/2025	09/2025
Amisulprid	Gruppe I	84%	98%	89%
Carbamazepin		36%	98%	76%
Citalopram		79%	88%	91%
Clarithromycin		27%	66%	65%
Diclofenac		58%	84%	62%
Hydrochlorothiazid		60%	99%	78%
Metoprolol		76%	93%	99%
Venlafaxin		38%	98%	32%
Benzotriazol	Gruppe II	53%	99%	79%
Candesartan		-8%	99%	40%
Irbesartan		25%	92%	57%
4-/5-Methyl-Benzotriazol		56%	97%	54%
	Mittelwert	49%	92%	68%

Die Ergebnisse der drei PFAS-Analysen sind in der nachfolgenden Tabelle 7 zusammengefasst. Bei der Analyse der Einzelsubstanzen zeigt sich, dass die kurzkettigen PFAS, d.h. PFAS mit einer Kohlenstoffkettenlänge zwischen 4 und 7 (C4 – C7), den größten Anteil an der PFAS-Gesamtkonzentration ausmachen, was im Einklang mit Erfahrungen aus der Literatur ist [11, 13]. Bei allen Probenahmen lag die Summenkonzentrationen für PFAS-20 (Σ PFAS-20) deutlich unterhalb des im DWA-M 1200-1 geforderten Grenzwerts von 100 ng/l, welche sich an den Trinkwassergrenzwerten (Σ PFAS-4 = 20 ng/l und Σ PFAS-20 = 100 ng/l) orientieren.

Tabelle 7: Gemessene PFAS-Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage (24-h Mischproben).

	10/2024	08/2025	09/2025
Kurzkettig (C4 – C7)	37,1 ng/l	22,5 ng/l	12,8 ng/l
Langkettig (C8 – C13)	8,3 ng/l	3,4 ng/l	4,0 ng/l
ΣPFAS-4	8,3 ng/l	3,4 ng/l	4,0 ng/l
ΣPFAS-20	45,4 ng/l	25,9 ng/l	16,8 ng/l

Zusammenfassung

Die UV-Anlage mit einer Behandlungskapazität von 60 m³/h wurde mit einer UV-Dosis (MS2RED) zwischen 270 – 420 J/m² (im Mittel 360 J/m²) betrieben. Mit der Aufbereitungskette, bestehend aus einer mechanisch-biologischen Behandlung, Sandfilter, GAK-Filter und UV-Anlage, konnten die im DWA-M 1200 (Gelddruck) festgelegten Überwachungswerte für die Wassergüteklasse A für die Trübung sowie *E. coli* und Enterokokken sicher eingehalten werden. Hygienisch relevante Mikroorganismen wie *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella* spp. und *Legionella* spp. konnten ebenfalls reduziert werden und waren im Ablauf der UV-Anlage nicht mehr nachweisbar.

Das Ergebnis der durchgeführten Prozessvalidierung bei UV-Dosen zwischen 500 – 720 J/m² (MS2RED) zeigte, dass die Anforderungen an *E. coli* und *Clostridium perfringens* Sporen erreicht werden können. Bezüglich der Virenindikatoren ergab sich hingegen ein differenzierte-

res Bild: So wurde für die somatischen Coliphagen eine Gesamtreduktion von 7 bis 8 Logstufen erzielt, während für die f-spezifischen Coliphagen lediglich eine Reduktion von 5 bis 6 Logstufen erreicht wurde. Für die Gesamt-Coliphagen lag die Gesamtreduktionsleistung zwischen 6 und 7 Logstufen. Basierend auf den Ergebnissen könnten zwar die Anforderungen der EU VO 2020/741 bei den untersuchten Randbedingungen erreichbar sein; für die im DWA-M 1200 (Gelbdruck) formulierten weitergehenden Anforderungen wären hingegen höhere UV-Dosen erforderlich.

Die Ergebnisse der stofflichen Beprobung zeigen, dass die PFAS-Konzentrationen unterhalb der Trinkwassergrenzwerte liegen und somit kein Hindernis für die Wasserwiederverwendung darstellen. Der GAK-Filter ist in der Lage ist, eine breite Auswahl an Spurenstoffen zu entfernen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Leistungsfähigkeit der GAK mit zunehmender Betriebszeit abnimmt und in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden muss, um eine hinreichend hohe Spurenstoffelimination zu gewährleisten.

4.2 AP2: Wasserqualitätsprognose, Risikomanagement und digitale Unterstützung

Im Arbeitspaket 2 wurde das datengetriebene Wasserqualitätsprognosemodell zur Unterstützung des Risikomanagements sowie der Optimierung des Energieeinsatzes bei der UV-Desinfektion entwickelt und das cloud-basierte Informationssystem aufgebaut.

4.2.1 AP2.1: Prognosemodell für Wasserqualität

Die wesentliche Fragestellung des Arbeitspakets 2.1 war es zu erforschen, inwieweit sich Modelle aus dem Bereich des maschinellen Lernens dazu eignen, die Regelung von UV-Desinfektionsanlagen zu unterstützen und diese so energetisch zu optimieren. Die Ausgangsthese dieser Arbeit war es, dass wenn es gelingt die Zulaufkonzentration an mikrobiologischen Indikatororganismen zuverlässig vorherzusagen, diese Information genutzt werden kann, die applizierte UV-Dosis an ebendiese Zulaufkonzentration dynamisch anzupassen. Für die Zeiträume in denen die Zulaufkonzentration vergleichsweise niedrig ist, kann dieser These folgend, die eingetragene UV-Dosis entsprechend reduziert werden. Dies erfolgt über eine Reduzierung der Lampenleistung und somit zu einer Reduktion des benötigten Energiebedarfs. Als zusätzlich Fragestellung sollten verschiedene algorithmische Ansätze getestet werden und dabei neben der Vorhersagegenauigkeit auch weitere Aspekte, insbesondere die Erklärbarkeit des verwendeten Algorithmus berücksichtigt werden.

Methodischer Ansatz

Für den Aufbau datengetriebener Modelle ist zunächst das Vorhandensein eines informativen Datensatzes eine notwendige Bedingung. Das zählt sowohl für die vorherzusagende Variable als auch für die Qualität der Eingangsdaten. Im Folgenden werden die Datenerhebung sowie die getesteten Modellierungsansätze näher beschrieben.

Erhebung von *E. coli* Daten als Zielvariable: Zielvariable für die Konzentration an mikrobiologischen Indikatororganismen war die Konzentration von *E. coli*. Da mikrobiologische Parameter in der Regel nicht oder wenn dann nur sporadisch im Ablauf von Kläranlagen überwacht werden, wurde zur Generierung eines ausreichend großen Trainings- und Testdatensatzes auf ein Schnellmessverfahren (aquaBio, adasa) zurückgegriffen (siehe Abschnitt 4.1.1). Das Messgerät ist in der Lage in Abhängigkeit der *E. coli* Konzentration 2 bis 3 Messungen pro Tag selbstständig durchzuführen. Da für die Einhaltung gesetzlicher Anforderungen standardisierte Messverfahren eingesetzt werden, müssen die Daten des Schnellmessgeräts gegen genormte Verfahren validiert und gegebenenfalls korrigiert werden. Zur Validierung der Daten, wurden deswegen regelmäßige manuelle Probennahmen durchgeführt und in einem akkreditierten Auftragslabor mittels genormter Methoden (DIN ISO 9308-3) analysiert.

Abbildung 14 zeigt den Vergleich zwischen den *E. coli* Konzentrationen die mit Hilfe des Schnellmessgeräts ermittelt wurden und den Ergebnissen der standardisierten Labormessungen. Der Vergleich zeigt, dass die Daten des Schnellmessgeräts sehr gut mit den Labormessungen übereinstimmen. Demzufolge kann auf eine weitere Korrektur der Daten des Schnellmessgeräts verzichtet und die Daten direkt für den Modellaufbau genutzt werden.

Da zwischen der Messstelle nach der Filtration und der UV-Anlage noch ein GAK-Filter zwischengeschaltet ist, wurden Vergleichsproben nach dem GAK-Filter genommen und im Labor analysiert. Die Daten (nicht dargestellt) zeigen keine weitere relevante Reduktion der *E. coli* Konzentration durch den GAK-Filter. Daher können die Modellprognosen im Ablauf des Sandfilters als gute Schätzung für die Zulaufkonzentration der beiden UV-Anlagen angesehen werden. Die Schwankungsbreite der *E. coli* Konzentration beträgt dort etwa 3 Größenordnungen

(10^2 - $10^{5,5}$ MPN/100 ml). Durch die höhere zeitliche Auflösung des Schnellmessung lassen sich dynamische Effekte erfassen, welche durch das Modell vorhergesagt werden können. Die Daten des Schnellmessgeräts wurden regelmäßig ausgelesen und standen in einem standardisierten csv-Format zu Verfügung.

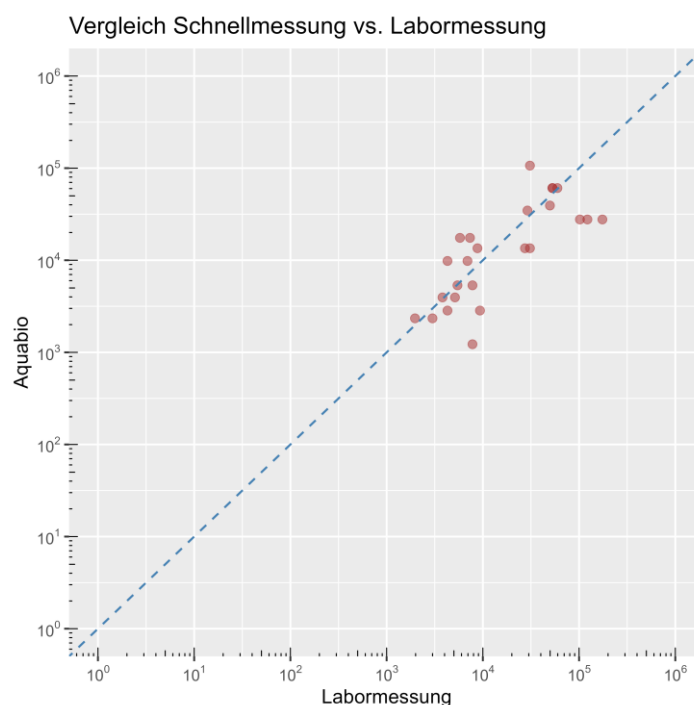


Abbildung 14: Vergleich der Messwerte des aquaBio Schnellmessgeräts mit der Labormessung (DIN ISO 9308-3).

Auswertung der Kläranlagen-Prozessdaten als Vorhersagevariablen

Datenquelle und zeitliche Auflösung: Die Prozessdaten der KA Bad Oeynhausen standen als Zeitreihen-Messdatei im CSV-Format zur Verfügung. Diese enthielt die kontinuierlich erhobene Prozess- und Onlinemessdaten der Kläranlage Bad Oeynhausen sowie der zugehörigen Verfahrensstufen (u. a. Zulauf/Ablauf der Kläranlage, biologische Stufe, Sandfiltration, GAK-Filtration, UV-Stufe). Die Messwerte lagen in einem 15-Minuten-Raster vor, was 96 Messpunkten pro Tag entspricht. Zur Reduktion kurzfristiger Schwankungen und zur Abbildung prozessrelevanter Trägheiten wurden aus den vorhandenen Zeitreihendaten gleitende 3-Stunden-Mittelwerte gebildet.

Datenimport und Datenaufbereitung: Die Rohdaten wurden zunächst in eine einheitliche und für die weitere Auswertung geeignete Struktur überführt. Dabei mussten mehrere für betriebliche Messdaten typische Besonderheiten berücksichtigt werden, darunter unterschiedliche Dezimal- und Feldtrennzeichen, uneinheitlich formatierte numerische Einträge, Leerfelder sowie vereinzelt auftretende Sonderzeichen.

Um fehlerhafte oder unvollständige Typkonvertierungen zu vermeiden, wurden die Variablen beim Import zunächst als Text eingelesen. Dies war insbesondere deshalb erforderlich, weil numerische Messwerte teilweise als Dezimalkommazahlen, Leerstrings oder gemischt formatierte Einträge vorlagen. Die Quelldatei wurde entsprechend ihrem Aufbau als semikolongetrennte Datei mit Dezimalkomma verarbeitet. Anschließend wurden die numerischen Variablen vereinheitlicht und in ein numerisches Format überführt. Leere oder nicht interpretierbare Einträge wurden dabei als fehlende Werte gekennzeichnet.

Nach dem Import erfolgten eine systematische Bereinigung und Harmonisierung des Datensatzes. Die getrennt vorliegenden Angaben zu Datum und Uhrzeit wurden zu einem gemeinsamen Zeitstempel zusammengeführt. Als Zeitzone wurde „Europe/Berlin“ festgelegt, um saisonale Zeitumstellungen und damit verbundene zeitliche Verschiebungen korrekt zu berücksichtigen. Danach wurde der Datensatz chronologisch sortiert, da sowohl die Berechnung gleitender Mittelwerte als auch zeitabhängige Interpolationsverfahren eine eindeutig geordnete Zeitachse voraussetzen.

Datensätze mit nicht interpretierbaren oder unvollständigen Zeitangaben wurden identifiziert und ausgeschlossen, da für diese Beobachtungen keine zuverlässige zeitliche Zuordnung möglich war. Mehrfach auftretende Zeitstempel wurden zusammengefasst. Für die numerischen Variablen wurde hierfür jeweils das arithmetische Mittel der zugehörigen Messwerte gebildet. Zur Kontrolle der zeitlichen Struktur wurden die Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Beobachtungen untersucht. Auf diese Weise wurde geprüft, ob das vorgesehene Messraster von 15 Minuten weitgehend eingehalten wurde und an welchen Stellen zeitliche Unterbrechungen oder unregelmäßige Abstände vorlagen.

Kurze Datenlücken in kontinuierlich erfassten numerischen Prozessvariablen wurden mittels zeitbezogener linearer Interpolation geschlossen. Die Interpolation wurde auf zeitlich begrenzte Ausfälle beschränkt, um keine längeren Messperioden künstlich zu rekonstruieren. Variablen mit einem sehr hohen Anteil fehlender Werte oder lediglich sporadisch vorliegenden Beobachtungen wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da für diese keine belastbare zeitliche Auswertung möglich war.

Aufbau der Modellkette

Für die modellgestützte Regelung der UV-Anlage wurde eine zweistufige Modellkette aufgebaut. Modellbaustein 1 sagt dabei die Zulaufkonzentration der *E. coli* Belastung vorher, während Modellbaustein 2 die benötigte UV-Dosis ableitet, die für die Einhaltung des Desinfektionsziels notwendig ist. Die beiden Modellbausteine werden im Folgenden separat beschrieben.

Modellbaustein 1 dient der Vorhersage der *E. coli* Konzentration im Zulauf der UV-Anlage. Für den Modellaufbau wurden hydraulische (Q_{ZulaufKA} , Q_{AblaufKA}), physikalisch-chemische Parameter (T , $\text{Trübung}_{\text{ZulaufFilter}}$, $\text{Trübung}_{\text{AblaufKA}}$, $\text{Ammonium}_{\text{AblaufKA}}$, $\text{Leitfähigkeit}_{\text{AblaufKA}}$) der Kläranlage in einer Auflösung von 15 Minuten gesammelt und zu gleitenden 3h-Mittelwerten aggregiert. Diese Größen dienten als Modelleingangsparameter (Prädiktoren bzw. Vorhersagevariablen).

Für den Modellaufbau wurden die Daten zunächst in Trainings- und Testdaten in einem Verhältnis von 80% zu 20% aufgeteilt. Für das Modelltraining wurde eine fünffache Kreuzvalidierung angewendet und anschließend gegen die 20% der unabhängigen Testdaten validiert. Als Performanceindikator diente der RMSE (*root mean squared error*) sowie die erklärbare Varianz R^2 . Da im Projekt untersucht werden sollte ob einfache, gut erklärbare Algorithmen eine vergleichbar gut Vorhersagegenauigkeit liefert wie komplexere, jedoch schlechter erklärbare Algorithmen, wurden verschiedenen Modellierungsansätze getestet und verglichen.

Vergleich und Auswahl verschiedener Modellierungsansätze

Ziel der Modellierung war eine robuste Vorhersage der Zielgröße ($\log_{10}$ -transformierte *E. coli*-Konzentration) auf Basis der Prozess- und Betriebsdaten der Kläranlage. Neben einer hohen Vorhersagegüte wurde eine fachlich nachvollziehbare Interpretation der Zusammenhänge als

Anforderung definiert, um die Ergebnisse für Betrieb, Monitoring und Prozesssteuerung nutzbar zu machen. Entsprechend wurden verschiedene Modellklassen mit unterschiedlicher Komplexität und Interpretierbarkeit systematisch getestet.

Getestete Modellklassen: Für den Modellvergleich wurden vier repräsentative Ansätze ausgewählt, die unterschiedliche Bias-Varianz-Eigenschaften und Grade an Erklärbarkeit abdecken:

1. **Lineare Modelle (LM) als Referenz/Baseline-Modell.** Lineare Regressionsmodelle sind durch die direkte Interpretierbarkeit der Regressionskoeffizienten hoch interpretierbar, setzen jedoch eine lineare Struktur und additive Effekte voraus und bilden Nichtlinearitäten bzw. Interaktionen nur eingeschränkt ab (z. B. über manuell definierte Transformationen/Interaktionsterme). Aufgrund der hohen Anzahl an möglichen Kombinationsmöglichkeiten von Vorhersagevariablen wurden zwei Algorithmen zur automatischen Variablenauswahl verwendet:
 - a. Stepwise Regression (schrittweise Variablenselektion), wählt Variablen auf Basis des Akaike-Informationskriteriums (AIC) aus. Dies kann zu kompakteren Modellen führen, ist jedoch methodisch anfällig und neigt zum Overfitting, also der Überanpassung des Modells an die zugrundeliegenden Trainingsdaten, bei gleichzeitig schlechter Vorhersageperformance.
 - b. Lasso-Regression (L1-Regularisierung), die lineare Modellierung mit Regularisierung kombiniert und durch Koeffizienten-„Shrinking“ zu sparsamen, gegenüber Stepwise-Verfahren typischerweise stabileren Lösungen führt. "Shrinking" bedeutet: Die Koeffizienten werden im Vergleich zur normalen Regression (ohne Regularisierung) kleiner gerechnet, weil die Regularisierungs-Funktion sie in Richtung Null zieht. Nimmt ein Koeffizient den Wert Null an fällt die Variable aus dem Modell heraus was zur Variablenselektion führt.
2. **Nicht-lineare Modelle:** Als Alternative zu linearen Regressionsmodellen wurden zwei Algorithmen getestet die nicht-lineare Effekte und Interaktionen ohne manuelle Transformationen abbilden können:
 - a. Neuronales Netz (R-Paket *nnet*): kann Nichtlinearitäten und komplexe Interaktionen datengetrieben erfassen und erreicht häufig eine hohe Vorhersageleistung, ist jedoch hinsichtlich der Erklärbarkeit einzelner Effekte eingeschränkt („Black Box“).
 - b. Quantile Random Forest (QRF): erweitert klassische Random Forests um die Schätzung bedingter Quantile und liefert damit neben Punktschätzern (Median) auch Unsicherheitsintervalle (z. B. 10.–90. Perzentil). QRF bildet Nichtlinearitäten und Interaktionen flexibel ab und ermöglicht zugleich interpretative Auswertungen über Variable Importance und nachvollziehbare Strukturannahmen (Baumensemble).

Untersuchung von Vereinfachungsansätzen

Für den Vergleich verschiedener Modellierungsansätze wurden zunächst alle verfügbaren Vorhersagevariablen genutzt. Wie in Abbildung 18 dargestellt, wurde der QRF als der geeignetste Vorhersagealgorithmus ausgewählt. Um die Modellauswahl weiter zu verfeinern und potenziell zu vereinfachen, wurde untersucht ob sich die Anzahl der benötigten Vorhersagevariablen reduzieren lässt. Dies hat den Vorteil, dass je niedriger die Anzahl an eingehenden Variablen ist, die Robustheit des Modells zunimmt, da das Modell weniger fehleranfällig ist. Um die Auswahl der Variablen zu systematisieren wurden die Eingangsvariablen der Wichtigkeit sortiert und die Abhängigkeit der Vorhersagegenauigkeit vom Vorhandensein der jeweiligen Parameter dargestellt (Abbildung 15). Die Abbildung zeigt, dass die Vorhersagegenauigkeit sich anfangs stark verbessert, jedoch nach der achten Variable ein Plateau erreicht und sich nicht

wesentlich verbessert. Darüber hinaus zeigen die Güteindikatoren größere Qualitätssprünge nach bei den Variablen 1, 2, 3 und 7 als bei 4, 5 und 6. Die Variablennamen hinter den Variablennummern sind in Abbildung 16 dargestellt. Auf dieser Basis wurden zwei Alternativmodelle (Model 2, Model 3) auf ihre Vorhersagegenauigkeit getestet und bewertet. Die zugrundeliegenden Eingangsgrößen sind in Abbildung 16 dargestellt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Auswahl der Prozessgrößen rein korrelationsbasiert stattfindet. Direkte Kausalketten zwischen der *E. coli* – Ablaufkonzentration und den einzelnen Eingangsparametern sollten demzufolge nicht abgeleitet werden.

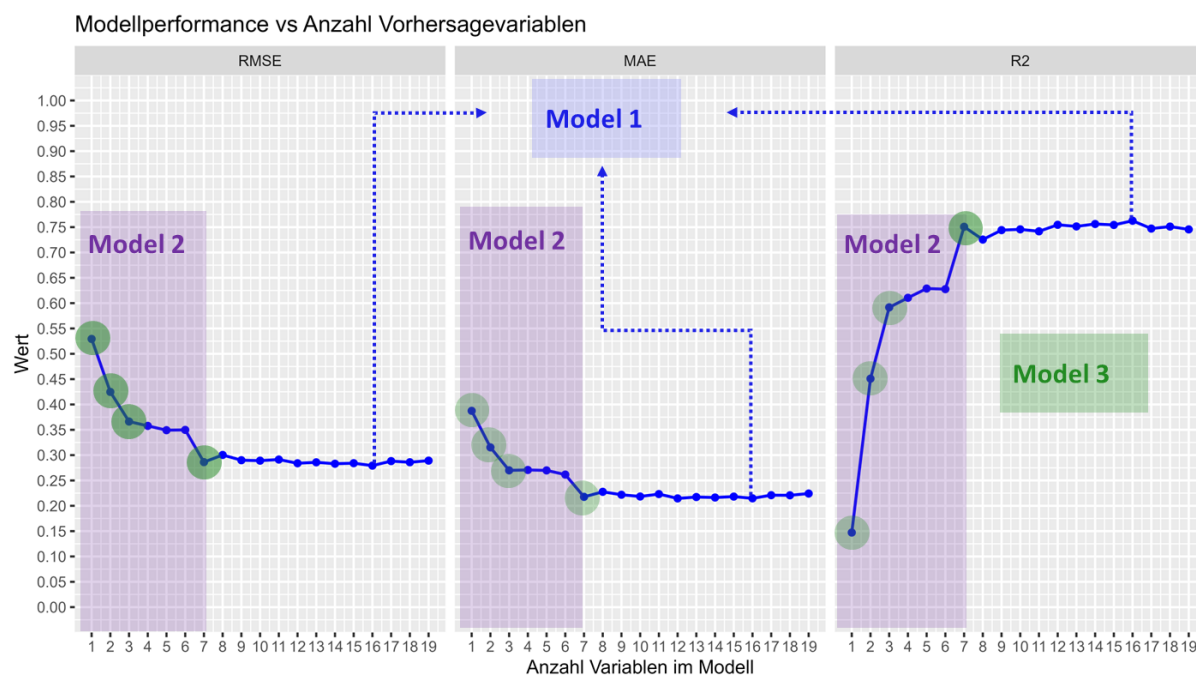


Abbildung 15: Abhängigkeit der Modellgüteparameter von der Anzahl der genutzten Vorhersagevariablen.

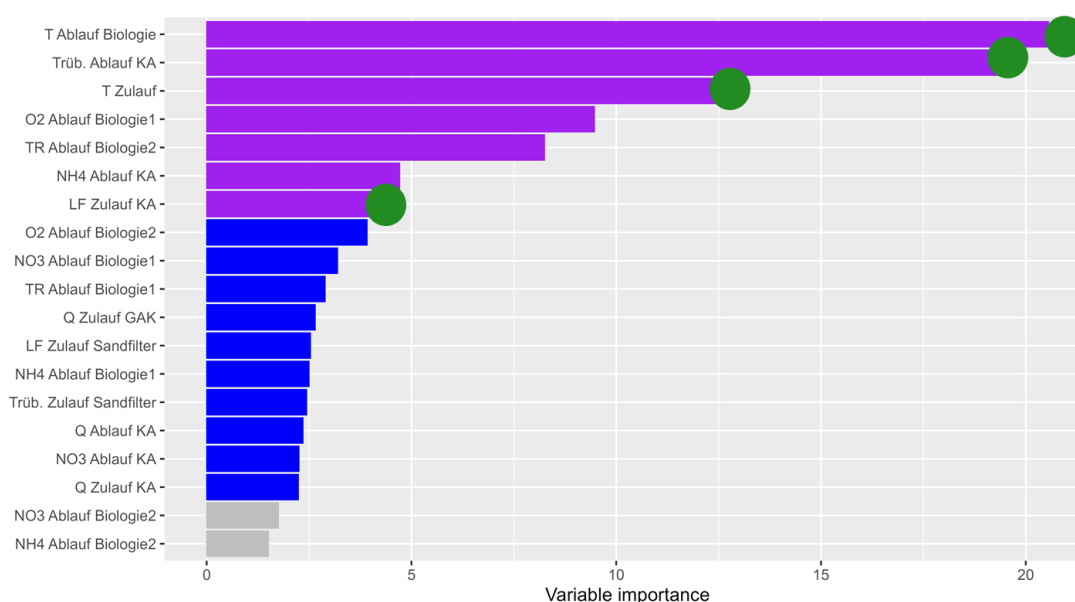


Abbildung 16: Prozessparameter, geordnet nach der Wichtigkeit der Variablen für das QRF-Modell.

Modellbaustein 2 dient der Vorhersage/Empfehlung der benötigten UV-Dosis zur Einhaltung der geforderten Vorgaben im Ablauf der UV-Anlage. Auf diese Weise soll die benötigte Energieeintrag optimiert werden.

Für den Modellaufbau war geplant am Standort Bad Oeynhausen separate Dosis-Wirkungstest durchzuführen. Da jedoch die untere Regelungsgrenze des LBX90e bei 50 % Lampenleistung und maximalen Durchfluss bei ca. 800 J/m² (PSS-Dosis) liegt und selbst bei der niedrigsten möglichen UV-Dosis die Nachweisgrenze für *E. coli* stets unterschritten wurde, konnte keine UV-Dosis-Wirkungsbeziehung für die verwendete UV-Anlage im Feld ermittelt werden, die für den geplanten Versuch geeignet wäre.

Aus diesem Grund wurde zum Aufbau des Modells auf Daten von Dosis-Wirkungsversuchen zurückgegriffen, die im Projekt FlexTreat [11] am Standort Braunschweig durchgeführt wurden, da dort derselbe UV-Reaktor (Spektron 2e) genutzt wurde, welcher später parallel zum LBX90e betrieben wurde (siehe Abschnitt 4.1.1). Die Daten wurden am Standort Bad Oeynhausen nochmals geprüft und bestätigt. Der funktionale Zusammenhang wurde mit Hilfe einer Regression zwischen der Log₁₀-Reduktion für *E. coli* und den log-transformierten UV-Dosiswerten ermittelt (Abbildung 17).

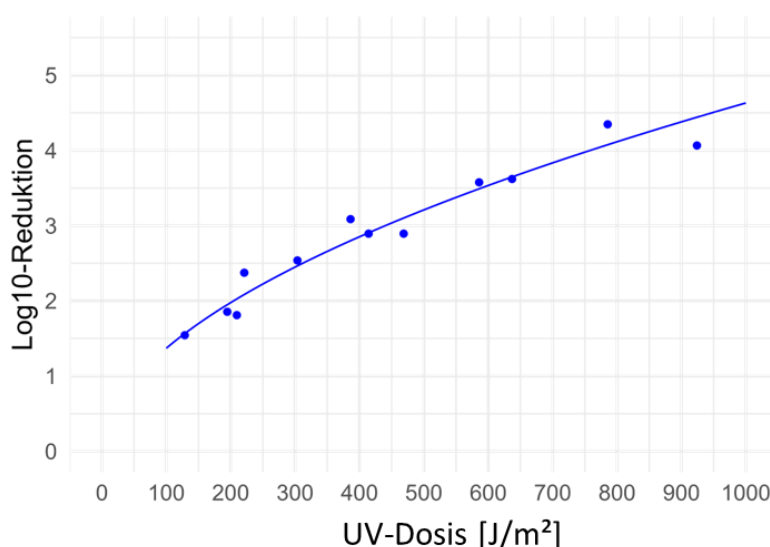


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen applizierter UV-Dosis (PSS) und erreichter Log₁₀-Reduktion von *E. Coli*.

Betrieb und Validierung der Modellkette

Die aufgebaute Modellkette wurde mit Hilfe der kleineren UV-Anlage (Spektron 2e, Xylem) in Echtzeitdemonstrationsbetrieb validiert. Mit Hilfe der aufgebauten Modellkette wurden hierfür alle 30 Minuten Empfehlungen zur minimal benötigten UV-Dosis abgeleitet. Hierfür wurden die benötigte Prozessdaten der Kläranlage über eine Sammel-SPS bereitgestellt und über eine OPC-UA Schnittstelle abgerufen.

Die Datenaufbereitung erfolgte analog zur Datenvorbereitung im Modellaufbau. Darüber hinaus wurde geprüft ob sich neue, auflaufenden Daten noch innerhalb des Kalibrierungsbereichs des Modells bewegten oder ob es sich aus Sicht des Modells um eine Anomalie handelt. Im letzteren Fall wurde auf eine Vorhersage verzichtet und im Sinne eines vorsorglichen Risikomanagements „empfohlen“ auf eine klassische, fluenzbasierte Anlagensteuerung umzuschalten.

Um die Modellvorhersagen gegen reale Messwerte zu validieren, wurde die Ablaufkonzentration von *E. coli* mit Hilfe des aquaBio-Schnellmessgeräts überwacht. Hierbei ist es wichtig zu

betonen, dass sich die UV-Dosis des Spektron 2e im Gegensatz zur großen LBX90e Anlage nicht über eine Anpassung der Lampenleitung in Echtzeit regeln lässt, sondern ausschließlich über eine manuelle Anpassung des Durchflusses. Daher wurde der Durchfluss periodisch verändert, sodass ein breites Spektrum an UV-Dosen erfasst werden konnte. Für diesen Validierungsansatz wurden bewusst auch sehr niedrige UV-Dosen angesetzt (200 – 600 J/m², PSS), die erhöhte, messtechnisch nachweisbare *E. coli* Konzentrationen im Ablauf der UV-Anlage erwarten lassen. Um Modellvorhersagen zu prüfen wurde getestet, ob sich die gemessenen Werte innerhalb des vorhergesagten Unsicherheitsbereichs bewegten. Bei dieser probabilistischen Validierung wurde geprüft ob sich 95 % der gemessenen Validierungsdaten unterhalb des vorhergesagten 95. Perzentils bewegten. Derselbe Ansatz wurde anschließend für das 90. und 80. Perzentil wiederholt. Gesetzlich ist vorgeschrieben, dass 90 % der Überwachungsdaten des Routinemonitorings die vorgegebenen Anforderungen einhalten. Die Validierungsmethodik entspricht dem Folgend den für die Praxis relevanten Vorgaben.

Ermittlung des Energieeinsparpotentials

Um das Energieeinsparpotenzial eines modellgestützten Anlagenbetriebs abzuschätzen wurde wie folgt vorgegangen:

1. Zunächst wurde das 95. Perzentil der im Zulauf gemessenen *E. coli*-Konzentration berechnet.
2. Auf Basis des berechneten 95. Perzentils wurde berechnet, welche UV-Dosis benötigt wird um diesen Wert unterhalb des Zielwertes zu senken.
3. Dieser UV-Dosis-Wert wurde als Referenz für einen regulären Anlagenbetrieb verwendet bei dem die Anlage auf einen konstanten hohen Zulaufwert ausgelegt wird, um auch Belastungsspitzen effektiv unter den Zielwert zu senken.
4. Für den modellgestützten Ansatz wurde die Zulaufkonzentration der UV-Anlage der Zeitraum zwischen Januar 2023 bis Juli 2025 mit dem validierten Vorhersagemodell modelliert. Dies führt zu einer nun dynamischen Prognose des 95. Perzentils, welches sich in Abhängigkeit der Eingangsparameter ändert.
5. Das berechnete dynamische 95. Perzentil wurde nun zur Abschätzung einer dynamischen UV-Dosis über 31 Monate herangezogen.
6. Die durchschnittliche dynamische UV-Dosis wurde nun in Verhältnis zur konstant hohen UV-Dosis gesetzt, die sich aus den Schritten 1-3 ergibt.
7. Für eine konservative Abschätzung des Energieeinsparpotenzials wurde ein linearer Zusammenhang zwischen Energiebedarf und UV-Dosis angenommen.

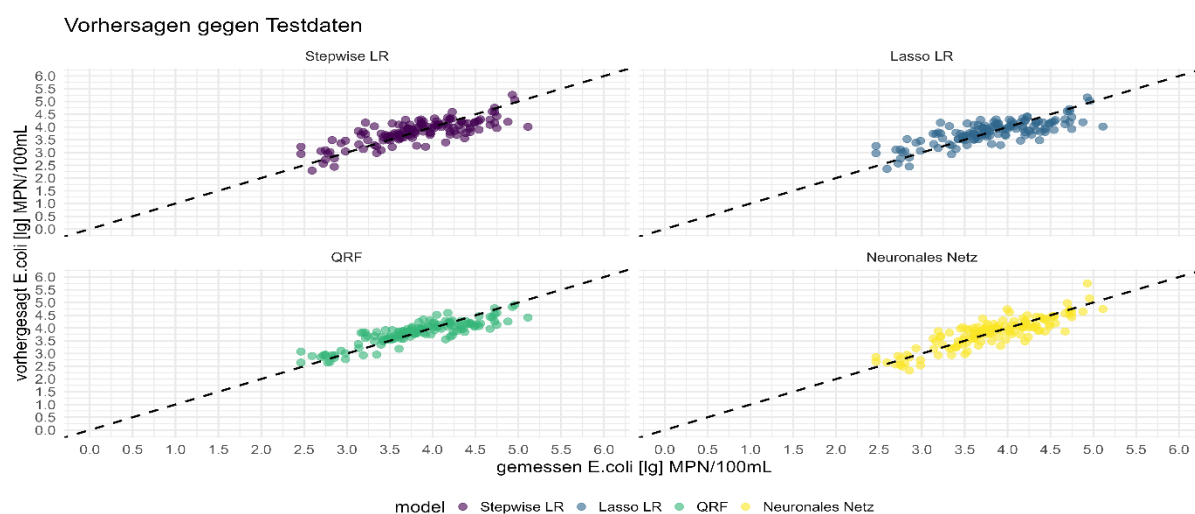
Als Zielwert diente ein *E. coli* Ablaufwert von 50 MPN/100 ml was der Hälfte des Grenzwerts von 100 MPN/100 ml für die Güteklasse B entspricht.

Ergebnisse

Modellbaustein 1: Zum Aufbau dieses Modellbausteins wurden zunächst die drei ausgewählten Vorhersagealgorithmen verglichen. Abbildung 18 zeigt den Vergleich der getesteten Modellklassen (LM, Stepwise-Regression, Lasso-Regression, nnet und QRF) anhand des RMSE und R². Die linearen Modelle (LM sowie deren Varianten mit Stepwise-Selektion bzw. Lasso-Regularisierung) zeigen eine geringere Vorhersagegüte als die nichtlinearen Ansätze, was auf nichtlineare Zusammenhänge und/oder relevante Interaktionen zwischen den Prozessparametern und der Zulaufkonzentration hindeutet. nnet und QRF erreichen die jeweils höchste Vorhersagegüte und sind in der Genauigkeit (RMSE, R²) vergleichbar. QRF wurde als finales

Modell ausgewählt, da es bei vergleichbarer Vorhersagegüte eine deutlich höhere Transparenz (Variable Importance, partielle Abhängigkeiten) sowie eine integrierte Quantifizierung der Vorhersageunsicherheit bietet. Die Coverage-Analyse der QRF-Quantile (vgl. Abschnitt „Modellvalidierung“) bestätigt zudem eine für die operative Nutzung ausreichende Kalibrierung der Unsicherheitsbänder.

Ergänzend zur reinen Vorhersagegüte liefert das QRF-Modell über die Variable-Importance-Analyse Hinweise darauf, welche der erfassten Prozessgrößen (hydraulische Parameter, Trübung, Ammonium, Leitfähigkeit) den größten Beitrag zur Vorhersage der *E. coli*-Zulaufkonzentration leisten. Partielle Abhängigkeitsdiagramme erlauben darüber hinaus eine Visualisierung der – teilweise nichtlinearen – Beziehung zwischen einzelnen Prädiktoren und der Zielgröße und unterstützen damit die fachliche Plausibilisierung der Modellergebnisse gegenüber dem Anlagenbetrieb.



Modell	RMSE	R ²
Stepwise Regression	0,36	0,60
Lasso Regression	0,36	0,60
Quantile Random Forest	0,28	0,75
Neuronales Netz	0,30	0,72

Abbildung 18: Vergleich verschiedener Modellierungsansätze.

Untersuchung weiterer Modellvereinfachungen

Der Vergleich der verschiedenen Modellgüteindikatoren ist in Tabelle 8 zusammengefasst und zeigt, dass die Vorhersagekraft negativ mit der Anzahl der Vorhersagevariablen korreliert. Das Modell mit nur vier Vorhersagevariablen (Modell 3) liefert keine belastbaren Vorhersagen (RMSE = 0,4; R² = -0,23) und sollte dem entsprechend nicht für den Praxisbetrieb genutzt werden. Modell 2 zeigt ein positives R² und einen deutlich niedrigeren Vorhersagefehler als Modell 3, fällt jedoch deutlich gegenüber der Vorhersagegüte von Modell 1 ab. Modell 1 ist demzufolge klar zu präferieren und wurde dementsprechend als Basis für die nachfolgenden Analysen herangezogen.

Tabelle 8: Vergleich der verschiedenen Modellgüteindikatoren berechnet aus Vorhersagen und unabhängigen

Model	N Variablen	RMSE	R ²
Model 1 (bestes R ²)	12	0,25	0,51
Model 2 (beste 7)	7	0,30	0,28
Model 3 (4/7)	4	0,40	-0,23

Die Tatsache, dass der Modellgüteparameter R² bei der Validierung gegenüber unabhängigen Laborprobennahmen (R² = 0,51) gegenüber dem Testdatensatz des Schnellmessgeräts (R² = 0,75) niedriger ausfällt, verdient einer gesonderten Betrachtung, da dies sonst potenziell zu einer Fehlinterpretation führen kann. Tabelle 9 fasst die wesentlichen Charakteristika der verschiedenen Validierungsdatensätze zusammen. Es zeigt sich, dass:

1. Die beobachtete Spanne und demzufolge die zu erklärende Variabilität innerhalb der Laboraten (SD = 0,32) ist deutlich niedriger als die der Daten des Schnellmessgeräts (SD = 0,58).
2. Der berechnete mittlere Vorhersagefehler für die Laboraten (RMSE = 0,25) ist etwas niedriger als der für die Testdaten des Schnellmessgeräts (RMSE = 0,29). Das Modell liefert folglich mindestens ebenso genaue Vorhersagen in Bezug auf die Laboraten wie in Bezug auf die Testdaten des Schnellmessgeräts.

Da die Berechnung des R² die beobachtete Variabilität mit einbezieht, bleibt festzustellen, dass ein niedrigerer R²-Wert alleine für eine Bewertung der Vorhersagegenauigkeit nicht ausreichend ist, sondern stets durch weitere Indikatoren wie dem RMSE ergänzt werden sollte. Dies wurde bereits in anderen wasserwirtschaftlichen Anwendungsbereichen wie der Bewertung der Vorhersagegüte von Modellen zur Vorhersage der Badegewässerqualität wissenschaftlich publiziert [14].

Tabelle 9: Charakteristika der verschiedenen Validierungsdatensätze.

Parameter	Testdaten (aquaBio)	Validierungsdaten Labor
N	135	13
Min-Max (log ₁₀)	2,46 - 5,11 (Differenz = 2,65)	3,45 - 4,54 (Differenz = 1,09)
SD (log ₁₀)	0,58	0,32
RMSE	0,288	0,250
R ²	0,75	0,51

Validierung der benötigten UV-Dosis durch Messungen im Ablauf der kleiner UV-Anlage

Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse der indirekten Validierung der vorhergesagten Ablaufkonzentration gegen gemessene Ablaufwerte (weiße Punkte) in Abhängigkeit der prognostizierten *E. coli*-Zulaufkonzentration und der eingetragenen UV-Dosis (graue Schattierung). Die Ergebnisse zeigen, dass sich 98 % der Validierungsmessungen unterhalb des vorhergesagte 95. Perzentils befinden und 96 % unterhalb des 90. Perzentils. Im Zeitraum Ende November 2025 mit vergleichbar hoher UV-Dosis lagen alle Werten unterhalb des Zielwerts von 5 *E. coli* MPN/100 ml. Erhöhte Werte traten durchweg in Bereichen niedriger UV-Dosen auf. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass das Modell plausible Vorhersagen über die resultierende Ablaufkonzentration liefert und somit für die Nutzung als Regelinstrument in Betracht kommen kann.

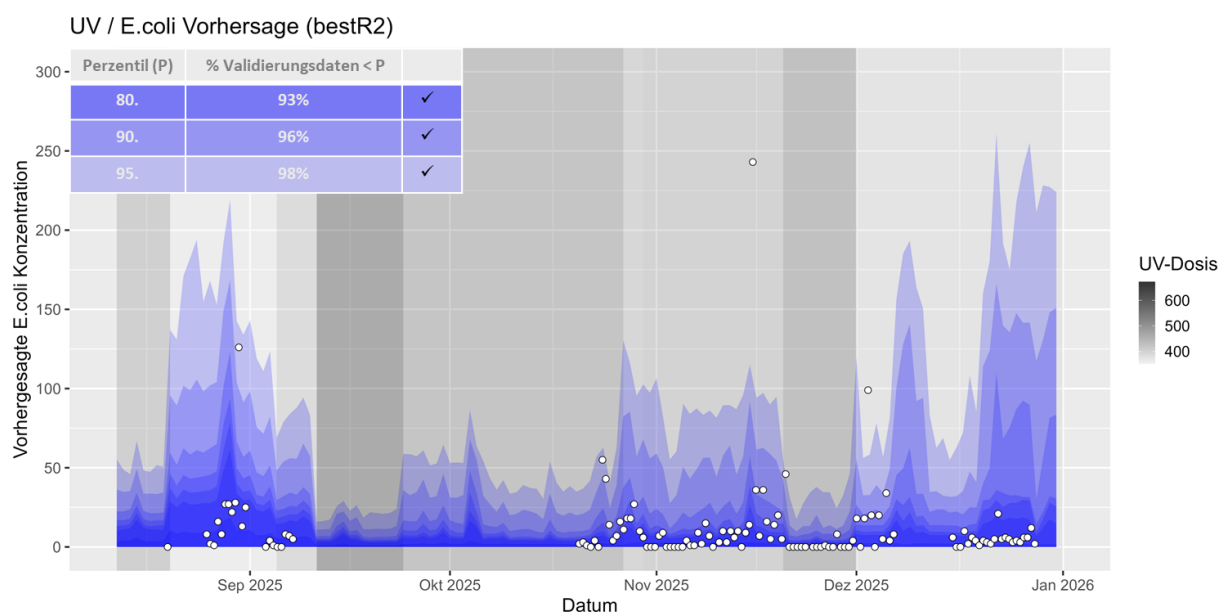


Abbildung 19: Vergleich der Vorhergesagten *E. coli* Ablaufkonzentrationen in Abhängigkeit der prognostizierten Zulaufkonzentration und der eingetragenen UV-Dosis. Unterschiedliche blaue Schattierung zeigen verschiedene Unsicherheitsbänder. Die graue Hintergrundschattierung zeigt die unterschiedliche UV-Dosis an.

Abschätzung des Energieeinsparpotenzials und der Praxisrelevanz

Die Abschätzung des Energieeinsparpotenzials erfolgte durch einen Vergleich der modellgestützt ermittelten UV-Dosis mit einem fluenzbasierten Referenzwert von 412 J/m². Dieser Referenzwert basiert auf einer konservativen Auslegung anhand des 95. Perzentils der gemessenen *E. coli*-Zulaufkonzentrationen.

Die beiden für einen möglichen praktischen Einsatz betrachteten Modellvarianten 1 und 2 liefern nahezu identische Ergebnisse. Bei einer Regelung auf Grundlage der Medianvorhersage würde sich rechnerisch eine Verringerung der mittleren UV-Dosis um etwa 50 % ergeben. Eine solche Auslegung berücksichtigt die Unsicherheit der Vorhersage jedoch nur eingeschränkt und ist daher für den Regelbetrieb nicht als ausreichend sicher anzusehen.

Für den Betrieb wird vorausgesetzt, dass mindestens 90 % der Validierungsmessungen die festgelegten hygienischen Anforderungen einhalten. Aus diesem Grund stellt die Dosierung auf Grundlage des vorhergesagten 90. Perzentils die plausible und sicherheitsorientierte Auslegungsvariante dar. Hieraus ergibt sich für Modell 1 eine Verringerung der UV-Dosis um 21,5 % und für Modell 2 einer Reduzierung von 22,1 %.

Unter Berücksichtigung zusätzlicher betrieblicher Unsicherheiten wird das realistisch erreichbare Einsparpotenzial daher konservativ mit rund 20 % angesetzt. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass sich die Verringerung der UV-Dosis proportional auf den Stromverbrauch der UV-Lampen überträgt. Auf der Kläranlage Bad Oeynhausen ist eine UV-Anlage des Typs LBX90e der Firma Xylem installiert. Die Anlage verfügt über vier UV-Lampen mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von jeweils 290 W. Bei voller Leistung beträgt die gesamte Lampenleistung damit 1.160 W. Bei einem ganzjährigen Betrieb mit maximaler Leistung ergibt sich ein theoretischer Stromverbrauch von rund 10.162 kWh pro Jahr. Eine Reduzierung um 20 % würde einer Einsparung von etwa 2.032 kWh pro Jahr entsprechen. Der verbleibende Stromverbrauch der UV-Lampen läge bei rund 8.129 kWh pro Jahr. Bei einem angenommenen Strompreis von 0,25 €/kWh ergibt sich daraus eine jährliche Kostenersparnis von etwa 508 €. Für die in Bad Oeynhausen installierte Anlage ist der direkte wirtschaftliche Nutzen damit begrenzt. Der Gesamtstromverbrauch der Kläranlage liegt ohne UV-Behandlung zwischen 1,6

und 1,8 Millionen kWh pro Jahr. Der maximale Energieverbrauch der UV-Lampen entspricht somit etwa 0,6 % des Gesamtstromverbrauchs. Durch die modellgestützte Regelung könnte dieser Anteil auf ungefähr 0,5 % reduziert werden.

Die relative Einsparung innerhalb des UV-Prozesses ist damit zwar relevant, ihr Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage bleibt aufgrund der kleinen Anlagengröße jedoch gering. Mögliche zusätzliche Effekte, beispielsweise eine geringere thermische und elektrische Beanspruchung der Lampen, längere Standzeiten oder geringere Wartungskosten, sind in dieser Abschätzung nicht berücksichtigt.

Für die wirtschaftliche Bewertung einer modellgestützten Regelung ist die Größe der UV-Anlage von entscheidender Bedeutung. Die Anlage in Bad Oeynhausen ist mit vier Lampen vergleichsweise klein. Innerhalb der LBX-Baureihe werden jedoch auch Anlagen mit bis zu 60 Lampen eingesetzt. Bei 60 Lampen mit einer Leistung von jeweils 290 W ergibt sich eine maximale elektrische Leistung von 17,4 kW. Bei einem ganzjährigen Betrieb mit voller Leistung entspräche dies einem Stromverbrauch von rund 152.000 kWh pro Jahr. Eine Einsparung von 20 % würde den jährlichen Stromverbrauch um etwa 30.500 kWh reduzieren. Bei einem Strompreis von 0,25 €/kWh ergäbe sich daraus eine jährliche Kostenersparnis von ungefähr 7.600 €. Über eine angenommene Nutzungsdauer von zehn Jahren könnten sich die kumulierten Einsparungen damit auf rund 76.000 € belaufen. Bei Anlagen dieser Größenordnung kann eine modellgestützte Regelung wirtschaftlich relevant werden und die Kosten für Datenerhebung, Modellentwicklung, technische Integration und laufende Überwachung kompensieren.

Tabelle 10: Abschätzung des Energieeinsparpotentials im Vergleich zur fluenzbasierten Regelung bezogen auf das 95. Perzentil der gemessenen E. coli Werte.

Modell	Zielwert <i>E. coli</i> /100 ml	Auslegungs- größe	Mittlere UV- Dosis (J/m ²)	Vergleichs- wert (J/m ²)	Verringe- rung UV- Dosis
Model 1	50	Median	205	412	50,3%
Model 1	50	P90	324	412	21,5%
Model 2	50	Median	203	412	50,7%
Model 2	50	P90	321	412	22,1%

Veröffentlichung der Trainingsdaten, des Codes und der Modelle.

Die anonymisierten Trainingsdaten, der zugrundeliegende R-Code und die angepassten Modelle für die Wasserqualitätsprognose wurden auf der Online-Plattform Zenodo veröffentlicht¹. Die Merkmale der Betriebsmesstechnik der Kläranlage werden durch eine variablenweise affine Transformation anonymisiert, deren Koeffizienten nicht offengelegt werden. Die angepassten Modelle werden mit derselben Transformation bearbeitet, sodass die Vorhersagen reproduzierbar sind, ohne dass die Rohmesswerte der Kläranlage offengelegt werden. Die *E. coli*-Messwerte, Zeitstempel und die UV-Dosis-Wirkungs-Werte sind gemessenen Werte und wurden nicht verändert.

¹ <https://zenodo.org/records/21882855>

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass eine energetische Optimierung der UV-Desinfektion durch eine modellgestützte Regelung grundsätzlich möglich ist. Mit den verfügbaren Prozessgrößen konnte ein QRF-Modell entwickelt werden, das die *E. coli*-Konzentration im Zulauf mit ausreichender Genauigkeit vorhersagt und gleichzeitig eine Quantifizierung der Vorhersageunsicherheit ermöglicht. Die nichtlinearen Modellierungsverfahren QRF und neuronales Netz waren den untersuchten linearen Ansätzen deutlich überlegen. Der QRF wurde ausgewählt, weil er bei mindestens vergleichbarer Vorhersagegüte eine bessere fachliche Interpretierbarkeit und eine direkte Bereitstellung von Vorhersagequantilen ermöglicht.

Die Validierung anhand unabhängiger Laborproben ergab einen RMSE von 0,25 und ein R^2 von 0,51. Trotz des gegenüber dem aquaBio-Testdatensatz niedrigeren R^2 waren die absoluten Vorhersagefehler nicht größer. Der Unterschied ist vor allem durch die geringere Spannweite und Variabilität der Laborwerte zu erklären. Auch die indirekte Validierung der vorhergesagten Ablaufkonzentrationen ergab insgesamt plausible Ergebnisse. Der überwiegende Teil der Messwerte lag unterhalb der vorhergesagten oberen Quantile. Gleichzeitig traten erhöhte Ablaufwerte vor allem während Phasen mit vergleichsweise niedriger UV-Dosis auf.

Für eine sicherheitsorientierte Regelung auf Grundlage des 90. Perzentils ergibt sich ein konservativ abgeschätztes Energieeinsparpotenzial von etwa 20 %. Bei der verwendeten UV-Anlage in Bad Oeynhausen führt dies zu einer jährlichen Stromkostensparnis von lediglich rund 500 €. Der wirtschaftliche Nutzen ist an diesem Standort daher begrenzt. Bei größeren Anlagen steigt das absolute Einsparpotenzial jedoch deutlich an, sodass eine modellgestützte Regelung sowohl energetisch als auch wirtschaftlich relevant werden kann. Vor einer dauerhaften Implementierung sollten die Ergebnisse in einem längeren Regelungsversuch bestätigt werden. Dabei sollten insbesondere die Einhaltung der hygienischen Anforderungen, der tatsächliche Stromverbrauch, die Stabilität der Regelung sowie mögliche Auswirkungen auf Lampenlebensdauer und Wartungsaufwand untersucht werden.

4.2.2 AP2.2: Cloud-basiertes Informationssystem

Ziel der Arbeiten von AP2.2 war der Aufbau eines nutzerorientierten Informationssystems in Form einer Cloud-Plattform zur digitalen Unterstützung der urbanen Wasserwiederverwendung. Die Plattform dient dabei als zentrale Schnittstelle für die Erfassung, Zusammenführung, Verarbeitung und nutzergruppenspezifischen Bereitstellung relevanter Betriebs-, Qualitäts-, Bedarfs- und Logistikinformationen. Im Kontext der Wasserwiederverwendung soll sie bisher getrennte Bereiche wie Abwasserbehandlung, Wasserbereitstellung, Grünflächenbewässerung und Transportlogistik informationstechnisch miteinander verknüpfen und damit eine effiziente, sichere und ressourcenschonende Nutzung von aufbereitetem Wasser ermöglichen. Im Vorfeld der Entwicklung des Informationssystems wurde eine strukturierte Nutzerbefragung durchgeführt. Ziel dieser Befragung war es, die Anforderungen an Aufbau, Funktionalität und inhaltliche Ausgestaltung des Systems zu ermitteln. Ein zentrales Element stellte dabei die Identifikation relevanter Nutzergruppen sowie der von diesen zu treffenden Entscheidungen dar. Auf dieser Grundlage können die jeweils notwendigen Informationen bestimmt, strukturiert aufbereitet und bedarfsgerecht bereitgestellt werden.

Die Befragung erfolgte sowohl in Form von Einzelinterviews als auch im Rahmen eines Bürgerdialogs, der in Bad Oeynhausen durchgeführt wurde. An dem Bürgerdialog nahmen insgesamt elf Personen teil. Die befragten Einzelpersonen waren in unterschiedlichen fachlichen Aufgabenbereichen tätig, darunter:

- Wasserversorgung,
- Stadtbildpflege,
- Betrieb der Kläranlage,
- Trinkwasserüberwachung,
- Schwimmbadbetrieb,
- Technische Hygiene,
- klinische Einrichtungen,
- Wasserwerke,
- Genehmigungs- und Überwachungsbehörden,
- Grundwasserschutz sowie der
- Vorstand der Stadtwerke.

Ziel der Befragung war es, die heterogenen Informationsbedarfe der verschiedenen Akteursgruppen zu erfassen und bestehende Informationsquellen zu identifizieren. Diese Informationen sollen auf einer gemeinsamen Plattform zusammengeführt und nutzergruppenübergreifend sowie zielgerichtet verfügbar gemacht werden. Als übergreifend relevante Informationsinhalte, die von allen Nutzergruppen als wesentlich identifiziert wurden, erwiesen sich neben der einfachen und aktuellen Verfügbarkeit der Daten insbesondere Informationen zum aktuellen Wasserbedarf, zur Wasserqualität sowie zum verfügbaren Wasserangebot.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Plattformkonzept entwickelt, das hinsichtlich des Umfangs und der Struktur übersichtlich gehalten ist. Das System soll sowohl allgemeine, übergeordnete Informationen für alle Nutzergruppen als auch ergänzende, spezifische Inhalte für einzelne Anwendergruppen bereitstellen und so eine bedarfsgerechte Informationsversorgung gewährleisten.

Beschreibung der Xylem-IDRICA Informationsplattform

Die im Projekt DigiWaVe eingesetzte Xylem-IDRICA Informationsplattform wurde als cloud-basiertes Informationssystem zur zentralen Zusammenführung und Darstellung projektrelevanter Informationen genutzt. Im Fokus stand ihre Funktion als Integrations- und Visualisierungsumgebung für ausgewählte Daten und Ergebnisse aus den verschiedenen Projektbausteinen (Abbildung 20). Dadurch konnten relevante Informationen für unterschiedliche Anwendergruppen, wie Kläranlagenbetrieb, Stadtbildpflege, Transport bzw. Tankwagenbetrieb, Management der Stadtwerke und perspektivisch Behörden, strukturiert bereitgestellt werden und bei betrieblichen Entscheidungen unterstützen. Die Darstellung erfolgte in Form projektspezifischer Dashboards, beispielsweise zu Kläranlage, UV-Anlage, Bewässerungsstellen, Bewässerungsplanung und Gesamtübersicht.

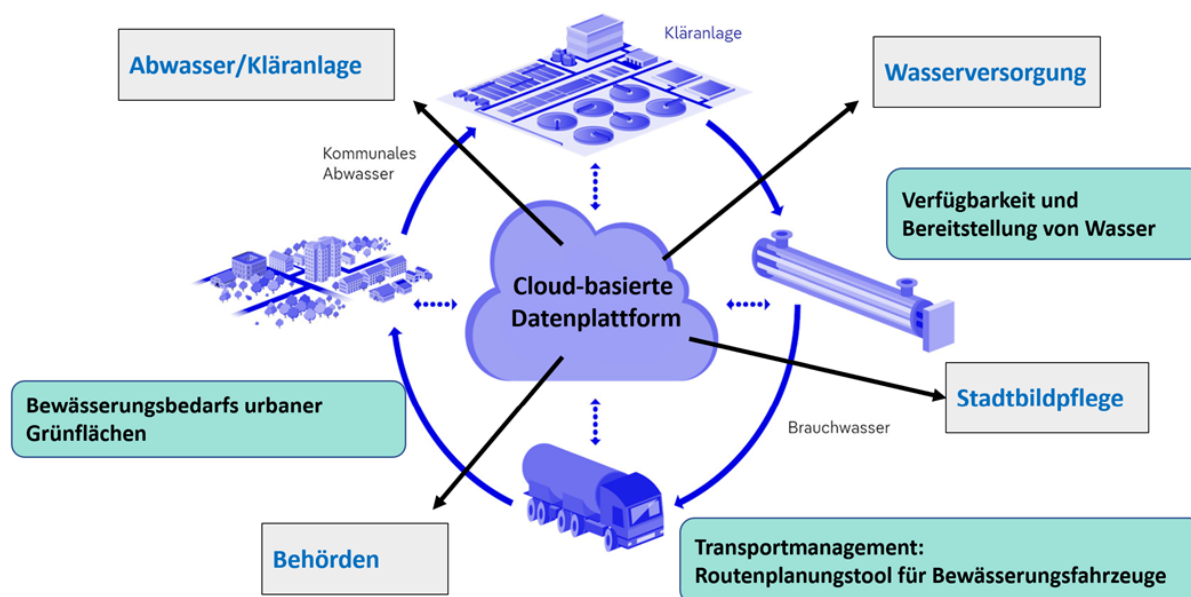


Abbildung 20: Schema Informationsmanagement: Bereitstellung der erforderlichen Informationen für verschiedene Anwendergruppen.

Die Nutzung einer bestehenden Plattform wurde gewählt, um auf eine bereits verfügbare, wasserwirtschaftlich ausgerichtete und skalierbare Cloud-Infrastruktur zurückzugreifen. Dadurch musste kein vollständig neues Informationssystem aufgebaut werden. Gleichzeitig ermöglichte die Plattform die Einbindung unterschiedlicher Datenquellen und die schrittweise Erweiterung um zusätzliche Informationsinhalte. Im Projekt diente sie damit auch als „Blaupause“ für eine mögliche spätere betriebliche Nutzung sowie für die Übertragung auf andere Standorte der Wasserwiederverwendung.

Da die Wasser- und Abwasserinfrastruktur sicherheitsrelevante Bereiche umfasst, wurde auch das Thema Cyber-Sicherheit berücksichtigt. Dazu gehören insbesondere die nutzergruppen-spezifische Vergabe von Zugriffsrechten, die Unterscheidung zwischen teilbaren und nicht teilbaren Daten sowie der Schutz sensibler Betriebs- und Infrastrukturdaten. Die Plattform soll somit nicht nur Informationen bereitstellen, sondern dies unter Berücksichtigung der Anforderungen an Datensicherheit und kritische Infrastruktur ermöglichen. Die eingesetzte Cloud-Plattform basiert auf einer Xylem-Cloud- bzw. Managed-Service-Umgebung, für die öffentlich verfügbare Zertifizierungen nach ISO/IEC 27001:2022 für Informationssicherheitsmanagement sowie ISO/IEC 27017:2015 für cloud-spezifische Sicherheitskontrollen vorliegen. Ergänzend verweist Xylem für die Secure-Connect-Anwendung auf die Orientierung an international anerkannten Cybersecurity-Standards wie IEC 62443-4-1, NIST und ISO 27001. Damit werden zentrale Anforderungen an Informationssicherheit, Zugriffsschutz und den sicheren Betrieb cloudbasierter Dienste im Umfeld kritischer Infrastrukturen adressiert.

Projektspezifische Darstellung der Online Plattform

Für die Visualisierung der im Projekt erfassten und verarbeiteten Daten wurden insgesamt fünf Dashboards erstellt. Diese dienen der strukturierten Darstellung relevanter Betriebs-, Bedarfs- und Qualitätsparameter und ermöglichen eine thematisch gegliederte Aufbereitung der verfügbaren Informationen.

Das erste Dashboard stellt eine übergeordnete **Übersicht** zu den Themen Wasserverfügbarkeit, Bewässerungsbedarf und Wasserqualität bereit (Abbildung 21). Der Bereich **Wasserverfügbarkeit** umfasst Kenngrößen zur aktuell verfügbaren Wassermenge. Hierzu zählen insbesondere der momentane Gesamtdurchfluss der Kläranlage, der aktuelle Durchfluss durch die

UV-Desinfektionsanlage sowie die im laufenden Kalenderjahr bislang produzierte Nutzwassermenge. Der Bereich **Bewässerungsbedarf** beinhaltet Kennzahlen zum aktuellen und kumulierten Wasserbedarf für Bewässerungszwecke. Dargestellt werden die Anzahl der Standorte mit aktuellem Bewässerungsbedarf, der Wasserbedarf je Baum sowie der daraus resultierende gesamte Bewässerungsbedarf. Ergänzend wird der aufsummierte Bewässerungsbedarf des laufenden Jahres dargestellt. Im Bereich **Wasserqualität** werden ausgewählte qualitätsrelevante Parameter zusammengefasst. Hierzu gehört insbesondere die Information, ob der vorgegebene Grenzwert für die Trübung eingehalten wird, sowie die aktuell applizierte UV-Dosis.

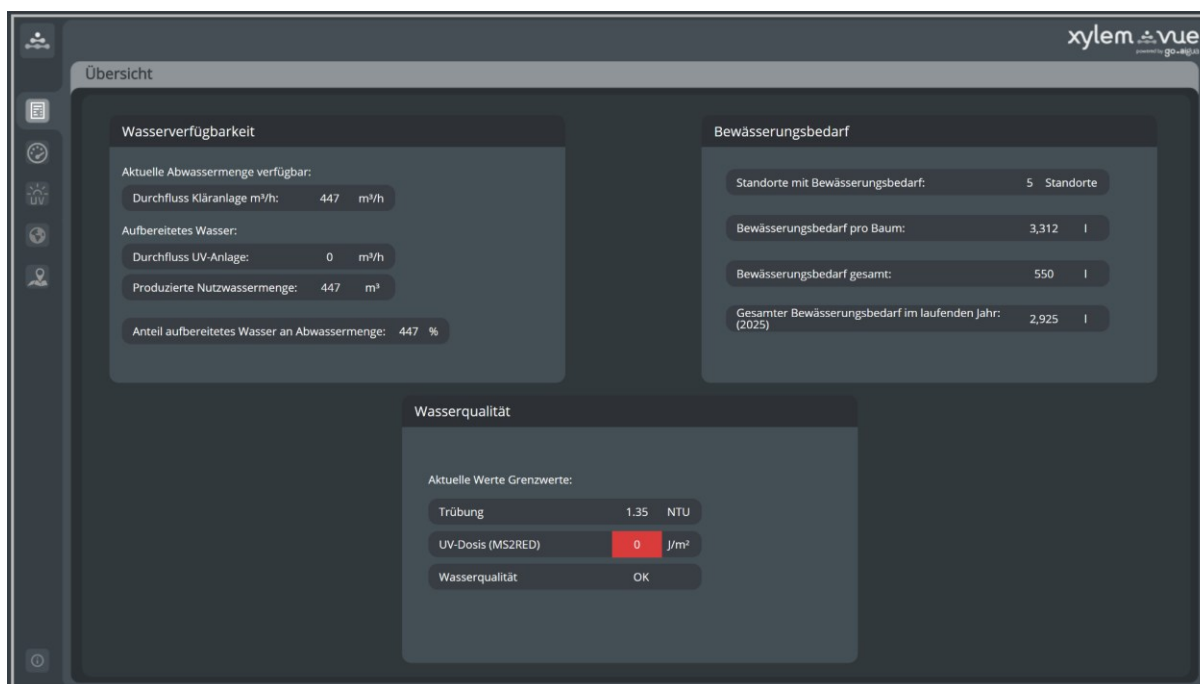


Abbildung 21: Dashboard 1: Übersicht

Dashboard 2 visualisiert ausgewählte Betriebsparameter der **Kläranlage**. Auf Grundlage der angezeigten Messwerte kann eine orientierende Einschätzung vorgenommen werden, ob sich die Anlage im regulären Betriebszustand befindet. Hierzu werden zentrale Kenngrößen aus unterschiedlichen Prozessbereichen zusammengeführt und in übersichtlicher Form dargestellt (Abbildung 22). Neben den allgemeinen Betriebsdaten der Kläranlage werden auch Messwerte des Zulaufs zum Sandfilter sowie des Ablaufs des GAK-Filters angezeigt. Dadurch wird ein vergleichender Überblick über relevante Prozesszustände innerhalb der weitergehenden Reinigungsstufen ermöglicht.

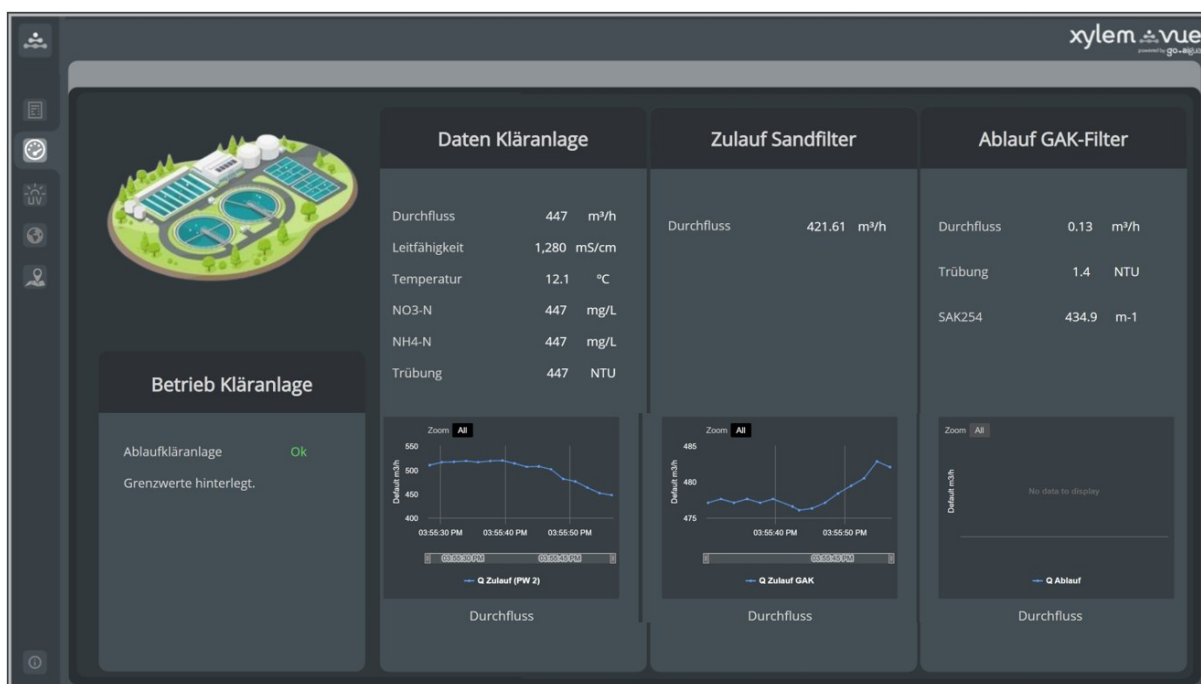


Abbildung 22: Dashboard zur Darstellung ausgewählter Betriebsparameter der Kläranlage mit Übersicht über aktuelle Messwerte.

Für jeden dargestellten Messwert kann eine zugehörige Zeitreihe (Ganglinie) aufgerufen werden (Abbildung 23). Der Betrachtungszeitraum ist dabei frei wählbar, sodass sowohl kurzfristige Veränderungen als auch längerfristige Entwicklungen der jeweiligen Betriebsparameter analysiert werden können.

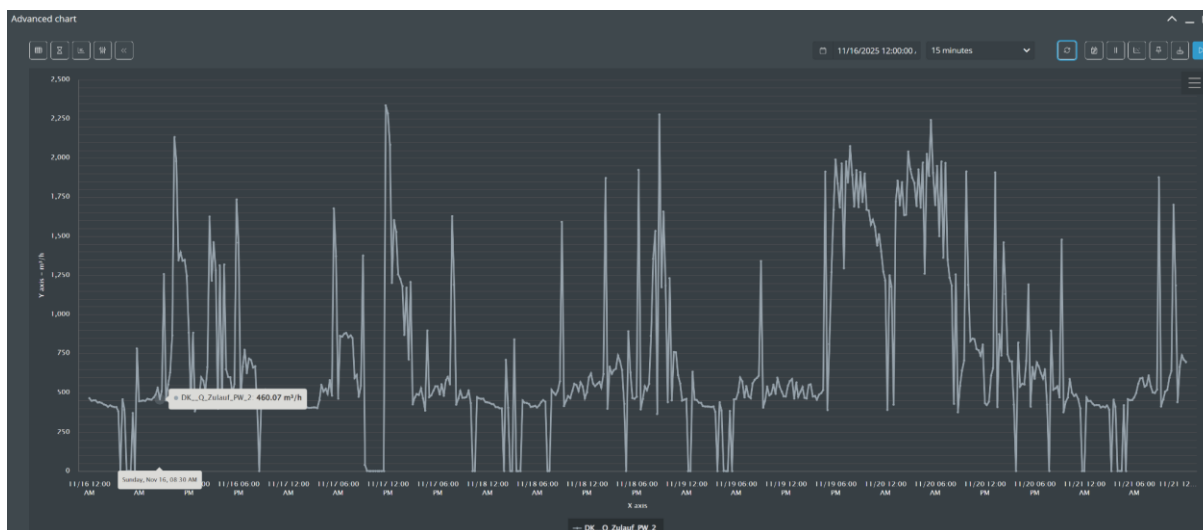


Abbildung 23: Beispielhaft Darstellung der Ganglinie des Wasserdurchflusses.

Das dritte Dashboard dient der Darstellung ausgewählter Betriebs- und Modelldaten der **UV-Behandlungsstufe**. Es bietet eine Übersicht über die aktuellen Prozessparameter der UV-Anlage sowie über ausgewählte Kenngrößen zur Beurteilung des Anlagenzustands. Im Bereich „**UV-Anlage**“ werden aktuelle Betriebsdaten der Desinfektionsstufe dargestellt (Abbildung 24). Hierzu zählen insbesondere anlagenrelevante Parameter wie UV-Intensität, Lampenleistung, applizierte UV-Dosis sowie betriebsbezogene Kennwerte wie Strahlerstunden und Schaltzyklen. Die Erfassung der Strahlerlaufzeiten und Schalthäufigkeiten ermöglicht eine zustandsbezogene Planung zukünftiger Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen.

Zusätzlich werden im Dashboard die Ergebnisse der Modellierung angezeigt. Diese umfassen die vom Modell berechneten Ziel- und Prognosewerte und dienen dem Vergleich mit den aktuell gemessenen Betriebsdaten, insbesondere mit der tatsächlich applizierten UV-Dosis. Durch diese Gegenüberstellung kann beurteilt werden, ob die Betriebsweise der Anlage mit den modellgestützten Anforderungen übereinstimmt und eine ausreichende Desinfektionsleistung gewährleistet ist.

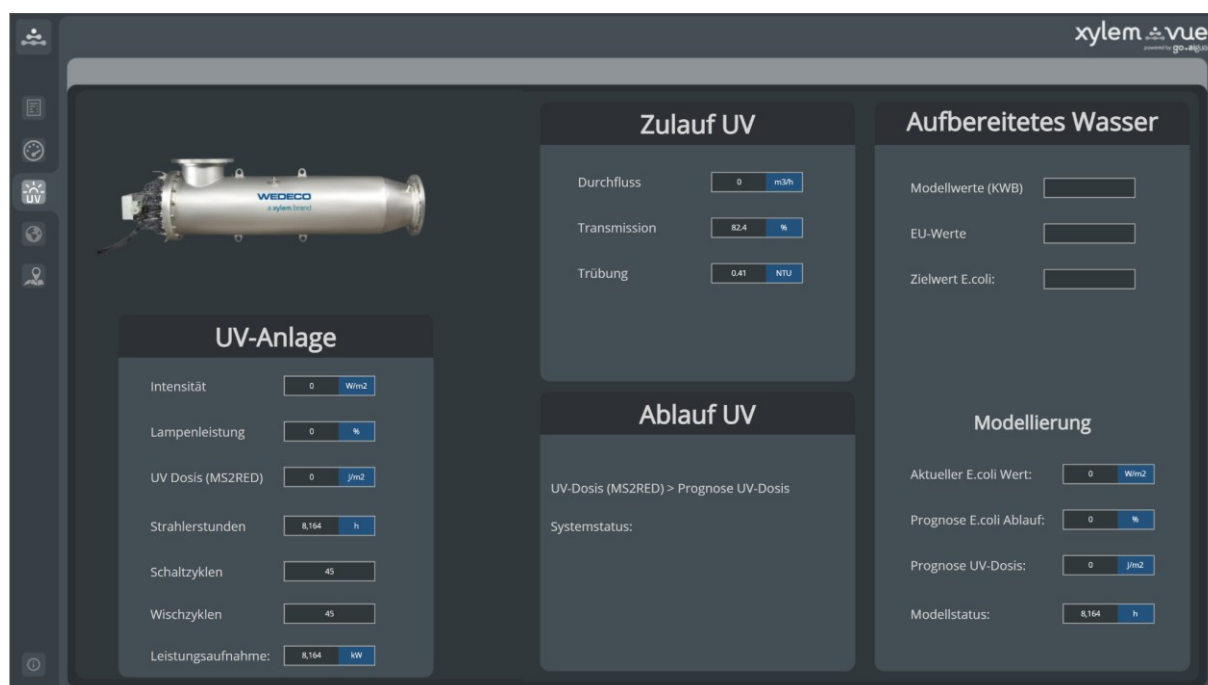


Abbildung 24: Dashboard UV-Anlage

Ein weiteres Dashboard dient der räumlichen Darstellung der im Projekt berücksichtigten **Bewässerungsstandorte** im Stadtgebiet (Abbildung 25). Im Rahmen des vorliegenden Projekts umfasst dies insgesamt fünf Standorte mit jeweils fünf Bäumen. Diese Standorte sind mit Bodenfeuchtesensoren ausgestattet, um den aktuellen Wasserhaushalt im Wurzelraum standortspezifisch zu erfassen. Die Standorte sowie die Ermittlung des Bewässerungsbedarfs werden in AP3 näher beschrieben. Die kartografische Darstellung ermöglicht eine räumliche Zuordnung der Messstandorte im Stadtgebiet und erleichtert damit die Übersicht über die verteilten Überwachungspunkte.

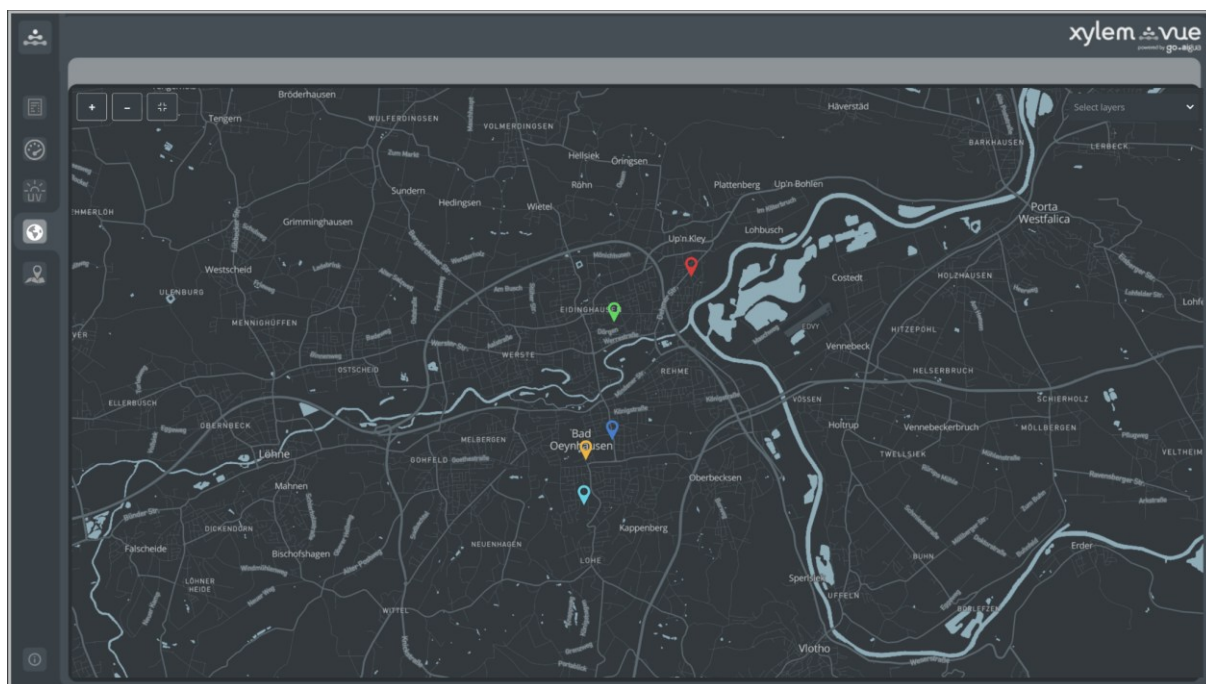


Abbildung 25: Dashboard kartografische Darstellung der Messstandorte

Durch Auswahl eines Standorts im Dashboard werden die zugehörigen aktuellen Messwerte der Bodenfeuchtesensoren in Form von Ganglinien dargestellt. Die Visualisierung erfolgt getrennt nach den installierten Messtiefen und ermöglicht damit eine zeitaufgelöste Beurteilung des Feuchteverlaufs im Bodenprofil (Abbildung 26). Zusätzlich werden für den jeweils ausgewählten Standort Informationen zum aktuellen Bewässerungsbedarf angezeigt. Hierzu zählen insbesondere die Angabe, ob eine Bewässerung erforderlich ist sowie die Höhe des standortbezogenen Wasserbedarfs. Auf diese Weise werden Messdaten und daraus abgeleitete Bewässerungskennwerte in einer gemeinsamen Ansicht zusammengeführt.

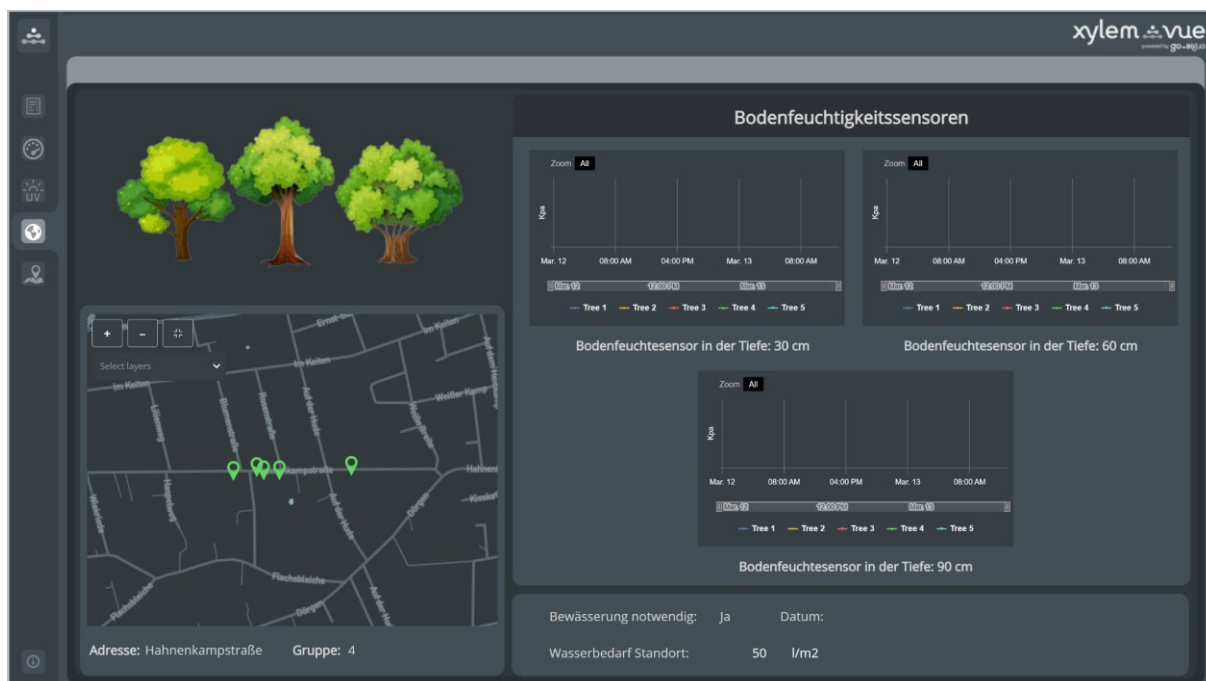


Abbildung 26: Dashboard Bodenfeuchtesensoren

Zur operativen Routenplanung wurde ein weiteres Dashboard implementiert, das die vom Projektpartner Masasana bereitgestellte Bewässerungsrouten darstellt. Die Routeninformation wird so aufbereitet, dass sie für die operative Durchführung der Bewässerungsfahrten genutzt werden kann (vgl. Abschnitt 4.3.2). Der eingesetzte Tankwagen soll mobil auf die hinterlegte Route zugreifen können und diese unmittelbar für die Durchführung der Fahrten verwenden. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Route als Datei herunterzuladen und in ein externes Navigationssystem zu übernehmen. Damit stellt das Dashboard eine Schnittstelle zwischen der datenbasierten Planung des Bewässerungsbedarfs und der praktischen Umsetzung im Feld dar.

Insgesamt ermöglichen die eingerichteten Dashboards eine strukturierte Darstellung der für das Projekt relevanten Informationen auf unterschiedlichen Ebenen. Sie verknüpfen Daten zur Wasserbereitstellung, Anlagenüberwachung, UV-Behandlung, standortbezogenen Bodenfeuchtemessung und operativen Bewässerungslogistik in einer gemeinsamen Benutzeroberfläche. Dadurch wird eine zusammenhängende Betrachtung der wesentlichen Prozess- und Zustandsgrößen innerhalb des Projektkontexts ermöglicht.

Zusammenfassung

Das cloudbasierte Informationssystem wurde im Projekt DigiWaVe als zentrale Plattform zur Zusammenführung, Strukturierung und Visualisierung projektrelevanter Informationen zur urbanen Wasserwiederverwendung umgesetzt. Auf Grundlage einer Nutzerbefragung wurden die Informationsbedarfe verschiedener Akteursgruppen erfasst. Insgesamt wurden fünf Dashboards erstellt. Damit konnte eine durchgängige Informationskette von der Aufbereitung des aufbereiteten Wassers über die Bewertung des Bewässerungsbedarfs bis hin zur praktischen Durchführung der Bewässerung geschaffen werden.

Das Informationssystem stellt damit eine funktionsfähige Grundstruktur für die digitale Unterstützung der Wasserwiederverwendung dar. Es kann als Blaupause für eine spätere betriebliche Anwendung am Standort Bad Oeynhausen sowie für die Übertragung auf weitere Kommunen und Anwendungsfälle dienen.

4.3 AP3: KI-basierte Wasserbedarfsprognose, Routenplanung und cloudbasiertes Datenmanagement-system

In Arbeitspaket 3 wurden die Wasserbedarfsprognose und die automatische Routenplanung zur Unterstützung der Grünflächenpflege entwickelt.

4.3.1 AP3.1: KI-basierte Wasserbedarfsprognose

Motivation und Zielsetzung: Eine ressourceneffiziente Wasserwiederverwendung setzt voraus, dass nur so viel bewässert wird, wie die Pflanzen tatsächlich benötigen. Genau hier setzt AP3.1 an: Ziel des Unterarbeitspakets war die Entwicklung eines KI-basierten Prognosemodells, das auf Grundlage von Bodenfeuchtemessungen sowie Wetter-, Boden- und Fernerkundungsdaten die Bodenfeuchte an den einzelnen Baumstandorten vorhersagt und daraus den Wasserbedarf der Bäume ableitet. Die Prognose bildet die Datengrundlage für eine bedarfsgerechte Bewässerung und damit zugleich den Ausgangspunkt der Routenplanung in AP3.2. Konkret verfolgte AP3.1 die folgenden Teilziele:

1. Aufbau einer belastbaren, konsolidierten Datenbasis aus Sensor- und Kontextdaten,
2. Entwicklung und Training eines Prognosemodells für die Bodenfeuchte bzw. den Wasserbedarf,
3. Validierung der Modellgüte gegen unabhängige Referenzen sowie
4. die Integration der Prognoseergebnisse in die übergeordnete Projektplattform.

Stand des Wissens zu Projektbeginn: Der Wasserbedarf von Pflanzen wird klassisch über die Evapotranspiration abgeschätzt. Als Standardverfahren gilt die FAO-56-Penman-Monteith-Methode zur Bestimmung der Referenz-Evapotranspiration aus meteorologischen Größen (Strahlung, Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit), die für Grünland und landwirtschaftliche Kulturen umfangreich parametrisiert ist [15]. Für städtische Bäume bzw. urbane Grüninfrastruktur sind übertragbare Parametersätze hingegen weniger etabliert, weshalb hier zunehmend an angepassten Modellen gearbeitet wird. Parallel haben sich datengetriebene Verfahren etabliert, die Bodenfeuchte aus frei verfügbaren Fernerkundungsdaten – insbesondere Sentinel-1 (Radar/SAR) und Sentinel-2 (multispektral, u. a. NDVI/NDMI) – in Kombination mit Wetter-, Boden- und Topografiedaten schätzen. Übersichtsarbeiten zeigen, dass Verfahren des maschinellen Lernens (häufig Random Forest, Support Vector Regression und künstliche neuronale Netze) hierbei verbreitet sind und multisensorale Datenquellen die Schätzgüte gegenüber Einzelquellen verbessern. Zugleich begrenzen dichte Vegetation, komplexe Topografie sowie die Verfügbarkeit verlässlicher In-situ-Referenzdaten die erreichbare Genauigkeit.

DigiWaVe verfolgt in AP3.1 einen entsprechend datengetriebenen Ansatz, der In-situ-Bodenfeuchtemessungen mit Wetter- und Satellitendaten verknüpft, um den Bewässerungsbedarf städtischer Bäume abzuleiten. Darüber hinaus verfolgte DigiWaVe den Ansatz, datengetriebene Prognosen unmittelbar mit der im Feld vorhandenen Sensorik und den operativen Bewässerungsabläufen der Stadtwerke zu verknüpfen und so von einer rein modellhaften Betrachtung zu einem praxistauglichen Steuerungswerkzeug zu gelangen.

Zeitlicher Ablauf: Der Lösungsbaustein 3 wurde über die gesamte Projektlaufzeit hinweg bearbeitet. Nach dem Projektstart im September 2023 lag der Schwerpunkt zunächst auf der Erschließung der Datenquellen und dem Aufbau der Datenpipeline. Zu Beginn standen die Anbindung der ARBOR revival-Abfrage-API, die Vorbereitung der Datenhaltung sowie der Aufbau der internen Datenstruktur im Vordergrund. Brauchbare, kontinuierliche Sensordaten lagen – entgegen der ursprünglichen Planung – erst ab Mitte April 2024 vor, wodurch sich der

Beginn der eigentlichen Modellentwicklung verschob. Darauf aufbauend wurden erste Modellansätze entwickelt und mit dem Feature Engineering begonnen. Anschließend lagen die Schwerpunkte auf der Stabilisierung der Datenbasis, der Einbindung zusätzlicher Datenquellen sowie der Weiterentwicklung und Validierung des Prognosemodells.

Standorte mit den Bodenfeuchtemessungen: Als Referenzwerte für das Modelltraining zum Bewässerungsbedarf wurden an fünf Standorten Bodenfeuchtesensoren installiert. Die Standorte wurden so gewählt, dass sie möglichst unterschiedliche Bedingungen aufweisen. Ausgewählt wurden dafür ein Standort an einer Hauptstraße, ein Standort mit hohem Streusalzeintrag, ein Standort in einer Parkanlage, ein Standort an einem Geh-/ Radweg und ein Standort mit Jungbäumen. An jedem der fünf Standorte wurden an fünf Bäumen Messgeräte mit jeweils drei Sensoren in 30, 60 und 90 cm Tiefe installiert – insgesamt 75 Sensoren. Die Standorte bzw. deren Bezeichnungen (und Merkmale) waren:

1. Steinstraße (Hauptstraße)
2. Dehmer Straße (Hoher Streusalzeintrag)
3. Ostkorso (Parkanlage)
4. Hahnenkampstraße (Geh-/ Radweg)
5. Georgstraße (Jungbäume)

Details zu den fünf Standorten können Abbildung 28 entnommen werden. Impressionen des Einbaus eines Bodenfeuchtesensors findet sich nachfolgenden Abbildung 27.



Abbildung 27: Impressionen vom Einbau eines Bodenfeuchtemessgeräts

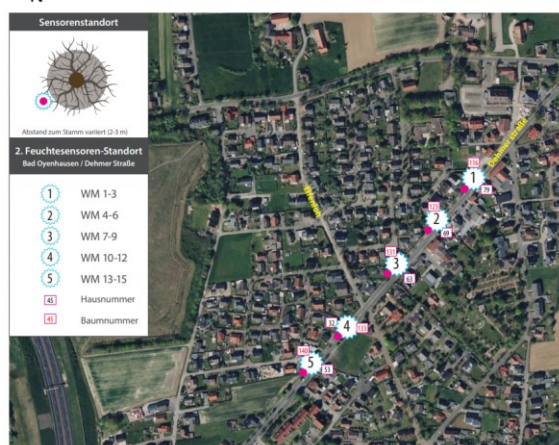
Bodenkennwerte und Standortcharakterisierung: Zur Charakterisierung der Bodeneigenschaften an den Baumstandorten wurden von ARBOR revival an sieben Messpunkten in Bad Oeynhausen Bodenproben entnommen und laboranalytisch ausgewertet. Erfasst wurden jeweils die Bodenart, das Gesamtporenvolumen, das Luftporenvolumen, die nutzbare Wasserspeicherkapazität (nWSK) sowie der Totwasseranteil. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Abbildung 29 zeigt beispielhaft den Wasserspeicher-Steckbrief eines Standorts. Die Kennwerte dienen als Kontextinformation für die Interpretation der Sensormesswerte und bilden die bodenkundliche Grundlage für die spätere Bewertung der Bewässerungssteuerung.

Übersichtsplan: Steinstraße, 32547 Bad Oeynhausen | Erstellt am 18.12.2023
01 Feuchtesensorik-Übersichtsplan (*Quercus robur*)



(Fluggrundlage: Apple Karten, Aufnahme: 18.12.2023)

Übersichtsplan: Dehmer Straße, 32547 Bad Oeynhausen | Erstellt am 18.12.2023
02 Feuchtesensorik-Übersichtsplan (*Acer pseudoplatanus*)



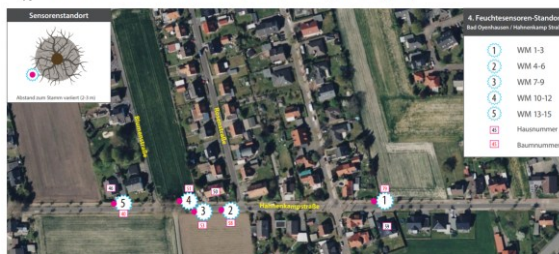
(Fluggrundlage: Apple Karten, Aufnahme: 18.12.2023)

Übersichtsplan: Ostkorsor, 32547 Bad Oeynhausen | Erstellt am 18.12.2023
03 Feuchtesensorik-Übersichtsplan (*Tilia spec.*)

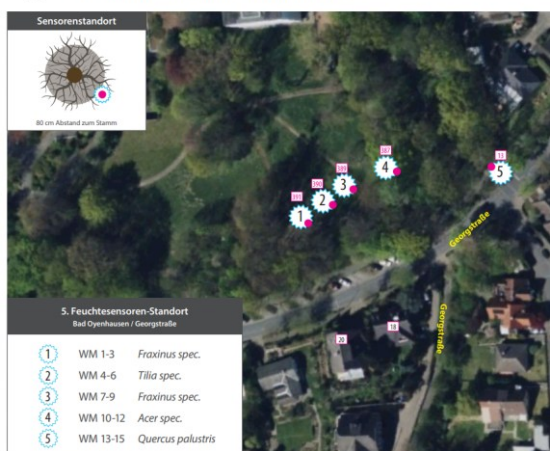


(Fluggrundlage: Google Maps, Aufnahme: 18.12.2023)

Übersichtsplan: Hahnenkamp Straße, 32549 Bad Oeynhausen | Erstellt am 18.12.2023
04 Feuchtesensorik-Übersichtsplan (*Crataegus laevigata*)



Übersichtsplan: Georgstraße, 32547 Bad Oeynhausen | Erstellt am 18.12.2023
05 Feuchtesensorik-Übersichtsplan



(Fluggrundlage: Apple Karten, Aufnahme: 18.12.2023)

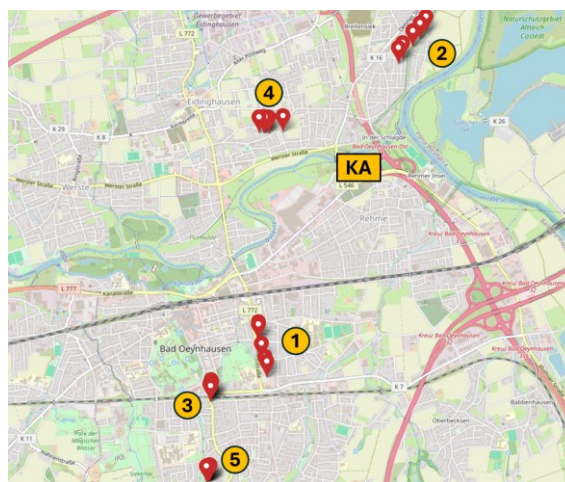


Abbildung 28: Details der fünf Standorte mit den Bodenfeuchtemessungen sowie eine Übersicht der Verteilungen über das Stadtgebiet. Zur Orientierung ist auch der Standort der Kläranlage (KA) hervorgehoben.

Tabelle 11: Ergebnisse der Bodenproben an den Baumstandorten (ARBOR revival): Bodenart, Gesamtporenvolumen, Luftporenvolumen, nutzbare Wasserspeicherkapazität (nWSK) und Totwasseranteil.

Standort	Bodenart	Gesamtporenvolumen	Luftporenvolumen	nWSK	Totwasser
Steinstraße	Ut4 (stark toniger Schluff)	48 Vol. %	11 Vol. %	30 Vol. %	7 Vol. %
Georgstraße	Ut4 (stark toniger Schluff)	48 Vol. %	11 Vol. %	30 Vol. %	7 Vol. %
Georgstraße	Tu2 (schwach schluffiger Ton)	55 Vol. %	5 Vol. %	29 Vol. %	21 Vol. %
Dehmner Straße	Tu2 (schwach schluffiger Ton)	55 Vol. %	5 Vol. %	29 Vol. %	21 Vol. %
Ostkorso	Su2 (schwach schluffiger Sand)	53 Vol. %	26 Vol. %	23 Vol. %	4 Vol. %
Hahnenkampstraße	Su2 (schwach schluffiger Sand)	53 Vol. %	26 Vol. %	23 Vol. %	4 Vol. %
Georgstraße (Baumsubstrat)	Baumsubstrat	59 Vol. %	24 Vol. %	32 Vol. %	3 Vol. %

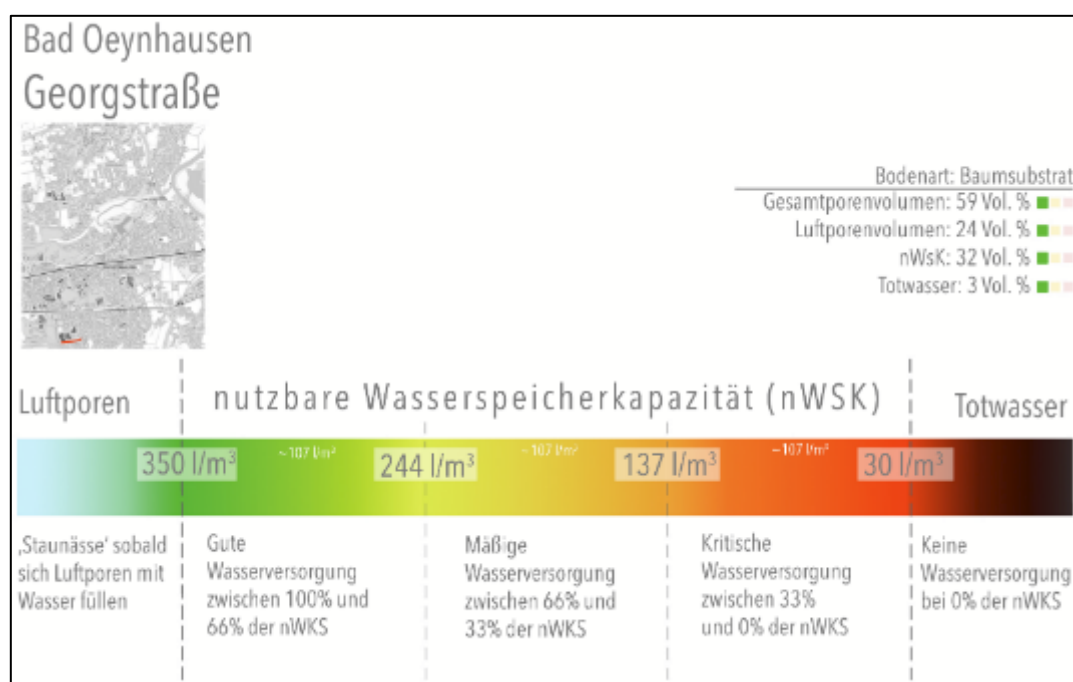


Abbildung 29: Beispielhafter Wasserspeicher-Steckbrief eines Baumstandorts (hier: Georgstraße, Baumsubstrat) mit Bodenart, Porenvolumina und nutzbarer Wasserspeicherkapazität.

Datengrundlage und Datenquellen: Als Ziel- bzw. Ausgangsgröße (Output der Trainingsdaten) dienen die Bodenfeuchte-Messwerte der ARBORmonitor-Sensorik (ARBOR revival). Zur Prognose dieser Zielgröße wurden die folgenden Datenquellen als Eingangsgrößen herangezogen (vgl. Abbildung 31):

- **Wetterdaten** – über die API des Deutschen Wetterdienstes (DWD).
- **Niederschlagsdaten** – von den Stadtwerken Bad Oeynhausen.
- **Satellitendaten** – über die SentinelHub-API (Copernicus/Sentinel).
- **Baum-Metadaten** – teilweise aus dem Baumkataster der Stadtwerke Bad Oeynhausen (SBO), ergänzt um Daten aus den Analysen von ARBOR revival.
- **Bodenproben / Bodenkenwerte** – von ARBOR revival durchgeführte Bodenproben (eine Probe je Standort); sie standen erst im späteren Projektverlauf zur Verfügung.

Datenaufbereitung und Feature Engineering: Die heterogenen Roh- und Kontextdaten wurden in eine einheitliche, maschinenlesbare Datenbasis überführt und zeitlich synchronisiert. Als potenzielle Einflussgrößen wurden u. a. der Niederschlag des Vortages sowie weitere Wettergrößen einbezogen. Die aus den Bodenproben gewonnenen Kennwerte wurden als bodenartspezifische Parameter in das Modell überführt.

Modellierungsansatz: Als Zielgröße diente der Bodenfeuchte-Messwert (value) der ARBOR revival-Sensoren, der zunächst aus der vom Zulieferer in den positiven Bereich gespiegelten Rohform zurücktransformiert wurde. Die Sensormesswerte sind über Geräte- und Standort-IDs den jeweiligen Bäumen zugeordnet. Jedem Sensor wurde über die Gerätepositionen die nächstgelegene (sowie ersatzweise die zweitnächste) Wetterstation zugeordnet.

Als erklärende Merkmale (Features) wurden u. a. einbezogen: Niederschlag, Lufttemperatur (Mittel und Maximum), Niederschlagshöhe und Luftfeuchte (jeweils als aktueller Wert, als um einen und zwei Tage verzögerter Wert sowie als Prognosewert), Satellitendaten (Sentinel, Roh- und aufbereiteter Wert) sowie der Vortageswert (value_yesterday) und die Tagesdifferenz (value_diff) der Sensormessung. Die Umsetzung erfolgte in Python. Für die Prognose wurden mehrere Modelltypen trainiert und verglichen: ein neuronales Netz (Hyperparameter-Optimierung per Grid Search), eine lineare Regression, ein Random Forest sowie eine Support Vector Regression. Aus diesen wurde anhand einer Modellevaluation das jeweils beste Modell ausgewählt. Der Gesamtprozess von der Datenbeschaffung bis zur Modellauswahl ist in Abbildung 31 dargestellt.

Modelleinsatz: Vorgesehen war, die trainierten Modelle in regelmäßigen Abständen auf den aktuellen Datenbestand anzuwenden und die resultierenden Bedarfsprognosen über die Idrica-Plattform der Bewässerungsplanung (AP3.2) zuzuführen. Dort sollten sie als Eingangsgröße der Wasserbedarfs-Heatmap und der Routenplanung dienen. Aufgrund der unzureichenden Verlässlichkeit der Sensordaten (siehe Ergebnisse) befindet sich das Prognosemodell derzeit nicht im produktiven Einsatz. Der beschriebene Einsatzpfad ist jedoch vollständig implementiert und kann bei belastbarer Datengrundlage unmittelbar aktiviert werden (Abbildung 30).

Geplanter Modelleinsatz (AP 3.1 / AP 3.2)



Abbildung 30: Geplanter Einsatz des Prognosemodells: Wetterdaten speisen das KI-Modell, dessen Wasserbedarfsprognose über die Idrica-API an das Routenplanungstool (AP 3.2) übergeben wird und dort in eine Bewässerungsrouten mündet.

Schnittstellen und Integration: Zur Überführung der Prognoseergebnisse in das digitale Gesamtsystem des Projekts wurde eine API-Anbindung an die Idrica-Plattform konzipiert und umgesetzt. Über diese Schnittstelle stehen die Prognoseergebnisse für die plattformseitige Weiterverarbeitung, insbesondere die Routenerstellung (AP3.2) und die externe Ansicht für Bürgerinnen und Bürger, zur Verfügung. Die externen Datenquellen (DWD-Wetterdaten, Niederschlagsdaten, Sentinel-Satellitendaten) wurden jeweils unmittelbar vor jedem Trainingslauf aktualisiert. Da sich das Modell derzeit nicht im produktiven Einsatz befindet, erfolgt aktuell kein laufender Abruf dieser Daten. Die Integration zur Idrica-Plattform umfasst darüber hinaus Daten aus dem ARBOR revival-Monitor.

Aktueller Prozess - Datenpipeline (AP 3.1)

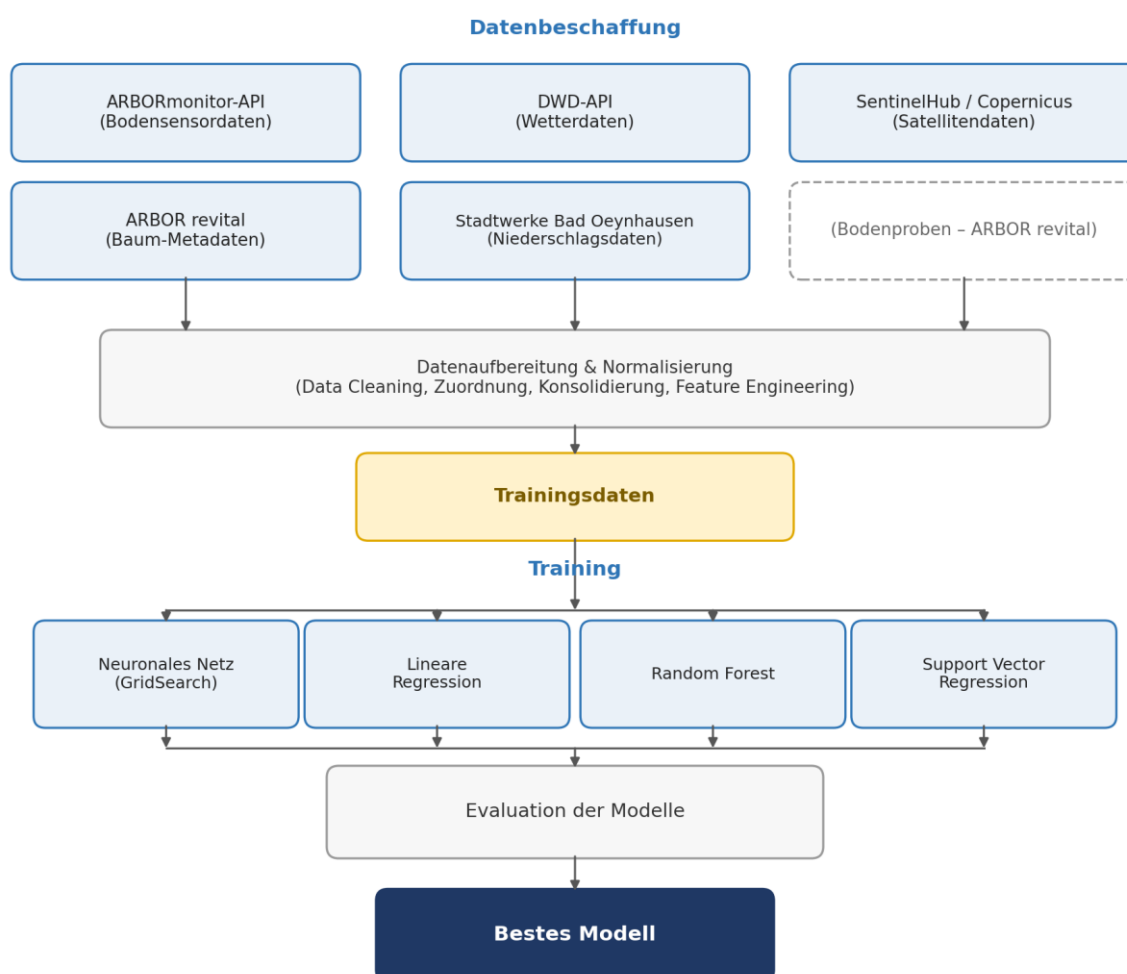


Abbildung 31: Datenpipeline der KI-basierten Wasserbedarfsprognose – von der Datenbeschaffung über Aufbereitung und Normalisierung bis zu Modelltraining, -evaluation und Auswahl des besten Modells.

Erzielte Ergebnisse

Datenqualität und Sensorik: Die Verfügbarkeit und Stabilität belastbarer Messwerte erwiesen sich über die gesamte Laufzeit als zentrale Herausforderung. Bereits 2024 zeigten die Messreihen eine hohe Volatilität mit teils abrupten Sprüngen von „sehr trocken“ zu „sehr nass“, was auf eine teilweise unzuverlässige Sensorik hindeutet. Die Funkeinheiten der Bodenfeuchtesensoren waren über den Winter zu Wartungszwecken ausgebaut und wurden im März 2025 wieder montiert, sodass die kontinuierliche Messwertaufzeichnung erst mit Verzögerung in die Saison startete. Ein bei Tiefbauarbeiten beschädigter Messpunkt wurde ersetzt, ein überbauter Sensor durch einen neuen am selben Standort ergänzt. Nach einer anfänglichen Phase mit Ausfällen und sprunghaftem Verhalten übermittelte die Mehrzahl der Sensoren im weiteren Jahresverlauf 2025 zwar wieder durchgängig Werte; die gemessenen Werte selbst blieben jedoch von eingeschränkter Verlässlichkeit (siehe Korrelationsanalyse). Auffällig war zudem, dass räumlich eng benachbarte Messpunkte, teils nur wenige Meter voneinander entfernt, gegensätzliche Verläufe aufwiesen. Während ein Sensor einen massiven Ausschlag in Richtung „nass“ verzeichnete, lag ein benachbarter Sensor zeitgleich nahe der Austrocknung. Ein solches Muster ist physikalisch nicht plausibel und deutet auf eine unzureichende Zuverlässigkeit der Sensorik hin.

Zur Einordnung des erwarteten Sensorverhaltens: Ein plausibler Bodenfeuchteverlauf zeigt nach einem Niederschlags- oder Bewässerungsereignis einen deutlichen Abfall der Messwerte – zuerst in der oberen Messtiefe, zeitversetzt und gedämpft in den tieferen Schichten – gefolgt von einem allmählichen, kontinuierlichen Anstieg während der Abtrocknungsphase. Benachbarte Sensoren desselben Standorts sollten dabei qualitativ ähnliche Verläufe aufweisen. Die tatsächlich erfassten Messreihen weichen von diesem Muster deutlich ab: Am Standort 846 etwa zeigen einzelne Sensoren abrupte, hochfrequente Sprünge über den gesamten Wertebereich von „sehr trocken“ zu „sehr nass“ innerhalb weniger Messintervalle und ohne korrespondierendes Niederschlags- oder Bewässerungsereignis, während benachbarte Sensoren am selben Standort zeitgleich stabile oder gegenläufige Werte liefern. Ein solches Verhalten ist physikalisch nicht erklärbar und kennzeichnet die Messwerte als Sensorartefakte.

Messdaten der 75 Sensoren liegen ab April 2024 bis zum Projektende vor. Die Nutzbarkeit dieser Daten ist jedoch stark eingeschränkt: Bereits zu Saisonbeginn im April 2024 zeigten die Messreihen ein ausgeprägt erratisches Verhalten mit hochfrequenten Sprüngen über den gesamten Wertebereich (Abbildung 32), das sich auch im weiteren Verlauf nicht in belastbare, konsistente Zeitreihen überführen ließ (Abbildung 33).

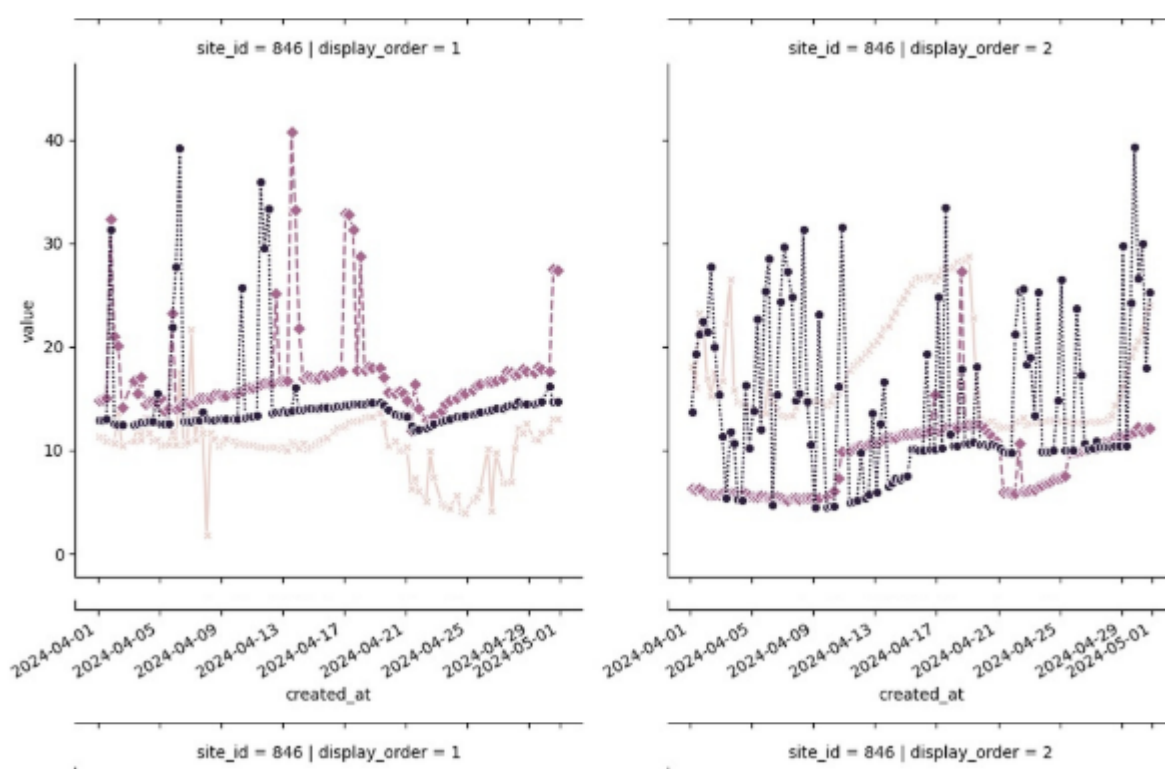


Abbildung 32: Sensorverläufe im April 2024 (Standort 846, zwei Bäume, drei Messtiefen). Bereits zu Saisonbeginn zeigen die Messreihen deutliche, hochfrequente Sprünge über den gesamten Wertebereich.

Besonders anschaulich wird dies bei der gemeinsamen Betrachtung mehrerer Bäume desselben Standorts: Obwohl diese demselben Bodenprofil zugeordnet sind, zeigen die Sensoren über identische Zeiträume hinweg stark voneinander abweichende, teils gegenläufige Verläufe. Einzelne Sensoren weisen zudem unplausible Sprünge bis an die Skalengrenze auf (vgl. Abbildung 32 und Abbildung 33).

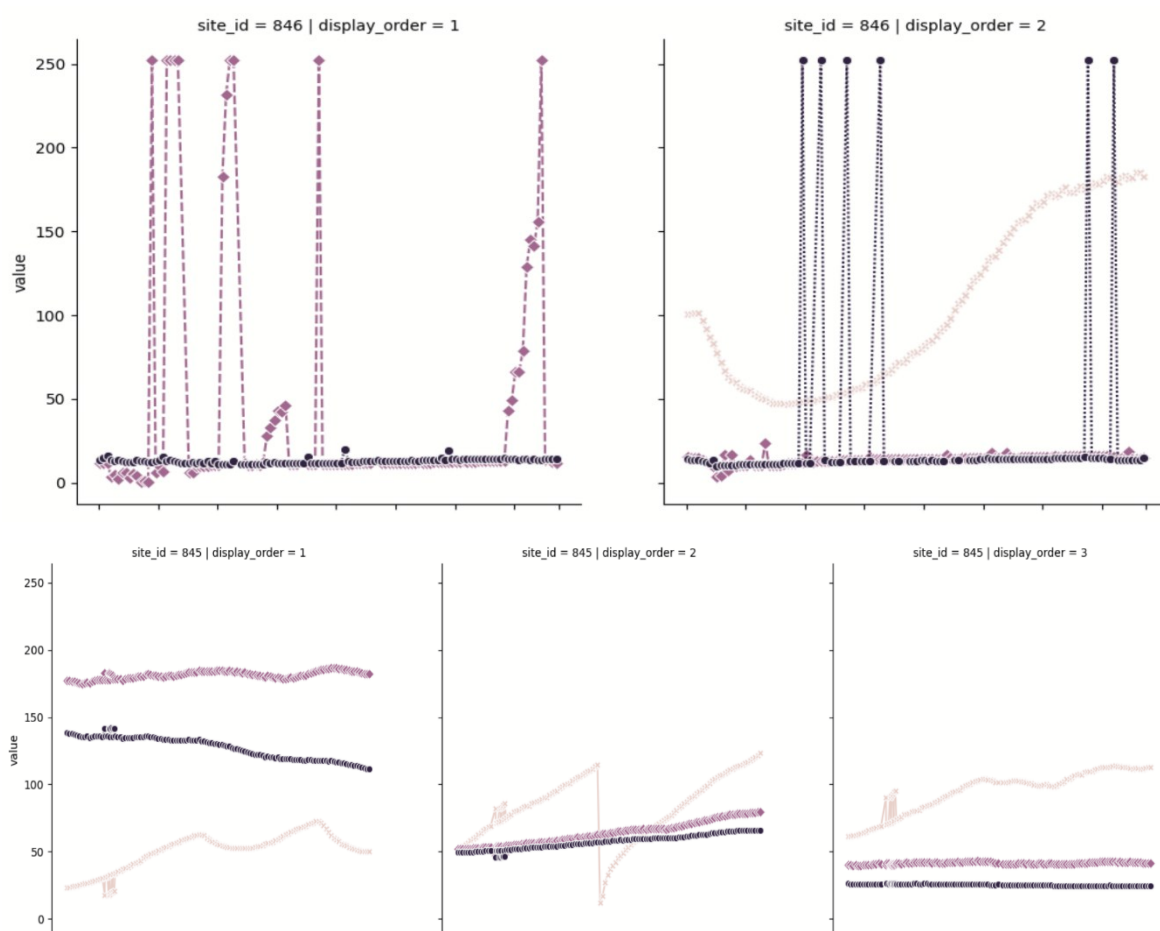


Abbildung 33: Sensorverläufe im August (oben) 2025 und September (unten) 2025. Bäume desselben Standorts und damit desselben Bodenprofils – reagieren über dieselben Tage hinweg deutlich unterschiedlich; einzelne Sensoren zeigen unplausible Ausschläge (z. B. Standort 846).

Korrelationsanalyse: Zur Überprüfung der Aussagekraft der Sensordaten wurde eine Korrelationsanalyse über die erfassten Größen durchgeführt (Abbildung 34). Die Korrelationsmatrix zeigte erwartungsgemäß deutliche Zusammenhänge zwischen den Wettergrößen untereinander – etwa zwischen mittlerer und maximaler Lufttemperatur sowie deren zeitversetzten Ausprägungen (bis $|r| = 1,0$). Zwischen den Wetterdaten und den Bodenfeuchtemesswerten (value) ließ sich hingegen kein nennenswerter Zusammenhang feststellen: über sämtliche Wettermerkmale hinweg lag die Korrelation betragsmäßig unter rund 0,12. Ein systematischer, physikalisch erwartbarer Einfluss der Witterung auf die gemessene Bodenfeuchte ließ sich damit nicht nachweisen.

Die einzigen starken Korrelationen der Zielgröße bestehen zur jeweils vorangegangenen Messung (prev_value, $r \approx 0,99$) sowie zur daraus abgeleiteten Klasse (class, $r \approx 0,85$) – also zur Eigendynamik der Zeitreihe selbst und nicht zu erklärenden Umweltgrößen. Als einzige unabhängige Referenz zur Plausibilisierung standen die Niederschlagsdaten zur Verfügung. Weitere unabhängige Messgrößen zur Validierung der ARBOR revival-Werte lagen nicht vor. Auch im Abgleich mit den Niederschlägen ergab sich kein klares Bild. In der Gesamtschau erwiesen sich die von ARBOR revival bereitgestellten Sensordaten damit als nicht hinreichend belastbar, um als verlässliche Zielgröße für ein Prognosemodell zu dienen.

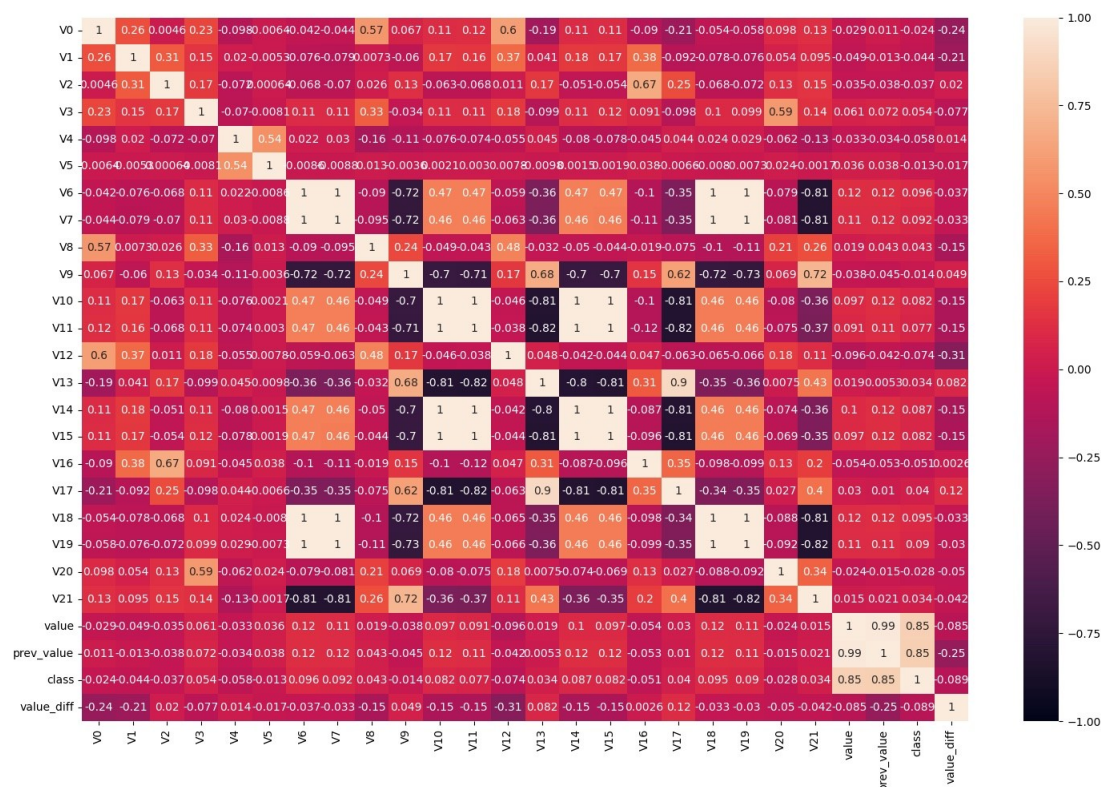


Abbildung 34: Korrelationsmatrix der erfassten Größen (V0–V3 Niederschlag, V4/V5 Satellit/Sentinel, V6–V21 Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchte inkl. Zeitversatz und Prognose; value = Sensormesswert). Die Sensormesswerte weisen keine nennenswerten Korrelation mit den Wettermerkmalen auf.

Bodenkennwerte: Ergänzend wurden von ARBOR revital Bodenproben bereitgestellt. Je Standort wurde dabei jedoch nur eine einzige Probe entnommen, sodass jeweils mehrere Bäume (rund fünf je Standort) demselben Bodenprofil zugeordnet sind. Die ermittelten Kennwerte fielen über die Standorte hinweg entsprechend weitgehend einheitlich aus. Eine standortindividuelle Differenzierung der Bodeneigenschaften auf Einzelbaumebene ist auf dieser Grundlage nicht möglich. Trotz des identischen Bodenprofils traten zwischen den Bäumen eines Standorts deutliche Diskrepanzen in den Sensormesswerten auf – ein weiterer Beleg dafür, dass die beobachteten Schwankungen nicht durch reale, kleinräumige Bodenunterschiede erklärbar sind, sondern auf die eingeschränkte Zuverlässigkeit der Sensorik zurückgehen. Eine ergänzende Auswertung der Wassergabedaten deutete zudem darauf hin, dass sich der Einfluss der Wassergabe primär auf die oberen ca. 30 cm des Bodens auswirkt.

Erweiterung der Datenbasis: Zur Verbreiterung der Datenbasis über Bad Oeynhausen hinaus wurde die Einbindung von Daten aus einer weiteren Großstadt vorangetrieben. Die Anfrage erfolgte, weil dort ebenfalls Sensoren von ARBOR revital im Einsatz waren und somit eine methodisch vergleichbare Datenbasis zu erwarten war. In den dortigen Rohdaten zeigten sich dieselben Instabilitäten wie in Bad Oeynhausen, sie treten in den dort genutzten Auswertungen von ARBOR revital jedoch weniger deutlich zutage, da diese auf mehrfach gemittelten Werten (Mittelwerte über bereits gemittelte Größen) basieren und Ausreißer dadurch geglättet werden. Die Wassergabedaten lagen zunächst nicht maschinenlesbar vor und wurden im Jahresverlauf aufbereitet. Die für eine belastbare Modellintegration notwendige Verknüpfung der Baumstandorte mit den zugehörigen Wassergabe- und Satellitendaten konnte jedoch nicht abgeschlossen werden, da seitens des Datengebers keine vollständigen Baumpositionsdaten bereitgestellt wurden. Nach Bewertung des zu erwartenden Mehrwerts wurde im Oktober 2025

entschieden, die weitere Einbindung dieser Daten innerhalb der Projektlaufzeit nicht weiterzuverfolgen, da ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung des Prognosemodells nicht mehr zu erwarten war.

Veröffentlichung des Datensatzes: Der Datensatz wurde ebenfalls auf der Online-Plattform Zenodo veröffentlicht². Der Datensatz umfasst zwei Dateien:

1. bad_oeynhaus.csv (10.400 Zeilen, 21.12.2023 – 23.02.2026): 5 Standorte und 31 Messstationen in Bad Oeynhausen, inklusive Satellitenmerkmalen und Wassergaben.
2. city_b.csv (19.412 Zeilen, 02.03.2021 – 15.09.2023): 10 Standorte und 71 Messstationen in einer zweiten deutschen Großstadt (zur Anonymisierung nicht benannt), aus einem früheren Einsatz vor Projektbeginn. Enthält den Großteil der dokumentierten Wassergaben.

Jede Zeile ist eine Beobachtung je Standort, Messstation, Tiefe und Tag: der Tagesmedian der Bodenwasserspannung mit Wettermerkmalen für denselben Tag sowie 1-/7-/14-Tage-Rückblicken. Eine vollständige Spaltenbeschreibung enthält die beiliegende README.

Standort- und Stationskennungen sind pseudonymisiert; GPS-Koordinaten, Straßennamen, Adressen, Kundenkennungen, Hardware-Seriennummern sowie Kennungen von Wetter- und Regenmessstationen wurden entfernt.

Modellentwicklung und Validierung: Die methodische Weiterentwicklung des Prognoseansatzes (Datenaufbereitung, Feature Engineering und Anbindung an die Plattform) wurde fortgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Der gesamte Workflow von der automatisierten Datenbeschaffung über die Aufbereitung und das Modelltraining bis zur Bereitstellung der Ergebnisse über die Schnittstellen ist funktionsfähig umgesetzt und kann mit einer verlässlichen Datengrundlage – etwa anderer Sensorik oder an anderen Standorten – unmittelbar produktiv genutzt werden. Eine belastbare quantitative Validierung des Modells war auf der vorliegenden Datenbasis jedoch nicht möglich: Die Sensordaten von ARBOR revival lieferten keine konsistente, physikalisch plausible Zielgröße (siehe Korrelationsanalyse), und mit Ausnahme der Niederschlagsdaten stand keine unabhängige Referenz zur Validierung zur Verfügung. Auch der Abgleich der Modellergebnisse mit den Bewässerungsempfehlungen von ARBOR revival ergab keine gute Übereinstimmung.

Integration in die Plattform: Die API zur Abfrage der Daten durch die Idrica-Plattform wurde fertiggestellt und wird produktiv genutzt; das zugrunde liegende Datenmodell ist entsprechend umfassend gefüllt. Die Schnittstelle zur Routenerstellung (AP3.2) ist implementiert.

Finalisierung in der Verlängerungsphase: Die Datenanbindung ist vollständig umgesetzt, produktiv im Einsatz und das Datenmodell ist umfassend gefüllt. Trotz dieser belastbaren technischen Grundlage liefert die Wasserbedarfsprognose weiterhin keine brauchbaren Ergebnisse. Die in dieser Phase erweiterte Datenbasis bestätigt die zuvor dargestellten Befunde: Die zugrunde liegenden Sensordaten von ARBOR revival sind nicht hinreichend zuverlässig, um eine valide Prognose zu tragen.

Zusammenfassung

Im AP3.1 wurden die methodischen und technischen Grundlagen einer KI-basierten Wasserbedarfsprognose geschaffen: eine konsolidierte Datenpipeline, Verfahren des Feature Engineering sowie die API-Anbindung an die Idrica-Plattform als Grundlage für die Einbindung in

² <https://zenodo.org/records/21874569>

das digitale Gesamtsystem. Als zentrales Ergebnis zeigte sich jedoch, dass die im Projekt verfügbare Datenbasis – insbesondere die Bodenfeuchte-Messwerte von ARBOR revival – für eine belastbare, validierbare Prognose nicht ausreichte. Eine Korrelationsanalyse ergab keinen nachweisbaren Zusammenhang zwischen Wetterdaten und Sensormesswerten. Die Sensordaten waren zudem untereinander inkonsistent, sodass räumlich benachbarte Standorte gegensätzliche Verläufe aufwiesen. Als zentrale Herausforderung erwies sich über die gesamte Laufzeit die Qualität und Stabilität der Messwerte. Brauchbare Sensordaten lagen erst ab Mitte April 2024 vor; verzögerte Laborergebnisse, die winterbedingte Außerbetriebnahme der Funkeinheiten sowie unvollständige Baumstandortdaten des Erweiterungsdatensatzes verzögerten die Konsolidierung der Datenbasis zusätzlich.

Eine belastbare quantitative Modellvalidierung erfordert vor allem eine zuverlässigere Sensorik sowie längere und konsistentere Zeitreihen, als sie innerhalb der Projektlaufzeit erhoben werden konnten. Im Ergebnis wurden die technische Infrastruktur (Datenanbindung, gefülltes Datenmodell und die produktiv genutzte API zur Idrica-Plattform) sowie die methodischen Grundlagen vollständig bereitgestellt. Das eigentliche Sachziel einer belastbaren, validierbaren Wasserbedarfsprognose konnte auf der verfügbaren Datenbasis hingegen nicht erreicht werden, da die Qualität der Sensordaten dies nicht zuließ. Für eine Anschlussnutzung und eine Übertragung auf weitere Kommunen ist daher zunächst eine zuverlässigere Sensorik bzw. eine qualitativ belastbarere Datenquelle erforderlich; die entwickelte Verarbeitungs- und Integrationskette kann dann unmittelbar weitergenutzt werden. Das im Projekt entwickelte Werkzeug – Datenpipeline, Trainings- und Auswertungsumgebung sowie die produktive API – steht hierfür unmittelbar zur Verfügung (vgl. Abschnitt „Modellentwicklung und Validierung“).

4.3.2 AP3.2: Routenplanung & Entnahmepunktoptimierung

Motivation und Zielsetzung: Aufbauend auf der Wasserbedarfsprognose aus AP3.1 verfolgt AP3.2 das Ziel, den Bewässerungseinsatz operativ zu optimieren. Die mobile Bewässerung städtischer Bäume mit aufbereitetem Wasser erfordert eine effiziente Planung der Fahrtrouten des Bewässerungsfahrzeugs sowie eine sinnvolle Auswahl der Entnahmepunkte, an denen das Fahrzeug befüllt wird. Eine bedarfsorientierte und wegeoptimierte Einsatzplanung reduziert Fahrzeiten, Energie- und Personalaufwand und stellt sicher, dass die nach Bedarf priorisierten Standorte zuverlässig versorgt werden.

Zielsetzung von AP3.2 war es, aus den Bedarfsprognosen eine räumlich differenzierte Bewässerungsplanung abzuleiten und in die digitale Plattform zu überführen. Klassische Ansätze der Tourenplanung formulieren dies als Optimierungsproblem (z. B. Vehicle-Routing- bzw. Traveling-Salesman-Probleme). In DigiWaVe wurde demgegenüber bewusst ein anwenderzentrierter Ansatz gewählt, bei dem die Route manuell durch das Betriebspersonal festgelegt und durch digitale Auswertungen (Wasserbedarf, Bäume entlang der Route, Tankfüllung) unterstützt wird.

Planung und Ablauf des Arbeitspakets: Zur räumlichen Abgrenzung der Bewässerungsgebiete stellte die Stadt Bad Oeynhausen Shape-Dateien der Stadtgrenzen bereit. Auf dieser Grundlage wurde das Stadtgebiet in Teilgebiete (u. a. Wetterstationsgebiete) eingeteilt, um die Bewässerungsflächen exakt einzugrenzen und die ortsbezogenen Prognose- und Wetterdaten den jeweiligen Gebieten zuzuordnen (Abbildung 35).

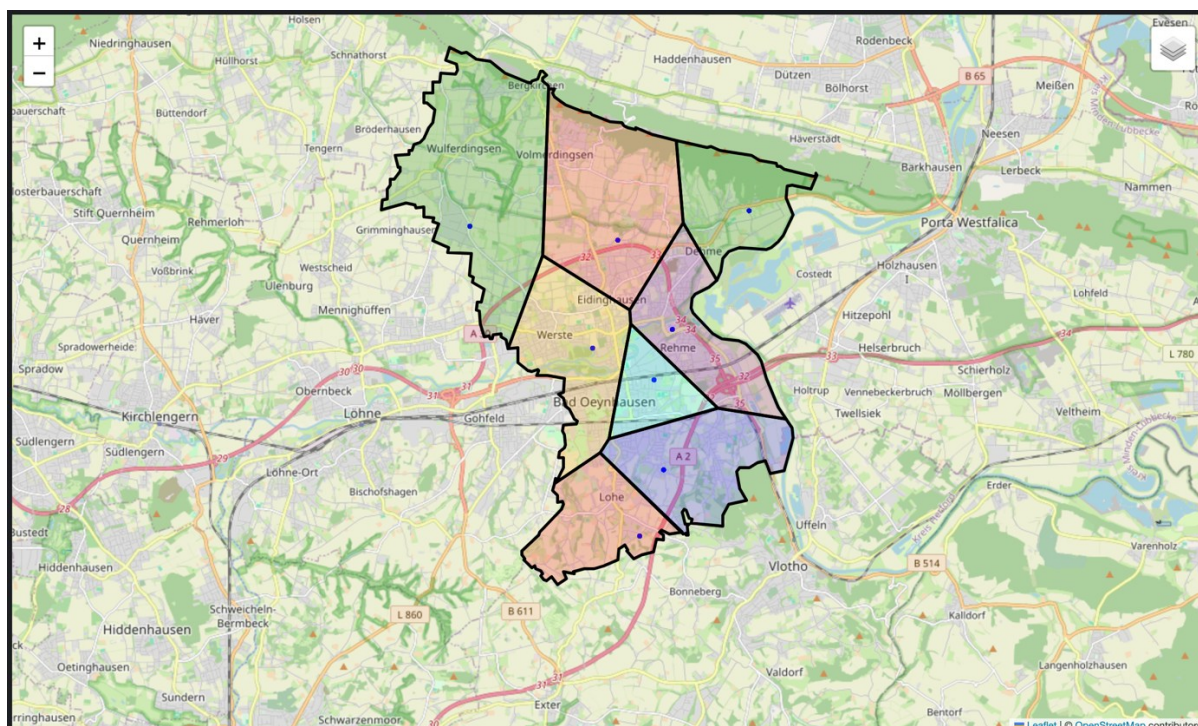


Abbildung 35: Stadtgebiet Bad Oeynhausen, eingeteilt in Wetterstationsgebiete (farbige Sektoren), zur räumlichen Zuordnung von Prognose- und Wetterdaten. Kartengrundlage: © OpenStreetMap-Mitwirkende.

Die Bedarfswerte je Standort werden in eine flächenhafte Darstellung überführt. Grundlage der Darstellung sind die im Baumkataster erfassten Baumstandorte, denen jeweils ein Bedarfswert zugeordnet wird – derzeit auf Basis der Wassergabeempfehlungen von ARBOR revival (vgl. AP3.1), perspektivisch auf Basis der KI-gestützten Prognose. Aus diesen punktbezogenen Bedarfswerten wird eine flächige Dichtedarstellung (Heatmap) erzeugt, in die Bereiche mit hohem aggregiertem Wasserbedarf hervortreten. Die Heatmap wird bei Abruf im Routenplaner auf Basis der jeweils aktuellen Bedarfswerte erzeugt. Als Ausgangspunkt der Planung visualisiert sie die räumliche Verteilung des Bewässerungsbedarfs im Stadtgebiet und unterstützt die Priorisierung der anzufahrenden Standorte (Abbildung 36).

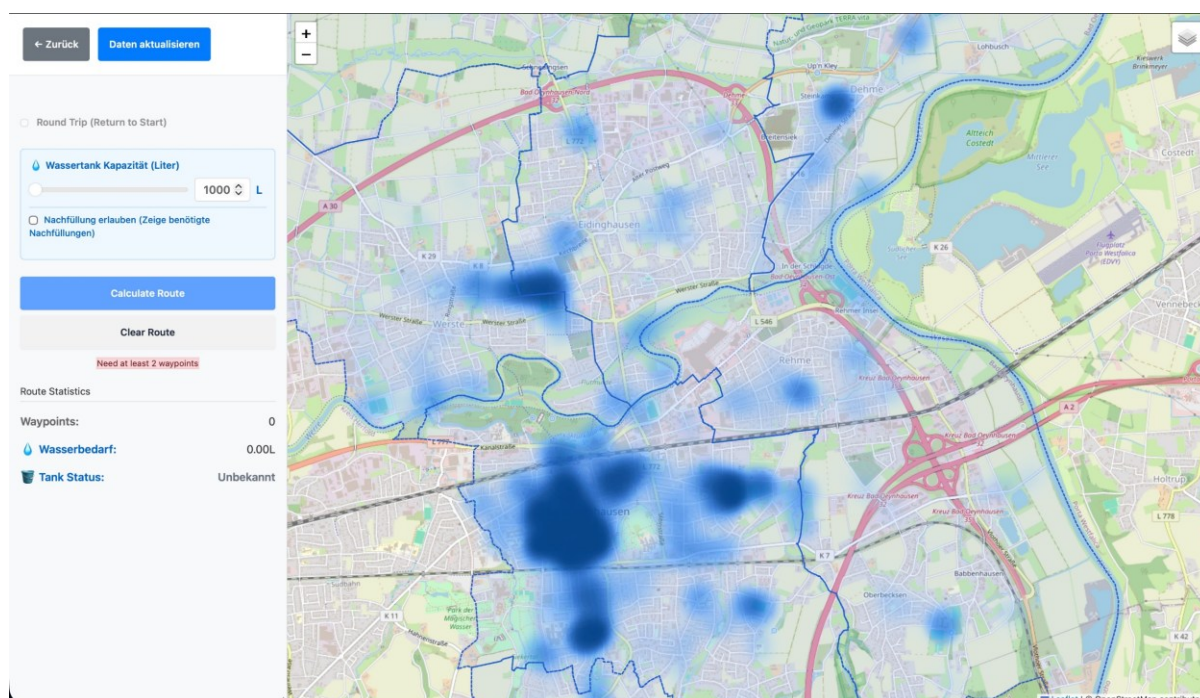


Abbildung 36: Routenplaner mit Wasserbedarfs-Heatmap für Bad Oeynhausen. Einstellbar sind u. a. die Wassertank-Kapazität sowie die Berücksichtigung von Nachfüllungen. Kartengrundlage: © OpenStreetMap-Mitwirkende.

Die eigentliche Route wird anschließend manuell durch das Betriebspersonal festgelegt: Es werden Wegpunkte gesetzt, entlang derer das Werkzeug die zu bewässernden Bäume ermittelt und den benötigten Wasserbedarf je Baum sowie in Summe berechnet – auf Grundlage der Bedarfsempfehlung (derzeit aus den Wassergabeempfehlungen von ARBOR revival, vgl. AP3.1). Berücksichtigt werden die Wassertank-Kapazität des Fahrzeugs sowie optional die Rückkehr zum Ausgangspunkt (Round Trip) und erforderliche Nachfüllungen. Das Werkzeug weist Wegpunktzahl, Gesamtwasserbedarf, Tankstatus bzw. Anzahl der Nachfüllungen, Strecke und Fahrzeit aus (Abbildung 37). Das Werkzeug ist als Webanwendung umgesetzt und im Browser nutzbar, eine gesonderte mobile Applikation ist nicht erforderlich. Die fertige Route wird als Geodaten zum Download bereitgestellt oder über eine API abgefragt, über die die Idrica-Plattform sie den Nutzern zur Verfügung stellt. Die exportierte Route lässt sich in gängigen Kartenanwendungen öffnen und zur Navigation nutzen.

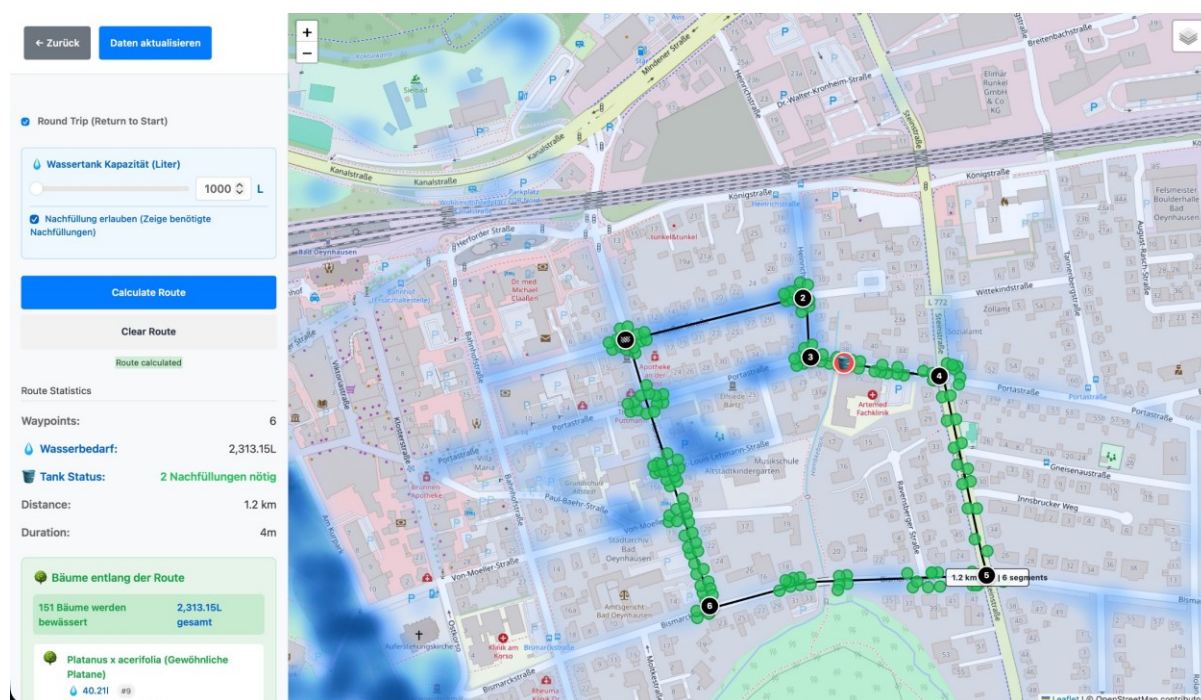


Abbildung 37: Beispielhaft geplante Route (Wegpunkte, Bäume entlang der Strecke, Wasserbedarf, Tankstatus/Nachfüllungen, Strecke und Fahrzeit). Kartengrundlage: © OpenStreetMap-Mitwirkende.

Ergebnisse

Die Gebietseinteilung auf Basis der Shape-Dateien wurde umgesetzt und ermöglicht eine exakte räumliche Eingrenzung der Bewässerungsflächen (Abbildung 35). Mit der Wasserbedarfs-Heatmap und dem interaktiven Routenplaner steht ein einsatzfähiges Werkzeug zur Verfügung, das die manuelle Routenfestlegung wirksam unterstützt. Für eine geplante Route werden die entlang des Weges liegenden Bäume erfasst und der Wasserbedarf je Baum und in Summe ausgewiesen, inklusive Tankstatus und erforderlicher Nachfüllungen. In einem Beispiel ergaben sich für eine Route mit sechs Wegpunkten 151 zu bewässernden Bäumen mit einem Gesamtbedarf von rund 2.313 Litern, woraus das Werkzeug bei 1.000 Litern Tankkapazität zwei erforderliche Nachfüllungen ableitete (Abbildung 37).

Die Schnittstelle zur Routenerstellung in der Idrica-Plattform ist implementiert. Die fertige Route steht als Geodaten-Download und über eine API bereit, über die die Idrica-Plattform sie den Nutzern bereitstellt. Die Anbindung der Bedarfsdaten (vgl. AP3.1) bildet die Grundlage für die Versorgung des Planers mit Wasserbedarfswerten.

Gegenüber der bisherigen, rein manuellen Einsatzplanung bietet das Werkzeug deutliche Vorteile: Bedarfsermittlung, Tanklogistik (Kapazität, Nachfüllungen) sowie Strecken- und Fahrzeitberechnung werden automatisiert zusammengeführt, die zuvor einzeln und erfahrungsbasiert abgeschätzt werden mussten. Die Aussagekraft der resultierenden Planung hängt allerdings unmittelbar von der Qualität der zugrunde liegenden Bedarfsdaten ab (vgl. AP3.1). Eine eigenständige Veröffentlichung des Routenplaners ist nur eingeschränkt sinnvoll, da es sich um eine Webanwendung handelt, die auf die projektspezifische API zugreift. Eine Bereitstellung ist daher im Verbund mit dem in AP3.1 entwickelten Workflow vorgesehen.

Zusammenfassung

In AP3.2 wurden die räumlichen Grundlagen der Bewässerungsplanung geschaffen: die Gebietseinteilung auf Basis amtlicher Shape-Daten sowie eine Bewässerungs-Heatmap als Ausgangspunkt der Routenausarbeitung. Das in AP3.2 entwickelte Verfahren ist als methodisches Werkzeug einsatzfähig, unterliegt jedoch derselben Einschränkung wie AP3.1: Da die KI-basierte Wasserbedarfsprognose auf der vorliegenden Datenbasis keine belastbaren Ergebnisse lieferte, wird als Eingangsgröße für die Routen- und Entnahmepunktplanung derzeit auf die Wassergabeempfehlungen von ARBOR revival zurückgegriffen. Sobald eine zuverlässigere Datengrundlage und damit eine belastbare eigene Prognose verfügbar ist, kann diese unmittelbar als Eingangsgröße in das Verfahren übernommen werden.

Die in AP3.2 entwickelten Komponenten – Gebietseinteilung, Bewässerungs-Heatmap und die implementierte Routenschnittstelle – sind funktionsfähig und produktiv eingebunden. Der Zielerreichungsgrad von AP3.2 ist damit auf methodischer und technischer Ebene erreicht, die Aussagekraft der resultierenden Bewässerungsplanung hängt jedoch unmittelbar von der Qualität der zugrunde liegenden Bedarfsdaten ab. Mit einer belastbareren Datengrundlage ist das Verfahren ohne Anpassung übertragbar.

4.4 Arbeitspaket 4: Vorbereitung der Umsetzung und Ergebnisverbreitung

Die Kommunikation stellte im Projekt DigiWaVe einen zentralen Baustein zur erfolgreichen Umsetzung der Projektziele dar. Bereits zu Projektbeginn wurde eine Kommunikationsstrategie entwickelt, die sowohl den Wissenstransfer innerhalb der Fachwelt als auch die Schaffung von Akzeptanz für die Wasserwiederverwendung in Kommunen und der Öffentlichkeit adressierte. Ziel war es, die Projektfortschritte transparent zu kommunizieren, den fachlichen Austausch aktiv zu fördern und gleichzeitig den Weg für eine spätere Umsetzung vergleichbarer Projekte in anderen Kommunen zu ebnen.

Die Kommunikationsmaßnahmen orientierten sich dabei an den unterschiedlichen Zielgruppen des Projekts. Während Betreiber von Kläranlagen, Ingenieurbüros, Behörden, Forschungseinrichtungen und Unternehmen vor allem über wissenschaftliche und fachliche Formate angesprochen wurden, richteten sich lokale Maßnahmen an politische Entscheidungsträger*innen, Mitarbeitende der Stadtwerke sowie interessierte Bürger*innen. Ergänzt wurde dies durch digitale Kommunikationsangebote, die eine kontinuierliche Projektbegleitung über die gesamte Laufzeit ermöglichten. Eine Zusammenfassung aller kommunikativer Maßnahmen findet sich in Tabelle 12.

Wissenschaftskommunikation und Wissenstransfer

Ein wesentlicher Bestandteil der Kommunikationsarbeit bestand in der kontinuierlichen Präsentation der Projektfortschritte auf nationalen und internationalen Fachveranstaltungen. Ziel war es, die im Projekt entwickelten Lösungsansätze frühzeitig mit der Fachwelt zu diskutieren, Rückmeldungen aus der Praxis aufzunehmen und den Wissenstransfer über den unmittelbaren Projektkreis hinaus zu fördern. Im Projektverlauf wurden die Ergebnisse unter anderem auf der Urban Water Interfaces in Berlin (04/24), der IFAT mit einem Water Reuse Talk und einem anschließenden fachlichen Austausch (05/24), der Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies (LET) im Rahmen einer Posterpräsentation (06/24), einer Fachveranstaltung des DVGW (06/24), der wasserwirtschaftlichen Jahrestagung (01/25), den Wassertagen Münster (02/25) und der Aachener Tagung Wassertechnologie (11/25) vorgestellt.

Dabei beschränkte sich die Kommunikation bewusst nicht auf klassische Veranstaltungen der Wasserwirtschaft. Da die urbane Wasserwiederverwendung zahlreiche Schnittstellen zur kommunalen Grünflächenpflege, Stadtplanung und Klimaanpassung aufweist, wurden gezielt auch fachfremde Zielgruppen adressiert. So wurden die Projektinhalte auf der internationalen Leitmesse GaLaBau (09/24) vorgestellt und mit Vertreterinnen aus dem Garten- und Landschaftsbau, Kommunen sowie Planungsbüros diskutiert. Darüber hinaus bot die Loccumer Tagung (10/24) die Möglichkeit, das Projekt in einem interdisziplinären Umfeld mit Teilnehmenden aus Verwaltung, Politik, Wissenschaft und Zivilgesellschaft zu präsentieren. Durch diese Formate konnte das Thema Wasserwiederverwendung frühzeitig über die Grenzen der Wasserwirtschaft hinaus bekannt gemacht und der Dialog mit denjenigen Akteur*innen gestärkt werden, die künftig an der Planung, Genehmigung und Umsetzung entsprechender Konzepte beteiligt sind oder deren gesellschaftliche Akzeptanz maßgeblich beeinflussen.

Ergänzend zu den Fachveranstaltungen wurden die Projektergebnisse kontinuierlich über Fachmedien verbreitet. Hierzu gehörten die Projektankündigung in der Korrespondenz Abwasser, Abfall (11/23), ein Fachbeitrag in der Sonderausgabe der wasserwirtschaft wassertechnik (wwt) (2023/24), ein Artikel in der Fachzeitschrift Neue Landschaft zur Bewässerung von Stadtgrün mit gereinigtem Abwasser (07/24) sowie Beiträge im Rahmen der Fördermaßnahme.

Die Kombination aus Fachveranstaltungen und Veröffentlichungen ermöglichte eine kontinuierliche Verbreitung der Projektergebnisse und erreichte sowohl die wissenschaftliche Fachwelt als auch Praktiker*innen aus Kommunen, Planungsbüros und Versorgungsunternehmen.

Webinare als Plattform für den fachlichen Austausch

Ein weiterer Schwerpunkt der Kommunikation lag auf der Durchführung offener Webinare. Bereits früh im Projekt wurde mit einem ersten Webinar (01/24) das Projekt, seine Zielsetzungen und der geplante Projektablauf einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Im weiteren Projektverlauf folgte ein zweites Webinar (09/24), in dem erste Ergebnisse sowie praktische Erfahrungen aus dem Anlagenbetrieb präsentiert wurden. Den Abschluss der Webinarreihe bildete ein drittes Webinar (02/26), in dem die wesentlichen Projektergebnisse zusammengefasst sowie Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen für die praktische Umsetzung der urbanen Wasserwiederverwendung vorgestellt wurden.

Die Webinare erfüllten mehrere Funktionen. Einerseits ermöglichten sie einen niedrighschwelligen Zugang zu aktuellen Projektinformationen unabhängig vom Veranstaltungsort. Andererseits dienten sie als Plattform für einen offenen Austausch zwischen Projektteam und Fachöffentlichkeit. Neben den eigentlichen Vorträgen wurde bewusst ausreichend Zeit für Fragen und Diskussionen eingeplant. Dadurch konnten praktische Erfahrungen, unterschiedliche Sichtweisen sowie bestehende Herausforderungen unmittelbar diskutiert werden.

Dieses Format erwies sich insbesondere für kommunale Vertreter*innen, Betreiber*innen von Kläranlagen sowie Planungsbüros als geeignete Möglichkeit, sich frühzeitig über aktuelle Entwicklungen im Bereich der Wasserwiederverwendung zu informieren und gleichzeitig eigene Fragestellungen einzubringen. Gleichzeitig entstand über die gesamte Projektlaufzeit eine kontinuierliche Austauschplattform, über die Interessierte die Entwicklung des Projekts von den ersten Konzepten bis zu den abschließenden Ergebnissen begleiten konnten.

Digitale Kommunikation und Vernetzung

Eine besondere Bedeutung kam der digitalen Kommunikation zu. Bereits zu Beginn des Projektes wurde ein eigener LinkedIn-Kanal³ eingerichtet, der als zentrales Kommunikationsmedium während der gesamten Projektlaufzeit genutzt wurde. Dort wurden regelmäßig Projektfortschritte, Veranstaltungen, wissenschaftliche Erkenntnisse sowie allgemeine Informationen zur Wasserwiederverwendung veröffentlicht.

Im Gegensatz zu einer ausschließlich anlassbezogenen Kommunikation verfolgte DigiWaVe bewusst einen kontinuierlichen Kommunikationsansatz. Durch regelmäßige Beiträge blieb das Projekt über die gesamte Laufzeit sichtbar und konnte sich als Anlaufstelle für aktuelle Informationen zur urbanen Wasserwiederverwendung etablieren. Neben projektbezogenen Inhalten wurden auch allgemeine Entwicklungen im Bereich Wasserwiederverwendung, Digitalisierung und Klimaanpassung aufgegriffen, wodurch eine kontinuierliche fachliche Einordnung aktueller Themen möglich wurde.

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden insgesamt 89 Beiträge veröffentlicht. Zum Projektende umfasste der LinkedIn-Kanal 1.026 Follower*innen. Die kontinuierlich steigende Reichweite verdeutlicht das wachsende Interesse an digitalen Lösungen für die Wasserwiederverwendung sowie an den im Projekt entwickelten Ansätzen.

³ <https://www.linkedin.com/company/digiwave-ein-water-reuse-projekt/>

Weiterhin wurde im Juli 2024 eine Projektwebsite mit den Inhalten und wichtigen Neuigkeiten zum Projekt unter folgender Adresse erstellt und regelmäßig aktualisiert: <https://digiwave-project.org/de>.

Ergänzt wurde die digitale Kommunikation durch Podcastformate, in denen das Projekt und seine Zielsetzungen einem erweiterten Fachpublikum vorgestellt wurden. Hierzu gehörten unter anderem Beiträge im Podcast Abwassertalk sowie im DigitalGreenTech-Podcast. Diese Formate ermöglichten eine vertiefte Diskussion der Projekteinhalte in einem weniger formellen Rahmen und trugen dazu bei, auch Zielgruppen außerhalb klassischer Fachveranstaltungen zu erreichen.

Darüber hinaus bildete die kontinuierliche Netzwerkarbeit mit Akteur*innen aus Wasserwirtschaft, Wissenschaft, Kommunen und Behörden einen wesentlichen Bestandteil der Kommunikationsstrategie. Der regelmäßige Austausch unterstützte die Verbreitung der Projektergebnisse und erleichterte gleichzeitig die Diskussion zukünftiger Anwendungsfelder der entwickelten digitalen Werkzeuge. Insbesondere die enge Vernetzung mit Fachverbänden sowie verschiedenen Forschungsvorhaben trug dazu bei, DigiWaVe frühzeitig als praxisnahes Leuchtturmprojekt im Bereich der urbanen Wasserwiederverwendung zu etablieren.

Öffentlichkeitsarbeit und Akzeptanzförderung

Neben der Kommunikation innerhalb der Fachwelt stellte die Information der lokalen Öffentlichkeit einen wichtigen Bestandteil des Arbeitspakets dar. Die Einführung der Wasserwiederverwendung für die urbane Grünflächenbewässerung berührt nicht nur technische Fragestellungen, sondern setzt auch gesellschaftliche Akzeptanz voraus. Aus diesem Grund wurden verschiedene Maßnahmen umgesetzt, um Transparenz zu schaffen und den Dialog mit interessierten Bürger*innen zu fördern.

Hierzu gehörten unter anderem die Vorstellung des Projekts im nordrhein-westfälischen Landtag (06/24), ein Bürger*innendialog in Bad Oeynhausen (07/24), Anlagenführungen sowie weitere regionale Informations- und Austauschformate. Ergänzend informierte ein Artikel der Neuen Westfälischen über das Projekt DigiWaVe und die Wasserwiederverwendung in Bad Oeynhausen (08/24) eine breite regionale Öffentlichkeit. Im Mittelpunkt sämtlicher Maßnahmen stand die verständliche Vermittlung der technischen Zusammenhänge sowie des Nutzens der Wasserwiederverwendung für den kommunalen Umgang mit den Folgen des Klimawandels. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, Fragen offen zu beantworten sowie Chancen, Herausforderungen und bestehende Unsicherheiten transparent zu kommunizieren. Die verschiedenen Formate ermöglichten einen direkten Austausch zwischen Projektteam, Bürger*innen, politischen Entscheidungsträger*innen und regionalen Akteur*innen und trugen dazu bei, Vertrauen in die entwickelten Lösungsansätze aufzubauen.

Zur internen Projektinformation der Stadtwerke Bad Oeynhausen AöR wurde im Intranet eine Projektkachel angelegt, um die Mitarbeitenden zu informieren.

Den kommunikativen Höhepunkt des Projekts bildete die öffentliche Abschlussveranstaltung „H²Oeynhausen – Altes Wasser, neue Wege“ (02/26), die im UCI Kino Bad Oeynhausen stattfand. Im Rahmen der Veranstaltung wurden die wesentlichen Ergebnisse aus zweieinhalb Jahren Forschungsarbeit vorgestellt und die entwickelten technischen sowie digitalen Lösungsansätze einer breiten Öffentlichkeit präsentiert. Ergänzt wurde das Programm durch eine Führung über die Kläranlage Bad Oeynhausen mit Besichtigung der Anlagen zur weitergehenden Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung. Die Veranstaltung mit insgesamt 96 Teilnehmenden bildete den Abschluss der Kommunikationsmaßnahmen und unterstrich den Leuchtturmcharakter des Projekts DigiWaVe.

Zusammenfassende Bewertung

Die Kommunikationsmaßnahmen des Projektes konnten die im Arbeitspaket 4 definierten Ziele in weiten Teilen erfüllen. Durch die Kombination aus Fachveranstaltungen, wissenschaftlichen Veröffentlichungen, Webinaren, digitaler Kommunikation und lokaler Öffentlichkeitsarbeit wurden sowohl Fachöffentlichkeit als auch kommunale Akteurinnen und interessierte Bürgerinnen kontinuierlich in das Projekt eingebunden.

Besonders erfolgreich erwies sich die Verbindung klassischer Wissenschaftskommunikation mit modernen digitalen Kommunikationsformaten. Während Fachkonferenzen und Veröffentlichungen den wissenschaftlichen Wissenstransfer unterstützten, ermöglichten LinkedIn, Podcasts und Webinare eine kontinuierliche Begleitung des Projektes und einen niedrighschwelligsten Austausch mit unterschiedlichen Zielgruppen. Gleichzeitig konnten Bürgerdialoge und regionale Pressearbeit einen wichtigen Beitrag zur Akzeptanz der Wasserwiederverwendung leisten.

Insgesamt konnte DigiWaVe dadurch bereits während der Projektlaufzeit eine hohe Sichtbarkeit innerhalb der deutschsprachigen Wasserwirtschaft erreichen. Die kontinuierliche Kommunikation der Projektfortschritte sowie der offene Austausch über Chancen, Herausforderungen und praktische Erfahrungen leisteten einen wichtigen Beitrag dazu, die entwickelten Lösungsansätze über den unmittelbaren Projektkontext hinaus bekannt zu machen und den Wissenstransfer in Richtung zukünftiger Anwender*innen zu fördern.

4.5 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Es wurde eine **UV-Anlage** mit einer Behandlungskapazität von 60 m³/h bei UV-Dosen von 270 bis 420 J/m² (MS2RED; Mittelwert 360 J/m²) betrieben. Die Aufbereitungskette aus mechanisch-biologischer Behandlung, Sand- und GAK-Filtration sowie UV-Desinfektion hielt die im DWA-M 1200 (Gelbdruck) für Wassergüteklasse A festgelegten Überwachungswerte für Trübung, *E. coli* und *Enterokokken* sicher ein. Auch *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella spp.* und *Legionella spp.* waren im Ablauf der UV-Anlage nicht mehr nachweisbar. Die Prozessvalidierung bei 500 bis 720 J/m² (MS2RED) bestätigte die Anforderungen für *E. coli* und Sporen von *Clostridium perfringens*. Bei den Virenindikatoren wurden 7 bis 8 Logstufen für somatische, 5 bis 6 Logstufen für f-spezifische und 6 bis 7 Logstufen für Gesamt-Coliphagen erreicht. Damit erscheinen die Anforderungen der EU-Verordnung 2020/741 unter den untersuchten Bedingungen grundsätzlich erreichbar. Für die weitergehenden Vorgaben des DWA-M 1200 wären höhere UV-Dosen erforderlich. Die PFAS-Konzentrationen lagen unter den Trinkwassergrenzwerten und stehen einer Wasserwiederverwendung nicht entgegen.

Eine **datengetriebene Echtzeitprognose der Reinigungsleistung von UV-Anlagen zur Wasserwiederverwendung** wurde entwickelt und es konnte gezeigt werden, dass eine energetische Optimierung der UV-Desinfektion durch eine modellgestützte Regelung möglich ist. Ein Quantile-Random-Forest-Modell (QRF) konnte die Konzentration von *E. coli* im Zulauf mit ausreichender Genauigkeit vorhersagen und zugleich die Unsicherheit über Vorhersagequantile abbilden. QRF und neuronale Netze waren den linearen Ansätzen deutlich überlegen. Ausgewählt wurde der QRF wegen seiner guten Interpretierbarkeit und der direkten Quantilprognose. Die Validierung mit unabhängigen Laborproben sowie eine indirekte Validierung der Ablaufkonzentrationen waren plausibel. Eine sicherheitsorientierte Regelung basierend auf dem Prognosemodell lässt ein konservatives Energieeinsparpotenzial von etwa 20 % erwarten, was bei der verwendeten Anlage in Bad Oeynhausen nur einer Stromkostenersparnis von etwa 500 € pro Jahr entspricht. Bei größeren UV-Anlagen steigt das absolute Einsparpotenzial, sodass eine modellgestützte Regelung sowohl energetisch als auch wirtschaftlich relevant werden kann.

Das **cloudbasierte Datenmanagement** als zentrale Plattform zur Zusammenführung, Strukturierung und Visualisierung der projektrelevanten Informationen zur urbanen Wasserwiederverwendung wurde umgesetzt. Eine Nutzerbefragung ermittelte die Bedarfe verschiedener Akteursgruppen. Auf dieser Grundlage entstanden fünf Dashboards, die eine durchgängige Informationskette von der Nutzwasseraufbereitung über die Bewertung des Bewässerungsbedarfs bis zur praktischen Bewässerung abbilden. Das System kann als Blaupause für den betrieblichen Einsatz in Bad Oeynhausen sowie für weitere Kommunen und Anwendungsfälle dienen.

Die methodischen und technischen Grundlagen für eine **datengetriebene Modellierung des Bewässerungsbedarfs urbaner Grünflächen** wurden geschaffen, was eine konsolidierte Datenpipeline, Verfahren des Feature Engineering, ein gefülltes Datenmodell sowie eine produktiv genutzte API zur zentralen Plattform beinhaltet. Eine belastbare Bewässerungsbedarfssprognose und quantitative Validierung waren jedoch nicht möglich, weil insbesondere die gemessenen Bodenfeuchtedaten nicht ausreichend zuverlässig und konsistent waren. Das technische Werkzeug aus Datenpipeline, Trainings- und Auswertungsumgebung sowie API steht vollständig zur Verfügung und kann unmittelbar weitergenutzt werden. Für eine Anschlussanwendung sind jedoch zuverlässigere Sensoren beziehungsweise qualitativ bessere Datenquellen sowie längere, konsistente Zeitreihen erforderlich.

Weiterhin wurden die räumlichen Grundlagen der **automatischen Routenplanung** für die Bewässerungsfahrzeuge der Stadtbildpflege mit einer Gebietseinteilung auf Basis amtlicher Shape-Daten, einer Bewässerungs-Heatmap und einer produktiv eingebundenen Routenschnittstelle geschaffen. Da noch keine belastbare eigene Modellierung des Bewässerungsbedarfs vorlag, werden derzeit die Wassergabeempfehlungen eines externen Unternehmens basierend auf Sensordaten als Eingangsgröße für die Routenplanung verwendet. Die Komponenten sind funktionsfähig und die methodischen sowie technischen Ziele wurden erreicht. Die Aussagekraft der Planung hängt jedoch unmittelbar von der Qualität der Bedarfsdaten ab. Sobald eine verlässliche Prognose verfügbar ist, kann sie ohne grundlegende Anpassung übernommen und das Verfahren auf weitere Kommunen übertragen werden.

Durch die Kombination aus Fachveranstaltungen, wissenschaftlichen Veröffentlichungen, Webinaren, digitaler **Kommunikation** und lokaler Öffentlichkeitsarbeit wurden sowohl Fachöffentlichkeit als auch kommunale Akteure und interessierte Bürger kontinuierlich in das Projekt eingebunden. DigiWaVe konnte dadurch bereits während der Projektlaufzeit eine hohe Sichtbarkeit innerhalb der deutschsprachigen Wasserwirtschaft erreichen und hat einen offenen Austausch über Chancen, Herausforderungen und praktische Erfahrungen bei einer Umsetzung der Wasserwiederwendung ermöglicht.

5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet

Während der Laufzeit bekannt gewordene Erkenntnisse Dritter wurden verfolgt und sofern sinnvoll möglich im Laufe der weiteren Projektdurchführung berücksichtigt. Dies betraf insbesondere genehmigungsrechtlich relevante Entwicklungen, wie die Veröffentlichung des Referentenentwurfs zur Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes im Februar 2024 sowie des Gelbdrucks der Merkblattrihe DWA-M 1200 „Wasserwiederverwendung für landwirtschaftliche und urbane Zwecke in Deutschland“ im Juli 2025 (siehe Abschnitt 3).

6 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Im Konsortium von DigiWaVe waren Partner aus Forschungseinrichtungen (KWB gGmbH), kleinen und großen Wirtschaftsunternehmen (Xylem Water Solutions Herford GmbH, Masasana GmbH, Schölzel Consulting) sowie einem kommunalen Unternehmen (Stadtwerke Bad Oeynhausen AöR) vertreten. Dadurch konnten die Projektergebnisse von den einzelnen Partnern sowohl im wissenschaftlichen als auch im wirtschaftlichen Bereich genutzt werden. Darüber hinaus entstand zusätzlicher Nutzen durch die Fortführung und den Ausbau bestehender Kooperationen. Die konkrete Verwertung der Projektergebnisse ist für jeden Projektpartner in den jeweiligen Erfolgskontrollberichten dargestellt.

7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Im Rahmen der Projektbearbeitung erfolgte die Zusammenarbeit mit folgenden Stellen außerhalb des Verbundprojektes u.a. im Rahmen des Begleitvorhabens NetDGT der Digital Green-Tech Fördermaßnahme mit der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI).

8 Dissemination der Ergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle 12 sind die kommunikativen Maßnahmen des Projekts (z.B. Fachartikel, Konferenzen, Vorträge/Webinare, sonstige Veranstaltungen) zusammengefasst.

Tabelle 12: Übersicht aller kommunikativer Maßnahmen im Projekt DigiWaVe.

Zeitpunkt	Maßnahme	Format	Zielgruppe
08/23	Artikel in der Neuen Westfälischen	Presse	Regionale Öffentlichkeit
10/23	Präsentation auf der DigitalGreenTech-Konferenz	Fachkonferenz	Fachleute innerhalb der Fördermaßnahme
ab 10/2023	Einrichtung des LinkedIn-Kanals und regelmäßige projektbezogene Beiträge	Social Media	Fachöffentlichkeit, Interessierte
11/23	Projektankündigung in Korrespondenz Abwasser, Abfall	Fachartikel	Wasserwirtschaft
2023/24	Fachbeitrag in der Sonderausgabe wasserwirtschaft wassertechnik (wwt)	Fachartikel	Wasserwirtschaft
01/24	Webinar 1	Webinar	Fachöffentlichkeit
03/24	Podcast Abwassertalk	Podcast	Fachöffentlichkeit
04/24	Urban Water Interfaces in Berlin	Fachvortrag	Wissenschaft, Praxis
05/24	Artikel in der Neuen Westfälischen	Presse	Regionale Öffentlichkeit
05/24	IFAT – Water Reuse Talk (Xylem-Stand)	Fachvortrag	Fachöffentlichkeit

05/24	IFAT – Water Reuse Get Together (BBH-Stand)	Netzwerkveranstaltung	Fachöffentlichkeit
06/24	Vorstellung des Projekts im Landtag Nordrhein-Westfalen	Politische Veranstaltung	Politik, Verwaltung
06/24	Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies (LET)	Posterpräsentation	Internationale Fachöffentlichkeit
06/24	DVGW-Fachveranstaltung	Fachvortrag	Wasserwirtschaft
07/24	Fachartikel in Neue Landschaft	Fachartikel	Garten- und Landschaftsbau, Fachöffentlichkeit
07/24	Bürger*innendialog Bad Oeynhausen	Öffentlichkeitsveranstaltung	Bürger*innen
08/24	Podcast DigitalGreenTech	Podcast	Fachleute innerhalb der Fördermaßnahme
08/24	Artikel in der Neuen Westfälischen	Presse	Regionale Öffentlichkeit
09/24	Internationale Leitmesse GaLaBau	Fachvortrag / Messe	Garten- und Landschaftsbau, Kommunen
09/24	Webinar 2	Webinar	Fachöffentlichkeit
10/24	Löccumer Tagung	Fachvortrag	Politik, Verwaltung, Wissenschaft, Zivilgesellschaft
11/24	DigitalGreenTech-Konferenz	Fachvortrag	Fachleute innerhalb der Fördermaßnahme
01/25	Wasserwirtschaftliche Jahrestagung	Fachvortrag	Wasserwirtschaft
02/25	Wassertage Münster	Fachvortrag	Wasserwirtschaft
05/25	KläranlagenTage Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen (MSR)	Poster	Fachöffentlichkeit
08/25	Fachartikel in KA	Fachartikel	Abwasser Fachöffentlichkeit
10/25	IKT-Abwassersprechstunde	Fachvortrag	Fachöffentlichkeit
10/25	Fachartikel in WasserWirtschaft	Fachartikel	Wasserwirtschaft
11/25	Aachener Tagung Wassertechnologie	Fachvortrag	Wasserwirtschaft, Wissenschaft
11/25	DigitalGreenTech-Konferenz 2025	Fachvortrag	Fachleute innerhalb der Fördermaßnahme
12/25	Viega Versorgerforum	Fachvortrag	Fachöffentlichkeit
12/25	Artikel in der Neuen Westfälischen	Presse	Regionale Öffentlichkeit
02/26	H ² Oeynhausen – Altes Wasser, neue Wege	Öffentliche Abschlussveranstaltung	Öffentlichkeit, Fachwelt, Kommunen, Behörden
02/26	Artikel in der Neuen Westfälischen	Presse	Regionale Öffentlichkeit
02/26	Viega Versorgerforum	Fachvortrag	Fachöffentlichkeit
02/26	Webinar 3 (Abschlusswebinar)	Webinar	Fachöffentlichkeit
06/26	DWA-Landesverbandstagung Nord-Ost 2026	Fachvortrag	Fachöffentlichkeit

9 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wurde separat übermittelt.

10 Literaturverzeichnis

1. Foschi, J., A. Turolla, and M. Antonelli, *Artificial neural network modeling of full-scale UV disinfection for process control aimed at wastewater reuse*. Journal of Environmental Management, 2021. **300**: p. 113790.
2. Stumpf, L., et al., *Chancen und Herausforderungen der Verknüpfungen der Systeme in der Wasserwirtschaft (Wasser 4.0). Abschlussbericht*. 2020: Umweltbundesamt.
3. Choi, C., P. Berry, and A. Smith, *The climate benefits, co-benefits, and trade-offs of green infrastructure: A systematic literature review*. Journal of Environmental Management, 2021. **291**: p. 112583.
4. WHO, *Urban green spaces: a brief for action*. 2017, WHO.
5. Jennings, V. and O. Bamkole *The Relationship between Social Cohesion and Urban Green Space: An Avenue for Health Promotion*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019. **16**, 452 DOI: 10.3390/ijerph16030452.
6. EU, *Leitlinien zur Anwendung der Verordnung 2020/741 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung*. 2022: Amtsblatt der Europäischen Union.
7. Maffettone, R. and B. Gawlik, *Technical guidance water reuse risk management for agricultural irrigation schemes in Europe*. Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2022.
8. EU, *Deligierte Verordnung (EU) 2024/1765 der Kommission vom 11. März 2024 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/741 des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf technische Spezifikationen der wesentlichen Elemente des Risikomanagements*, in 2024/1765, EU, Editor. 2024: Amtsblatt der Europäischen Union.
9. LAWA, *Endbericht der LAWA-Ad hoc AG/KG Water Reuse an die 163. LAWA Vollversammlung*. 2022, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).
10. BMUV, *Referentenentwurf. Entwurf eines Dritten Gesetzes zur Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes. Bearbeitungsstand 28.02.2024*. 2024.
11. FlexTreat, *Flexible und zuverlässige Konzepte für eine nachhaltige Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft. Abschlussbericht zum BMBF Vorhaben 02WV1561A-L, Projektlaufzeit 06/2021 – 10/2024*. 2025. p. 345.
12. Seis, W., et al., *Validierungsleitfaden für die uneingeschränkte Bewässerung*. 2024: Zenodo.
13. Lenka, S.P., M. Kah, and L.P. Padhye, *A review of the occurrence, transformation, and removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment plants*. Water Research, 2021. **199**: p. 117187.
14. Seis, W., et al., *A new Bayesian approach for managing bathing water quality at river bathing locations vulnerable to short-term pollution*. Water Research, 2024. **252**: p. 121186.
15. Allen, R., et al., *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop requirements. FAO Irrig. Drain. Report modeling and application*. J. Hydrol., 1998. **285**: p. 19–40.