

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

WaX – Verbundprojekt ZwillE: Digitaler Zwilling zum KI-unterstützten Management von Wasser-Extremereignissen im urbanen Raum



in der Fördermaßnahme

„Wasser-Extremereignisse“ im Förderbereich
„Wasser:N – Wasser-Forschung und Wasser-Innovationen für Nachhaltigkeit“

Autoren

Alexander Krebs (Atos / Eviden); Christian Hübner & Manfred Schütze (ifak); Jürgen Krausewald & Joachim Schmidt (IAB); Erik Ristenpart (ifs); Alrun Jasper-Tönnies & Thomas Einfalt (h&m); Michael Pabst & Stefanie Maßmann (SEH)

Projektlaufzeit: 1. Februar 2022 – 31. Juli 2025

Erstellungsdatum: 31.01.2026

Projektpartner

| | | |
|-----------------|--|------------|
| (Atos / Eviden) | Eviden Germany GmbH, München | 02WEE1627A |
| (ifak) | Institut für Automation und Kommunikation e. V., Magdeburg | 02WEE1627B |
| (IAB) | IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Weimar | 02WEE1627C |
| (ifs) | Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH, Hannover | 02WEE1627D |
| (h&m) | hydro & meteo GmbH, Lübeck | 02WEE1627E |
| (SEH) | Stadtentwässerung Hannover, Eigenbetrieb der Landeshauptstadt Hannover | 02WEE1627F |

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------|--|-----|
| I. | Teil I: Kurzfassung..... | 3 |
| I.1 | Aufgabenstellung | 3 |
| I.2 | Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens | 3 |
| I.3 | Wesentliche Ergebnisse im Überblick | 4 |
| II. | Teil II: Eingehende Darstellung..... | 6 |
| II.1 | Motivation und Aufgabenstellung | 6 |
| II.2 | Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens..... | 11 |
| II.3 | Planung und Ablauf des Vorhabens | 14 |
| II.4 | Geleistete Projektarbeiten und erzielte Ergebnisse | 16 |
| II.5 | Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen | 99 |
| II.6 | Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse | 101 |
| II.7 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes | 104 |
| II.8 | Erfolgte Veröffentlichungen, Vorträge, Referate etc. | 106 |
| II.9 | Literaturverzeichnis | 111 |

I. Teil I: Kurzfassung

I.1 Aufgabenstellung

Durch den Klimawandel kommt es in Deutschland seit einigen Jahren als Folge von Starkregen deutlich häufiger zu Überschwemmungen und Sturzfluten, die zu immer größeren wirtschaftlichen und ökologischen Schäden führen. Dabei spielen die städtischen Entwässerungssysteme mit ihren verschiedenen Teilbereichen eine entscheidende Rolle, da sie bei heftigen Niederschlägen an ihre Grenzen stoßen. Hydrologische Extremsituationen erfordern daher neue Ansätze für das Management des Wassersektors im urbanen Raum. Denn oftmals sind die im Bereich der Prognose und des Risikomanagements vorhandenen Digitalisierungsansätze entweder auf einzelne Teilaspekte des Entwässerungssystems beschränkt oder scheitern beim Versuch der integralen Betrachtung aller relevanten Sektoren zum Teil an fehlenden Daten, veraltetem Datenmanagement und unzureichender Datenstandardisierung. Dementsprechend gilt es, für den urbanen Funktionsraum neue Konzepte und Strategien für den Umgang mit extremen hydrologischen Ereignissen zu erarbeiten.

Das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) geförderte Verbundforschungsvorhaben ZwillE zielte daher auf die Entwicklung eines Digitalen Zwillings der städtischen Entwässerungsinfrastruktur einschließlich der Einleitungsgewässer ab, welcher Messdaten, Prognosen, Simulationsmodelle, Erfahrungswissen der Akteure sowie eine darauf aufbauende nachvollziehbare Entscheidungsassistenz integriert und so ein transdisziplinäres und systemisches Betriebs- und Risikomanagement von Wasser-Extremereignissen ermöglicht. Im Fokus des Projektes stand die Entwicklung und praktische Umsetzung von Methoden und Werkzeugen für die Erstellung eines virtuellen Abbildes eines städtischen Entwässerungssystems als Basis für eine proaktive Bewältigung von extremen Niederschlagsereignissen im urbanen Raum.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Wasser-Extremereignisse wie starkregeninduzierte Sturzfluten und Dürren erfordern ein Umdenken in der Planung und im Umgang mit der Bestandsinfrastruktur der Wasserableitung und -behandlung im urbanen Raum. Bislang werden die verschiedenen Teilbereiche eines Entwässerungssystems mit ihren jeweiligen Daten und verantwortlichen Entscheidungsträgern in der Regel getrennt voneinander betrachtet. Ein ganzheitlicher, interdisziplinärer Ansatz auf kommunaler Ebene findet im Bereich der Messdatenerfassung, -auswertung, Nutzung von Prognosemodellen und Formalisierung von Erfahrungswissen derzeit nicht statt.

Wichtige Komponenten für eine Verbesserung von Niederschlags- und Hochwasservorhersagen im städtischen Raum sind kurzfristige Ensemble-Vorhersagen der numerischen Wettervorhersagen, z. B. ICON-D2-EPS des Deutschen Wetterdienstes (DWD), aktuelle Radarmessungen und Radar-Nowcasts. Ein in Deutschland vielgenutztes Warnsystem ist das System FEWIS des DWD, ein generisches Warnsystem für Feuerwehr und Katastrophenschutz. Starkregenwarnungen werden darin auf Basis von allgemeinen Grenzwerten ausgegeben. Lokale Begebenheiten, die sich auf die Überflutungsgefahr auswirken, werden nicht berücksichtigt und die Warnung erfolgt ohne Verknüpfung zu einer konkreten Maßnahmenplanung. Überflutungen bei Starkregenereignissen können mithilfe von gekoppelten 1D-Kanalnetz- / 2D-Oberflächenabflussmodellen simuliert werden. Durch den hohen Rechenaufwand eignen sich diese gekoppelten Modelle bislang nicht zur Nutzung in Echtzeitsystemen. Die Ergebnisse von Simulationen können aber für eine bessere Abschätzung der Überflutungsgefahr genutzt werden. Für Kommunen ist darüber hinaus die Verknüpfung einer Prognose mit einer konkreten Maßnahmenplanung wichtig, die in den Routineabläufen der Stadt verankert sein muss (z. B. objektorientierte Warnung), was zu Beginn des Vorhabens jedoch nicht den Regelfall darstellt.

Um auf stark variierende Niederschlagsereignisse angemessen reagieren zu können, wurde im Bereich der Kanalnetze die Kanalnetzsteuerung – also das geplante, belastungsabhängige Eingreifen in die Abflussvorgänge im Kanalnetz – in zahlreichen Fällen bei gutem Kosten-Nutzen-Verhältnis angewendet. Die integrierte Betrachtung von Einzugsgebiet, Kanalnetz, Kläranlage und Vorflutgewässer als den

verschiedenen Teilbereichen eines Entwässerungssystems hat erst in den letzten Jahren ihren Weg in die Simulationspraxis außerhalb des Forschungsbetriebes gefunden, bildet aber eine grundlegende Voraussetzung für das proaktive Management von Wasser-Extremereignissen. Zur Nutzung der Simulationsmodelle für z. B. die Kanalnetzsteuerung ist die Erfassung von Echtzeitmessdaten von Abwassertransport- und Abwasserreinigungsprozessen in kommunalen Leitwarten zielführend und übliche Praxis. Dabei stellt allerdings die Online-Sensorik zur Erfassung der Wasserbeschaffenheit (Güte) noch nicht den allgemeinen Stand der Technik dar, denn der Aufwand für Messbetrieb und Kalibrierung zur Gewährleistung einer hinreichenden Messgenauigkeit übersteigt zu Beginn des Vorhabens den praxisüblichen Rahmen. Des Weiteren ist die unmittelbare Datenverfügbarkeit innerhalb einer Kommune teilweise nicht gegeben, da z. B. getrennte Leitwarten und Systeme für Kanalnetz und Kläranlage existieren.

Um Niederschlags- und Hochwasservorhersagen, Echtzeitmessdaten, Simulationsmodelle, formalisiertes Erfahrungswissen und digitale Assistenten zur Entscheidungsunterstützung zusammenzuführen, bietet sich das Konzept eines Digitalen Zwillinges an. Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentationen physischer Objekte, Produkte, Prozesse oder Systeme und ihre Komponenten, die dynamisch aktualisiert werden, um die tatsächlichen Bedingungen und das Verhalten ihres physischen Gegenstücks widerzuspiegeln. Dazu sind Digitale Zwillinge informationstechnisch mit dem physischen Gegenpart gekoppelt. Sie bestehen also aus Modellen, Systembeschreibungen und insbesondere Verhaltensmodellen und erlauben die Erzeugung von Simulationen und Vorhersagen, die zur Steuerung und Optimierung von Abläufen und zur Vorbeugung von Problemen genutzt werden können. Im Bereich des Wassermanagements kommen digitalen Zwillinge inzwischen vereinzelt zum Einsatz, z. B. für den Betrieb von Kläranlagen. Insgesamt befindet sich die Nutzung von Digitalen Zwillingen für ein derartiges Management zu Beginn des Vorhabens allerdings noch im Anfangsstadium. Herausforderungen sind z. B. die fehlende Interoperabilität zwischen verschiedenen städtischen Systemen und Plattformen, hohe Sicherheitsanforderungen beim Datenaustausch, aber auch Datenschutzbedenken hinsichtlich der Nutzung potenziell sensibler Daten.

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Im Rahmen des ZwiLE Verbundvorhabens entstand am Beispiel der Stadt Hannover ein Digitaler Zwilling, welcher auf Grundlage von Echtzeitmessdaten und Simulationsmodellen den jeweils aktuellen Ist-Zustand einer städtischen Entwässerungsinfrastruktur mit ihren verschiedenen Teilbereichen widerspiegelt. Durch die Einbeziehung von Prognosen der wichtigsten Einflussfaktoren wie insbesondere Niederschlags- und Abflussdaten wird eine vorausschauende Szenario-Analyse ermöglicht als Basis für eine proaktive Bewältigung von extremen Niederschlagsereignissen. Der Digitale Zwilling liefert dem Betriebspersonal der Stadtentwässerung zudem Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Starkregenereignissen, um hierdurch beispielsweise Überflutungsschäden im Stadtgebiet sowie Mischwasserabschläge in die Gewässer zu reduzieren.

Mittels einer kartenbasierten Visualisierung stellt der entwickelte Digitale Zwilling dem Betriebspersonal des städtischen Netzbetreibers zum einen die aktuelle sowie die in naher Zukunft zu erwartende regionale Niederschlagssituation im Stadtgebiet dar. Zum anderen werden den technischen Betriebsmitarbeitenden auf den Leitwarten die aus dem aktuellen sowie dem erwarteten Niederschlag resultierenden möglichen Auswirkungen in den verschiedenen Teilbereichen des Entwässerungssystems verdeutlicht: a) die aktuelle sowie die zu erwartende potenziell mögliche Belastungssituation im Kanalnetz inklusive der Eingangspumpwerke und Kläranlagen, b) die aus aktuellen und prognostizierten Niederschlägen jeweils resultierende modelltechnische Oberflächenüberflutung in den städtischen Teileinzugsgebieten inklusive aktueller und potenzieller kritischer Bereiche sowie c) die hydraulische und stoffliche Beschaffenheit (Quantität und Qualität) der Gewässer Leine und Ihme mitsamt ihrer Beeinflussung durch die aus dem jeweiligen Niederschlagsereignis resultierenden Regenwassereinleitungen sowie Mischwasserabschläge. Schließlich offeriert das System den Mitarbeitenden des städtischen Netzbetreibers sowie den weiteren im Starkregenfall involvierten städtischen Akteure Maßnahmenvorschläge zum Management des akuten Niederschlagsereignisses (in kritischen überflutungsgefährdeten Bereichen z. B.

Absperrung von Unterführungen und Straßen, Warnhinweise bzw. -anzeigen, Evakuierung gefährdeter Liegenschaften und Sicherungen mittels lokaler Schutzmaßnahmen, z. B. temporäre Abschottungen) sowie zur proaktiven Vorbereitung auf das bevorstehende Ereignis (z. B. vorausschauendes Entlüften von Pumpen).

Um die vorgenannten Darstellungen der Systemzustände für das Betriebspersonal zu erzeugen, wurden verschiedene fachlich-technische Lösungsmodul als Grundlage für den Digitalen Zwilling zusammengeführt, u. a.:

1. Echtzeitfähiges Simulationsmodell: Als zentrale Komponente des Digitalen Zwillings wurde ein integriertes, kombiniert hydrologisch-hydrodynamisches Simulationsmodell des Kanalnetzes und der Kläranlagen zur virtuellen Abbildung und Prognose der dynamischen Prozesse entwickelt, das als Grundlage für die Ableitung von Maßnahmen zur Abflusssteuerung dient. Insbesondere die unmittelbare Kopplung von hydrodynamisch und hydrologisch modellierten Netzteilen in einem einzigen Modell besitzt hierbei einen hohen Neuigkeitscharakter.

2. Echtzeitmessdaten: Im Digitalen Zwilling werden nicht nur statische Systemdaten der vorhandenen städtischen Infrastruktur abgebildet, sondern auch dynamische Prozessdaten in Form von Echtzeitmessdaten von Niederschlag, Wassermenge und -qualität. Neben Bestandsmessdaten aus unterschiedlichen Quellen werden zusätzlich Messdaten aus einem temporären Messprogramm mit neu eingerichteter Sensorik (UV/VIS-Spektrometer- und Multi-Parameter-Sonden) in Kanalnetz und Einleitungsgewässern berücksichtigt, die den anderen Komponenten des Digitalen Zwillings über eine FIWARE-basierte Daten- und Kommunikationsinfrastruktur mit standardisierten Schnittstellen bereitgestellt werden.

3. Hochauflösende Niederschlagsprognosen: Für die Simulation des hydrologisch-hydraulischen Prozessgeschehens stellen die Niederschläge die wesentliche Belastungsgröße dar. Für diesen Input werden korrigierte und angeeichte Niederschlagsmessdaten des DWD-Radars Hannover und der 11 städtischen Regenschreiberstationen in Nahezu-Echtzeit aufbereitet, mit 11 städtischen Regenschreiberstationen sowie DWD-Stationsdaten angeeicht und um numerische Wettermodelldaten (ICON-D2-EPS) ergänzt. Niederschlagsprognosen über 2 Stunden werden mittels Radar-Nowcasts als Ensemblevorhersagen mit 500 m-Rasterauflösung erzeugt.

4. Überflutungsprognose: Zudem wurde ein innovativer, Radar-basierter Ansatz zur Vorhersage des urbanen Überflutungsrisikos entwickelt, der auf den zuvor beschriebenen Ensemble-Nowcasts sowie vorgerechneten Modellergebnissen aus einem gekoppelten 1D- / 2D-Modell zur Simulation von Kanal- und Oberflächenabfluss basiert und als Ergebnis für das konkrete bzw. prognostizierte Niederschlagsereignis eine Überflutungsrisikokarte für das Stadtgebiet von Hannover liefert.

5. Wissensbasis und Entscheidungsunterstützung: Zudem wurde das beim Fachpersonal des städtischen Netzbetreibers in Bezug auf Starkregenereignisse vorhandene Erfahrungswissen erhoben, formalisiert und mit den Simulationsmodellen kombiniert, um eine digitale, aktualisier- und erweiterbare Wissensbasis als Grundlage für eine nachvollziehbare Entscheidungsassistenz zu schaffen.

Bei der Entwicklung des Digitalen Zwillings wurde auf eine hohe Offenheit und Übertragbarkeit der Herangehensweise auf andere Städte und Gemeinden geachtet. So ist der gewählte Ansatz mit einem moderaten Anpassungsbedarf (insbesondere zur Berücksichtigung alternativer städtischer Gegebenheiten) auch auf andere Anwendungsfälle außerhalb des Pilotgebietes Hannover übertragbar. Wichtig dabei sind v. a. die frühzeitige Klärung von organisatorischen und rechtlichen Fragestellungen bzw. von Anforderungen für Kritische Infrastrukturen (KRITIS) in Bezug auf eine stadtinterne Bereitstellung der erforderlichen meteorologischen und hydrologischen Modell- und Messdaten sowie der Bestands- und Infrastrukturdaten des Entwässerungssystems und die Einbindung der für die Entwicklung des Digitalen Zwillings erforderlichen externen Softwareanwendungen (z. B. das Simulationssystem SIMBA#).

II. Teil II: Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Durch den Klimawandel nehmen extreme Wettersituationen wie Starkregen oder Dürren auch in Mitteleuropa zu. So kommt es in Deutschland seit einigen Jahren als Folge von Starkregen deutlich häufiger zu Überschwemmungen und Sturzfluten, die zu immer größeren wirtschaftlichen und ökologischen Schäden führen. Städte sind einerseits besonders gefährdet, andererseits aber aufgrund ihrer dichten Bebauung auch ein Teil des Problems. Dabei spielen die städtischen Entwässerungssysteme mit ihren verschiedenen Teilbereichen eine entscheidende Rolle, da sie bei heftigen Niederschlägen an ihre Grenzen stoßen.

Hydrologische Extremsituationen erfordern daher neue Ansätze für das Management des Wassersektors im urbanen Raum. Denn oftmals sind die im Bereich der Prognose und des Risikomanagements vorhandenen Digitalisierungsansätze entweder auf einzelne Teilaspekte des Entwässerungssystems beschränkt (vgl. z. B. städtische Starkregengefahrenkarten zur Visualisierung des Überflutungsrisikos auf den städtischen Oberflächen) oder scheitern beim Versuch der integralen Betrachtung aller relevanten Sektoren zum Teil an fehlenden Daten, veraltetem Datenmanagement und unzureichender Datenstandardisierung. Durch eine konsequente Vernetzung von Bestandsdaten und Echtzeitmessdaten verbunden mit der Nutzung von echtzeitfähigen Vorhersage- und Simulationsmodellen sowie von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) gilt es, für den urbanen Funktionsraum neue Konzepte und Strategien für den Umgang mit extremen hydrologischen Ereignissen zu erarbeiten.

Projektziele und Aufgabenstellung

Das vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) geförderte Verbundforschungsvorhaben ZwiLIE zielte daher auf die Entwicklung eines Digitalen Zwillings der städtischen Entwässerungsinfrastruktur einschließlich der Einleitungsgewässer ab, welcher Messdaten, Prognosen, Simulationsmodelle, Erfahrungswissen der Akteure sowie eine darauf aufbauende nachvollziehbare Entscheidungsassistenz integriert und so ein transdisziplinäres und systemisches Betriebs- und Risikomanagement von Wasser-Extremereignissen ermöglicht. Im Fokus des Projektes stand die Entwicklung und praktische Umsetzung von Methoden und Werkzeugen für die Erstellung eines virtuellen Abbildes eines städtischen Entwässerungssystems als Basis für eine proaktive Bewältigung von extremen Niederschlagsereignissen im urbanen Raum. Am Beispiel des Entwässerungssystems der Stadt Hannover mit vorgelagerten Einzugsgebieten und nachgelagerten Oberflächengewässern sollte ein Digitaler Zwilling entstehen, welcher auf Grundlage von Echtzeitmessdaten und Simulationsmodellen den aktuellen Ist-Zustand des abgebildeten Systems widerspiegelt und durch die Einbeziehung von Prognosen der wichtigsten Einflussfaktoren wie z. B. Niederschlags- und Abflussdaten eine vorausschauende Szenario-Analyse ermöglicht. Hierzu waren unter Berücksichtigung der Datensicherheit geeignete Konzepte zur sektorübergreifenden Datengenerierung und -aggregation sowie für ein Standard-basiertes Datenmanagementsystem zu entwickeln. Das System sollte dem Betriebspersonal des Projektpartners Stadtentwässerung Hannover (SEH) sowie den weiteren städtischen Akteuren zudem mit Hilfe einer nachvollziehbaren Entscheidungsunterstützung unter Einbeziehung von formalisiertem Erfahrungswissen und Simulationsergebnissen Handlungsempfehlungen zur Vorsorge und zum Umgang während und nach extremen Niederschlagsereignissen liefern, um hierdurch beispielsweise Überflutungsschäden im Stadtgebiet sowie Mischwasserabschläge in die Gewässer zu reduzieren. Die vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen sollten dem städtischen Fachpersonal dabei in einer nachvollziehbaren Weise transparent erläutert werden, um die Akzeptanz der empfohlenen Maßnahmen und daraus resultierend die späteren Umsetzungschancen zu erhöhen. Schließlich sollte das entwickelte System durch das SEH-Betriebspersonal im Rahmen der Wasserinfrastrukturumgebung der Stadt Hannover einem realitätsnahen Test unter Heranziehung historischer Starkregenereignisse unterworfen werden, um aus der kritischen Bewertung des Betriebs des virtuellen Systemabbilds sowohl weitere Überarbeitungs- und Anpassungsbedarfe als auch Schlussfolgerungen für die Übertragbarkeit des in ZwiLIE entwickelten Digitalen Zwillings auf andere Anwendungsgebiete außerhalb der Pilotregion Hannover abzuleiten.

Zur Sicherstellung einer derartigen Übertragbarkeit der erzielten Projektergebnisse sollten softwareunabhängige und standardisierte Datenformaten zum Einsatz kommen, um keine Einzel- und Individualösungen zu schaffen.

Abbildung 1 stellt den ganzheitlichen und interdisziplinären Ansatz des Forschungsprojekts dar, bei dem bisherige vertikale und horizontale Informations- und Ablauforganisationen innerhalb der verschiedenen Teilbereiche des Entwässerungssystems (vgl. hierzu die Abbildung 3 im nachfolgenden Abschnitt II.2) durch eine vernetzte Struktur abgelöst werden.

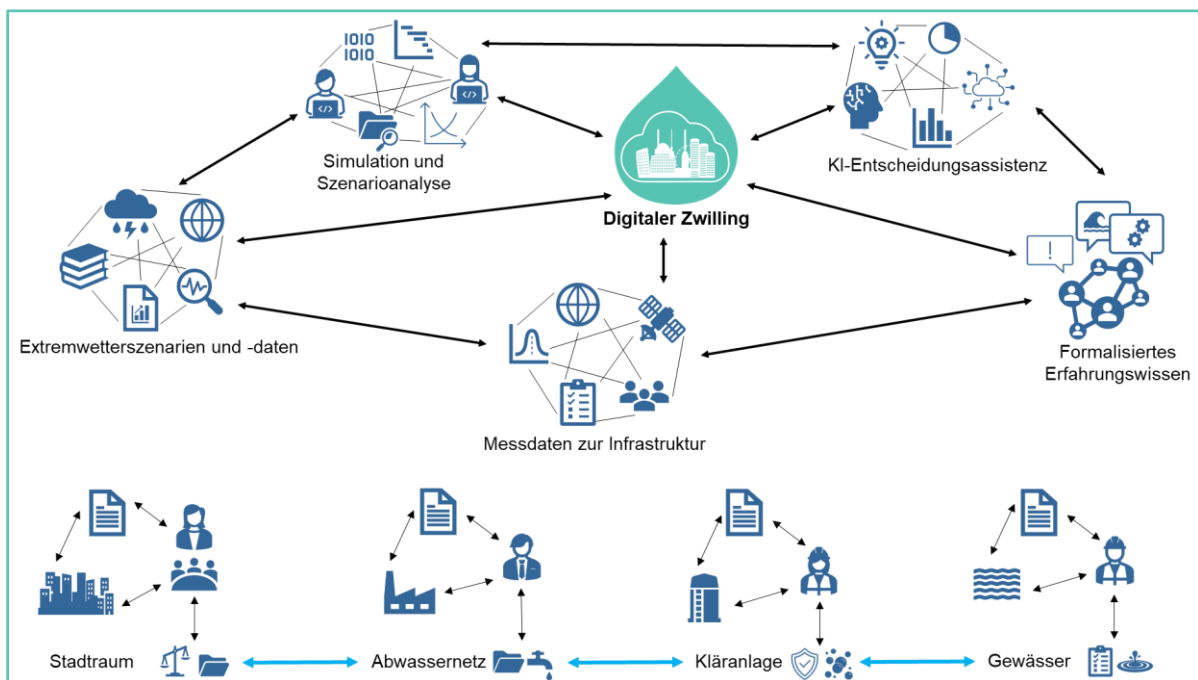


Abbildung 1: Ganzheitlicher interdisziplinär vernetzter Ansatz des Digitalen Zwillings

Anwendungsfälle für den Digitalen Zwilling

Die Anforderungen an das Gesamtsystem des Digitalen Zwillings sowie an seine einzelnen Teilkomponenten wurden aus der Perspektive verschiedener Interessengruppen (Betreiber und Nutzer des Entwässerungssystems, Kommune, Gewässerschutz, Ordnungsdienste) formuliert. Dabei wurden drei umzusetzende Anwendungsfälle (Use Cases) identifiziert. Für die nachfolgend skizzierten Anwendungsfälle (1) und (2) ist ein Online-Betrieb des Digitalen Zwillings in Nahezu-Echtzeit erforderlich, wohingegen der Anwendungsfall (3) für die Planungsprozesse einen Offlinebetrieb erlaubt.

(1) Abbildung des Ist-Zustands:

Darstellung des jeweils aktuellen Ist-Zustands des physischen Entwässerungssystems (online) einschließlich des aus aktuellen Niederschlägen resultierenden aktuellen Oberflächenabflusses in den städtischen Teileinzugsgebieten sowie der aktuellen stofflichen Gewässerbeschaffenheit (Qualität), sowohl auf Basis von Echtzeitmessdaten als auch unter Nutzung von aktuellen Simulationsergebnissen.

(2) Vorhersage zu erwartender Problembereiche und Ableitung kurzfristiger Maßnahmen gegen die negativen Auswirkungen von akuten Wasser-Extremereignissen:

Vorausschauende Szenario-Analysen mit kurzfristiger zeitlicher Orientierung (online) durch Einbeziehung modelltechnischer Prognosen der wichtigsten Einflussfaktoren und fortlaufenden Abgleich mit

Echtzeitmessdaten; daraus Ableitung schwachstellenbezogener, auf Erfahrungswissen basierender Gegenstrategien für identifizierte Problembereiche als nachvollziehbare Handlungsvorschläge (z. B. Abflusssteuerung und andere betriebliche Eingriffe, Straßensperrungen, Nutzerwarnungen).

(3) Langfristige Planung von Infrastrukturanpassungen an Wasser-Extremereignisse:

Szenario-Analysen mit langfristiger zeitlicher Orientierung (offline) auf Grundlage modelltechnischer Prognosen einschließlich Langzeitkontinuumssimulationen für die Überplanung des Entwässerungssystems (grundlegende strategische Ausrichtung und konkreter Aus- / Umbau von Kanalisation, Klärwerken etc.) zur Bewältigung zukünftiger Anforderungen infolge klimatischer Veränderungen.

Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen der Fördermaßnahme

Das Forschungsprojekt ZwillE deckt wesentliche Anteile der förderpolitischen Ziele der Fördermaßnahme „Wasser-Extremereignisse“ im Bundesprogramm „Wasser-Forschung und Wasser-Innovationen für Nachhaltigkeit – Wasser:N“ ab. Das Vorhaben war so aufgebaut, dass Themen aus den drei nachfolgenden Bereichen der Förderbekanntmachung integriert behandelt wurden:

- 2.1 Digitale Instrumente für Monitoring, Analyse, Vorhersage und Kommunikation,*
- 2.2 Risikomanagement gegensätzlicher hydrologischer Extreme sowie*
- 2.3 Urbane extreme Wasserereignisse.*

Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten lag dabei auf dem Themenbereich 2.1 „Digitale Instrumente für Monitoring, Analyse, Vorhersage und Kommunikation“ sowie auf einer praxisnahen Erprobung dieser digitalen Instrumente im realen Anwendungskontext. So zielte ZwillE darauf ab, einen Beitrag zu folgenden Zielen zu leisten:

- Verbesserung von Werkzeugen zur Vorhersage hydrologischer Extremsituationen (2.1),
- Bereitstellung von Instrumenten für ein umfassendes Risikomanagement von Einrichtungen zur Abwasserentsorgung (2.1),
- Weiterentwicklung von Informations- und Frühwarnsystemen: intelligente Instrumente für eine effektive Krisenkommunikation zwischen Akteuren im Ereignisfall (2.1).

Diese Themen waren Kernbestandteile der in ZwillE bearbeiteten Arbeitspakete bzw. des entwickelten Digitalen Zwillings als Informations- und Frühwarnsystem.

Weitere wichtige Bestandteile im Projekt ZwillE waren:

- Entwicklung geeigneter Management-Strategien zur Anpassung und Minderung der Folgen von Wasser-Extremereignissen (2.2) sowie
- Entwicklung von Indikatoren für die multikriterielle Bewertung und Entwicklung von Entscheidungswerkzeugen zur Bewertung von Handlungsalternativen (2.2).

Aus dem Themenfeld 2.3 wurde das Ziel „Entwicklung widerstandsfähiger und nachhaltiger urbaner Wasserinfrastrukturen“ adressiert, wobei vor allem der Aspekt Sicherstellung der Abwasserentsorgung auch unter Extrembedingungen behandelt wurde.

Partnerstruktur und relevante Expertise

Das Verbundvorhaben ZwillE wurde in enger Zusammenarbeit von sechs unterschiedlichen Projektpartnern aus kommunaler Verwaltung, Industrie und Wissenschaft realisiert. Die nachfolgende Abbildung 2 gibt einen Überblick über die beteiligten Projektpartner mit ihren jeweiligen Arbeitsschwerpunkten.



Abbildung 2: ZwillE Projektpartner und ihre Arbeitsschwerpunkte

Die bisherigen Arbeiten der Projektpartner sowie das eingebrachte Know-how lagen jeweils in unterschiedlichen Teilbereichen des Forschungsvorhabens und waren unterschiedlich stark ausgeprägt. Neben der allgemein eingebrachten Expertise nahm jeder Partner im Projektkonsortium eine eigene Rolle ein, welche zum Gelingen des Gesamtvorhabens unerlässlich war. Die nachfolgende Tabelle 1 liefert eine Darstellung der jeweiligen Vorarbeiten und Expertisen der Projektpartner sowie der sich daraus ergebenden jeweiligen Rollen im Projekt:

| | | |
|-----|---|--|
| SEH | <p>Stadtentwässerung Hannover Wir klären das.</p> | <p>Um die stetige Weiterentwicklung und Anpassung der siedlungswasserwirtschaftlichen Infrastruktur an immer neue Herausforderungen meistern zu können, ist die Stadtentwässerung Hannover (SEH) seit vielen Jahren in verschiedenen Forschungsvorhaben zum Themengebiet „Klimafolgenanpassung“ aktiv. Zudem arbeiten Mitarbeitende der SEH auch in verschiedenen Fachgremien, z. B. der DWA-AG ES 2.4 „Integrale Abflusssteuerung“, mit.</p> |
| | <p>Im ZwillE Verbundvorhaben lieferte SEH als Entwässerungsinfrastrukturbetreiber der Pilotregion Hannover den Anwendungsfall für den zu entwickelnden Digitalen Zwilling und nahm vor diesem Hintergrund eine mit allen weiteren Projektpartnern eng verzahnte Rolle ein, die zudem innerhalb der verschiedenen Sachgebiete der SEH sowie der weiteren Fachbereiche der Stadt eines hohen Koordinierungsaufwands bedurfte.</p> | |

| | | |
|------|---|--|
| ifs |  | <p>Die Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH (ifs) ist ein mittelständisches Ingenieurbüro mit langjähriger Erfahrung in der Planung von Siedlungsentwässerungsprojekten sowie der Hydrometrie. Zum Dienstleistungsspektrum gehört des Weiteren die Entwicklung von Software zur Messdatenauswertung, zur Modellierung von Wassersystemen und zur Dimensionierung von Wasserbewirtschaftungsanlagen. Herr Dr. Ristenpart ist Mitglied in der DWA-AG ES 1.7 „Quantitative und qualitative Abflussmessung“ sowie der „Sewer Systems & Processes“ Arbeitsgruppe des IWA – IAHR Joint Committee on Urban Drainage.</p> <p>Im ZwillE Verbundvorhaben übernahm ifs die Datenerfassung und Messdatenverarbeitung im Kanalnetz und Gewässer. Hierzu zählten neben der Datenrecherche und der Messkonzeption auch die Durchführung sowie die Auswertung der Messungen. Zudem führte ifs die Gefährdungsanalyse für Überschwemmungen im urbanen Raum mittels detaillierter 2D-Oberflächenabflusssimulationen durch. Aufgrund der langjährigen Erfahrungen sowohl in der Entwässerungs- und Bewirtschaftungsplanung als auch im Messwesen hat ifs ferner bei der Formalisierung von Erfahrungswissen zur Bewältigung von Extremwasserszenarien sowie bei Umsetzung und Test des Digitalen Zwillings mitgewirkt.</p> |
| h&m |  hydro & meteo | <p>Die hydro & meteo GmbH (h&m) ist ein hydrometeorologisches Ingenieurbüro mit Schwerpunkten in der Analyse und Bearbeitung von Niederschlagsdaten (Weterradar und -stationen), Erstellung von Niederschlagsvorhersagen, Betrieb von Warnsystemen, Analyse von Klimaaufzeichnungen, Bewertung und Downscaling von Klimaprojektionen und Qualitätsprüfung von meteorologischen und hydrologischen Messdaten. Durch Herrn Dr. Einfalt bestehen Mitgliedschaften in Arbeitsgruppen, u. a. VDI/DIN (Bereich 3786: Umweltmeteorologie) und die Anerkennung als beratender Meteorologe (DMG) mit dem Arbeitsgebiet Hydrometeorologie.</p> <p>Die Rolle von h&m im ZwillE Verbundprojekt lag in der Prozessierung von Niederschlagsinformationen (historisch, aktuell, projiziert), ihrer Bewertung und Bereitstellung für den Digitalen Zwilling sowie der projektbezogenen Verwertung anderer meteorologischer Messungen, Modellrechnungen und der Entwicklung eines echtzeitfähigen Verfahrens zur Überflutungsabschätzung.</p> |
| ifak |  | <p>Das ifak – Institut für Automation und Kommunikation e. V. besteht seit 1991 in der Rechtsform eines gemeinnützigen eingetragenen Trägervereins und beschäftigt mehr als 50 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in den Fachbereichen Elektrotechnik, Steuerungs- und Regelungstechnik, Informatik und Umweltingenieurwesen. Die wissenschaftliche Arbeit des ifak gliedert sich in vier Geschäftsfelder, von denen das Geschäftsfeld „Wasser & Energie“ als eine der weltweit führenden Arbeitsgruppen auf dem Gebiet der Modellierung und Regelung von Abwassersystemen an dem Verbundprojekt mitgewirkt hat. Aus Vorprojekten und langjähriger Forschung werden u. a. Expertisen zu Simulationswerkzeugen zur Dimensionierung und Optimierung von Kläranlagen und Kanalnetzen (SIMBA#) eingebracht. Mitarbeitende des ifak sind in zahlreichen nationalen und internationalen Fachgremien tätig (u. a. DWA-AG ES 2.4 „Integrale Abflussteuerung“; IWA-IAHR-Arbeitsgruppe „Real time control“; DWA-KA 13 „Automatisierung von Kläranlagen“; VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik).</p> <p>Die Rolle des ifak im ZwillE Verbundprojekt lag in der ganzheitlichen Modellierung und Simulation der städtischen Entwässerungsinfrastruktur als wesentliche Grundlage für die Realisierung des Digitalen Zwillings. Als technische Basis brachte ifak das Simulationswerkzeug SIMBA# ein, das im Projekt weiterentwickelt wurde, um seine Anwendung als Digitaler Zwilling zu ermöglichen.</p> |
| IAB |  Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH | <p>Am IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH forschen und entwickeln über 120 Mitarbeitende in den Tätigkeitsfeldern „Baustoffe und Verfahrenstechnik“, „Bausysteme und Bauteile“, „Tief- und Rohrleitungsbau“ sowie „Energie und Gebäudetechnik“. Relevante Expertisen bestehen in der Entwicklung von Entscheidungsunterstützungssystemen, der Erstellung von Messkonzepten und der Simulation fluider Medien.</p> |

| | |
|---------------|--|
| | <p>Die Rolle des IAB im ZwillE Verbundprojekt lag in der Entwicklung einer digitalen und an neue Gegebenheiten anpassbaren Wissensbasis zur Nutzung des Erfahrungswissens des städtischen Fachpersonals in Bezug auf kurz-, mittel- und langfristige Gegenstrategien im Extremwetterfall. Hinzu kam die Einbringung von messtechnischer Expertise und die Betrachtung von gekoppelten Sensordaten für die Nutzbarmachung im Digitalen Zwilling.</p> |
| Atos / Eviden | <p>Atos Atos SE als Muttergesellschaft der am Projekt teilnehmenden Einheit Eviden Germany GmbH ist ein weltweit führender Anbieter im Bereich der digitalen Transformation. Mit ca. 67.000 Mitarbeitenden agiert das Unternehmen in 61 Ländern und bietet maßgeschneiderte KI-gestützte End-to-End Lösungen für alle Branchen. Atos / Eviden verfügt über umfangreiches Wissen zu KI-basierten Technologien und erklärbaren Assistenz- und regelbasierten Empfehlungsverfahren sowie Digital-Twin-Lösungen in industriellen Kontexten.</p> <p>Im ZwillE Verbundvorhaben übernahm Atos / Eviden die Konsortialleitung des Vorhabens. Des Weiteren hatte Atos / Eviden die Rolle des Softwarearchitekten inne und war maßgeblich an der Definition der Systemarchitektur, der Feinarchitektur einer nachvollziehbaren Entscheidungsassistenz sowie der Spezifikation einer geeigneten Standard-basierten Daten- und Kommunikationsinfrastruktur für das Gesamtsystem beteiligt. In der Rolle als Softwareentwickler übernahm Atos / Eviden hauptsächlich die Realisierung der Daten- und Kommunikationsinfrastruktur sowie der nachvollziehbaren Entscheidungsassistenz. In der Rolle des Systemintegrators erfolgte die Integration der verantworteten Teilkomponenten in das Gesamtsystem des Digitalen Zwillings.</p> |

Tabelle 1: Expertisen und Rollen der einzelnen Projektpartner des ZwillE Verbundvorhabens

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Wasser-Extremereignisse wie starkregeninduzierte Sturzfluten und Dürren nehmen in den letzten Jahren weltweit merklich zu. Diese erfordern ein Umdenken in der Planung und im Umgang mit der Bestandsinfrastruktur der Wasserableitung und -behandlung im urbanen Raum. Bislang werden die verschiedenen Teilbereiche eines Entwässerungssystems mit ihren jeweiligen Daten und verantwortlichen Entscheidungsträgern in der Regel getrennt voneinander betrachtet. Ein ganzheitlicher, interdisziplinärer Ansatz auf kommunaler Ebene findet im Bereich der Messdatenerfassung, -auswertung, Nutzung von Prognosemodellen und Formalisierung von Erfahrungswissen derzeit nicht statt (vgl. Abbildung 3). Insbesondere im Bereich des „Smart City“ Ansatzes scheitert die Umsetzung oft an fehlenden Datenstandards und Fragen der Datensicherheit.

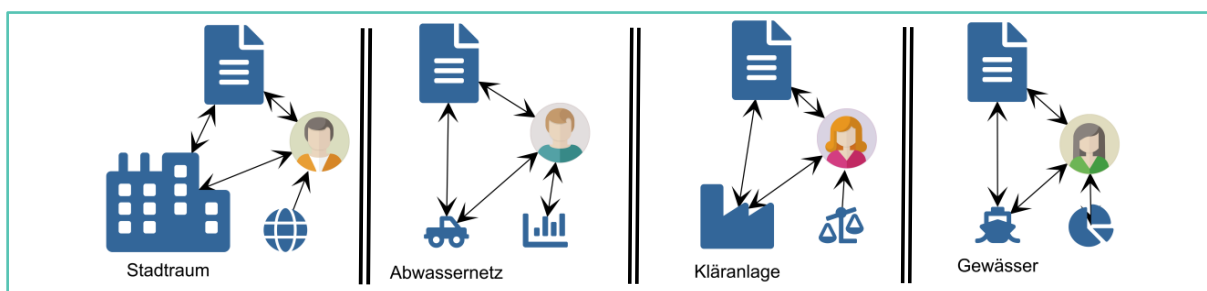


Abbildung 3: Fehlende Vernetzung der Teilbereiche des Entwässerungssystems

Durch die Verknüpfung von verschiedenen Datenquellen und Vorhersagen lässt sich eine Verbesserung von **Niederschlags- und Hochwasservorhersagen im städtischen Raum** erreichen (vgl. z. B. Rossa et al. 2011; Jasper-Tönnies et al. 2018). Wichtige Komponenten sind dabei kurzfristige Ensemble-Vorhersagen der numerischen Wettervorhersagen, z. B. ICON-D2-EPS des Deutschen Wetterdienstes (DWD), aktuelle Radarmessungen und Radar-Nowcasts. Ein in Deutschland vielgenutztes Warnsystem

ist das System FEWIS des DWD, ein generisches Warnsystem für Feuerwehr und Katastrophenschutz. Starkregenwarnungen werden darin auf Basis von allgemeinen Grenzwerten ausgegeben. Lokale Begebenheiten, die sich auf die Überflutungsgefahr auswirken, werden nicht berücksichtigt und die Warnung erfolgt ohne Verknüpfung zu einer konkreten Maßnahmenplanung. Seit 2017 mit Start des Open Data Konzepts des DWD gab es Entwicklungen für Kommunen, die angepasste, Radar-basierte Niederschlagsvorhersagen und -warnungen ermöglichen und in Pilotprojekten genutzt werden (z. B. Warn-dienst Binnenhochwasser Hamburg, Warnsystem Solingen). Überflutungen bei Starkregenereignissen können mithilfe von gekoppelten 1D-Kanalnetz / 2D-Oberflächenabflussmodellen simuliert werden. Durch den hohen Rechenaufwand eignen sich diese gekoppelten Modelle bislang nicht zur Nutzung in Echtzeitsystemen. Die Ergebnisse von Simulationen können aber für eine bessere Abschätzung der Überflutungsgefahr genutzt werden. Für Kommunen ist ferner die Verknüpfung einer Prognose mit einer konkreten Maßnahmenplanung wichtig, die in den Routineabläufen der Stadt verankert sein muss (z. B. objektorientierte Warnung), was zu Beginn des Vorhabens jedoch nicht den Regelfall darstellt.

Um auf stark variierende Niederschlagsereignisse angemessen reagieren zu können, wurde im Bereich der Kanalnetze die **Kanalnetzsteuerung** – also das geplante, belastungsabhängige Eingreifen in die Abflussvorgänge im Kanalnetz – in zahlreichen Fällen (vgl. Pabst 2017) bei gutem Kosten-Nutzen-Verhältnis (vgl. Beeneken et al. 2013) angewendet. Ansätze der modellgestützten Regelung finden im Bereich der Kanalnetzsteuerung bereits seit längerem Anwendung (vgl. Pleau et al. 2005; Schütze et al. 2002). Erste Ansätze der Anwendung maschineller Lernverfahren in dieser Anwendungsdomäne wurden bereits 1993 verfolgt (vgl. Khelil et al. 1993). Aufgrund technologischer Fortschritte in den letzten Jahren erscheint der Übergang von sektorbezogenen Modellen in eine stadtintegrierte Simulation durch ein digitales Gesamtmodell realistisch und aufgrund des komplexen Wechselspiels der Wasserakteure auch geboten.

Mit **Simulationsmodellen**, die in Echtzeit parallel zu einem realen Prozess simuliert werden (Online-Simulation), lassen sich unterschiedliche Aufgaben lösen. Im Kontext von ZwiIE relevant ist die Nutzung von Modellen, um als Beobachtermodelle unbekannte Zustandsgrößen zu ermitteln (vgl. Vanrolleghem et al. 1996). Eine zweite Anwendungsmöglichkeit besteht in der modellgestützten Regelung von Anlagen (Model Based Predictive Control (MBPC), vgl. Kouvaritakis et al. 1999). Beide Prinzipien werden bereits in komplexen oder wichtigen Steuerungsaufgaben verwendet, z. B. in der Prozessindustrie. Bei der modellgestützten Betriebsführung von Kläranlagen gibt es nach einer ersten wenig erfolgreichen Welle von Anwendungen zwischen 1990 und 2000 (vgl. Weijers 2000; Alex et al. 1999) inzwischen durch verbesserte technische Voraussetzungen in Kombination mit Machine-Learning-Ansätzen die nötigen Bedingungen für eine erfolgreiche Anwendung (vgl. Rieger/Alex 2013; Hübner/Alex 2018). Die integrierte Betrachtung von Einzugsgebiet, Kanalnetz, Kläranlage und Vorflutgewässer als den verschiedenen Teilbereichen eines Entwässerungssystems hat erst in den letzten Jahren ihren Weg in die Simulationspraxis außerhalb des Forschungsbetriebes gefunden (vgl. Schütze et al. 2017), bildet aber eine grundlegende Voraussetzung für das proaktive Management von Wasser-Extremereignissen.

Um die Simulationsmodelle hinsichtlich ihrer Validität, dem Umgang mit Unvorhergesehenem, der Genauigkeit der Vorhersage sowie der Entscheidungsunterstützung zu verbessern, lassen sich Verfahren der **Künstlichen Intelligenz** (KI) einsetzen. KI-Verfahren werden aktuell u. a. zur Klassifikation von Bildern sowie in der Sprach- und der Mustererkennung genutzt. Ein weiterer Bereich der KI behandelt kognitive Algorithmen, Wissensverarbeitung und Entscheidungsunterstützung (Decision Management Systems). Dabei stehen diese Verfahren nicht isoliert, sondern werden in komplexen Lösungen auch kombiniert. Die Nutzung von KI ermöglicht zudem die Integration des Wissens der Experten in KI-basierte Expertensysteme und sog. Wissensdatenbanken. Auf dieser Basis können dann entsprechende Inferenzsysteme z. B. für fallbasiertes Schließen zur Problemlösungsunterstützung eingesetzt werden (vgl. Kolodner 1993).

Zur Nutzung der Simulationsmodelle für z. B. die Kanalnetzsteuerung ist die **Erfassung von Echtzeit-messdaten** von Abwassertransport- und Abwasserreinigungsprozessen in kommunalen Leitwarten zielführend und übliche Praxis. Dabei stellt allerdings die Online-Sensorik zur Erfassung der Wasserbeschaffenheit (Güte) noch nicht den allgemeinen Stand der Technik dar, denn der Aufwand für Messbetrieb und Kalibrierung zur Gewährleistung einer hinreichenden Messgenauigkeit übersteigt zu Beginn

des Vorhabens den praxisüblichen Rahmen. Der Umfang der Datenerhebung (Anzahl an Messstellen) variiert jedoch häufig stark, u. a. abhängig von der Größe des Betreibers (angeschlossene Einwohner, Kanalnetzlänge). Die Daten werden für die Betriebsüberwachung der Anlagen und in geringerem Umfang auch für ihre Steuerung genutzt. Letztere erfolgt jedoch oftmals manuell und häufig nach „subjektiver“ Entscheidung (so auch beim Verbundpartner SEH). Des Weiteren ist die unmittelbare Datenverfügbarkeit innerhalb einer Kommune teilweise nicht gegeben, da z. B. getrennte Leitwarten und Systeme für Kanalnetz und Kläranlage existieren.

Der Mensch spielt im Umgang mit Wasser-Extremereignissen eine entscheidende Rolle. Einerseits legt er Maßnahmenpläne fest und beurteilt die Situation. Andererseits ist er ein wichtiger Akteur in der Kommunikation und Vernetzung der Gesamtdatenlage. Die Herausforderung besteht darin, das vorhandene Wissen zu externalisieren. Die Formalisierung des Stakeholder-Wissens ist u. a. für die Optimierung der Prozessabläufe, die Entwicklung von Managementansätzen sowie für die Aus- und Weiterbildung der Mitarbeitenden im Unternehmen nutzbar (vgl. z. B. Lehnert 2019). Mit Hilfe **digitaler Assistenten als Entscheidungsunterstützung** lässt sich die Mensch-Maschine-Interaktion im Planungs-, Ausbildungs- oder Ereignisfall verbessern (vgl. z. B. Hecker et al. 2018). Diese kombinieren domänenspezifische Interaktionsmodelle für typische Handlungsmuster unter Einbindung der Wissensbasis der bekannten Maßnahmen mit Problemlösungs-Know-how und der Möglichkeit, die Konsequenzen von Entscheidungen unter zur Hilfenahme von Simulationen zu analysieren. Vorgeschlagene Handlungsoptionen werden dabei transparent und nachvollziehbar erläutert.

Um Niederschlags- und Hochwasservorhersagen, Echtzeitmessdaten, Simulationsmodelle, formalisiertes Erfahrungswissen und digitale Assistenten zur Entscheidungsunterstützung zusammenzuführen, bietet sich das Konzept eines **Digitalen Zwillinges** an. Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentationen physischer Objekte, Produkte, Prozesse oder Systeme und ihre Komponenten, die dynamisch aktualisiert werden, um die tatsächlichen Bedingungen und das Verhalten ihres physischen Gegenstücks widerzuspiegeln. Dazu sind Digitale Zwillinge informationstechnisch mit dem physischen Gegenpart gekoppelt. Sie bestehen also aus Modellen, Systembeschreibungen und insbesondere Verhaltensmodellen. In einem Smart-City-Kontext bieten Digitale Zwillinge hohe Potenziale, um urbane Infrastrukturen effizienter zu gestalten und um Entscheidungsfindungsprozesse zu unterstützen. Ein Digitaler Zwilling wird dabei durch die kontinuierliche Erhebung von (Echtzeit-)Daten aus verschiedenen Quellen, insbesondere von Sensoren sowie vorhandenen Bestands- und Infrastrukturdaten des abzubildenden physischen Systems, erstellt und aktualisiert. Diese im Digitalen Zwilling gesammelten Daten spiegeln die realen Bedingungen wider. Durch ihre Verarbeitung lassen sich Simulationen und Vorhersagen erzeugen, die zur Steuerung und Optimierung von Abläufen und zur Vorbeugung von Problemen genutzt werden können. Hierfür können physikalisch-basierte Modelle, statistische bzw. empirisch-statistische Verfahren, Verfahren des maschinellen Lernens oder auch Kombinationen dieser Verfahren zum Einsatz kommen. Eine wesentliche Voraussetzung ist, dass die Verfahren in der Lage sind, Anomalien in den abgebildeten Prozessen zu erkennen. Idealerweise sind sie darüber hinaus in der Lage, die zugrunde liegenden Ursachen der Anomalien zu ermitteln, Folgen abzuleiten und eine automatisierte Verknüpfung mit geeigneten Handlungsempfehlungen herzustellen. Anwendungsbereiche für Digitale Zwillinge im städtischen Kontext stellen etwa Verkehrsmanagement und -optimierung (vgl. z. B. Tao et al. 2018) oder die Überwachung und Wartung städtischer Infrastruktur wie Brücken, Straßen und Gebäude dar (vgl. Batty 2018). In Deutschland entwickeln die Städte Hamburg, München und Leipzig urbane digitale Zwillinge zur Unterstützung der Stadtplanung (vgl. Connected Urban Twins 2025). Im Bereich des Wassermanagements kommen digitalen Zwillinge inzwischen vereinzelt zum Einsatz (vgl. Water World 2020; Mankowski 2020), z. B. für den Betrieb von Kläranlagen (vgl. Alex 2021). Insgesamt befindet sich die Nutzung von Digitalen Zwillingen für ein derartiges Management allerdings noch im Anfangsstadium. Herausforderungen sind z. B. die fehlende Interoperabilität zwischen verschiedenen städtischen Systemen und Plattformen, hohe Sicherheitsanforderungen beim Datenaustausch, aber auch Datenschutzbedenken hinsichtlich der Nutzung potenziell sensibler Daten. Hier können **FIWARE-konforme technische Architekturen und Komponenten bzw. Dienste** zum Einsatz kommen (vgl. z. B. FIWARE 2024; FIWARE 2025), wodurch Daten aus unterschiedlichen, verteilten Quellen in einer einheitlichen Struktur dynamisch verfügbar und für unterschiedliche Anwendungen nutzbar gemacht

werden. Ein solches FIWARE-basiertes Konzept bietet sich auch für das Wassermanagement und für den Spezialfall des Managements von Wasser-Extremereignissen mittels eines Digitalen Zwillings an.

Von der Stadtentwässerung Hannover (SEH) werden zu Beginn des Vorhabens und aktuell eine Vielzahl an Mess- und Betriebsdaten erhoben und für die Betriebsüberwachung, Kanalnetzplanung und teilweise auch bereits für die Steuerung verwendet. Dies umfasst langjährige Niederschlagsdaten von elf Regenschreiberstationen, mehr als 150 Wasserstands- und Abflussmessungen im Kanalnetz sowie zusätzliche Messdaten auf den Kläranlagen. Für eine integrale Modellbetrachtung stehen langjährige Abfluss- und Wasserstandsmessungen in den großen Fließgewässern Leine und Ihme sowie Fließgewässerquerprofile und -achsen zur Verfügung. Dabei basiert das **Management von Wasser-Extremereignissen bei der SEH** zu Vorhabensbeginn im Wesentlichen auf den relevanten Messdaten, die graphisch und tabellarisch auf den Leitwarten dargestellt werden. Ein Teil der Regelungen erfolgt automatisch mittels eines Regelkreises. Das Betriebspersonal erhält zudem automatisch Hinweise bei Unter- bzw. Überschreiten von definierten Wertebereichen und Betriebszuständen, wobei aktuell keine Prognose- oder integrale Steuerungsansätze Eingang in die Betriebsweise des Kanalnetzes und der Klärwerke finden. Lediglich die auf den Leitwarten verfügbare deutschlandweite Radarvorhersage des DWD dient als Grundlage für manuelle Steuerungseingriffe des Betriebspersonals. Die Erstellung des Digitalen Zwillings soll es daher ermöglichen, Prognosedaten zu berücksichtigen und zukünftig auch integrierte Steuerungsansätze zu implementieren. Für die SEH stehen dabei in den nächsten Jahren wichtige und große Investitionen bzgl. der MSR-Technik auf den Klärwerken sowie eine Neuausrichtung der Prozessleittechnik der Klärwerke an. Die SEH befindet sich zudem im Prozess einer umfangreichen Digitalisierung. Im Bereich der industriellen Vernetzung unter Anwendung von Industrie 4.0 Ansätzen stellt der in ZwiLIE erarbeitete Digitale Zwillings daher einen festen Bestandteil und Grundlage für die weiteren Entwicklungsstufen dar.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan des ZwiLIE Forschungsvorhabens gliederte sich in 10 Arbeitspakete mit jeweils einer weiteren untergeordneten Ebene von Teilarbeitspaketen. Je Arbeitspaket und Teilarbeitspaket war die Verantwortung für die Koordination und Durchführung einem Projektpartner zugeordnet. Das Zusammenwirken der Arbeitspakete ist in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Arbeitspaketstruktur des ZwiLIE Verbundvorhabens

Das Projektmanagement im Konsortium und die damit verbundene Gesamtkoordination des Projektablaufs übernahm dabei der Verbundkoordinator Atos / Eviden. Die Arbeitsteilung innerhalb des Konsortiums in Bezug auf die inhaltliche Ergebniserarbeitung war entsprechend der Arbeitspakete ausgerichtet. Organisiert wurde diese jeweils durch die Leads in den jeweiligen Arbeitspaketen. Die Projektstruktur mit den Verantwortlichkeiten für und mit den Angaben zur Beteiligung der Verbundpartner an den einzelnen Arbeitspaketen ist in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt. Aufgrund des interdisziplinären Projektansatzes und der vorliegenden Fach- und Methodenkompetenz waren zur Gewinnung von Synergieeffekten oftmals mehrere bis hin zu sämtlichen Projektpartnern in den einzelnen Arbeitspaketen engagiert.

| AP-Beteiligungen der einzelnen Projektpartner | | SEH | Atos | ifs | h&m | ifak | IAB |
|---|--|-----|------|-----|-----|------|-----|
| AP 0 | Projektmanagement und Ergebnistransfer | x | x | x | x | x | x |
| AP 1 | Anforderungsanalyse und Definition von Extremwetter Szenarien | x | x | x | x | x | x |
| AP 2 | Systemarchitektur und Umsetzung der Daten- und Kommunikationsinfrastruktur | x | x | x | x | x | x |
| AP 3 | Datenerfassung und Messdatenverarbeitung | x | | x | x | | x |
| AP 4 | Hochauflösende Prognosemodelle für extreme Niederschlagsereignisse | x | | x | x | | |
| AP 5 | Entwicklung des integrierten Simulationsmodells | x | | x | x | x | x |
| AP 6 | Formalisierung von Erfahrungswissen zur Bewältigung von Extremwasserszenarien | x | x | x | | | x |
| AP 7 | Entscheidungsassistenz für Extremwasserszenarien mit nachvollziehbaren KI-Methoden | | x | | | x | x |
| AP 8 | Prototypische Entwicklung des Digitalen Zwillings | x | x | x | x | x | x |
| AP 9 | Umsetzung des Realsystems und Evaluation des Digitalen Zwillings im Praxistest | x | x | x | x | x | x |


 = AP-Leitung

Abbildung 5: Arbeitspaketbeteiligungen der einzelnen Projektpartner

Die Projektdauer war ursprünglich mit 36 Monaten veranschlagt, mit einem Projektstart am 1. Februar 2022 und einem ursprünglichen Projektende am 31. Januar 2025. Aufgrund von während der Projektlaufzeit aufgetretenen Verzögerungen wurde von den Verbundpartnern im Oktober 2024 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung um 6 Monate bis zum 31. Juli 2025 (M42) beantragt und durch den Zuwendungsgeber bewilligt.

Wesentliche Kostenpositionen des ZwillE Verbundvorhabens

Das ZwillE Projektkonsortium hat für das Verbundvorhaben mit ursprünglichen Projektgesamtkosten in Höhe von 3,246 Mio. EUR geplant (Gesamtvorkalkulation), wobei sich der ursprünglich bewilligte Zuwendungsanteil auf 2,454 Mio. EUR belief. Der größte Anteil der vorgenannten Projektgesamtkosten entfiel dabei auf die Kostenkategorie „Personalkosten“ (ca. 88 %), gefolgt von der Kostenkategorie „Vorhabensspezifische Abschreibungen / Investitionen“ (ca. 9,75 %), in die vor allem die Anschaffungen der innovativen Messtechnik zur Realisierung des temporären Messprogramms im Kanal, auf den Klärwerken und in den Einleitungsgewässern zur Erfassung von Wassermengen und -beschaffenheiten fielen. Erläuterungen zu den einzelnen Positionen (Personalkosten, Reisekosten, Sachkosten und Vorhabensspezifische Abschreibungen / Investitionen) des zahlenmäßigen Nachweises (Gesamtnachkalkulation) finden sich in den Verwendungsnachweisen und Erfolgskontrollberichten der einzelnen Projektpartner.

II.4 Geleistete Projektarbeiten und erzielte Ergebnisse

AP 0: Projektmanagement und Ergebnistransfer (AP-Leitung: Atos / Eviden)

Am Teil-AP 0.1 „Projektmanagement“ wirkten sämtliche der am Verbundvorhaben ZwillE beteiligten Projektpartner mit. Das Projektmanagement für den Verbund und die damit verbundene Gesamtkoordination des Projektablaufs übernahm dabei der Verbundkoordinator Atos / Eviden. In diesem Zusammenhang hat Atos / Eviden u. a. eine Kommunikations- und Kollaborationsinfrastruktur für das Gesamtvorhaben bereitgestellt und ein regelmäßiges Projektmanagement und -monitoring des Verbundprojekts durchgeführt. Zu den wesentlichen Aufgaben gehörten dabei die Überwachung des Arbeitsfortschritts inklusive Risikomanagement für das Gesamtvorhaben, die Kommunikation mit und die Berichterstattung gegenüber dem Projektträger sowie die Planung, Organisation und Leitung von internen Verbundtreffen und monatlichen Telefonkonferenzen zur Durchsprache und Diskussion der erreichten Projektergebnisse innerhalb des Konsortiums und zum Abgleich des Arbeitsfortschritts gemäß Meilensteinplanung. Ein weiteres Tätigkeitsfeld von Atos / Eviden und den Projektpartnern im Teil-AP 0.1 betraf die Vorbereitung und Teilnahme an den periodischen Lenungskreistreffen für die Verbundkoordinatoren.

An den Aktivitäten im Teil-AP 0.2 „Öffentlichkeitsarbeit und Ergebnistransfer“ waren ebenfalls sämtliche Konsortialpartner beteiligt. Hierunter fielen zum einen die Mitwirkung an unterschiedlichen Publikationsformaten (z. B. Tagungsbroschüren, Projektblättern, Impuls- bzw. Informationspapieren), fachlichen Workshops zu verbundübergreifenden Querschnittsthemen, Befragungen und weiteren Vernetzungsaktivitäten des Vernetzungs- und Transfervorhabens Aqua-X-Net (vgl. hierzu auch die Ausführungen im nachfolgenden Abschnitt II.7 „Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes“) sowie zum anderen die Präsentation aktueller Projektergebnisse im Rahmen des WaX-Statusseminars im September 2023 in Potsdam sowie auf der WaX-Abschlusskonferenz im März 2025 in Berlin. Außerdem wurden im Oktober 2024 aktuelle ZwillE Projektergebnisse in einem WaX-Lunchtalk zum Thema „Management von Wasserextremen im urbanen Raum und Stadtentwässerung“ der Fachöffentlichkeit (Vertreter von Landes- und Bundesministerien sowie nachgeordneten Behörden, von kommunalen Verwaltungen etc.) vorgestellt. Im September 2025 fand in den Räumlichkeiten des Anwendungspartners Stadtentwässerung Hannover schließlich die Abschlussveranstaltung des WaX-Verbundvorhabens ZwillE statt. Im Rahmen verschiedener Vorträge sowie Live-Vorführungen bot sich den anwesenden Vertreter:innen aus Hydrologie und Stadtplanung (i. e. Stadtentwässerung Hannover, Stadtentwässerung Hildesheim, Abwasserbetriebe Weserbergland, Kommunale Umwelt-Aktion UAN e. V. sowie die Region Hannover als wasserrechtliche Genehmigungsbehörde der Stadt Hannover) die Möglichkeit, sich umfassend über die in ZwillE erzielten Projektergebnisse und die verschiedenen innovativen Nutzungsmöglichkeiten des entwickelten Digitalen Zwillings in der Stadtentwässerung zur Unterstützung eines proaktiven Umgangs mit Starkregenereignissen zu informieren und mit dem Projektkonsortium über Möglichkeiten zur Übertragung der Projektergebnisse auf neue Anwendungsbereiche jenseits der in ZwillE betrachteten Pilotregion Hannover zu diskutieren.

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit und der Ergebnisverbreitung wurden vom ZwillE Projektkonsortium darüber hinaus Informationsmaterialien zum Projekt aufbereitet und bereitgestellt, eingehende Anfragen beantwortet sowie entsprechende Präsentationsvorlagen und eine Internetpräsenz für das Projekt (www.zwille-projekt.de) erstellt, auf der sich die interessierte (Fach-)Öffentlichkeit über Neuigkeiten, aktuelle Projektergebnisse sowie über die während der Projektlaufzeit von den Projektpartnern einzeln bzw. gemeinschaftlich erstellten (wissenschaftlichen) Publikationen in Fachzeitschriften und Konferenzen sowie über bevorstehende bzw. erfolgte Konferenzteilnahmen und Messeauftritte informieren kann (vgl. die nachfolgende Abbildung 6). Eine Liste der von den verschiedenen Projektpartnern während der Projektlaufzeit und nach Projektende im Rahmen der gemeinsamen Öffentlichkeitsarbeit unternommen umfangreichen Aktivitäten zum Transfer der im ZwillE Verbundvorhaben erzielten Projektergebnisse findet sich im nachfolgenden Abschnitt II.8 „Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.“.



Abbildung 6: Internetpräsenz des Verbundprojekts ZwillE

AP 1: Anforderungsanalyse und Definition von Extremwetterszenarien (AP-Leitung: SEH)

Das Arbeitspaket AP 1 bildet die Grundlage für die weiteren Arbeitspakete, indem es die Anforderungsanalyse für das Gesamtsystem des Digitalen Zwillings und dessen Teilkomponenten sowie die Definition und Analyse verschiedener Extremwetterszenarien sowohl für den Anwendungsfall Hannover als auch unter dem Aspekt der Übertragbarkeit auf andere Städte umfasst.

Sämtliche Projektpartner waren an den AP-bezogenen Tätigkeiten beteiligt und haben spezifische Beiträge eingebracht. Die federführend durch SEH ausgeführten Arbeiten umfassten die Identifikation gefährdeter Stadt- und Wasserinfrastrukturbereiche, die Dokumentation relevanter Prozesse sowie die Ermittlung der zugrundeliegenden Datenbasis. Darüber hinaus spezifizierte SEH die erforderliche Daten- und Kommunikationsinfrastruktur und definierte die angestrebte Funktionalität des Digitalen

Zwillings mit seiner nachvollziehbaren Entscheidungsassistenten. Atos / Eviden ergänzte diese Grundlagen durch die Ableitung von technischen Anforderungen an die Entscheidungsassistenten. Die meteorologische Perspektive wurde durch den Projektpartner h&m eingebracht, der die meteorologische Datenbasis erarbeitete und die notwendigen Datenzugänge klärte. ifak legte die erforderliche Modelldetaillierung fest und stellte einen Modellierungsleitfaden bereit, der die Anforderungen an den Modellaufbau, Eingangsgrößen und Konsistenz definierte. Das IAB systematisierte die Informationsabläufe und das im Projekt vorhandene Erfahrungswissen. Der Projektpartner ifs dokumentierte bekannte Extremwetterbereiche in Hannover und erstellte eine Fallbibliothek realer Ereignisse. Zusätzlich wurden realistische Extremwetter Szenarien definiert, die als Grundlage für die spätere Modellierung dienen.

Mit den Arbeiten aus AP 1 lag eine konsolidierte und belastbare Basis für den weiteren Projektverlauf vor. Sämtliche relevanten Datenquellen, Prozesse und Modellierungsanforderungen wurden innerhalb des Konsortiums gemeinsam abgestimmt und transparent dokumentiert. Die definierten Schnittstellen und Datenanforderungen schafften damit die notwendige Grundlage, um die fachliche Entwicklung des Digitalen Zwillings sowie seine Übertragbarkeit auf andere Kommunen zielgerichtet voranzutreiben.

Auf Basis dieser Ergebnisse konnten die nachfolgenden Arbeitspakete – von der Implementierung und Kopplung der Simulationsmodelle über die Durchführung der Szenario-Analysen bis hin zur Ausgestaltung der nachvollziehbaren Entscheidungsassistenten und der Systemintegration – strukturiert weitergeführt werden. Durch die in AP 1 erfolgte Harmonisierung der Anforderungen und Schnittstellen waren die technischen, fachlichen und organisatorischen Voraussetzungen geschaffen, um die Weiterentwicklung des Gesamtsystems konsistent und übertragbar umzusetzen.

Teil-AP 1.1: Anforderungsanalyse

Untersuchungsgebiet

Die Landeshauptstadt Hannover hat knapp 550.000 Einwohner und eine Gesamtfläche von 204 km². Hiervon sind etwa 112 km² mit einem mittleren Befestigungsgrad von 44 % an die Kanalisation angeschlossen. Mit einer Kanalnetzlänge von über 2.500 km gehört das von der Stadtentwässerung Hannover (SEH) betriebene Kanalnetz zu den drei längsten in Deutschland und umfasst sowohl Misch- als auch Trennkanalisation. Die Aufteilung beträgt ca. 11 % Mischwasserkanäle, 44 % Schmutzwasserkanäle und 45 % Regenwasserkanäle.

Das gesamte Abwasser wird in zwei, im Verbund betriebenen Klärwerken behandelt: Das Klärwerk Gümmerwald, das auf eine Kapazität von 750.000 Einwohnergleichwerten (EGW) ausgelegt ist, womit es die größte Kläranlage Niedersachsens darstellt, und das Klärwerk Herrenhausen mit einer Kapazität von 500.000 EGW. Täglich werden rund 157.000 Kubikmeter Abwasser aus der Stadt und sechs Umlandgemeinden behandelt.

Das Kanalnetz der Stadt umfasst 65.000 Haltungen mit Profilen von bis zu 3 Metern. Das Schmutz- bzw. Mischwasser wird über vier Hauptsammler zu den Kläranlagen geleitet. Aufgrund der flachen Topografie sind hierfür 62 Abwasserpumpwerke im Einzugsgebiet (EZG) notwendig. Im Mischsystem befinden sich zudem ein Regenüberlaufbecken und neun Regenüberläufe. Das aus den im Trennsystem entwässerten EZG stammende Regenwasser wird über ein komplexes System von Gräben und verrohrten Abschnitten über 400 Einleitstellen den drei Gewässern Leine, Ihme und Wietze sowie dem Mittellandkanal zugeleitet. Zudem sind im Stadtgebiet 54 Regen- und Hochwasserpumpwerke und 71 Regenrückhaltebecken Bestandteil des Regenwasser-Entwässerungssystems. Die nachfolgende Abbildung 7 gibt eine Übersicht über das Einzugsgebiet und die Hauptsammler des Schmutz- und Mischwassersystems. Zusätzlich leiten sechs Umlandgemeinden das Schmutzwasser zu den zwei Klärwerken.

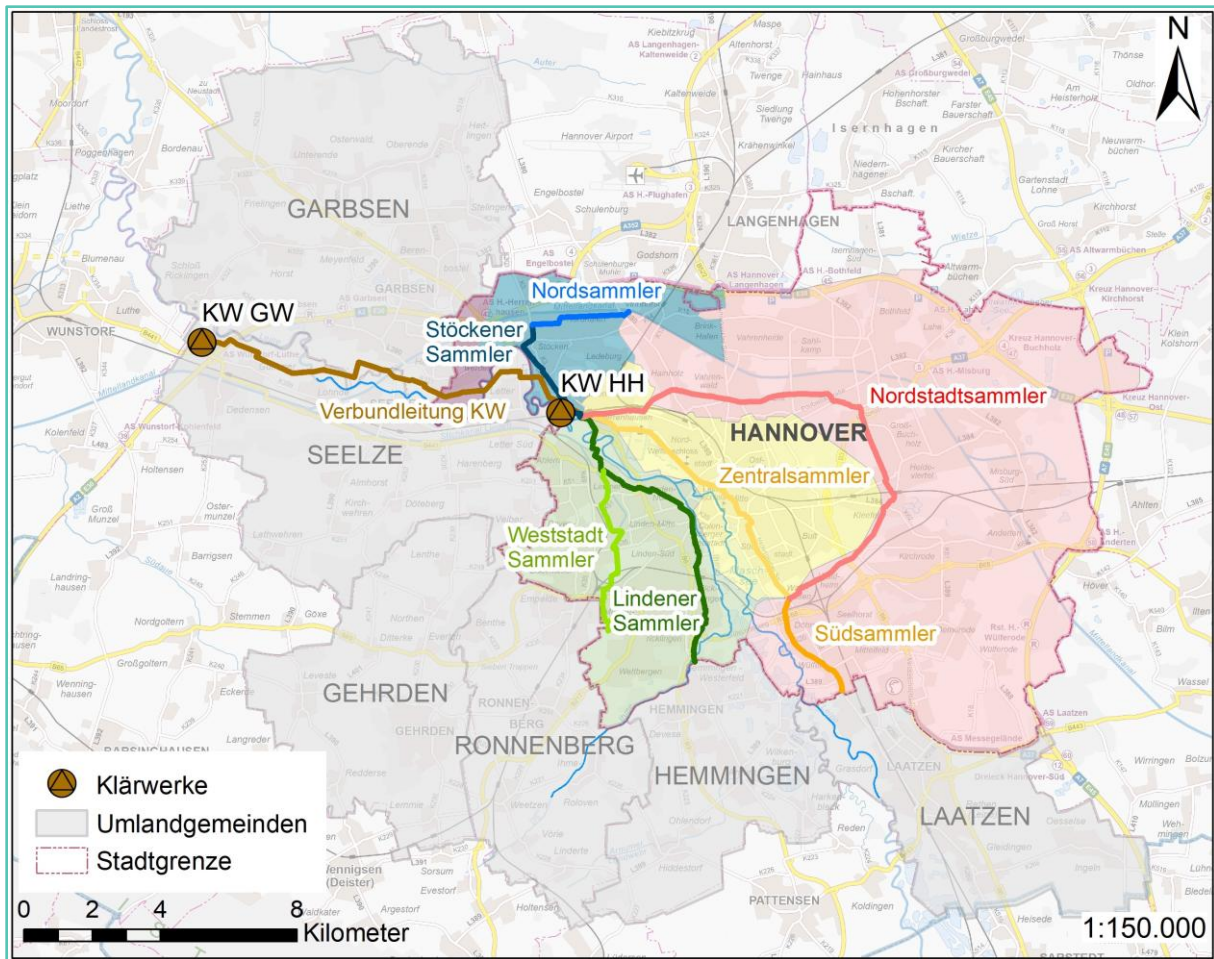


Abbildung 7: Untersuchungsgebiet Hannover mit den Einzugsgebieten, Hauptsammlern, Umlandgemeinden und Kläranlagen Gümmerwald (KW GW) und Herrenhausen (KW HH)

Ausgangslage, Bestands- und Infrastrukturdaten der SEH

Von der SEH werden eine Vielzahl an Mess- und Betriebsdaten erhoben und für die Betriebsüberwachung, Kanalnetzplanung und teilweise Steuerung verwendet. Dies umfasst langjährige Niederschlagsdaten von elf Regenschreiberstationen, mehr als 150 Wasserstands- und Abflussmessungen im Kanalnetz sowie zusätzliche Messdaten auf den Kläranlagen. Für eine integrale Modellbetrachtung stehen langjährige Abfluss- und Wasserstandsmessungen in den großen Fließgewässern Leine und Ihme sowie Fließgewässerquerprofile und -achsen zur Verfügung.

Aktuell basiert das Management von Wasser-Extremereignissen bei der SEH im Wesentlichen auf den relevanten Messdaten, die graphisch und tabellarisch auf den Leitwarten dargestellt werden. Ein Teil der Regelungen erfolgt automatisch mittels eines Regelkreises. Das Betriebspersonal erhält zudem automatisch Hinweise bei Unter- bzw. Überschreiten von definierten Wertebereichen und Betriebszuständen. Prognosedaten werden nur eingeschränkt berücksichtigt; lediglich die deutschlandweite Radarvorhersage des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wird für manuelle Steuerungseingriffe des Betriebspersonals verwendet. Mit dem in ZwiIE entwickelten Digitalen Zwilling soll es zukünftig möglich sein, Prognosedaten und Modellvorhersagen automatisiert zu berücksichtigen und integrierte Steuerungsansätze zu implementieren. Der Einsatz des Digitalen Zwillings mit seiner nachvollziehbaren Entscheidungsassistenzfunktionalität soll zudem zur Unterstützung des technischen Betriebspersonals beitragen.

Als Datenbasis für den Digitalen Zwilling standen von der SEH erstellte hydrologische und hydrodynamische Modelle in 1D und 2D sowie gekoppelte 1D- / 2D-Kanalnetz- und Oberflächenmodelle sowie Schmutzfrachtmodelle zur Verfügung. Darüber hinaus stellte die SEH eine Emissionspotenzialkarte

nach DWA-A 102 (vgl. DWA 2020), die Kartierung der Schutzkategorien entsprechend DWA-A 118 (vgl. DWA 2024) sowie die im Internet veröffentlichten Starkregenhinweiskarten der Landeshauptstadt Hannover (vgl. LHH 2023) zur Verfügung, die wichtige Grundlagen für die spätere Modellierung bildeten.

Ergebnisse der Anforderungsanalyse

Im Rahmen von AP 1 wurden die Anforderungen an das im Verbundvorhaben zu entwickelnde System systematisch erhoben. Dabei wurden vor dem Hintergrund der drei umzusetzenden Use Cases

- UC 1: Abbildung des Ist-Zustands des Entwässerungssystems von Hannover
- UC 2: Vorhersage zu erwartender Problembereiche und Ableitung kurzfristiger Maßnahmen gegen die negativen Auswirkungen von akuten Wasser-Extremereignissen
- UC 3: Langfristige Planung von Infrastrukturanpassungen an Wasser-Extremereignisse

entsprechende Anforderungen an das Gesamtsystem Digitaler Zwilling, an die zugrundeliegende Daten- und Kommunikationsinfrastruktur (DKI) sowie an eine nachvollziehbare Entscheidungsassistenz aus Sicht unterschiedlicher Stakeholder (SEH Betriebspersonal, SEH Planungsbeauftragte, SEH IT, Modellierer, Messstellenbetreiber, Anbieter von meteorologischen Vorhersagen etc.) abgeleitet und dokumentiert (vgl. die beiden nachfolgenden Tabellen 2 und 3). Parallel wurden relevante Datenquellen und Kommunikationspfade inventarisiert, hinsichtlich Qualität und Zugänglichkeit bewertet und Detailgrade für Modellierung und Kopplung festgelegt, um die spätere Systemintegration und Simulationen konsistent möglich zu machen.

| Nr. | Kategorie | Kernanforderungen |
|-----|---|---|
| 1 | Flexible Visualisierung und Wechsel | <ul style="list-style-type: none"> • Wechsel zwischen Ist-Zustand und prognostizierten Auswirkungen von Niederschlagsereignissen • Optionale parallele Ansicht beider Zustände |
| 2 | Anpassbare Darstellungsformen | <ul style="list-style-type: none"> • 1D-Gesamtsystem und GIS-Karte • Integrierte Darstellung: Niederschlagssituation, Kanalnetz und Klärwerksverbund, Oberflächenabfluss, Gewässer |
| 3 | Wetter- / Prognosedaten | <ul style="list-style-type: none"> • Aktuelle Wettersituation und Prognosen anzeigen • Auswahl / Darstellung von Niederschlagsprognosen mit unterschiedlichen Prognosehorizonten • Automatisierte Alarmierung bei kritischen Prognosen |
| 4 | Messstellenmanagement | <ul style="list-style-type: none"> • Anzeige physischer und virtueller Messstellen • Detailansichten, Trends, Hervorhebung kritischer Werte |
| 5 | Alarm & nachvollziehbare Entscheidungsassistenz | <ul style="list-style-type: none"> • Grafische Hervorhebung von Problembereichen • Warnstufenspezifische Maßnahmenempfehlungen |
| 6 | Maßnahmenmanagement | <ul style="list-style-type: none"> • Nachvollziehbare Darstellung der Maßnahmen • Auswahl und Umsetzung nicht automatisiert, sondern durch die Nutzer |
| 7 | Externe Datenquellen | <ul style="list-style-type: none"> • Einbindung von Pegelprognosen (z. B. NLWKN) • Nutzung für Szenario-Analysen und Maßnahmenableitung |

Tabelle 2: Zusammenfassung der Anforderungen an den Digitalen Zwilling

| Nr. | Kategorie | Kernanforderungen |
|-----|--|--|
| 1 | Sicherer Zugriff auf Messdaten | Einbindung hydrologischer & meteorologischer Daten aus Bestands- und neuer Sensorik (externe Betreiber (z. B. WSV, NLWKN, ...), SEH-Sensorik, DWD-Rohdaten) |
| 2 | Schnittstellen und Adapter | Einheitliche, abgesicherte Schnittstellen für alle Quellen; keine direkten Verbindungen zu SEH-Produktivsystemen |
| 3 | Datenpersistenz und Semantik | Persistenz gemäß Semantik im geeigneten Datenmodell; Klärung von Persistenzdauer, Volumen, Speicherstrategie |
| 4 | Integration externer Dienste | Einbindung von Niederschlagsmessungen und -prognosen (h&m), Simulationsergebnissen (SIMBA# & RadEF), Entscheidungsassistent (Atos / Eviden), Fallbasis (IAB) |
| 5 | Datenbereitstellung für andere Teilkomponenten des Digitalen Zwillings | Schnittstellen für GUI (GIS-Integration und Georeferenzierung), SIMBA#, Entscheidungsassistent, RadEF |
| 6 | Sicherheit & Integration | Absicherung aller Datenflüsse; Standardprotokolle; Definition der GIS-Datenpersistenz und Einbindung |

Tabelle 3: Anforderungen an die Daten- und Kommunikationsinfrastruktur (DKI)

Teil-AP 1.2: Festlegung Extremwetterszenarien

Für eine allgemeinverständliche Einordnung von Starkregen wurde der von Schmitt et al. (2018) empfohlene Starkregenindex (SRI) herangezogen, der eine ortsbezogene Kategorisierung von Starkregenhöhen in Form von Indexzahlen von 1 bis 12 vorschlägt (vgl. Abbildung 8).

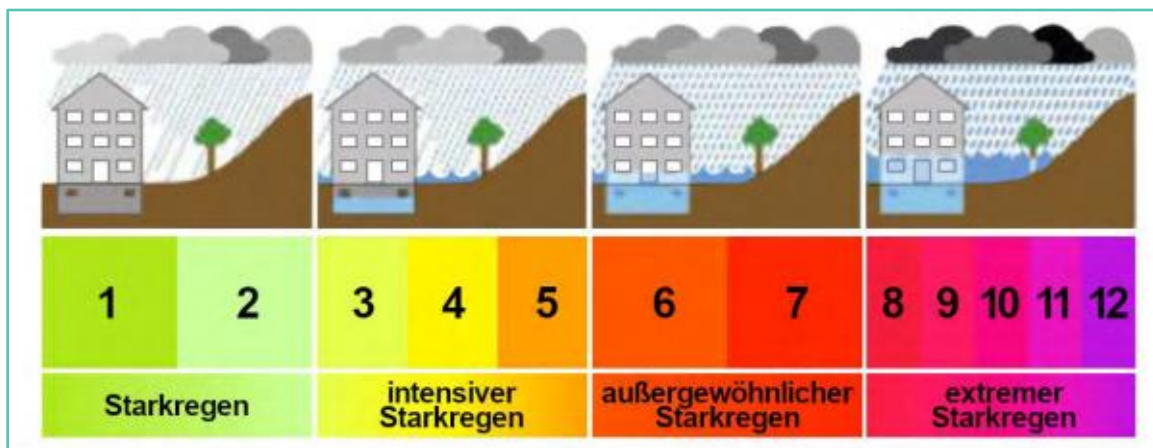


Abbildung 8: Prinzipische Skizze zur Risikokommunikation mittels SRI 1 bis 12 nach Schmitt et al. (2018)

| | | |
|----------|---|--|
| SRI 1-2 | Starkregen | kein Überstau aus der Kanalisation („Entwässerungskomfort“) |
| SRI 3-5 | intensiver Starkregen | Schutz gegen Überflutungen als „kommunale Gemeinschaftsaufgabe“, ggfs. kurzzeitige Überstauungen an der Oberfläche |
| SRI 6-12 | außergewöhnlicher und extremer Starkregen | punktueller, auch ausgedehnte Überflutungen; vorrangige Handlungsmaxime „Schadensbegrenzung“ |

Tabelle 4: Folgen von Starkregenereignissen SRI 1 bis 12 nach Schmitt (2022)

Aus Tabelle 4 kann für das Projekt ZwillE abgeleitet werden, dass im Use Case 2 bei Starkregen mit SRI 1 bis 2 das Regenwasser über die Kanalisation abgeleitet werden kann. Erst bei Überschreiten der Bemessungssituation „Freispiegelabfluss“ durch verschiedene Überlastungszustände ab $SRI \geq 3$ kommt es zu einem Einstau mit Schachtwasserständen oberhalb des Kanalscheitels. Die Freispiegelleitung wird hydraulisch zum Druckabfluss. Als Überstau werden Wasserstände oberhalb eines Bezugsniveaus, üblicherweise der Geländeoberkante am Bezugspunkt, bezeichnet. Eine Ableitung über die Kanalisation ist nicht mehr möglich. Es kann zu Wasseraustritt auf die Oberfläche bzw. zu einem verhinderten Wassereintritt kommen. Die Folgen sind kanalinduzierte Überflutungen.

Es wurde eine Ist-Analyse durchgeführt und historische Extremwetterdaten recherchiert. Die daraufhin erfolgte Präzisierung der im Anwendungsfall Hannover zugrunde gelegten Extremwetterdatenbasis führte zu den folgenden im Projekt betrachteten Szenarien:

- Szenario 1: Lokale Überflutungen infolge von Starkregenereignissen (ab $SRI \geq 3$)
- Szenario 2: Mischwasserentlastungen bei Niedrigwasser im Gewässer infolge kritischer Regenereignisse ($SRI < 3$)
- Szenario 3: Flusshochwasser in Verbindung mit Starkregenereignissen ($SRI < 3$)
- Szenario 4: Lange Trockenwetterperioden

Im weiteren Projektverlauf lag der Schwerpunkt der Betrachtung auf den Extremwetterszenarien 1 bis 3, da diese für die Umsetzung und technische Ausgestaltung des Digitalen Zwillings die größte Relevanz aufwiesen. Das Szenario 4 wurde im Rahmen der Datenrecherche und der Arbeiten in Teil-AP 3.1 ebenfalls berücksichtigt, jedoch im weiteren Verlauf nachrangig behandelt, da seine unmittelbare Bedeutung für den prototypischen Aufbau des ZwillE Gesamtsystems geringer war.

Bereitstellung von Klimaprojektionsdaten zur Umsetzung des Use Case 3

Es wurden Klimaprojektionsdaten aus drei EURO-CORDEX-Regionalmodellen sowie einer konvektionsauflösenden Simulation (CPS) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) genutzt. Die zukünftigen Projektionen basieren auf dem RCP8.5-Szenario, da dieses eine Worst-Case-Betrachtung ermöglicht, um extreme Entwicklungen und Risiken zu berücksichtigen. Zudem stellte RCP8.5 zum Zeitpunkt des Projekts die höchst-konvektionsauflösenden Daten dar, die vom DWD verfügbar waren, und somit die beste Datenbasis für die Untersuchung. Die Projektionen decken drei Zeiträume ab:

- Historisch: 2001 – 2018
- Nahe Zukunft: 2031 – 2060
- Ferne Zukunft: 2071 – 2100

Um die groben täglichen Klimamodellprojektionen für die lokale hydrologische Modellierung nutzbar zu machen, wurde ein neuartiges, zweistufiges zeitliches Disaggregations-Framework entwickelt. Dieses wandelt tägliche Niederschlagswerte in hochaufgelöste 5-Minuten-Zeitreihen um:

- Stufe 1: Ein temperaturabhängiges stochastisches Kaskadenmodell erzeugt aus täglichen Summen realistische stündliche Niederschläge.
- Stufe 2: Eine Analog-Matching-Technik ergänzt diese stündlichen Reihen um beobachtete sub-stündliche Strukturen.

Dieser Ansatz ist entscheidend für die Simulation lokaler Überflutungsrisiken und für eine fachgerechte Bewertung extremer Niederschlagsereignisse unter zukünftigen Klimabedingungen.

AP 2: Systemarchitektur und Umsetzung der Daten- und Kommunikationsinfrastruktur (AP-Leitung: Atos / Eviden)

Zielsetzung des von Atos / Eviden geleiteten AP 2 „Systemarchitektur und Umsetzung der Daten- und Kommunikationsinfrastruktur“ war zum einen in Teil-AP 2.1 die gemeinschaftliche Entwicklung eines technischen Architekturkonzepts samt zugehöriger Schnittstellendefinition als Basis für die spätere Integration der verschiedenen fachlichen Teilkomponenten des Digitalen Zwillings in ein ZwillE Gesamtsystem (vgl. hierzu auch die nachfolgenden Ausführungen zu Teil-AP 8.1). Des Weiteren lag in Teil-AP 2.2 der Fokus auf der Erstellung einer konzeptionellen Spezifikation und der anschließenden technischen Umsetzung einer auf Standards basierenden Daten- und Kommunikationsinfrastruktur unter Berücksichtigung der vorhandenen und ggf. zu erweiternden Hardware- und Softwarebasis, um meteorologische und hydrologische Messdaten aus unterschiedlichen, verteilten technischen Systemen und Plattformen automatisiert in einer einheitlichen Struktur zusammenzuführen und den notwendigen Datenaustausch zwischen den fachlichen Teilkomponenten des ZwillE Systems zu ermöglichen. Ein besonderes Augenmerk galt dabei dem Aspekt der Offenheit und Anpassbarkeit des gewählten Ansatzes, um keine Insellösung für den Anwendungsfall Hannover zu schaffen, sondern eine aufwandsarme Übertragbarkeit der softwaretechnischen Umsetzung des Gesamtsystems des Digitalen Zwillings auf andere Städte und Gemeinden außerhalb des Pilotgebiets zu gewährleisten.

An den Arbeiten im AP 2 waren sämtliche Verbundpartner des ZwillE Vorhabens beteiligt, wobei jeder Partner die sich aus den im Rahmen des Vorhabens jeweils verantworteten fachlichen Teilkomponenten ergebenden Anforderungen und Perspektiven in die gemeinsamen Arbeiten zur Spezifikation der Gesamtsystemarchitektur und zur Konzipierung der Daten- und Kommunikationsinfrastruktur einbrachte:

- SEH in Bezug auf die SEH-seitige Bestandsdateninfrastruktur und die Randbedingungen zur Einbindung von SEH-seitigen Echtzeitmessdaten unter der besonderen Beachtung von KRITIS- und Datenschutz-Gesichtspunkten (vgl. hierzu auch die nachfolgenden Ausführungen zu AP 9),
- ifs in Bezug auf die sich aus dem temporären ZwillE Messprogramm ergebenden technischen Randbedingungen für die Integration von Echtzeitmesswerten der im Rahmen des Vorhabens neu angeschafften Messsonden (vgl. hierzu auch die nachfolgenden Ausführungen zu AP 3),
- h&m in Bezug auf die Beschreibung der externen meteorologischen Serverstruktur bei h&m, der Festlegung der Datenflüsse der meteorologischen und hydrologischen Mess- und Prognosedaten sowie des Datenmodells und der Austauschformate der über die jeweiligen Dienste jeweils bereitgestellten Daten (vgl. hierzu auch die nachfolgenden Ausführungen zu AP 4),
- ifak in Bezug auf die Datenübermittlung vom und zum im ZwillE Vorhaben eingesetzten Simulationssystem SIMBA# und in Bezug auf die integrierte Ergebnisvisualisierung von Ist- und prognostizierten Systemzuständen des Entwässerungssystems im Front-End des Digitalen Zwillings (vgl. hierzu auch die nachfolgenden Ausführungen zu AP 5 und AP 8),
- IAB in Bezug auf die Einbindung der auf Basis von formalisiertem Erfahrungswissen der technischen Betriebsmitarbeitenden der SEH aufgebauten Wissensbasis zu starkregenbezogenen Gegenstrategien (vgl. hierzu auch die nachfolgenden Ausführungen zu AP 6) sowie
- Atos / Eviden in Bezug auf die technische Integration der nachvollziehbaren Entscheidungsunterstützungsfunktionalität in den Digitalen Zwilling und der hierzu erforderlichen Datenflüsse (vgl. hierzu auch die nachfolgenden Ausführungen zu AP 7).

Basierend auf den Ergebnissen von a) der Anforderungsanalyse und der für den Anwendungsfall Hannover betrachteten Extremwetter szenarien (vgl. hierzu die vorherigen Ausführungen zu AP 1) und b) der bewerteten SEH-seitigen Bestandsdateninfrastruktur sowie den von externen Messstellenbetreibern (z. B. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), Deutscher Wetterdienst (DWD)) angebotenen Datenbereitstellungsdiensten wurde im Teil-AP 2.1 „Konzeption der Systemarchitektur“ von den ZwillE Projektpartnern unter Leitung von Atos / Eviden ein technisches Architekturkonzept für das ZwillE Gesamtsystem zur Integration der verschiedenen fachlich-technischen Teilkomponenten in den Digitalen Zwilling erstellt und im Projektverlauf an neue technische Gegebenheiten und Erkenntnisse angepasst und iterativ verfeinert. Zudem erfolgte eine gemeinsame Definition der erforderlichen Schnittstellen und Datenformate zwischen den einzelnen Teilkomponenten. Den Ausgangspunkt hierzu bildete zunächst eine Bewertung aktuell existierender technischer Ansätze zur Ermöglichung eines vertrauenswürdigen Austauschs von unterschiedlichen Datentypen aus verteilten, dezentralen Quellen (z. B. Gaia-X, International Data Spaces, FIWARE), die hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf den Projektkontext evaluiert wurden. Angesichts einer hohen technischen Offenheit und einer leichten Adaptierbarkeit an unterschiedliche vertikale Anwendungskontexte fiel die Entscheidung zugunsten einer Nutzung des FIWARE Frameworks als wiederverwendbarer und übertragbarer Open-Source-Software (OSS) Ansatz. FIWARE stellt dabei einen offenen Baukasten aus Open-Source-Software- und Plattformkomponenten zur Verfügung, um verteilte smarte Anwendungen (z. B. Digitale Zwillinge, Datenräume etc.) für verschiedene Branchen effizient zu entwickeln.

Das Architekturkonzept für das Gesamtsystem des Digitalen Zwillings orientiert sich dabei an der in der nachfolgenden Abbildung 9 dargestellten sog. FIWARE Smart Water Referenzarchitektur (vgl. FIWARE 2024), die für den ZwillE Anwendungsfall entsprechend angepasst wurde.

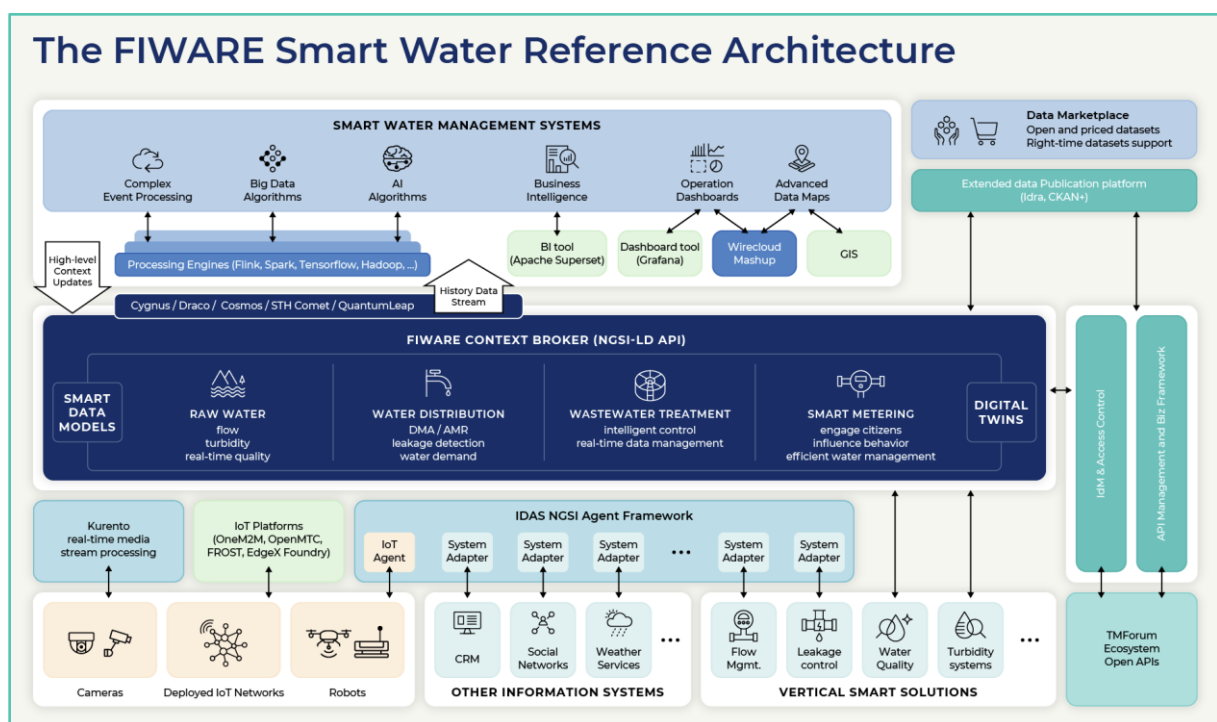


Abbildung 9: FIWARE Smart Water Referenzarchitektur

Bei der FIWARE Smart Water Referenzarchitektur handelt es sich um eine auf offenen Standards basierende allgemeine Architektur-Blaupause, die von der FIWARE OSS Community mit dem Ziel entwickelt wurde, die Umsetzung interoperabler Anwendungen im Wassersektor zu minimalen Kosten zu unterstützen. Hierdurch können verschiedene Datenquellen, die von diesen Anwendungen über den

gesamten Wasserlebenszyklus hinweg erzeugt oder genutzt werden, in bestehende Systeme integriert werden, um so Echtzeitinformationen und -kennzahlen auf einheitliche, integrierte und verständliche Weise für die involvierten Entscheidungsträger bereitzustellen. Als zentrales, standardisiertes Schnittstellenformat wird von FIWARE das sog. NGSI-LD (Next Generation Service Interface Linked Data) genutzt, wobei auch proprietäre Schnittstellen (z. B. der installierten Sensorik) über Adapter, sogenannte Generic Enablers, angebunden werden können.



Abbildung 10: Ebenen des FIWARE Technologie Stack

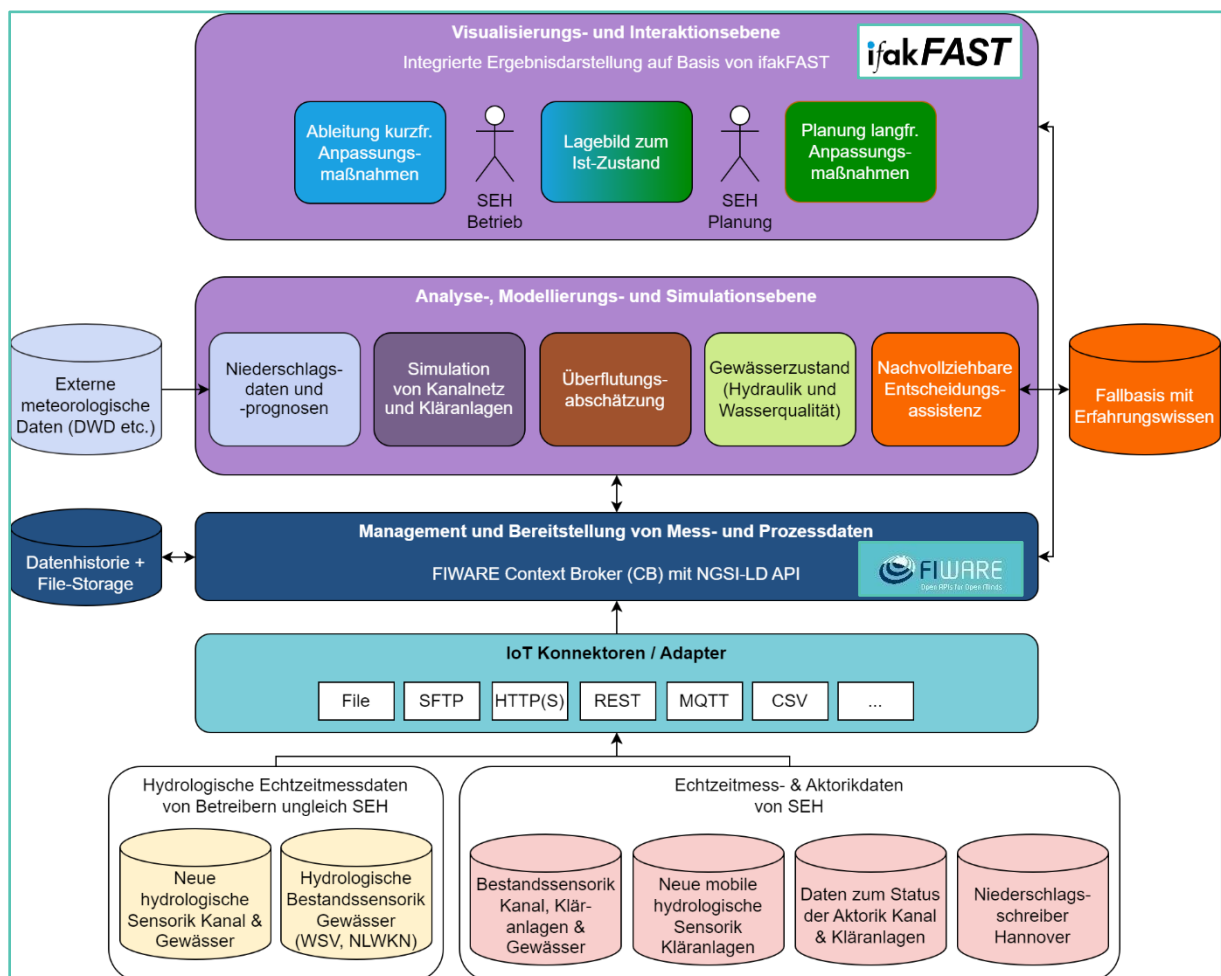


Abbildung 11: Architekturkonzept für das Zwillie Gesamtsystem

Die in ZwillE erarbeitete Gesamtsystemarchitektur mit den verschiedenen fachlichen Teilkomponenten des Digitalen Zwillings ist in der vorherigen Abbildung 11 dargestellt, wobei sich die Darstellung an der verschiedenen Ebenen des FIWARE Technologie Stack (vgl. Abbildung 10) orientiert.

Der Fokus der Arbeiten des Projektkonsortiums im Teil-AP 2.2 „Konzipierung und technische Umsetzung der Daten- und Kommunikationsinfrastruktur“ lag zunächst auf der Erstellung einer Spezifikation für eine auf Komponenten des FIWARE Frameworks (v. a. auf dem sog. FIWARE Orion-LD Context Broker (vgl. FIWARE 2025)) basierende Daten- und Kommunikationsinfrastruktur (DKI) für das ZwillE Gesamtsystem zur Anbindung, Bereitstellung und zum Management von Mess- und Prozessdaten für die weiteren fachlichen Teilkomponenten des Digitalen Zwillings. Als Bestandteil dieser Spezifikation erfolgte zudem eine Adaption und Erweiterung des in FIWARE4Water genutzten Datenmodells für den ZwillE Anwendungsfall. Ein Kernbestandteil der anschließenden technischen Umsetzung der DKI in Teil-AP 2.2 war die Entwicklung des sog. ZwillE Data Center (ZDC) (vgl. Abbildung 12), einer Webapplikation, die als technische Zusatzkomponente die Konfiguration und Verwaltung der Datenkommunikation von und zum FIWARE NGSI-LD Context Broker ermöglicht und die Anbindung von verteilten, in- und externen Datenquellen (z. B. über die Gateways von Messtechnik-Herstellern wie GO Systemelektronik oder NIVUS) und Datensinken an den Digitalen Zwilling über das Anlegen und Verwalten von Camel-Routen (vgl. Abbildung 13) erleichtert. Dabei unterstützt das ZDC eine Vielzahl von Schnittstellen (z. B. File, SFTP, HTTP(S), REST, MQTT, CSV) sowie verschiedene Datenbankformate und bietet eine Funktionalität zur schnelleren und flexiblen semantischen Einbindung von Messdaten in ein einheitliches Datenmodell.

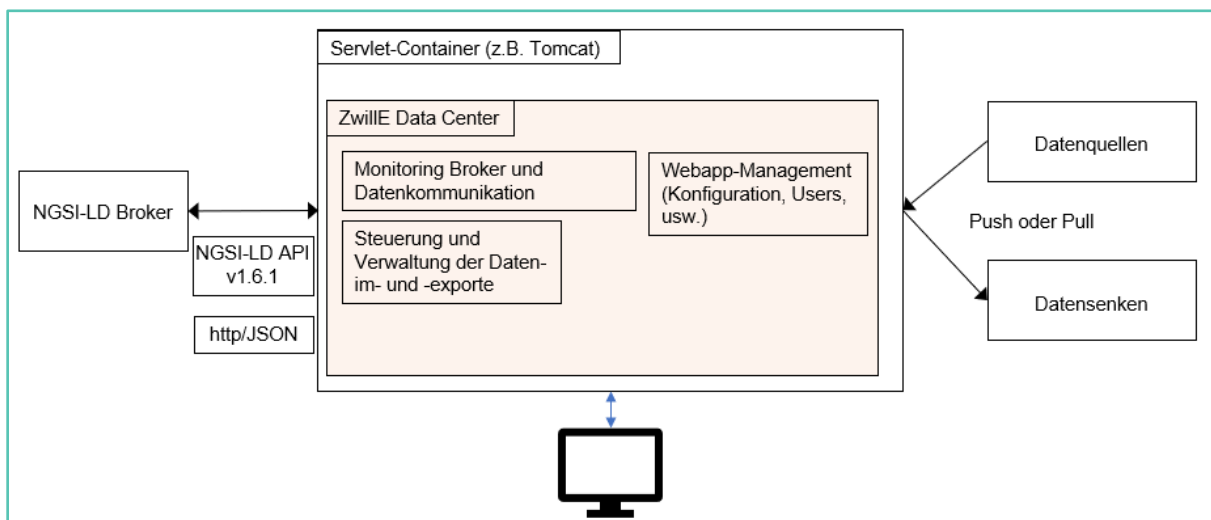


Abbildung 12: ZwillE Data Center

| Aktionen | Routenid | Status | Zuletzt gestartet | Zuletzt beendet | Läufe |
|----------|--|---------|-----------------------------|-----------------------------|-------|
| | Broker.notification | Started | 2025-07-16T12:25:07.195270Z | 2025-07-16T12:25:07.211470Z | 12202 |
| | CrateDB | Started | 2025-07-16T12:25:07.192228Z | 2025-07-16T12:25:07.222749Z | 18161 |
| | Go MG1 T40434 | Started | 2025-07-21T09:06:35.010114Z | 2025-07-16T12:25:05.538137Z | 28640 |
| | Go MG2 T40445 | | | | |
| | NLWKN Pegel Oberrücklingen | Started | 2025-07-21T09:06:07.008452Z | 2025-07-16T12:25:07.223234Z | 7160 |
| | Nivus HG2 Helene-Wießer-Brücke | Started | 2025-07-21T09:06:33.031519Z | 2025-07-16T12:25:03.548085Z | 28639 |
| | Nivus SK1 Herrenhäuser Allee | | | | |
| | Nivus SK2 Pfarstraße | Started | 2025-07-21T09:06:33.009831Z | 2025-07-16T12:25:03.283127Z | 28639 |
| | SEH Gewässerpegel Leinebasen Monweggasse | Started | 2025-07-16T11:47:40.795018Z | 2025-07-16T11:47:40.795820Z | 154 |
| | SEH Regenschreiber Petistr | Started | 2025-07-16T11:47:40.767595Z | 2025-07-16T11:47:40.792509Z | 750 |

Abbildung 13: Camel-Routen im ZwillE Data Center

Auf diese Weise können existierende Datensilos aufgebrochen und meteorologische und hydrologische (Echtzeit-)Messdaten aus unterschiedlichen, verteilten technischen Systemen und Plattformen automatisiert in einer einheitlichen Struktur zusammengeführt werden. Diese Daten werden anschließend den anderen Komponenten des Digitalen Zwilling (z. B. dem Simulationssystem SIMBA# für die Durchführung von Szenario-Analysen) zur weiteren Verarbeitung, Analyse und Visualisierung über eine MQTT-basierte Kommunikationsarchitektur unter Einbindung des Open Source Software Frameworks ifak-FAST des Projektpartners ifak (vgl. Hübner et al. 2018) zur Verfügung gestellt. Hierzu wurden entsprechende Topics und Datenformate für den Austausch der Daten zwischen den einzelnen ZwillE Systemkomponenten definiert. Im Anschluss wurden unterschiedliche hydrologische Online-Messdaten aus verschiedenen SEH-externe Datenquellen wie beispielsweise die vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) bzw. von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) bereitgestellten Pegelstände der Leine (flussauf- und -abwärts) an die ZwillE DKI angebunden. Ferner fand über die Gateways der in ZwillE verwendeten Messtechnik von GO Systemelektronik und NIVUS eine Einbindung der vom Projektpartner ifs an zwei repräsentativen Stellen in der Misch- bzw. Regenwasserkanalisation von Hannover und den zugehörigen Einleitstellen in den Gewässern Leine und Ihme betriebenen temporären Messstellen (vgl. hierzu auch die nachfolgenden Ausführungen zum AP 3) und der von ihnen jeweils übermittelten Online-Messdaten (Wasserstände, Durchflüsse sowie verschiedene Wassergüte-Parameter) in den Digitalen Zwilling statt. Des Weiteren stellt der Projektpartner h&m unterschiedliche meteorologische Online-Daten (Radar-basierte Niederschlagsmessungen, Niederschlagsprognosen als Ensemble-Nowcasts mit unterschiedlichen Prognosehorizonten) sowie auf dieser Grundlage ermittelte Echtzeit-Überflutungsvorhersagen für das Stadtgebiet Hannover bereit, die ebenfalls über die DKI an den Digitalen Zwilling angebunden wurden. Schließlich wurde zwischen Atos / Eviden, ifak sowie den IT-Verantwortlichen von SEH ein technischer Lösungsansatz entwickelt und umgesetzt (siehe hierzu auch die Ausführungen zu Teil-AP 9.1), um hydrologische und meteorologische Echtzeitmessdaten von SEH-seitiger Bestandssensorik aus dem SEH Prozessleitsystem (PLS) in den Digitalen Zwilling einzubinden (vgl. die nachfolgende Abbildung 14).

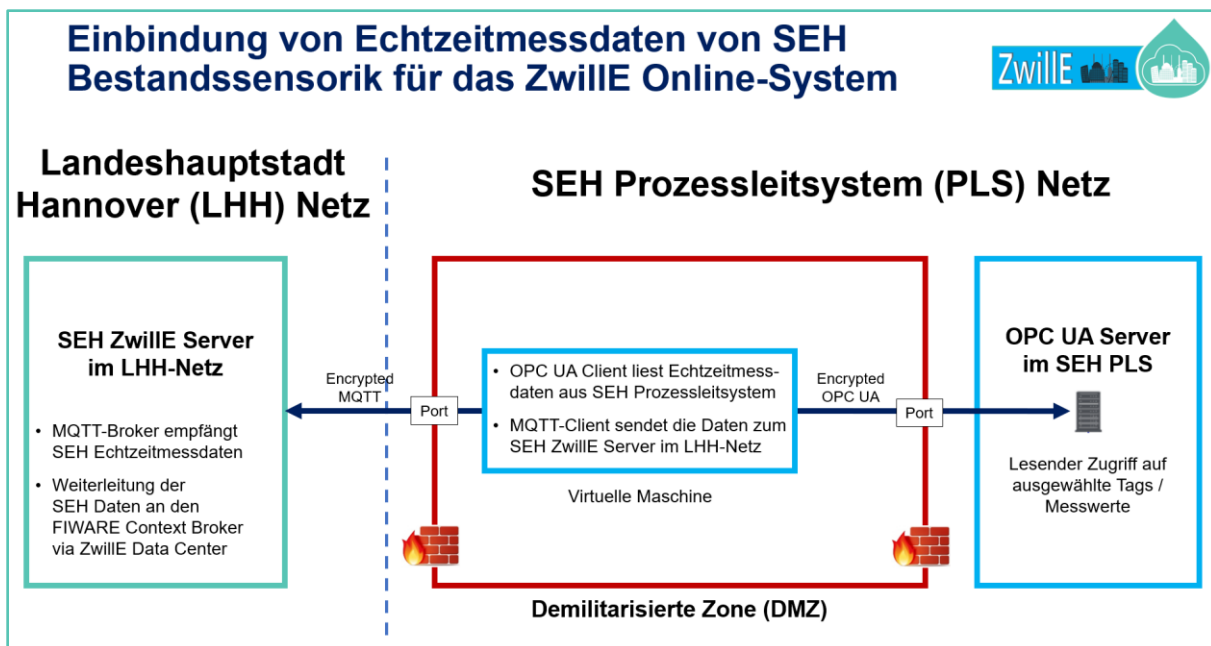


Abbildung 14: Einbindung von Echtzeitmessdaten von SEH Bestandssensorik für den Digitalen Zwilling

Die Visualisierung von Messdaten, Prognosen und Simulationsergebnissen im Digitalen Zwilling erfolgt ebenfalls unter Nutzung von ifakFAST. Das Framework ermöglicht die Prozess- und Automatisierungskonnektivität über verschiedene Protokolle (z. B. OPC UA), einschließlich der überwachten Ausführung einer modellprädiktiven Regelung in Verbindung mit dem Simulationssystem SIMBA#. Zeitreihendatenbanken und webbasierte Dashboards ermöglichen die Konfiguration, den Betrieb und die Überwachung des Systems. Als Front-End des Digitalen Zwillings wurden spezielle Dashboards zur Visualisierung der einzelnen Systemzustände in den Teilbereichen des Entwässerungssystems erstellt, die den technischen Betriebsmitarbeitenden auf den SEH Leitwarten relevante Informationen mit Hilfe von Geokarten und Zeitreihendiagrammen darstellen (siehe hierzu auch die Ausführungen zu AP 8).

AP 3: Datenerfassung und Messdatenverarbeitung (AP-Leitung: ifs)

In dem von ifs geleiteten AP 3 „Datenerfassung und Messdatenverarbeitung“ erfolgten die Arbeiten mit großer Unterstützung des Projektpartners SEH (u. a. auch durch das SEH Betriebs- und Laborpersonal) zur kontinuierlichen Erfassung der dynamischen Prozessdaten des Entwässerungssystems in Form von Echtzeitmessdaten zu Wasserhaushalt und -beschaffenheit für den Digitalen Zwilling. Um das Systemverhalten während Wasser-Extremereignissen virtuell abbilden und analysieren zu können, wurden alle Wasserkompartimente berücksichtigt (Kanalnetze, Kläranlagen, Gewässer). Es wurden zum einen Daten vorhandener stationärer Messeinrichtungen eingebunden, zum anderen wurde ein temporäres Messprogramm mit neu eingerichteter Sensorik durchgeführt. Mit weiteren Messdaten zum Niederschlagsgeschehen als Belastungsgröße für die Entwässerungsinfrastruktur befasste sich AP 4 (siehe die nachfolgenden Ausführungen weiter unten). Für die kontinuierlichen Erfassung der Wasserbeschaffenheit wurden in dem temporären Messprogramm UV/VIS-Spektrometer als innovative Online-Messgeräte einbezogen. Das mehrjährige Programm war auch als Praxistest ausgelegt, um diese sehr aufwändige Sensorik einer kritischen Eignungsprüfung zu unterziehen.

Im Teil-AP 3.1 „Datenrecherche“ wurde zunächst eine umfassende Datenerhebung und -strukturierung im Anwendungsfall Großraum Hannover sowie darüber hinaus durchgeführt. Sie umfasste zum einen die Aufarbeitung bisher von ifs durchgeführter Messkampagnen in Kanalnetzen und Gewässern in Hannover und Umgebung sowie auf der Kläranlage Herrenhausen aus den letzten rund 30 Jahren. Zum

anderen wurden historische Wasser-Extremereignisse in unterschiedlichen Quellen, die noch deutlich weiter in die Vergangenheit reichen, recherchiert und strukturiert zusammengestellt.

Im Rahmen früherer und auch immer noch laufender Vorhaben führte und führt ifs verschiedene temporäre Messungen für die Betreiber der Entwässerungssysteme in Hannover sowie in Umlandkommunen, die im hier betroffenen Einzugsgebiet liegen (Garbsen, Laatzen, Barsinghausen, Isernhagen), durch. Diese umfassten neben Hydraulikparametern wie Durchfluss, Wasserstand und Fließgeschwindigkeit auch Videoaufzeichnungen an neuralgischen Punkten im Kanalsystem und auf der Kläranlage Herrenhausen. Die Stadtentwässerungsbetriebe stellten zudem Betriebsmessdaten – ebenfalls zu den hydraulischen Prozessen in Kanalisation und Einleitgewässern einschließlich Entlastungsraten aus dem Kanalnetz, aber auch zur Aktorik (Pumpwerksförderleistungen, Schieberstellungen, Klärwerksanlagen) – für die Auswertung zur Verfügung. Auch zur Abwasserbeschaffenheit wurden vereinzelte Betreiberdaten vorgelegt und verarbeitet. Ebenfalls wurden historische Daten anderer Messstellenbetreiber auf ihre Nutzbarkeit hin untersucht und abschließend ausgewertet. Dazu gehören insbesondere Pegel­daten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) und des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) sowie Gewässergütedaten der Region Hannover.

Im Zuge der Messkampagnen wurde festgestellt, dass es bei Regenwetter in Hannover zu Rückstausituationen aus den beiden Eingangspumpwerken (EPW) der zentralen Kläranlage Herrenhausen in die Hauptsammler (vor allem Zentralsammler, Nordstadtsammler, Lindener Sammler) kommt. Diese können zu Abschlängen an den Regenüberläufen (RÜ) führen. Insbesondere das zentrale Eingangspumpwerk II auf der Kläranlage Herrenhausen beeinflusst das Abflussgeschehen im Zentralsammler als einzigem Mischwassersammler in Hannover mit seinem großen, hochgradig versiegelten innerstädtischen Einzugsgebiet und den zugehörigen Entlastungsbauwerken maßgeblich. Diese Bauwerke führen damit in allen Mischsystemen, so auch hier, zu einer Verknüpfung von Wassermengen- und Wasserqualitätsproblematik, so dass nicht nur der Abfluss im Kanalnetz betroffen ist, sondern auch die Entlastungsmengen und Schmutzfrachten, die bei Überlaufereignissen in die Gewässer gelangen, hier in die Leine.

Für den in ZwillE entwickelten Digitalen Zwilling ist daher die möglichst genaue messtechnische Erfassung und Abbildung des komplexen Betriebsverhaltens des Zentralsammlers im Regenwetterfall mit seinen Entlastungsvorgängen (insbesondere am größten RÜ „Herrenhäuser Allee“) von erheblicher Bedeutung. Und auch für die Nachbildung des stark veränderlichen Abflussverhaltens im Rahmen der Modellierungen in den APs 4 und 5 (siehe die nachfolgenden Ausführungen weiter unten) ist die Definition der komplexen unteren Randbedingungen am EPW, d. h. der gesteuerten, zeitlich veränderlichen Pumpenförderleistungen, besonders wichtig. Diese Komponenten der Entwässerungsinfrastruktur wurden somit als besonders systemrelevant identifiziert.

Vom Verbundpartner h&m wurden Datensätze zum Thema Starkregen und Klimawandel im Großraum Hannover recherchiert und erhoben. Die Datensammlung umfasst einerseits historische und aktuelle Messdaten aus verschiedenen Quellen (u. a. von Messstationen verschiedener Betreiber, Niederschlagsradar­daten und Rasterdatensätze), andererseits Modelldaten von globalen und regionalen Klimaprojektionen. Diese Daten stellten die Grundlage für die Arbeiten in AP 4 dar und werden in den zugehörigen Teil-AP-Beschreibungen der Teil-APs 4.1 bis 4.4 im Einzelnen aufgeführt.

Darüber hinaus wurden Datensätze betrachtet, die auf bereits ausgewerteten meteorologischen und geographischen Daten basieren und das Zielgebiet Hannover umfassen. Hier sind insbesondere die Datensätze KOSTRA-DWD-2020 (vgl. DWD 2023) und der CatRaRE-Katalog des DWD (vgl. Lengfeld et al. 2021) zu nennen, in dem auf Basis der Radarklimatologie RadKlim (vgl. Winterrath et al. 2017) Starkregenereignisse seit 2001 deutschlandweit erfasst werden. Die nachfolgende Abbildung 15 stellt Starkregenereignisse aus dem CatRaRE-Katalog dar (CatRaRE-W3; dieser beinhaltet Ereignisse, die die DWD-Warnstufe 3 für Unwetter überschritten), die in Niedersachsen stattfanden oder Niedersachsen mit betrafen. Angezeigt werden Ereignisse in einem Dauerstufenbereich von 1 bis 4 Stunden für zwei 10-Jahres-Zeiträume: 2003 – 2012 und 2013 – 2022. Im ersten Zeitraum traten 688 Ereignisse auf, im zweiten Zeitraum 947, was einer relativen Zunahme von +38 % entspricht. Wenn man ausschließlich Ereignisse betrachtet, die die Region Hannover betrafen, reduziert sich die Anzahl der

Starkregenereignisse auf 37 Ereignisse im ersten und 44 Ereignisse im zweiten Zeitraum, was einer relativen Zunahme von +19 % entspricht. Da die betrachteten Zeiträume aus klimatologischer Sicht relativ kurz sind und einzelne Wetterlagen, die in Zusammenhang mit Starkregenereignissen stehen, eine starke Auswirkung auf die Anzahl der Ereignisse haben können, sind diese Änderungen nicht als quantitative, robuste Klimasignale anzusehen. Sie können aber im Zusammenhang mit zunehmenden Temperaturen und der damit einhergehenden Zunahme der Aufnahmekapazität für Wasserdampf in der Atmosphäre als ein deutlicher Indikator einer zunehmenden Starkregengefahr im Großraum Hannover interpretiert werden. Weiterführende Ergebnisse zur Veränderung der Starkregenhäufigkeit in Zusammenhang mit dem Klimawandel werden in den Ausführungen zu Teil-AP 4.2 beschrieben.

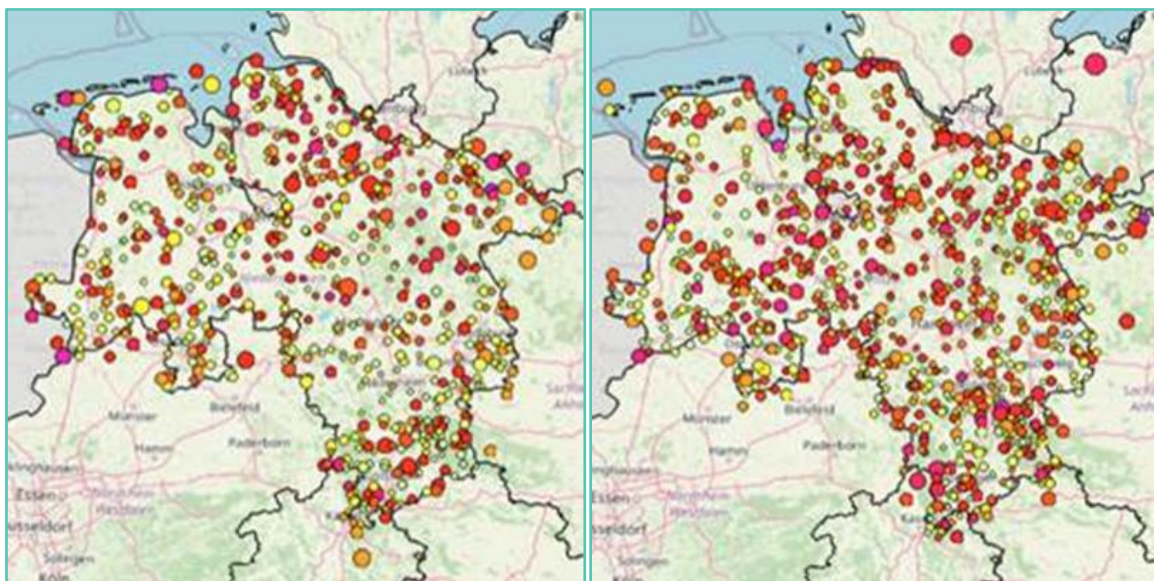


Abbildung 15: Starkregenereignisse von 2003 – 2012 (links) gegenüber 2013 – 2022 (rechts) in Niedersachsen mit Dauerstufen zwischen 1 und 4 Stunden. Dargestellt ist jeweils der Punkt des maximal gemessenen Niederschlags bei einem Ereignis, die Größe des Punktes ist relativ zur Ausdehnung des Ereignisses, die Farbe kennzeichnet den maximal erreichten Starkregenindex (SRI), Quelle: CatRaRE, LAWA-Starkregenportal (www.starkregenportal.de)

Außerdem wurden Berichte und Publikationen von früheren Projekten gesichtet und zusammengestellt. Umfangreiche Arbeiten fanden im Rahmen der KliBiW-Projekte statt (vgl. die verschiedenen NLWKN-Berichte). Darin wurden in mehreren aufeinander aufbauenden Projektphasen Analysen zur Entwicklung von Hoch- und Niedrigwasser im Leinegebiet durchgeführt. Es kamen unterschiedliche Regional- und Klimamodelle sowie hydrologische Impaktmodelle zum Einsatz, zunächst auf Basis des SRES-Szenarios A1B und in späteren Phasen ergänzend unter dem RCP8.5-Szenario. Die Auswertungen zeigen insgesamt einen konsistenten Trend zu häufigeren und intensiveren Hochwasserereignissen, insbesondere im Winterhalbjahr. Bereits für die nahe Zukunft (2021 – 2050) wird in mehreren Modellphasen eine Zunahme der Hochwasserabflüsse projiziert. Ab der Mitte des 21. Jahrhunderts verstärkt sich dieser Trend deutlich. Besonders extreme Hochwasser nehmen dabei stärker zu als häufigere Ereignisse, und Hochwasserperioden im Winter werden länger und ausgeprägter. Auch bei den Niedrigwasserverhältnissen, welche in den KliBiW-Projektphasen drei und fünf untersucht wurden, deuten die Ergebnisse auf klimabedingte Veränderungen hin. Während für die nahe Zukunft (2021 – 2050) noch keine eindeutige Entwicklung festgestellt werden konnte, zeichnet sich für die ferne Zukunft (2071 – 2100) ein robuster Trend zu ausgeprägteren und länger andauernden Trockenperioden ab. Besonders im Aller-Leine-Einzugsgebiet wird eine deutliche Zunahme der sogenannten Unterschreitungsdauer projiziert – also jener Zeiträume, in denen der Abfluss unter einen definierten Schwellenwert fällt, wobei dieser Schwellenwert für jeden Pegel als das 20 %-Langzeitquantil des Abflusses definiert wurde. Insgesamt deuten die Ergebnisse der KliBiW-Projekte auf erhebliche Auswirkungen durch den Klimawandel hin, sowohl in Bezug auf Hoch- als auch auf Niedrigwasser.

Neben den zuvor erläuterten Analysen eigener Messvorhaben und recherchierter Niederschlagsdaten wurde vom Projektpartner h&m ebenfalls eine umfassende Erhebung zu historischen extremen Ereignissen (extremes Hochwasser und extreme Trockenheit) vorrangig aus den letzten 100 Jahren in verschiedensten lokalen, regionalen und bundesweiten Quellen durchgeführt. Der Erhebungszeitraum lag vor Beginn der vorhandenen Messreihen und war damit – abhängig von den jeweils betrachteten Prozessen – wesentlich länger. Lokale Starkregenereignisse im Raum Hannover wurden für die Zeit ab 2010 bis 2022, Hochwasserereignisse zurückgehend bis Anfang des 19. Jahrhunderts (vorrangig die letzten 100 Jahre) und Trocken- bzw. Hitzeperioden zurück bis ins 14. Jahrhundert (vorrangig die letzten 75 Jahre) recherchiert und strukturiert nach diesen Prozessen und dem Zeitpunkt zusammengestellt. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf den Auswirkungen eben dieser Prozesse hinsichtlich Überflutungen im urbanen Raum, weiteren Störfällen, betrieblichen Einschränkungen, Notfalleinsätzen von Feuerwehr und THW, Verschlechterungen der Gewässergüte durch stoffliche Belastung und Verschmutzung sowie den resultierenden Umwelt-, Sach- und ggf. Personenschäden. Ergänzend wurden aus den Recherchequellen auch Informationen zu relevanten Umgebungsfaktoren im Untersuchungsgebiet, festgestellten Überschwemmungs- und Risikogebieten einschließlich Schadenspotenzialen sowie Gegenmaßnahmen und Einsatzpläne zusammengetragen und deren Relevanz für das ZwillE Vorhaben bewertet.

Das voranstehend zusammenfasste Wissen aus früheren Messprojekten und die neuen Erkenntnisse aus der Datenrecherche flossen in die nachfolgenden Arbeiten zur Auswahl der Messgrößen und Messstellen für den Digitalen Zwilling mit ein.

Im Teil-AP 3.2 „Konzeption des Messprogramms und der Datenverarbeitung“ wurde zunächst ein übergeordnetes Messkonzept erstellt, in dem die Messziele, die Messgrößen bzw. -parameter und die Messstellen festgelegt wurden. Dies erfolgte unter Abwägung von erforderlichem Datenbedarf, daraus resultierendem Umfang, Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Sensorik gegenüber der Angemessenheit der Kosten. Des Weiteren wurde im Messkonzept unterschieden zwischen der Einbindung stationärer, vorhandener Messeinrichtungen und der Durchführung eines zusätzlichen temporären Messprogramms mit im Rahmen des ZwillE Vorhabens neu beschaffter Sensorik. Die Messgeräteauswahl dafür wurde ebenfalls im Rahmen dieser Konzeptionierung vorgenommen. Zudem wurden in Absprache mit dem Verbundpartner IAB auch Vorgaben zur Datenverarbeitung und zur Sicherstellung der Datenqualität (Datenprüfung, -korrektur, Datenauswertung) ausgearbeitet. Das gesamte Messkonzept unterlag einer fortwährenden Überprüfung, Fortschreibung und ggf. auch Anpassung an den laufenden Messbetrieb.

Von vornherein war klar, dass eine vollständige messtechnische Erfassung des hydrologischen Prozessgeschehens im gesamten Stadtgebiet von Hannover den Rahmen des dreijährigen Vorhabens hinsichtlich Personal- und Sachkostenaufwand weit überschritten hätte. Daher besteht die Grundidee für das schlussendlich in Hannover durchgeführte Messprogramm zum einen aus einer „summarischen“ Betrachtung des gesamten Stadtgebietes mit allen Gewässereinleitungen und zum anderen aus einer exemplarischen und detaillierten Untersuchung von vier Teilgebieten bzw. Abwasseranlagen. Damit reicht die Spannweite der Messungen von den Eigenschaften der Kanalabflüsse und -einleitungen unterschiedlicher Entwässerungsverfahren und Kläranlagen (d. h. Emissionen aus Abwassereinleitungen) bis hin zu deren Auswirkungen im Gewässer (Immissionen). Ein Lageplan ausgewählter Messstellen ist der nachfolgenden Abbildung 16 zu entnehmen.

Für die „summarische“ Betrachtung wurden die Basiszuflüsse des Hauptgewässers Leine (Gewässermessstelle SG 3 / HG 3) und des größten Nebengewässers Ihme (Gewässermessstelle SG 4 / HG 4) in das Stadtgebiet hinein als Systeminput sowie der gebietsverlassende Abfluss der Leine unterhalb aller städtischen Einleitungsstellen (Gewässermessstelle SG 5 / HG 5) als Systemoutput erfasst. Dabei wurde sowohl die Hydraulik (HG x = Wasserstände, teilweise Schlüsselkurven zur Abflussberechnung vorhanden) als auch die Wasserbeschaffenheit bzw. -güte (SG x) kontinuierlich online gemessen.

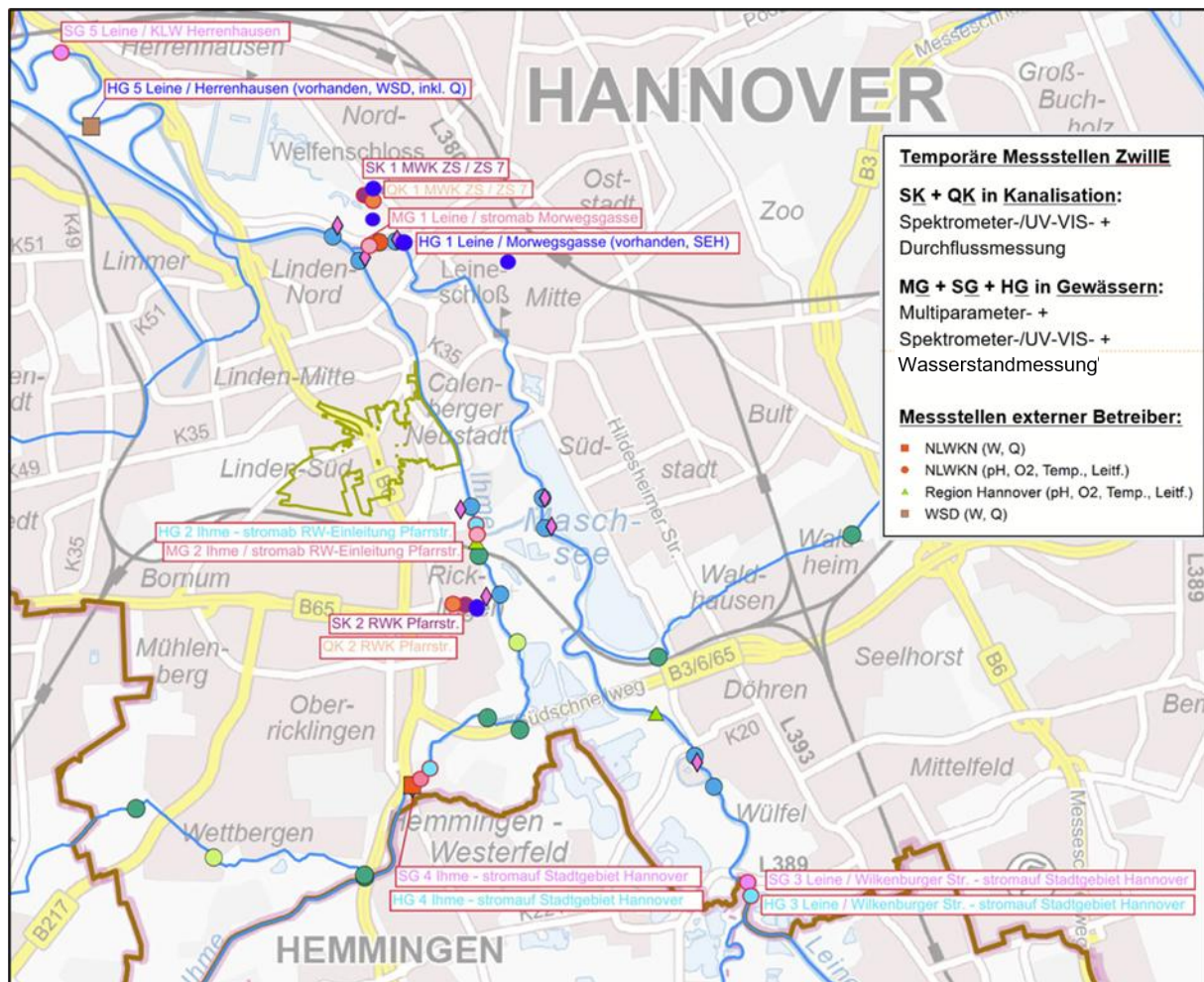


Abbildung 16: Auswahl von Messstellen im Gewässer und an zwei Kanalisationseinleitungen

Für die vier exemplarischen Untersuchungsbereiche wurde je ein Teilgebiet der Misch- und der Trennkanalisation mit den jeweils zugehörigen Einleitungsgewässern sowie die beiden Klärwerke ausgewählt. Bei dem Mischsystem handelt es sich um das weiter oben bereits erwähnte innerstädtische Einzugsgebiet des Zentralsammlers oberhalb des größten RÜ „Herrenhäuser Allee“ (Kanalmessstelle SK 1 / QK 1 kurz vor der Entlastungsschwelle) mit der zugehörigen Mischwassereinleitung in die Leine (Gewässermessstelle MG 1 / HG 1 unterhalb der zugehörigen Einleitstelle). Im ausgewählten Teilgebiet der Trennkanalisation in Ricklingen wurden die Regenwasserabflüsse in der Pfarrstraße (Kanalmessstelle SK 2 / QK 2) und die Gewässerzustände der Ihme (Gewässermessstelle MG 2 / HG 2 unterhalb der zugehörigen Einleitstelle) messtechnisch erfasst. Auch hier wurde sowohl die Hydraulik (QK x = Durchflüsse im Kanalnetz, HG x = Wasserstände in den Gewässern) als auch die Wasserbeschaffenheit bzw. -güte (SK x, MG x) kontinuierlich online gemessen. Außerdem gehörten die Klärwerke Herrenhausen und Gümmerwald zu den Abwasseranlagen, auf denen Wasser- und Stoffströme erfasst wurden.

Das Messkonzept bezieht die Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie (vgl. EU 2000) sowie des DWA-BWK-Arbeitsblatts A 102-2 / BWK-A 3-2 bzw. des Merkblatts DWA-M 102-3 (vgl. DWA 2020, DWA 2021) hinsichtlich der Beurteilungspunkte im Gewässer sowie der Messgrößen mit ein.

Von den vorhandenen stationären Dauermessstellen verschiedener Betreiber sind kontinuierliche Wasserstanddaten und zugehörige Wasserstand-Abfluss-Kennlinien aus den Gewässern Leine (HG 3, Betreiber: WSV) und Ihme (HG 4, Betreiber: NLWKN) integriert. Die Stadtentwässerung Hannover (SEH) liefert Betriebsmessdaten von Wasserständen in Kanalisation und Einleitgewässern, aber auch Pumpwerksförderleistungen, Schieberstellungen und Entlastungsraten aus der Kanalisation sowie Daten von den Kläranlagen, die aus den Prozessleitsystemen von Kanalnetz und Klärwerken stammen.

Für das temporäre Messprogramm wurde Online-Messtechnik zum einen zur kontinuierlichen Erfassung der Abwasser- und Gewässerbeschaffenheit neu beschafft. Sie bestand erstens aus modernen Spektrometer-Sonden (Messstellenbezeichnung Sx x in Abbildung 16), die ein optisches Messverfahren nutzen. Dabei wird Strahlung im UV- sowie im sichtbaren (VIS) Bereich durch das zu messende Wassermedium gesendet und das resultierende Absorptionsspektrum gemessen. Diese Rohspektren werden ausgewertet, wobei jeder Wasserinhaltsstoff einen spezifischen Fingerabdruck aufweist, der mittels Kalibrierung anhand von Laborproben abgeleitet wird. Zweitens kamen Multi-Parameter-Sonden (Messstellenbezeichnung MG x in Abbildung 16) zum Einsatz, die die Güteparameter mittels chemisch-physikalischer, teilweise ionenselektiver Prozesse erfassen. Zweck der Verwendung dieser innovativen Gütemessgeräte war neben der Erfassung der Parameter für den Digitalen Zwilling auch ihre kritische Eignungsprüfung im Praxiseinsatz, um den betrieblichen Aufwand sowie die Zuverlässigkeit und Qualität der Ergebnisse dieser Geräte bewerten zu können.

Zum anderen wurde auch neue Sensorik zur kontinuierlichen Erfassung der Hydraulik installiert. Wie zuvor schon erläutert, handelt es sich um Durchflussmessungen in zwei Abwasserkanälen (QK x) und eine Wasserstandmessung im Gewässer (HG 2). Als Hilfs- und Zusatzinformation wurden sowohl von den direkt im Gewässer installierten Spektrometer-Sonden als auch von den Durchflussmessgeräten zusätzlich die Wasserstände kontinuierlich erfasst.

Eine Übersicht über Sensorik und Messgrößen des temporären Messprogramms ist Abbildung 17 zu entnehmen. Bei der genauen Festlegung der Messorte im Feld wurde deren hydrometrische Eignung und Repräsentativität im Hinblick auf die zu erfassenden Prozesse besonders berücksichtigt.

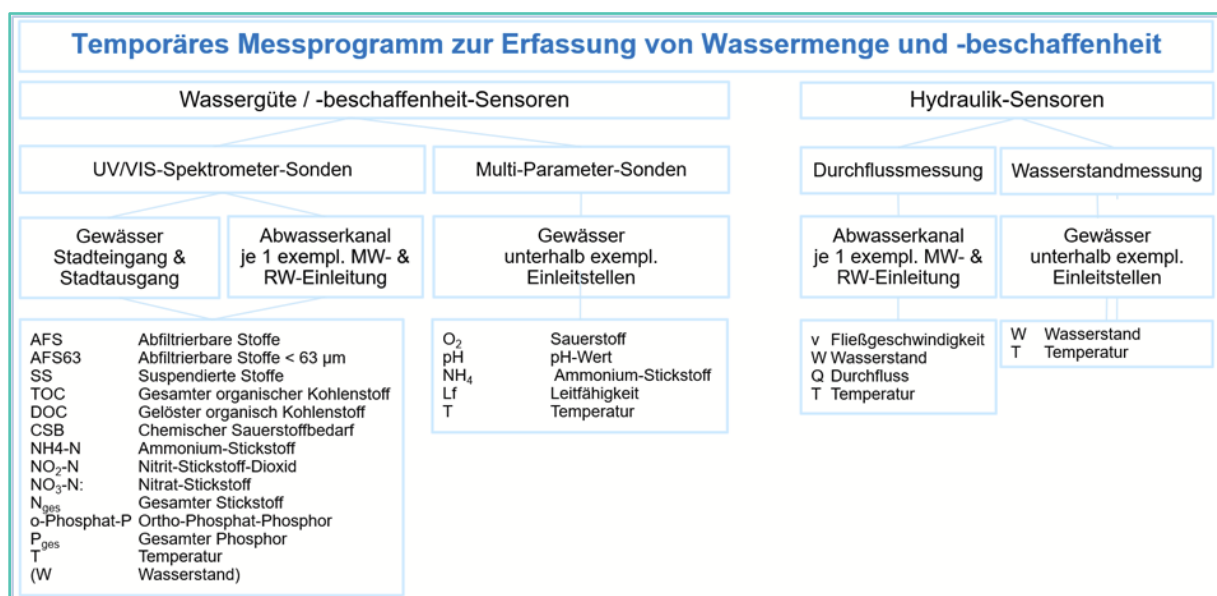


Abbildung 17: Sensorik und Messgrößen des temporären Messprogramms

Nach der Konzeptionierungsphase begann in Teil-AP 3.3 die eigentliche „Durchführung des Messprogramms“, die wie erwartet mit einem sehr hohen Personalaufwand verbunden war. Dazu gehörten Beschaffung (durch den Verbundpartner IAB), Installation und Betrieb der Messgeräte, die intensive Betreuung der innovativen Messeinrichtungen zur kontinuierlichen Erfassung der Wasserbeschaffenheit einschließlich ihrer Kalibrierung sowie die Verarbeitung und Auswertung der kontinuierlich erhobenen Messdaten.

Einbau und Inbetriebnahme der neuen temporären Messtechnik in Kanalnetz und Gewässer startete 2022 und endete im Februar 2024 mit der letzten Messstelle MG 2. Der kontinuierliche Betrieb der Messeinrichtungen begann entsprechend schrittweise ab Dezember 2022. Ab Anfang März 2024 waren

dann alle Messstellen in Betrieb. In der nachfolgenden Abbildung 18 ist die Verfügbarkeit der temporären Messstellen für nahezu den gesamten Messzeitraum von Anfang 2023 bis Mitte 2025 dargestellt. Die unerwartet lange Installationsphase war mehreren Faktoren geschuldet, die im vorherigen Abschnitt II.3 „Planung und Ablauf des Vorhabens“ erläutert sind. Daher war im ersten Jahr 2023 nur ein unvollständiger Betrieb des Messsystems möglich.

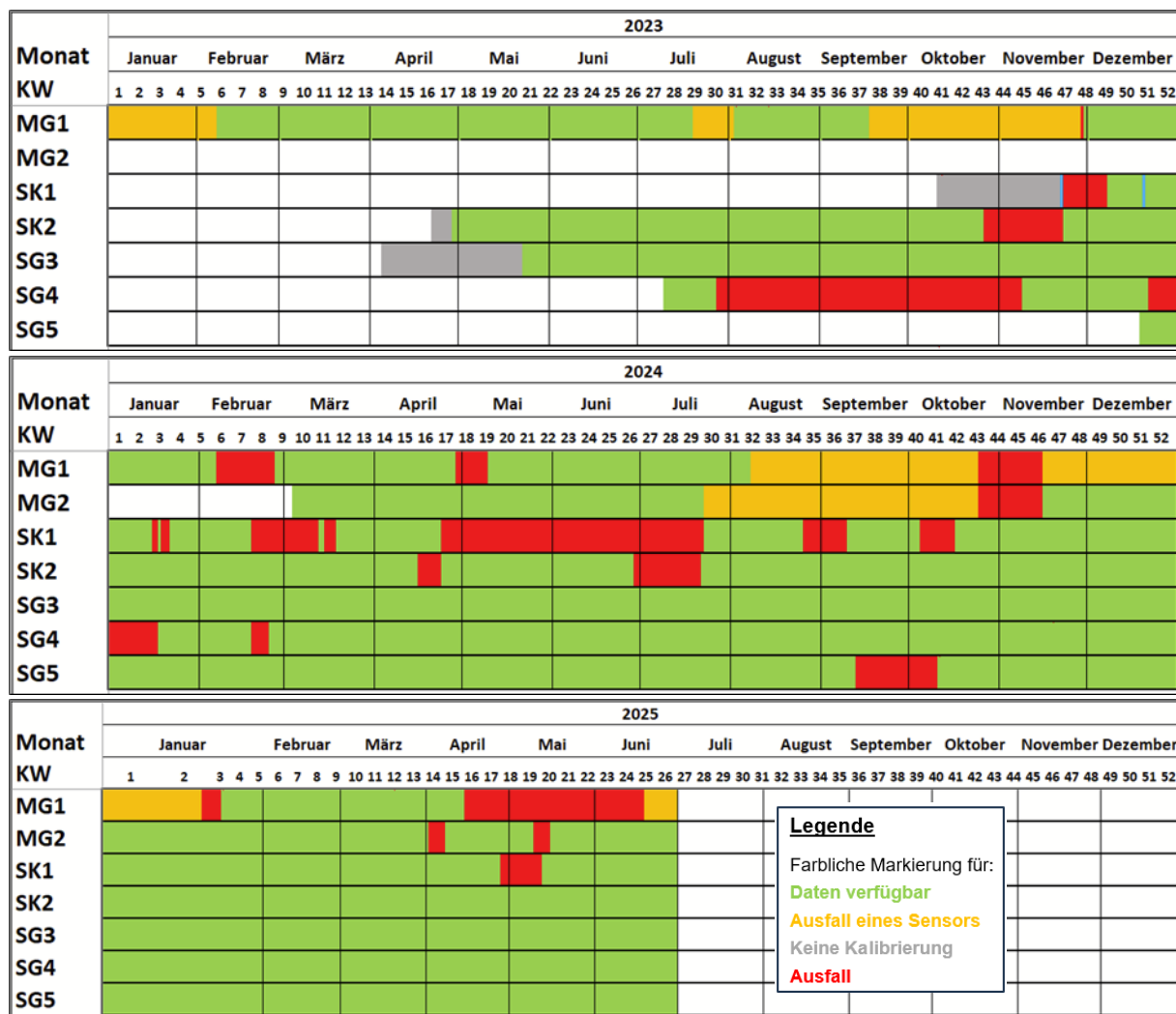


Abbildung 18: Messstellenverfügbarkeit des temporären Messprogramms

Die Spektrometer erforderten zu Beginn des Messprogramms eine aufwändige lokale Anwendungskalibrierung für die unterschiedlichen realen Wassermatrizen in den Gewässern und Abwasserkanälen. Diese Kalibrierung war erforderlich, um die vom Spektrometer gemessenen Rohspektren in Konzentrationswerte für die Güteparameter umrechnen zu können (siehe oben). Hierfür wurden vom Verbundpartner SEH im Rahmen eines umfangreichen begleitenden Probenahme- und Analytikprogramms für die 14 untersuchten Wasserbeschaffenheitsparameter (vgl. die vorherige Abbildung 17) in einem Zeitraum von Januar bis August 2024 je Spektrometer-Messstelle bis zu 32 Wasserproben entnommen und laboranalytisch untersucht, um Referenzwerte zu erhalten. Diese Werte wurden jeweils einem zeitgleich gemessenen Spektrum zugeordnet. Mit der Software „ISA plus Manager“ des Spektrometer-Herstellers und den zuvor genannten Wertepaaren wurden mathematische multilineare Modelle für jeden Parameter erstellt. Diese beinhalten die Koeffizienten, mit denen auf Grundlage bestimmter Wellenlängen aus den Absorptionsspektren die Konzentration der gewünschten Stoffgrößen ermittelt wird. Die Modelle wurden auf den Messumformern der Spektrometer-Sonden als virtuelle Sensoren programmiert, so dass die Güteparameter online und in Echtzeit für den Digitalen Zwilling zur Verfügung standen.

Der laufende Messbetrieb war verbunden mit einer regelmäßigen Online-Überwachung der Messsysteme im Sinne der Qualitätssicherung. Es erfolgte ein vorläufiger visueller Vergleich der auflaufenden Messdaten an den unterschiedlichen Standorten in einer Zeitreihendarstellung. Dadurch konnte schnell erkannt werden, wenn eine Kalibrierung bzw. Reinigung der Sonden notwendig wurde oder auch, wann besondere Ereignisse auftraten, die eventuell für die weitergehende Datenauswertung interessant sein konnten. Die Überwachung wurde mittels eines eigens für das Projekt erstellten grafischen Dashboards zur Zeitreihendarstellung durchgeführt. Dies baut auf einer speziell für dieses Vorhaben aufgebauten SQL-Datenbank auf, die die bei den Messgeräteherstellern gespeicherten Messdatenbestände sowie weitere öffentlich zugängliche Daten anderer Messstellenbetreiber nutzte. Die Oberfläche wurde mittels der plattformübergreifenden Open-Source-Anwendung Grafana¹ erstellt. Aufgrund technischer Einschränkungen wurden die Daten der Messsysteme nur alle zwei Stunden in die Datenbank übertragen. Bei „fremden“ Messungen externer öffentlicher Messdatenanbieter fand ein Datenabruf nur einmal pro Tag statt (near-real-time), da die Daten für die Zwecke der Messbetriebsüberwachung nicht in Echtzeit (real-time) benötigt wurden.

Des Weiteren erfolgte eine zeitintensive Vor-Ort-Betreuung der Messeinrichtungen. Die Wartung umfasste dabei neben der regelmäßigen monatlichen Vergleichs- und Mehrpunkt-Kalibrierung der Sensoren der Multi-Parameter-Sonde auch die Klarwasserkalibrierung der Spektrometer-Sonden. Letztere wurde zunächst in einem Intervall von etwa drei Monaten durchgeführt. Um den Einfluss von Verschmutzungen der Spektrometer-Gläser auf die Messwerte zu verringern, wurde ab Sommer 2024 monatlich eine Reinigung und Klarwasserkalibrierung durchgeführt.

Die Verfügbarkeit der kontinuierlichen Messdaten war auch durch Ausfälle der Messeinrichtungen in unterschiedlichem Umfang eingeschränkt. So wiesen die beiden Multi-Parameter-Sonden zwischenzeitliche kürzere Ausfälle, aber auch jeweils längere Zeiträume über mehrere Monate mit Problemen einzelner Sensoren (pH- und insbesondere dem Ammonium-Sensor), der Stromversorgung und auch mit einem Defekt der gesamten Sonde auf. Die resultierenden Reparaturen und der erforderliche regelmäßige Austausch der Ammonium-Sensoren führten zudem zu häufigen Ausfällen. Im letzten Messjahr 2025 erreichte zumindest die Messstelle MG 2 dann allerdings wieder eine höhere Zuverlässigkeit.

Insbesondere die Kanalmessstellen SK 1 und SK 2 mussten wegen wiederholten technischen Defekten mehrfach abgeschaltet und repariert werden. Die geringste Zuverlässigkeit wies bis Oktober 2024 die Kanalmessstelle SK 1 auf. Über den gesamten Messzeitraum kam es immer wieder zu kurz- und längerfristigen Ausfällen. Im Jahr 2024 liegt damit nur eine Datenverfügbarkeit von etwa 60 % vor. Ursachen hierfür sind Probleme mit dem Kompressor zur Förderung des Abwassers aus dem Kanal in die Bypass-Leitung, mit Verstopfungen an der Pumpe im Kanal und mit einem Ablaufschlauch am Auslauf der Messstation. Die Probleme mit dem Kompressor konnten nach dessen Austausch durch eine Verlängerung des Messintervalls von zwei auf fünf Minuten und der damit verbundenen Reduzierung an Pumpvorgängen behoben werden.

Am zuverlässigsten zeigten sich die Spektrometer-Messstellen im Gewässer. So erreichte die Messstelle SG 3 eine Datenverfügbarkeit von 100 % und auch die beiden Spektrometer bei SG 4 und SG 5 haben jeweils zu über 90 % Daten geliefert. Dort traten Ausfälle ausschließlich aufgrund externer Ursachen auf (Stromversorgungsprobleme, Messstellerverlegung wegen Brückenbaustelle). Hier waren die Sonden in einem Hüllrohr mit direktem Kontakt zum Wasserkörper eingebaut, so dass die o. g. Probleme infolge der Bypassleitung vermieden werden konnten. Das starke Winterhochwasser 2023 / 2024 führte erfreulicherweise kaum zu einer Beeinträchtigung des Messbetriebs. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgte – bis auf eine Stromabschaltung seitens des Grundstückseigentümers an der Messstelle SG 4 – lückenlos.

Ein Augenmerk im Rahmen des Messprogramms galt der Eignung der Messgeräte im hydrometrischen Praxiseinsatz. Die Nutzung der verschiedenen Messsysteme in Schmutz-, Regen- und Oberflächenwasser stellt eine hohe Belastung für die Geräte dar. Insbesondere die ionenselektiven Elektroden mit

¹ <https://grafana.com/>

ihrem chemisch-physikalischen Messprinzip (ISE-Sensoren der Multi-Parameter-Sonden) sind von einer starken Abnutzung ihrer Komponenten betroffen. Dies ließ sich sehr gut an den Ergebnissen der fortlaufenden Kalibrierungen im wichtigen Konzentrationsbereich von 0,1 – 10 mg/l erkennen. Zudem sind aufgrund von Umwelteinflüssen fehlerhafte Feldkalibrierungen schwer zu kontrollieren. Eine sorgfältige Dokumentation aller Vorkommnisse bei den Kalibrierungen kann die spätere Nachbearbeitung, nachträgliche Fehlerbeseitigung und Auswertung der Daten begünstigen. Basierend auf den gesammelten Erfahrungen sind die Multi-Parameter-Sonden nur bedingt für den Dauerbetrieb in der Ingenieurpraxis geeignet. So kann nur mit erheblichen Personal- und Sachmitteleinsatz eine zufriedenstellende Zuverlässigkeit der Sonden erzielt werden.

Zur Verifizierung der Messergebnisse der UV/VIS-Spektrometer wird im Folgenden die erzielte Messgenauigkeit der UV/VIS-Messungen exemplarisch anhand der Parameter TOC, $\text{NH}_4\text{-N}$ und Suspensierte Stoffe dargestellt. Hierzu wurden die durch Probennahme gewonnenen Laboraten jeweils mit dem 10-Minuten-Mittelwert der gemessenen Spektrometerwerte (nach erfolgter Anwendungskalibrierung) verglichen. Die schwarze Winkelhalbierende markiert dabei den Sollverlauf zwischen den Labor- und Messwerten. Zur Bewertung der Messgenauigkeit wurden zusätzlich die Standardabweichung, die mittlere prozentuale Abweichung sowie der Pearson-Korrelationskoeffizient ermittelt.

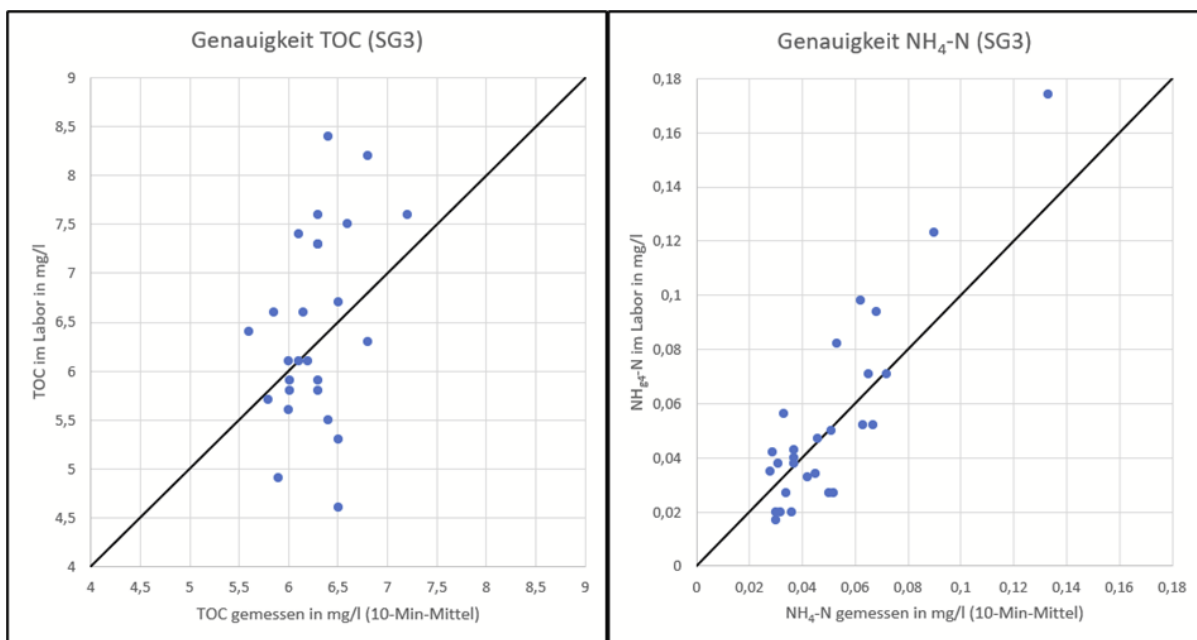


Abbildung 19: Konzentrationen aus Laboranalytik und Spektrometermessung, Messstelle SG 3, links Parameter TOC, rechts Parameter $\text{NH}_4\text{-N}$

In Abbildung 19 ist links der Zusammenhang zwischen den mit dem Spektrometer gemessenen TOC-Konzentrationen und den Laborwerten an der Messstelle SG 3 dargestellt. Auffällig ist die kleinere Messwertespanne der vom Spektrometer gemessenen Werte. Die Laborwerte decken einen Bereich von etwa 4,6 bis 8,4 mg/l ab. Die Spektrometerwerte liegen in einem Bereich von lediglich etwa 5,6 bis 7,2 mg/l. Der Korrelationskoeffizient zeigt mit 0,75 einen mäßigen Zusammenhang. Der Mittelwert der prozentualen Abweichung erreicht mit 12,3 % einen guten Wert. Die ermittelte Standardabweichung beträgt 0,94 mg/l.

In Abbildung 19 ist rechts für Ammoniumstickstoff ein sehr deutlich ausgeprägter linearer Zusammenhang erkennbar. Bestätigt wird dies durch einen hohen Korrelationskoeffizienten von 0,90. Die berechnete Standardabweichung liegt bei 0,011 mg/l. Aufgrund der geringen Konzentrationen fällt der Mittelwert der prozentualen Abweichung mit 32,5 % allerdings sehr hoch aus.

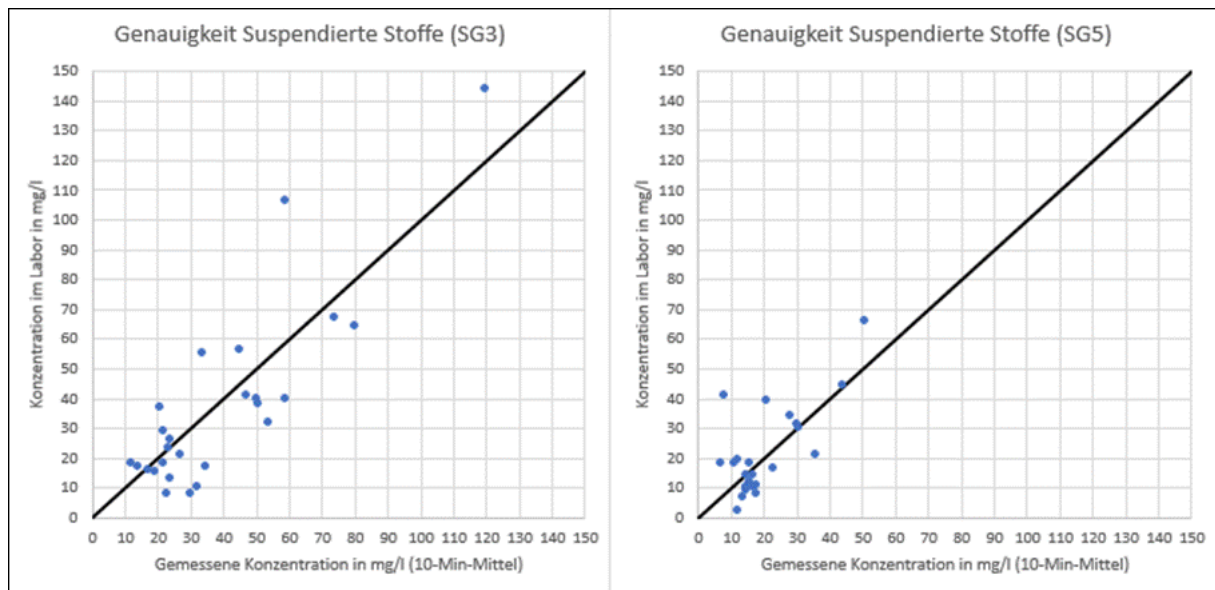


Abbildung 20: Konzentrationen aus Laboranalytik und Spektrometermessung, Parameter Suspendierte Stoffe, links Messstelle SG 3, rechts Messstelle SG 5

Die zwei Diagramme in obiger Abbildung 20 zeigen den Zusammenhang zwischen den mit den Spektrometern gemessenen Konzentrationen und den Laborwerten für den Parameter Suspendierte Stoffe an den Messstellen SG 3 und SG 5. Der Wertebereich der Laborproben wird von den gemessenen Spektrometerdaten nahezu vollständig abgedeckt. Insgesamt weisen die Messstellen für den Parameter eine ähnliche Genauigkeit auf. Die Standardabweichung beträgt 9,85 mg/l an der Messstelle SG 3 und 7,08 mg/l an Messstelle SG 5. Der Mittelwert der prozentualen Abweichung liegt an beiden Messstellen mit Werten von 55,1 und 63,9 % in einem ähnlich hohen Bereich. Der Pearson-Korrelationskoeffizient weist mit 0,86 an der Messstelle SG 3 einen höheren Wert auf als an Messstelle SG 5 mit 0,70.

Angesichts der o. g. teilweise hohen Abweichungen bzw. der Schwankungsbreite der Messergebnisse (siehe auch die nachfolgenden Abbildungen 21 bis 23), insbesondere bei den Feststoffparametern, stellte sich die Frage nach dem Einfluss des Probenahmevorgangs selbst. Dieser erfolgte an den Gewässermessstellen unterschiedlich. Dort waren die Spektrometer-Sonden in einem Hüllrohr direkt im Wasserkörper eingebaut. Die Proben für die Laboranalytik wurden hingegen als Schöpfproben entnommen. Hier ist weitere Forschung zur Klärung der Vergleichbarkeit der Messergebnisse erforderlich. Im Unterschied dazu wurde die Probenahme an den beiden Kanalmessstellen sowohl für die quasi-kontinuierliche Spektrometermessung als auch für die Laborproben auf die gleiche Art und Weise in der Bypassleitung vorgenommen, in die das Abwasser über eine Saugpumpe aus dem Abwasserkanal gefördert wurde. Auch in diesen Fällen ist die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu klären. Laboranalytisch problematisch – insbesondere für die Feststoffanalytik – war einerseits das nur geringe Probenvolumen, das aus dem Bypass entnommen werden konnte. Andererseits wird weiter unten im Zusammenhang mit den Messdaten an der Messstelle SK 2 (siehe die nachfolgende Abbildung 22) zudem auch der Verdacht einer zu schwachen Probenförderung geäußert, die eventuell zu einer Klassierung des Probegutes hat führen können. Ein erster Abgleich der aktuell erhobenen Laborwerte aus der Bypassleitung mit Schöpfproben aus dem Jahr 2010 kann allerdings keine systematische Abweichung bestätigen. Die gepumpten Proben weisen vergleichbare Konzentrationen von NH_4 und N_{ges} sowie teilweise sogar höhere Konzentrationen von CSB, NO_2 und NO_3 auf.

Die Spektrometer-Sonden erfordern einen hohen Anfangsaufwand für die lokale Anwendungskalibrierung. Im Dauerbetrieb weisen sie eine hohe Datenverfügbarkeit auf. Ob der hohe Aufwand für die Sondenkalibrierung gerechtfertigt ist, hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab: Während die Gütemessungen für die Funktionalität des Digitalen Zwillings hinsichtlich Wassermengen und Überflutungsschutz nicht von Bedeutung sind, stellen sie jedoch Grundlagendaten für den Gewässerschutz dar, um zukünftige Veränderungen der Gewässerbelastung zu dokumentieren und minimieren zu können.

Das Teil-AP 3.4 „Datenübergabe und Untersuchung der Transferierbarkeit“ umfasst die Nachbearbeitung der im zuvor erläuterten Teil-AP 3.3 erhobenen kontinuierlichen Messdaten. Dazu gehört sowohl die Bereitstellung des erfassten Datenkontinuums für den Digitalen Zwilling als auch dessen weitergehende Auswertung, Kommentierung und Bewertung.

Die Übergabe der Messdatenkontinuums an die unterschiedlichen Datenportale der Messgerätehersteller wurde fortlaufend überwacht. Dort ließen sich online und für alle Verbundpartner einsehbar Tabellen-, Zeitreihen- und sonstige Darstellungen erzeugen und auch händisch exportieren. Außerdem wurden Verfahren zur automatischen kontinuierlichen Übernahme der gemessenen Daten in eine lokale Messdatenbank bei ifs zur Überwachung des Messbetriebs realisiert (siehe oben). Diese Datenbank wurde auch dem Verbundpartner IAB zur Bearbeitung seiner Teilaufgaben übergeben. Die zuvor genannten implementierten Datenübernahmeverfahren mit ihren unterschiedlichen Routinen für die verschiedenen Messeinrichtungen für Hydraulik und Wasserbeschaffenheit wurden dann schließlich auch für den Datenimport in die gemeinsame Daten- und Kommunikationsinfrastruktur des Digitalen Zwillings genutzt (vgl. hierzu auch die vorherigen Ausführungen zum Teil-AP 2.2).

Neben der Erfassung und Bereitstellung der dynamischen Prozessdaten des Entwässerungssystems in Form von Echtzeitmessdaten für den Digitalen Zwilling sollten auch die Auswirkungen der Abwässereinleitungen auf die Gewässerbeschaffenheit (Immissionen) beurteilt werden. Um den Rahmen dieses Berichts nicht zu sprengen, wird dazu nachfolgend eine kleine Auswahl von Ereignissen erläutert, anhand derer signifikante Beeinflussungen der Gewässer aufgezeigt werden können. Gemäß Zielrichtung des Messkonzepts beinhaltet diese eine Misch- und eine Regenwässereinleitung sowie ein fluviales Hochwasserereignis.

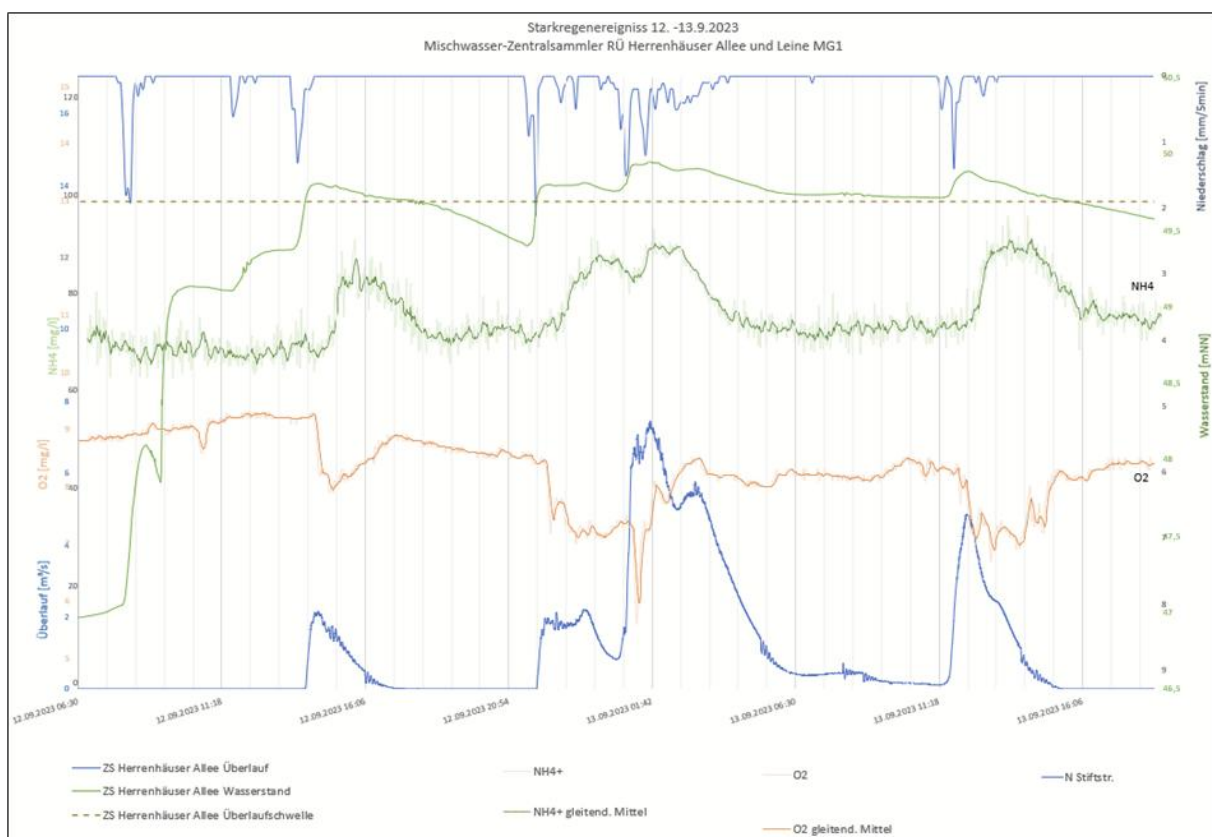


Abbildung 21: Niederschlagsereignis mit Mischwasserüberlauf und Auswirkungen auf die Gewässerbeschaffenheit (Messstelle MG 1)

So konnten an der Gewässermessstelle MG 1 unmittelbar unterhalb der o. g. Hauptmischwasserentlastung am RÜ „Herrenhäuser Allee“ (Länge Überlaufschwelle rd. 40 m, Zuflusskanal DN 3.400) die Auswirkungen von Überlaufereignissen auf die Gewässerbeschaffenheit mittels der dortigen Multi-Parameter-Sonde eindeutig erfasst werden. Dies ist in Abbildung 21 exemplarisch an einem mehrteiligen Niederschlags- (blaue Ganglinie von oben) und Entlastungsereignis mit einem maximalen Überlauf (blaue Ganglinie unten) von rd. 8 m³/s dargestellt. Zeitgleich mit den Überlaufgeschehen zeigt die Abbildung den deutlichen Rückgang von Sauerstoff (orange Ganglinie) und den signifikanten Anstieg von Ammonium (grüne Ganglinie) im Gewässer unterhalb der Einleitstelle. Im Übrigen ist auch das Absinken von Leitfähigkeit und weniger ausgeprägt von pH-Wert sowie der Anstieg der Wassertemperatur zu verzeichnen (in der Abbildung 21 nicht dargestellt).

An der Messstelle SK 2 waren im Regenwasserkanal ein Durchflussmessgerät sowie eine UV/VIS-Spektrometer-Sonde, die über eine Bypass-Pumpleitung beschickt wurde, eingebaut. In der nachfolgenden Abbildung 22 sind die erfassten Messdaten dieser Sensoren während eines Starkregenereignisses dargestellt: als Wasserbeschaffenheitsparameter die Suspendierten Feststoffe (SS, gelbe Ganglinie), der Gesamt-Phosphor (graue Ganglinie) und der Gesamt-Stickstoff (grüne Ganglinie). Für jeden dieser drei Parameter sind zwei Zeitreihen zu erkennen: eine stärker schwankende, feinere Linie mit allen im 2-Minuten-Intervall erfassten Messdaten und eine in fett eingezeichnete Ganglinie als 10-Minuten-Gleitmittel. Die Ganglinien der Messgrößen der Wassergüte weisen funktionsgemäß Unterbrechungen auf, die mit den Zwischenzeiten korrespondieren, in denen Wasserstand und Abfluss im Regenwasserkanal aufgrund von Regenpausen auf null zurückgegangen waren. Des Weiteren ist der Niederschlag im betreffenden Einzugsgebiet (blaue Ganglinie von oben) abgebildet.

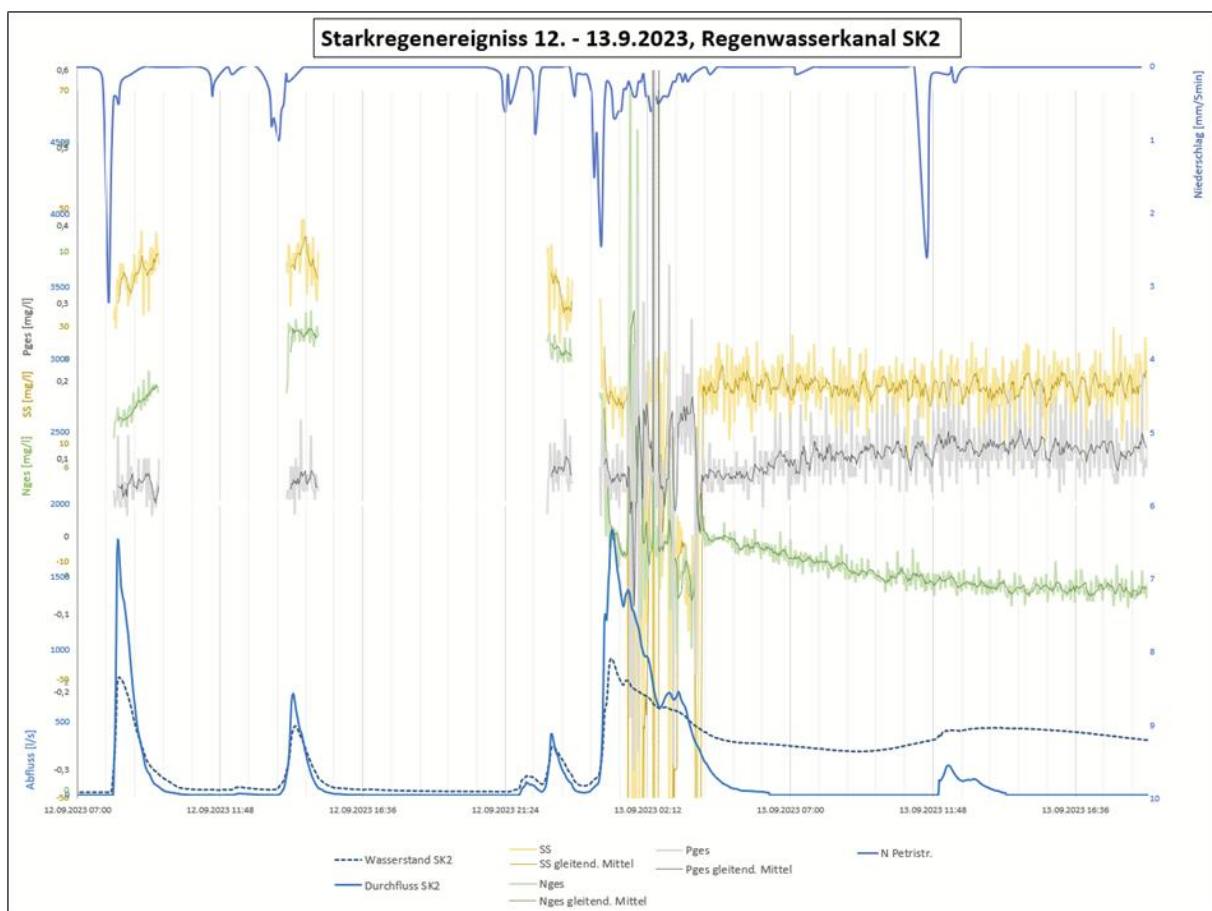


Abbildung 22: Regenwassereinleitung während Starkregenereignis, Hydraulik und Abwasserbeschaffenheit (Messstelle SK 2)

Gerade während der größten Abflusswelle, die am 13.09.2023 ab ca. 0:00 Uhr beginnt, zeigen die Beschaffenheitsparameter ab ca. 1:30 Uhr bis ca. 4:00 Uhr sehr starke Ausschläge in beide Richtungen, so dass die Ergebnisse der UV/VIS-Spektrometer als nicht vertrauenswürdig anzusehen sind. Auch eine Ausschnittvergrößerung dieses Zeitraums ergibt keine belastbaren Hinweise, außer dass die Schwankungen beim Parameter Suspendierte Stoffe am stärksten sind und am längsten andauern. Ein Verdacht dafür ist eine eventuell unzulängliche Probenförderung, insbesondere der Feststoffe, durch Pumpe und Bypassleitung. Hier ist weitere Ursachenforschung zur Erklärung dieser Messwertschwankungen erforderlich.

Das Weihnachtshochwasser 2023 / 2024 ist das letzte Ereignis, das hier im Hinblick auf seine Beeinflussung der Gewässerbeschaffenheit diskutiert wird. Auslöser war, entgegen der eigentlichen Zielrichtung dieses Vorhabens, nicht ein urbaner Starkregen, sondern ein ergiebiger und langanhaltender Dauerregen. Trotzdem eignet sich das Hochwasserereignis gut zur Beschreibung der Prozesse im Gewässer und zur Beurteilung des Messsystems.

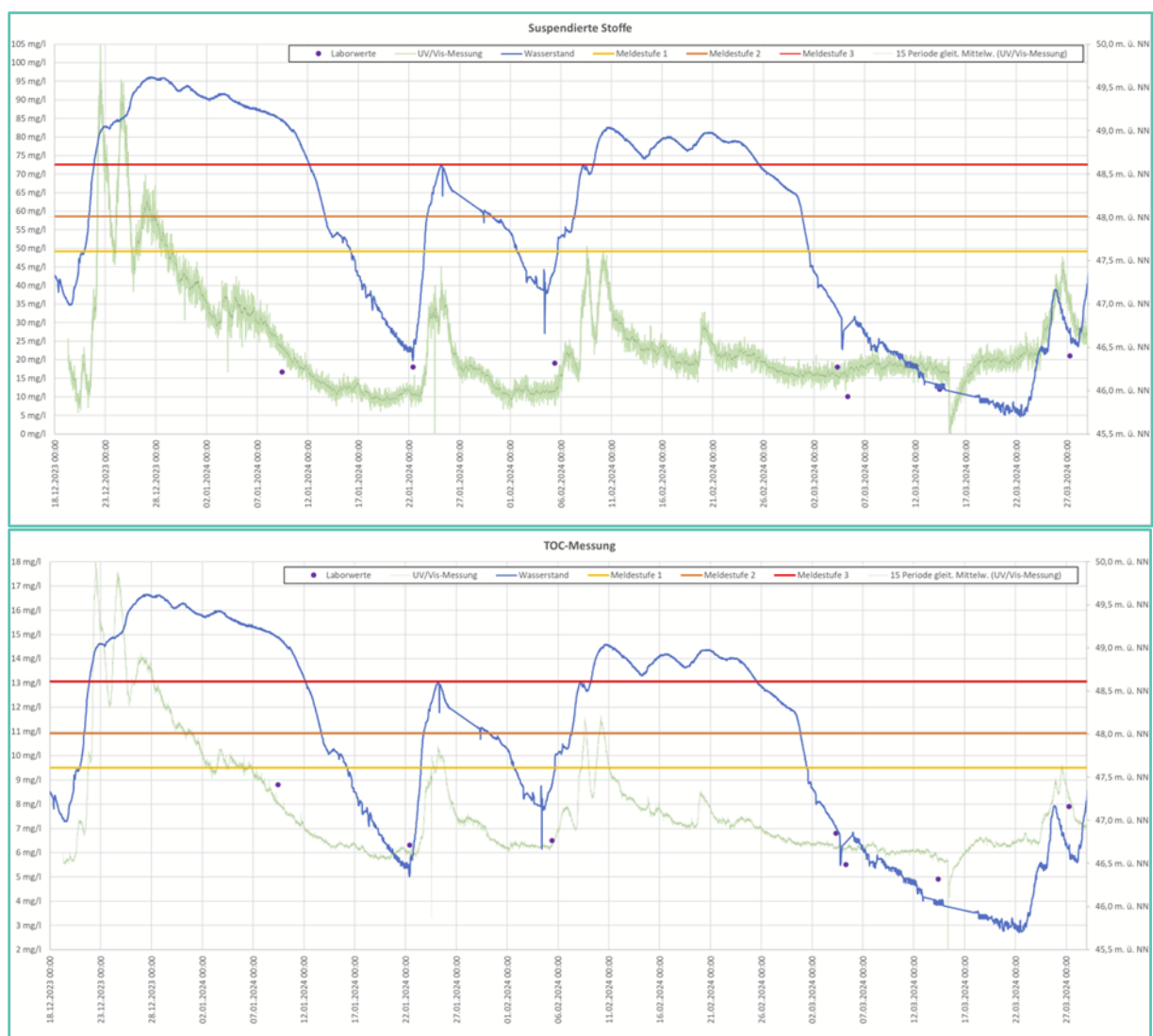


Abbildung 23: Weihnachtshochwasser 2023 / 2024 der Leine stadtausgangs mit Wasserstand (HG 5) und Gewässerbeschaffenheit (SG 5)

Wie Abbildung 23 zeigt, handelt es sich um ein mehrteiliges, ca. 2,5 Monate anhaltendes Hochwasserereignis, bei dem der Wasserstand am WSV-Pegel (HG 5) um rund 4 m anstieg. Es führte in der Region

Hannover und im weiteren Umland zu erheblichen Überschwemmungen. Diese ist auch an den Hochwassermeldestufen I, II und III abzulesen, die als horizontale Geraden in den beiden Diagrammen eingetragen sind (gelbe, orange und rote Linien). Gut zu erkennen ist ein erster Anstieg des Wasserstands (blaue Ganglinie) Mitte Dezember und das eigentliche Weihnachtshochwasser dann ab 20.12.2023, das noch lange bis in die ersten Monate des Jahres 2024 nachwirkt.

Die Auswirkungen dieses Ereignisses auf die Gewässerbeschaffenheit zeigen die Messergebnisse des UV/VIS-Spektrometers an der Messstelle SG 5. In Abbildung 23 beispielhaft dargestellt sind die Konzentrationen der Suspendierte Stoffe und des TOC als hellgrüne Ganglinien. Beide Parameter zeigen jeweils Anstiege, die mit jedem Anschwellen des Wasserstands erneut auftraten. Als Ursache wird vor allem die Erosion und das Abschwemmen von Feststoffen mit jeder Hochwasserwelle vermutet. Auch die Plausibilität der Messergebnisse lässt sich augenscheinlich für beide Parameter belegen. Als Referenz sind in den Diagrammen die Ergebnisse der Laboranalysen zeitgerecht als lila Punkte dargestellt. Erkennbar ist eine recht gute Übereinstimmung, wobei die Dynamik der Konzentrationsanstiege wegen damit nicht übereinstimmenden Zeitpunkten der Probenahmen, die nur bei niedrigeren Wasserständen möglich waren, nicht belegt werden kann. Die oben in Teil-AP 3.3 festgestellten deutlich geringeren Abweichungen der TOC-Konzentration gegenüber der Konzentration der Suspendierten Stoffe lassen sich ebenfalls an der unterschiedlichen Schwankungsbreite der beiden Parameter ablesen.

Die Auswertung der Messergebnisse der UV/VIS-Spektrometers hinsichtlich des summarischen Einflusses aller städtischen Regen- und Mischwassereinleitungen auf die Gewässerbeschaffenheit gestaltete sich schwierig, da Konzentrationsänderungen der Wasserinhaltsstoffe angesichts der festgestellten Schwankungsbreite der Messwerte kaum eindeutig zugeordnet werden konnten. Auch die größere Entfernung zwischen der Messstelle SG 5 in der Leine am Ausgang des Stadtgebiets und den – vor allem – signifikanten Einleitstellen in der Innenstadt erschwerte die Bewertung. Durch die resultierende lange Fließzeit und damit verbundene Dämpfung von Konzentrationsspitzen büßen diese zudem ihre deutliche Ausprägung ein. Das langfristige Ziel der Minimierung der Gewässerbelastung durch Beobachtung der Gewässerbeschaffenheit und resultierende Steuerungseingriffe mit Hilfe des Digitalen Zwillings ist daher besser über Messstellen im Nahbereich der Einleitungen zu realisieren.

AP 4: Hochauflösende Prognosemodelle für extreme Niederschlagsereignisse (AP-Leitung: h&m)

In dem von h&m geleiteten AP 3 „Hochauflösende Prognosemodelle für extreme Niederschlagsereignisse“ erfolgten die Arbeiten in den Teil-APs 4.1 und 4.3 mit Unterstützung der Projektpartner ifs und SEH, wobei SEH Grundlagendaten wie z. B. Niederschlagsdaten der SEH-eigenen Stationen und Informationen zu Störungsmeldungen und Feuerwehreinsätzen zur Verfügung stellte. Im Teil-AP 4.3 stellte SEH das zugrunde liegende Kanalnetzmodell zur Verfügung sowie bereits vorhandene Überflutungskarten auf Grundlage von Modellregen. ifs bereitete historische Daten zu Überflutungen im Stadtgebiet Hannover auf, führte gekoppelte Simulationen für Kanalnetz- und 2D-Oberflächenabfluss durch und unterstützte bei der Methodenentwicklung und Validierung des im Teil-AP 4.3 entwickelten Verfahrens. Die übrigen Arbeiten wurden durch h&m ausgeführt.

Teil-AP 4.1: Aufbereitung und Auswertung historischer Daten

Aufbereitung historischer Niederschlagsmessdaten

Im Projekt wurde ein umfassender, qualitätsgesicherter Niederschlagsdatensatz für den Raum Hannover aufgebaut. Dies erfolgte zunächst für den Zeitraum 2001 – 2021, im Projektverlauf wurden Daten der Jahre 2022 und 2023 ergänzt. Grundlage des Datensatzes bilden Radardaten des DWD-Niederschlagsradars Hannover sowie Regenschreiberdaten des DWD, der SEH und des NLWKN. Für die Stationsdaten wurde eine systematische Qualitätsprüfung durchgeführt und ein Fehler- und Lückenprotokoll erstellt. Die Radardaten des Radars Hannover umfassen verschiedene Produkte aus verschiedenen Messphasen beim DWD. Für den Zeitraum 2001 – 2017 wurde das Produkt DX mit einer Auflösung von 1 km x 1° genutzt, ab 2018 das Produkt SWEEP mit einer Auflösung von 250 m x 1°, jeweils mit einem Messintervall von 5 Min.

Die Radardaten wurden mit der Software SCOUT (hydro & meteo) automatisiert aufbereitet. Die Verarbeitung umfasste u. a. Korrekturen von Clutter, Strahlabschattung und Dämpfung sowie eine Advektionskorrektur. Die polar vorliegenden Radardaten wurden flächengewichtet auf ein kartesisches Raster mit 500 m x 500 m umgerechnet und mittels Z-R-Beziehung in Niederschlagsintensitäten überführt. Ein Beispiel des Effekts der angewandten Korrekturen ist in Abbildung 24 gezeigt. Dargestellt sind aggregierte Niederschläge des Radars Hannover über den Zeitraum vom 01.11.2022 bis 01.11.2023 (Wasserwirtschaftsjahr WWJ 2023). Die in dieser Darstellung deutlich sichtbaren Artefakte durch Clutter, Strahlabschattung u. a. der unkorrigierten Daten sind in der korrigierten Variante fast vollständig verschwunden.

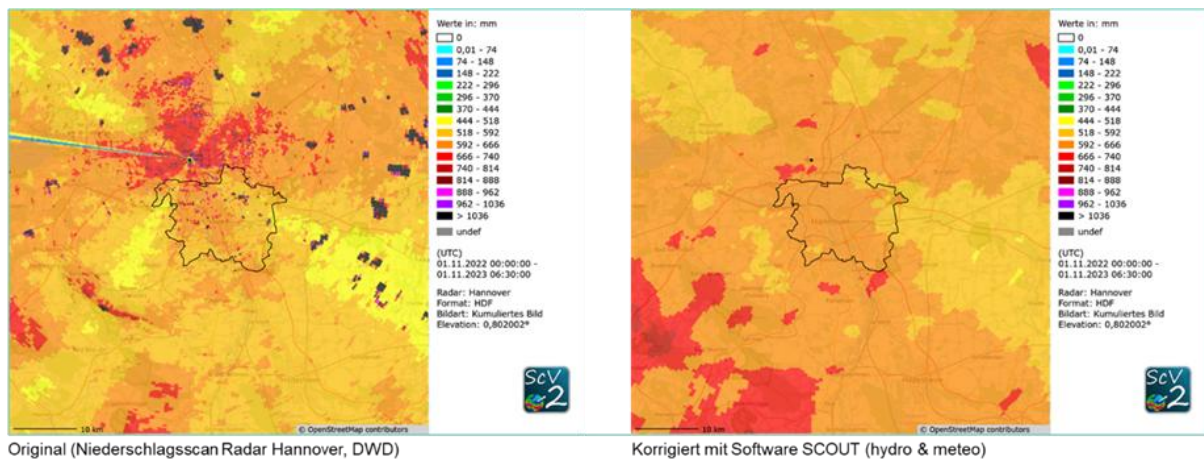


Abbildung 24: Niederschlagssumme über 1 Jahr vom 01.11.2022 bis 01.11.2023, original und nach Korrekturen mit SCOUT (hydro & meteo)

Zur Verbesserung der bodennahen Niederschlagsabschätzung wurden die Radardaten mithilfe von Stationsmessungen angeeicht. Dabei kommt ein flexibles Faktor- und Differenzenverfahren zum Einsatz, das Messunsicherheiten, Stationsverteilung und die Bewegung des Niederschlagsfeldes berücksichtigt. Eine Kartendarstellung der angeeichten Radarsumme ist in Abbildung 25 dargestellt, exemplarisch für den Zeitraum 01.11.2020 bis zum 31.10.2021 (Wasserwirtschaftsjahr WWJ 2021).

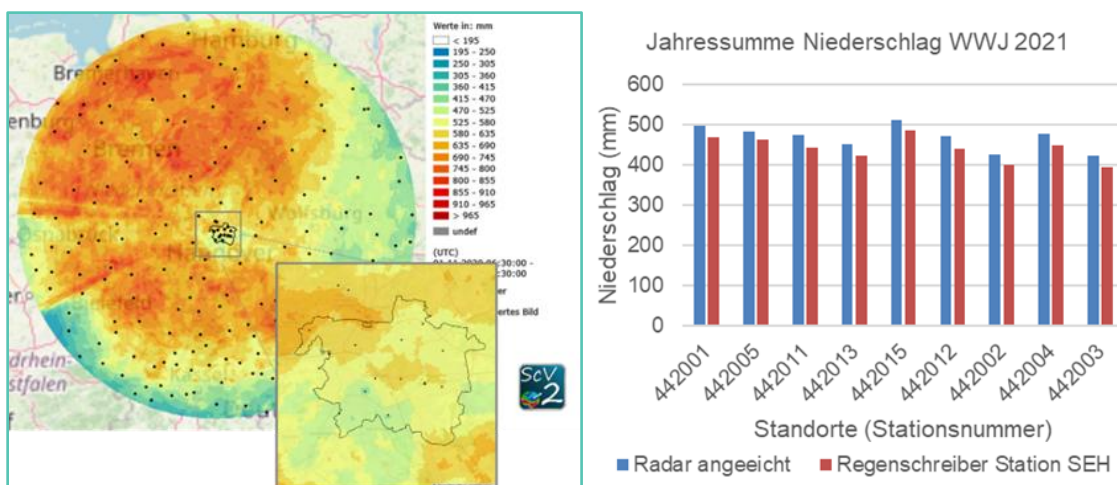


Abbildung 25: Radarsumme des Radars Hannover (angeeicht) für das WWJ 2021 (links) und Vergleich der Jahressummen mit Regenschreibermessungen im Stadtgebiet Hannover (rechts)

In diesem Zeitraum standen Daten von 180 Regenschreiberstationen für die Aneichung zur Verfügung. Auf der rechten Seite ist ein Vergleich der Jahressummen von Radar (angeeicht) und Regenschreiber für 12 Regenschreiberstandorte der SEH im Stadtgebiet Hannover abgebildet. Die resultierende Datenqualität der angeeichten Radardaten wurde anhand unabhängiger Verifizierstationen bewertet. Für das WWJ 2021 standen Daten von drei Tageswertstationen in einer Umgebung von bis zu 10 km um Hannover zur Verifikation zur Verfügung. An diesen Standorten wurde ein Vergleich der angeeichten Radardaten mit den Stationsmessungen durchgeführt. Die über die drei Standorte gemittelte Jahressumme lag mit der angeeichten Radarmessung bei 450 mm gegenüber 436 mm mit den Stationsmessungen, was einer leichten Überschätzung von rund 3 % im Vergleich zu den Stationsdaten entspricht. Ausgewertet wurden außerdem Abweichungen von Tageswerten > 3 mm (vgl. Tabelle 5). Über alle Stationen und Tage hinweg stimmen die überwiegende Anzahl der Tageswerte auf Basis der Stationsmessungen und der angeeichten Radardaten gut überein. Bei rund 4 % der Tage kommt es zu einer Abweichung von mehr als 3 mm. Größere Abweichungen von mehr als 5 mm und mehr als 10 mm treten mit rund 2 % und 0,5 % vergleichsweise selten auf.

| Station Nr. | Anzahl Tage gesamt | Anzahl Tage mit Abweichungen | | | Prozentualer Anteil Abweichungen | | |
|-------------|-----------------------|------------------------------|--------|---------|----------------------------------|--------|---------|
| | | > 3 mm | > 5 mm | > 10 mm | > 3 mm | > 5 mm | > 10 mm |
| 00820 | 302 | 6 | 1 | 0 | 2,0 % | 0,3 % | 0,0 % |
| 02804 | 293 | 9 | 5 | 1 | 3,1 % | 2,3 % | 0,3 % |
| 19289 | 217 | 17 | 9 | 3 | 7,8 % | 1,1 % | 1,4 % |
| gesamt | 812 | 32 | 15 | 4 | 3,9 % | 1,8 % | 0,5 % |

Tabelle 5: Vergleich der Tageswerte von Radar (angeeicht) mit drei Verifizierstationen in der Umgebung von Hannover. Aufgelistet sind die Anzahl der Tage mit Abweichungen der Tagessumme oberhalb der Grenzwerte 3 mm, 5 mm und 10 mm, absolut und relativ zur Gesamtanzahl der ausgewerteten Tage

Auf Basis des aufbereiteten Radardatensatzes wurden kontinuierliche Zeitreihen für 83 Kanal-Teileinzugsgebiete im Stadtgebiet von Hannover erzeugt. Diese wurden als Eingangsdaten für die Berechnung des Abflusses im Kanalnetz und für die Simulation der Kläranlagen mit dem Simulationssystem SIMBA# bereitgestellt (vgl. hierzu die nachfolgenden Ausführungen zu AP 5).

Statistische Auswertung und Ereignisanalyse

Es wurden statistische Auswertungen der langjährigen Messreihen durchgeführt, wobei der Fokus auf extremen Niederschlagsereignissen lag. Die Ergebnisse wurden für Auswertungen zum Effekt des Klimawandels in Teil-AP 4.2 genutzt. Darüber hinaus wurden für den Stadtbereich Hannover Starkregenereignisse seit 2001 identifiziert. Die 10 höchsten konvektiven Niederschlagsereignisse im Zeitraum 2018 – 2021 wurden detailliert betrachtet. Bei allen Ereignissen treten kleinräumige Strukturen und hohe räumliche Gradienten im Niederschlagsgeschehen auf (vgl. die nachfolgende Abbildung 26).

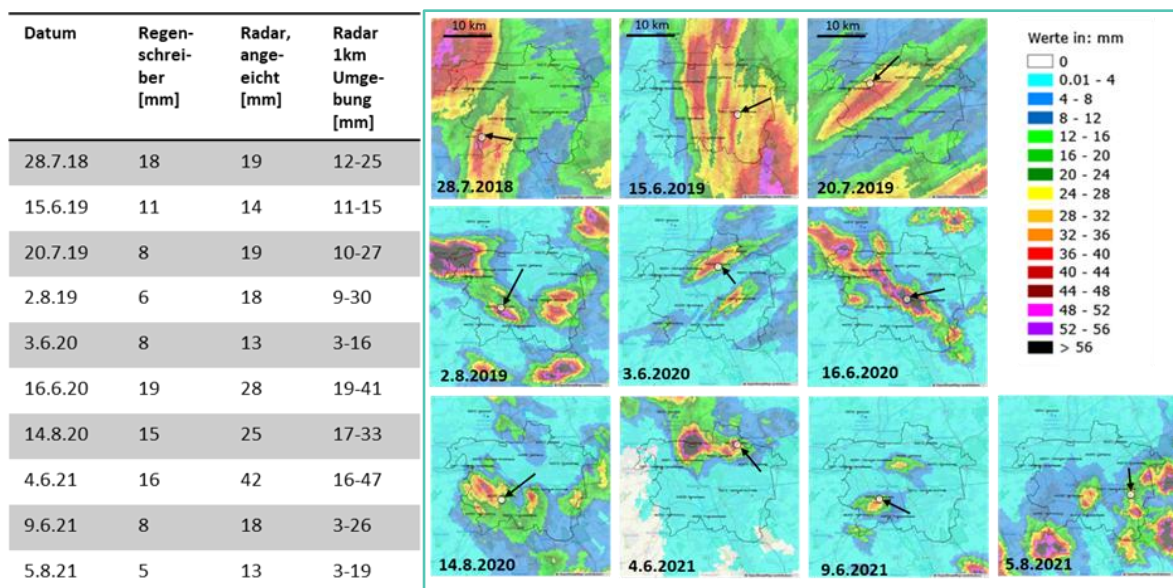


Abbildung 26: Niederschlagsereignisse im Zeitraum 2018 – 2021 im Stadtgebiet Hannover. Die Tabelle links enthält maximal erreichte Stundenwerte von Regenschreiber (SEH) und Radar (angeeicht) am jeweiligen Stationsstandort sowie aus einer Umgebung von 1 km um die Station. Rechts sind die zugehörigen Tagessummen von Radar dargestellt; die betrachteten Regenschreiberstandorte sind mit Pfeilen gekennzeichnet

Um solche Ereignisse effektiv auswerten zu können, sind hochaufgelöste Niederschlagsdaten erforderlich. Gleichzeitig wird anschaulich, dass die Vorhersage solcher Ereignisse mit hohen Unsicherheiten behaftet ist, da u. a. kleine räumliche Abweichungen bereits dazu führen, dass der Ereignisschwerpunkt nicht am richtigen Ort vorhergesagt wird. Bei fünf Starkregenereignissen kam es im gleichen Zeitraum zu Feuerwehreinsätzen wegen Wasserschäden und Überflutung (vgl. die nachfolgende Tabelle 6).

| Ereignis | Anzahl Einsätze | Beginn der Einsätze | Ende der Einsätze | Hauptgründe der Einsätze |
|------------|-----------------|---------------------|-------------------|--|
| 02.08.2019 | 25 | 19:36 | 23:24 | 7 – 50 cm Wasserstände in Garagen, Kellern, Höfen; Wasserschäden |
| 15.10.2019 | 210 | 23:02 | 22:09 am 16.10.19 | 7 – 50 cm Wasserstände in Garagen, Kellern, auf Parkplätzen, in Höfen; Wasserschäden |
| 16.06.2020 | 10 | 16:01 | 16:50 | 5 – 25 cm Wasserstände in Kellern, Aufzugsschächten; Lagerung gefährlicher Stoffe |
| 14.08.2020 | 33 | 18:13 | 21:21 | 5 – 50 cm Wasserstände in Garagen, Kellern, Aufzugsschächten, Höfen; Wasserschäden |
| 04.06.2021 | 81 | 19:50 | 23:58 | 3 – 60 cm Wasserstände in Garagen, Kellern, auf Parkplätzen, Straßen, Höfen; Wasserschäden |

Tabelle 6: Feuerwehreinsätze in Folge von Starkregenereignissen im Stadtgebiet Hannover, Quelle: Masterarbeit Melissa Pimiento 2024 (bearbeitet)

Die Datensätze der Ereignisse dienten der Entwicklung und Validierung von Methoden in den Teil-APs 4.3 und 4.4. Gemessene Niederschläge wurden über verschiedene Dauerstufen aggregiert und statistisch eingeordnet. Die Bewertung erfolgte anhand von Wiederkehrzeiten und des Starkregenindex (SRI) nach Schmitt et al. (2018), abgeleitet auf Basis des Datensatzes KOSTRA-DWD-2020 (vgl. DWD 2023). Die maximale Wiederkehrzeit über Dauerstufen von 15 Min. bis 24 h erwies sich als geeigneter Indikator für starkregenbedingte Überflutungen und Feuerwehreinsätze (siehe hierzu auch die nachfolgenden Ausführungen zu Teil-AP 4.3).

Teil-AP 4.2: Effekt des Klimawandels auf extreme Niederschlagsereignisse und Trockenperioden

Globale und regionale Klimamodelle sind zentrale Instrumente zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels und zur Ableitung geeigneter Anpassungsstrategien (vgl. Giorgi & Gutowski 2015; Steensen et al. 2025). Um den Effekt des Klimawandels auf regionaler und lokaler Ebene abzuschätzen, werden regionale Klimaprojektionen betrachtet, die durch „Nesting“ eines regionalen Klimamodells in ein globales Klimamodell erzeugt werden. Dies erfolgt bei aktuellen Klimaprojektionen aus dem internationalen Vergleichsprojekt CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, vgl. Taylor et al. 2012) auf Basis von Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre mithilfe von RCP (Representative Concentration Pathway)-Szenarien. Diese Szenarien (u. a. RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5) unterscheiden sich hinsichtlich der zugrunde gelegten Emissionspfade und der damit verbundenen Strahlungsantriebe bis zum Jahr 2100 und spannen damit ein Spektrum möglicher zukünftiger Klimaentwicklungen auf.

Aufgrund ihrer relativ groben räumlichen und zeitlichen Auflösung sind regionale Klimaprojektionen jedoch nur eingeschränkt für die lokale hydrologische Modellierung und detaillierte Hochwasserrisikoanalysen nutzbar (vgl. Iles et al. 2020). Als neue Entwicklung können Klimaprojektionen von konvektionsauflösenden Klimamodellen (CPM – Convection Permitting Models) genutzt werden, die laut aktuellen Studien Niederschlag im Vergleich zu regionalen Klimamodellen mit einer Auflösung von 12,5 km (entsprechend EURO-CORDEX, EUR-11) realistischer abbilden. Im Rahmen des ZwillE Projekts wurden als wesentliche Datengrundlage tägliche Werte von regionalen Klimamodellen aus EURO-CORDEX (EUR-11) verwendet (vgl. Tabelle 7). Diese wurden mithilfe eines statistischen Downscalingverfahrens in eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung übertragen und hinsichtlich lokaler Klimamerkmale an Beobachtungsdaten angepasst.

| GCM | RCM | Experiment | Ensemble |
|------------------------------|----------------|-------------------|----------|
| CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 | SMHI-RCA4 | historisch, rcp85 | r1i1p1 |
| ICHEC-EC-EARTH | DMI-HIRHAM5 | historisch, rcp85 | r1i1p1 |
| MIROC-MIROC5 | CCLM4-8-17 | historisch, rcp85 | r1i1p1 |
| ECMWF-ERA5* | DWD-CCLM5-0-16 | Evaluierung | x0n1-v1 |
| MIROC-MIROC5* | DWD-CCLM5-0-16 | rcp85 | x2yn2-v1 |

Tabelle 7: Regionale Klimaprojektionen (EURO-CORDEX, CMIP5) und konvektionsauflösende Simulationen (*) für Deutschland (GER-0275)

Für die Zukunft wurden Projektionen auf Basis des Szenarios RCP8.5 betrachtet. Dieses beschreibt ein Szenario sehr hoher Treibhausgasemissionen ohne zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen, das bis 2100 zu einem starken Anstieg des Strahlungsantriebs von ca. 8,5 W/m² führt. Zusätzlich wurden Simulationsläufe des konvektionsauflösenden Modells MIROC5-CCLM5-0-16 und des Evaluierungslaufs ECMWF-ERA5-CCLM5-0-16 (vgl. Rybka et al. 2023) betrachtet, im Folgenden bezeichnet als CCLM-CPM. Diese Daten haben eine horizontale Auflösung von ca. 3 km und eine zeitliche Auflösung von einer Stunde und wurden insbesondere zur Validierung der Ergebnisse des statistischen Downscalingverfahrens genutzt. Es wurden für jedes Modell drei Zeiträume betrachtet: Vergangenheit (2001 – 2018), nahe Zukunft (2031 – 2060) und ferne Zukunft (2071 – 2100). Die verwendeten Variablen sind: Lufttemperatur und Niederschlag, in täglicher bzw. stündlicher Auflösung.

Es wurden zunächst Kriterien für die Auswahl eines geeigneten statistischen Downscaling-Verfahrens zusammengestellt, um Klimaprojektionsdaten für die Szenarien-Analyse mit SIMBA# aufzubereiten. Zielgröße waren Zeitreihen des Niederschlags mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Min. Dabei wurden Ergebnisse aus der Literatur berücksichtigt, z. B. Erfordernis der Prüfung des Zusammenhangs zwischen Temperatur und extremen Niederschlagsintensitäten bei herunterskalierten Größen (Clausius-Clapeyron-Skalierung in Anlehnung an die Clausius-Clapeyron-Formel, die den Zusammenhang von

Temperatur und Sättigungsdampfdruck beschreibt), als Voraussetzung für eine Gültigkeit des Verfahrens unter geänderten Klimabedingungen. Darauf basierend wurde ein kombiniertes Verfahren gewählt, das eine Bias-Korrektur und ein Verfahren zur zeitlichen Disaggregation umfasst, um tägliche Niederschlagsdaten auf eine wesentlich feinere 5-Minuten-Auflösung herunterzuskalieren. Der im Rahmen des Projekts weiterentwickelte Disaggregationsansatz kombiniert multiplikative Kaskadenmethoden (vgl. Bürger et al. 2014) mit Analog-Matching-Techniken auf Grundlage von Temperatur- und Niederschlagsmustern.

Schritt 1: Bias-Korrektur der Temperaturdaten

Eine Bias-Korrektur der täglichen Temperaturdaten erfolgte mithilfe der Methode des Quantile Delta Mapping (QDM) (vgl. Cannon et al. 2015). Ziel dieser Methode ist es, systematische Abweichungen zwischen modellierten und beobachteten Temperaturen zu korrigieren, ohne dabei das im Klimamodell enthaltene Klimasignal (d. h. die projizierte Änderung zwischen Vergangenheit und Zukunft) zu verfälschen. Für jede Modellgitterzelle und jeden Kalendermonat wurden zunächst die historischen Modelltemperaturen korrigiert, indem deren empirische Quantile auf die empirischen Quantile der beobachteten Temperaturverteilung abgebildet wurden. Anschließend wurden die zukünftigen Modellprojektionen korrigiert, indem die modellierte Änderung zwischen historischem und zukünftigem Zeitraum auf die Bias-korrigierte historische Zeitreihe übertragen wurde. Auf diese Weise bleiben relative Temperaturänderungen erhalten, während systematische Modellfehler reduziert werden. Die Anwendung der Korrektur erfolgte getrennt für jeden Monat, um saisonale Unterschiede zu berücksichtigen.

Schritt 2: Bias-Korrektur der Niederschlagsdaten

Die Bias-Korrektur der täglichen Niederschläge erfolgte mithilfe eines Verteilungsanpassungsverfahrens, bedingt durch die Lufttemperatur. Hintergrund dieses Ansatzes ist die enge physikalische Kopplung zwischen Temperatur und Starkniederschlägen, die unter anderem durch die temperaturabhängige Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Atmosphäre verursacht wird, die durch die Clausius-Clapeyron-Gleichung beschrieben wird. Auch wenn diese Skalierung nicht explizit vorgegeben wird, stellt die Konditionierung anhand der Temperatur sicher, dass die physikalische Beziehung implizit erhalten bleibt.

Hierzu wurden beobachtete und modellierte tägliche Niederschläge jeweils in 16 Temperaturklassen eingeteilt, basierend auf Quantilen der täglichen Mitteltemperatur. Für jede Temperaturklasse wurden empirische Verteilungsfunktionen (Cumulative Distribution Functions, CDF) der Niederschläge für Beobachtungen und Modell berechnet. Auf Basis der Verteilungsfunktionen im historischen Zeitraum wurden empirische Funktionen zur Bias-Korrektur abgeleitet, durch eine Quantilzuordnung zwischen modellierter und beobachteter Niederschlagsverteilung innerhalb jeder Temperaturklasse. Diese Funktionen wurden im Anschluss auf die Modelldaten im historischen und zukünftigen Zeitraum angewandt.

Schritt 3: Disaggregation von Tages- zu Stundenniederschlägen mittels stochastischer Kaskade

Die zeitliche Disaggregation der täglichen Niederschlagssummen auf Stundenwerte erfolgte in einem ersten Schritt mit einer temperaturabhängigen multiplikativen Kaskade (MC+), basierend auf dem Ansatz von Bürger et al. (2014). Dieses Modell simuliert die zeitliche Struktur von Niederschlägen, wobei Tagesniederschläge rekursiv über mehrere Kaskadenstufen auf kleinere Zeitskalen aufgeteilt werden. In der vorliegenden Anwendung wurden fünf Stufen verwendet, was zunächst zu 32 Teilintervallen führt, die anschließend zu 24 Stundenintervallen zusammengefasst werden. Auf jeder Stufe wird ein übergeordnetes Intervall probabilistisch in zwei untergeordnete Intervalle aufgeteilt. Dabei kommen zwei Prozesse zum Einsatz:

- Intervallweise Aufteilung (1/0-Split), bei der der gesamte Niederschlag einem der beiden Teilintervalle zugeordnet wird und das andere trocken bleibt,
- Gewichtete Aufteilung, bei der der Niederschlag probabilistisch auf beide Teilintervalle verteilt wird, wobei die Gewichte einer symmetrischen Beta-Verteilung folgen.

Die Wahrscheinlichkeit für intervallweise Aufteilungen und die Form der Gewichtungsverteilung hängen von der betrachteten Zeitskala ab und werden durch vier grundlegende Modellparameter beschrieben.

Eine wesentliche Erweiterung des Modells durch Bürger et al. (2014) besteht in der Temperaturabhängigkeit der Intervallaufteilung. Die Wahrscheinlichkeit für konvektive Niederschläge, die innerhalb eines kurzen Zeitraums auftreten, wird dynamisch anhand der täglichen Mitteltemperatur angepasst. Hierzu wird eine logistische Funktion verwendet, die bei niedrigen Temperaturen eine gleichmäßigere (stratiforme) Niederschlagsverteilung begünstigt und bei hohen Temperaturen die Wahrscheinlichkeit kurzer, intensiver Niederschlagsereignisse erhöht. Die Temperaturabhängigkeit wird über drei zusätzliche Parameter gesteuert, die den Schwellenwert, die Übergangsschärfe und die maximale Verstärkung des Temperatureinflusses definieren.

Automatisierte Kalibrierung des MC+-Modells

Im Rahmen von ZwillE wurde diese Methode angepasst und erweitert, durch eine vollautomatische Kalibrierung aller sieben Modellparameter. Dazu wurde ein Random-Search-Ansatz mit 5.000 zufällig generierten Parametersätzen eingesetzt. Jeder Parametersatz wurde auf beobachtete Tagesniederschläge angewendet und anhand einer zusammengesetzten Zielfunktion bewertet. Diese Zielfunktion berücksichtigt mehrere Aspekte extremer Niederschläge:

- die korrekte Form der Beziehung zwischen Temperatur und extremen Stundenintensitäten,
- die temperaturabhängige Skalierung der Extremwerte,
- die absolute Größe der höchsten beobachteten Niederschläge,
- sowie Strafterme für physikalisch nicht plausible Ergebnisse.

Die bestbewerteten Parametersätze wurden für die weitere Anwendung ausgewählt, um statistische und physikalische Eigenschaften extremer Niederschläge möglichst realistisch zu reproduzieren.

Schritt 4: Disaggregation von Stunden- zu 5-Minuten-Niederschlägen mittels Analogverfahren

In einem weiteren Schritt erfolgt die Disaggregation von Stundenwerten auf eine 5-Minuten-Auflösung mithilfe eines Analogverfahrens. Dabei werden realistische hochaufgelöste Niederschlagsmuster aus einem Archiv historischer Radarbeobachtungen auf die simulierten Stundenwerte übertragen. Hierzu wurde der in Teil-AP 4.1 beschriebene aufbereitete Radardatensatz des Radars Hannover über den Zeitraum 2001 – 2018 genutzt. Zunächst wird für jede simulierte Stunde ein geeigneter „Analogzeitpunkt“ aus den Beobachtungen identifiziert. Die Auswahl erfolgt unter Berücksichtigung der räumlich gemittelten Tagesmitteltemperatur und der maximalen stündlichen Niederschlagsintensität. Innerhalb eines Beobachtungskollektivs mit ähnlichen Temperaturen wird zunächst ein Zeitpunkt (Stunde) ausgewählt, in dem die gemessene Niederschlagsmenge der modellierten am nächsten kommt. In einem zweiten Schritt wird eine räumliche Auswahl getroffen, wobei zu jedem Modellgitterpunkt ein Ort aus dem reduzierten Beobachtungskollektiv gewählt wird, an dem der Stundenwert möglichst gut zum simulierten Wert passt. Das zugehörige 5-Minuten-Niederschlagsmuster wird übernommen und anschließend skaliert, so dass die Summe exakt dem simulierten Stundenwert entspricht. Damit bleibt die Niederschlagsbilanz erhalten und der stündliche Niederschlag wird auf einen realistischen zeitlichen Verlauf mit einem Zeitschritt von 5 Minuten übertragen.

Validierung

Die beschriebene Disaggregationsmethode wurde auf den historischen und die zukünftigen Zeiträume angewandt und die Ergebnisse in Hinblick auf mittlere und extreme Niederschläge ausgewertet. Zur Validierung der disaggregierten Ergebnisse wurden sowohl Vergleiche mit den beobachteten Radardaten als auch mit stündlichen Daten der konvektionsauflösenden Simulation CCLM-CPM durchgeführt. Als statistische Kenngrößen für extreme Niederschläge wurden die Niederschlagsperzentile 95 %, 99 %, 99,9 % und 99,97 % betrachtet. Diese wurden für verschiedene Zeitintervalle berechnet und verglichen. Außerdem wurde ausgewertet, wie sich die Niederschlagsintensität mit steigender Temperatur verändert. In Abbildung 27 und Abbildung 28 wird dabei zur Einordnung der Ergebnisse die Clausius-Clapeyron-(CC)-Skalierungsbeziehung mit abgebildet.

Abbildung 27 zeigt das 99,9 %-Perzentil des stündlichen Niederschlags (mm/h), aufgetragen gegen Klassen der Tagesmitteltemperatur ($^{\circ}\text{C}$). Verglichen werden Ergebnisse für den historischen Zeitraum von Radar, CPS-CPM und der disaggregierten Reihe als Ergebnis des statistischen Downscalings. Die Referenzlinie entspricht $7\% \text{ K}^{-1}$. Der untere Teil der Abbildung zeigt die absoluten Unterschiede zwischen der disaggregierten Reihe und Radar sowie zwischen der disaggregierten Reihe und CPS-CPM. Auf Basis der Radardaten nehmen die Niederschlagsextreme über einen weiten Temperaturbereich mit der Temperatur zu und sind insgesamt mit einer CC-ähnlichen Skalierung vereinbar. Die disaggregierte Reihe folgt dieser Beziehung über den gut abgebildeten Temperaturbereich (etwa von unter 0°C bis etwa 23°C) sehr eng, und die Unterschiede bleiben in den meisten Klassen klein. Die größten Abweichungen treten bei den höchsten Temperaturen (etwa $24 - 25^{\circ}\text{C}$) auf, wo die Stichprobe begrenzt ist und die klassierten Extremwerte stark streuen. In diesen Klassen können die Unterschiede mehrere mm/h erreichen, und auch die Abweichung zu CPS-CPM nimmt zu. Insgesamt zeigt die Auswertung, dass die Disaggregation die wesentliche Temperaturabhängigkeit der stündlichen Extreme erhält, während die Unsicherheit für die höchsten Temperaturklassen zunimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass die disaggregierten hochaufgelösten Niederschlagsdaten den Radarbeobachtungen sehr gut entsprechen, wobei die Intensität der extremen Niederschlagsperzentile mit einer Rate von $6,0\%$ bis $7,2\%$ pro Grad Celsius zunimmt.

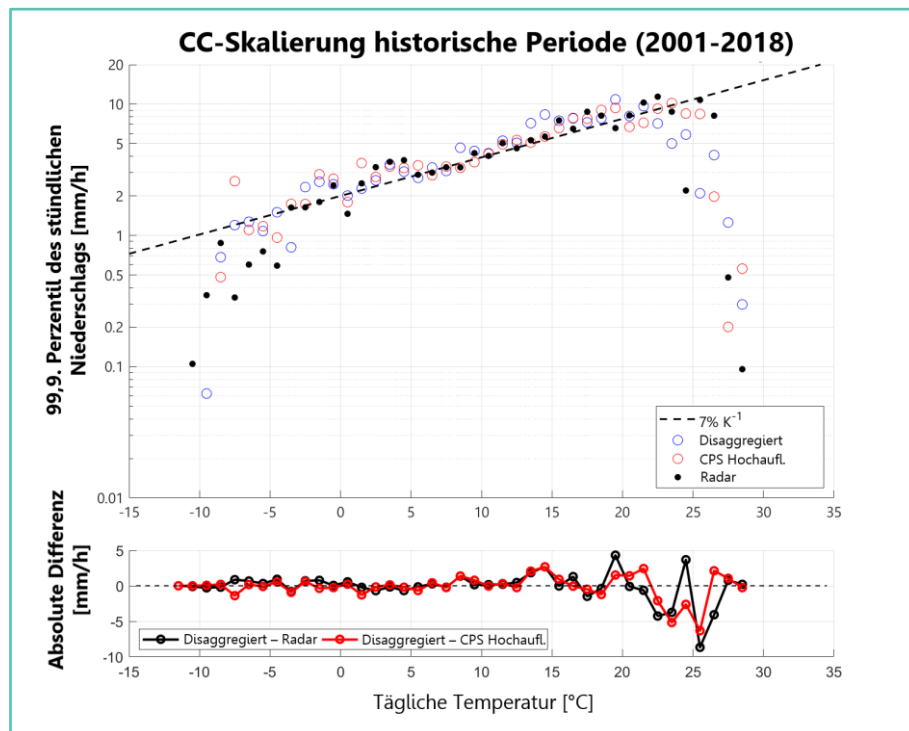


Abbildung 27: Extreme stündliche Niederschläge (99,9 %-Perzentil) aufgetragen gegen die Tagesmitteltemperatur, von mit dem erweiterten MC+-Modell disaggregierten Niederschlägen (blau), CPS-CPM (rot) und Radarmessung (schwarz) für den historischen Zeitraum (2001 – 2018)

Die Abbildungen 28 bis 30 zeigen ebenfalls den Zusammenhang zwischen dem 99,9 %-Perzentil des stündlichen Niederschlags und der Temperatur.

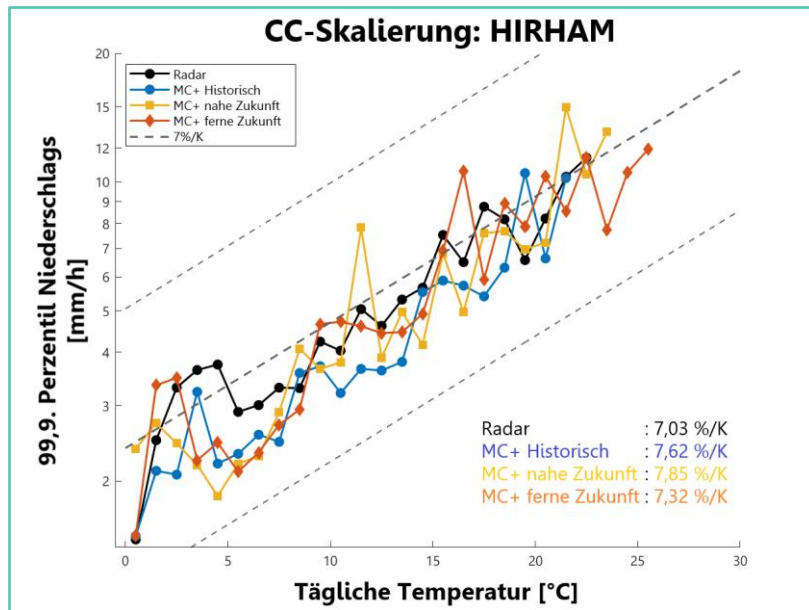


Abbildung 28: Extreme stündliche Niederschläge (99,9 %-Perzentil) aufgetragen gegen die Tagesmitteltemperatur, von mit dem erweiterten MC+-Modell disaggregierten Niederschlägen auf Basis von DMI-HIRHAM, für den historischen Zeitraum, nahe Zukunft und ferne Zukunft, sowie Radar (historischer Zeitraum)

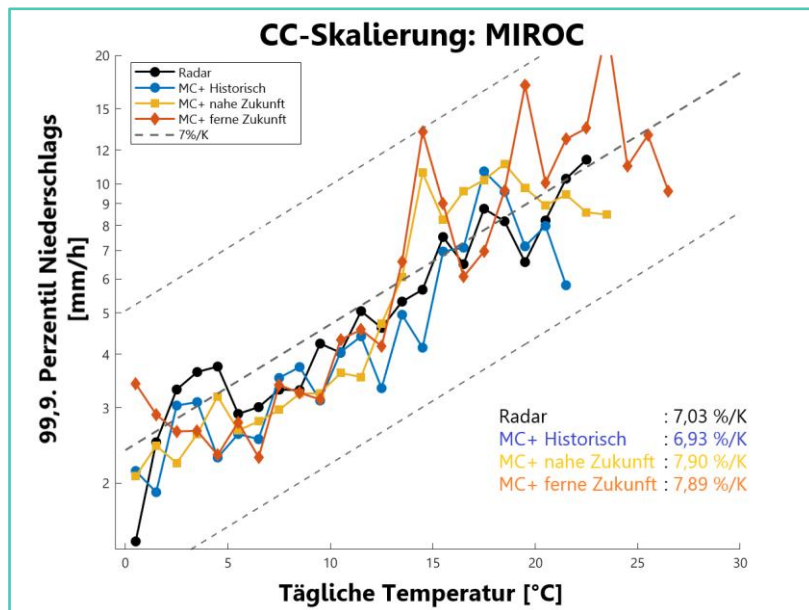


Abbildung 29: Wie Abbildung 28, ausgewertet auf Basis des regionalen Klimamodells MIROC5-CCLM4-8-17

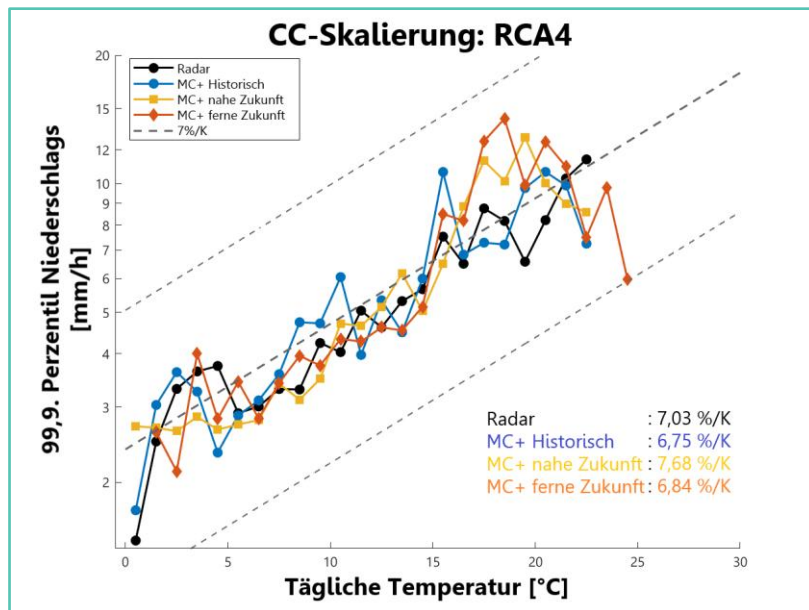


Abbildung 30: Wie Abbildung 28, ausgewertet auf Basis des regionalen Klimamodells SMHI-RCA4

Dargestellt sind Ergebnisse der disaggregierten Niederschläge auf Basis der regionalen Klimaprojektionen DMI-HIRHAM, SMHI-RCA4 und MIROC5-CCLM4-8-17 für den historischen Zeitraum, die nahe und die ferne Zukunft. Ergänzend sind die Radardaten aus dem historischen Zeitraum dargestellt. Im nahen Zukunftszeitraum folgen die disaggregierten Extreme im gut abgebildeten Temperaturbereich i. A. derselben Temperaturabhängigkeit wie im historischen Radar-Referenzdatensatz, wobei das 99,9 %-Perzentil des stündlichen Niederschlags mit der Temperatur annähernd entlang einer CC-ähnlichen Steigung zunimmt. Im fernen Zukunftszeitraum verschiebt sich der Temperaturbereich weiter zu wärmeren Bedingungen, und die 99,9 %-Perzentil-Extreme bleiben stark temperaturabhängig, wobei größere Schwankungen in den höchsten Temperaturklassen auftreten. Für Ereignisse, die in die höchsten Temperaturklassen fallen, ist die Aussagekraft der Ergebnisse somit eingeschränkt. Über den mittleren Temperaturbereich, in dem ausreichend viele Stichproben aus Modell und Beobachtung vorliegen, folgen die disaggregierten Reihen weiterhin dem insgesamt radarähnlichen Skalierungsverhalten. Dies deutet darauf hin, dass die Disaggregation auch unter stärkerer Erwärmung eine physikalisch plausible Niederschlags-Temperatur-Beziehung beibehält.

Die disaggregierten Niederschlagsreihen für den historischen Zeitraum, die nahe und ferne Zukunft wurden außerdem in Hinblick auf mittlere und extreme Niederschläge ausgewertet. Die Ergebnisse sind im Vergleich zu den Ergebnissen des konvektionsauflösenden Modells CPM-CPS und den radarbasierten Werten (historischer Zeitraum) in der nachfolgenden Abbildung 31 dargestellt.

Im historischen Zeitraum stimmen die Ergebnisse der disaggregierten, stündlichen Daten sehr gut mit den Referenzwerten von Radar überein. Der Mittelwert wird praktisch reproduziert und auch der obere Verteilungsbereich wird gut wiedergegeben (z. B. 95 %-Perzentil: 0,36 vs. 0,34-0,35 mm/h). Bei hohen Intensitäten liegt das 99,9%-Perzentil von Radar (5,16 mm/h) innerhalb der Bandbreite der disaggregierten Reihen (4,91-5,21 mm/h), ebenso wie das 99,97%-Perzentil. Das absolute Maximum (31,79-59,6 mm/h) fällt hingegen geringer aus als in den Radarmessungen (66,7 mm/h). Eine ähnlich gute Übereinstimmung findet man bei den 5-minütlichen Werten, mit einer guten Abbildung der Verteilung bis hin zum 99,97%-Perzentil. Die maximal simulierten Niederschlagswerte liegen auch hier etwas niedriger als in den Radarmessungen, mit 13,6-17,8 mm pro 5 Min. gegenüber 20,4 mm pro 5 Min. Im Vergleich zum konvektionsauflösenden Modell CPM-CPS ergeben sich ähnliche Veränderungen der betrachteten stündlichen extremen Niederschläge für die nahe und ferne Zukunft im Vergleich zum Referenzzeitraum. Zusammenfassend erscheint der Disaggregationsansatz damit geeignet, um die Niederschlagsverteilung kurzer Dauerstufen sowie zukünftige Veränderungen bis 2100 hinsichtlich mittlerer Eigenschaften und bis in den Extrembereich hinein gut abzubilden.

| Stundensummen Niederschlag [mm] | | Ergebnisse des Disaggregationsverfahrens | | | |
|---------------------------------|--------|--|--------------|------------------|---------------|
| Kenngröße | Radar | CORDEX FPS | EURO CORDEX | | |
| | | CLM-CPS | MIROC5-CCLM4 | EC-EARTH-HIRHAM5 | CNRM-CM5-RCA4 |
| Historisch | | | | | |
| Mittelwert | 0,0747 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| Maximum | 66,98 | 60,1 | 59,7 | 36,9 | 31,8 |
| Standardabweichung | 0,41 | 0,46 | 0,40 | 0,40 | 0,38 |
| 95% Perzentil | 0,36 | 0,35 | 0,35 | 0,34 | 0,34 |
| 99% Perzentil | 1,59 | 1,55 | 1,36 | 1,38 | 1,28 |
| 99,9% Perzentil | 5,16 | 5,32 | 4,9 | 5,2 | 5,0 |
| 99,97% Perzentil | 8,54 | 9,43 | 8,5 | 8,6 | 8,4 |
| Nahe Zukunft | | | | | |
| Mittelwert | | 0,07 | 0,08 | 0,07 | 0,08 |
| Maximum | | 57,5 | 82,8 | 74,8 | 53,1 |
| Standardabweichung | | 0,46 | 0,47 | 0,45 | 0,42 |
| 95% Perzentil | | 0,33 | 0,36 | 0,31 | 0,37 |
| 99% Perzentil | | 1,55 | 1,52 | 1,41 | 1,39 |
| 99,9% Perzentil | | 5,43 | 6,1 | 5,4 | 5,2 |
| 99,97% Perzentil | | 9,42 | 10,2 | 9,4 | 9,1 |
| Far-Future Period | | | | | |
| Mittelwert | | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,08 |
| Maximum | | 67,2 | 88,2 | 71,3 | 72,2 |
| Standardabweichung | | 0,61 | 0,60 | 0,51 | 0,51 |
| 95% Perzentil | | 0,35 | 0,37 | 0,32 | 0,36 |
| 99% Perzentil | | 1,72 | 1,73 | 1,57 | 1,50 |
| 99,9% Perzentil | | 7,0 | 7,4 | 6,3 | 6,3 |
| 99,97% Perzentil | | 13,3 | 12,9 | 11,1 | 11,4 |
| Änderungssignale | | | | | |
| Verhältnis 95%-Perzentil | | | | | |
| Nahe Zukunft/ Historisch | | 0,95 | 1,03 | 0,94 | 1,07 |
| Ferne Zukunft/ Historisch | | 1,00 | 1,08 | 0,96 | 1,06 |
| Verhältnis 99%-Perzentil | | | | | |
| Nahe Zukunft/ Historisch | | 1,00 | 1,12 | 1,02 | 1,09 |
| Ferne Zukunft/ Historisch | | 1,11 | 1,27 | 1,13 | 1,18 |
| Verhältnis 99,9%-Perzentil | | | | | |
| Nahe Zukunft/ Historisch | | 1,02 | 1,24 | 1,04 | 1,04 |
| Ferne Zukunft/ Historisch | | 1,32 | 1,50 | 1,22 | 1,27 |
| Verhältnis 99,97%-Perzentil | | | | | |
| Nahe Zukunft/ Historisch | | 1,00 | 1,20 | 1,09 | 1,08 |
| Ferne Zukunft/ Historisch | | 1,41 | 1,52 | 1,29 | 1,35 |

Abbildung 31: Kenngrößen der Niederschlagsverteilung stündlicher Niederschläge aus Radardaten, CLM-CPS und disaggregierten regionalen Klimaprojektionen für den historischen Zeitraum, nahe und ferne Zukunft, sowie Änderungssignale im Vergleich zum historischen Zeitraum

Ergebnisse Niederschlag und Starkregen

- Die Ergebnisse auf Basis des Szenarios RCP8.5 deuten auf signifikante Zunahmen in der Intensität extremer Niederschläge hin. Danach würden z. B. extreme Niederschläge (99,97%-Perzentil) mit einer Dauerstufe von einer Stunde in der nahen Zukunft (2031 – 2060) um 8-20 % intensiver und in der fernen Zukunft (2071 – 2100) um 29-52 % intensiver werden im Vergleich zum Zeitraum 2001 – 2018.
- Diese Veränderungen entsprechen projizierten durchschnittlichen Temperaturanstiegen von etwa 0,52-1,36 K in der nahen Zukunft und 2,74-3,61 K in der fernen Zukunft.
- Die Projektionen der jährlichen durchschnittlichen Niederschlagsmenge variierten zwischen den Klimamodellen: Zwei Modelle zeigten eine durchschnittliche Zunahme von etwa 8 %, während zwei andere Modelle eine durchschnittliche Abnahme von etwa 2 % zeigten.
- Ergebnisse einer saisonalen Auswertung deuten darauf hin, dass im jahreszeitlichen Verlauf insbesondere die Sommermonate und teilweise die Herbstmonate heißer und trockener werden, Wintermonate hingegen feuchter im Vergleich zu den historischen Mittelwerten.
- Unsicherheiten ergeben sich vor allem aus der Annahme stationärer Temperatur-Niederschlags-Beziehungen und der begrenzten Stichprobengröße bei sehr extremen Ereignissen.

Diese Ergebnisse ermöglichen eine genauere, quantitative Einschätzung zur zukünftigen Zunahme von Starkregenereignissen in und um Hannover und können als Grundlage für die Planung von Anpassungsmaßnahmen genutzt werden. Die erzeugten Zeitreihen wurden an das AP 5 für die Simulation von Szenarien mit dem Simulationssystem SIMBA# weitergegeben. Das Verfahren ist auf andere Orte übertragbar, wobei eine Voraussetzung für die Anwendung neben den regionalen Klimaprojektionen die Verfügbarkeit langjähriger, hochaufgelöster Messdatensätze ist.

Teil-AP 4.3: Gefährdungsanalyse für Überschwemmungen im urbanen Raum

Entwicklung und Validierung eines Verfahrens zur schnellen Überflutungsabschätzung (RadEF)

In vielen Kommunen liegen Starkregengefahren- und Überflutungskarten vor, die auf Bemessungsregen unterschiedlicher Wiederkehrzeiten (z. B. 10-, 30- oder 100-jährlich) oder auf einzelnen Extremereignissen basieren. Diese Karten sind statisch und erlauben nur eine grobe Einschätzung möglicher Überflutungssituationen, da sie weder aktuelle noch prognostizierte Niederschläge berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund wurde im Projekt ein neues Verfahren zur schnellen, stadtweiten Abschätzung von Überflutungshöhen in Nahezu-Echtzeit entwickelt und für die Stadt Hannover umgesetzt.

Referenzsimulationen und Datenbasis

Als Referenz für Entwicklung und Validierung dienten detaillierte Überflutungssimulationen für das gesamte Stadtgebiet Hannovers, die mit einem gekoppelten hydrodynamischen 1D-Kanalnetz- und 2D-Oberflächenmodell (HYSTEM-EXTRAN 8.6) vom Projektpartner ifs durchgeführt wurden. Für die Kanalnetzsimulation wurden die Module HYSTEM und EXTRAN der itwh GmbH verwendet, für den Oberflächenabfluss kam HYSTEM-EXTRAN 2D zum Einsatz. Die bidirektionale Kopplung der beiden Softwarepakete gewährleistet einen Volumenaustausch des Kanalisations- und Oberflächenabflusses an den Kopplungsknoten, d. h. den Ein- und Auslässen der Kanalisation. Das zugrunde liegende Kanalnetzmodell wurde von SEH bereitgestellt. Das 2D-Oberflächenmodell berücksichtigt realistische Gelände- und Strukturdaten, darunter digitale Geländemodelle, Gebäude, Mauern, Kanten, besondere Bauwerke sowie flächenabhängige Rauigkeitsparameter. ifs übernahm das Modell und bereitete es bis zur Realisierung der Rechenfähigkeit auf. Neben Simulationen auf Basis von zahlreichen Euler-Modellregen unterschiedlicher Jährlichkeiten von 2 bis 100 Jahren wurden auch 10 reale Starkregenereignisse zwischen 2002 und 2023 mit angeeichten Radarniederschlägen simuliert. Durch die aufwändige, gekoppelte Berechnung und deren Ausdehnung auf das gesamte Stadtgebiet ergaben sich lange Rechenzeit von mehreren Tagen für die Simulation der realen Niederschlagsereignisse. Diese realen Ereignisse dienten als unabhängige Referenz zur Validierung des neu entwickelten Verfahrens. Zudem dienten die Simulationsergebnisse mit der realen Regenbelastung als Grundlage für Überflutungsbetrachtungen mit einer Analyse der Fließwege auf der Oberfläche und des Überschwemmungsrisikos sowie schließlich auch für die daraus resultierende Erarbeitung von Gegenmaßnahmen.

Konzept des RadEF-Verfahrens

Auf Basis einer Literaturrecherche zu Echtzeit- und Warnverfahren für urbane Überflutungen und Vorarbeiten aus einer im Projektverlauf betreuten Masterarbeit (vgl. Pimiento 2024) wurde ein empirisch-statistisches Verfahren entwickelt: Radar-based fast Estimation of Flooding (RadEF). Ziel ist es, Überflutungshöhen schnell abzuschätzen ohne die hohen Rechenzeiten gekoppelter 1D- / 2D-Modelle. Das RadEF-Verfahren besteht dabei aus zwei Stufen und nutzt drei zentrale Eingangsdaten:

1. Radar-basierte Niederschlagsdaten (Messung und Vorhersage),
2. Deutschlandweiter KOSTRA-Datensatz zu Niederschlagswiederkehrzeiten zu extremen Niederschlagshöhen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauerstufe (vgl. DWD 2023),
3. Sieben im Voraus berechnete, stadtweite Überflutungskarten für Bemessungsregen mit Wiederkehrzeiten zwischen 2 und 100 Jahren.

Stufe 1: Niederschlagsanalyse

Radar-basierte Niederschlagsdaten werden über einen Zeitraum von 24 Stunden ausgewertet. Je nach Anwendungsfall umfasst dieser Zeitraum entweder ausschließlich Messdaten („Echtzeit“) oder eine Kombination aus Messdaten und Vorhersagen. Für sieben Dauerstufen (15 Min. bis 24 h) werden pro Rasterpunkt (500 m x 500 m) die maximalen aggregierten Niederschlagssummen berechnet. Diese Maxima werden mithilfe von KOSTRA in statistische Wiederkehrzeiten überführt. Pro Rasterpunkt wird anschließend die maximal erreichte Wiederkehrzeit über alle Dauerstufen bestimmt.

Stufe 2: Überflutungsabschätzung:

In der zweiten Stufe wird für jeden Rasterpunkt diejenige vorgerechnete Überflutungskarte ausgewählt, deren Bemessungsregen der ermittelten Wiederkehrzeit entspricht. Die entsprechenden Kartenausschnitte werden extrahiert und mosaikartig zu einer stadtweiten Überflutungskarte mit 3-m-Auflösung zusammengesetzt. Die Verarbeitung erfolgt GIS-basiert (QGIS, Python). Die gesamte Rechenzeit liegt unter zwei Minuten und ist damit für den Echtzeitbetrieb geeignet. Ein Beispiel des resultierenden Wasserstands im Vergleich zur Referenzsimulation ist in Abbildung 32 dargestellt.

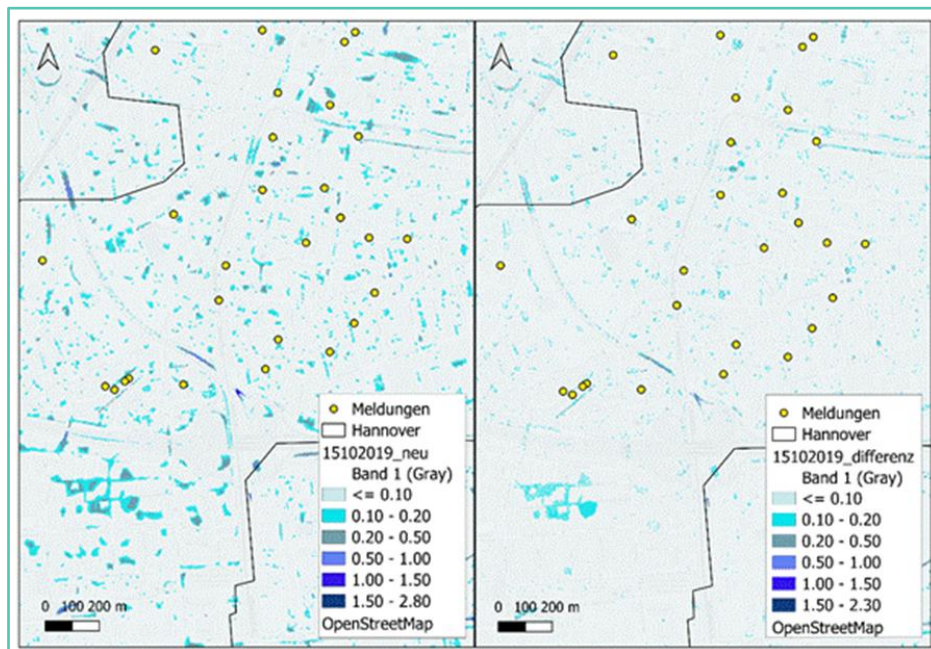


Abbildung 32: Maximaler Wasserstand auf Basis von RadEF (links) und Differenzenkarte (rechts) mit absoluten Differenzen im Vergleich zur Referenzsimulation für ein Starkregenereignis am 15. Oktober 2019. Gelbe Punkte kennzeichnen Feuerwehreinsätze

Anwendungsfälle und Vorhersagen

In dem in ZwiIIe entwickelten Digitalen Zwilling werden drei Anwendungsfälle anhand der eingehenden Niederschlagsdaten unterschieden, die alle 5 Minuten aktualisiert werden:

- I – Echtzeit: Niederschlagsmessungen der vergangenen 24 h,
- II – Vorhersage: Messungen der letzten 22 h plus Nowcasts für die nächsten 2 h,
- III – Maximale Vorhersage: Maximale Niederschläge aus einem Ensemble von 10 Nowcasts

Ensemble-Nowcasts ermöglichen dabei die Berücksichtigung von Vorhersageunsicherheiten und liefern sowohl eine „mittlere“ als auch eine „maximale“ Abschätzung der Überflutungssituation.

Validierung des neu entwickelten RadEF-Verfahrens

Die Validierung erfolgte durch einen direkten Vergleich mit den gekoppelten HYSTEM-EXTRAN-Simulationen. Dazu wurden pro Ereignis rund 100.000 zufällige Stichprobenpunkte im Stadtgebiet ausgewertet. Bewertet wurden u. a. Pearson-Korrelation, RMSE, MAE sowie Treffer- und Fehlalarmraten und der Critical Success Index (CSI) für einen Schwellenwert von 0,5 m Wasserstand.

Für den Anwendungsfall Echtzeit (vgl. die nachfolgende Abbildung 33) ergab sich über alle 10 Ereignisse eine hohe Übereinstimmung mit der Referenzsimulation (mittlere Korrelation 0,81; RMSE 0,05 m; MAE 0,01 m). Die Trefferrate (engl. Probability of Detection – POD) für Wasserstände über 0,5 m lag bei 72 %, bei einem Anteil falscher Alarmer (engl. False Alarm Ratio – FAR) von 34 %. Kurze, konvektive Ereignisse werden tendenziell leicht überschätzt, lang andauernde Ereignisse eher unterschätzt.

| Ereignis | Dauer [h] | RadEF mittl. Wasserstand [m] | Pearson Correlation | MAE [m] | RMSE [m] | POD w > 0,5 m | FAR w > 0,5 m | CSI w > 0,5 m |
|-------------|-----------|------------------------------|---------------------|---------|----------|---------------|---------------|---------------|
| 15.10.2019* | 2 | 0,03 | 0,82 | 0,02 | 0,06 | 0,99 | 0,66 | 0,34 |
| 16.06.2020* | 3 | 0,03 | 0,82 | 0,02 | 0,05 | 0,73 | 0,3 | 0,55 |
| 14.08.2020* | 2 | 0,02 | 0,83 | 0,01 | 0,05 | 0,92 | 0,62 | 0,37 |
| 17.07.2002 | 48 | 0,01 | 0,72 | 0,01 | 0,06 | 0,45 | 0,11 | 0,43 |
| 22.05.2002 | 2 | 0,03 | 0,81 | 0,02 | 0,05 | 0,87 | 0,41 | 0,55 |
| 25.06.2006 | 4 | 0,01 | 0,86 | 0,01 | 0,05 | 0,63 | 0,24 | 0,53 |
| 26.08.2010 | 24 | 0,02 | 0,84 | 0,02 | 0,06 | 0,52 | 0,12 | 0,49 |
| 22.06.2017 | 1 | 0,02 | 0,81 | 0,01 | 0,04 | 0,76 | 0,29 | 0,58 |
| 28.07.2018 | 12 | 0,01 | 0,81 | 0,01 | 0,04 | 0,92 | 0,57 | 0,42 |
| 12.09.2023 | 24 | 0,01 | 0,8 | 0,01 | 0,05 | 0,39 | 0,04 | 0,38 |
| Mittelwert | | 0,02 | 0,81 | 0,01 | 0,05 | 0,72 | 0,34 | 0,46 |

Abbildung 33: Kennwerte der maximalen Wasserstandshöhen aus dem RadEF-Verfahren für den Anwendungsfall „I – Echtzeit“ im Vergleich zur Referenzsimulation (mit * markierte Ereignisse gingen in die Entwicklung des Verfahrens ein)

Die Vorhersagevalidierung wurde für sechs kurze Ereignisse (≤ 4 Stunden) durchgeführt (vgl. die nachfolgende Abbildung 34). Eine Stunde vor Ereignisende lag die Trefferrate bei 64 %, allerdings mit deutlich erhöhtem Fehlalarmanteil.

| Ereignis | Dauer [h] | RadEF mittl. Wasserstand [m] | Pearson Correlation | MAE [m] | RMSE [m] | POD | FAR | CSI |
|------------|-----------|------------------------------|---------------------|---------|----------|------|------|------|
| 15.10.2019 | 2 | 0,02 | 0,76 | 0,01 | 0,05 | 0,87 | 0,71 | 0,27 |
| 16.06.2020 | 3 | 0,01 | 0,71 | 0,01 | 0,03 | 0,37 | 0,23 | 0,33 |
| 14.08.2020 | 2 | 0,01 | 0,45 | 0,01 | 0,04 | 0,83 | 0,88 | 0,12 |
| 22.05.2002 | 2 | 0,01 | 0,72 | 0,01 | 0,04 | 0,85 | 0,63 | 0,45 |
| 25.06.2006 | 4 | 0,002 | 0,36 | 0,01 | 0,03 | 0,22 | 0,56 | 0,17 |
| 22.06.2017 | 1 | 0,01 | 0,57 | 0,01 | 0,04 | 0,72 | 0,69 | 0,28 |
| Mittelwert | | 0,01 | 0,60 | 0,01 | 0,04 | 0,64 | 0,62 | 0,27 |

Abbildung 34: Wie Abbildung 33, aber für den Anwendungsfall „II – Vorhersage“ zum Zeitpunkt $t - 60$ Min., d. h. eine Stunde vor Ereignisende

Zusätzlich wurde eine Einzugsgebiets-basierte Bewertung für 83 Teileinzugsgebiete durchgeführt. Dabei wurde für jedes Teileinzugsgebiet die maximal erreichte Wiederkehrzeit des Niederschlags in eine von vier Risikoklassen (niedrig, mittel, hoch, sehr hoch) übersetzt. Diese dient der Übersichtlichkeit in einer stadtweiten Darstellung im Digitalen Zwilling (vgl. hierzu die nachfolgenden Ausführungen zu AP 8). Ein Beispiel ist in Abbildung 35 dargestellt.

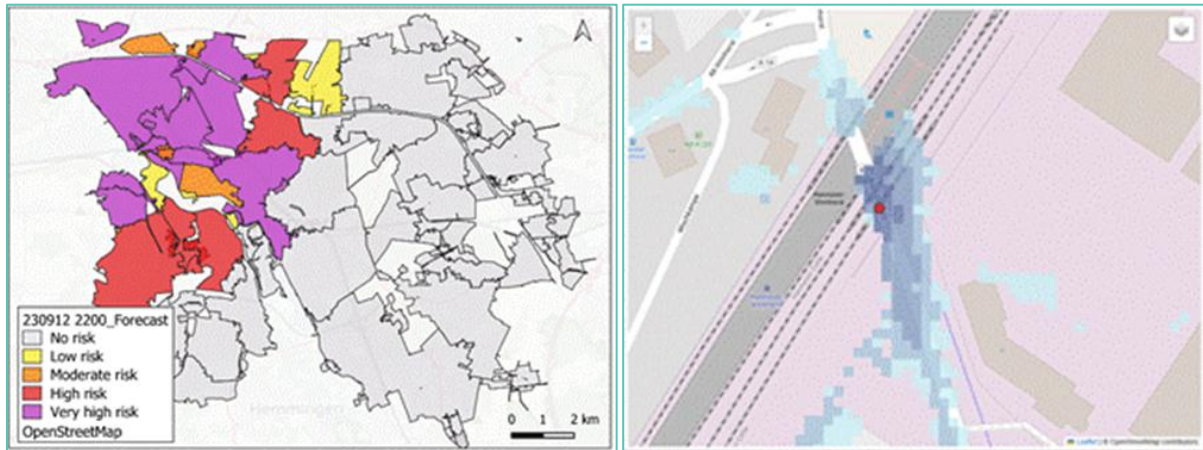


Abbildung 35: Links: Darstellung der Risikoklassen (niedrig, mittel, hoch, sehr hoch) zur Überflutung für Teileinzugsgebieten, rechts: Ausschnitt der mit RadEF erzeugten Karte des maximalen Wasserstands

Eine Auswertung der Risikoklassen auf Teileinzugsgebietsebene zeigte, dass die Vorhersagegüte mit der Länge des Vorhersagezeitraums abnahm, während für kurze Vorhersagezeiträume bis zu einer Stunde ein Anteil von ca. 70 % richtigen Vorhersagen erreicht wurde (vgl. Abbildung 36). Erhöhte Erkennungsraten wurden mit dem Vorhersagemaximum (Maximum aus 10 Ensemble-Nowcasts) erreicht (vgl. Abbildung 37), die trotz eines erhöhten Fehlalarmanteils die beste Wahl für Warn- und Einsatzentscheidungen sein kann.

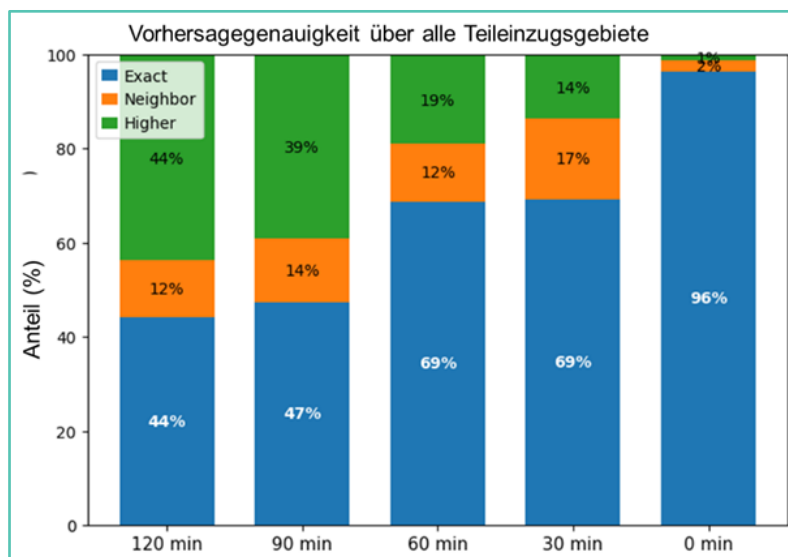


Abbildung 36: Genauigkeit der klassenbasierten Vorhersage des Überflutungsrisikos (4 Klassen) für Teileinzugsgebiete mit RadEFF in Abhängigkeit des Vorhersagezeitraums, gemittelt über 6 Ereignisse. Blau steht für eine richtige Vorhersage, orange für die Vorhersage der Nachbarklasse und grün für eine größere Abweichung

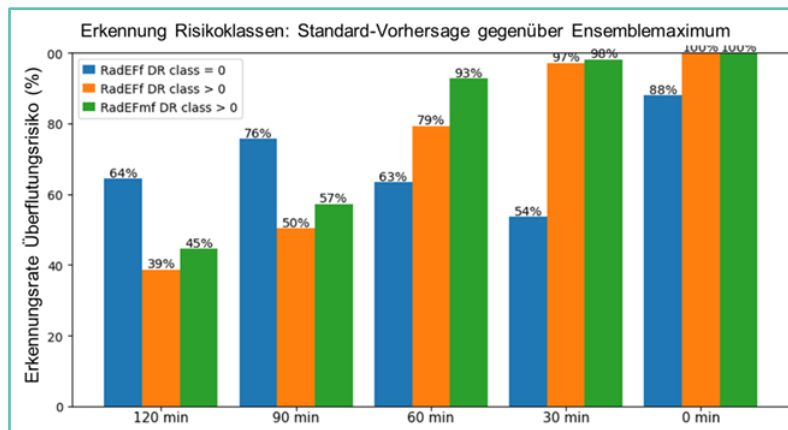


Abbildung 37: Anteil von Teileinzugsgebieten mit richtiger ODER überschätzter Risikoklasse (4 Klassen, Vorhersage auf Basis von RadEF) in Abhängigkeit vom Vorhersagezeitpunkt, gemittelt über 6 Ereignisse. Orange: Standard-Vorhersage, grün: Ensemblemaximum von 10 Ensemble-Nowcasts, blau: richtige Vorhersage der Klasse 0 = keine Überflutung

Die Ergebnisse zeigen, dass RadEF für die Überflutungsabschätzung in Echtzeit geeignet ist. Die Methode stellt eine robuste, transparente und recheneffiziente Alternative zu KI-basierten Ansätzen wie Convolutional Neural Networks (CNN) dar. Im Gegensatz zu CNN ist das Verfahren leicht übertragbar, ohne umfangreiche Trainingsdatensätze anwendbar und fachlich gut nachvollziehbar. Es eignet sich ausschließlich für relativ flache urbane Gebiete mit kurzen Fließwegen.

Teil-AP 4.4: Bereitstellung von Echtzeitmessdaten und Prognosen als Online-Dienst

Durch den Aufbau des digitalen Zwillings ergeben sich besondere Anforderungen an die Verarbeitung und Bereitstellung der Niederschlagsdaten. Um diesen gerecht zu werden, wurde die Software SCOUT (hydro & meteo) erweitert. Für die integrierte Kanalnetz- und Kläranlagensimulation sowie die Überflutungssimulation spielt die Echtzeitbereitstellung der Daten in einer hohen Qualität eine wichtige Rolle. Zur Optimierung wurde eine neues Software-Verfahren für die Aneichung (Quasi-Aneichung mit Advektionskorrektur) entwickelt und in der Software SCOUT implementiert. Dieses ermöglicht im Echtzeitsystem, wo Messdaten von Radar und Regenschreiber nur für einen zurückliegenden Zeitraum zum Vergleich zur Verfügung stehen, ein Korrekturfeld zu berechnen, das besser zum aktuellen Radarbild passt, indem die räumlich-zeitliche Bewegung des Niederschlagsfelds berücksichtigt wird. Dabei kommen Methoden aus dem Nowcasting zum Einsatz, wie die Zellerkennung und die Semi-Lagrange-Methode zur Berechnung der Advektion auf dem Raster.

Weiterhin wurde die Software für die Verarbeitung von hochaufgelösten Radardaten, d. h. originale polare Daten mit der Auflösung 250 m x 1° angepasst. Für die Kurzfristvorhersage (Nowcasting) auf Basis von hochaufgelösten Radardaten erfolgte ebenfalls eine Anpassung der Software, so dass Nowcasts auf einem Gitter von 500 m x 500 m gerechnet werden können. Das Verfahren zur Zellerkennung auf dem 500 m x 500 m Gitter wurde getestet und weiter verbessert. Neu ist dabei eine Bildanalyse über mehrere Level hinweg, mit der eine größere Anzahl von Mustern in verschiedenen Intensitätsbereichen erkannt und verarbeitet werden. Erste Auswertungen wurden anhand von 10 Starkregenereignissen im Zeitraum 2018 – 2021 durchgeführt, wobei die Erhöhung der Auflösung zu einer verbesserten Vorhersage im Vergleich zur Vorhersage auf einem 1 km-Raster führte. Ein Beispiel von Ensemble-Nowcasts über 2 Stunden, gerechnet mit zwei verschiedenen Auflösungen, ist in Abbildung 38 dargestellt.

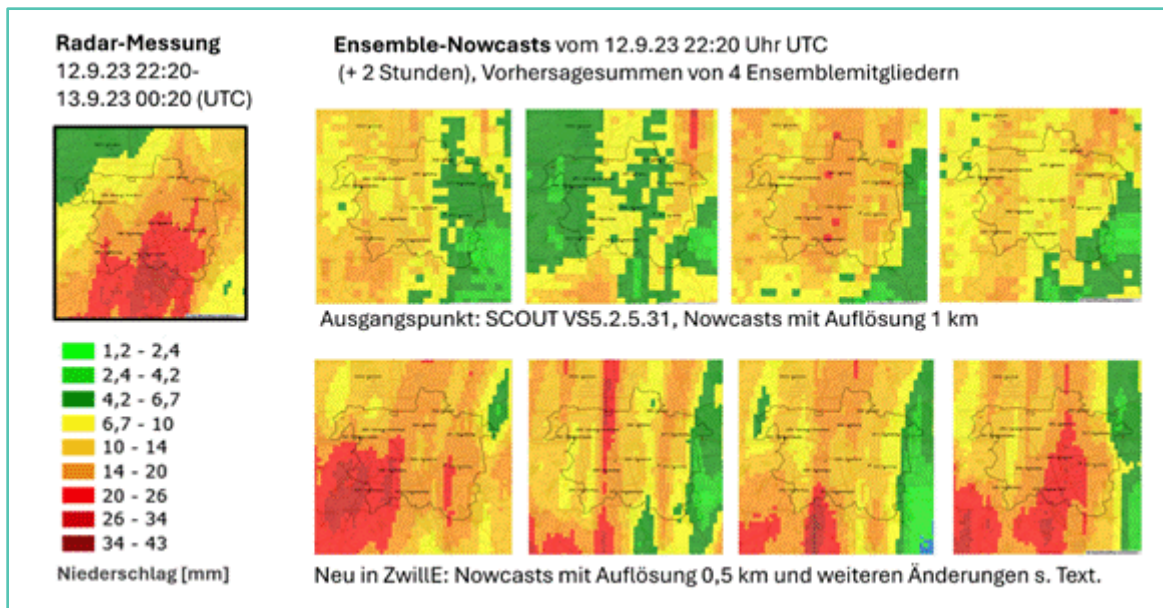


Abbildung 38: Ensemble-Nowcasts über Hannover. Dargestellt sind Vorhersagesummen über 2 Stunden von zwei verschiedenen Vorhersageensembles mit je 4 Realisierungen im Vergleich zur Radarmessung (oben links)

Das Echtzeitsystem wurde umgesetzt mit den folgenden Komponenten:

- Regelmäßiger Datenbezug von Stationsdaten und Radardaten vom DWD (von DWD-Open-Data-Portal) sowie von SEH und dem NLWKN,
- Automatisierte Korrekturen der Radardaten, Mapping der Daten auf ein gemeinsames 500 m-Raster,
- „Quasi-Aneichung“ mit Regenschreiberdaten der zurückliegenden 3 Stunden,
- Berechnung von Nowcasts, Nowcast-Ensembles (10 Realisierungen) und kombinierten Ensemble-Niederschlagsvorhersagen auf Basis der Ensemble-Nowcasts und numerischen Wettervorhersagen ICON-D2-EPS über 24 Stunden,
- Berechnung von Niederschlagssummen über verschiedene Zeiträume sowie Zeitreihen für 83 Kanal-Teileinzugsgebiete,
- Erstellung von Karten zum aktuellen Überflutungsrisiko und zum Wasserstand, mit regelmäßiger, automatisierter Aktualisierung,
- Umwandlung von Rasterdaten in ein georeferenziertes Format zur Visualisierung.

AP 5: Entwicklung des integrierten Simulationsmodells (AP-Leitung: ifak)

Zu Beginn des Projektes wurde ein Mapping zwischen vorhandenen Methoden und den beim Projektpartner SEH vorhandenen Modellen und Daten einerseits und den Anforderungen (vgl. die Ausführungen zu Teil-AP 1.2) andererseits vorgenommen und daraus das weitere Vorgehen für AP 5 abgeleitet. Die SEH verfügte bei Projektbeginn über ein – aus dem Kanalnetzinformationssystem heraus – beständig aktualisiertes hydrodynamisches Kanalnetzmodell sowie hydrologische Kanalnetzmodelle, welche zum Teil nicht aktualisiert und zum Teil unvollständig waren (z. B. in Bezug auf Kanalstauraumvolumina). Somit lag eine im Vergleich zu anderen Kommunen übliche Modellierungsgrundlage vor. Historische Prozessmessdaten (u. a. Wasserstände, Durchflüsse, Wasserqualität an etlichen Punkten im Kanalnetz und in den Klärwerken) liegen im SEH-Prozessleitsystem vor und waren verfügbar.

Als Haupteinflussgrößen und Hauptkomponenten des Stadtentwässerungssystems wurden der Niederschlag (insbesondere im Hinblick auf Extremereignisse) sowie das Kanalnetz identifiziert. Ohne sorgfältige Berücksichtigung dieser Komponenten sind auch nachgelagerte Elemente wie z. B. Kläranlagen und Gewässer nicht hinreichend abbildbar. Daher wurde im ZwillE Projekt besonderes Augenmerk auf Niederschläge und ihre Prognose und die Abbildung des Kanalnetzes gelegt.

Teil-AP 5.1: Modellaufbau Kanalnetz

Die Abbildung des realen Entwässerungssystems in einem Digitalen Zwilling setzt voraus, dass die Komponenten des Systems durch entsprechende Modelle beschrieben sind. Hierfür wurde das Simulationssystem SIMBA# ausgewählt, da es sich um eine vielseitige Simulationsumgebung handelt, die es ermöglicht, auf interne Datenstrukturen zuzugreifen und diese zu verarbeiten. Darüber hinaus bietet SIMBA# die Möglichkeit, hydrologische und hydrodynamische Teilmodelle zu kombinieren und Abwasserbehandlungs- und Flussmodelle nahtlos zu integrieren (vgl. Alex et al. 2024).

Als Ausgangsbasis für die Kanalnetzsimulation lag ein detailliertes, hydrodynamisches Kanalnetzmodell in der Software HYSTEM-EXTRAN (vgl. itwh 2023) vor. In beständigem Austausch zwischen ifak und SEH konnten Rückfragen geklärt, aber auch einzelne Inkonsistenzen in den vorhandenen Modellen identifiziert und behoben werden. Das Ausgangsmodell wurde auf die hydrodynamischen Module des SIMBA#-Simulators (vgl. ifak 2025) übertragen. Analog zu HYSTEM-EXTRAN berechnet auch SIMBA# den Abfluss in Kanalnetzen über das vollständige Saint-Venant-Gleichungssystem. Des Weiteren eignet sich SIMBA# auch für die Modellierung und Simulation von Kläranlagen und Gewässern.

Die Einrichtung eines Digitalen Zwillings, der auf die Echtzeitbeobachtung des Stadtentwässerungssystems abzielt, erfordert ein hochleistungsfähiges Simulationsmodell, insbesondere wenn, wie hier, prädiktive Simulationen vorgesehen sind. Ebenso erfordern Simulationsstudien, die die Analyse einer großen Anzahl von Szenarien und / oder die Auswertung langfristiger Zeitreihen beinhalten, trotz aller Fortschritte in der Computertechnologie nach wie vor hochleistungsfähige Modelle. Herkömmliche hydrodynamische Modelle, insbesondere von großen Netzwerken, sind für diesen Zweck zu komplex und zu langsam. Dies gilt auch für die meisten vereinfachten hydrodynamischen Modelle, wie sie derzeit üblich sind und für die viel Forschungsarbeit geleistet wurde (vgl. z. B. Pichler et al. 2024). Solche Methoden basieren in der Regel auf der Aggregation von Netzwerkelementen. Ein weiterer, sehr leistungsfähiger Ansatz besteht in der Erstellung eines hydrologischen Modells.

Um die Verallgemeinerbarkeit der im Rahmen des ZwillE Projektes durchgeführten Arbeiten zu sichern, wurde eine Methodik erarbeitet, die es erlaubt, aus vorliegenden Detailinformationen (z. B. hydrodynamisches Kanalnetzmodell, perspektivisch auch: Kanalnetzdatenbank) vereinfachte Modelle unterschiedlichen Detaillierungsgrades – damit auch anpassbar an die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Use Cases im ZwillE Projekt – zu erstellen. Die Erarbeitung einer derartigen, automatisierten (und damit auch übertragbaren) Methode, die auf Fachwissen basiert und auch für eher komplexe Netzwerke geeignet ist, bildete einen der Hauptteile von Teil-AP 5.1.

Ausgehend von dem bestehenden hydrodynamischen Detailmodell des Mischwasserkanalsystems der Stadt Hannover und nach der durch die SEH erfolgten Festlegung bedeutender Netzpunkte (über das gesamte Stadtgebiet verteilt) wird in diesem Verfahren das Modell in ein vereinfachtes hydrologisches Modell überführt. Dieses Verfahren besteht, nach einer vorab durchgeführten Plausibilitätskontrolle des Netzes („Schritt 0“), aus den folgenden Schritten (vgl. die nachfolgende Abbildung 39):

1. Identifizierung von (topologischen) Clustern als Gliederungseinheiten innerhalb des Netzes,
2. Identifizierung zusätzlicher, für den Modellaufbau und für die Flächenzuordnung relevanter Netzelemente und schließlich
3. Aufbau und Verbindung von Teilmodellen der Netzabschnitte, die ein betriebsbereites hydrologisches Modell des Systems bilden.

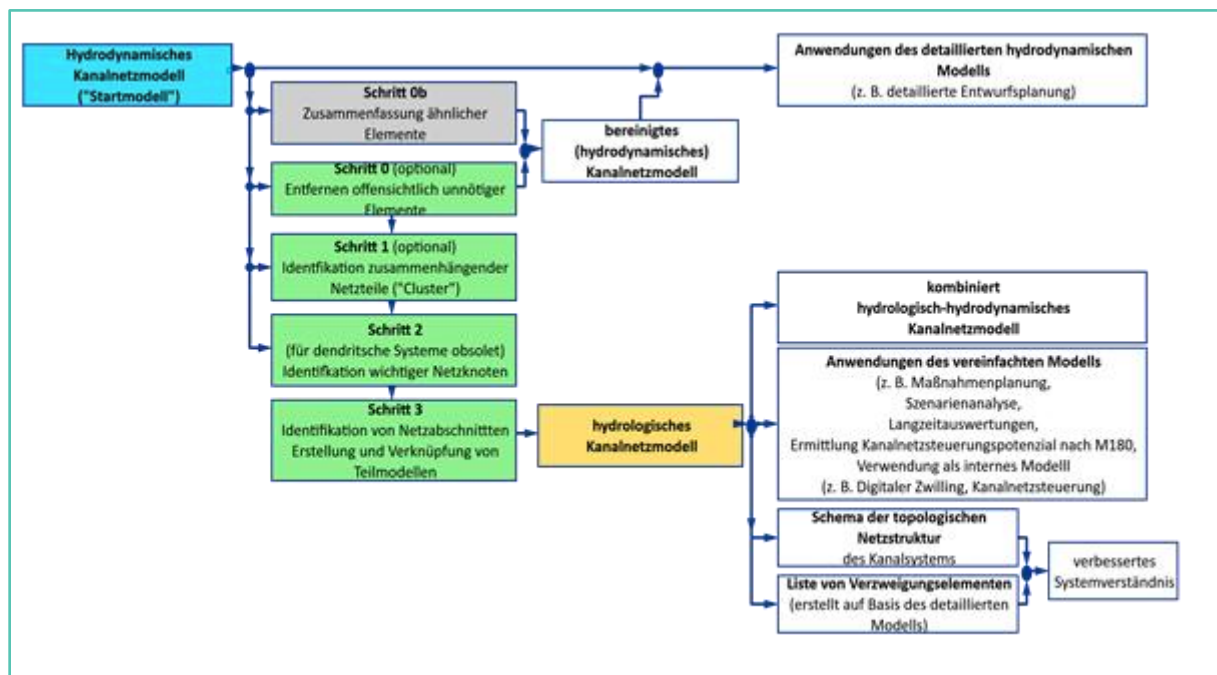


Abbildung 39: Methodik der automatisierten Modelltransformation und Optionen ihrer Anwendung

Dieses automatisierte Verfahren wurde im Test erfolgreich auch auf mehrere andere komplexe Kanalnetze großer Ausdehnung angewendet. Die Methode wurde sukzessive erweitert durch eine detailliertere Analyse des Netzverhaltens an Verzweigungspunkten mit automatisierten Annahmen, die manuell überschrieben werden können, und durch eine verbesserte Darstellung von Rückhalte- und Speichereffekten in Kanalrohren im vereinfachten Modell. Insgesamt ergibt sich für Hannover ein vereinfachtes Modell mit 237 Netzabschnitten (vgl. die kartenbasierten Darstellungen in den Abbildungen 40 und 41). Des Weiteren wurden neben den Routinen, die die o. g. Schritte der Modellvereinfachung auf Knopfdruck durchführen, etliche weitere Hilfsroutinen und Simulationsmodule erarbeitet. Diese unterstützen u. a. folgende Aufgaben:

- Topologische Vorwärts- und Rückwärtssuchen im Netzwerk, Ermittlung von Fließzeiten, Ermittlung von Kanalstauraumvolumina sowie zugehöriger Kennlinien etc.,
- Identifikation von Auffälligkeiten im Netzwerk und von zirkulären Netzmaschen,
- Analyse von Verzweigungspunkten,
- Erzeugung von Längsprofilen aller Fließwege,
- Erzeugung von topologischen Netzwerkkarten (in SIMBA# direkt sowie Schnittstelle zur Grafik-Software GraphViz),

- Polygon-basierte Flächendarstellungen mit Einfärbungen (kontinuierliche und diskrete Farbskalen),
- Zuordnung von Regenschreibern zu Einzugsgebieten (Thiessen-Polygon-Methode),
- Import von Niederschlagsdaten im uvf-Format, mit kontinuierlichem Update der Daten im Modell,
- Hilfsroutinen zur Verarbeitung und Verwendung historischer Daten des Prozessleitsystems im Simulationsmodell.

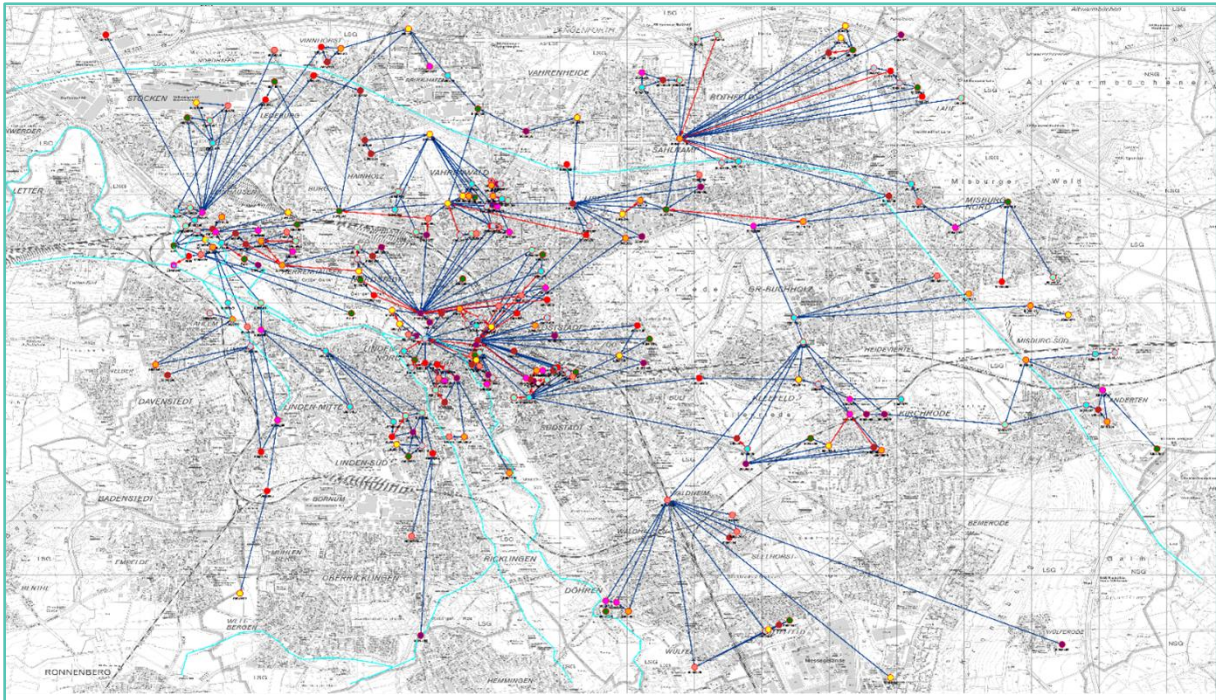


Abbildung 40: Kartenbasierte Darstellung der Struktur des vereinfachten, rein hydrologischen Kanalnetzmodells der Stadt Hannover

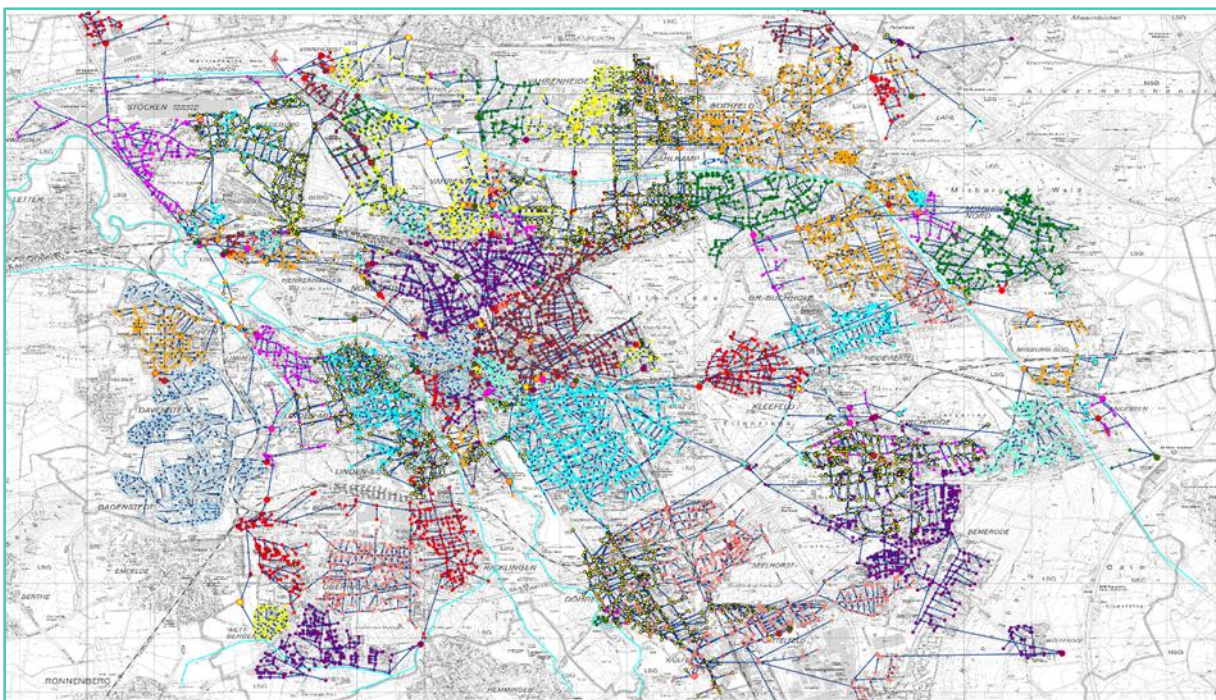


Abbildung 41: Zuordnung von Einzugsgebieten zu den Modulen des vereinfachten Kanalnetzmodells

Hydrologischen Modellen fehlt jedoch die Fähigkeit, wichtige hydrodynamische Effekte detailliert zu beschreiben, und sie sind daher ggf. nicht in allen Fällen ausreichend. Dies gilt insbesondere für das System in Hannover, wo einer der kritischsten Abwasserkanäle ein relativ flacher Hauptkanal mit erheblichem Rückstau-, Überlauf- und Überlastpotenzial ist. Daher wurde das automatisiert erzeugte, zunächst rein hydrologische Kanalnetzmodell für die besonders einstaugefährdeten Netzteile mit einer hydrodynamischen Modellbeschreibung in diesen Netzteilen gekoppelt (vgl. Abbildung 42). Hierbei kommt ein besonderes Feature des verwendeten Simulationssystems SIMBA# zur Geltung, welches die Kopplung beider Modellierungsansätze in einem einzigen Modell erlaubt.

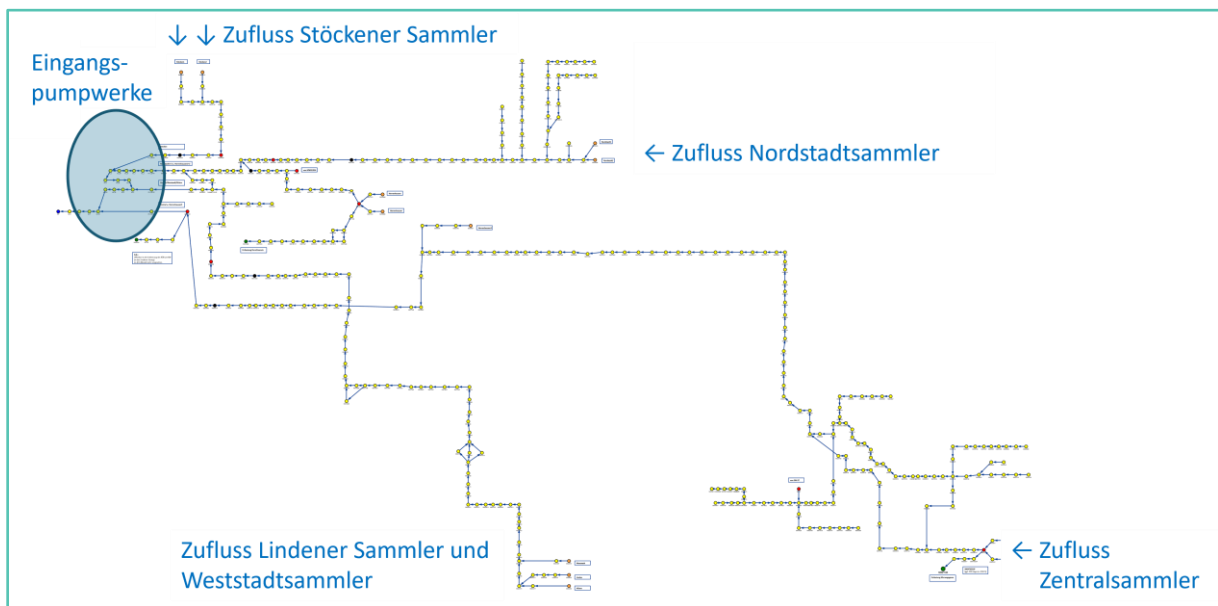


Abbildung 42: Modellaufbau des hydrodynamischen Teilmodells der einstaugefährdeten Teile des Kanalnetzes

Bestandteil dieses Modells sind auch die beiden Eingangspumpwerke, die das im Kanalnetz Hannover anfallende Mischwasser auf die beiden Klärwerke des Klärwerksverbunds Herrenhausen / Gümmerwald verteilen. Hierbei mussten vereinfachende Annahmen getroffen werden, da eine Analyse der historischen Daten des Prozessleitsystems zeigte, dass die Steuerung nicht immer nach einem einheitlichen Vorgehen erfolgte.

| Modelle Kanalnetz Hannover | Hydrodyn. Modell | rein hydrolog. Modell | kombiniert hydrodyn./hydrolog. Modell |
|------------------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Simulationsmodule insgesamt | 102894 | 3089 | 3031 |
| Einzugsgebiete | 33446 | 271 | 261 |
| Einzeleinleiter | 3988 | 271 | 251 |
| Haltungen/Sammler | 33241 | 440 | 530 |
| Schächte | 31774 | 271 | 281 |
| Simulationsdauer für 1 Tag: | ca. 3 Std. | ca. 7 Sek. | ca. 20 Sek. |

Tabelle 8: Überblick über die verschiedenen, im ZwiIE Projekt erarbeiteten Kanalnetzmodelle und ihre Performanz

Insgesamt wurden im ZwiIE Projekt drei verschiedene Kanalnetzmodelle unterschiedlicher Komplexität und Detaillierungsgrades erstellt (vgl. die vorherige Tabelle 8). Somit liegen für jeden der betrachteten Use Cases 1 bis 3 angemessene Modelle vor. Für die resultierenden vereinfachten Modelle, d. h. das rein hydrologische Modell und das kombinierte hydrologisch-hydrodynamische Modell, bei dem die für

hydrodynamische Effekte anfälligen Abschnitte des Kanalnetzes vollständig hydrodynamisch modelliert wurden, fanden Tests in Form von Validierungsläufen statt. Diese dienten dem Vergleich mit dem hydrodynamischen Modell des Gesamtsystems sowie mit historischen Daten aus dem Prozessleitsystem der SEH. Unter Verwendung des Modells wurde eine Optimierung zur Identifizierung der Formparameter für das durch eine Fourier-Reihe beschriebene Trockenwettertagesgangmuster durchgeführt (vgl. Alex 2024). Dadurch ist sichergestellt, dass der Trockenwettertagesgang in den stromabwärts gelegenen Teilen des Systems mit den durch Messungen beobachteten Mustern übereinstimmt, wobei eine sehr gute Übereinstimmung erzielt wurde (vgl. die nachfolgende Abbildung 43).

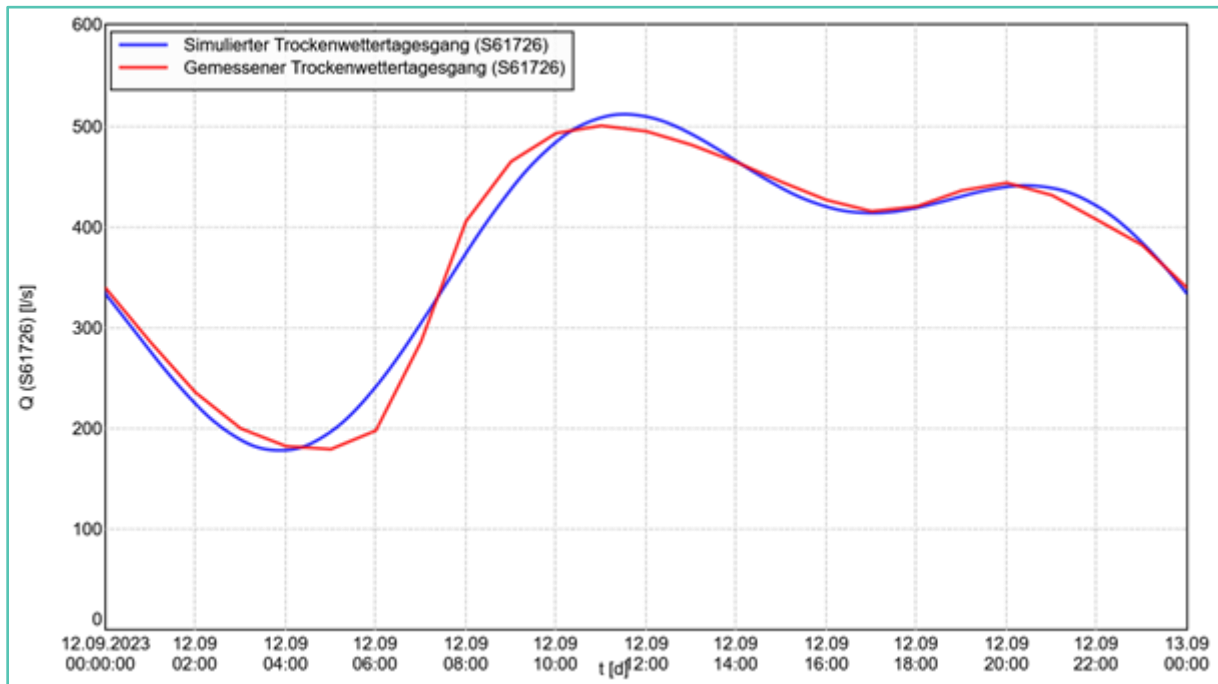


Abbildung 43: Vergleich von gemessenen und simulierten (aus Optimierung der Koeffizienten einer Fourier-Reihe ermittelten) Trockenwettertagesgangdaten an einer Messstelle kurz oberhalb der Einlaufpumpwerke

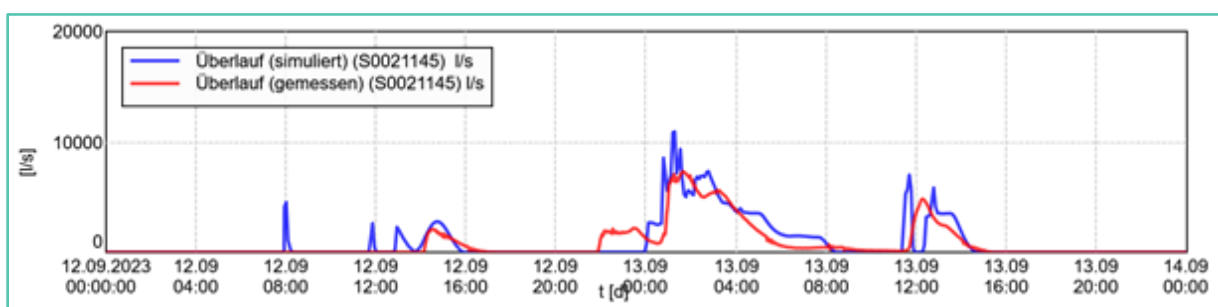


Abbildung 44: Gemessener und simulierter Überlauf an einem der wichtigsten Abschlagsbauwerke des Kanalnetzes (S0021145) während des Starkregenereignisses vom 12. / 13.09.2023

Um das hydrologische Modell des gesamten Kanalnetzes zu validieren, erfolgte ein Vergleich seiner Ergebnisse an 243 Punkten innerhalb des Netzes mit den Ergebnissen der entsprechenden Elemente des hydrodynamischen Modells unter Trockenwetterabflussbedingungen. Dabei ergab sich, wie erwartet, eine gute Übereinstimmung von weniger als 1 % Abweichung für 95 % der Elemente. Die Übereinstimmung bei Regenereignissen wurde unter anderem anhand von Überlaufdaten an kritischen Stellen

des Netzes – wie etwa einem Überlauf aus einem der Hauptabwasserkanäle – analysiert. Das hydrologische Modell zeigt bereits eine recht gute Übereinstimmung in Bezug auf die Überlaufzeiten und die Form der Überlaufganglinien, während das vereinfachte Modell die Überlaufzeiten an einem der wichtigsten Abschlagsbauwerke des Kanalnetze leicht zu überschätzen scheint. Die vorherige Abbildung 44 zeigt ein Beispiel für ein Starkregenereignis mit 50 mm Niederschlag. Die nachfolgende Abbildung 45 illustriert die Darstellung der Wasserstände in einigen der Hauptsammler von Hannover.

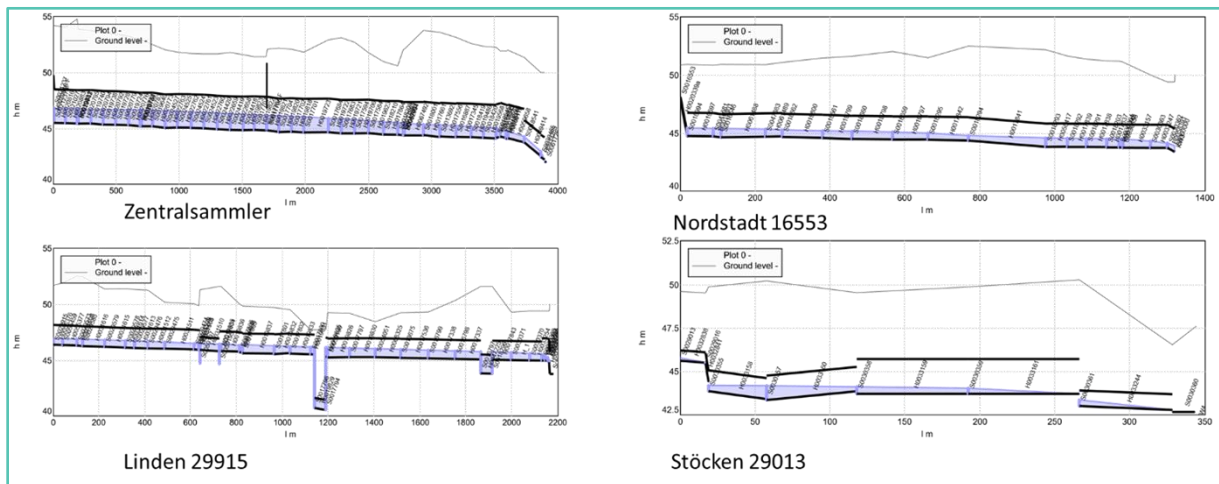


Abbildung 45: Ergebnisdarstellung im Längsprofil (hydrodynamisches Teilmodell) wichtiger Sammler

Ein zentrales Element in der Nutzeroberfläche des Digitalen Zwillings (vgl. hierzu auch die nachfolgenden Ausführungen zu AP 8) besteht in der Darstellung des Abflussgeschehens im gesamten Stadtgebiet. In einer ampelartigen Darstellung wird für jedes der 83 Kanal-Teileinzugsgebiete der Stadt farblich illustriert, ob sich die Abflüsse im Kanalnetz auf niedrigem (Darstellung in grün bzw. gelb) oder möglicherweise zu Einstau (orange) oder Überlauf (rot) führendem Niveau befinden.

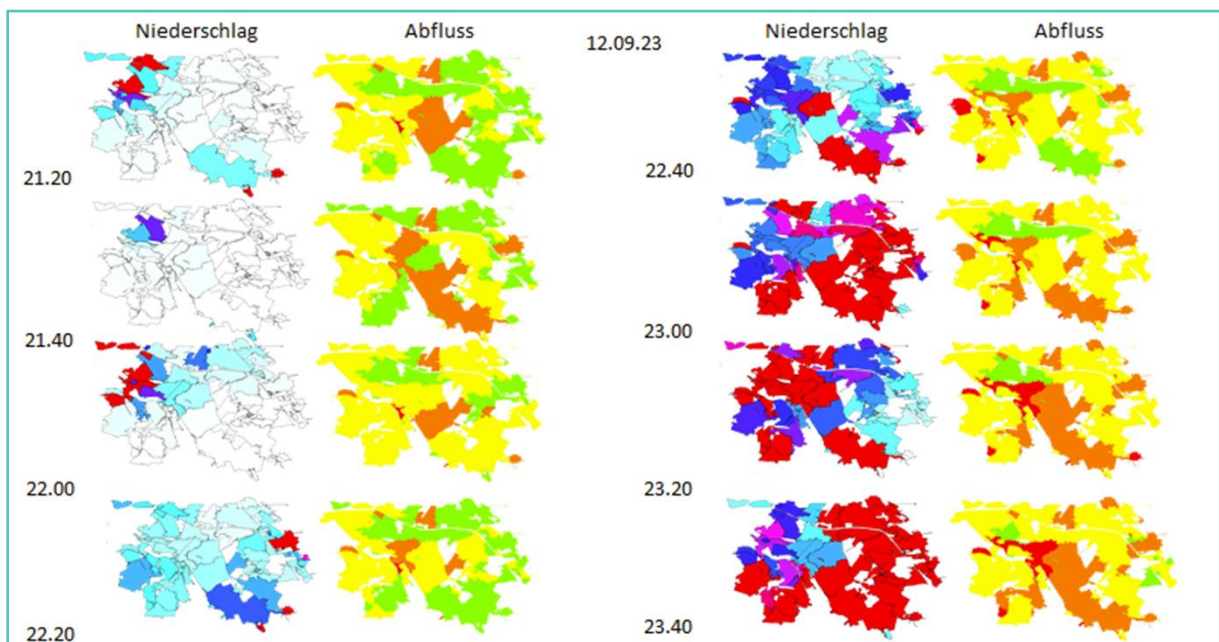


Abbildung 46: Verlauf des Starkregenereignisses vom 12. / 13.09.2023 in Bezug auf Niederschlag und Abfluss

Die vorherige Abbildung 46 illustriert den Verlauf des Starkregenereignisses vom 12. / 13.09.2023 an einem der wichtigsten Punkte des Kanalnetzes. In den Vergleich von Simulations- und Messdaten und in die Bewertung der Simulationsergebnisse sind auch die in den vom Projektpartner ifs durchgeführten Messkampagnen erhobenen Messdaten eingegangen.

Teil-AP 5.2: Modellaufbau Klärwerksverbund

In Abstimmung mit SEH und nach einer Besichtigung des Klärwerks Herrenhausen wurde sich auf den Detaillierungsgrad des Klärwerksmodells Herrenhausen geeinigt und die benötigten Daten übermittelt. Als Bezugsjahr wurde das Jahr 2021 gewählt. Die Sichtung und Aufbereitung der verfügbaren Informationen von SEH zu Konzentrationen und Frachten ergab, dass für eine zuverlässige Modellierung des Zulaufs und der Verteilung der Zulauffrachten auf die beiden Klärwerke Herrenhausen und Gümmerwald eine tiefergehende Analyse der Daten erforderlich wurde.

Die Modelle der Klärwerke (vgl. für das Klärwerk Herrenhausen die nachfolgenden Abbildungen 47 und 48 und für das Klärwerk Gümmerwald die nachfolgende Abbildung 54) wurden unter Nutzung der Blockbibliotheken in SIMBA# aufgebaut. Die Beckendimensionen und Wasser- und Schlammströme sowie die vorhandene Steuerungslogik zur Abbildung der Automatisierung wurden implementiert.

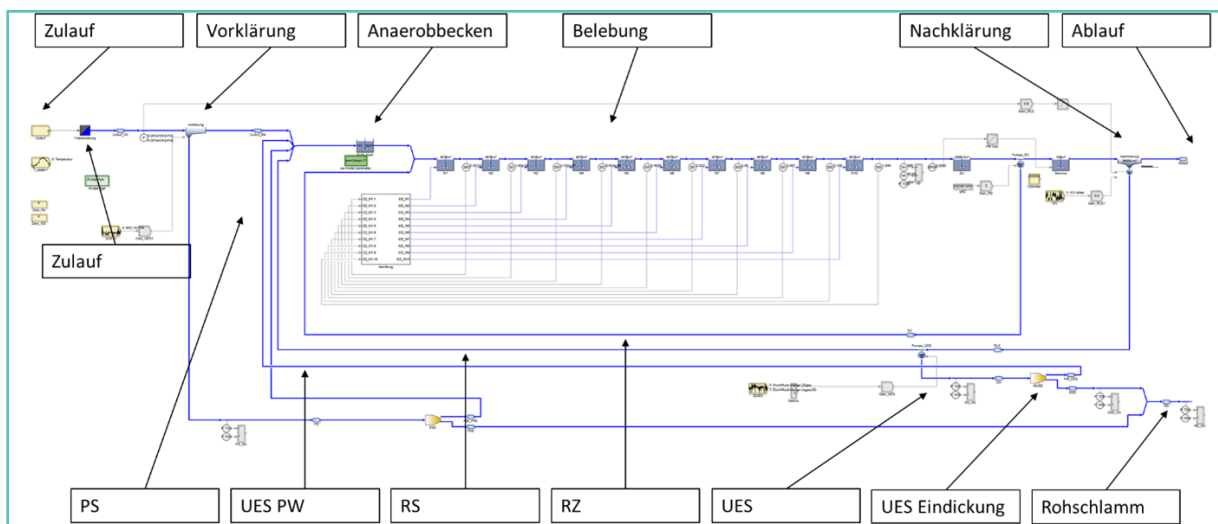


Abbildung 47: Fließbild des Modells des Klärwerks Herrenhausen mit verfahrenstechnischen Aspekten

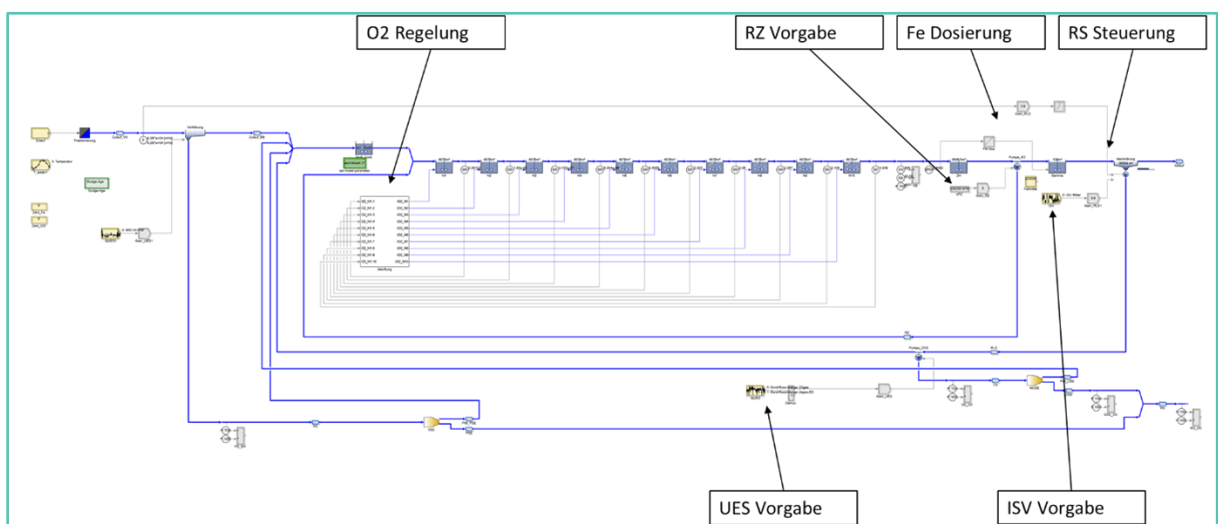


Abbildung 48: Fließbild des Modells des Klärwerks Herrenhausen mit steuerungstechnischen Aspekten

Das Ziel der Modellierung bestand darin, den realen Anlagenzustand möglichst realitätsnah abzubilden und die Eignung des Modells für Analyse-, Bewertungs- und Weiterentwicklungszwecke zu überprüfen. Das Modell zeigt den vollständigen verfahrenstechnischen Aufbau der Anlage: vom Zulauf über die Vorklärung, das Anaerobbecken, die Belebungsstufe und die Nachklärung bis hin zur Schlammbehandlung mit Primär-, Rücklauf-, Überschuss- und Rohschlamm. Ergänzend wurden wesentliche Steuerungs- und Regelungskonzepte implementiert, darunter die Sauerstoffregelung in der Belebungsstufe, die Fällmitteldosierung und die Steuerung der relevanten Schlammströme. Die Zulaufbeschreibung erfolgte unter Berücksichtigung der Frachten und einer Fraktionierung nach ASM3biop (vgl. Rieger 2006).

Zur Kalibrierung des Modells wurden verschiedene Anpassungen vorgenommen, um eine möglichst gute Übereinstimmung mit den verfügbaren Messdaten zu erreichen. Dazu zählten unter anderem die Begrenzung des Rücklaufschlammvolumenstroms in Abhängigkeit vom Zulauf, die dynamische Vorgabe des Schlammvolumenindex für die Nachklärung und die Anpassung der maximalen Wachstumsrate der Nitrifikanten. Darüber hinaus wurde die Fällmitteleffektivität erhöht und die Fällmitteldosierung über eine Lookup-Tabelle modelliert. Dabei wurde die gemessene Phosphatkonzentration im Ablauf der Belebungsstufe als Regelgröße genutzt.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen eine gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten (vgl. die nachfolgenden Abbildungen 49 bis 53). Sowohl die CSB-, Ammonium- und Phosphorkonzentrationen im Zu- und Ablauf der Vorklärung, im Ablauf der Belebungsstufe als auch im Ablauf der Nachklärung werden plausibel reproduziert. Auch die simulierten Sauerstoffkonzentrationen in ausgewählten Belebungsbecken-Kaskaden stimmen gut mit den verfügbaren Online-Messungen überein. Die Volumenströme und Trockensubstanzgehalte der relevanten Schlammströme liegen überwiegend im Bereich der gemessenen Tagesmengen und Stichproben. Abweichungen ergeben sich insbesondere aus realen Schwankungen des CSB/N-Verhältnisses im Zulauf sowie aus der insgesamt geringen Anzahl verfügbarer Messungen für CSB und Stickstoff. Zusätzlich wurde der Gesamtstickstoff im Zulauf nicht als TKN erfasst, so dass das Modell im Wesentlichen auf die Ammoniumkonzentrationen im Zu- und Ablauf der Vorklärung sowie der Belebungsstufe abgestimmt wurde.

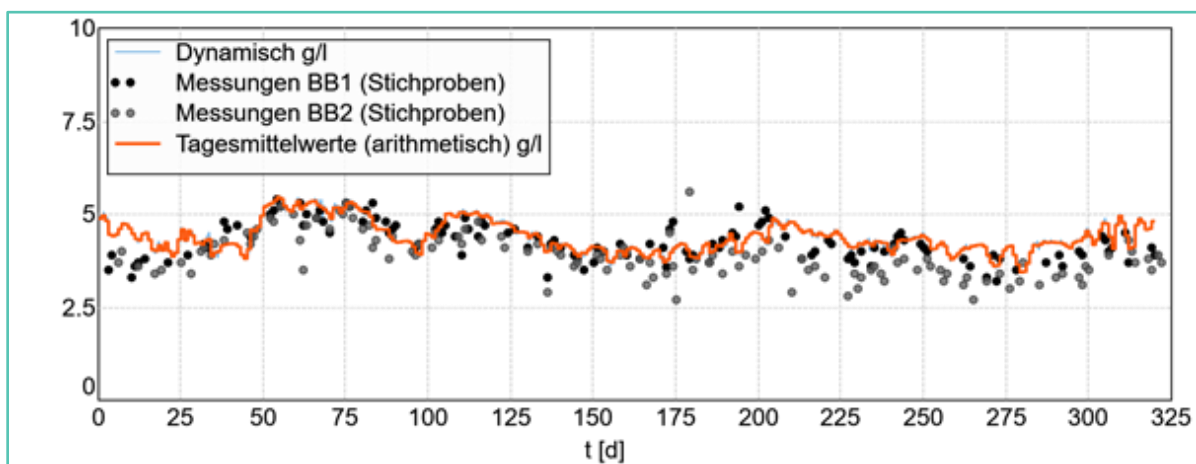


Abbildung 49: TS Belebungsstufe

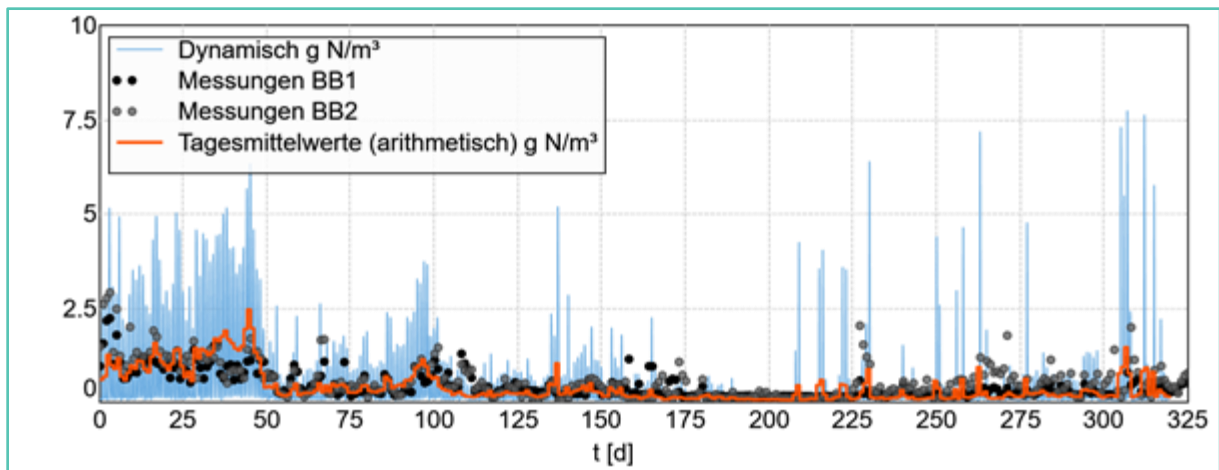


Abbildung 50: NH4 Ablauf Belebung

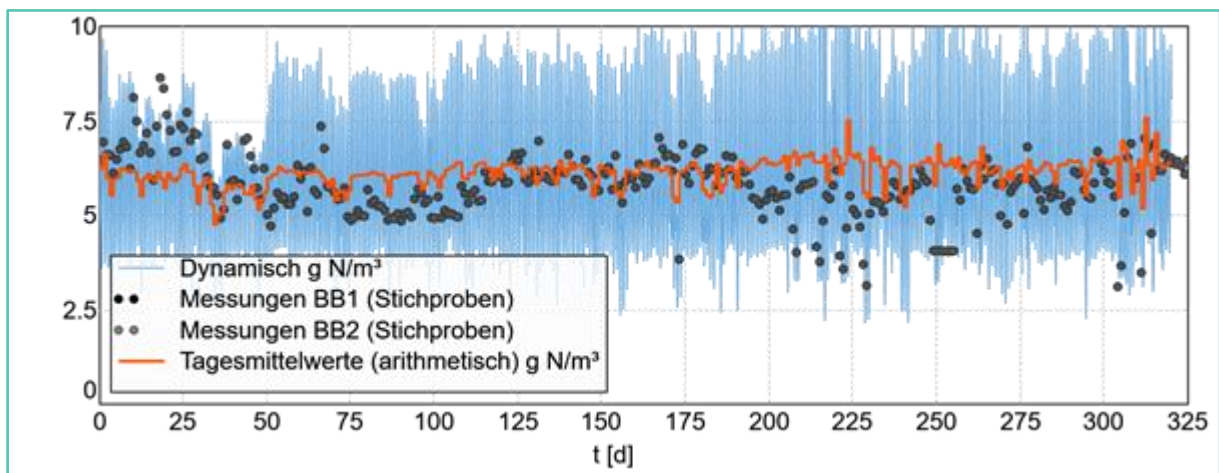


Abbildung 51: TS NOx Ablauf Belebung

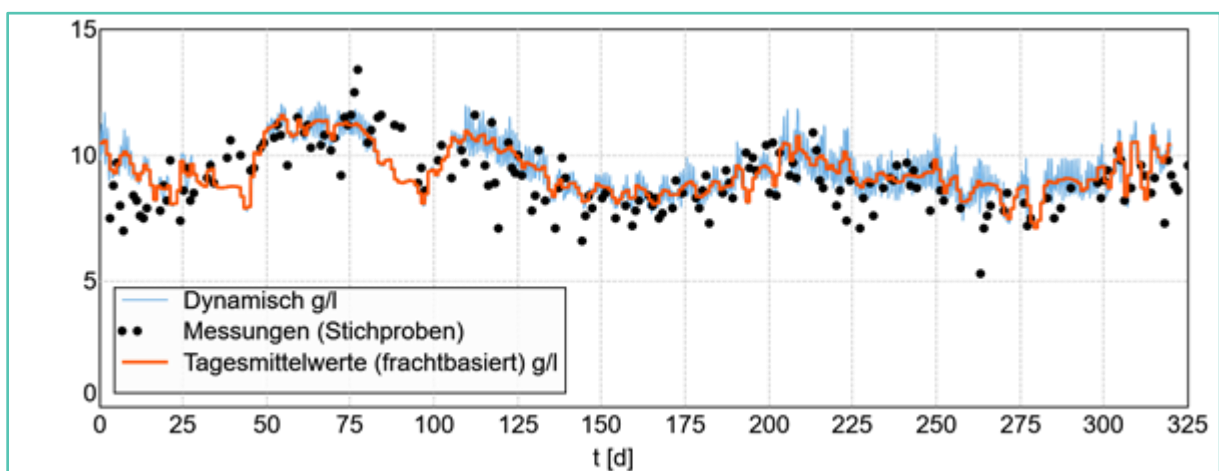


Abbildung 52: TS Überschussschlamm

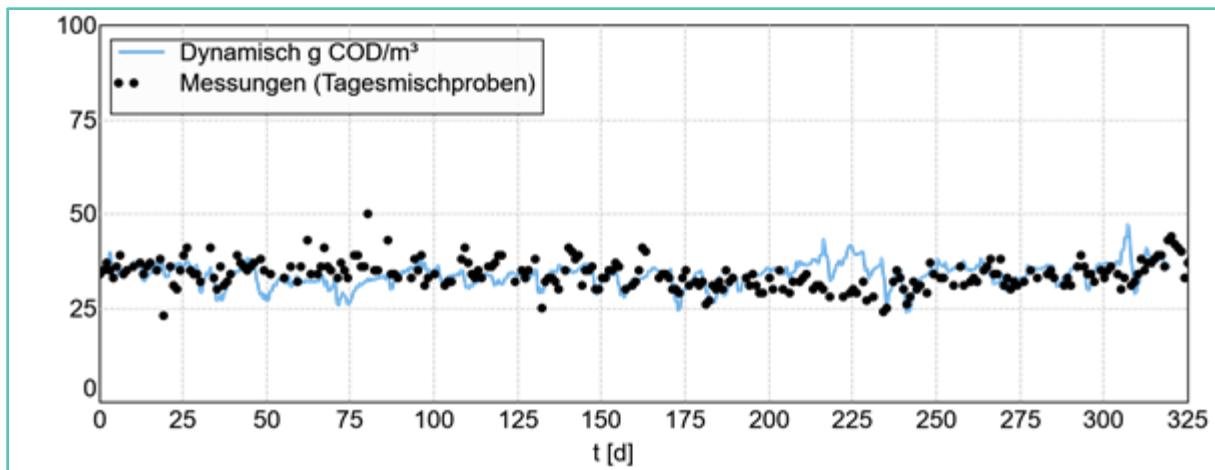


Abbildung 53: CSB Ablauf Nachklärung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Modell den Anlagenzustand des Klärwerks Herrenhausen für das Jahr 2021 realitätsnah widerspiegelt und als belastbare Grundlage für weiterführende Untersuchungen dient. Verbesserungspotenziale bestehen vor allem in einer detaillierteren Zulaufcharakterisierung, einer erweiterten Messdatengrundlage für Stickstoffparameter und einer genaueren Abbildung des tatsächlichen Fällmitteldosierkonzepts. Die Belüftungsregelung wurde zwar modelliert, jedoch nicht im Hinblick auf Luftvolumenströme, Belüfterkennlinien und Belegung detailliert ausgewertet. Auch hier bestehen somit Ansatzpunkte für eine weitere Nachschärfung des Modells.

Ebenso wurde das Modell für das Klärwerk Gümmerwald aufgebaut und fertiggestellt (vgl. die nachfolgende Abbildung 54). Die Zulauffraktionierung wurde dabei analog zur Zulauffraktionierung für das Klärwerk Herrenhausen durchgeführt. Damit liegen nunmehr dynamische Simulationsmodelle für beide Klärwerke von Hannover (Herrenhausen und Gümmerwald) vor.

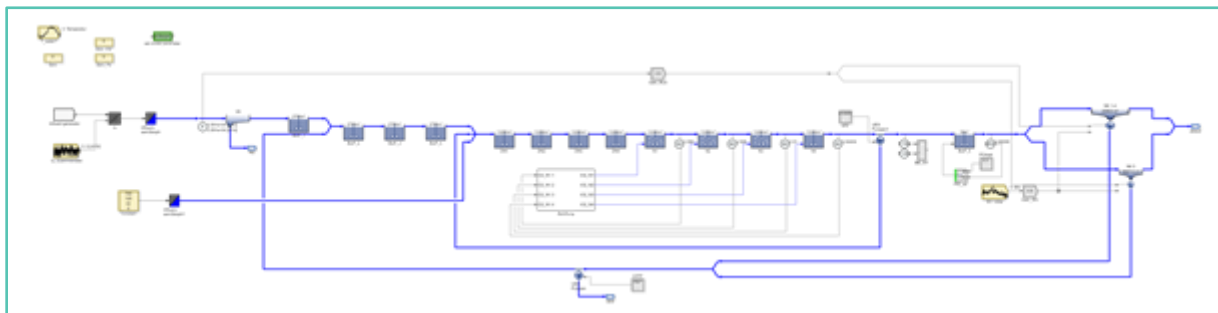


Abbildung 54: Fließbild des Modells des Klärwerks Gümmerwald mit verfahrens- und steuerungstechnischen Aspekten

Teil-AP 5.3: Integration in ein Gesamtmodell

Für die Integration von Teilmodellen für Kanalnetz, Klärwerksverbund und Gewässerabschnitte der Vorflutgewässer sind die entsprechenden Vorbereitungen getroffen worden. Aufgrund sich veränderter Anforderungen im Projekt wurde der Fokus jedoch auf die Ermittlung und Visualisierung des Niederschlags- und des Abflussgeschehens im Kanalnetz gelegt (vgl. hierzu die vorherigen Ausführungen zu Teil-AP 5.1). Hierbei sind auch die Einzugsgebiete mit einbezogen worden, die Einfluss auf das Abflussgeschehen im Kanalnetz haben. Daten der SEH zu weiteren Gewässer-Einzugsgebieten (mit ausschließlichem Niederschlagsabfluss) sind evaluiert worden; zudem sind Module zur Analyse, Glättung

und Interpolation von vorhandenen Gewässerprofildaten aus GIS und ihrer Übertragung in Gewässerabschnittmodule eines Gewässermodells vorbereitet worden (vgl. die nachfolgende Abbildung 55). Insgesamt waren diese Arbeiten jedoch deutlich aufwandsintensiver als zuvor angenommen. Aufgrund begrenzter Zeitressourcen erfolgte, wie oben erläutert, die Schwerpunktlegung auf die Kanalnetz- und Kläranlagenmodellierung.

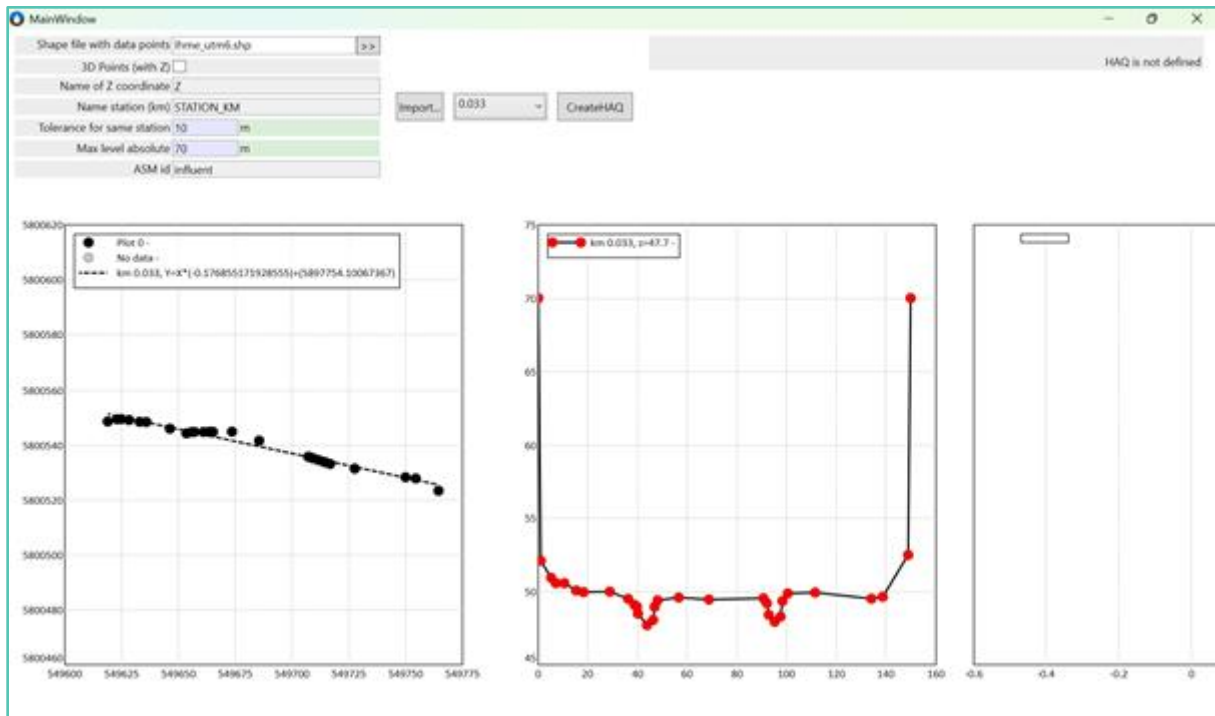


Abbildung 55: Import von Gewässerprofildaten zum Aufbau eines Gewässergütemodells

Teil-AP 5.4: Szenario-Analyse

Aufgrund der zuvor erläuterten Schwerpunktbildung sind die methodischen Vorarbeiten für die Szenario-Analyse, nicht jedoch die Szenario-Analyse selbst, durchgeführt worden. Durch den Projektpartner h&m sind Ensembles von Niederschlagsdaten bis zum Jahre 2100 erstellt und zur Verfügung gestellt worden; somit liegt hierfür eine gute Grundlage vor. Jedoch können aufgrund der Projektarbeiten folgende Empfehlungen in Bezug auf die Fallstudie Hannover gegeben werden:

- Derzeit besteht in den kritischen einstufiggefährdeten Bereichen des Kanalnetzes vergleichsweise wenig Potenzial, um steuernd in das Abflussgeschehen einzugreifen und dadurch Belastungen der Gewässer zu reduzieren. Wünschenswert wäre weiteres Speichervolumen und / oder aktivierbares Kanalstauraumvolumen nicht nur im Bereich der Eingangspumpwerke. Aktuell führt die SEH daher Analysen bezüglich eines Baus von zusätzlichem Beckenvolumen und seiner Bewirtschaftung durch.

Insgesamt konnte in AP 5 nicht nur die Simulationsbasis für den Digitalen Zwilling mit seinen in Teil-AP 1.2 abgeleiteten Anforderungen erarbeitet werden, sondern es wurde – und das ist für die Übertragbarkeit und Anwendung der Ergebnisse dieses Verbundforschungsprojekts von großer Bedeutung – eine allgemeingültige und anwendbare Methodik zur Erstellung vereinfachter Kanalsimulationsmodelle erarbeitet, getestet und validiert. Der Nutzen hiervon zeigte sich bereits unmittelbar nach Projektabschluss: Eine neue Version des vom Projektpartner SEH erstellten hydrodynamischen Kanalnetzmodells kann nun erheblich leichter als je zuvor in ein für die Echtzeitznutzung in einem Digitalen Zwilling geeignetes hochperformantes vereinfachtes Modell überführt werden.

AP 6: Formalisierung von Erfahrungswissen zur Bewältigung von Extremwasserszenarien (AP-Leitung: IAB)

Teil-AP 6.1: Definition von Erfahrungswissen und Entwicklung von Modellen für die Wissensrepräsentation

Im Rahmen des Teil-AP 6.1 wurden Erfahrungsdimensionen und Erfahrungsquellen gesammelt und hinsichtlich ihrer Verwendung im Projekt bewertet. Um Erfahrungswissen für das ZwillE Projekt nutzbar zu machen, wurden mögliche Quellen von explizitem und implizitem Wissen beim Projektpartner SEH untersucht. Im Fokus standen dabei die für eine Beeinflussung der Entwässerungsinfrastruktur in Hannover relevanten Leitwarten des Kanal- und Klärwerkbetriebs. Neben der Einbeziehung von bereits dokumentierten Wissensbausteinen (z. B. aus betrieblichen Handlungsanweisungen) wurde besonders auf das implizite Wissen der Mitarbeitenden in den Leitwarten fokussiert und entsprechende Befragungen des Personals vorbereitet. Dazu wurde zusammen mit Atos / Eviden ein Fragekatalog für die Erhebung des Erfahrungswissens entwickelt.

Teil-AP 6.2: Erhebung und Validierung von Erfahrungswissen

In diesem Teil-AP wurde zunächst das relevante Erfahrungswissen für den Erfahrungsraum Hannover eruiert. Dabei wurde nach internen und externen Quellen von Erfahrungswissen unterschieden. Internes Wissen umfasste impliziertes, personengebundenes Wissen von Mitarbeitern der SEH und kodifiziertes Wissen z. B. Handlungsabläufe und -anweisungen. Als externe Quellen von implizitem und explizitem Erfahrungswissen wurden verschiedene potenzielle Quellen identifiziert.

Da im relevanten Use Case 2 (Unterstützung bei kurzfristiger Ausführung von Maßnahmen zur Bewältigung von Wasser-Extremereignissen mit $SRI < 3$) Maßnahmen durch SEH veranlasst werden können, wurde zunächst das Erfahrungswissen bei SEH erhoben. Im vorliegenden Kontext war dabei insbesondere das personengebundene Wissen in Form der beruflichen Erfahrung des SEH-Personals im Bereich der Auswirkungen der Ereignisdimension Starkregen auf einen Ereignisraum interessant, welches zu Kenntnissen (Handlungsabläufen) im Umgang mit solchen Ereignissen, insbesondere hinsichtlich der Vermeidung von kritischen abflussbedingten Betriebszuständen geführt hat. Erfahrungswissen kann personenbezogen, direkt bei den Erfahrungsträgern in nicht schriftlicher Form als implizites Wissen vorliegen oder in Textform als dokumentiertes implizites Wissen in Form von Niederschriften in Tagesprotokollen, Berichten, Veröffentlichungen etc. Als Ereignisraum wurde die Stadt Hannover mit dem Umland betrachtet. Als Ereignisdimension wurde lokal im Ereignisraum auftretender Starkregen definiert.

Die Übergabe von internem expliziten Erfahrungswissen erfolgte durch die SEH in Form einer Handlungsbeschreibung für die Fahrweise der Eingangspumpwerke des Klärwerks Herrenhausen.

Es wurden Erhebungszeiträume für die Befragungen durch alle Projektpartner festgelegt. Die Funktion der im Projekt aufgebauten Wissensbasis besteht in der maschinenlesbaren Erfassung von Erfahrungswissen über die aktuellen Einflussnahmemöglichkeiten auf die Entwässerungsinfrastruktur im Stadtgebiet von Hannover sowie über Auswirkungen historischer Starkregenereignisse auf die nachfolgenden im Projekt betrachteten Use Cases:

- Use Case 1: Aktueller Ist-Zustand des Entwässerungssystems von Hannover,
- Use Case 2: Prognostizierter Zustand des Entwässerungssystems in Hannover bei Extremwetterereignissen – Ableitung von kurzfristigen Anpassungsmaßnahmen,
- Use Case 3: Durchführung von längerfristigen Planungs- und Anpassungsmaßnahmen zur Berücksichtigung neuer, aus dem Klimawandel resultierender Anforderungen.

Bei SEH sind in Hannover zwei Leitwarten in Betrieb:

1. Leitwarte Kanal: u. a. verantwortlich für die Steuerung der Schieber- und Pumpensysteme der Hauptsammler

2. Leitwarte Klärwerk Gümmerwald: u. a. verantwortlich für die Überwachung und Steuerung der beiden Eingangspumpwerke. Hier besteht je nach Auslastung der Klärwerke die Möglichkeit, durch deren Beschickung auf die Auslastung und auf die Hauptsammler und damit auf das Kanalnetz einzuwirken. Somit kann bei prognostizierten Starkregenereignissen mit Hilfe des Digitalen Zwillings ggf. eine (vorausschauende) hydraulische Entlastung der Sammler erfolgen.

Somit kam das Personal dieser beiden Leitwarten für eine Befragung zur Erfassung des Erfahrungswissens in Betracht. Auf den Leitwarten sind Inspektoren im Schichtsystem im Einsatz und verantwortlich für ihren jeweiligen Zuständigkeitsbereich. Aufgrund des Informationsgehalts und der Zuordnung zu KRITIS-relevanten Aspekten musste bei SEH grundsätzlich entschieden werden, unter welchen Voraussetzungen derartige Befragungen des SEH-Betriebspersonals durchgeführt werden konnten.

Zunächst wurde die Befragung des SEH-Personals zur Erfassung von impliziten Erfahrungswissen geplant und in Zusammenarbeit mit Atos / Eviden die Inhalte der Befragung in Fragekatalogen erarbeitet. Die Fragestellungen wurden so formuliert, dass eine Zuordnung nach verschiedenen Merkmalen möglich war wie:

- Zuordnung der Aktivitäten zu den einzelnen Sammlern,
- Aktivitäten bei Trockenwetter,
- Aktivitäten bei leichtem Regen,
- Aktivitäten bei Starkregen mit Flusshochwasser,
- Aktivitäten bei Starkregen ohne Flusshochwasser.

Aufgrund von zeitlichen Verzögerungen aufgrund des Weihnachtshochwassers 2022 / 2023 sowie einer Klärung KRITIS-relevanter Informationen konnten im Jahr 2023 daher nicht alle geplanten Befragungen realisiert werden. Im Januar / Februar 2024 wurde die Befragung der Inspektoren im Klärwerk Gümmerwald fortgesetzt.

Bei der Befragung von Inspektoren in der Leitwarte Kanal wurde deutlich, dass die Möglichkeiten der Einflussnahme bei Starkregenereignissen auf die Befüllung der Sammler in Hannover mit dem Ziel einer Vermeidung / Minimierung von Überstausituationen in der Leitwarte Kanal gering sind.

Die Auswertung der Befragung kommt für die Erarbeitung der Wissensbasis zu der wichtigen Feststellung, dass der Betrieb der Eingangspumpwerke auf einer manuellen Steuerung des jeweiligen Inspektors auf angelerntem Erfahrungswissen beruht. Der Füllstand der Sammler wird über die Pumpensämpfe der Eingangspumpwerke mittels Pegelsonden überwacht, so dass im Regelfall eine automatisierte Steuerung Anwendung findet. Die Inspektoren haben diese Pegel in der Leitwarte ständig im Blick und korrigieren aufgrund ihres Erfahrungswissens das Gesamtsystem insbesondere bei Regenereignissen mit unterschiedlichen Füllständen in den Sammlern.

Als Ergebnis der durchgeführten Befragungen ist es deshalb wichtig, den im Rahmen von ZwillE entwickelten Digitalen Zwilling gegenüber den Inspektoren in den Leitwarten so zu kommunizieren, dass die Entscheidungshoheit weiterhin beim einzelnen Mitarbeitenden der jeweiligen Leitwarte verbleibt. So soll auch einem beim technischen Betriebspersonal ggf. bestehenden Vorurteil gegenüber dem Einsatz Künstlicher Intelligenz entgegengewirkt werden. Den Teilnehmenden der Befragungen wurde zudem verdeutlicht, dass Regeln jederzeit auch manuell zur Wissensbasis hinzugefügt werden können und sollen.

Das auf diese Weise zusammengetragene Erfahrungswissen wurde im Anschluss validiert. Es herrschte unter allen Projektpartnern Einigkeit darüber, dass auf dieser Grundlage ein guter Grundstock für den Aufbau des Digitalen Zwillings zur Verfügung steht, dass jedoch insbesondere im ersten Jahr nach Projektabschluss entsprechende Schritte zur Prüfung und Erweiterung der Wissensbasis durchgeführt werden müssen, u. a. um alle erfassten Sensordaten hinsichtlich der Wissensbasis nutzen zu können.

Hinsichtlich der Nutzung historischer Daten stimmten die beteiligten Partner in der Diskussion darin überein, dass diese bereits im Wege der über die Befragungen erfassten persönlichen Erfahrungen bzw. daraus abgeleiteter Regeln in die Wissensbasis einfließen. Die Kopplung erfasster Sensordaten, prozessierter Wettervorhersagen sowie zugewiesener Handlungsempfehlungen im Rahmen der Lösung ist der Kern der im Projekt ZwillE erarbeiteten Funktionalität der nachvollziehbaren, regelbasierten Entscheidungsassistenz (vgl. hierzu die nachfolgenden Ausführungen zum AP 7).

Teil-AP 6.3: Formalisierung von Erfahrungswissen über die Infrastruktur und deren Zustand

Zunächst wurde damit begonnen, das erste gesammelte Erfahrungswissen so zu formalisieren, dass Ergebnisse von weiteren, zum damaligen Zeitpunkt noch ausstehenden Befragungen des SEH-Betriebsspersonals einfach integriert werden konnten. Im Rahmen der gewählten Formalisierungsmethode findet auch implizites Wissen im Sinne von verbalen Ergänzungen zu den sensordatengebundenen Informationen Platz.

Auf Grundlage der im Rahmen der Teil-APs 6.1, 6.2 sowie 6.3 bereits erarbeiteten Erkenntnisse konnte mit dem Aufbau der vom IAB entwickelten Wissensbasis begonnen werden. Diese wurde dann durch die Erkenntnisse aus den noch ausstehenden Befragungen weiter vervollständigt.

Hier sei angemerkt, dass die Situation der Stadt Hannover in Teilen auf andere Städte (z. B. Hildesheim) oder Großräume (wie etwa das Ruhrgebiet) übertragbar sein wird, dass jedoch auch völlig andere Erwartungshaltungen seitens der zuständigen städtischen Stellen oder auch unterschiedliche Ausgangslagen bestehen können. Das System ist in jedem Fall diesbezüglich anzupassen.

Die wesentliche Vorinformation für die vom IAB entwickelten Wissenskomponenten ist die Überflutungsvorhersage, die von den Projektpartnern h&m und ifs bereitgestellt wird. Die Überflutungsvorhersage nutzt die im Vorfeld berechneten Ergebnisse des 1D-Kanal- und 2D-Oberflächenabflussmodells (HYS-TEM-EXTRAN) sowie die Wettervorhersage (insbesondere die der erwarteten Niederschläge). Die Überflutungsvorhersage ist für einen Zeithorizont von zwei Stunden ausgelegt, so dass gesichert ist, dass oberirdische Gegenmaßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden können bzw. betroffene Ansprechpersonen auch außerhalb der direkten städtischen Fachverantwortung früh genug informiert werden können.

Ein kompakt gehaltenes IAB-Teilsystem wurde mittels der Python-Bibliotheken folium (für die GIS-basierte Kartendarstellung) sowie streamlit (Bereitstellung der Funktionalität einer Browseranwendung) umgesetzt. Die Kernkomponente des IAB-Teilsystems, die Wissensbasis, konnte bis zum Projektabschluss in das ZwillE Gesamtsystem integriert werden.

Abbildung 56 zeigt das Herzstück des IAB-Teilsystems. Aufgrund von Sensorwerten (z. B. Pegelstände in den Flüssen oder Wasserstände in den Sammlern, aber insbesondere auch Informationen aus der Überflutungsvorhersage) kann durch Vergleich mit Grenzwerten eine entsprechende Warnstufe bestimmt werden. Da die Sensoren mit GIS-Koordinaten verknüpft sind, kann abgeleitet werden, wo in Kürze eine Überflutung zu befürchten ist. Es kann sein, dass mehrere Aktionen durchgeführt werden müssen. Somit bietet das IAB-Teilsystem für jeden Zeitpunkt mehrere Lösungen an. Die Lösungen erscheinen in der Tabelle (oberer Teil von Abbildung 56) als Indices der Wissensbasis.

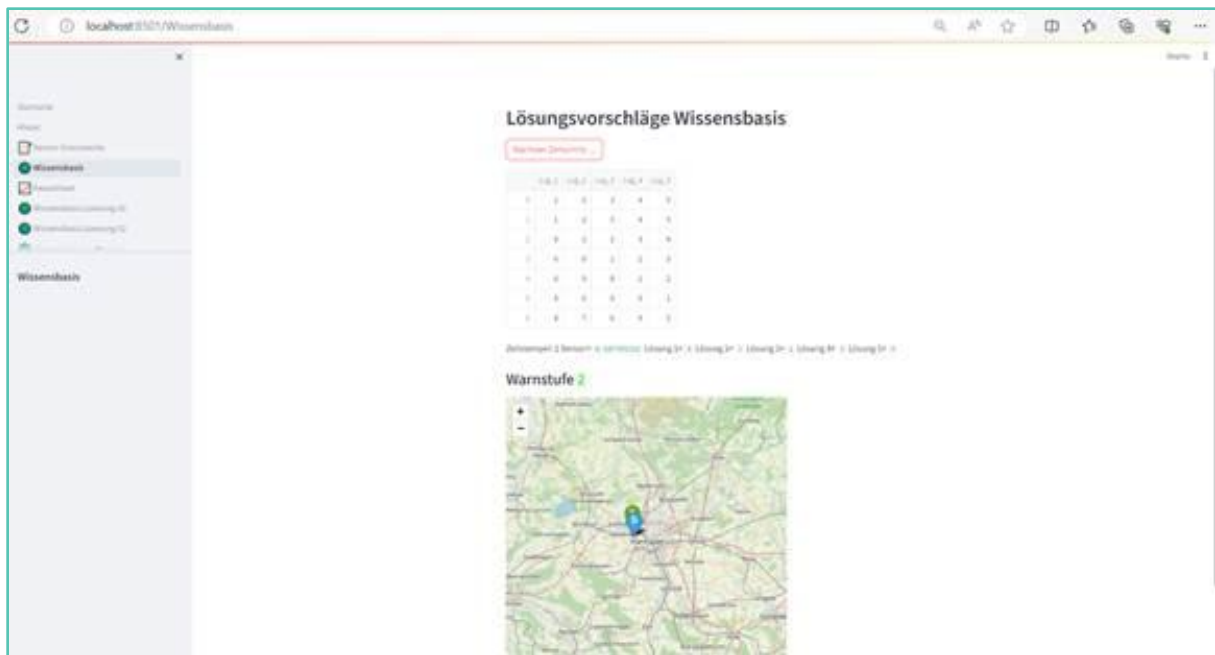


Abbildung 56: Ansicht IAB-Subsystem (Reiter „Wissensbasis“) in der streamlit-Anwendung

Die Erkenntnisse der Befragung ergänzen die Elemente der im Rahmen von ZwillIE aufgebauten erweiterbaren Wissensbasis und wurden im Rahmen der Abarbeitung des Teil-AP 6.4 erstellt.

Mit der Umsetzung des ZwillIE Gesamtsystems in AP 8 (siehe unten) konnte das gewonnene und formalisierte Erfahrungswissen innerhalb des Digitalen Zwilling zur Beeinflussung der Entwässerungsinfrastruktur in Hannover nutzbar gemacht werden. Dazu war es notwendig, die Wissensbasis auf die Entwässerungsinfrastruktur im Stadtgebiet von Hannover in den im Projekt betrachteten Use Cases anzuwenden.

Aufgrund von Sensorwerten kann durch Vergleich mit Grenzwerten eine entsprechende Warnstufe bestimmt werden. Auf diese Art und Weise wurde in AP 7 (siehe unten) eine nachvollziehbare Entscheidungsassistentz aufgebaut, die lediglich dann empfohlene Maßnahmen anzeigt, wenn diese nach Abgleich der Sensordaten mit den Grenzwerten als sinnvoll bzw. dringlich bewertet werden.

In die aufgebaute Wissensbasis gehen z. B. ein:

- Störungsmeldungen, die an SEH gesendet werden,
- mögliche „Meldekettten“ (diese beziehen sich auf die durch den Digitalen Zwilling mögliche Übermittlung von frühzeitigen Warninformationen an größerer (kritische) Einrichtungen wie etwa Krankenhäuser, Seniorenheime, Kindertagesstätten, Schulen, Bibliotheken, Museen, Tiefgaragen etc.),
- mögliche oberirdische Maßnahmen aus der Überflutungsvorsorge (Unterführungen, Parkplätze),
- Vorschläge zum Anlegen von Speicherbecken (Use Case 3).

Ein Beispiel für die graphische Darstellung der aus der Wissensbasis abgeleiteten theoretisch denkbaren Maßnahmen zeigt die nachfolgende Abbildung 57.

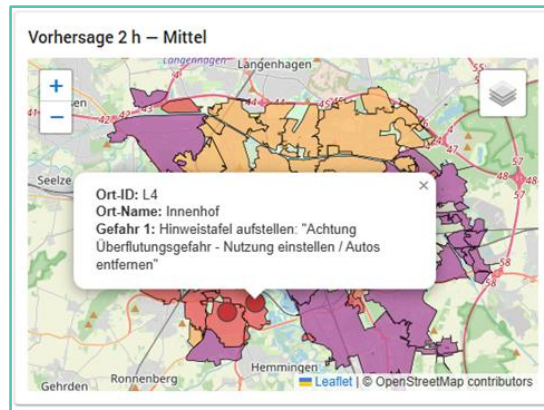


Abbildung 57: Darstellung einer auf Basis des Erfahrungswissens abgeleiteten fiktiven Maßnahme im Digitalen Zwilling

Teil-AP 6.4: Entwicklung einer formalisierten Fallbasis für schwachstellenbezogene Gegenstrategien

In diesem Teil-AP wurden durch das IAB die Ergebnisse der Befragungen (formuliert als Regeln) in eine konkrete Fallbasis umgewandelt. Dabei war in Kooperation mit allen Projektpartnern ein Verfahren zu entwickeln, wie auf Basis der im Rahmen von Teil-AP 6.2 aufgestellten Regeln die benötigten Daten generiert werden können. Wesentlich für das Verständnis des entwickelten Verfahrens ist die Kenntnis der Datenstruktur für regelbasierte Handlungsempfehlungen. Die Grundlagen für diese Datenstruktur wurden im Rahmen einer durch den Projektpartner Atos / Eviden betreuten Masterarbeit gelegt.

Die im Rahmen von ZwiIIe aufgebaute Wissensbasis enthält die nachfolgenden Teilelemente:

- Eine wesentliche Komponente sind die zuvor erwähnten „Meldeketten“: Wird durch das RadEF-Erfahren (vgl. hierzu die vorherigen Ausführungen zu Teil-AP 4.3) eine erhebliche Überflutung an einer bestimmten GIS-Position im Stadtgebiet von Hannover vorhergesagt, könnten theoretisch mehrere Stellen informiert werden, die dann individuell zu erarbeitende Handlungs- oder Maßnahmenumsetzungen vornehmen können. Adressaten können sein:
 - Berufsfeuerwehr (lokal verantwortlicher Ansprechpartner),
 - Freiwillige Feuerwehr,
 - Museen (Schutz wertvoller Ausstellungsstücke),
 - Bibliotheken (vorsorgliche Schließung der Einrichtung),
 - Krankenhäuser und Pflegeeinrichtungen (ggf. Vorbereitung Evakuierung),
 - Schulen und Kindertagesstätten,
 - Größere Unternehmen,
 - Zoologische Gärten (Evakuierung der Tiere),
 - Tiefgaragen (rechtzeitige Entfernung der Fahrzeuge).
- Weiterhin liegen Störungsmeldungen der städtischen verantwortlichen Stellen vor (z. B. im Fall der Stadt Hannover Meldungen an die SEH)
 - Datenbanken zu Störungen im Kontext von Überflutungen, Hochwasser, Kanalnetz – gesammelt sind Art des Vorfalls, ausgetauschte Informationen und eingeleitete Gegenmaßnahmen.
- Strategische Maßnahmen:
 - Auflistung allgemeiner und spezieller längerfristiger planerisch-technischer Maßnahmen für den resilienten Stadtumbau.

Einige Komponenten der Wissensbasis werden nachfolgend beispielhaft tabellarisch dargestellt (vgl. die nachfolgende Tabelle 9). Einige Informationen werden aufgrund der Bestimmungen zur Kritischen Infrastruktur dabei nur intern bei SEH angezeigt. In den nachfolgenden Tabellen werden diese Informationen durch “[]” gekennzeichnet.

| Einzugs- gebiet | Geokoor- dinaten | | Art der Lokalität | Grenzwert der Überflutungs- höhe y | Handlungsempfehlung |
|--------------------|---------------------|----|-------------------------------|--|---|
| Stadtteil xy | [] | [] | Feuer- und Ret- tungswache | n. a. | Stufe 1: Planung und Beginn Umsetzung der Maßnahmen |
| | | | | | Stufe 2: Umsetzung |
| | | | | | Stufe 3: Erfolgskontrolle |
| Stadtteil xy | [] | [] | Ortsfeuerwehr | n. a. | Stufe 1: Planung und Beginn Umsetzung der Maßnahmen |
| | | | | | Stufe 2: Umsetzung |
| | | | | | Stufe 3: Erfolgskontrolle |
| Stadtteil xy | [] | [] | Museum | y > 0,02 | 0,02 ... 0,1: Museum wird von SEH ver- ständigt |
| | | | | | 0,1 ... 0,3: Zeitbewertung und Planung |
| | | | | | 0,3 ... 0,6: Sensible Gegenstände werden im OG gesichert |
| Stadtteil xy | [] | [] | Bibliothek | y > 0,02 | 0,02 ... 0,1: Bibliothek wird von SEH ver- ständigt |
| | | | | | 0,1 ... 0,3: Zeitbewertung und Planung |
| | | | | | 0,3 ... 0,6: Wertvolle Bücher (Kellerarchiv!) werden im OG gesichert |

Tabelle 9: Beispielhafte Maßnahmen in Bezug auf „Meldekettten“

Wie im Fall der „Meldekettten“ können auch hinsichtlich des Abwassersystems die Wissensbasiselemente in Form von Tabellen aufgelistet werden. Diese beziehen sich auf die SEH-Störungsmeldungen (vgl. die nachfolgende Tabelle 10) und auf die Ergebnisse der durchgeführten Befragungen des SEH-Betriebspersonals (vgl. die nachfolgende Tabelle 11 und Tabelle 12).

| Einzugsgebiet | Geokoordinaten | | Art der Lokalität | Grenzwert der Überflutungshöhe y | Handlungsempfehlung |
|---------------|----------------|---|-------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Stadtteil xy | □ | □ | EF-Haus | y > 0,02 | 0,02 ... 0,1: Herr NN verständigen |
| | | | | | 0,1 ... 0,3: Mauerwerk inspizieren |
| | | | | | 0,3 ... 0,6: Mauerwerk schützen |
| Stadtteil xy | □ | □ | MF-Haus | y > 0,02 | 0,02 ... 0,1: Mieter verständigen |
| | | | | | 0,1 ... 0,3: Feuerwehr vor Ort rufen |
| | | | | | 0,3 ... 0,6: Keller auspumpen |

Tabelle 10: SEH-Störmeldungen

| Anlass | Regel (verbal) | Regel (steuerungstechnisch) |
|---------------|--------------------------|---|
| Starkregen | <u>Alle Sammler</u> | □ |
| | □ | Für Pumpenwerke höchste Alarmstufe auslösen |
| Trockenwetter | <u>Eingangspumpwerke</u> | Abflusssteuerung |
| | □ | |
| | □ | |
| | □ | |
| Starkregen | <u>Verbundleitung</u> | Abflusssteuerung |
| | □ | |

Tabelle 11: Befragungen Leitwarte Klärwerk Gümmerwald

| Anlass | Regel (verbal) | Regel (steuerungstechnisch) |
|------------|--|-----------------------------|
| Starkregen | Zentralsammler steigt schnell, Luftdruck | □ |
| | Deckel kontrollieren | |

Tabelle 12: Befragung Leitwarte Kanal

Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses besteht der erarbeitete Stand der Wissensbasis aus etwa 700 Elementen. An dieser Stelle sei auf die Notwendigkeit einer ständigen Erweiterung, Prüfung und, falls nötig, einer Änderung der Wissensbasis hingewiesen.

AP 7: Entscheidungsassistenz für Extremwasserszenarien mit nachvollziehbaren KI-Methoden (AP-Leitung: Atos / Eviden)

Zielsetzung des von Atos / Eviden geleiteten AP 7 „Entscheidungsassistenz für Extremwasserszenarien mit nachvollziehbaren KI-Methoden“ war die Entwicklung einer Entscheidungsunterstützung als weitere fachliche Teilkomponente für den Digitalen Zwilling, die dem technischen Betriebspersonal der Stadtentwässerung sowie den weiteren, in einem Starkregenereignis involvierten städtischen Akteuren kurzfristige Maßnahmenvorschläge für ein Agieren in akuten hydrologischen Krisensituationen liefert und dabei zuvor erhobenes Erfahrungswissen der Betriebsmitarbeitenden bzw. von externen Experten zu geeigneten Lösungsansätzen in früheren und hinsichtlich ihrer Merkmale vergleichbaren Situationen einbezieht. Durch eine transparente Erläuterung der vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen mittels regel- oder fallbasierter Wissensmodelle sollten die Nachvollziehbarkeit und Akzeptanz und damit die späteren Umsetzungschancen der Maßnahmenvorschläge bei den Entscheidungsträgern gewährleistet werden.

Vor dem Hintergrund dieser Zielsetzung wurde von den am AP 7 mitwirkenden Projektpartnern (Atos / Eviden, IAB und ifak) eine Entscheidungsassistenz für die Ableitung derartiger Handlungsempfehlungen für den Umgang mit Extremwetterereignissen konzipiert und technisch umgesetzt, die die städtischen Entscheidungsträger auf Basis der im Rahmen von AP 6 aufgebauten erweiterbaren Wissens- bzw. Fallbasis (vgl. hierzu die vorherigen Ausführungen zu AP 6) bei der Auswahl geeigneter schwachstellenbezogener Gegenmaßnahmen unterstützt. Dies geschieht durch eine Kombination von Simulationsergebnisse zu prognostizierten Schwachstellen in den verschiedenen Teilbereichen des Entwässerungssystems (z. B. vorhergesagte Überflutungshöhen auf den städtischen Oberflächen in den einzelnen Teileinzugsgebieten, prognostizierte Belastungssituationen in den einzelnen Abschnitten des Kanalnetzes, vorhergesagte Pegelstände in den Pumpensämpfen der Eingangspumpwerke) mit dem formalisierten Erfahrungswissen zu erfolgversprechenden Gegenstrategien in früheren bzw. analogen Situationen.

Im Teil-AP 7.1 „Konzeption und Feinarchitektur einer nachvollziehbaren Entscheidungsassistenz“ wurden dazu zunächst auf Grundlage der in Teil-AP 1.1 ermittelten Anforderungen die für eine nachvollziehbare Entscheidungsassistenz notwendigen Funktionalitäten spezifiziert und auf dieser Basis eine Mikroservices-Architektur der zugrunde liegenden Teildienste (v. a. Anbindung der formalisierten Wissensbasis, semantische Schwachstellenanalyse, regelbasierter Matching-Algorithmus etc.) entworfen (vgl. die nachfolgende Abbildung 58), die im weiteren Projektverlauf durch eine zusätzliche Deployment-Architektur ergänzt wurde.

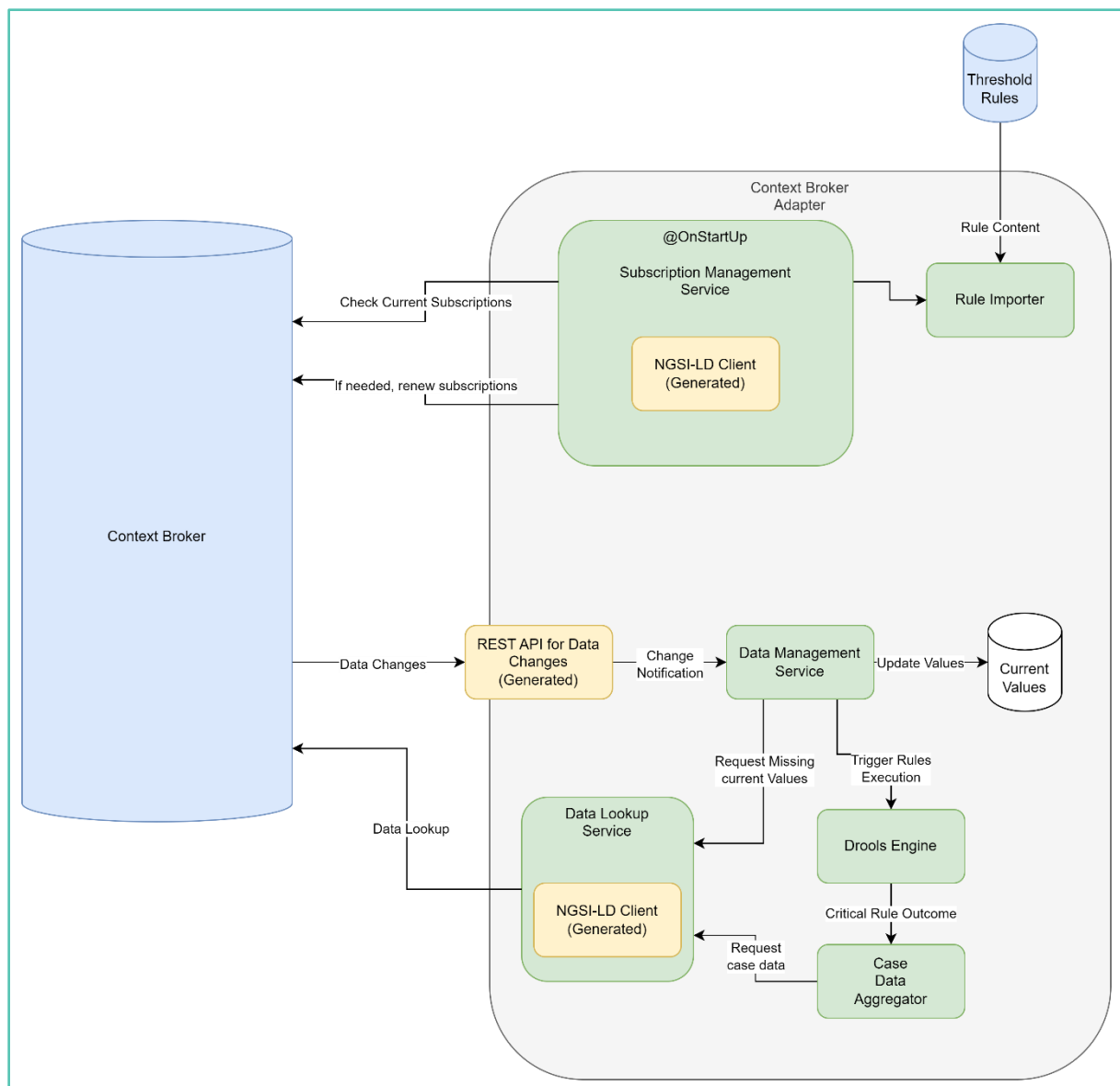


Abbildung 58: Mikroservices-Architektur der nachvollziehbaren Entscheidungsassistentz

Des Weiteren wurde ein Konzept für die Interaktion des Fachpersonals mit der Entscheidungsassistentzfunktionalität im Digitalen Zwilling erstellt, das auch Ergebnisse aus einer gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insbesondere Betriebliche Informationssysteme, der Universität Paderborn betreuten Masterarbeit mit dem Titel „Digitale Analysen von Extremwetter Szenarien – Instanziierung eines Case-based Reasoning-Ansatzes zum Umgang mit hydrologischen Extremereignissen“ berücksichtigt.

An den Arbeiten im Teil-AP 7.2 zur semantischen Schwachstellenanalyse wirkten sämtliche Projektpartner des ZwiIE Konsortiums mit. Ausgangspunkt der Arbeiten bildeten dabei die im Zuge des Aufbaus der erweiterbaren Wissensbasis mit maschinenlesbaren Informationen zu den Auswirkungen von historischen Starkregenereignisse und zu möglichen Gegenmaßnahmen in den einzelnen Teilbereichen des Entwässerungssystems gewonnenen Erkenntnisse. Diese Erkenntnisse stammten aus der Auswertung und Formalisierung von bei SEH dokumentiertem expliziten Erfahrungswissen (z. B. Betriebsanweisungen zur Steuerung der Eingangspumpwerke (EPW) der Klärwerke, betrieblicher Hochwasserplan), der Auswertung von Störungsmeldungen sowie von Informationen zu theoretisch denkbaren Gegenmaßnahmen, die von den beteiligten städtischen Akteuren und Ordnungsdiensten (z. B. Polizei, Feuerwehr, Tiefbauamt etc.) bei Überflutungsfällen an relevanten Lokationen im Stadtgebiet ergriffen

werden könnten, sowie aus Befragungen des SEH-Betriebspersonals auf den Leitwarten für Kanalnetz- und Klärwerksbetrieb zur Sammlung von ergänzendem implizitem Erfahrungswissen in Bezug auf die Veranlassung von Maßnahmen in bisherigen Starkregensituationen. Vor diesem Hintergrund nahmen die ZWILLE Projektpartner in Teil-AP 7.2 eine Analyse von Simulationsergebnissen zur Identifikation von prognostizierten bzw. erwartbaren Schwachstellen in den verschiedenen Teilbereichen des Entwässerungssystems von Hannover und der sie jeweils kennzeichnenden Parameter bzw. kritischen Mess- / Grenzwerte vor (z. B. kritische pluviale Überflutungshöhen auf der Oberfläche an besonders relevanten Lokalitäten im Stadtgebiet, kritische Belastungssituationen (im Sinne von Höhenständen und Durchflüssen) in den einzelnen Abschnitten des Kanalnetzes, kritische Pegelstände in den verschiedenen Pumpensümpfen der beiden Eingangspumpwerke etc.) als Basis für die Festlegung von lokalitätsbezogenen unterschiedlichen Warnstufen und die Zuordnung von SEH-seitig und / oder von weiteren städtischen Akteuren initiierten schwachstellenbezogenen Gegenmaßnahmen.

Im Teil-AP 7.3 wurde sodann ein regelbasierter Matching-Algorithmus konzipiert und technisch umgesetzt. Der Matching-Algorithmus kann beispielsweise durch die Angabe eines der für die städtischen Oberflächen vorgerechneten Überflutungsszenarien den prognostizierten maximalen Wasserstand in diesem Szenario an verschiedenen relevanten Lokalitäten des betreffenden Teileinzugsgebiets ableiten. Des Weiteren bestimmt der Algorithmus unter Heranziehung von aktuellen sowie prognostizierten (Echtzeit-)Messwerten – betrachtet werden dabei u. a. Pegelstände in den Flüssen, Wasserstände in den einzelnen Sammlern und Pumpensümpfen sowie Überflutungshöhen an verschiedenen relevanten Orten auf der Oberfläche – durch Vergleich mit den zuvor für die einzelnen Schwachstellen innerhalb der Entwässerungsinfrastruktur festgelegten multiplen Grenzwerten die daraus für die einzelnen Schwachstellen jeweils resultierenden Warnstufen.

Diese ermittelten lokalitätsbezogenen Warnstufen dienen sodann als Grundlage, um im Teil-AP 7.4 eine Entscheidungsassistentenfunktionalität zur zielgruppengerechten Ableitung von schwachstellenbezogenen Maßnahmenvorschlägen technisch zu realisieren. Diese kann den SEH-Betriebsmitarbeitenden sowie den weiteren im Starkregenfall involvierten städtischen Akteuren für betroffene Stellen innerhalb der Entwässerungsinfrastruktur in Abhängigkeit des Schweregrads der jeweiligen Beeinträchtigung unter Nutzung der in Teil-AP 6.4 erarbeiteten Wissensbasis eine oder mehrere warnstufenspezifische Maßnahmen zum Management des aktuellen Niederschlagsereignisses sowie zur proaktiven Vorbereitung auf bevorstehende Ereignisse als nachvollziehbare Handlungsempfehlungen vorschlagen. Dabei galt es, bei der Ausgestaltung der Entscheidungsassistenz die unterschiedlichen und klar getrennten Verantwortungsbereiche innerhalb der SEH sowie die Verantwortlichkeiten der im Falle eines größeren Starkregenereignisses zusätzlich hinzugezogenen städtischen Entscheidungsträger angemessen zu berücksichtigen: So ist das SEH-Betriebspersonal auf der Leitwarte Klärwerksbetrieb neben den Steuerung der beiden Klärwerke Gümmerwald und Herrenhausen zusätzlich für die Beeinflussung des Abflussgeschehens in den Hauptsammlern von Hannover durch Steuerung der beiden Eingangspumpwerke (EPW) unter Beachtung einer Vielzahl an situativen Einflussfaktoren verantwortlich (z. B. Wasserstand in den EPW-Pumpensümpfen, Tagesganglinien, Vorliegen eines Flusshochwassers in den verschiedenen Einleitungsgewässern, Infiltration durch Grundwasser, Belastungssituation in den sechs zusätzlichen Verbundleitungspumpwerken der Umlandgemeinden etc.). Demgegenüber sind die SEH-Betriebsmitarbeitenden auf der Leitwarte Kanalbetrieb für die Überwachung des Kanalnetzes in der Stadt und der über 100 angeschlossenen Abwasser-, Regenwasser- und Hochwasser-Pumpwerke sowie der Betrachtung der Oberflächensituation im Stadtgebiet (d. h. Kontrolle und Auflösung von ggf. überlaufinduzierten Überflutungsbereichen) zuständig (Letzteres gemeinsam mit weiteren städtischen Akteuren). Vor diesem Hintergrund wurden im Teil-AP 7.4 für die vorgenannten unterschiedlichen Adressatenkreise zwei unterschiedliche Ausprägungen der nachvollziehbaren Entscheidungsassistenz (jeweils unter Nutzung von kurzfristigen Vorhersagen zum bevorstehenden Niederschlagsereignis als Ausgangspunkt) umgesetzt:

- Leitwarte Klärwerksbetrieb: Als Entscheidungshilfe zum Management des aktuellen Niederschlagsereignisses sowie zur proaktiven Vorbereitung auf bevorstehende Ereignisse liefert das System für das technische Betriebspersonal der Leitwarte Klärwerksbetrieb auf Basis der mit Hilfe der Echtzeit-Simulation des Kanalnetzes ermittelten prognostizierten Wasserstände in den einzelnen Sammlern

und in den EPW-Pumpensümpfen Empfehlungen zur manuellen Abflusssteuerung, um Mischwasserabschläge zu reduzieren (z. B. Steuerung des Abflussgeschehens in den vier Hauptsammlern durch eine Änderung der Förderraten der einzelnen Pumpen in den beiden Eingangspumpwerken oder durch die Betätigung von Schiebern).

- Leitwarte Kanalbetrieb: Für die Mitarbeitenden der Leitwarte Kanalbetrieb liefert die Entscheidungsassistent unter Heranziehung der mittels der Echtzeit-Kanalnetzsimulation berechneten Durchflussmengen in den einzelnen Abschnitten des Kanalnetzes Hinweise, in welchen Abschnitten der maßgeblichen Hauptsammler ein für den Tag geplanter Kanaleinstieg zur Durchführung von z. B. Wartungsarbeiten angesichts eines bevorstehenden Belastungsereignisses umgeplant werden sollte, und fungiert zudem als Warnsystem für aktuell laufende Kanalarbeiten zur Ermöglichung einer frühzeitigen Alarmierung des SEH-Personals zum Kanalausstieg. Zudem unterbreitet das System auf Grundlage der mit Hilfe des in ZwiLE neu entwickelten Verfahrens zur schnellen Überflutungsabschätzung (RadEF) vorhergesagten Überflutungshöhen auf den Oberflächen in den städtischen Teileinzugsgebieten entsprechende Maßnahmenvorschläge für zu erwartende Überflutungsgebiete im Stadtgebiet (z. B. Hinweise zur Absperrung von Unterführungen und Straßen, zur Aktivierung von Warnhinweisen und -anzeigen in überflutungsgefährdeten Bereichen sowie zur Evakuierung und Sicherung gefährdeter Liegenschaften mittels lokaler Schutzmaßnahmen wie z. B. temporärer Abschottungen). Dazu vergleicht das System die erwarteten Überflutungshöhen mit zuvor festgelegten Grenzwerten an ausgewählten und mit GIS-Koordinaten hinterlegten kritischen Orten (z. B. wichtige Unterführungen und Straßen, Krankenhäuser, Seniorenheime, Kindertagesstätten, Schulen, Tiefgaragen etc.) und zeigt bei Grenzwertüberschreitungen passende, warnstufenspezifischen Maßnahme an.

Exemplarische Maßnahmen auf Basis der Überflutungsvorhersage an potenziellen Problemstellen sind in der nachfolgenden Tabelle 13 dargestellt.

| Ort | Geokoordinaten | | Art der Lokalität | Überflutungshöhe y in m | Handlungsempfehlungen |
|----------------------------|----------------|-------------|-------------------|---------------------------|---|
| Stadtteil 1 / Musterstr. 1 | X,XXXXXX °E | Y,YYYYYY °N | Schulgelände | $y > 0,3$ | <u>Maßnahme 1:</u> „Überflutungsgefahr“ auf digitaler Hinweistafel an Schule und Parkplatz anzeigen |
| Stadtteil 1 / Musterstr. 2 | X,XXXXXX °E | Y,YYYYYY °N | Innenhof / Straße | $y > 0,5$ | <u>Maßnahme 1:</u> „Überflutungsgefahr – Nutzung einstellen / Autos entfernen“ auf digitaler Hinweistafel anzeigen <u>Maßnahme 2:</u> Absperrung des Innenhofs <u>Maßnahme 3:</u> Evakuierung in Betracht ziehen |

Tabelle 13: Exemplarische oberirdische Maßnahmen auf Basis der Überflutungsvorhersage

Die von der Entscheidungsassistent abgeleiteten Maßnahmen werden sodann im Digitalen Zwilling als Entscheidungshilfe für das technische Betriebspersonal auf den Leitwarten angezeigt, wobei das Betriebspersonal über die tatsächliche Umsetzung von Maßnahmen entscheidet, die in ihrem jeweiligen Zuständigkeitsbereich liegen. Dabei gehen insbesondere extreme Starkregenereignisse als kommunale Gemeinschaftsaufgabe über den Zuständigkeitsbereich des Netzbetreibers hinaus. So wird bei extremen Ereignissen oftmals ein Krisenstab eingerichtet, und die Umsetzung von Maßnahmen erfolgt in Abstimmung zwischen Netzbetreiber, Tiefbauamt, Polizei, Feuerwehr etc.

Das Teil-AP 7.5 befasste sich schließlich mit der Umsetzung einer Interaktions- und Feedbackfunktionalität zwischen der Entscheidungsassistent und dem Fachpersonal des Netzbetreibers, wobei dem Aspekt der Erzielung einer hohen Nachvollziehbarkeit der mit Hilfe des regelbasierten Matching-Algorithmus abgeleiteten Maßnahmenvorschläge eine besondere Beachtung geschenkt wurde. So wurde, um die Akzeptanz und die späteren Umsetzungschancen der durch die Entscheidungsassistent bereitgestellten unterschiedlichen lokalitätsbezogenen Empfehlungen auf Seiten des Betriebspersonals zu gewährleisten bzw. zu erhöhen, ein Ansatz für eine transparente Darstellung und Erläuterung der der regelbasierten Maßnahmenableitung zugrunde liegenden Entscheidungsparameter gegenüber den SEH-seitigen Entscheidungsträgern entwickelt und nach einer Validierung mit potenziellen Nutzer:innen in verschiedenen Iterationen überarbeitet und verbessert. Die letztendlich gewählte und umgesetzte Darstellungsvariante (vgl. hierzu die nachfolgende Abbildung 59) gibt Auskunft über die nachfolgenden Aspekte:

Innenhof/Straße

- Standort ID: L5
- Prognostizierter max. Wasserstand: 0,728 m zum Zeitpunkt: 13.09.2023 02:37:00

Handlungsempfehlungen

Warnstufe 1 **Regel 8**

| Maßnahme | Beschreibung | empfohlen seit |
|----------|---|---------------------|
| Nr. 1 | Hinweistafel aufstellen: "Achtung Überflutungsgefahr" | 13.09.2023 00:29:09 |

Warnstufe 2 **Regel 9**

| Maßnahme | Beschreibung | empfohlen seit |
|----------|--|---------------------|
| Nr. 1 | Hinweistafel aufstellen: "Achtung Überflutungsgefahr - Nutzung einstellen / Autos entfernen" | 13.09.2023 00:37:09 |
| Nr. 2 | Absperrung | 13.09.2023 00:37:09 |
| Nr. 3 | Evakuierung in Betracht ziehen | 13.09.2023 00:37:09 |

Hinweis

- Warnstufe 1 (gelb) gilt ab einem prognostizierten max. Wasserstand von mindestens 0,3 m
- Warnstufe 2 (rot) gilt ab einem prognostizierten max. Wasserstand von mindestens 0,5 m

Abbildung 59: Konzept zur nachvollziehbaren Maßnahmendarstellung (exemplarisch)

- Um welche Art von kritischer Lokalität handelt es sich und welche ID hat der Eintrag zu dieser Lokalität in der aufgebauten Wissensbasis?
- Wie hoch ist der für diese kritische Lokalität auf Grundlage des RadEF Verfahrens prognostizierte maximale Wasserstand und für welchen Zeitpunkt wird dieser prognostizierte maximale Wasserstand an der betreffenden Lokalität vorhergesagt?
- Welche Warnstufe(n) (im u. a. Beispiel Warnstufe 1 und / oder 2) wurde(n) für die betreffende Lokalität durch den vorhergesagten maximalen Wasserstand ausgelöst und wo liegen jeweils die kritischen Grenzwerte für die einzelnen Warnstufen?

- Welches sind die jeweiligen Regeln, die zur Auslösung der betreffenden Warnstufe(n) und der Ableitung der zugehörigen Maßnahmenvorschläge geführt haben?
- Welche einzelnen, warnstufenspezifischen Maßnahmen werden den Entscheidungsträgern für die betreffende Lokalität zur manuellen Umsetzung durch das System vorgeschlagen und seit welchem Zeitpunkt erfolgten diese Empfehlungen durch die Entscheidungsassistentz?

Darüber hinaus wurden in Teil-AP 7.5 mit der Konzipierung und Umsetzung einer entsprechenden REST-Schnittstelle die technischen Grundlagen dafür geschaffen, um die nachvollziehbare Entscheidungsassistentzfunktionalität im Rahmen der im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Arbeiten des Teil-AP 8.1 als fachliche Teilkomponente in das prototypisch umgesetzte ZwillE Gesamtsystem zu integrieren.

AP 8: Prototypische Entwicklung des Digitalen Zwillings (AP-Leitung: ifak)

Das AP 8 stellte die finale Integrationsstufe des Verbundprojekts ZwillE dar. Während in den vorangegangenen APs die Grundlagen der Datenerfassung (AP 3), der Niederschlagsvorhersage (AP 4), der prozessualen Modellierung (AP 5) sowie der Wissensgenerierung und nachvollziehbaren Entscheidungsunterstützung (AP 6 und 7) erarbeitet wurden, lag der Fokus von Teil-AP 8.1 auf der Zusammenführung dieser fachlichen Einzelkomponenten zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem – dem Digitalen Zwillings – gemäß der in AP 2 gemeinschaftlich erarbeiteten Gesamtsystemarchitektur.

Der methodische Ansatz folgte dem Ziel, ein System zu schaffen, das über eine reine Visualisierung hinausgeht. Der Digitale Zwillings wurde als „lebendes“ Modell konzipiert, das permanent mit dem Real-system der SEH synchronisiert wird. Dabei wurden drei wesentliche Anwendungsfälle (Use Cases) adressiert, die unterschiedliche Zeithorizonte und Nutzergruppen bedienen:

- Use Case 1: Kontinuierliche Abbildung des aktuellen Ist-Zustands zur Schaffung von Transparenz im Gesamtsystem
- Use Case 2: Kurzfristige Planung und Frühwarnung bei Akutereignissen (Starkregen) unter Nutzung von Prognosedaten
- Use Case 3: Langfristige strategische Planung zur Anpassung an den Klimawandel

Die technische Grundlage des Digitalen Zwillings bildete dabei neben der im Teil-AP 2.2 entwickelten FIWARE-basierten Daten- und Kommunikationsinfrastruktur die Integrationsplattform ifakFAST². Hierbei handelt es sich um eine vom ifak entwickelte modulare Open-Source-Plattform, die für die Prozessüberwachung und übergeordnete Steuerung von komplexen technischen Anlagen dient. Das System ermöglicht es, individuelle Anwendungen flexibel aus verschiedenen Modulen für die Datenerfassung, die webbasierte Visualisierung in Dashboards sowie das Alarmmanagement und für die Durchführung komplexer Berechnungen zusammenzuführen. Da die auf .NET 8 basierende Lösung unter der MIT-Lizenz steht und plattformunabhängig unter Windows sowie Linux läuft, bietet sie eine leistungsstarke und frei erweiterbare Basis für industrielle Automatisierungsprojekte. Eine Besonderheit der ifakFAST Plattform stellt die enge Integration mit der Simulationssoftware SIMBA# dar. Dadurch wird eine einfache und zuverlässige Einbindung von komplexen Simulationsläufen ermöglicht. ifakFAST wurde im Rahmen des Projekts spezifisch erweitert, um die Anforderungen einer performanten, sektorenübergreifenden Wasserinfrastruktur-Plattform zu erfüllen.

² <https://fast.ifak.eu>

Zentrales Element der Integration war die Anbindung der im Rahmen von ZwillIE entwickelten Daten- und Kommunikationsinfrastruktur. Hierfür wurde ein hybrider Ansatz aus verschiedenen Kommunikationsprotokollen gewählt:

- **Echtzeit-Datenstrom (MQTT):** Für die Integration der im Projekt neu installierten Messtechnik (z. B. Sensoren zur Wasserstands-, Durchfluss- und Wassergütemessung), der im Prozessleitsystem der SEH vorhandenen Messsignale (z. B. Regenschreiberdaten, Pumpensignale, Höhenstände usw.) sowie der von h&m bereitgestellten meteorologischen Nowcasts wurde das MQTT-Protokoll eingesetzt. Das MQTT-Protokoll ermöglichte eine Latenzzeit im Bereich von Millisekunden und ist in der IT- / OT-Welt weit verbreitet, so dass die softwaretechnische Integration in verschiedenste Systeme erleichtert wird.
- **Dienste-Integration (REST-API):** Die Anbindung der in AP 6 aufgebauten Wissensbasis und der darauf basierenden, in AP 7 umgesetzten nachvollziehbaren Entscheidungsassistenten erfolgte über RESTful Webservices. Hierüber konnten Klassifizierungen von Ereignissen und regelbasiert abgeleitete warnstufenspezifische Handlungsempfehlungen dynamisch abgefragt werden.
- **Massendaten und Filesharing (SFTP):** Da die im AP 4 erzeugten Ensemble-Vorhersagen und Überflutungskarten (GeoTIFFs) signifikante Dateigrößen erreichen, wurde eine dedizierte Speicherinfrastruktur aufgebaut, die eine performante Bereitstellung für die Visualisierung gewährleistet.

Neben der Datenintegration auf Basis der Daten- und Kommunikationsinfrastruktur übernimmt die ifakFAST Plattform auch die Orchestrierung der Rechenmodelle. Sobald neue Eingangsdaten (z. B. ein neuer Niederschlags-Nowcast) vorliegen, triggert die Integrationslogik automatisch die entsprechenden Simulationsläufe in SIMBA# und speichert die resultierenden Ausgabedaten in der internen Zeitreihendatenbank, wodurch automatisch die Darstellungen im Dashboard aktualisiert werden.

Realisierung von Use Case 1: Abbildung des Ist-Zustands durch kontinuierliche Online-Simulation (Teil-AP 8.2)

Für diesen Anwendungsfall wurde der prototypisch aufgebaute Digitale Zwilling so konfiguriert, dass er als „Schatten-System“ zur realen Infrastruktur agiert. Eine zentrale Herausforderung war die Synchronisation des Simulationsmodells mit der Realität. Hierzu wurden Verfahren zur Online-Kalibrierung genutzt. Das System liest kontinuierlich Durchfluss- und Pegeldata aus dem Prozessleitsystem der SEH sowie den zusätzlichen ZwillIE Sensoren ein. Weichen die simulierten Werte signifikant von den gemessenen ab, erfolgt eine automatisierte Plausibilisierung, um Fehlalarme durch Sensordefekte auszuschließen.

Ein wesentlicher Mehrwert des Digitalen Zwillings in diesem Teil-AP war die Bereitstellung „virtueller Sensoren“. Da eine flächendeckende instrumentelle Überwachung des über 2.500 km langen Kanalnetzes von Hannover ökonomisch nicht darstellbar ist, nutzt der Digitale Zwilling das validierte Simulationsmodell, um Zustände an ungemessenen Knotenpunkten zu berechnen. Diese Daten werden in der Plattform wie reale Messwerte behandelt und ermöglichen dem technischen Betriebspersonal der SEH einen Einblick in kritische Netzteile (z. B. große Transportsammler), die bisher „blind“ waren.

Realisierung von Use Case 2: Kurzfristige Planung und Frühwarnung (Teil-AP 8.3)

Dieser Teilaspekt stellt das technologische Herzstück für das Management von Starkregenereignissen dar. Er kombiniert die meteorologische Vorhersage mit der hydrologischen Reaktion des Entwässerungssystems. Dazu wurde in Kooperation mit h&m eine Schnittstelle implementiert, die hochaufgelöste Niederschlagsdaten (SCOUT) direkt in das Simulationsmodell einspeist. Diese Schnittstelle basiert auf der Bereitstellung von Regenreihen in Form von UVF-Dateien (eine Datei pro Teileinzugsgebiet). Der Digitale Zwilling führt hierzu automatisch Vorhersagesimulationen durch, die zwei Stunden in die Zu-

kunft reichen. Besonders innovativ ist dabei die Berücksichtigung von Ensemble-Vorhersagen. So visualisiert das System nicht nur ein einzelnes Szenario, sondern ein Spektrum an möglichen Systemzuständen, was dem Entscheidungsträger bei SEH eine Einschätzung der Prognoseunsicherheit erlaubt. Die Ergebnisse der Vorhersagesimulation werden im Digitalen Zwilling sodann mit der nachvollziehbaren, regelbasierten Entscheidungsassistenz (AP 7) verknüpft. Erkennt das System beispielsweise einen drohenden Überlauf an einem kritischen Entlastungsbauwerk, werden den Nutzenden direkt im Dashboard proaktive Handlungsoptionen vorgeschlagen.

Realisierung von Use Case 3: Strategische Planung und Klimaanpassung (Teil-AP 8.4)

Über das operative Management hinaus wurde der Digitale Zwilling für langfristige Fragestellungen ermöglicht. Wesentlich dafür war die Modellvereinfachung für Langzeitsimulationen. Da hydrodynamische Modelle für die Simulation von Zeiträumen über mehrere Jahrzehnte (Klimaszenarien) zu rechenintensiv sind, wurde in AP 8 die vom ifak entwickelte Methodik der automatisierten Modellvereinfachung (vgl. hierzu die vorherigen Ausführungen zu Teil-AP 5.1) eingesetzt. Dabei werden die detaillierten Kanalnetzmodelle in effiziente, hydrologische Modelle überführt, die bei vergleichbarer Genauigkeit um den Faktor 100 bis über 1.000 schneller rechnen. Dies ermöglichte die Durchführung von vielen Szenarioläufen zur Bewertung der Resilienz der hannoverschen Entwässerungsinfrastruktur gegenüber Starkregenereignissen der Zukunft unter Berücksichtigung verschiedener baulicher Anpassungsmaßnahmen, wie z. B. der Integration von neuen Regenüberlaufbecken. So wurden in Zusammenarbeit mit SEH verschiedene Varianten des Baus und Betriebs eines neuen Regenüberlaufbeckens an einem kritischen Ort des Kanalnetzes betrachtet. In Verbindung mit den in SIMBA# integrierten Ansätzen zur Lebenszyklusanalyse (LCA) können die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von baulichen Anpassungsmaßnahmen direkt mit deren hydrologischem Nutzen in Beziehung gesetzt werden. Dies bildet eine fundierte Entscheidungsgrundlage für investive Maßnahmen zur Klimafolgenanpassung.

Visualisierung und Benutzeroberfläche (Dashboards)

Durch die Anwendung des Digitalen Zwillings greifen die verschiedenen Teilkomponenten so ineinander, dass Handlungsempfehlungen für das technische Betriebspersonal der SEH abgeleitet werden können. Dazu wurde gemeinsam mit allen Projektpartnern ein geeignetes Visualisierungskonzept entwickelt. Die Visualisierung ist darauf ausgerichtet, dass Mitarbeitende aus den Bereichen Kanal- und Klärwerksbetrieb die für sie jeweils relevanten Informationen effizient abrufen können. Das Front-End ist dabei mehrstufig aufgebaut.

Übersichtsebene

Die oberste Ebene dient dazu, einen schnellen Überblick über die Gesamtsituation zu erhalten, um sofort zu erkennen, ob sich alle Systembereiche im Normalzustand befinden oder ob Grenzwerte überschritten werden. Belastete Bereiche werden farblich hervorgehoben. Diese Übersichtsebene ist in vier Karten gegliedert:

- Karte 1: Niederschlagssituation im Stadtgebiet als maßgebliche Belastungsgröße
- Karte 2: Resultierende Belastung im Kanalnetz, den Eingangspumpwerken und den Kläranlagen
- Karte 3: Resultierende Belastung an der Oberfläche als Risikokarte für Überflutungen
- Karte 4: Zustand der Einleitungsgewässer und die aus Regen- bzw. Mischwasser-Einleitungen resultierenden Auswirkungen hinsichtlich Hydraulik und Wasserqualität

Die Ausgestaltung der vier Karten mit ihren jeweiligen Unterseiten (siehe unten) erfolgte dabei in enger Abstimmung mit den beteiligten Projektpartnern (Niederschlag: h&m, SEH, Atos / Eviden; Kanalnetz: SEH; Überflutung: h&m, ifs, Atos / Eviden, IAB, SEH; Gewässer: ifs, SEH) und unter Berücksichtigung der Rückmeldungen des Betriebspersonals der SEH-Leitwarten.

Die nachfolgende Abbildung 60 zeigt die Übersichtsebene mit den vier interaktiven Teilkarten:

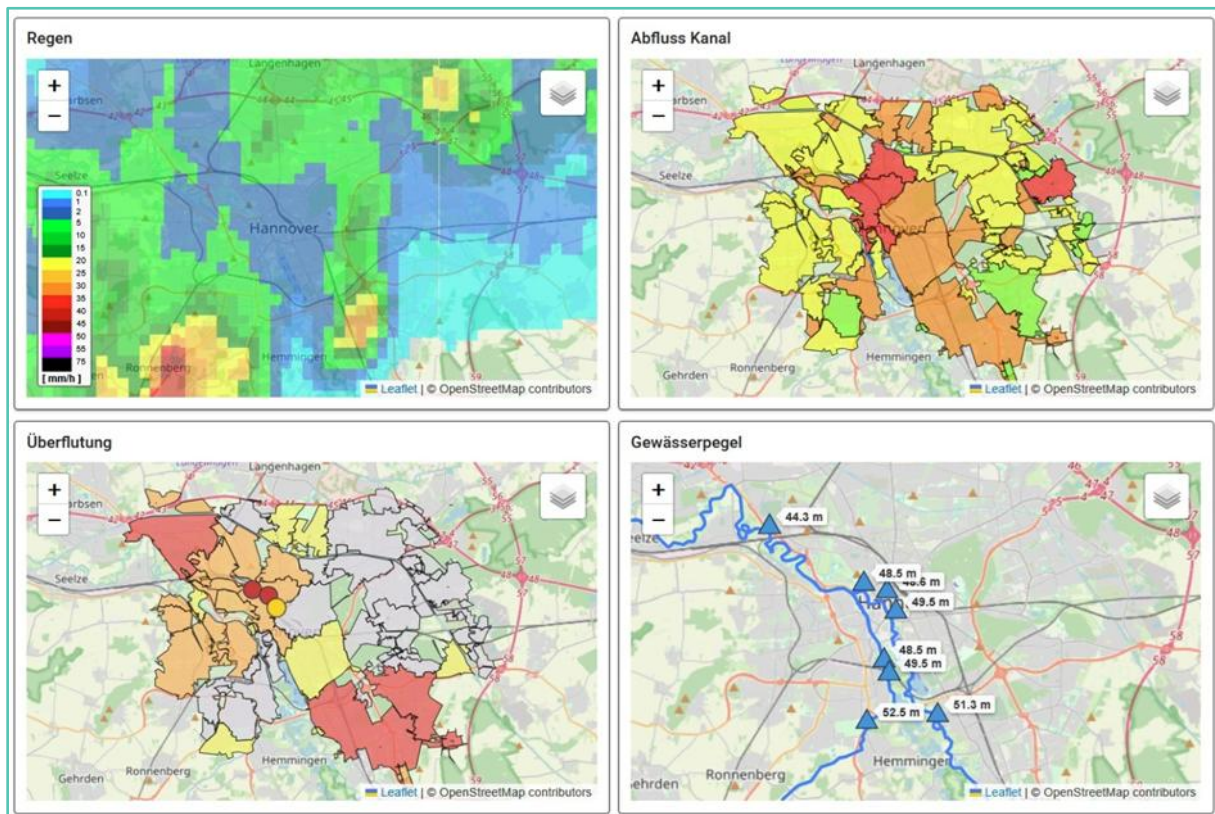


Abbildung 60: Übersichtsebene des Digitalen Zwillings

Detailebene

Die Detailebene unterteilt sich in die vier genannten Bereiche und bietet interaktive Funktionen:

1. Niederschlag: In der Detailansicht Niederschlag gibt es mehrere Unterseiten jeweils für die aktuelle Situation, für das Niederschlagsgeschehen der jüngsten Vergangenheit (Regensummen der letzten Stunden) sowie für die erwartete Entwicklung in den nächsten Stunden als Ensemble-Nowcasts (Vorhersagesummen über die nächsten Stunden als Ensemble mit 10 Realisierungen).

Die nachfolgende Abbildung 61 zeigt die erste Unterseite für die aktuelle Niederschlagssituation: Auf der rechten Seite wird ein Radarfilm in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung angezeigt. Auf der linken Seite wird für jedes der 83 Teileinzugsgebiete die durchschnittlich dort vorherrschende Niederschlagsintensität in farblicher Kodierung visualisiert. Beim Anklicken eines Teileinzugsgebietes auf der Karte wird in der darunter befindlichen Zeitreihendarstellung der zugehörige Regen im zeitlichen Verlauf angezeigt einschließlich einer Vorhersage für die nächsten beiden Stunden.

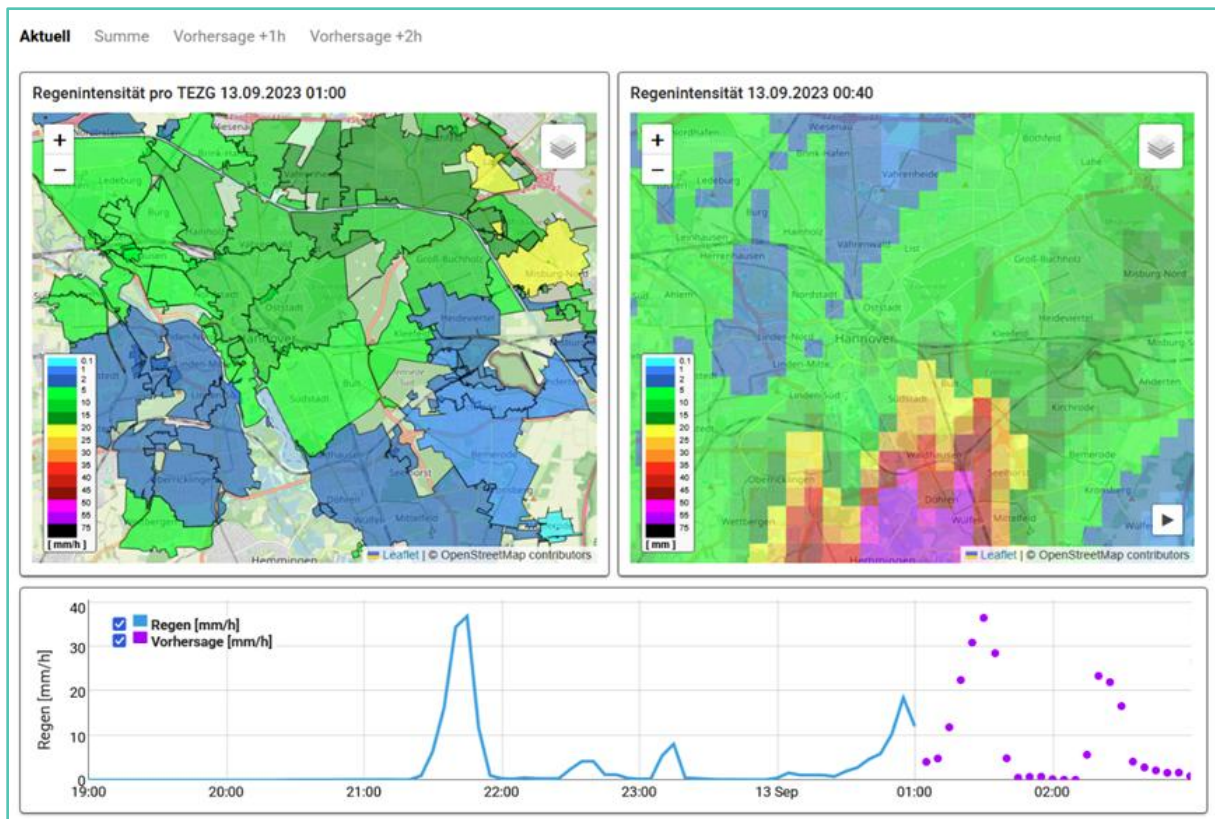


Abbildung 61: Detailebene des Digitalen Zwillings – Unterseite Niederschlag

2. Kanal und Klärwerke: Der Systemzustand des Kanalnetzes wird über eine farbliche Kennzeichnung der 83 Teileinzugsgebiete visualisiert (vgl. die nachfolgende Abbildung 62). Die Farbcodes unterscheiden zwischen Trockenwetterabfluss, erhöhtem Abfluss, Einstau und Überlauf. Auf der linken Karte ist die aktuelle Situation dargestellt, die auf Grundlage der vergangenen Niederschläge durch fortlaufende Simulation des gesamten Kanalnetzes in der Simulationssoftware SIMBA# berechnet wurde. Auf der rechten Seite wird die Situation im Kanalnetz in 1 bzw. 2 Stunden dargestellt. Hierfür wird der aktuelle Zustand des Kanalnetzes auf Basis der Niederschlagsprognosen (individuell für jedes der 83 Teileinzugsgebiete) in SIMBA# errechnet. Darunter findet sich eine Zeitreihendarstellung der Durchflüsse und Überläufe (jeweils in der Historie und der Prognose) des für das aktuell ausgewählte Teileinzugsgebiet maßgeblichen Hauptsammlers. Gleichzeitig kann auch der vergangene und erwartete Niederschlag im Teileinzugsgebiet angezeigt werden.

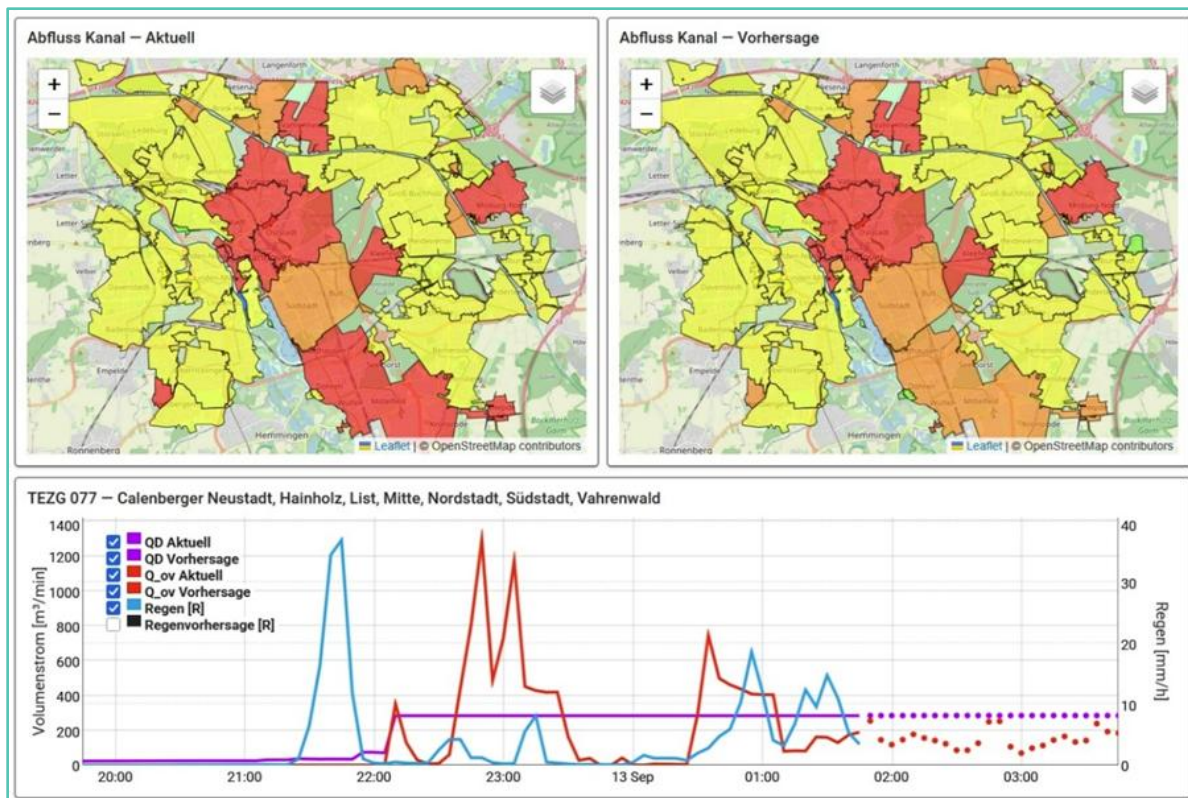


Abbildung 62: Detailsbene des Digitalen Zwillings – Unterseite Kanal und Klärwerke

3. Oberfläche und Überflutung: Das Überflutungsrisiko wird in fünf Klassen auf Basis gemessener und vorhergesagter Niederschläge dargestellt. Nutzende können zwischen mittleren und maximalen Prognosen umschalten, um Unsicherheiten zu visualisieren. Ergänzend gibt es eine Wasserstandskarte auf einem 3-m-Raster, die bis auf Straßenzüge zoombar ist (vgl. die nachfolgende Abbildung 63). Die zugehörigen Daten werden von h&m in Echtzeit als GeoTIFF-Dateien bereitgestellt.

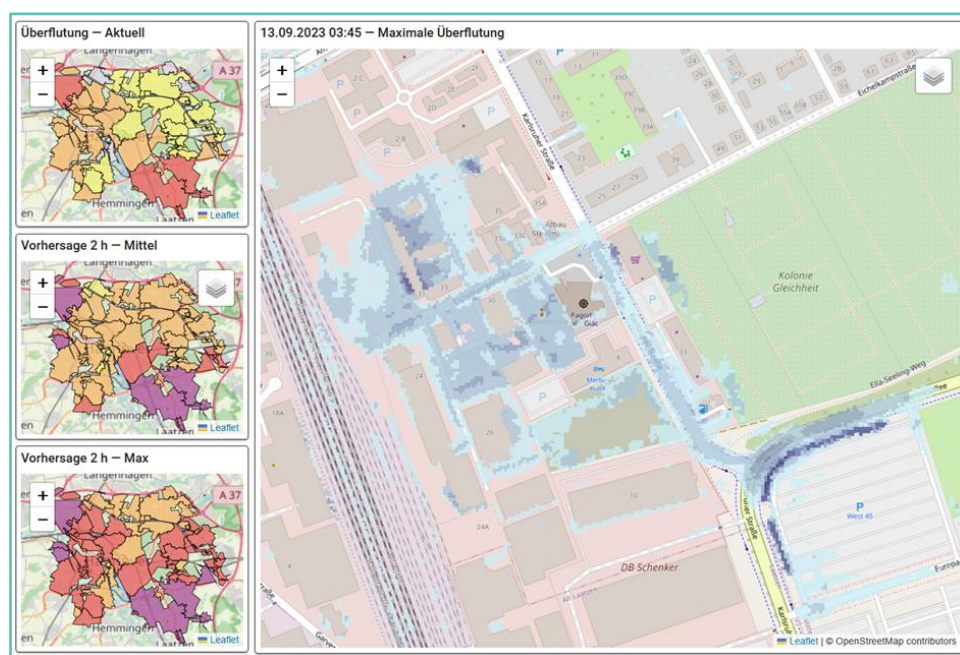


Abbildung 63: Detailsbene des Digitalen Zwillings – Unterseite Oberfläche und Überflutung

4. Gewässer und Einleitungen: Hier erfolgt eine Echtzeit-Darstellung der hydraulischen und wasserqualitativen Zustände. Messgrößen wie Wasserstand, Durchfluss, Temperatur, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt sowie chemische Parameter (TOC, CSB, Ammonium) werden über Karten und Gangliniendiagramme visualisiert (vgl. die nachfolgende Abbildung 64). In einer zweiten Ansicht wird die aktuelle Hochwassersituation dargestellt (Pegelstände an verschiedenen Stellen der Ihme und Leine sowie deren zeitlicher Verlauf).

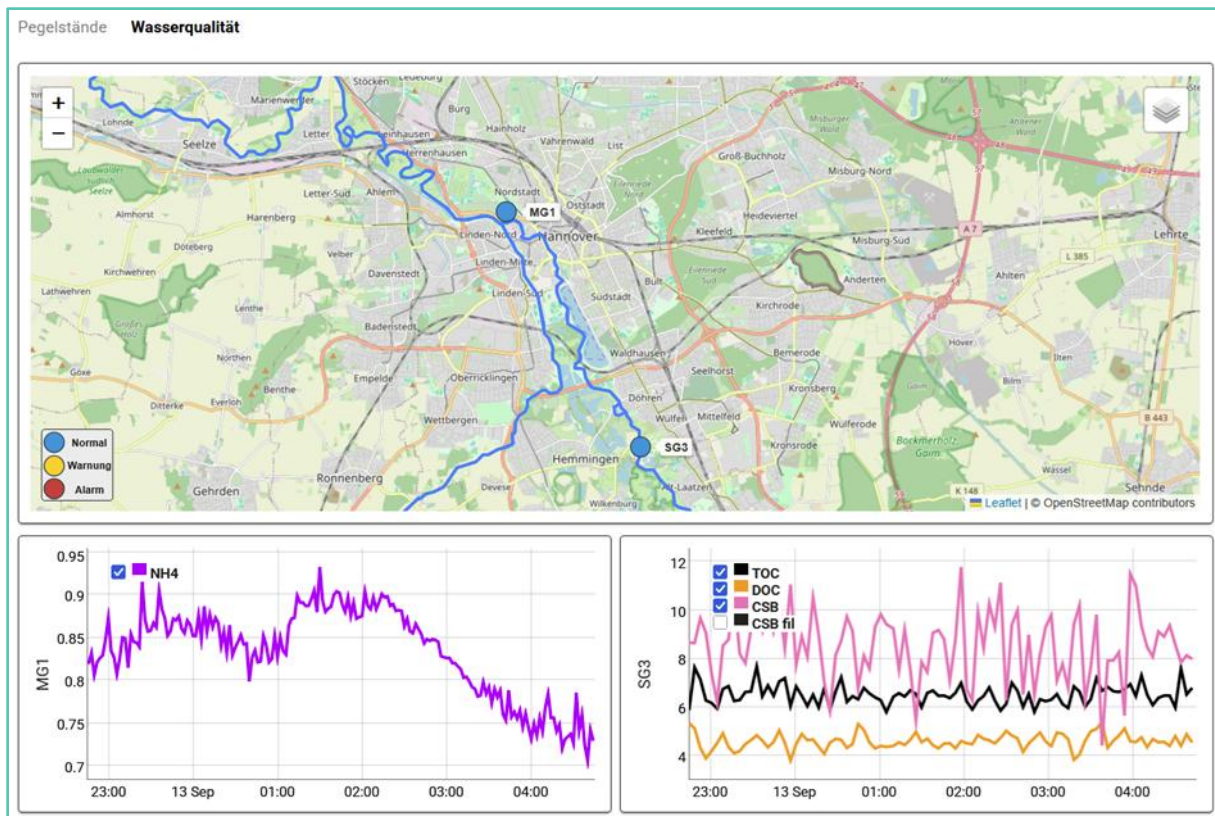


Abbildung 64: Details der Digitalen Zwillinge – Unterseite Gewässer und Einleitungen

Nachvollziehbare Entscheidungsassistenz und Maßnahmenvorschläge

Die nachvollziehbare, regelbasierte Entscheidungsassistenz unterstützt das Betriebspersonal durch warnstufenspezifische Maßnahmenvorschläge für das Management aktueller Starkregenereignisse sowie zur proaktiven Vorbereitung darauf.

- **Abflusssteuerung:** Vorschläge umfassen die manuelle Steuerung der vier Hauptsammler, etwa durch Änderung der Förderraten der Pumpwerke oder Betätigung von Schiebern, um Mischwasserüberläufe zu reduzieren.
- **Oberirdische Maßnahmen:** Das System gibt Hinweise zur Absperrung von Unterführungen und Straßen, zur Aktivierung von Warnanzeigen in gefährdeten Bereichen sowie zur Evakuierung oder Sicherung von Liegenschaften.
- **Funktionsweise:** Die Vorschläge basieren auf der Echtzeit-Simulation des Kanalnetzes und der Überflutungsabschätzung mittels RadEF. Das System vergleicht die erwarteten Überflutungshöhen mit Grenzwerten an mit GIS-Koordinaten hinterlegten Orten und zeigt bei Überschreitungen die passenden Maßnahmen an.
- **Umsetzung:** Die letzte Entscheidung über die Umsetzung einer durch die Entscheidungsassistenz vorgeschlagenen Maßnahme liegt beim Betriebspersonal auf den Leitwarten. Bei extremen Ereignissen erfolgt die Abstimmung zwischen Netzbetreiber, Tiefbauamt, Polizei und Feuerwehr.

Die nachfolgende Abbildung 65 zeigt beispielhaft eine Ansicht mit Handlungsempfehlungen, die auf Grundlage der aktuellen Situation generiert wurde.

Bahnunterführung (ID: L7)

Prognostizierter max. Wasserstand: 0.572 m zum Zeitpunkt: 12.09.2023 23:00

Handlungsempfehlungen

Warnstufe 1 Regel 12

| Maßnahme | Beschreibung | empfohlen seit |
|----------|---|------------------|
| Nr. 1 | Hinweistafel aufstellen: "Achtung Überflutungsgefahr" | 28.04.2025 12:29 |

Warnstufe 2 Regel 13

| Maßnahme | Beschreibung | empfohlen seit |
|----------|---|------------------|
| Nr. 2 | Hinweistafel aufstellen: "Achtung Überflutungsgefahr - Durchfahrt verboten" | 28.04.2025 12:29 |
| Nr. 3 | Nutzung einstellen | 28.04.2025 12:29 |
| Nr. 4 | Absperrung | 28.04.2025 12:29 |
| Nr. 5 | Umleitung von Regenwasser auf bzw. Versickerung in nebenliegenden Grünflächen | 28.04.2025 12:29 |

Hinweis

- Warnstufe 1 (gelb) gilt ab einem prognostizierten max. Wasserstand von 0,3 m
- Warnstufe 2 (rot) gilt ab einem prognostizierten max. Wasserstand von 0,5 m

Abbildung 65: Mittels der nachvollziehbaren Entscheidungsassistenz abgeleitete beispielhafte Handlungsempfehlungen für eine kritische Lokalität in Hannover

Prototypische Erprobung, Validierung und Demonstration

Die Validierung des ZwillE Gesamtsystems erfolgte zunächst durch Erstellung eines sog. „Datenspur-Demonstrators“: Es wurde ein historisches Starkregenereignis im September 2023 genutzt, um den Digitalen Zwilling im „Replay-Modus“ zu testen. Hierbei wurden alle Archivdaten (Radar, Sensoren) so eingespielt, als fänden sie aktuell statt. Dieser Demonstrator ist auch nach Ende der Projektlaufzeit unter der folgenden URL öffentlich aufruf- und nutzbar:

URL: <https://zwill-e-demo.ifak.eu/>

User: demo

Passwort: Berlin25#

Dieser öffentliche Demonstrator wurde auf verschiedenen Konferenzen und Veranstaltungen der Fachöffentlichkeit präsentiert (vgl. hierzu auch die Ausführungen im nachfolgenden Abschnitt II.8 „Erfolgte Veröffentlichungen, Vorträge, Referate etc.“).

Für die Evaluierung in der praktischen Anwendung wurde der Demonstrator so aufbereitet, dass er in den Leitwarten der SEH präsentiert und von den Betriebsmitarbeitenden getestet werden konnte. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Einhaltung von Sicherheitsstandards für Kritische Infrastrukturen (KRITIS). Es wurde eine strikte Trennung zwischen dem Digitalen Zwilling (Simulationswelt) und dem realen Prozessleitsystem (Steuerungswelt) implementiert, wobei der Digitale Zwilling als Informationssystem dient, das Entscheidungen der Mitarbeitenden vorbereitet, aber nicht autonom in den Prozess eingreift.

Zusammenfassung der Ergebnisse aus AP 8

Zusammenfassend wurde im Rahmen des AP 8 ein technischer Prototyp geschaffen, der weltweit zu den ersten Systemen gehört, die eine durchgängige Kette von der Meteorologie über die Kanalnetz-hydraulik bis hin zur Kläranlagenauslastung und Gewässergüte in einem Digitalen Zwilling abbilden. Die Integration der verschiedenen fachlichen Teilkomponenten über standardisierte Schnittstellen in eine flexible Plattform (ifakFAST) stellt einen signifikanten wissenschaftlich-technischen Fortschritt dar. SEH verfügt damit über ein Werkzeug, das sowohl im akuten Krisenfall als auch in der strategischen Stadtentwicklung einen messbaren Mehrwert für den Schutz der Bürger:innen und der Umwelt bietet.

AP 9: Umsetzung des Realsystems und Evaluation des Digitalen Zwillings im Praxistest (AP-Leitung: SEH)

Im AP 9 wurde das entwickelte System des Digitalen Zwillings prototypisch getestet, validiert und weiter optimiert. Hierfür wurde zunächst eine geeignete technische Infrastruktur geschaffen, die den Betrieb und die Weiterentwicklung des Systems ermöglicht. Die SEH übernahm AP-leitend den Aufbau der internen IT-Infrastruktur und der zentralen Datenablage sowie die Integration des Digitalen Zwillings in die bestehende SEH-interne Systemlandschaft. Dazu gehörten eine umfassende Prüfung datenschutzrechtlicher Anforderungen, KRITIS-Bezugsgrößen und eine detaillierte Analyse der bestehenden IT-Strukturen.

Parallel wirkten Atos / Eviden, ifs, h&m, ifak und IAB beim Aufbau der Laufzeitumgebung mit. Atos / Eviden unterstützte insbesondere bei der Sicherstellung der Datenkommunikation, der Fehlerbehebung und bei der Validierung der von der nachvollziehbaren Entscheidungsassistenz abgeleiteten Handlungsempfehlungen. Zudem setzte Atos / Eviden technische Anpassungen um. Der Projektpartner ifak war für die Inbetriebnahme und Konfiguration der Kommunikationsschnittstellen verantwortlich, analysierte die resultierenden Simulationsergebnisse und passte Modelle und Benutzeroberflächen bedarfsgerecht an. Das IAB unterstützte sowohl den Aufbau der technischen Umgebung als auch die Ableitung technischer Anforderungen und trug zu Auswertung und Optimierungsarbeiten bei. h&m prüfte und optimierte die meteorologischen Datenflüsse, dokumentierte die Datenverfügbarkeit der Niederschlagsmessungen und validierte die Niederschlags- und Überflutungsvorhersagen. ifs untersuchte die Messkette hinsichtlich Repräsentativität, analysierte die prognostizierten hydraulischen Zustände des Digitalen Zwillings und führte vertiefende Offline-Simulationen durch. h&m und ifs unterstützten zudem die Validierung der abgeleiteten Handlungsempfehlungen.

Auf einem zentralen Rechner konnte die Kopplung des Digitalen Zwillings mit dem Prozessleitsystem (PLS) der Klärwerke sowie des Kanalnetzes implementiert werden. Diese Schnittstelle ermöglicht eine gesicherte, kontinuierliche Datenkommunikation zwischen den Realdaten aus dem PLS und dem Digitalen Zwilling. Darüber hinaus wurden die Daten der im Projekt neu installierten Messstellen aufbereitet und – ebenso wie weitere externe Datenquellen – in das System integriert.

Im Anschluss daran ging das Gesamtsystem bei SEH in einen Probetrieb über. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in die Validierung und Weiterentwicklung der verschiedenen Modelle ein. Die Bewertung erfolgte sowohl über eine Ist-Soll-Analyse als auch über die Auswertung der prognostizierten optimierten Betriebszustände. Die Resultate aus diesen Analysen dienten wiederum der Verbesserung der Datenbereitstellung und -kommunikation. Daraus konnten schließlich robuste technische Randbedingungen für eine dauerhaft stabile Kopplung des Simulationssystems mit dem realen Prozessleitsystem abgeleitet werden.

Teil-AP 9.1: Umsetzung des Realsystems und Implementierung in die Netzwerkstruktur der SEH

Zu **Beginn** des Projekts verfügte die Stadtentwässerung Hannover über bewährte Betriebsabläufe im Kanalnetz und in den Klärwerken, jedoch standen nur begrenzte Möglichkeiten für eine vorausschauende oder integrale Betrachtung zur Verfügung. Systeme, die eine prognosegestützte Steuerung oder eine datenbasierte Entscheidungsunterstützung ermöglichten, existierten nicht. Die Betriebsweise orientierte sich daher überwiegend an aktuellen Situationen und Erfahrungswerten, ohne Hinweise auf potenzielle Belastungssituationen durch Starkregen oder hohe Zulaufmengen.

Der **Bedarf** an einem digitalen Werkzeug zur Unterstützung operativer und strategischer Entscheidungen war daher offensichtlich. Ziel des Zwillie Verbundvorhabens für SEH war es daher, mit Hilfe eines Digitalen Zwillings ein System zu schaffen, das Echtzeitdaten verarbeitet, Simulationen durchführt und daraus nachvollziehbare Handlungsempfehlungen ableitet. Dieses System sollte nicht nur die aktuelle Betriebssituation abbilden, sondern auch Prognosen ermöglichen. Damit sollte eine optimierte Steuerung und eine belastbare Grundlage für zukünftige Planungen geschaffen werden.

Die Stadtentwässerung sah darin eine Chance, ihre Prozesse zu modernisieren und die Digitalisierung voranzutreiben. Die Integration eines solchen Systems versprach eine höhere Betriebssicherheit, eine bessere Ressourcennutzung und eine verbesserte Kommunikation zwischen den verschiedenen technischen und organisatorischen Einheiten. Die Ausgangslage bildete somit den Startpunkt für ein umfassendes Projekt, das sowohl technische als auch organisatorische Herausforderungen mit sich brachte.

Die **Umsetzung des Digitalen Zwillings** war nicht nur technisch anspruchsvoll, sondern erforderte über mehrere Jahre hinweg intensive Abstimmungen, umfangreiche organisatorische Koordination und einen kontinuierlichen Wissensaustausch zwischen allen Beteiligten. So bedurfte die technische Realisierung und Integration des Systems bei SEH den Aufbau einer komplexen IT-Infrastruktur, die sowohl sicher als auch leistungsfähig ist. Zunächst wurde eine Kopplung mit dem bestehenden Prozessleitsystem (PLS) der Klärwerke und des Kanalnetzes realisiert. Dies ermöglichte die Kommunikation zwischen den Realdaten und dem Digitalen Zwilling. Zusätzlich wurden neue Messstellen eingerichtet und in die Systeme integriert, um eine umfassende Datenbasis zu schaffen. Die Daten aus verschiedenen Quellen – darunter Daten der Stadtentwässerung sowie Daten externer Anbieter (z. B. DWD, WSV, NLWKN) – wurden in einem zentralen System zusammengeführt und für die Simulationen aufbereitet.

Eine besondere Herausforderung stellte die Einhaltung der Anforderungen an die Kritische Infrastruktur (KRITIS) dar. Um einen sicheren Datenaustausch zwischen den Netzwerken zu gewährleisten, wurde eine demilitarisierte Zone (DMZ) eingerichtet (vgl. die nachfolgende Abbildung 66). Diese schützt den Datenverkehr und verhindert unautorisierten Zugriff.

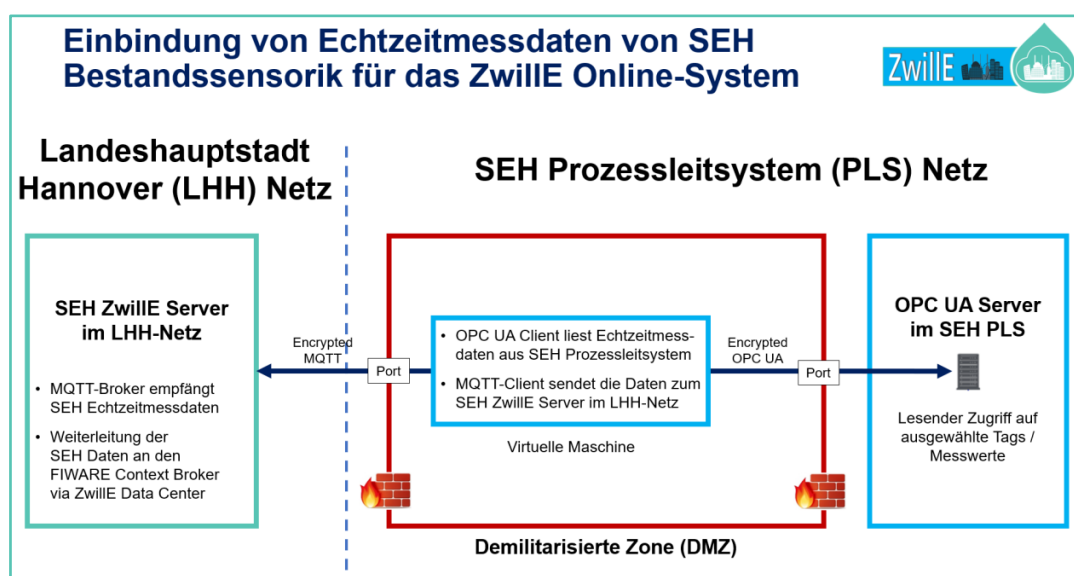


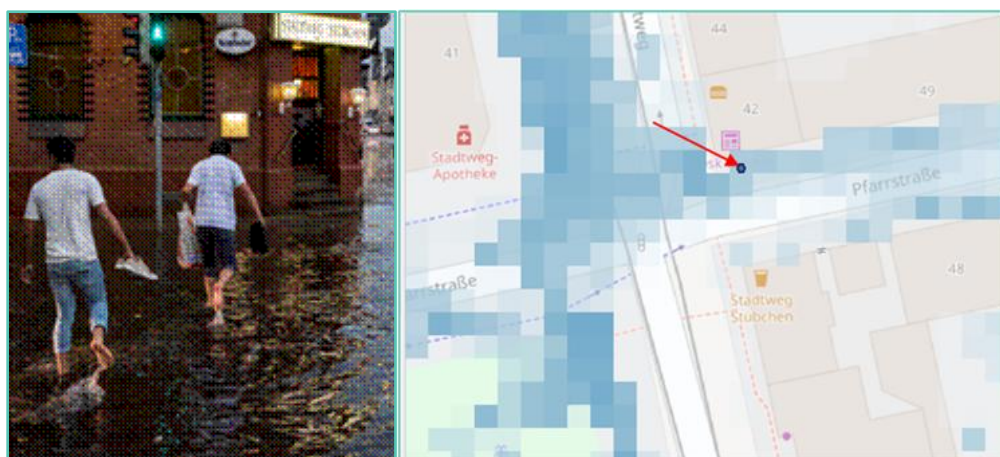
Abbildung 66: Einbindung von Echtzeitmessdaten von SEH Bestandssensorik für den Digitalen Zwilling mittels DMZ

Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Robustheit und Sicherheit des Systems. Der Digitale Zwilling wurde so konzipiert, dass er nicht direkt in das PLS eingebunden ist, sondern eine unidirektionale Kommunikation nutzt – Echtzeitdaten fließen nur in Richtung des Digitalen Zwillings, nicht zurück ins Leitsystem. Dies schützt das PLS vor potenziellen Cyberangriffen. Geplant ist zudem ein Penetrationstest zur weiteren Absicherung.

Die Integration des Digitalen Zwillings erforderte eine enge Zusammenarbeit zahlreicher Fachbereiche, darunter die IT-Abteilungen der Landeshauptstadt Hannover und der Stadtentwässerung, Experten für Prozessleittechnik, Netzwerkadministratoren und externe Dienstleister. Historisch gewachsene Netzwerke mit unterschiedlichen Konfigurationen und Softwareständen mussten harmonisiert werden. Die Integration des Digitalen Zwillings in diese Umgebung war ein komplexer und arbeitsintensiver Prozess, der zahlreiche technische Prüfungen und Optimierungen erforderte.

Teil-AP 9.2: Validierung der Simulationsergebnisse und der abgeleiteten Handlungsempfehlungen und Optimierung des Gesamtsystems

Die Validierung des Digitalen Zwillings erfolgte durch einen systematischen Abgleich der simulierten Daten mit den realen Messwerten (vgl. für ein Beispiel die nachfolgende Abbildung 67). Ziel war es, die Modellgüte zu bewerten und die Modellumgebung schrittweise zu optimieren.



| Ort | Wasserstand Foto (cm) | Wasserstand Referenzmodell (cm) | Wasserstand RadEF (cm) |
|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------|
| 1: Stadtweg_Stübchen | 10-12 | 15 | 10 |
| 2: Hamburger Allee | 5-15 | 2 | 2 |
| 3: Brücke_Südschnellweg | 25-50 | 85 | 60 |
| 4: Guts-Muths-Straße | 8-17 | 45 | 15 |

Abbildung 67: Beispiel für den Vergleich von mit RadEF und dem Referenzmodell simulierten Wasserständen mit beobachteten Wasserständen

Zunächst wurden Fehler identifiziert und behoben, gefolgt von Maßnahmen zur Rechenzeitoptimierung. Die Online-Simulationen wurden mit Ist-Zuständen verglichen, um die Modellgüte zu bewerten. Nach erfolgreicher Kalibrierung und Validierung wurden die aus dem Modell abgeleiteten Handlungsempfehlungen systematisch mit realen Betriebsdaten abgeglichen und einer Plausibilitätsprüfung unterzogen.

Dabei zeigte sich, dass der Digitale Zwilling realitätsnahe Prognosen liefern und konkrete Optimierungsvorschläge generieren kann. Die Ergebnisse dieser Validierungsphase wurden genutzt, um die Datenbereitstellung und -kommunikation weiter zu verbessern.

Evaluation und Erprobung des Prototypen

Der Digitale Zwilling wurde in einem ersten Schritt in Form eines sog. „Datenspur-Demonstrators“ mit einem historischen Ereignis umgesetzt und anschließend in einem zweiten Schritt als Online-System mit Echtzeitdaten intern bei der SEH aufgesetzt. Er wurde dem technischen Betriebspersonal parallel neben dem Prozessleitsystem zur Verfügung gestellt, so dass Informationen daraus genutzt und Erfahrungen hinsichtlich aller Systemkomponenten gesammelt werden können.

Ein zentraler Bestandteil der Evaluation war somit die Erprobung des Prototypen, der mit Hilfe eines Dashboards die Ergebnisse des Digitalen Zwillings für die Nutzenden visualisiert. Ziel war es, ein anwenderfreundliches System zu schaffen, das intuitiv bedienbar ist und relevante Informationen verständlich darstellt. Das System wurde daher gemeinsam mit dem Leitwartenpersonal konzipiert und getestet. In Experteninterviews wurden Anforderungen und Erwartungen erfasst, die in die Gestaltung der Benutzeroberfläche einfließen. Besondere Aufmerksamkeit galt der Integration in den Arbeitsalltag. Der Digitale Zwilling sollte auf einem separaten Monitor angezeigt werden, ohne dass ein Umschalten oder eine Anmeldung erforderlich ist. Auch technische Details wie die Deaktivierung des Bildschirmschoners wurden berücksichtigt.

Das Feedback der Anwender:innen war überwiegend positiv. Die Benutzeroberfläche wurde als intuitiv und hilfreich bewertet. Schulungen und Dokumentationen unterstützten die Einführung. Verbesserungsvorschläge wurden aufgenommen und umgesetzt, darunter die Erweiterung der Kartenansichten, die Integration eines Starkregenindex (SRI) und die Anpassung von Legenden. Die Akzeptanz innerhalb der Stadtentwässerung war insgesamt hoch; zudem gab es konkrete Nachfragen zur Nutzung des Digitalen Zwillings in aktuellen Projekten. Als Einsatzmöglichkeiten des Systems für Anwendungsfelder in konkreten Projekten ergaben sich u. a.:

- Planung und Bau eines Regenüberlaufbeckens
 - Voruntersuchung / Machbarkeitsstudie
 - Erhalt einer denkmalrechtlichen Genehmigung
- Baumaßnahme zur Sanierung eines DN2000 Kanalabschnitts
 - Unterstützung in der Planungsphase (Dimensionierung)
 - Optimierung der Einsatzplanung von Kanalarbeiten
 - Warnsystem für Kanalarbeiten (Ausstieg)
 - Steuerung von Pumpen in der Bauphase
- Smart City Projekt
 - Steuerung einer Zisterne mittels Vorhersage des Wettergeschehens in Kombination mit Wasserstandsmessungen in Echtzeit

Für das Projekt „Planung eines Regenüberlaufbeckens“ konnten bereits Modellergebnisse im Zuge von Voruntersuchungen und einer Machbarkeitsstudie bereitgestellt werden. Insgesamt zeigte sich, dass der Digitale Zwilling ein praxisnahes Werkzeug ist, das betriebliche und planerische Entscheidungen unterstützt und die Akzeptanz digitaler Lösungen deutlich erhöht.

Erweiterung des Bewertungsverfahrens mittels eines kombinierten Überflutungsrisikoindexes

Im Rahmen der Weiterentwicklung und Optimierung des Digitalen Zwillings wurde das Verfahren zur Bewertung des Überflutungsrisikos auf der Oberfläche auf Basis von ersten Rückmeldungen zum prototypischen System um einen kombinierten Überflutungsrisikoindex erweitert. Ziel war es, die räumliche und zeitliche Bewertung urbaner Überflutungsgefahren durch Starkregen deutlich zu präzisieren, indem modellbasierte Überflutungstiefen mit ereignisabhängigen Niederschlagsrisiken zusammengeführt werden.

1. Überflutungsrisikoindex – Urban Flood Risk Index (UFR-Index)

Der Überflutungsrisikoindex beschreibt das strukturell bedingte Überflutungsrisiko eines Einzugsgebietes. Grundlage bilden die simulierten Wasserstände aus dem gekoppelten 1D- / 2D-Modell. Für jedes der 83 Teileinzugsgebiete von Hannover wurde die Anzahl überfluteter Rasterzellen nach vier Wasserstandsklassen (niedrig, mittel, hoch, sehr hoch) ermittelt und über gewichtende Faktoren aggregiert, um höhere Überflutungstiefen stärker zu berücksichtigen.

Der daraus berechnete gewichtete Mittelwert bildet den initialen Überflutungsrisikoindex, der in drei Kategorien eingeteilt wird: *Mittel, Hoch und Sehr hoch*.

In einer anschließenden visuellen Validierungsphase (subjektive Analyse) wurden die Ergebnisse GIS-gestützt überprüft und bei Bedarf an die stadtstrukturellen Gegebenheiten (z. B. Unterführungen, Engstellen) angepasst. Das Ergebnis ist eine robuste, strukturelle Risikoeinstufung für alle Teileinzugsgebiete.

2. Niederschlagsüberflutungsrisikoindex – Precipitation Flood Risk Index (PFR-Index)

Parallel dazu wurde ein ereignisbezogener Niederschlagsüberflutungsrisikoindex berechnet. Dieser basiert auf radar-gestützten Ensemble-Nowcasts sowie vorgerechneten Modellergebnissen des Kanal- und Oberflächenabflusses. Die Niederschlagsintensitäten werden in fünf Risikostufen eingeteilt: *Kein Risiko, Niedrig, Mittel, Hoch und Sehr hoch*.

Die Daten werden durch h&m ereignisbezogen und automatisiert als GeoTIFF bereitgestellt und ermöglichen eine kontinuierlich aktualisierte Überflutungsrisikobewertung.

3. Kombinierter Überflutungsrisikoindex – Combined Flood Risk Index (CFR-Index)

Im letzten Schritt werden UFR- und PFR-Index zu einem kombinierten Index für jedes Teileinzugsgebiet zusammengeführt. Hierzu dient eine definierte Entscheidungsmatrix, in der die drei Kategorien des UFR-Index mit den fünf Kategorien des PFR-Index verknüpft werden (vgl. die nachfolgende Tabelle 14).

| CFR-Index | | UFR-Index | | |
|-----------|--------------------------|------------------|--------------|-------------------|
| | | Mittleres Risiko | Hohes Risiko | Sehr hohes Risiko |
| PFR-Index | 0 (Kein Risiko) | 0 | 0 | 0 |
| | 1 (Niedriges Risiko) | 1 | 1 | 2 |
| | 2 (Mittleres Risiko) | 1 | 1 | 2 |
| | 3 (Hohes Risiko) | 2 | 2 | 3 |
| | 4 (Sehr hohes Risiko) | 2 | 2 | 3 |

Tabelle 14: Kombination aus urbanem Überflutungsrisiko (UFR-Index) und Niederschlagsüberflutungsrisiko (PFR-Index) zur Ableitung des kombinierten Überflutungsrisikos (CFR-Index)

Das resultierende kombinierte Risikoniveau wird in vier Klassen ausgegeben (vgl. Tabelle 15):

| | |
|--|--------------------------------|
| | Kein Risiko |
| | Niedriges bis mittleres Risiko |
| | Mittleres bis hohes Risiko |
| | Hohes bis sehr hohes Risiko |

Tabelle 15: Farbkodierte Kategorien des kombinierten Überflutungsrisikoindexes (CFR-Index)

Die Methodik wurde exemplarisch auf das Niederschlagsereignis vom 12. / 13.09.2023 angewendet (vgl. die nachfolgende Abbildung 68).

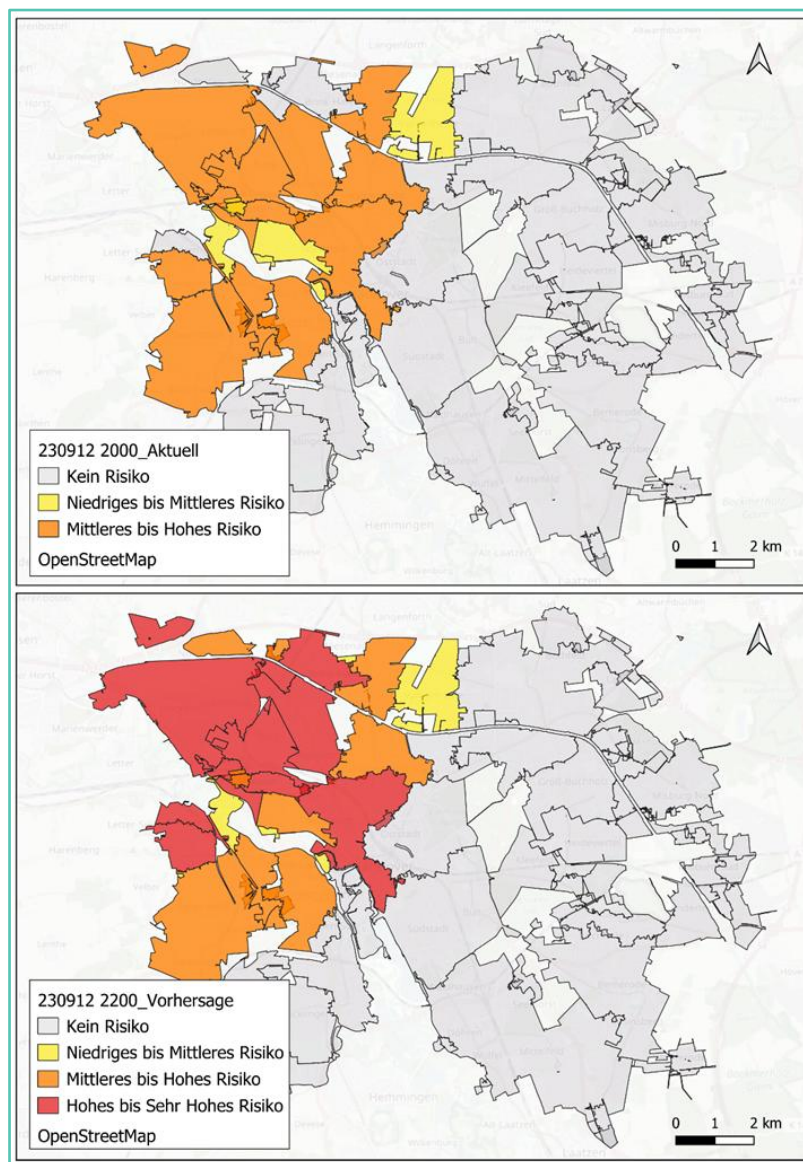


Abbildung 68: Kombiniertes Überflutungsrisikoindex pro Einzugsgebiet, oben: Ist-Zustand (20:00 Uhr), unten: Prognose (22:00 Uhr)

Für den gemessenen Zustand (20:00 Uhr) ergaben sich überwiegend geringe Risiken, während die zweistündige Prognose (22:00 Uhr) mehrere Einzugsgebiete in den Kategorien *Mittel* bis *Hoch* und *Hoch* bis *Sehr hoch* auswies. Die räumliche Analyse zeigte, dass erhöhte Risiken ausschließlich im Nordwesten Hannovers auftraten, während in den übrigen Stadtteilen zu diesem Zeitpunkt kein relevantes Überflutungsrisiko bestand.

Mit dem kombinierten Überflutungsrisikoindex wurde eine Grundlage für eine dynamische, einzugsgebietsbezogene Risikobewertung geschaffen, die sowohl für den operativen Einsatz als auch für die strategische Planung einen deutlichen Mehrwert bietet.

Teil-AP 9.3: Anforderungen zur Implementierung des Digitalen Zwillings in die Prozessleittechnik

Die Evaluation des Digitalen Zwillings bei der Stadtentwässerung Hannover hat gezeigt, dass digitale Werkzeuge einen echten Mehrwert für den Betrieb und die Planung einer Entwässerungsinfrastruktur bieten können. Der Digitale Zwilling konnte erfolgreich in die bestehende IT-Infrastruktur integriert werden (vgl. Teil-AP 9.1), kann realitätsnahe Prognosen liefern und wurde von den Anwender:innen gut angenommen. Die technische Umsetzung war anspruchsvoll, insbesondere im Hinblick auf Datenschutz, Netzwerksicherheit und die Einbindung in Kritische Infrastrukturen. Dennoch gelang es, eine stabile und sichere Laufzeitumgebung zu schaffen. Der prototypische Digitale Zwilling erwies sich als effektives Werkzeug zur Visualisierung und Entscheidungsunterstützung, das im Betrieb konkrete Rückmeldungen lieferte.

Die Rückmeldungen aus der Praxis führten zu konkreten Verbesserungen und zeigten, dass eine enge Zusammenarbeit entscheidend für die Systemoptimierung ist. Die Ergebnisse der Evaluation bilden die Grundlage für die Definition der Anforderungen an einen dauerhaften Betrieb und die Weiterentwicklung des Systems.

Der Austausch mit anderen Kommunen und Fachverbänden sowie die Durchführung von Vor-Ort-Demonstrationen tragen zur Sicherstellung der Übertragbarkeit bei. Langfristig soll der Digitale Zwilling als integraler Bestandteil der SEH-internen Prozessleittechnik etabliert werden und eine adaptive, datengestützte Abflusssteuerung ermöglichen. Die Stadtentwässerung sieht darin einen wichtigen Schritt in Richtung Digitalisierung und zukunftsorientierter Infrastruktur.

Die Erfahrungen aus diesem Projekt zeigen, dass digitale Lösungen nicht nur technisch umsetzbar, sondern auch praxisrelevant und breit akzeptiert sind, eine enge Zusammenarbeit zwischen IT und Anwender:innen zwar z. T. sehr aufwendig und zeitintensiv, aber entscheidend für den Erfolg ist.

Zusammenfassend können auf der Grundlage der im Projekt gewonnenen Erfahrungen – insbesondere aus dem Probetrieb des prototypischen Systems, den Rückmeldungen des Leitwartenpersonals sowie den technischen Tests – die folgenden Anforderungen für eine Implementierung des Digitalen Zwillings in die SEH-Prozessleittechnik bzw. für die Übernahme des Digitalen Zwillings in einen operativen Betrieb abgeleitet werden (vgl. Tabelle 16):

| Anforderungsbereich | Projektergebnisse / Abgeleitete Anforderungen |
|-----------------------------|---|
| Technische Anforderungen | <ul style="list-style-type: none"> • Bedarf an sicherer, KRITIS-konformer Laufzeitumgebung • Robuste, überwachte Schnittstellen zu PLS, Datenbanken, Sensorik und Prognosediensten erforderlich • Automatisierte Echtzeitdatenverarbeitung notwendig (Import, Validierung, Modelllauf) |
| IT-Sicherheit & Datenschutz | <ul style="list-style-type: none"> • Notwendigkeit einer strikten Netzwerktrennung • Rollen- und Rechtekonzepte für Betrieb, Wartung und Updates erforderlich • Datenschutzkonforme Verarbeitung bestimmter Daten • Sichere Kommunikationswege für PLS-Anbindung zwingend |

| | |
|--|--|
| Integration & Bedienbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> • Hoher Nutzen einer intuitiven, betriebsgerechten Visualisierung • Permanente Sichtbarkeit auf separatem Monitor ohne Umschalten oder „extra“ Anmeldung notwendig • Minimale Bediennotwendigkeit: Modell- und Datenprozesse sollen autonom laufen, Darstellung vieler relevanter Ergebnisse und Kategorien übersichtlich auf einem Blick • Einheitliche Karten-, Farb- und Legendenstandards erhöhen die Nutzbarkeit |
| Organisatorische Anforderungen | <ul style="list-style-type: none"> • Klare Verantwortlichkeiten hinsichtlich Betrieb, Pflege, Support, Weiterentwicklung erforderlich • Demonstrationsworkshop / Schulung als zentraler Erfolgsfaktor identifiziert • Dokumentation / Betriebshandbücher und definierte Supportstrukturen notwendig • Enge Zusammenarbeit zwischen IT, Betrieb und Fachplanung entscheidend |
| Weiterentwicklung & Zukunftstauglichkeit | <ul style="list-style-type: none"> • Digitaler Zwilling muss modular erweiterbar sein • Standardisierte Daten- und Modellstrukturen fördern Interoperabilität und Übertragbarkeit • Regelmäßige Evaluationszyklen werden empfohlen, da Feedback aus Praxis wesentlich zur Systemoptimierung beiträgt • Kooperation mit anderen Kommunen und Fachverbänden unterstützt die Übertragbarkeit |

Tabelle 16: Anforderungen für den operativen Einsatz des Digitalen Zwillings

Die Projektergebnisse zeigen, dass der Digitale Zwilling technisch integrierbar und betrieblich nutzbar ist. Um ihn dauerhaft in der Prozessleittechnik zu verankern, müssen klare technische, organisatorische und sicherheitstechnische Anforderungen erfüllt sein.

Teil-AP 9.4: Sicherstellung der Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse

Ein zentrales Ziel des Teil-AP 9.4 bestand darin, die im Projekt entwickelten Methoden, Modelle und Werkzeuge zur Entwicklung eines Digitalen Zwillings einer städtischen Entwässerungsinfrastruktur so aufzubereiten, dass sie über den Anwendungsfall Hannover hinaus in anderen Kommunen und Abwasserbetrieben eingesetzt werden können. Die Sicherstellung der Übertragbarkeit erfolgte durch Konferenzvorträge, Fachtagungen, wissenschaftliche Veröffentlichungen, Seminare und gezielte Demonstrationsveranstaltungen (vgl. hierzu auch die Ausführungen im nachfolgenden Abschnitt II.8 „Erfolgte Veröffentlichungen, Vorträge, Referate etc.“). An allen Aktivitäten waren sämtliche Projektpartner beteiligt – SEH, Atos / Eviden, ifs, h&m, ifak und IAB – und trugen so zu einer umfassenden fachlichen Verankerung der Projektergebnisse bei.

Ein Schwerpunkt des Teil-AP 9.4 lag auf der Demonstration des Digitalen Zwillings. Hierfür wurde der entwickelte und zuvor intern erprobte öffentliche „Datenspur-Demonstrator“ eingesetzt, der die Ergebnisse des Digitalen Zwillings für ein historisches Niederschlagsereignis in Form eines Dashboards visualisiert und damit einen praxisnahen Einblick in die Funktionsweise des Systems ermöglicht. Der Replay-Modus ermöglicht es, sämtliche relevanten Archivdaten (Radar, Sensorik, Modellausgaben) so einzuspielen, als fänden sie in Echtzeit statt. Dadurch kann die Funktionsweise und Reaktionslogik des Digitalen Zwillings unter realitätsnahen Bedingungen überprüft und anschaulich präsentiert werden. Der „Datenspur-Demonstrator“ ist auch nach Projektende öffentlich zugänglich und bietet interessierten Akteuren die Möglichkeit, die entwickelten Funktionen eigenständig zu testen.

Parallel dazu wurde ein Online-System des Digitalen Zwillings mit Echtzeitintegration aufgebaut, das in den Leitwarten der Stadtentwässerung Hannover über eine interne Webadresse aufgerufen wird und vom Betriebspersonal getestet wurde. Aufgrund der Anforderungen der Kritischen Infrastruktur (KRITIS) wurde eine strikte Trennung zwischen Simulationssystem (Digitaler Zwilling) und dem Prozessleitsystem (PLS) umgesetzt; der Digitale Zwilling fungiert ausschließlich als Informations- und Entscheidungsunterstützungssystem ohne Rückkanal ins PLS.

Die Rückmeldungen des Betriebspersonals, die im Rahmen von Interviews sowie Anwenderworkshops erhoben wurden, bestätigen die hohe Anwendbarkeit und Verständlichkeit der Visualisierungen. Gleichzeitig konnten durch diese dialogorientierten Formate praktische Anforderungen frühzeitig aus dem Echtbetrieb aufgenommen und direkt in die Weiterentwicklung des Digitalen Zwillings eingebunden werden. Auf dieser Grundlage wurden zahlreiche funktionale Verbesserungen umgesetzt, darunter die Erweiterung der Kartenansichten, die Integration des Starkregenindex (SRI) sowie die Optimierung von Legenden, Layouts und Benutzerführung. Diese nutzerorientierte Weiterentwicklung trug maßgeblich zur Steigerung der Akzeptanz des Systems bei und bildet eine wesentliche Grundlage für die Sicherstellung der Übertragbarkeit des in ZwillE entwickelten Ansatzes auf andere kommunale Infrastrukturen.

Der „Datenspür-Demonstrator“ wurde auf zahlreichen nationalen und internationalen Fachveranstaltungen vorgestellt und auf der Projektwebseite sowie im Innovationsatlas Wasser des BMFTR veröffentlicht. Dies fördert die Transparenz und erleichtert den Ergebniszugang für externe Akteure. Der Austausch mit interessierten Stadtentwässerungsbetrieben, Forschungspartnern und Kommunen führte bereits während der Projektlaufzeit zu konkreten Anfragen anderer Betreiber, die an einer Übernahme oder Weiterentwicklung der ZwillE Ergebnisse interessiert sind.

Insgesamt trug das Teil-AP 9.4 wesentlich dazu bei, die Praxisrelevanz, Sichtbarkeit und Übertragbarkeit des Digitalen Zwillings zu erhöhen. Durch die Kombination aus Demonstration, fachlichem Austausch, öffentlich zugänglichen Tools und wissenschaftlichen Publikationen konnte eine hohe Anschlussfähigkeit geschaffen werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Definition von Anforderungen an zukünftige Implementierungen in anderen Kommunen und bieten einen klaren Pfad für den breiteren Ergebnistransfer über die Stadt Hannover hinaus.

Zusammenfassende Darstellung der Kernergebnisse des ZwillE Verbundvorhabens

Im Rahmen des ZwillE Verbundvorhabens entstand am Beispiel der Stadt Hannover ein Digitaler Zwilling, welcher auf Grundlage von Echtzeitmessdaten und Simulationsmodellen den jeweils aktuellen Ist-Zustand einer städtischen Entwässerungsinfrastruktur mit ihren verschiedenen Teilbereichen widerspiegelt. Durch die Einbeziehung von Prognosen der wichtigsten Einflussfaktoren wie insbesondere Niederschlags- und Abflussdaten wird eine vorausschauende Szenario-Analyse ermöglicht als Basis für eine proaktive Bewältigung von extremen Niederschlagsereignissen. Der Digitale Zwilling liefert dem Betriebspersonal der Stadtentwässerung zudem Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Starkregenereignissen, um hierdurch beispielsweise Überflutungsschäden im Stadtgebiet sowie Mischwasserabschläge in die Gewässer zu reduzieren.

Mittels einer kartenbasierten Visualisierung stellt der entwickelte Digitale Zwilling dem Betriebspersonal des städtischen Netzbetreibers zum einen die aktuelle sowie die in naher Zukunft zu erwartende regionale Niederschlagssituation im Stadtgebiet dar. Zum anderen werden den technischen Betriebsmitarbeitenden auf den Leitwarten die aus dem aktuellen sowie dem erwarteten Niederschlag resultierenden Auswirkungen in den verschiedenen Teilbereichen des Entwässerungssystems verdeutlicht: a) die aktuelle sowie die zu erwartende Belastungssituation im Kanalnetz inklusive der Eingangspumpwerke und Kläranlagen, b) die aus aktuellen und prognostizierten Niederschlägen jeweils resultierende Oberflächenüberflutung in den städtischen Teileinzugsgebieten inklusive Hervorhebung aktueller und potenzieller kritischer Bereiche sowie c) die hydraulische und stoffliche Beschaffenheit (Quantität und Qualität) der Gewässer Leine und Ihme mitsamt ihrer Beeinflussung durch die aus dem jeweiligen Niederschlagsereignis resultierenden Regenwassereinleitungen sowie Mischwasserabschläge. Schließlich offeriert das System den Mitarbeitenden des städtischen Netzbetreibers sowie den weiteren im Starkregenfall

involvierten städtischen Akteure Maßnahmenvorschläge zum Management des akuten Niederschlagsereignisses (in kritischen Überflutungsgefährdeten Bereichen z. B. Absperrung von Unterführungen und Straßen, Warnhinweise bzw. -anzeigen, Evakuierung gefährdeter Liegenschaften und Sicherungen mittels lokaler Schutzmaßnahmen, z. B. temporäre Abschottungen) sowie zur proaktiven Vorbereitung auf das bevorstehende Ereignis (z. B. vorausschauendes Entlüften von Pumpen).

Um die vorgenannten Darstellungen der Systemzustände für das Betriebspersonal zu erzeugen, wurden verschiedene fachlich-technische Lösungsmodul als Grundlage für den Digitalen Zwilling zusammengeführt, u. a.:

1. Echtzeitfähiges Simulationsmodell: Als zentrale Komponente des Digitalen Zwillings wurde ein integriertes, kombiniert hydrologisch-hydrodynamisches Simulationsmodell des Kanalnetzes und der Kläranlagen zur virtuellen Abbildung und Prognose der dynamischen Prozesse entwickelt, das als Grundlage für die Ableitung von Maßnahmen zur Abflusssteuerung dient. Insbesondere die unmittelbare Kopplung von hydrodynamisch und hydrologisch modellierten Netzteilen in einem einzigen Modell besitzt hierbei einen hohen Neuigkeitscharakter.

2. Echtzeitmessdaten: Im Digitalen Zwilling werden nicht nur statische Systemdaten der vorhandenen städtischen Infrastruktur abgebildet, sondern auch dynamische Prozessdaten in Form von Echtzeitmessdaten von Niederschlag, Wassermenge und -qualität. Neben Bestandsmessdaten aus unterschiedlichen Quellen werden zusätzlich Messdaten aus einem temporären Messprogramm mit neu eingerichteter Sensorik (UV/VIS-Spektrometer- und Multi-Parameter-Sonden) in Kanalnetz und Einleitungsgewässern berücksichtigt, die den anderen Komponenten des Digitalen Zwillings über eine FIWARE-basierte Daten- und Kommunikationsinfrastruktur mit standardisierten Schnittstellen bereitgestellt werden.

3. Hochauflösende Niederschlagsprognosen: Für die Simulation des hydrologisch-hydraulischen Prozessgeschehens stellen die Niederschläge die wesentliche Belastungsgröße dar. Für diesen Input werden korrigierte und angeeichte Niederschlagsmessdaten des DWD-Radars Hannover und der 11 städtischen Regenschreiberstationen in Nahezu-Echtzeit aufbereitet und um numerische Wettermodelldaten (ICON-D2-EPS) ergänzt. Niederschlagsprognosen werden mittels Radar-Nowcasts als Ensemblevorhersagen mit 500 m-Rasterauflösung erzeugt.

4. Überflutungsprognose: Zudem wurde ein innovativer, Radar-basierter Ansatz zur Vorhersage des urbanen Überflutungsrisikos entwickelt, der auf den zuvor beschriebenen Ensemble-Nowcasts sowie vorgerechneten Modellergebnissen aus einem gekoppelten 1D- / 2D-Modell zur Simulation von Kanal- und Oberflächenabfluss basiert und als Ergebnis für das konkrete bzw. prognostizierte Niederschlagsereignis eine Überflutungsrisikokarte für das Stadtgebiet von Hannover liefert.

5. Wissensbasis und Entscheidungsunterstützung: Zudem wurde das beim Fachpersonal des städtischen Netzbetreibers in Bezug auf Starkregenereignisse vorhandene Erfahrungswissen erhoben, formalisiert und mit den Simulationsmodellen kombiniert, um eine digitale, aktualisier- und erweiterbare Wissensbasis als Grundlage für eine nachvollziehbare Entscheidungsassistenz zu schaffen.

Bei der Entwicklung des Digitalen Zwillings wurde auf eine hohe Offenheit und Übertragbarkeit der Herangehensweise auf andere Städte und Gemeinden geachtet. So ist der gewählte Ansatz mit einem moderaten Anpassungsbedarf (insbesondere zur Berücksichtigung alternativer städtischer Gegebenheiten) auch auf andere Anwendungsfälle außerhalb des Pilotgebietes Hannover übertragbar. Wichtig dabei sind v. a. die frühzeitige Klärung von organisatorischen und rechtlichen Fragestellungen bzw. von Anforderungen für Kritische Infrastrukturen (KRITIS) in Bezug auf eine stadtinterne Bereitstellung der erforderlichen meteorologischen und hydrologischen Modell- und Messdaten sowie der Bestands- und Infrastrukturdaten des Entwässerungssystems und die Einbindung der für die Entwicklung des Digitalen Zwillings erforderlichen externen Softwareanwendungen (z. B. das Simulationssystem SIMBA#).

Wissenschaftlich-technische Innovation der erzielten Ergebnisse

Das ZwillE Verbundvorhaben und die im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse grenzen sich dabei von aktuellen und vergangenen Projekten ab (vgl. hierzu auch die Ausführungen im nachfolgenden Abschnitt II.5) und stellen in dieser Form einen neuartigen Ansatz dar: So handelt es sich bei der Anwendung des Digitalen Zwillings mit einer nachvollziehbaren Entscheidungsassistenz zur Ableitung schwachstellenbezogener Gegenstrategien bei Starkregenereignissen für das urbane Gesamtwassersystem (Stadtraum, Kanal, Kläranlage(n), Einleitungsgewässer), welcher bei der Stadtentwässerung Hannover pilothaft umgesetzt wurde, um ein Novum. Ausgehend von einer umfassenden Messdatenerfassung und entsprechenden Prognosemodellierungen (Niederschlag, Überflutung und Kanalnetz- und Kläranlagensimulation) und der Erhebung von Erfahrungswissen bei den SEH Betriebsmitarbeitenden bezüglich des Umganges mit Wasser-Extremereignissen wurde ein komplexes Gesamtsystem beobachtet, formalisiert und bewertet.

Zudem wird der Digitale Zwilling als Prognose- und Beobachtermodell für potenzielle Niederschlagsereignisse eingesetzt und hat somit einen multifunktionalen Einsatzraum: Von der Prozessüberwachung bis hin zur Durchführung kurz- und langfristiger Szenario-Analysen ist der Einsatz möglich. Im Speziellen wird die Ableitung von Maßnahmenempfehlungen mit ganzheitlicher und systemischer Integration von Regenprognosen, Ableitungsberechnung, Kläranlagenführung und der Einbeziehung von multidimensionalem Expertenwissen durchgeführt. Dabei erfolgt die Mensch-Technik-Interaktion in bidirektionaler Weise. Dies wird durch den Einsatz des Digitalen Zwillings als Schulungs- und Rekonstruktionselement historischer und aktueller Daten im wasserbezogenen Ableitungs- und Behandlungssystem gewährleistet, auf deren Grundlage jederzeit eine Anpassung und Erweiterung der zugrunde liegenden maßnahmenbezogenen Wissensbasis durch das technische Betriebspersonal stattfinden kann. Ein weiteres Novum stellt die nachvollziehbare Entscheidungsunterstützung dar. Ausgehend von Prognosen und darauf basierenden ausgelösten Warnstufen werden den städtischen Entscheidungsträgern situationsgerechte Handlungsoptionen durch einen KI-basierten digitalen Assistenten vorgeschlagen und somit ein neuer Ansatz zur Verbesserung der Überwachung und Steuerung von Anlagen und Kanalnetz sowie von kritischen, überflutungsgefährdeten Bereichen (z. B. Unterführungen, Straßenkreuzungen, Krankenhäuser, Kindertagesstätten, Seniorenheime, Tiefgaragen etc.) innerhalb der einzelnen oberflächlichen Teileinzugsgebiete angeboten.

II.5 Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Während des Vorhabens sind von dritter Seite unterschiedliche F&E-Ergebnisse bzw. Verbundforschungsprojekte bekannt geworden, die inhaltliche Bezüge zu den verschiedenen, in ZwillE im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Digitalen Zwillings einer städtischen Entwässerungsinfrastruktur bearbeiteten fachlichen Themenfeldern aufweisen und die daher im Rahmen der inhaltlichen Projektarbeit aufgegriffen und berücksichtigt wurden.

In der Stadt Göteborg in Schweden wurde bereits 2015 die Arbeitsgruppe „Future City Flow“ gegründet, um verbesserte Werkzeuge und einen darauf basierenden Digitalen Zwilling als Entscheidungshilfe für die Echtzeitsteuerung des Kanalnetzes zu entwickeln. Auf Grundlage deterministischer Modellierung der hydrologischen Prozesse wurden historische Ereignisse zu Trainingszwecken analysiert und Steuer- und Regelstrategien für Pumpstationen und Verschlussorgane für Speicherräume automatisiert vorgeschlagen (forecast on demand). Diese Strategien können durch manuelles Eingreifen des Nutzers geändert werden, so dass der Digitale Zwilling in einen Beratermodus zurückkehrt. Eine Cloud-basierte GUI stellt Informationen zum aktuellen Zustand (z. B. gemessene Durchflussmengen und Füllstände), berechnete Abflüsse und Pegel an ausgewählten Punkten im Einzugsgebiet, aktuelle und berechnete Kanalüberstaumengen sowie vordefinierte Leistungsindikatoren für das Einzugsgebiet bereit (alles sowohl im Rückblick als auch als Vorhersage). Außerdem erfolgt dort eine visuelle Animation der Regenvorhersage und der Steuerstrategie. Als wichtigster Faktor für realitätsnahe Ergebnisse im Digitalen Zwilling stellte sich die Beschaffenheit der Niederschlagsvorhersagedaten heraus. Resultierend konnte eine deutliche Reduktion der Mischwasserentlastungen erreicht werden. Da das Projekt bzw. die Future

City Flow Initiative Bezüge zu der in ZwillE verfolgten Zielsetzung aufweist, wurden einzelne Aspekte v. a. in Bezug auf die Visualisierung von aktuellen Zustandsdaten des Entwässerungssystems sowie von Daten zur Niederschlagsprognose bei der Erarbeitung der integrierten kartenbasierten Ergebnisdarstellung im Rahmen des ZwillE Gesamtsystems berücksichtigt.

In dem vom Bundesministerium für Verkehr (BMV) geförderten Verbundforschungsprojekt SENSARE – Sensorbasierte Stadtgebietsanalyse für Starkregengefährdungen zur Warnung und Resilienzverbesserung der Verkehrsinfrastruktur (Laufzeit: 01.10.2018 bis 31.12.2021) (vgl. Kolesch et al. 2022) erfolgte in Berlin nach einem Nowcasting-Konzept, das auch in ZwillE zur Anwendung kam, eine kurzfristige Vorhersage der Intensität eines Regenereignisses. Auf dieser Basis wurden – ähnlich wie in ZwillE – Überflutungsszenarien mittels 2D-Oberflächenabflusssimulation berechnet, mit denen wiederum mögliche Szenarien für die Auswirkungen auf den Verkehr ausgegeben werden. Zusätzlich wurde in einem temporären Messprogramm eine Mischung aus berührungsloser Sensorik und Sensoren mit direktem Mediumkontakt sowohl an der Oberfläche als auch im Kanal eingesetzt.

Das vom Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) geförderte Forschungsprojekt „Wild abfließendes Wasser in urbanen Räumen“ (WAWUR) (Laufzeit: 01.07.2019 bis 30.06.2022) beschäftigte sich in Dresden mit der Ermittlung von Gefahren durch Starkregen für den Gebäudebestand und mit der Entwicklung von Maßnahmen zur Verminderung möglicher Schäden. Zur Einschätzung der aktuellen Niederschlagsentwicklung in ganz Dresden wurden DWD-Echtzeitdaten sowie eine 1,5 h-Regenprognose eingebunden. Ergebnis ist u. a. ein 3D-Starkregenportal für die Landeshauptstadt Dresden als frei verfügbare Anwendung, die den Bürger:innen helfen soll, die Risiken durch Starkregen an ihrem Wohngebäude besser einschätzen zu können und Handlungsmöglichkeiten zu entdecken, um mögliche Schäden zu vermindern oder sogar zu vermeiden. Bei vorhergesagtem Starkregen wird für die drei Testgebiete in den Stadtteilen Striesen, Löbtau und Klotzsche eine Überflutungsprognose angezeigt. Zudem werden historische Starkregenereignisse der Jahre 2000 bis 2018 im gesamten Stadtgebiet von Dresden in einer Auflösung von 500 m x 500 m angezeigt (dynamischer Verlauf, Regensumme, statistische Wiederkehrzeit inkl. Dauerstufe).

Das BMFTR-Verbundforschungsvorhaben KIWaSuS (Laufzeit: 01.04.2021 bis 31.03.2024) befasste sich mit dem intelligenten Management von Datenströmen und der Entwicklung von KI-Anwendungen für ein Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten. Frentrop et al. (2022) und Burrichter et al. (2022) berichten von der KI-basierten Vorhersage kanalinduzierter Überflutungen. Ein lernendes KI-Modell, das auf Basis von in Studien belegten ML-Verfahren arbeitet, berechnet für ein Niederschlagsereignis die maximale Überflutungssituation. Ziel bei der Modellentwicklung war dabei, den Unterschied zu den Ergebnissen der physikalisch basierten Berechnungsmodelle weitestgehend zu minimieren. Als ML-Verfahren wurden Neuronale Netze gewählt, da diese sich einerseits bei der Verarbeitung von Bild- und Videodaten als besonders effizient erwiesen haben und die Berücksichtigung unterschiedlicher Datenformate ermöglichen. Das Vorhersagesystem besteht aus zwei Modellen zur Vorhersage von Überstauvolumina und zur Vorhersage von Überflutungsflächen an der Geländeoberfläche sowie einem Low-Cost-Sensorsystem zur räumlich hochauflösenden Erfassung des Füllstandes im Kanalnetz. Das Projekt wurde im Februar 2024 im Rahmen eines Workshops zum WaX-Querschnittsthema „Modellierungen und Methoden aus der Informatik“ von Prof. Quirnbach von der Hochschule Ruhr West vorgestellt.

Am 01.04.2022 ist das vom BMFTR im Rahmen der Fördermaßnahme „DigitalGreenTech“ geförderte Forschungsprojekt „i-SEWER – Die nächste Generation der Kanalnetzsteuerung“ (FKZ: 02WDG1641; Laufzeit: 01.04.2022 bis 31.03.2024) gestartet, an dem der Projektpartner ifak mit seiner Modellierungsexpertise beteiligt war. Dieses Projekt hat die Erarbeitung von Kanalnetzsteuerungsstrategien mittels Methoden des Maschinellen Lernens zum Inhalt. Bezüglich der Abbildung von Steuerungskonzepten und der Nutzung von detaillierten hydrodynamischen Kanalnetzmodellen sowie der Visualisierung von Netzstrukturen konnten einzelne methodische Ergebnisse des i-SEWER-Projektes in ZwillE einfließen.

Am 01.05.2022 ist das vom Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) geförderte Forschungsprojekt FURBAS zur Entwicklung und Implementierung einer effizienten und nutzerfreundlichen Modellkette zur Frühwarnung vor urbanen Sturzfluten in Hannover

gestartet (FKZ: 67DAS224A-C; Laufzeit: 01.05.2022 bis 30.04.2025). Die SEH war dort als ausführende Stelle der Landeshauptstadt Hannover (LHH) vertreten. Ziel des Projektes war es, die in einem vorherigen BMFTR-Forschungsprojekt (EVUS – FKZ: 03G0846A bis D) entwickelten Methoden zur Niederschlags- und Überflutungsvorhersage weiterzuentwickeln und den kommunalen Institutionen (insbesondere Feuerwehr, Verkehrsleitung, ÖPNV, etc.) bereitzustellen, um dort eine frühzeitigere Kommunikation und Handlungsabstimmung zu ermöglichen. Neben der Fragestellung der Umsetzbarkeit und zuverlässigen Aussagefähigkeit der sehr aufwendigen hydrodynamischen 1D-/ 2D-Modellierung und Anwendung der Überflutungsvorhersage durch ein künstliches neuronales Netz-Modell (KNN) stand vor allem der mögliche Nutzen für die städtischen Akteure im Katastrophenfall (sowie ggf. eine spätere mögliche Bereitstellung der Vorhersage für die Bürger:innen) im Fokus des Projektes. Für die Stadtentwässerung Hannover stand das Vorhaben inhaltlich in Verbindung mit der Veröffentlichung der Starkregengefahrenkarten und der damit einhergehenden Beratung der Bürger:innen. Das Vorhaben weist trotz der Unterschiedlichkeit in Bezug auf die jeweils anvisierten Ziel- und Nutzergruppen und trotz des viel komplexeren und umfassenderen thematischen und räumlichen Betrachtungsraumes von ZWILLE gewisse Synergiepotential, z. B. im Bereich der Regenvorhersage als wesentlichem Faktor für die Erzielung realitätsnaher Überflutungsvorhersagen, auf, die durch den Projektpartner SEH vermittelt wurden.

Das vom BMFTR im Programm „Forschung für Nachhaltigkeit (FONA)“ geförderte Forschungsprojekt „Digitale, vernetzte und interaktive Wasserqualitätsüberwachung“ (DIWA) (Laufzeit: 01.09.2023 bis 28.02.2026) hat das Ziel, bereits vorhandene Sensorsysteme zur Wetterbeobachtung, zur Hydrodynamik sowie zum physikalischen, chemischen, biologischen und hygienischen Gewässerzustand digital zu vernetzen. Die im Gewässer online erfassten Messdaten, Satellitendaten, Labormessungen sowie historisch vorhandene Daten sollen digital miteinander verknüpft und mit einer Abflussvorhersage gekoppelt werden. Auf dieser Grundlage wird ein mit KI arbeitendes Frühwarnsystem zur Wasserqualität entwickelt, das exemplarisch an einer Trinkwassertalsperre (Wahnbachtalsperre) eingesetzt wird.

Beim DWD fanden Arbeiten im Rahmen des Projekts Sinfony (Seamless INtegrated FOrecastiNg sYstem) statt.³ Ziel von Sinfony ist ein integriertes Vorhersagesystem mit Ensemble-Nowcasts und numerischer Wettervorhersage (NWV), die mit einem „Rapid-Update-Cycle“ (RUC) häufiger aktualisiert werden, um bessere und aktuellere Kurzfristvorhersagen zu erreichen. Für den in ZWILLE entwickelten Digitalen Zwilling könnten die Änderungen der numerischen Wettervorhersagen relevant werden, da diese für das Blending von Nowcasts und NWV verwendet werden (aktuell: ICON-D2-EPS). Für das ZWILLE Online-System könnte zukünftig somit eine Umstellung auf die RUC-Vorhersagen sinnvoll sein, so dass dort aktuellere numerische Wettervorhersagen eingehen.

Laut aktuellen Studien (vgl. z. B. Rybka et al. 2023) bilden konvektionsauflösende Klimamodelle (Convection Permitting Models – CPM) im Vergleich zu regionalen Klimamodellen mit einer Auflösung von 12,5 km (entsprechend EURO-CORDEX, EUR-11) Niederschlag realistischer ab. Dieses Ergebnis wurde im Rahmen der Arbeiten zu Teil-AP 4.2 aufgegriffen und entsprechend berücksichtigt.

II.6 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse

Beim Verbundprojekt ZWILLE handelt es sich um ein praxisnahes Projekt mit direkter Umsetzung beim Projektpartner SEH, so dass eine schnelle und effektive Überführung der erzielten Ergebnisse in die Anwendungspraxis unter Berücksichtigung der regionalen und überwachungsrechtlichen Rahmenbedingungen in Niedersachsen gewährleistet ist. Der in ZWILLE entwickelte Digitale Zwilling verbindet komplexe, echtzeitfähige Modelle in einer geschlossenen Anwendung. Indem Kanalnetz, Kläranlagen und Gewässer gemeinsam betrachtet werden, eröffnet sich ein breites Spektrum an Verbesserungsmöglichkeiten für das Management von Wasser-Extremereignissen in Städten. Voraussetzung für einen solchen Digitalen Zwilling ist jedoch, dass alle relevanten Prozesse in Abhängigkeit von den verfügbaren

³ https://www.dwd.de/DE/forschung/forschungsprogramme/sinfony_iafe/sinfony_node.html

Eingangsdaten hinreichend modelliert sind. Bei der praktischen Umsetzung treten dabei verschiedene Herausforderungen auf: Neben der Verfügbarkeit und Anbindung von Messdaten sind insbesondere rechtliche Fragestellungen und IT-Sicherheitsaspekte zu klären – vor allem in Bezug auf Datenweitergabe und den Zugriff auf Systeme, die Teil Kritischer Infrastrukturen sind. Hinzu kommt, dass bestehende Messnetze oft nicht ausreichen und zusätzliche Sensorik installiert werden muss. Der Aufbau eines Digitalen Zwilling erfordert daher zu Beginn einen erheblichen Aufwand. Dieser Nachteil geht jedoch mit positiven Effekten einher: Die Implementierung zwingt dazu, bestehende Probleme zu identifizieren, praxisorientierte Lösungen zu entwickeln und klare Abläufe zu definieren, wodurch das Gesamtsystem und sein Management langfristig verbessert werden.

Die Entscheidungsunterstützung, die im Digitalen Zwilling transparent und für die Nutzer:innen nachvollziehbar eingebettet wurde, erleichtert und verbessert das Management von Extremereignissen insbesondere dann, wenn das über Jahre angesammelte Erfahrungswissen der Betriebsmitarbeitenden jederzeit digital verfügbar gemacht wird. In ZwiLE wurde zudem eine neuartige Methodik entwickelt, mit der sich aus einem detaillierten hydrodynamischen Kanalnetzmodell in wenigen Schritten automatisiert ein echtzeitfähiges, reduziertes Modell erzeugen lässt. Diese Automatisierung ist ein Novum und erlaubt es, vergleichbare Modelle für andere Stadtentwässerungssysteme mit geringem Aufwand bereitzustellen. Ebenfalls effizient aktualisierbar und übertragbar ist das neue Radar-basierte RadEF-Verfahren zur Abschätzung überfluteter Flächen; es eignet sich insbesondere für Städte mit ähnlichen Rahmenbedingungen wie Hannover, also einer überwiegend flachen Topografie, und stellt damit eine praktikable Alternative zu Machine-Learning-Ansätzen dar. Begrenzungen in der Genauigkeit der geschätzten bzw. prognostizierten Wasserstände sind bei Starkregenereignissen dabei weniger entscheidend als andere Unsicherheiten – etwa in der Niederschlagsvorhersage oder durch mögliche Verstopfungen von Gullys und Durchlässen. Deshalb erfüllt das RadEF-Verfahren wesentliche Voraussetzungen für den praktischen Einsatz.

Der Umgang mit Starkregen ist dabei eine kommunale Gemeinschaftsaufgabe, die über die Verantwortung des Stadtentwässerungsbetriebes hinausgeht. Bei extremen Ereignissen wird häufig ein Krisenstab gebildet, und proaktive Maßnahmen zur Minderung der negativen Auswirkungen im städtischen Raum werden zwischen Stadtentwässerung, Tiefbauamt, Polizei, Feuerwehr, Energieversorgern und weiteren Akteuren koordiniert und ergriffen. Für manche Maßnahmen – etwa das Absperren von Unterführungen – existieren bislang oftmals noch keine klar definierten Meldekettens und Abläufe. Die Verfügbarkeit von Echtzeitinformationen im Digitalen Zwilling schafft jedoch eine zentrale Voraussetzung, um solche Prozesse künftig zu entwickeln und in Abstimmung der Entscheidungsträger ergänzende Schutzmaßnahmen zu implementieren, die der Sicherheit der Bevölkerung dienen.

Als eine wesentliche Verwertungsstrategie für den ZwiLE Projektverbund ist demzufolge vorgesehen, den im Vorhaben entwickelten ganzheitlichen, interdisziplinär vernetzten Digitalen Zwilling nach Projektende entsprechend zu optimieren und um zusätzliche sinnvolle Funktionalitäten zu erweitern und diesen in der Folge in den technischen Infrastrukturen der SEH weiter zu betreiben und als Grundlage für ein proaktives Management von Wasser-Extremereignissen in Hannover sowie für die Durchführung szenariobasierter Aus-, Weiterbildungs- und Trainingsmaßnahmen für das Fachpersonal bei SEH zu nutzen. So befindet sich der Digitale Zwilling als abgesichertes, nicht öffentlich zugängliches Live-System, das fortlaufende Online-Simulationen und Vorhersagefunktionen bietet, bei der SEH aktuell im Probetrieb. Dabei stellte die gesicherte Einbindung von hydrologischen bzw. meteorologischen Echtzeitmessdaten von SEH-Bestandssensorik zunächst eine technische Herausforderung dar, die im Projektverlauf jedoch erfolgreich gemeistert werden konnte. Das ZwiLE Online-System steht dem technischen Betriebspersonal auf den beiden Leitwarten für Kanal- und Klärwerksbetrieb somit als ergänzendes, optionales Werkzeug parallel neben dem Prozessleitsystem zur Verfügung, wobei die Nutzung auf der SEH Führungsebene sowie mit dem örtlichen SEH Personalrat abgestimmt ist. Durch den Einsatz des Digitalen Zwilling wird ein identisches Lagebild mit einheitlichen Informationen auf beiden Leitwarten bereitgestellt, was die Koordination und Entscheidungsfindung erheblich verbessert. Die im Digitalen Zwilling bereitgestellten Vorhersageinformationen können dabei zunächst als Grundlage für die Initiierung vorbereitender Maßnahmen im Ereignisfall genutzt werden. Dazu gehören beispielsweise die frühzeitige Entlüftung von Pumpen oder die vorausschauende Positionierung mobiler Pumpen. Darüber

hinaus ist geplant, im weiteren Verlauf zusätzliche Erfahrungen zu den einzelnen Systemkomponenten des Digitalen Zwillings sowie zur Güte der unterschiedlichen bereitgestellten Vorhersagen und Simulationsergebnisse zu sammeln. Bei erfolgreichem Verlauf können die Informationen aus dem Digitalen Zwilling dann durch das Betriebspersonal auch im Kontext von (vorbereitenden) Steuerungsentscheidungen herangezogen werden. Perspektivisch sind für die Zukunft funktionale Weiterentwicklungen des Systems vorgesehen, die auf Anregungen aus der Evaluation des Digitalen Zwillings auf den beiden Leitwarten beruhen. Zu den potenziellen Erweiterungen zählen unter anderem die Einbindung von Blitzinformationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), eine ergänzende Netzansicht zur erwarteten Belastung der Hauptsammler, ein Ampelsystem sowie die Anzeige der aktuellen Stufe des betrieblichen Hochwasserplans. Diese Entwicklungen sollen dazu beitragen, das System weiter zu optimieren und die Effizienz im Umgang mit Wasser-Extremereignissen weiter zu steigern. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der in ZwillE entwickelte Digitale Zwilling bei der SEH im Probetrieb für Planung, Bau und Betrieb eingeführt wurde, von den Mitarbeitenden auf den Leitwarten und in der Planung akzeptiert ist und eine wesentliche Grundlage für die weitere Digitalisierung SEH-interner Informations- und Steuerungsprozesse im Zusammenhang mit einem proaktiven Management von Starkregenereignissen in Hannover darstellt.

Eine zweite Säule einer übergeordneten Verwertungsstrategie für das ZwillE Projektkonsortium stellt die Übertragung der erzielten Projektergebnisse auf andere Entwässerungsbetriebe und interessierte Kommunen außerhalb der Pilotregion Hannover dar. So lag der Fokus der zuvor beschriebenen Projektarbeiten und des dabei verfolgten Vorgehens stets auf der Erzielung einer hohen Offenheit und Übertragbarkeit der Herangehensweise auf andere Städte und Gemeinden. Im Ergebnis ist der entwickelte Ansatz mit einem moderaten Anpassungsbedarf (insbesondere zur Berücksichtigung alternativer städtischer Gegebenheiten) auch auf andere Anwendungsfälle jenseits von Hannover übertragbar und die einzelnen, in ZwillE entwickelten fachlichen Teilkomponenten des Gesamtsystems können auch für andere Städte als Grundlage für die Konzipierung und Entwicklung von analogen Digitalen Zwillingen zum Starkregen-Management dienen. Wichtige Voraussetzungen für einen erfolgreichen Transfer auf andere Anwendungskontexte sind dabei z. B. die frühzeitige Klärung von organisatorischen und rechtlichen Fragestellungen bzw. von Anforderungen für Kritische Infrastrukturen (KRITIS) in Bezug auf eine stadinterne Bereitstellung der erforderlichen meteorologischen und hydrologischen Modell- und Messdaten sowie der Bestands- und Infrastrukturdaten des Entwässerungssystems und die Einbindung der für die Entwicklung des Digitalen Zwillings erforderlichen externen Softwareanwendungen (z. B. das Simulationssystem SIMBA#).

Um eine derartige erfolgreiche Übertragung der ZwillE Projektergebnisse und ihren Transfer in die Praxis zu unterstützen und diese für Anwender:innen aus der Wasserwirtschaft, Verwaltung und Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, wurden das ZwillE Gesamtsystem sowie seine einzelnen fachlichen Teilkomponenten (Daten- und Kommunikationsinfrastruktur (DKI) für Digitale Zwillinge, Nachvollziehbare Entscheidungsassistenz für Digitale Zwillinge, Hochauflösende Niederschlagsdaten und -prognosen für Digitale Zwillinge, Echtzeitfähiges Verfahren zur Radar-basierten Überflutungsvorhersage, Vereinfachungsmethodik für die Kanalnetzmodellierung, Wissensbasis zu schwachstellenbezogenen Maßnahmen im Starkregenkontext) denn auch als innovative Produkte für den Innovationsatlas Wasser des BMFTR beschrieben.⁴ Ferner wurde ein öffentlich zugänglicher ZwillE Demonstrator mit einem historischen Niederschlagsereignis über die Projektwebseite sowie über die im Innovationsatlas Wasser veröffentlichten ZwillE Produkte bereitgestellt.⁵ Der Demonstrator fördert die Transparenz der Projektergebnisse und ermöglicht es interessierten Akteuren, direkt mit den entwickelten Technologien und Ansätzen zu interagieren und diese eigenständig zu erproben. Schließlich fanden vom gesamten ZwillE Projektkonsortium sowohl während der Projektlaufzeit als auch im Anschluss an das Projekt umfangreiche gemeinschaftliche sowie individuelle Aktivitäten zur Vernetzung, zur Diskussion und Verbreitung

⁴ <https://www.innovationsatlas-wasser.de/de/innovationsatlas-wasser/?funding-measures%5B%5D=wax&search-keyword=ZwillE>

⁵ <https://zwillE-demo.ifak.eu/> (User Name: demo; Password: Berlin25#)

der erzielten Projektergebnisse sowie zum praxisnahen Informationstransfer (z. B. über Veranstaltungen der Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (beispielsweise Kläranlagennachbarschaftstreffen) mit der externen (Fach-)Öffentlichkeit in Form von (Fach-)Publikationen, Vorträgen, Referaten, Workshopteilnahmen etc. statt (vgl. die Ausführungen im nachfolgenden Abschnitt II.8), die als Grundlage für entsprechende Gespräche mit anderen, an den ZwillE Ergebnissen interessierten Stadtentwässerungsbetrieben dienen. Dabei ist zum jetzigen Zeitpunkt bereits ein positives Interesse von mehreren weiteren Anwenderorganisationen zu verzeichnen, mit denen das ZwillE Projektkonsortium im Austausch steht und erste Gespräche in Bezug auf einen zukünftigen Ergebnistransfer führt.

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Im Rahmen des ZwillE Verbundvorhabens fand die Zusammenarbeit mit Dritten in vielfältiger Art und Weise statt:

Abstimmung mit stadtinternen Organisationen in Hannover

Eine zentrale Komponente der Zusammenarbeit mit Dritten war die Abstimmung und Rückkopplung mit den stadtinternen Organisationen in Hannover, die bei Wasser-Extremereignissen aktiv eingreifen. Die Stadtentwässerung Hannover (SEH), bei der seit 2015 auch eine Stelle zur Koordination der unterschiedlichen Aufgaben des städtischen Hochwasserschutzes angesiedelt ist, spielte hierbei eine entscheidende Rolle. Zum Hochwasserschutz in Hannover gehören u. a. Maßnahmen der SEH (Schutz des Kanalnetzes), des Tiefbauamts (Mobile Elemente, Deichtore, Deichkontrollen), der Feuerwehr Hannover (Katastrophenschutz), der Verkehrsbetriebe (Umleitung von Linienverbindungen, Schutz unterirdischer Anlagen) und der Stadtwerke (Sicherstellung der Stromversorgung). Die Aufgaben der Hochwasserschutzkoordination umfassen zudem die strategische Weiterentwicklung des Flusshochwasserschutzes in Hannover, wobei die Strategien ständig an die sich ändernden Rahmenbedingungen angepasst werden. In analoger Weise wurde der Hochwasserschutzkoordination im Jahr 2019 zudem die Verantwortung für das Thema Starkregen übertragen, da Starkregenereignisse als kommunale Gemeinschaftsaufgabe über den Zuständigkeitsbereich der SEH hinausgehen. Die Starkregenkoordinierung umfasst neben weiteren Dingen insbesondere die Implementierung von Überflutungsvorsorge-Maßnahmen für Starkregen in die administrativen und planerischen Abläufe der Verwaltung, die Entwicklung von Schutzkonzepten sowie die Information der Öffentlichkeit zu diesen Themen. Vor diesem Hintergrund fand während der Projektlaufzeit ein regelmäßiger Austausch zwischen den ZwillE Projektverantwortlichen bei SEH und den im Starkregenfall beteiligten weiteren städtischen Akteuren in Hannover statt. Zudem wurden in AP 6 beim Aufbau der Wissens- bzw. Fallbasis mit maschinenlesbaren Informationen zu Auswirkungen historischer Starkregenereignisse und zu möglichen Gegenmaßnahmen in den einzelnen Teilbereichen des Entwässerungssystems neben den Befragungen des SEH Betriebspersonals auf den Leitwarten für Kanalnetz- und Klärwerksbetrieb zudem dokumentierte Störungsmeldungen samt Informationen über Gegenmaßnahmen, welche die Ordnungsdienste, d. h. Polizei, Feuerwehr oder Katastrophenschutz, bei Überflutungsfällen an relevanten Lokationen im Stadtgebiet ergriffen haben, als weitere Quellen von vorhandenem Erfahrungswissen herangezogen und ausgewertet. Schließlich wurden durch den Projektpartner SEH wiederholt Arbeitsstände und Ergebnisse aus ZwillE an das vom Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) geförderte Forschungsprojekt FURBAS zur Entwicklung und Implementierung einer effizienten und nutzerfreundlichen Modellkette zur Frühwarnung vor urbanen Sturzfluten in Hannover (FKZ: 67DAS224A-C; Laufzeit: 01.05.2022 bis 30.04.2025) kommuniziert, an dem die SEH als ausführende Stelle der Landeshauptstadt Hannover (LHH) ebenfalls beteiligt war. Ziel von FURBAS war es, die in einem vorherigen BMFTR-Forschungsprojekt (EVUS – FKZ: 03G0846A bis D) entwickelten Methoden zur Niederschlags- und Überflutungsvorhersage weiterzuentwickeln und den kommunalen Institutionen (insbesondere Feuerwehr, Verkehrsleitung, ÖPNV, etc.) bereitzustellen, um dort eine frühzeitigere Kommunikation und Handlungsabstimmung zu ermöglichen.

Projektbegleitkreis aus assoziierten Projektpartnern

Es wurde ein Projektbegleitkreis aus assoziierten Projektpartnern etabliert, um Zwischenergebnisse aus ZwillE bereits während der Projektlaufzeit an weitere interessierte Akteure und Kommunen zu kommunizieren. Dieser Begleitkreis bestand aus der Region Hannover als wasserrechtlicher Genehmigungsbehörde der Stadt Hannover, der Stadtentwässerung Hildesheim sowie der Kommunalen Umwelt-Aktion (UAN) e. V., einem Verein in Trägerschaft des Niedersächsischen Städte- und Gemeindebundes, der in enger Abstimmung bzw. gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz mehrere Projekte im Kontext „Kommunale Starkregen- und Hochwasservorsorge“ bearbeitet hat und zudem das Starkregen-Netzwerk Niedersachsen betreibt. Mit diesem Projektbegleitkreis fand während der Projektlaufzeit ein regelmäßiger fachlicher Austausch samt Diskussion der verschiedenen, in ZwillE erarbeiteten Teilergebnissen statt. Zudem wurden Projektergebnisse auch im Rahmen von Veranstaltungen der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) in einem praxisnahen Informationstransfer vorgestellt und diskutiert, zuletzt im Oktober 2025, wo der Projektpartner ifs im Rahmen einer Veranstaltung zum Erfahrungsaustausch der Kläranlagen- und Kanalnachbarschaften des DWA-Landesverbands Nord einen Vortrag zum Thema „Der digitale Zwilling für die Stadtentwässerung“ gehalten und dabei den anwesenden Fachvertreter:innen die wesentlichen Ergebnisse des Verbundprojekts ZwillE näher vorgestellt hat. Im April 2026 werden Vertreter:innen der Stadtentwässerung Hannover die zentralen ZwillE Ergebnisse sowie erste Erfahrungen, die SEH mit dem Digitalen Zwilling im realen Praxiseinsatz gemacht hat, auf einer Veranstaltung des von der Kommunalen Umwelt-Aktion (UAN) e. V. betriebenen Starkregen-Netzwerks Niedersachsen gegenüber Bürgermeister:innen, Fachleuten aus den Kommunen sowie Entscheidungsträger:innen der Kommunalpolitik und Verwaltung präsentieren.

Mitwirkung an Veranstaltungen sowie der Öffentlichkeitsarbeit der Fördermaßnahme WaX

Schließlich war das ZwillE Projektkonsortium aktiv an Veranstaltungen beteiligt, die vom Vernetzungs- und Transfervorhaben Aqua-X-Net der Fördermaßnahme WaX – Wasser-Extremereignisse organisiert wurden. Dazu gehörten allgemeine Veranstaltungen wie die Auftakt-, Status- und Abschlussveranstaltungen des WaX-Verbundes, die periodischen Lenkungskreistreffen für die Verbundkoordinatoren sowie fachliche Workshops des Vernetzungs- und Transfervorhabens Aqua-X-Net zu verbundübergreifenden Querschnittsthemen (v. a. zu den beiden Themengebieten „Modellierungen und Methoden aus der Informatik“ und „Praxistransfer“). Zu einzelnen vorhabensbezogenen Themen (z. B. rechenzeitoptimierten Verfahren zur Überflutungsvorsorge, Case-based Reasoning Ansätze, Kanalnetzmodellierung) führte das ZwillE Projektkonsortium bilaterale Abstimmungen mit anderen WaX-Verbünden (z. B. EXDIMUM, InSchuKa4.0) durch.

Darüber hinaus unterstützten die ZwillE Projektpartner aktiv die gemeinsame Presse- und Öffentlichkeitsarbeit der Fördermaßnahme WaX, um die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projekts einem breiteren (Fach-)Publikum zugänglich zu machen. Neben der Mitwirkung an verschiedenen Tagungsbroschüren und Projektblättern hat das ZwillE Konsortium ferner an zwei Impuls- bzw. Informationspapieren zu den Themen „Starkregen und Sturzfluten“ sowie „Nutzung von Niederschlagsradar-Informationen zur Hochwasseranalyse: Möglichkeiten und Grenzen“ mitgearbeitet und entsprechende Beiträge geliefert. Außerdem wurden im Oktober 2024 aktuelle ZwillE Projektergebnisse im Rahmen eines WaX-Lunchtalks zum Thema „Management von Wasserextremen im urbanen Raum und Stadtentwässerung“ der Fachöffentlichkeit (Vertreter von Landes- und Bundesministerien sowie nachgeordneten Behörden, von kommunalen Verwaltungen etc.) vorgestellt.

Insgesamt zeigt sich, dass durch diese vielschichtige Zusammenarbeit mit WaX-internen und -externen Partnern eine umfassende Vernetzung und effektive Kommunikation der Projektergebnisse erreicht werden konnte, was eine entscheidende Voraussetzung für eine Verbesserung der Starkregenvorsorge auf Basis der in ZwillE erzielten Ergebnisse darstellt (vgl. hierzu auch die Ausführungen in den Abschnitten II.6 und II.8).

II.8 Erfolgte Veröffentlichungen, Vorträge, Referate etc.

Wie der nachfolgenden detaillierten Auflistung⁶ zu entnehmen ist, fanden während der gesamten Projektlaufzeit sowie im Anschluss an das ZwillE Verbundvorhaben umfangreiche gemeinschaftliche sowie individuelle Aktivitäten der ZwillE Projektpartner zur Vernetzung sowie zur Diskussion und Verbreitung der erzielten Projektergebnisse in und mit der externen (Fach-)Öffentlichkeit in Form von (Fach-)Publikationen, Vorträgen, Referaten, Workshopteilnahmen etc. statt. Im Jahr 2025 wurden diese Ergebnisverbreitungsaktivitäten nochmals verstärkt.

So führte das ZwillE Projektkonsortium **im Jahr 2025** eine Vielzahl von Aktivitäten zur Ergebnisverbreitung durch, um die Erkenntnisse und Ergebnisse des Projekts einem breiten Publikum zugänglich zu machen. Ein zentrales Ereignis war in diesem Zusammenhang die **WaX-Abschlusskonferenz**, die am 12. und 13. März 2025 in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften in Berlin stattfand. Die Konferenz diente als Plattform für den Austausch von Ergebnissen, die im Rahmen der einzelnen WaX-Verbundprojekte erarbeitet wurden, und ermöglichte es den Teilnehmenden, sich über aktuelle Herausforderungen und Entwicklungen im Bereich des Wasser-Managements auszutauschen. Zusätzlich fand vom 26. bis 28. März 2025 in Aachen die **Essener Tagung für Wasserwirtschaft** statt, bei der ebenfalls Ergebnisse des ZwillE Projekts vorgestellt wurden. Die Tagung bot einen passenden Rahmen für Diskussionen über Innovationen und praktische Lösungen in der Wasserwirtschaft und stellte sicher, dass die entwickelten Ansätze in der Fachgemeinschaft Gehör fanden. Des Weiteren wurden im September 2025 auf der **13. Urban Drainage Modelling Conference (UDM)** in Innsbruck zwei Konferenzbeiträge zu ZwillE Ergebnissen vorgestellt und mit den anwesenden wasserwirtschaftlichen Fachleuten diskutiert. Zudem wurde Dr. Manfred Schütze, der stellvertretende Geschäftsfeldleiter Wasser & Energie des ZwillE Projektpartners ifak, auf der UDM 2025 in Innsbruck für die im Rahmen von ZwillE genutzte und weiterentwickelte praxisgerechte Methodik zur Erzeugung hochperformanter Simulationsmodelle für Kanalnetze mit dem **AquaFin-Preis** zur Parameterschätzung von Kanalnetzmodellen ausgezeichnet. AquaFin ist der Betreiber von Kanalnetzen und von 328 Kläranlagen in Flandern (Belgien).

Am 23. September 2025 fand in den Räumlichkeiten des Anwendungspartners Stadtentwässerung Hannover schließlich die **Abschlussveranstaltung des WaX-Verbundvorhabens ZwillE** statt. Im Rahmen verschiedener Vorträge sowie Live-Vorführungen bot sich den anwesenden Vertreter:innen aus Hydrologie und Stadtplanung (i. e. Stadtentwässerung Hannover, Stadtentwässerung Hildesheim, Abwasserbetriebe Weserbergland, Kommunale Umwelt-Aktion UAN e. V. sowie die Region Hannover als wasserrechtliche Genehmigungsbehörde der Stadt Hannover) die Möglichkeit, sich umfassend über die in ZwillE erzielten Projektergebnisse und die verschiedenen innovativen Nutzungsmöglichkeiten des entwickelten Digitalen Zwillings in der Stadtentwässerung zur Unterstützung eines proaktiven Umgangs mit Starkregenereignissen zu informieren. Zudem entstand zwischen den Teilnehmenden der Veranstaltung und den Mitgliedern des Projektkonsortiums eine angeregte und fruchtbare Diskussion über Möglichkeiten zur Übertragung der Projektergebnisse auf neue Anwendungsbereiche jenseits der im ZwillE Vorhaben betrachteten Pilotregion Hannover.

Ein weiterer wichtiger Schritt zur Verbreitung der ZwillE Projektergebnisse war die Erstellung zweier **Fachbeiträge**, die im Dezember 2025 in der Fachzeitschrift „**Hydrologie und Wasserbewirtschaftung**“ (**HyWa**) bzw. im Januar 2026 in der Fachzeitschrift „**KW Korrespondenz Wasserwirtschaft**“ der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) erschienen sind. Die Beiträge zielen darauf ab, die wissenschaftlichen Erkenntnisse des Projekts einer breiten Leserschaft zu präsentieren und die praktische Relevanz der Forschungsergebnisse zu unterstreichen. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse zum ZwillE Gesamtsystem sowie zu den einzelnen fachlich-techni-

⁶ Dabei haben die in der Auflistung genutzten Schriftfarben die nachfolgende Bedeutung: blau = wissenschaftliche Konferenzbeiträge und Fachpublikationen; grau = Fachvorträge; gelb = Projektvorstellungen auf Messen und Industrie-Events; grün = Vernetzungsaktivitäten ohne eigenen Vortrag; schwarz = Sonstiges.

schen Teilkomponenten des Digitalen Zwillings als Produkte im **Innovationsatlas Wasser des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR)** veröffentlicht.⁷ Die Veröffentlichung dient dazu, die entwickelten ZwillE Lösungen und deren Anwendungsmöglichkeiten zu dokumentieren und für interessierte Fachleute und Entscheidungsträger zugänglich zu machen. Zudem wurde ein **öffentlich zugänglicher ZwillE Demonstrator** mit einem historischen Niederschlagsereignis über die Projektwebseite sowie über die im Innovationsatlas Wasser veröffentlichten ZwillE Produkte bereitgestellt.⁸ Der Demonstrator fördert die Transparenz der Projektergebnisse und ermöglicht es interessierten Akteuren, direkt mit den entwickelten Technologien und Ansätzen zu interagieren und diese eigenständig zu erproben.

Insgesamt spiegeln die seit Projektbeginn und insbesondere im Jahr 2025 durchgeführten Maßnahmen zur Ergebnisverbreitung das hohe Engagement des ZwillE Projektkonsortiums wider, die im Rahmen des Vorhabens erzielten Forschungsergebnisse nicht nur innerhalb der Wissenschaft, sondern auch in der praktischen Anwendung in der Wasserwirtschaft zu verbreiten und deren Eignung für eine Nutzung in weiteren Anwendungskontexten außerhalb des Pilotgebiets Hannover aufzuzeigen und hervorzuheben.

- 06.04.2022: Projektvorstellung im Rahmen einer öffentlichen Atos BreakfastTV Session zum Thema „Forschung & Entwicklung in Deutschland“ (Atos / Eviden)
- 06.05.2022: Teilnahme an der Vortragsveranstaltung „Urbanhydrologie“ u. a. mit den Themen „Modelle zur Überflutungsvorhersage in Städten“ und „Starkregenrisikomanagement in Niedersachsen“ (ifs)
- 31.05.2022: Projektvorstellung im Rahmen der Session „Innovationsforum Wasserwirtschaft“ auf der IFAT 2022 in München (Atos / Eviden)
- 21.06.2022: Durchführung eines öffentlichen Online-Seminars zum Thema „Simulation und modellbasierte prädiktive Regelung von ressourceneffizienten Anlagen am Beispiel von Kanalnetzen“ (ifak)
- 23.06.2022: Teilnahme am Fachtag Hydrometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft mit dem Thema „Hydrometeorologie im Klimawandel – Was gibt es zu tun?“ (h&m)
- 20.10.2022: Projektvorstellung im Rahmen der Session „Staatliche Resilienz / Krisenvorsorge“ auf der Smart Country Convention 2022 in Berlin (Atos / Eviden)
- 20.10.2022: Vortrag auf Einladung der Universität Québec: Real time control of wastewater infrastructure – Assessing different methods; Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique; Québec Ville (ifak)
- 16.11.2022: Teilnahme an einem Fachgespräch der Bündnis 90/Die Grünen Bundestagsfraktion zum Thema „Klimavorsorge: Stadtentwicklung neu denken“ (Atos / Eviden)
- 13.12.2022: Austausch mit dem DLR / Deutsche Raumfahrtagentur zur gegenseitigen Projektvorstellung und Vernetzung mit der Destination Earth (DestinE) Initiative der Europäischen Kommission (Atos / Eviden)
- 01.02.2023: Vortrag im Seminar „Generalentwässerungsplanung“ der Technischen Akademie Hannover: Einfalt, T.: Radar-Niederschlagsmessung – Aktueller Stand von Verfahren und Richtlinien, online (h&m)
- 02.02.2023: Vortrag im Seminar „Generalentwässerungsplanung“ der Technischen Akademie Hannover: Ristenpart, E. & Rüter, J.: Generalentwässerungsplanung in der Praxis und Ausblick auf neue Werkzeuge, online (ifs)

⁷ <https://www.innovationsatlas-wasser.de/de/innovationsatlas-wasser/?funding-measures%5B%5D=wax&search-keyword=ZwillE>

⁸ <https://zwillE-demo.ifak.eu/> (User Name: demo; Password: Berlin25#)

- 09.-10.03.2023: Teilnahme am 35. Lindauer Seminar zum Thema „Praktische Kanalisationstechnik – Zukunftsfähige Entwässerungssysteme“ (IAB)
- 21.-23.03.2023: Jasper-Tönnies, A.; Einfalt, T.; Schütze, M.; Ristenpart, E.; Strehz, A.: Fortschritte bei der Berechnung von Niederschlägen und Nowcasts aus Radarmessungen für Echtzeitanwendungen in der Stadthydrologie, Tag der Hydrologie, Bochum (h&m, ifak, ifs)
- 20.06.2023: Vortrag im Seminar „Generalentwässerungsplanung“ der Technischen Akademie Hannover: Einfalt, T.: Radar-Niederschlagsmessung – Aktueller Stand von Verfahren und Richtlinien, online (h&m)
- 21.06.2023: Vortrag im Seminar „Generalentwässerungsplanung“ der Technischen Akademie Hannover: Ristenpart, E. & Rüter, J.: Generalentwässerungsplanung in der Praxis und Ausblick auf neue Werkzeuge, online (ifs)
- 21.06.2023: Vortrag im Seminar „Generalentwässerungsplanung“ der Technischen Akademie Hannover: Pabst, M.: Herausforderung der integralen Planung aus Sicht einer Stadtentwässerung – Beispiele aus Hannover, online (SEH)
- 03.-07.07.2023: Schütze, M.; Förster, L.; Hübner, C.; Alex, J.: A digital twin platform for purpose-driven modelling, 11th Novatech Conference 2023, Lyon (ifak)
- 03.-07.07.2023: Jasper-Tönnies, A.; Einfalt, T.; Schütze, M.; Ristenpart, E.; Strehz, A.: Advanced real-time precipitation components for urban hydrological applications as part of a digital twin for the city of Hanover, 11th Novatech Conference 2023, Lyon (h&m, ifak, ifs)
- Vorstellung und Diskussion des Projektes in Planungsrunden der Stadtverwaltung der Landeshauptstadt Hannover (SEH)
- 20.- 21.09.2023: Vorstellung von ZwillE Projektergebnissen auf dem WaX-Statusseminar, Universität Potsdam (Atos / Eviden, SEH, h&m, ifs, ifak, IAB)
- 02.11.2023: Kolloquiumsvortrag: Schütze, M. (2023): Automatisierung mit Digitalen Zwillingen – Beispiel Kanalnetzsteuerung; VDI Arbeitskreis und Automatisierungstechnik; Mittelstand-Digital Zentrum Magdeburg, verfügbar auf: <https://youtu.be/6l5yk-KOk-4> (ifak)
- 09.11.2023: Vortrag im Rahmen der Bürger*innen-Vortragsveranstaltung „Klimawandel“: Pabst, M.: Wassersensible Stadtentwicklung – Herausforderungen und Entwicklungen im Umgang mit Wasser in der Stadt“, VHS Hannover (SEH)
- 01.2024: Schütze, M.: Simba regelt Verkehrsstau im Abwasserkanal – ifak Magdeburg entwickelt Simulationssystem für digitale Kanalnetzsteuerung; Mitteldeutsche Mitteilungen 1/2024, S. 24-25 (ifak)
- 17.-18.01.2024: Projektvorstellung im Rahmen der IAB-TAGE „Rohrbau“ (IAB)
- 07.03.2024: Teilnahme an 29. Thüringer Wasserkolloquium (IAB)
- 12.-14.03.2024: Teilnahme an der 13. Deutschen Klimatagung (h&m)
- 13.-17.05.2024: Posterpräsentation zum WaX-Verbundprojekt ZwillE auf der IFAT 2024 in München (ifak)
- 09.-14.06.2024: Schütze, M.; de Matos, K.; Schmidt, T.; Alex, J.: Scalable model simplification for hydrodynamic sewer system models; 16th Int. Conf. on Urban Drainage, Delft, June 2024 (ifak)
- 09.-14.06.2024: Abasi, H.; Schütze, M.; Duchesne, S.; Pelletier, G. (2024): Combining different measures for mitigating combined sewer overflows in the Québec-Beauport system; 16th Int. Conf. on Urban Drainage, Delft, June 2024 (ifak)
- 20.08.2024: Pabst, M.: Wassersensible Stadtentwicklung – Herausforderungen und Entwicklungen im Umgang mit Wasser in der Stadt“, 3. ÖKOPROFIT Klub Workshop Hannoverscher Firmen und Unternehmen zu den Themen Biodiversität und Klimaanpassung, Hannover (SEH)

- 13.09.2024: Jasper-Tönnies, A.; Kelvin, J.; Einfalt, T.; Hübner, C.; Schütze, M.: Sub-daily extreme precipitation trends: new insights from combining radar data and convection permitting climate simulations, 12th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD), Rom (h&m, ifak)
- 22.-24.09.2024: Ristenpart, E.; Enders, Y.; Krebs, A.; Tschirner-Vinke, G.; Tran, C.; Maßmann, S.; Jasper-Tönnies, A.; Schütze, M.; Hübner, C.; Krausewald, J.: Digitaler Zwilling zum KI-unterstützten Management von Wasser-Extremereignissen in der Stadt Hannover; Aqua Urbanica 2024 – Urbanes Niedrigwassermanagement: Herausforderungen – Möglichkeiten – Grenzen, Graz (ifs, Atos / Eviden, SEH, h&m, ifak, IAB)
- 27.09.2024: Pabst, M.: **Wassersensible Stadtentwicklung, Kommunaler Austausch der Städte Hannover und Freiburg (SEH)**
- 29.10.2024: Pabst, M.: ZwillE: Ein neuer Blick auf ein Wasser-Extremereignis: Ein digitaler Zwilling für Hannover, WaX-Lunchtalk: Wasserextreme im Fokus – Neue Impulse aus der Forschung, online & <https://www.youtube.com/watch?v=IQadhYYxSsA> (SEH)
- 11.2024: Schütze, M.: Skalierbare automatisierte Transformation hydrodynamischer Kanalnetzmodelle in vereinfachte hydrologische Modelle, gwf Wasser+Abwasser, Bd. 165 Nr. 11, November 2024, S. 77-82 (ifak)
- 27.11.2024: Vortrag im Seminar „Generalentwässerungsplanung“ der Technischen Akademie Hannover: Pabst, M.: Herausforderung der integralen Planung aus Sicht einer Stadtentwässerung – Beispiele aus Hannover, online (SEH)
- 18.-19.02.2025: Ristenpart, E.: Digitaler Zwilling zum Management von Wasser-Extremereignissen in Hannover; Göttinger Abwassertage (Technische Akademie Hannover) (ifs)
- 12.-13.03.2025: Vorstellung von ZwillE Projektergebnissen auf der WaX-Abschlusskonferenz, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin (Atos / Eviden, SEH, h&m, ifs, ifak, IAB)
- 26.-28.03.2025: Ristenpart, E.; Krebs, A.: Digitaler Zwilling zum KI-unterstützten Management von Wasser-Extremereignissen im urbanen Raum; 58. ESSENER TAGUNG für Wasserwirtschaft, Aachen, S. 38/1-38/13 (ifs, Atos / Eviden)
- 15.-19.09.2025: Schütze, M.; Hübner, C.; Maßmann, S.; De Toffol, S.; Krauß, B.; Pabst, M.; Alex, J. (2025): Automated set-up of a digital twin model of the sewer system of Hannover / Germany; 13th Urban Drainage Modelling Conference (UDM), Innsbruck, September 2025 (ifak, SEH)
- 15.-19.09.2025: Jasper-Tönnies, A.; Castro, B.; Einfalt, T.; Pimiento Castañeda, M.; Ristenpart, E.; Reinsch, A. (2025): Insight into the digital twin of Hannover: real-time modelling of flooded areas; 13th Urban Drainage Modelling Conference (UDM), Innsbruck, September 2025 (h&m, ifs)
- 23.09.2025: Abschlussveranstaltung des ZwillE Verbundvorhabens bei der Stadtentwässerung Hannover (Atos / Eviden, SEH, h&m, ifs, ifak, IAB)
- 10.2025: Veröffentlichung von Ergebnissen zum ZwillE Gesamtsystem sowie zu den einzelnen fachlich-technischen Teilkomponenten des Digitalen Zwillings als Produkte im Innovationsatlas Wasser des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) (Atos / Eviden, SEH, h&m, ifs, ifak, IAB)
- 10.2025: Verfügbarmachung eines öffentlich zugänglichen ZwillE Demonstrators mit einem historischen Niederschlagsereignis über die ZwillE Projektwebseite (www.zwille-projekt.de) sowie über die im Innovationsatlas Wasser veröffentlichten ZwillE Produkte (Atos / Eviden, SEH, h&m, ifs, ifak, IAB)
- 21.-22.10.2025: Ristenpart, E.: Der digitale Zwilling für die Stadtentwässerung; Vortrag bei einer Veranstaltung zum Erfahrungsaustausch der Kläranlagen- und Kanalnachbarschaften des DWA-Landesverbands Nord, Soltau (ifs)

- 12.2025: Jasper-Tönnies, A.; Schütze, M.; Krebs, A.; Ristenpart, E.; Hübner, C.; Maßmann, S.; Schmidt, J.; Tschirner-Vinke, G.; Pabst, M.; Castro, B.; Pimiento Castañeda, M.; Reinsch, A.; Einfalt, T.; De Toffol, S.: ZwillE – Entwicklung eines Digitalen Zwillings für die siedlungswasserwirtschaftliche Infrastruktur Hannovers, *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 69. Jg., Nr. 6, S. 303-320. DOI: 10.5675/HyWa_2025.6_2 (h&m, ifak, Atos / Eviden, ifs, SEH, IAB)
- 12.2025: Jasper-Tönnies, A.; Einfalt, T.; Castro, B.; Schütze, M.; Hübner, C.; Ristenpart, E.; Krebs, A.; Maßmann, S.; Pabst, M.; Schmidt, J.: An operational Digital Twin for the drainage system and natural waters in the city of Hanover; Beitrag eingereicht für die 12th Novatech Conference, Lyon, Juni / Juli 2026 (h&m, ifak, ifs, Atos / Eviden, SEH, IAB)
- 01.2026: Krebs, A.; Pabst, M.; Maßmann, S.; Jasper-Tönnies, A.; Ristenpart, E.; Hübner, C.; Krausewald, J.: ZwillE – Digitaler Zwilling zum KI-unterstützten Management von Wasser-Extremereignissen im urbanen Raum, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 19. Jg., Nr. 1, S. 17-19 (Atos / Eviden, SEH, h&m, ifs, ifak, IAB)
- 02.2026: Verfügbarmachung des öffentlichen ZwillE Verbundschlussberichts über die ZwillE Projektwebseite (www.zwille-projekt.de) (Atos / Eviden, SEH, h&m, ifs, ifak, IAB)

Schließlich wurden im Laufe des Verbundvorhabens von den Projektpartner zusammen mit unterschiedlichen Universitäten und Fachhochschulen insgesamt eine Bachelor- und sechs Masterarbeiten zu projektbezogenen Themen ausgeschrieben und fachlich betreut:

- Oktober 2022 bis April 2023: Masterarbeit zum Thema „Digitale Analyse von Extremwetterszenarien – Instanziierung eines Case-based Reasoning-Ansatzes zum Umgang mit hydrologischen Extremereignissen“, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. Betriebliche Informationssysteme, Universität Paderborn (Atos / Eviden)
- September bis November 2023: Bachelorarbeit zum Thema „Untersuchung der kontinuierlichen Messung der Wasserbeschaffenheit mit Multi-Parameter- und UV/VIS-Spektrometer-Sonden für ingenieurpraktische Anwendungen“, Fakultät Bau-Wasser-Boden, Siedlungsentwässerung / urbane Hydrologie, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften (ifs)
- Oktober 2023 bis März 2024: Masterarbeit zum Thema „Modellierung und immissionsorientierte Bewertung siedlungswasserwirtschaftlicher Einleitungen in Oberflächengewässer mit besonderem Fokus auf der notwendigen Datenbasis am Beispiel des Hirtenbachs in Hannover“, Zentrum für Fernstudien und universitäre Weiterbildung der Universität Koblenz-Landau (SEH)
- November 2023 bis Mai 2024: Bachelorarbeit zum Thema „Exploiting ontology-based data access for testing ensemble models in weather forecasts“, Institut für Informationssysteme, Universität Lübeck (h&m)
- Dezember 2023 bis Juni 2024: Masterarbeit zum Thema „Model simplification for model-based control of sewer systems“, Hochschule Magdeburg-Stendal (ifak)
- Februar 2024 bis Juli 2024: Masterarbeit zum Thema „Untersuchungen zum Zusammenhang von kommunalen Emissionen und der Gewässergüte unter Anwendung von UV/VIS-Spektrometern“, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Leibniz Universität Hannover (ifs)
- März 2024 bis August 2024: Masterarbeit zum Thema „An ensemble approach for the prediction of the flooding extent in an urban area“, Technische Hochschule Lübeck (h&m)

II.9 Literaturverzeichnis

Alex, J.; Jumar, U.; Tschepetzki, R. (1999): An empirical observer for wastewater treatment plants, European Control Conference.

Alex, J. (2021): Anwendungen digitaler Zwillinge bei der Planung und zur Betriebsunterstützung von Kläranlagen, Digital Tools & Twins, Digitale Woche DWA, 08.-12.03.2021.

Alex, J. (2024): Model-Based Construction of Wastewater Treatment Plant Influent Data for Simulation Studies. – Water, 16(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/w16040564>.

Alex, J., Schütze, M., Hübner, C., Ogurek, M. (2024): A multi-solver simulation environment for resilience analysis of drinking water and wastewater networks. – Water Practice and Technology, 10.2166/wpt.2024.216. DOI: 10.2166/wpt.2024.216.

Batty, M. (2018): Digital Cities: Big Data and Smart Urban Planning, The International Journal of Urban Sciences, Jahrgang 22 (2018), Nr. 2, S. 1-16.

Beeneken, T.; Erbe, V.; Messmer, A.; Reder, C.; Rohlfing, R.; Scheer, M.; Schütze, M.; Schumacher, B.; Weilandt, M.; Weyand, M. (2013): Real time control (RTC) of urban drainage systems – A discussion of the additional efforts compared to conventionally operated systems, Urban Water Journal, Jahrgang 5 (2013), Nr. 10, S. 293-299.

Bürger, G.; Heistermann, M.; Bronstert, A. (2014): Towards subdaily rainfall disaggregation via Clausius-Clapeyron, Journal of Hydrometeorology, Nr. 15, S. 1303-1311, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0161.1>.

Burrichter, B.; Koltermann da Silva, J.; Quirnbach, M. (2022): KI-basierte Vorhersage kanalinduzierter Überflutungen, in: Grün statt grau. Mit Blau-Grünen Infrastrukturen gemeinsam die Siedlungsentwässerung der Zukunft planen, Aqua Urbanica, Glattfelden, Schweiz, 14.-15. November 2022, S. 218-225.

Cannon, A. J.; Sobie, S. R.; Murdock, T. Q. (2015): Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?, Journal of Climate, Jahrgang 28 (2015), Nr. 17, S. 6938-6959.

Connected Urban Twins (2025): Urbane Digitale Zwillinge, <https://www.connectedurbantwins.de/urbane-digitale-zwillinge/>.

DWA (2020): Arbeits- und Merkblattserie 102-2 / BWK-A 3-2 – Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 12/2020.

DWA (2021): Arbeits- und Merkblattserie 102-3 – Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 3: Immissionsbezogene Bewertungen und Regelungen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 10/2021.

DWA (2024): Arbeitsblatt DWA-A 118 – Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 01/2024.

DWD – Deutscher Wetterdienst (2023): Koordinierte Starkregenauswertung und -regionalisierung des Deutschen Wetterdienstes, <https://dwd.de/kostra>.

EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, Amtsblatt Nr. L 327, <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>.

FIWARE (2024): The FIWARE Smart Water Reference Architecture, https://www.fiware.org/wp-content/uploads/FIWARE_ReferenceArchitecture_SmartWater.png.

FIWARE (2025): context.Orion-LD Broker, <https://github.com/FIWARE/context.Orion-LD/tree/develop/doc/manuals-ld>.

Frentrup S.; Schultheis H.; Quirnbach M.; Burrichter B., et al. (2022): Intelligentes Management von Datenströmen und KI-Anwendungen in KIWaSuS, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, Jahrgang 69 (2022), Nr. 4, S. 264-270.

Giorgi, F.; Gutowski, W. J. (2015): Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative, Annual Review of Environment and Resources, Jahrgang 40 (2015), S. 467-490, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>.

Hecker, D.; Döbel, I.; Petersen, U.; Rauschert, A.; Schmitz, A.; Voss, A. (2018): Zukunftsmarkt Künstliche Intelligenz – Potenziale und Anwendungen, Fraunhofer-Allianz Big Data.

Hübner, C.; Alex, J. (2018): Digitaler Zwilling im Wassermanagement 4.0, gwf Wasser | Abwasser.

Hübner, C.; Suchold, N.; Alex, J.; Thron, M.; Zipper, H.; Rieger, L. (2018): Offene Plattform für die Prozessoptimierung – Digitaler Zwilling im Wassermanagement 4.0, AUTOMATION 2018, Baden-Baden, 03.-04.07.2018, VDI Verlag GmbH.

ifak (2025): SIMBA#, Version 7, Manual. Institut für Automation und Kommunikation e. V., Magdeburg.

Iles, C. E.; Vautard, R.; Strachan, J.; Joussaume, S.; Eggen, B. R.; Hewitt, C. D. (2020): The benefits of increasing resolution in global and regional climate simulations for European climate extremes, Geoscientific Model Development, Jahrgang 13 (2020), Nr. 11, S. 5583-5607.

itwh (2023): HYSTEM-EXTRAN, Hydrodynamische Kanalnetzberechnung, Dokumentation, Version 8.6. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover.

Jasper-Tönnies, A.; Hellmers, S.; Einfalt, T.; Strehz, A.; Fröhle, P. (2018): Ensembles of radar nowcasts and COSMO-DE-EPS for urban flood management, Water Science and Technology, 2017, Nr. 1, S. 27-35.

Khelil, A.; Heinemann, A; Müller, D. (1993): Learning algorithms in a rule-based system for control of UDS, 6th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Niagara Falls.

Kolesch, D.; Neumann, J.; Scheid, C.; Engel, T.; Rentschler, C.; Langer, M.; Führ, A.; Reinhardt, M.; Radomski, S.; Sauter, D. (2022): Gemeinsamer Abschlussbericht des Verbundprojekts SENSARE – Sensorbasierte Stadtgebietsanalyse für Starkregen-gefährdungen zur Warnung und Resilienzverbesserung der Verkehrsinfrastruktur (https://sensare.infralab.berlin/wp-content/uploads/2022/04/Abchlussbericht_SENSARE.pdf).

Kolodner, J.; (1993): Case-Based Reasoning, Morgan Kaufmann Series in Representation & Reasoning, ISBN 978-1-55860-237-3.

Kouvaritakis, B.; Cannon, M.; Rossiter, J. A. (1999): Non-linear model based predictive control, International Journal of Control, Jahrgang 72 (1999), Nr. 10, S. 919-929.

Lehnert, N. (2019): Erfahrungswissen sichern, aber wie? Wissensmanagement 3/2019, S. 4-8 (https://www.steinbeis.de/fileadmin/content/SU_Profile_Flyer_Broschueren/1731-Erfahrungswissen-sichern-172638.pdf).

Lengfeld, K.; Walawender, E.; Winterrath, T.; Becker, A. (2021): CatRaRE: A Catalogue of radar-based heavy rainfall events in Germany derived from 20 years of data, Meteorologische Zeitschrift Jahrgang 30 (2021), S. 469-487.

LHH (2023): Die Starkregenauskunft Hannover, <https://www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Umwelt-Nachhaltigkeit/Wasser-Abwasser/Abwasser/Stadtentw%C3%A4sserung-Hannover/Hochwasserschutz/Allgemeine-Informationen/Die-Starkregenauskunft-Hannover>.

Mankowski, R. (2020): City-Scale Digital Twins for Flood Resilience, Water Finance & Management, <https://waterfm.com/city-scale-digital-twins-for-flood-resilience/>.

NLWKN (2012): Oberirdische Gewässer, Band 33.

NLWKN (2015): Oberirdische Gewässer, Band 36.

NLWKN (2017): Oberirdische Gewässer, Band 41.

NLWKN (2019): Oberirdische Gewässer, Band 42.

NLWKN (2021): Oberirdische Gewässer, Band 45.

Pabst, M. (2017): Vorkonfektionierte Abflusssteuerung für Kanalnetze. Dissertation; Leibniz-Universität Hannover, ISBN 978-3-921421-93-2.

Pichler, M., König, A.W., Reinstaller, S., Muschalla, D. (2024): Fully automated simplification of urban drainage models on a city scale. – Water Science and Technology, 90(9), 2673.

Pimiento, M. Castañeda (2024): An ensemble approach for the prediction of the flooding extent in the urban area of Hanover, Germany, Masterarbeit an der Technischen Hochschule Lübeck.

Pleau, M.; Colas, H.; Lavallee, P.; Pelletier, G.; Bonin, R. (2005): Global Optimal Real-Time Control of the Québec Urban Drainage System, Env. Mod. Software, Jahrgang 20 (2005); Nr. 4, S. 401-413.

Rieger, L. (2006): The EAWAG Bio-P Module for Activated Sludge Model No. 3. – Water Research, 35(16), 3887-3903. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00110-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00110-5).

Rieger, L.; Alex, J. (2013): Modellgestützte Regelung der Dosierung von Kohlenstoffquellen für mehrstufige Anlagen zur weitergehenden Stickstoffelimination, DWA-GMA-Gemeinschaftstagung Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen, 15.-16.10.2013, Fulda, ISBN 978-3-944328-44-7.

Rossa, A.; Liechti, K.; Zappa, M.; Bruen, M.; Germann, U.; Haase, G. (2011): The COST 731 Action: A review on uncertainty propagation in advanced hydro-meteorological forecast systems, Atmospheric Research Jahrgang 100 (2011), Nr. 2/3, S. 150–167.

Rybka, H.; Haller, M.; Brien, S.; Brauch, J.; Früh, B.; Junghänel, T.; Lengfeld, K.; Walter, A.; Winterrath, T. (2023): Convection-permitting climate simulations with COSMO-CLM for Germany: Analysis of present and future daily and sub-daily extreme precipitation, in: Meteorologische Zeitschrift, Jahrgang 32 (2023), Nr. 2, S. 91-111.

Schmitt, T.; Krüger, M.; Pfister, A.; Becker, M.; Mudersbach, C.; Fuchs, L.; Hoppe, H.; Lakes, I. (2018): Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex, Korrespondenz Abwasser, Abfall, Jahrgang 65 (2018), Nr. 2, S. 113-120.

Schmitt, T. (2022): Starkregen und urbane Sturzfluten – Agenda 2030.

Schütze, M.; Butler, D.; Beck, M.B. (2002): Modelling, Simulation and Control of Urban Wastewater Systems, Springer Verlag, ISBN 1-85233-553-X.

Schütze, M.; Ogurek, M.; Alex, J. (2017): Integrated modelling using a modern simulation framework, 14th Int. Conf. on Urban Drainage, Prague, 10.-15.09.2017.

Steensen, B. M.; Myhre, G.; Hodnebrog, Ø.; Alterskjær, K. (2025): How climate models reproduce the observed increase in extreme precipitation over Europe, PLOS Climate, 4, <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000442>.

Tao, F.; Zhang, H.; Cheng, Y. (2018): Digital Twin in Industry: State-of-the-art, IEEE Access, 6, 7084-7097. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.

Taylor, K. E.; Stouffer, R. J.; Meehl, G. A. (2012): An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, Bull. Amer. Meteor. Soc., Nr. 93, S. 485-498, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.

Vanrolleghem, P.A.; Kong, Z. D.; Coen, F. (1996): Full-scale on-line assessment of toxic wastewaters causing change in biodegradation model structure and parameters, Wat. Sci. Tech., Jahrgang 33 (1996), Nr. 2, S. 163-175.

Water World (2020): Digital Twins for Managing Water Infrastructure, <https://www.waterworld.com/water-utility-management/smart-water-utility/article/14173219/digital-twins-for-managing-water-infrastructure>.

Weijers, S.R. (2000): Modelling, identification and control of activated sludge processes for nitrogen removal, PhD. Thesis, Technical University of Eindhoven, The Netherlands.

Winterrath, T.; Brendel, C.; Hafer, M.; Junghänel, T.; Klameth, A.; Walawender, E.; Weigl, E.; Becker, A. (2017): Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie „RADKLIM“, Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Berichte des Deutschen Wetterdienstes 251.