

Alrun Jasper-Tönnies, Manfred Schütze, Alexander Krebs, Erik Ristenpart, Christian Hübner, Stefanie Maßmann, Joachim Schmidt, Gudrun Tschirner-Vinke, Michael Pabst, Bruno Castro, Melissa Pimiento Castañeda, Alida Reinsch, Thomas Einfalt, Sara De Toffol & Robert Fetter

Entwicklung eines Digitalen Zwillings für die siedlungswasserwirtschaftliche Infrastruktur Hannovers

Development of a Digital Twin for the Water and Wastewater Infrastructure of the City of Hanover

Das Projekt „ZWILLE“ gehört zur Fördermaßnahme Wasser-Extremereignisse (WaX) des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR, vormals Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF). Für die Stadtentwässerung Hannover (SEH) hat es einen Digitalen Zwilling entwickelt, welcher die Bereiche Kanalnetz, Kläranlagen und Gewässer umfasst. Ziel dieses Digitalen Zwillings ist eine Abbildung des Gesamtsystems in Echtzeit, um die Auswirkungen von Wasser-Extremereignissen besser managen zu können. Im Fokus stehen eine Reduktion von Mischwasserüberläufen und die Bereitstellung von Informationen zum Überflutungsrisiko. Darüber hinaus soll er dazu dienen, Problemstellen und Anpassungsbedarfe aufzuzeigen.

Um ausreichend Daten aus dem Kanalnetz zur Verfügung zu haben, wurden zusätzliche Messstellen und Sensoren installiert. Radar-niederschlagsmessungen und Kurzfristvorhersagen gehen dazu einerseits in die integrierte Simulation von Kanalnetz und Kläranlage im Simulationssystem SIMBA# ein und andererseits in eine Abschätzung des Überflutungsrisikos. SIMBA# dient als Simulationskern im Digitalen Zwilling zur Echtzeit-Modellierung des Wassersystems sowie zur Ableitung von Visualisierungen und Prognosen. Es wurde eine Methodik zur automatisierten Erstellung echtzeitfähiger Kanalnetzmodelle aus detaillierten Modellen adaptiert und für das Kanalnetz von Hannover angewendet. Dies erlaubt es, Aussagen und Prognoserechnungen bzgl. zu erwartender Mischwasserentlastungen zu machen und ggf. vorausschauend einzugreifen, um derartige Entlastungen zu verringern.

Zur schnellen Abschätzung des Überflutungsrisikos wurde dabei ein empirisch-statistisches Verfahren für den Einsatz im Digitalen Zwilling entwickelt. Das Verfahren nutzt Radarniederschläge und im Voraus berechnete Überflutungskarten und ermöglicht die Erstellung einer stadtweiten Überflutungskarte für eine aktuelle Niederschlagsituation in einer Prozessierungszeit von unter 5 min. Bei einer Auswertung von 10 realen Starkregenereignissen zeigte das Verfahren gute Ergebnisse im Vergleich zu den Referenzsimulationen mit einem gekoppelten Oberflächen- und Kanalnetzmodell. Der digitale Zwilling kann einerseits schnelle Veränderungen der Wettersituation abbilden, andererseits lassen sich Prognosekarten anhand von Ensemble-Vorhersagen berechnen.

Die Messdaten und Simulationsergebnisse werden im Digitalen Zwilling über eine Daten- und Kommunikationsinfrastruktur zusammengeführt und den Nutzenden über ein integriertes Front-End zur Verfügung gestellt. Das Visualisierungskonzept beinhaltet mehrere Ebenen, über die die Nutzenden einerseits einen schnellen Überblick zum Gesamtsystem erhalten, andererseits aber auch Detailinformationen aus einzelnen Bereichen einsehen können.

Der Digitale Zwilling wurde zunächst als Demonstrator umgesetzt, mit dem sich historische Ereignisse durchspielen lassen. Im nächsten Schritt wurde ein Prototyp des Digitalen Zwillings für den Echtzeitbetrieb aufgesetzt. Für diesen läuft derzeit die Einrichtung auf den Leitwarten der SEH, so dass er intern im laufenden Betrieb getestet werden kann.

Schlagwörter: Digitaler Zwilling, Ensemble-Vorhersagen, Entscheidungsassistenz, Handlungsempfehlungen, Modellvereinfachung, Radar-Nowcasts, Simulationsmodelle, Überflutung, Wissensbasis

The „ZWILLE“ project is part of the funding program „Water Extreme Events (WaX)“ of the Federal Ministry of Research, Technology, and Space (BMFTR, formerly the Federal Ministry of Education and Research, BMBF). It has developed a digital twin for Stadtentwässerung Hannover (SEH, Hanover city drainage), covering the areas of the sewer network, wastewater treatment plants and surface waters. The goal of the Digital Twin is to map the entire system in real-time in order to better manage the effects of extreme water events. Its focus is on reducing combined sewer overflows and providing information on flood risks. The identification of problem areas and necessary adaptations is also intended.

To ensure sufficient data availability from the sewer network, additional measurement stations and sensors were installed. Radar precipitation measurements and short-term forecasts are used, both for the integrated simulation of the sewer network and treatment plant within the SIMBA# simulation system and for flood risk assessments. SIMBA# serves as the simulation core of the Digital Twin, enabling the real-time modelling of the water system and the generation of visualizations and forecasts. A methodology for the automated creation of real-time capable sewer network models from detailed models was adapted and applied to Hannover's sewer network. This allows for statements and forecasts to be made regarding expected combined sewer discharges, and enables proactive interventions to reduce such discharges.

For a rapid flood risk assessment, an empirical-statistical method was developed for use in the Digital Twin. This method uses radar precipitation data and precomputed flood maps to generate a city-wide flood map for a current rainfall situation within a processing time of less than five minutes. An evaluation based on ten real heavy rainfall events demonstrated that the method yields good results compared to reference simulations with a coupled surface and sewer network model. The method allows both for the rapid representation of changing weather conditions and the generation of forecast maps based on ensemble predictions.

The measurement data and simulation results are integrated into the Digital Twin via a data and communication infrastructure and made available to users through an integrated front-end. The visualization concept includes multiple levels, providing users with both a quick overview of the system as a whole, and detailed insights into specific areas.

The Digital Twin was initially implemented as a demonstrator, allowing historical events to be simulated. In the next step, a prototype of the Digital Twin was developed for real-time operation. It is currently being implemented at the control rooms of SEH to be tested internally in operation.

Keywords: Digital Twin, Ensemble Forecasts, Decision Making, Recommendations for Actions, Model Simplification, Radar Nowcasts, Simulation Models, Flooding, Knowledge base

1 Einleitung

Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentationen physischer Objekte, Prozesse oder Systeme, die dynamisch aktualisiert werden, um die tatsächlichen Bedingungen und das Verhalten ihres physischen Gegenstücks widerzuspiegeln. In einem Smart-City-Kontext bieten Digitale Zwillinge hohe Potenziale, um urbane Infrastrukturen effizienter zu gestalten und um Entscheidungsfindungen zu unterstützen. Ein Digitaler Zwilling wird dabei durch die kontinuierliche Erhebung von 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 Optimierung von Abläufen und zur Vorbeugung von Problemen dienen. 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 dar (TAO et al., 2018), oder die Überwachung und Wartung städtischer Infrastruktur, wie Brücken, Straßen und Gebäude (BATTY, 2018). In Deutschland entwickeln die Städte Hamburg, München und Leipzig urbane digitale Zwillinge zur Unterstützung der Stadtplanung (CUT, 2025). Im Bereich Wasser und Abwasser gibt es erste Ansätze z. B. für den Betrieb von Kläranlagen (ALEX, 2021). Insgesamt ist 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.

In dem vom damaligen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), heute Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR), geförderten Verbundforschungsvorhaben „ZwiLLIE – Digitaler Zwilling zum KI-unterstützten Management von Wasser-Extremereignissen im urbanen Raum“ wird ein Digitaler Zwilling als virtuelles Abbild der städtischen Entwässerungsinfrastruktur am Beispiel der Stadt Hannover entwickelt, mit einer integrierten Betrachtung von Einzugsgebieten, Kanalnetz, Klärwerksverbund und oberirdischen Einleitungsgewässern. Dieser Digitale Zwilling stellt auf Basis von Echtzeitmessdaten den aktuellen Ist-Zustand des abgebildeten Entwässerungssystems dar. Durch die Integration von Niederschlagsvorhersagen wird zudem die zukünftige Entwicklung simuliert, was vorausschauende Szenarioanalysen ermöglicht. Diese dienen als Basis zur Ableitung von Handlungsempfehlungen, die dem Fachpersonal der Stadtentwässerung helfen sollen, Extremwetterereignisse durch gezielte Maßnahmen besser zu bewältigen.

Die Abbildung des aktuellen Zustands des Entwässerungssystems in einem Digitalen Zwilling setzt voraus, dass die Komponenten des Systems durch entsprechende echtzeitfähige Modelle beschrieben werden. Herkömmliche hydrodynamische Modelle, insbesondere von großen Netzen, sind dafür zu komplex und zu langsam. Als wesentliche Bausteine des Digitalen Zwillings wurden im Projekt ZwiLLIE daher ein echtzeitfähiges Kanalnetzmodell (Kap. 4.3) und ein Verfahren zu einer schnellen Abschätzung des Überflutungsrisikos (Kap. 4.4) entwickelt. Im vorliegenden Artikel steht die Beschreibung dieser Verfahren im Mittelpunkt. Außerdem wird das Gesamtsystem des Digitalen Zwillings vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf der integrierten Visualisierung und der Einbettung der Entscheidungsassistenz liegt (Kap. 5).

2 Einzugsgebiet und Ausgangslage

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. Durch seine Kanalnetzlänge von über 2.500 km gehört dieses von der Stadtentwässerung Hannover (SEH) betriebene Kanalnetz zu den drei längsten in Deutschland. Es 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 m³ Abwasser aus der Stadt und sechs Umlandgemeinden behandelt.

Das Kanalnetz der Stadt umfasst 65.000 Haltungen mit Profilen von bis zu 3 m. 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. Abbildung 1 gibt eine Übersicht über das Einzugsgebiet und die Hauptsammler des Schmutz- und Mischwassersystems. Zusätzlich leiten sechs Umlandgemeinden ihr Schmutzwasser zu den zwei Klärwerken.

Von der Stadtentwässerung Hannover (SEH) werden 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.

Als Modellbasis für den Digitalen Zwilling lieferte die SEH selbst erstellte hydrologische und hydrodynamische Modelle in 1D und 2D sowie gekoppelte 1D/2D-Kanalnetz- und Oberflächenmodelle und Schmutzfrachtmodelle. Darüber hinaus stellte sie

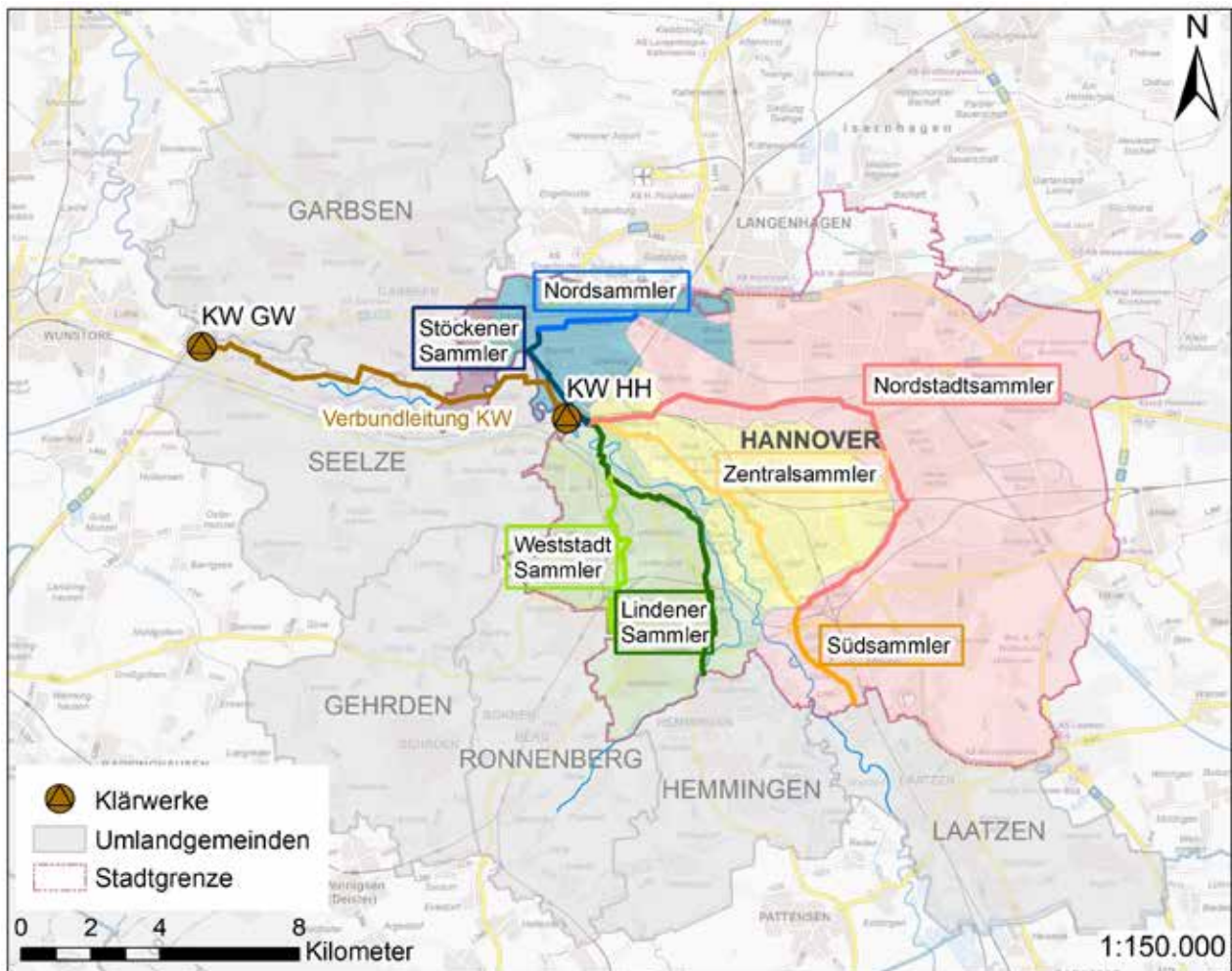


Abbildung 1

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

Hanover study area with the catchments, main collectors for wastewater, neighbouring municipalities, and the Gümmerwald (KW GW) and Herrenhausen (KW HH) wastewater treatment plants.

eine Emissionspotentialkarte nach DWA-A 102/BWK-A 3 (DWA & BWK, 2020), die Kartierung der Schutzkategorien entsprechend DWA-A 118 (DWA, 2024) und die im Internet veröffentlichten Starkregenhinweiskarten (LHH, 2023) zur Verfügung.

Aktuell basiert das Management von Wasserextremereignissen 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, wobei bisher keine Prognosedaten berücksichtigt werden. Lediglich die auf den Leitwarten verfügbare Radarvorhersage des DWD dient als Grundlage für manuelle Steuerungseingriffe des Betriebspersonals. Die Erstellung des Digitalen Zwillings soll es ermöglichen, Prognosedaten zu berücksichtigen und zukünftig auch integrierte Steuerungsansätze zu implementieren. Für die Integration des Digitalen Zwillings in den operationellen Betrieb sind mehrere Schritte erforderlich. Zunächst ist geplant, den Prototyp des Digitalen Zwillings als ergänzende Anwendung in den Leitwarten bereitzustellen. Die Anwendung wird getrennt vom Prozessleitsystem aufgesetzt, erhält aber aktuelle Mess- und Aktorikdaten der SEH zum Kanalnetz, den Kläranlagen sowie den Einleitungsgewässern, wobei der Datentransfer in abgesicherter Weise erfolgt (Kap. 4.1).

3 Daten und Methoden

3.1 Niederschlagsdaten

Die verwendeten Niederschlagsdaten basieren auf Messungen des Wetterradars des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Region Hannover (C-Band, Produkt SWEEP Niederschlags-Scan, verfügbar auf dem Open Data Server des DWD), mit einer Auflösung von 250 m x 1° und einem Zeitschritt von 5 min. Ergänzend kommen Stationsdaten von Regenschreibern des DWD und der Stadtentwässerung Hannover (SEH) zum Einsatz, die zur Aneicherung der Radardaten genutzt werden.

Die Aufbereitung der Daten erfolgt automatisiert mit der Software SCOUT (HYDRO & METEO, 2009) und umfasst mehrere Schritte. Zunächst werden Korrekturen durchgeführt, um Störungen wie Clutter und Strahlabschattung zu entfernen und eine Advektionskorrektur vorzunehmen (JASPER-TÖNNIES & JESSEN, 2014). Anschließend erfolgt eine flächengewichtete Umrechnung auf ein kartesisches 500 m x 500 m Raster. Schließlich werden die von Radar gemessenen Reflektivitäten per Z-R-Beziehung in Niederschlagsintensitäten umgerechnet. Ein Vergleich mit den Regenschreiberdaten mittels eines Faktorfelds dient dazu, diese „quasi“-anzueichen (STREHZ et al., 2021). Dafür werden die Niederschlagswerte der vorhergehenden drei Stunden berücksichtigt.

Die aufbereiteten Niederschläge kommen dann für Nowcasting und Blending mit numerischen Wettervorhersagen zum Einsatz, wodurch sich Nowcasting-Vorhersagen mit einem Vorhersagezeitraum von bis zu 2 h und, über Blending mit dem Vorhersagemodell ICON-D2/ICON-D2-EPS, Vorhersagen von bis zu 2 Tagen erzeugen lassen. Diese werden als Ensemble-Vorhersagen mit 10 Realisierungen gerechnet. Das Verfahren und eine Validierung der mit SCOUT berechneten Ensemble-Nowcasts sind in JASPER-TÖNNIES et al. (2017) beschrieben.

3.2 Echtzeitmessdaten Gewässer und Abwasseranlagen

Neben dem Niederschlag erfasst der Digitale Zwillings weitere dynamische Prozessdaten des Entwässerungssystems in Form von Echtzeitmessdaten von Wassermenge und -qualität. Das übergeordnete Messkonzept wurde unter Einbeziehung der Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie sowie des DWA-BWK-Arbeitsblatts A 102-2/BWK-A 3-2 bzw. des Merkblatts DWA-M 102-3 (DWA & BWK, 2020 bzw. DWA, 2021) hinsichtlich der Beurteilungspunkte im Gewässer sowie der Messgrößen entwickelt. Ziel ist die Erfassung sowohl der Emissionen aus Abwasseranleitungen als auch der Immissionen in den Gewässern.

Von den stationären Dauermessstellen des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) sowie der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sind kontinuierliche Wasserstanddaten und zugehörige Wasserstand-Abfluss-Kennlinien aus den Gewässern integriert. Die Stadtentwässerung Hannover liefert Betriebsmessdaten von Wasserständen in Kanalisation und Einleitungsgewässern, aber auch Pumpwerksförderleistungen, Schieberstellungen und Entlastungsraten aus der Kanalisation sowie Daten von den Kläranlagen.

Im Rahmen des Projekts ZWILLE fand ein zusätzliches, temporäres Messprogramm statt. Dazu wurde neue Messtechnik zur Erfassung der Abwasser- und Gewässerbeschaffenheit installiert, bestehend aus UV/VIS-Spektrometer-Sonden und Multi-Parameter-Sonden. Außerdem erfolgte der Einbau neuer Durchfluss- und Wasserstandmesstechnik zur detaillierten Erfassung der Hydraulik. Die Messstellen sind repräsentativ und wurden exemplarisch in einem Regen- und einem Mischwasserkanal kurz vor der Entlastungsschwelle sowie in den Gewässern stadteingangs und -ausgangs und unterhalb der betreffenden Einleitstellen platziert. Der kontinuierliche Betrieb der Messeinrichtungen begann schrittweise ab Dezember 2022.

Von den Multi-Parameter-Sonden werden mittels chemisch-physikalischer Prozesse nachfolgende Messgrößen erfasst:

- σ : Elektrische Leitfähigkeit
- T: Temperatur (zweifach, innerhalb Leitfähigkeits- und Sauerstoffsensor)
- O₂: Sauerstoff
- pH: Acidität
- NH₄⁺: Ammonium

Die Spektrometer-Sonden messen die Folgenden aus den Rohspektren abgeleiteten Parameter:

- AFS: Abfiltrierbare Stoffe
- AFS63: Abfiltrierbare Stoffe < 63 µm
- SS: Suspensierte Stoffe
- TOC: Gesamter organischer Kohlenstoff (total organic carbon)
- DOC: Organisch gelöster Kohlenstoff (dissolved organic carbon)
- CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf
- NH₄-N: Ammonium-Stickstoff
- NO₂-N: Nitrit-Stickstoff
- NO₃-N: Nitrat-Stickstoff
- Nges: Gesamter Stickstoff
- o-Phosphat-P: Ortho-Phosphat-Phosphor

- Pges: Gesamter Phosphor
- T: Temperatur
- h: Wasserstand (nur an den Gewässermessstellen)

Die Multi-Parameter-Sonden erfordern eine monatliche Kalibrierung. Im Messzeitraum kam es außerdem wiederholt zu Sensor-Ausfällen. Die Spektrometer, die Strahlung im UV- sowie im sichtbaren (VIS) Bereich nutzen, erfordern eine lokale Anwendungskalibrierung für die realen Wassermatrizen in Gewässer und Kanalisation; dazu gehören entsprechend umfangreiche begleitende Probenahmen und Laboranalysen. Basierend auf den gesammelten Erfahrungen sind die Multi-Parameter-Sonden nur bedingt für den Dauerbetrieb geeignet. Die Spektrometer-Sonden erfordern einen hohen Anfangsaufwand in der Kalibrierung, einem dauerhaften Betrieb steht aber nach aktueller Einschätzung nichts entgegen. 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 elementarer Bedeutung sind, stellen sie jedoch eine Basis für den Gewässerschutz dar, um zukünftige Veränderungen hinsichtlich der Gewässerbelastung zu dokumentieren und minimieren zu können.

3.3 Simulationssystem SIMBA#

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 (ALEX et al., 2024).

Als Ausgangsbasis für die Kanalnetzsimulation lag ein detailliertes, hydrodynamisches Kanalnetzmodell in der Software HYSTEM-EXTRAN (ITWH, 2023) vor. Dieses wurde auf die hydrodynamischen Module des SIMBA#-Simulators (IFAK, 2024) übertragen. Analog zu HYSTEM-EXTRAN berechnet auch SIMBA# den Abfluss in Kanalnetzen über das vollständige Saint-Venant-Gleichungssystem. Für die beiden Klärwerke wurden Modelle in der Software SIMBA#, Version 6 (IFAK, 2024), erstellt und aktualisiert; für die Modellierung der Fließgewässer und des Regenwassersystems kam ebenfalls das Simulationssystem SIMBA# zum Einsatz (SCHÜTZE & ALEX, 2022).

SIMBA# enthält eine breite Palette von Modulen für die Steuerung. Beispielsweise können Beobachtermodelle und darauf aufbauend eine modellbasierte prädiktive Steuerung, aber auch eine regelbasierte Wissensrepräsentation erfolgen, z. B. in der international standardisierten Steuerungssprache IEC 61131-3 (Structured Text). Des Weiteren lassen sich bei Bedarf KI-Module integrieren (OGUREK et al., 2024).

Das detaillierte hydrodynamische Modell von Hannover umfasst mehr als 30.000 Haltungen, 30.000 Schächte, 33.000 Teileinzugsgebiete sowie über 200 Sonderbauwerke wie Speicherbecken, Überlaufwehre, Pumpen und freie Auslässe. Auf die Herausforde-

rungen, ein derartiges Modell im Rahmen eines Digitalen Zwillings zu verwenden, wird in Kapitel 4.3 näher eingegangen.

3.4 Gekoppelte Überflutungssimulation

Extreme Starkregenereignisse stellen eine große Belastung für urbane Kanalsysteme dar. Zur Ermittlung von Kanalnetz- und Oberflächenabflüssen dienen hydraulische Berechnungen mit Simulationsmodellen. Das Projekts ZwiLIE nutzt für hydrodynamische Kanalnetz- und Überflutungsberechnungen das Softwarepaket HYSTEM-EXTRAN (ITWH, 2023). Die Ergebnisse werden für die Entwicklung und Validierung eines vereinfachten, echtzeitfähigen Verfahrens zur Abschätzung des Überflutungsrisikos verwendet (Kap. 4.4).

In HYSTEM-EXTRAN erfolgt die eindimensionale hydrodynamische Berechnung der Abflussprozesse im Kanalnetz. Die Erweiterung HYSTEM-EXTRAN 2D ermöglicht die zweidimensionale hydrodynamische Berechnung des Oberflächenabflusses auf Grundlage einer realitätsgerechten Berücksichtigung des Geländes. Eine bidirektionale Kopplung der beiden Softwarepakete gewährleistet einen Volumenaustausch des Kanalisations- und Oberflächenabflusses an den Kopplungsknoten, d. h. den Ein- und Auslässen der Kanalisation (DWA, 2024). Als Belastungsinput für die Simulationen dienen Euler-Modellregen mit verschiedenen Jährlichkeiten bzw. angeeichte Radar-Niederschlagsdaten für die Simulation von realen Ereignissen. Durch die aufwändige, gekoppelte Berechnung für das gesamte Stadtgebiet von Hannover ergibt sich eine relative lange Rechenzeit von einigen Stunden bis hin zu mehreren Tagen für die Simulation eines realen Niederschlagsereignisses.

4 Entwicklung des Digitalen Zwillings

Für den Aufbau des Digitalen Zwillings werden die im Kapitel 3 dargestellten Datengrundlagen und Modelle genutzt und in vier fachlichen Komponenten weiterentwickelt, hin zu einem integrierten und echtzeitfähigen System. Nachfolgend werden der Technische Systemaufbau (Kap. 4.1) sowie die Entwicklung der Komponenten (Kap. 4.2 bis 4.5) beschrieben; darauf aufbauend behandelt Kapitel 4.6 die Entwicklung einer Entscheidungsassistenz für Mitarbeitende der Stadtentwässerung Hannover (SEH).

4.1 Technischer Systemaufbau

Das Architekturkonzept des ZwiLIE-Gesamtsystems, einschließlich der Wechselwirkungen zwischen den vorgenannten fachlichen Komponenten, ist in Abbildung 2 dargestellt. Die softwaretechnische Umsetzung des Gesamtsystems des Digitalen Zwillings basiert auf diesem Konzept für die IT-Systemarchitektur sowie der Implementierung einer Daten- und Kommunikationsinfrastruktur (DKI) inklusive der zugehörigen Schnittstellendefinition, um die einzelnen Teilkomponenten zu einem Gesamtsystem zu integrieren. Das Architekturkonzept orientiert sich an der sog. FIWARE Smart Water Referenzarchitektur (FIWARE, 2024), die für den ZwiLIE-Anwendungsfall angepasst wurde. FIWARE stellt einen offenen Baukasten aus Open-Source-Software- und Plattformkomponenten zur Verfügung, um verteilte smarte Anwendungen für verschiedene Branchen effizient zu entwickeln.

Als zentrales, standardisiertes Schnittstellenformat wird NGSI-LD (Next Generation Service Interface Linked Data) genutzt. Spezielle Adapter, sogenannte Generic Enablers, machen es möglich, auch proprietäre Schnittstellen einzubinden, um z. B. mit der ins-

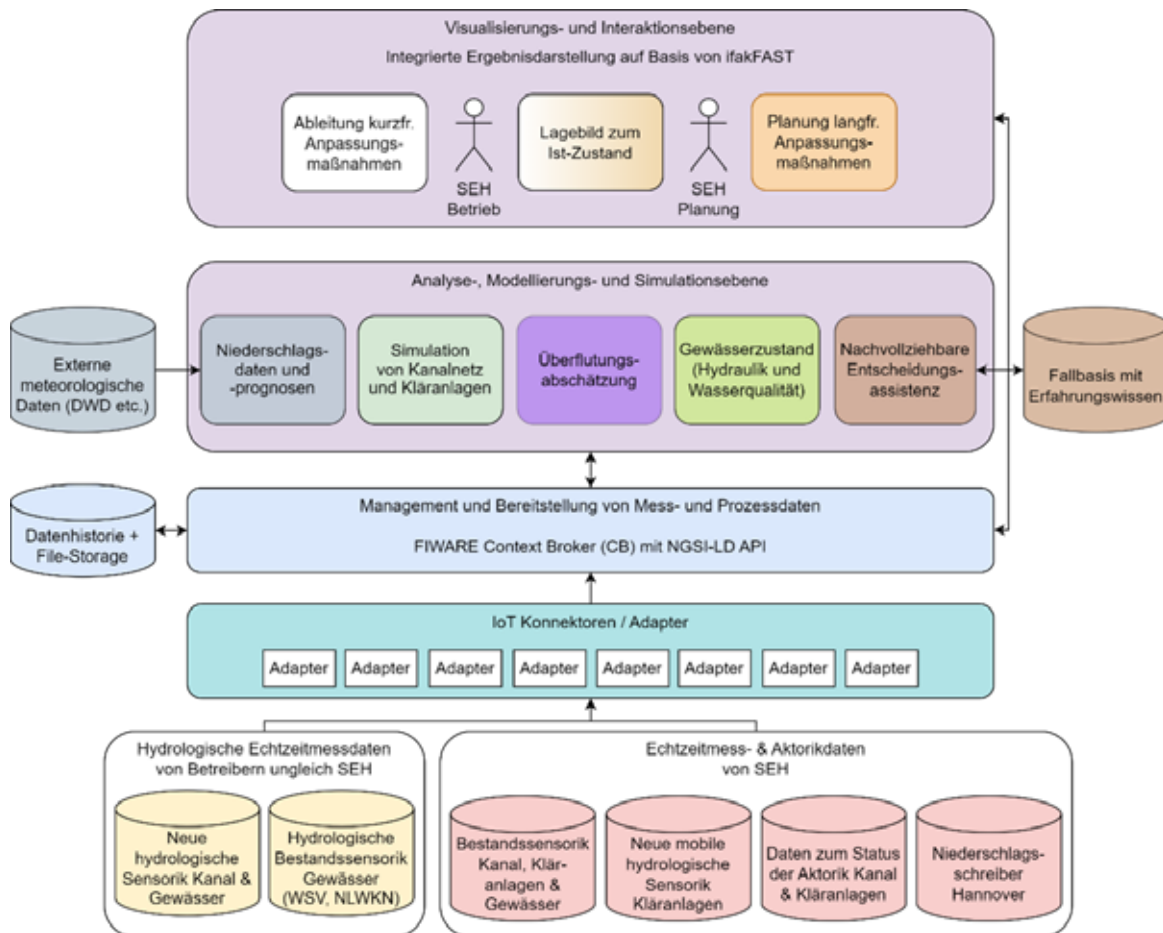


Abbildung 2
 Architekturkonzept für den Digitalen Zwillling.
 Outline of the architecture for the Digital Twin.

tallierten Sensorik zu kommunizieren. Ein zentraler Bestandteil der technischen Realisierung der DKI ist die Entwicklung einer Komponente zur Konfiguration und Verwaltung der Datenkommunikation mit dem sogenannten FIWARE Orion-LD Context Broker (FIWARE, 2025). Diese Komponente ermöglicht die Anbindung externer Datenquellen, z. B. über Gateways, an die DKI und unterstützt eine Vielzahl von Schnittstellen wie File, HTTP(S), SFTP, REST, MQTT oder CSV sowie verschiedene Datenbankformate. Dadurch können existierende Datensilos aufgebrochen und meteorologische und hydrologische Messdaten aus unterschiedlichen, verteilten technischen Systemen und Plattformen automatisiert in einer einheitlichen Struktur zusammengeführt werden.

Kritische Infrastruktur (KRITIS) muss besondere Anforderungen bezüglich Datensicherheit erfüllen. Um die verschiedenen Echtzeitmess- und Aktorikdaten zum Kanalnetz, den Kläranlagen, den Einleitungsgewässern sowie den im Stadtgebiet verteilten Niederschlagschreibern aus den SEH-Steuerungssystemen für den Digitalen Zwillling bereitzustellen, kommt daher eine entsprechend abgesicherte sogenannte Demilitarisierte Zone (DMZ) zum Einsatz. Dort werden die Daten der SEH mit den via verschlüsselter Kommunikation bereitgestellten Messdaten von technisch authentifizierten externen Betreibern wie NLWKN oder WSV kombiniert. Diese kombinierten Daten stehen dann den

weiteren Komponenten des Digitalen Zwillings zur Weiterverarbeitung zur Verfügung, wofür eine MQTT-basierte Kommunikationsarchitektur zum Einsatz kommt. Das Gesamtsystem des Digitalen Zwillings mit seinen verschiedenen Teilkomponenten wird in einem abgegrenzten Systembereich bei der SEH gehostet und ausgeführt, so dass es nur für SEH-Mitarbeitende zugänglich ist.

Für die Laufzeitimplementierung des Digitalen Zwillings ist das Open-Source-Framework ifakFAST (HÜBNER et al., 2018) in Verwendung. Dieses 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#. Zur Visualisierung der einzelnen Systemzustände in den Teilbereichen des Entwässerungssystems wurden spezielle Dashboards erstellt, die relevante Informationen mit Hilfe von Geokarten und Zeitreihendiagrammen darstellen. Das Front-End des Digitalen Zwillings mit einer integrierten Visualisierung der Systemzustände wird in Kapitel 5 behandelt.

4.2 Niederschlagsdaten und -prognosen für die Echtzeitanwendung im Digitalen Zwillling

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 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:

1. Die Rasterweite der Radardaten bei der Umrechnung der polaren Ausgangsdaten auf ein kartesisches Gitter von 1 km auf 0,5 km reduziert.
2. Ein verbessertes Verfahren der „Quasi“-Aneichung der Radardaten an Regenschreiberdaten implementiert. Da Regenschreibermessungen nur für einen zurückliegenden Zeitraum vorliegen, ist es nötig, zur Berechnung der Aneichparameter einen vergangenen Zeitraum zu betrachten, in dem überlappende Daten von Radar und Regenschreibern vorliegen. Um diese Informationen auf den aktuellen Zeitpunkt und das zuletzt gemessene Radarbild zu übertragen, wurde eine Advektionsberechnung ergänzt, unter Verwendung von Algorithmen wie der Zellerkennung, die auch beim Nowcasting zum Einsatz kommen.
3. Eine Advektionskorrektur der Messdaten durchgeführt und der Vorhersagezeitschritt von 5 min auf 1 min verkürzt. Dadurch lassen sich aggregierte Niederschläge genauer berechnen und künstliche, falsche Extremwerte bei hohen Zuggeschwindigkeiten bleiben aus.

Zwei weitere wichtige Aspekte sind die Kurzfristvorhersage und die Darstellung von Unsicherheiten mithilfe von Ensembles. Die Bandbreite der Ensemble-Nowcasts hängt davon ab, wie sehr Zellparameter wie die Größe und der Zugvektor von Niederschlagszellen in den zurückliegenden Zeitschritten variieren. Wie gut dies erfasst wird, bestimmt der Algorithmus zur Zellerkennung. Die Berücksichtigung von Eingangsdaten mit höherer Auflösung und von entsprechend angepassten Grenzwerten zur Wiedererkennung von Zellen, wie z. B. Mindestgröße, sowie eine Iteration der Zellerkennung über verschiedene Grenzwerte des Niederschlags erweitern den Algorithmus, sodass sich Zellen in verschiedenen Intensitätsniveaus erkennen lassen. Weiterhin wurden Parameter, die die Ensemble-Bandbreite beeinflussen, anhand der für Hannover aufbereiteten Daten aktualisiert, sodass das Modell Unsicherheiten besser abbildet.

Ein Beispiel für das resultierende Nowcast-Ensemble bei einem Starkregenereignis am 12. September 2023 über Hannover zeigt Abbildung 3. Dargestellt ist die Vorhersagesumme über 2 Stunden von 9 Ensemble-Realisierungen im Vergleich zum gemessenen Niederschlag. Der Messwert ist fast an jedem Ort innerhalb des Stadtgebiets in der Bandbreite der Ensemblevorhersagen enthalten. Für ein konvektives Starkregenereignis über einen

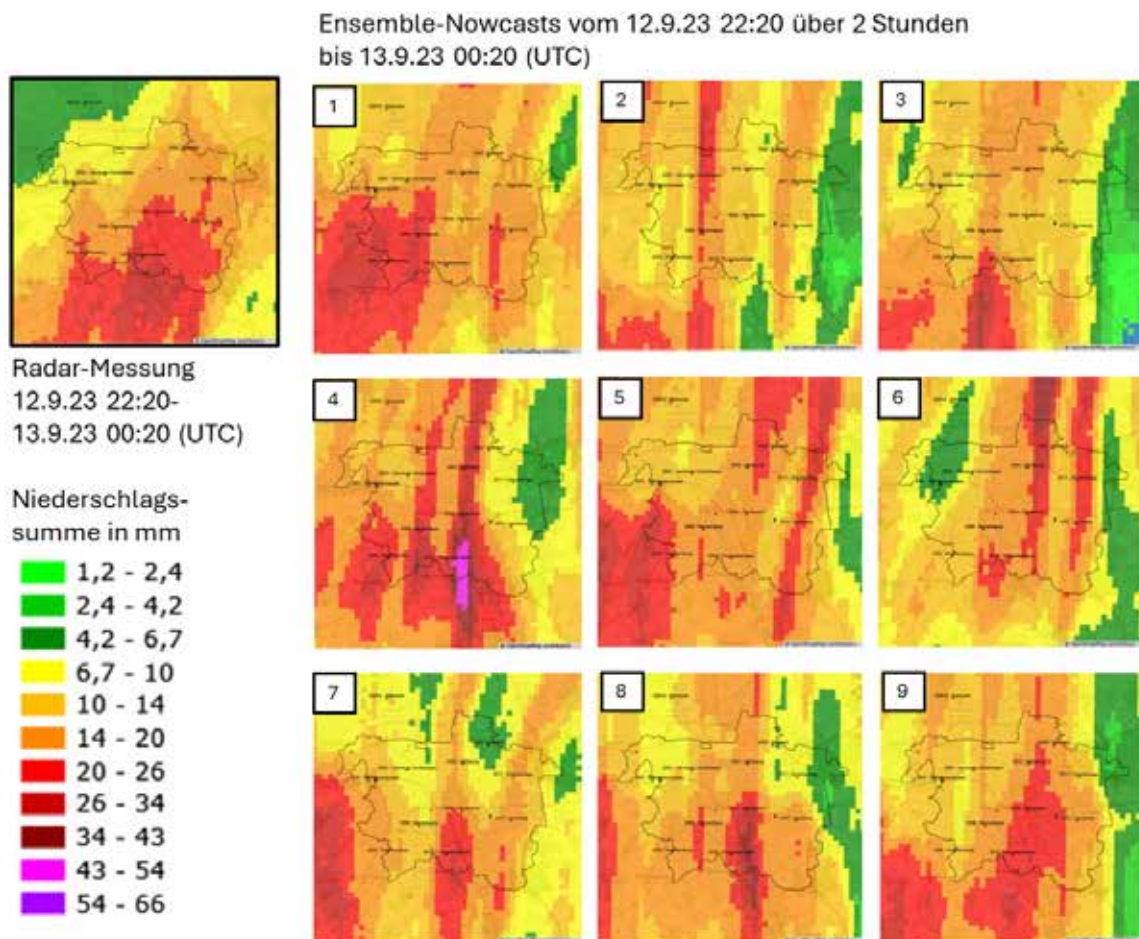


Abbildung 3

Gemessene Niederschlagssumme aus angeeichteten Radarmessungen (links oben) und Vorhersagesumme von Ensemble-Nowcasts (1-9) vom 12. September 2023, 22:20 Uhr, über 2 Stunden bis zum 13. September 2023 00:30 Uhr (UTC).

Measured aggregated precipitation from adjusted radar measurements (upper left) and forecast total ensemble nowcasts (1-9) from Sept 12, 2023, 22:20 until Sept 13, 2023, 00:30 UTC.

2-stündigen Vorhersagezeitraum stellt dies ein gutes Ergebnis dar, wie es in einer stichprobenhaften Auswertung über 12 Ereignisse nur bei ca. einem Drittel der Ereignisse gefunden wurde. Andererseits ist die räumliche Streuung recht breit und anhand der Ensemblevorhersagen ist nur eine leicht erhöhte Wahrscheinlichkeit dafür zu erkennen, dass das Ereignis den Süden der Stadt betrifft (5 von 9 Vorhersagen). Damit befindet sich die Vorhersage im mittleren, erwarteten Bereich.

Für die Darstellung im Digitalen Zwilling ist auch die statistische Einordnung der Niederschläge relevant. Gemessene Niederschläge werden dafür über verschiedene Dauerstufen aggregiert und in Hinblick auf die statistische Wiederkehrzeit, den Starkregenindex (SRI) nach SCHMITT et al. (2018) und den maximalen SRI in verschiedenen Dauerstufen ausgewertet. Die Auswertung erfolgt durch Vergleich mit der Koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung und -Auswertung des DWD (KOSTRA-DWD-2020) (DWD, 2023) für den jeweiligen KOSTRA-Rasterpunkt über Hannover.

Für den Digitalen Zwilling werden folgende Datenprodukte bereitgestellt und 5-minütig aktualisiert:

1. „Quasi“-angeeichte Radarmessung: Niederschlagsintensität und aggregierte Niederschläge über verschiedene Dauerstufen sowie maximaler SRI über die letzten 24 h,
2. Ensemble-Nowcasts: Vorhersagesummen und Niederschlagsintensität als Ensemble mit 10 Realisierungen,
3. Zeitreihen für 83 Kanal-Teileinzugsgebiete, welche das gesamte Stadtgebiet überdecken und aus einer Kombination von Radarmessungen und Ensemble-Nowcasts bestehen, als Eingangsdaten für das Modell SIMBA#.

4.3 Simulation von Kanalnetz und Kläranlagen im Digitalen Zwilling

Der Aufbau eines Digitalen Zwillings zur Echtzeitdarstellung des urbanen Wassersystems erfordert ein leistungsfähiges Simulationsmodell, insbesondere wenn prädiktive Simulationen entstehen sollen. Ebenso erfordern Simulationsstudien, die die Analyse einer großen Anzahl von Szenarien und/oder die Auswertung langfristiger Zeitreihen beinhalten, trotz aller Fortschritte in der Rechentechnik nach wie vor leistungsstarke Modelle. Herkömmliche hydrodynamische Modelle, insbesondere von großen Netzen, sind dafür zu komplex und zu langsam. Dies gilt auch für die meisten vereinfachten hydrodynamischen Modelle, wie sie heute üblich sind und an denen viel geforscht wurde (PICHLER et al., 2024). Diese Methoden beruhen in der Regel auf der Aggregation von Netzelementen, um u. a. die Courant-Bedingung zu erhalten. Ein anderer, sehr leistungsfähiger Ansatz wäre die Erstellung eines hydrologischen Modells. Eine vollautomatische Methode, die auf Domänenwissen basiert und auch für recht komplexe Netze geeignet ist, wurde bereits entwickelt (SCHÜTZE et al., 2024) und wird in dieser Arbeit für den realen Fall von Hannover erweitert und angewendet.

Hydrologische Modelle sind nicht in der Lage, wichtige hydrodynamische Effekte detailliert zu beschreiben, so dass sie nicht in allen Fällen ausreichend sind. Dies gilt insbesondere für das System von Hannover, wo einer der kritischsten Abwasserkanäle ein eher flacher Hauptkanal mit erheblichem Rückstau-, Überlauf- und Überlastungspotenzial ist. Daher wurde ein kombiniertes hydrologisch-hydrodynamisches Modell erarbeitet, das für die

Integration in einen Digitalen Zwilling für das komplexe Kanalnetz der Stadt Hannover geeignet ist. Darüber hinaus ermöglicht ein automatisiertes Verfahren der Modellvereinfachung eine kontinuierliche Aktualisierung des vereinfachten Modells, wenn sich Informationen im detaillierten Modell ändern, so dass in der Praxis der Modellanwendung ein Single-Source-Ansatz gewährleistet ist.

Ausgehend von dem bestehenden hydrodynamischen Detailmodell des Mischwasserkanalsystems der Stadt Hannover und nach Festlegung besonders wichtiger Elemente des Entwässerungssystems, z. B. Becken und Überlaufbauwerke, wird das von SCHÜTZE et al. (2024) entwickelte und diskutierte Verfahren der Modelltransformation in ein vereinfachtes hydrologisches Modell angewendet. Dieses Verfahren besteht im Wesentlichen aus den folgenden Schritten:

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.

Dieses automatisierte Verfahren ließ sich erfolgreich auf mehrere komplexe Kanalnetze großer Ausdehnung anwenden. Die ursprüngliche Methode wurde 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.

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 dienen 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 (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.

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 einem Überlauf aus einem der Hauptabwasserkanäle analysiert. Das hydrologische – noch nicht kalibrierte – 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 Kanalnetzes leicht zu überschätzen scheint. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für ein Starkregenereignis mit 50 mm Niederschlag.

Die Einrichtung des Digitalen Zwillings beginnt mit der Implementierung der Modelle des Kanalisationssystems und des Hauptpumpwerks, während die Kläranlagen und das Flusssystem in einem zweiten Schritt hinzugefügt werden. Die beiden Kläranlagen wurden dynamisch mit einer Bio-P-Erweiterung des Activated Sludge Models 3 (RIEGER, 2006) in SIMBA# abgebildet.

4.4 Echtzeitfähiges Verfahren zur Abschätzung von Überflutung

Die bisher verbreiteten Verfahren zur Simulation von Überflutung liefern entweder ungenaue Ergebnisse, z. B. reine 2D-Simulationen von Oberflächenabflüssen ohne Kanalnetz, oder sie sind sehr rechenaufwändig, da sie die gekoppelte Berechnung von Oberfläche und Kanal erfordern. Neuere Studien haben gezeigt, dass es mithilfe von Machine-Learning-Verfahren möglich ist, die Rechenzeit auf ein Minimum zu reduzieren und damit in Nahezeit Ergebnisse in guter Qualität zu erhalten (HOFMANN & SCHÜTTRUMPF, 2021; BERKHAHN & NEUWEILER, 2024). Die Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung ist allerdings ein großer Trainingsdatensatz, bestehend aus vielen hundert Ereignissen. Diesen für ein so großes Gebiet wie Hannover auf Basis von gekoppelter Modellierung zu erzeugen oder zu aktualisieren, ist sehr aufwändig.

Für den Einsatz im Digitalen Zwillings wurde ein neues, empirisch-statistisches Verfahren zur schnellen Abschätzung überfluteter Bereiche im Stadtgebiet entwickelt, „Radar-based fast Estimation of Flooding“ (RadEF). Das Verfahren verwendet als Eingangsdaten radarbasierte Niederschlagsinformationen sowie 7 vorgerechnete, stadtweite Überflutungskarten. Diese wurden auf Basis von Modellregen für Niederschläge mit statistischen Wiederkehrzeiten zwischen 2 und 100 Jahren durch gekoppelte 1D-2D-Simulationen mit HYSTEM-EXTRAN erstellt (Kap. 3.4). Die resultierenden Karten stellen den an jedem Ort maximal erreichten Wasserstand dar. Ähnliche Karten existieren als Starkregengefahrenkarten in vielen Kommunen.

Ebenfalls mit HYSTEM-EXTRAN wurden Überflutungssimulationen für 10 reale Niederschlagsereignisse zwischen 2002 und 2023 durchgeführt, wobei angeeichte Radardaten als

Eingangsdaten dienen (Kap. 4.1). Die Simulationsergebnisse wurden als Referenzdaten betrachtet, um darauf aufbauend das empirisch-statistische Verfahren zu entwickeln und zu validieren. Die Ergebnisse von 3 Ereignissen gingen in die Entwicklung ein, 7 Ereignisse wurden ausschließlich zur Validierung genutzt.

Das Verfahren RadEF besteht aus zwei Stufen: In der ersten Stufe werden radarbasierte Niederschlagsdaten über einen Zeitraum von 24 Stunden ausgewertet, der je nach Anwendungsfall entweder gemessene Daten oder gemessene Daten plus Vorhersagen umfasst. Aus diesem Zeitraum werden für 7 Dauerstufen – 15 min, 30 min, 60 min, 2 h, 6 h, 12 h, 24 h – jeweils die maximale aggregierte Niederschlagsmenge pro Rasterpunkt berechnet. Die Berechnung der Maxima erfolgt zusammengefasst für den Mess- und den Vorhersagezeitraum. Im Anwendungsfall mit 5-minütigen Daten gibt es 288 Datenpunkte pro 24 Stunden, wobei die aggregierten Niederschlagsmengen für die Dauerstufen 15 min, 60 min und 24 Stunden aus jeweils 3, 12 und 288 Datenpunkten berechnet werden. Daraus werden gleitend die Maxima berechnet, z. B. für die Dauerstufe 15 min aus 286 Werten, für die Dauerstufe 60 min aus 277 Werten, und für die Dauerstufe 24 Stunden geht genau ein Wert ein. Für die Auswertung der maximalen Niederschlagssummen pro Dauerstufe hinsichtlich ihrer statistischen Wiederkehrzeit nutzt das Modell den KOSTRA-Datensatz (DWD, 2023). Anschließend wird die maximal erreichte Wiederkehrzeit über alle 7 Dauerstufen pro Rasterpunkt bestimmt und als Karte mit einer Auflösung von 500 m gespeichert.

In der zweiten Stufe überführt das System diese Karte mithilfe der Überflutungskarten, die es auf Basis von Bemessungsregen vorgerechnet hat, in eine individuelle Überflutungskarte. Dies erfolgt unter der Annahme, dass für jeden Rasterpunkt diejenige vorgerechnete Überflutungskarte, die auf dem Bemessungsregen mit der gleichen Wiederkehrzeit basiert, die beste Schätzung für die Überflutungssituation am jeweiligen Ort darstellt. Für jeden Punkt wählt das Modell anhand der maximalen Wiederkehrzeit des Niederschlags die entsprechende Überflutungskarte aus, wobei es Punkte gleicher Wiederkehrzeit zusammenfasst. Die räumlichen Ausschnitte der zugehörigen, vorgerechneten Überflutungskarten werden für diese Rasterpunkte extrahiert. Die Berechnung für Rasterpunkte mit anderen maximalen Wiederkehrzeiten erfolgt analog, wobei jeweils der zugehörige Teil-

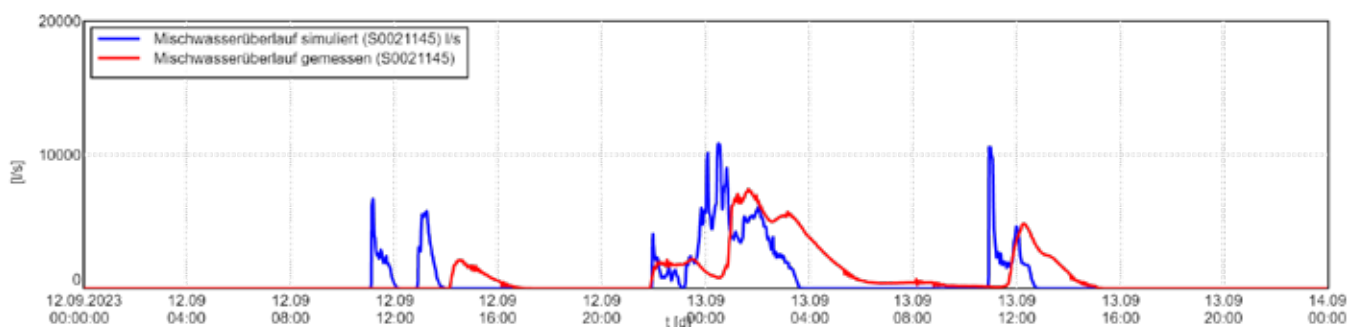


Abbildung 4

Gemessener und simulierter Überlauf an einem der wichtigsten Abschlagsbauwerke des Kanalnetzes (S0021145) während des Starkregenereignisses vom 12. bis 13. September 2023).

Measured and simulated overflow flow rates at one of the most important CSO locations of the sewer network (S0021145).

bereich aus der entsprechenden Überflutungskarte ausgeschnitten wird. Die so erzeugten Kartenausschnitte setzt das Modell im nächsten Schritt mosaikartig zu einer stadtweiten Überflutungskarte mit einer räumlichen Auflösung von 3 m zusammen. Die Berechnung und Verschneidung erfolgen mithilfe von Geoinformationssystemen (QGIS) und Python-gestützter Datenverarbeitung.

Die Rechenzeit für die Erstellung einer solchen, stadtweiten Überflutungskarte auf Basis realer Niederschlagsdaten beträgt weniger als 2 min. Aufgrund der kurzen Rechenzeit ist das Verfahren für die Abschätzung des Wasserstands in Echtzeit geeignet und sowohl auf gemessene als auch auf vorhergesagte Niederschlagsdaten anwendbar. Im Digitalen Zwilling werden für die Anwendungsfälle „I – Echtzeit“, „II – Vorhersage“ und „III – Max. Vorhersage“ jeweils eigene Überflutungskarten erstellt und alle 5 min aktualisiert. Die Karte „I – Echtzeit“ basiert auf den Niederschlagsmessungen der vergangenen 24 Stunden, die Karte „II – Vorhersage“ auf den Messungen über die vergangenen 22 Stunden plus Nowcasts über die kommenden 2 Stunden. Um die Karte „III – Max. Vorhersage“ zu berechnen, dient die maximale Niederschlagsvorhersage als Basis, d. h. das Maximum von 10 Ensemble-Nowcasts.

Die Ergebnisse des RadEF-Verfahrens zur Überflutungs-Abschätzung im Anwendungsfall „I – Echtzeit“ wurden mit Referenzdaten aus dem gekoppelten Oberflächen- und Kanalnetzmodell verglichen. Abbildung 5 zeigt den maximalen Wasserstand und eine Betrags-Differenzenkarte im Vergleich zur Referenzsimulation

exemplarisch für ein Starkregenereignis vom 12. bis 13. September 2023. Die Differenz beträgt an den meisten Orten weniger als 0,1 m, nur an wenigen Punkten wird ein Wert von 0,2 m überschritten.

Eine statistische Auswertung wurde anhand von 10 realen Starkregenereignissen durchgeführt, die zwischen 2002 und 2023 in Hannover auftraten. Darunter sind sowohl kurze, konvektive als auch länger andauernde Ereignisse sowie Serien von Starkregen, die aus einer Abfolge von mehreren kurzen Ereignissen mit Niederschlagspausen dazwischen bestehen. Aus dieser Gruppe von 10 wurden 6 kurze Ereignisse mit einer Dauerstufe von 1 bis 4 Stunden außerdem zur Validierung der vorhergesagten Wasserstände genutzt, über eine Nachrechnung im „Hindcast“-Modus. Zur Validierung kam eine Stichprobenmethode mit einer zufälligen Punktauswahl in der GIS-Software QGIS zum Einsatz. Die Ergebnisse des RadEF-Verfahrens wurden für jedes Ereignis durch einen direkten Vergleich des simulierten Wasserstands mit den Referenzwerten an rund 100.000 Punkten im Stadtgebiet bewertet. Die Auswertung umfasste die Qualitäts-Parameter Pearson-Korrelation, mittlerer Quadratische Fehler (Root Mean Square Error, RMSE) sowie Mittlerer Absoluter Fehler (Mean Absolute Error, MAE). Dazu wurden Parameter für das Überschreiten eines Grenzwerts von 0,5 m Wasserstand ausgewertet: die Trefferquote (Probability of Detection, POD), der Anteil der Falschen Alarme (False Alarm Ratio, FAR), wobei ein falscher Alarm für eine Grenzwertüberschreitung in RadEF, aber nicht in der Referenzsimulation steht, und der Kritische Erfolgs-Index (CSI für Critical Success Index).

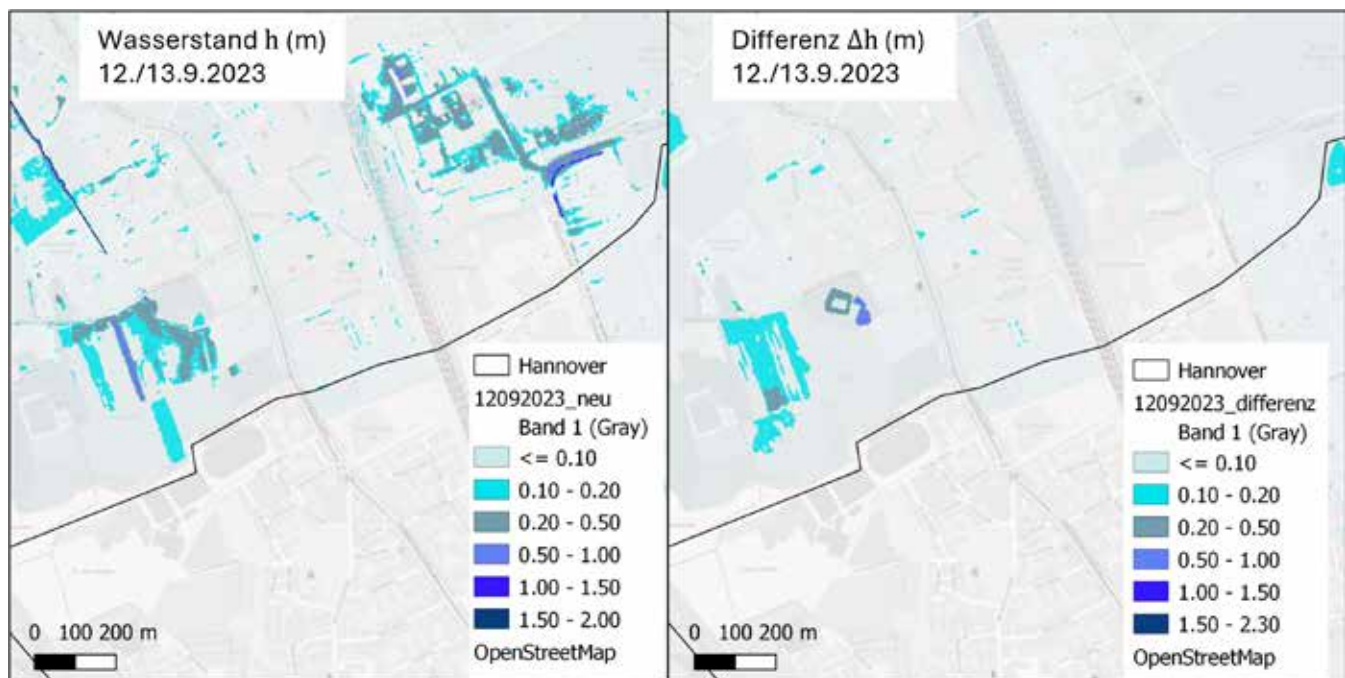


Abbildung 5 Maximaler Wasserstand in m berechnet mit dem schnellen Schätzverfahren RadEF (links) und Differenzenkarte Δh (rechts), die die Beträge der Differenzen zur Referenzsimulation mit dem gekoppelten Modell HYSTEM-EXTRAN zeigt. Dargestellt ist ein Ausschnitt von Hannover für ein Starkregenereignis vom 12. bis 13. September 2023. *Maximum water level in m as calculated with the RadEF rapid estimation technique (left) and map of differences Δh (right), showing the absolute values of the differences compared to the reference simulation with the coupled HYSTEM-EXTRAN model. A section of Hannover is shown for a heavy rain event of Sep 12 to Sep 13, 2023.*

Die Ergebnisse des Anwendungsfalls „I – Echtzeit“ sind in Tabelle 1 aufgeführt. Bei allen Ereignissen gibt es eine hohe Korrelation zwischen den mit RadEF simulierten maximalen Wasserstandshöhen und den Referenz-Wasserständen, mit einem minimalen Wert von 0,72 und einem Durchschnitt von 0,81. Der mittlere RMSE beträgt 0,05 m und der MAE 0,01 m, bei einem mittleren Wasserstand von 0,02 m. Im Durchschnitt beträgt die Trefferquote 72 % für eine Grenzwertüberschreitung von 0,5 m ($w > 0,5$ m). Der Anteil der falschen Alarme liegt bei 34 %. Tendenziell werden die Wasserstände bei den kurzen Ereignissen mit einer Dauer unter 3 Stunden etwas überschätzt und bei den längeren mit einer Dauer von 24 h und länger unterschätzt.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der vorhergesagten, maximalen Wasserstände im Anwendungsfall „II – Vorhersage“, jeweils eine Stunde vor Ereignisende. Die Vorhersagegüte variiert von Ereignis zu Ereignis. Die Trefferquote für eine Grenzwertüberschreitung von 0,5 m liegt im Mittel relativ nah am Wert für den Echtzeitfall, 64 % gegenüber 72 %, wohingegen der Anteil der falschen Alarme wesentlich höher ist, 69 % gegenüber 34 %. Der CSI liegt bei 0,28, womit die Vorhersagequalität „am Punkt“ äh-

lich ausfällt wie bei aktuellen Verfahren zur Niederschlagsvorhersage. Vergleichbare Werte wurden beispielsweise in einer Studie von AYZEL & HEISTERMANN (2025) ermittelt, für die Vorhersagegenauigkeit aggregierter Niederschläge über eine Stunde mit Grenzwerten von 5 bis 10 mm/h.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist es wichtig, die Unsicherheiten während eines Starkregenereignisses zu berücksichtigen, die aus der Niederschlagsmessung und -vorhersage, aber auch aus Unsicherheiten im Abflussverhalten resultieren, wie sie z. B. durch verstopfte Gullys oder Durchlässe entstehen. Die Ergebnisse deuten an, dass die Ungenauigkeiten des RadEF-Verfahrens im Vergleich zur Referenzsimulation nicht wesentlich ins Gewicht fallen, etwa wenn es um kurzfristige Entscheidungen während eines Starkregens geht. Gleichzeitig bestätigen sie die insgesamt bestehenden, hohen Unsicherheiten bei der Vorhersage von Starkregen und Überflutung, wie sie auch in anderen Studien beschrieben werden (SIDERIS et al., 2020; HOFMANN & SCHÜTTRUPF, 2021; AYZEL & HEISTERMANN, 2025). Für die Entscheidungsunterstützung im Starkregenfall ist es wichtig, diese Unsicherheiten zu berücksichtigen, beispielsweise bei der

Tabelle 1
 Ergebnisse der maximalen Wasserstandshöhen bei einer Grenzwertüberschreitung von 0,5 m ($w > 0,5$ m), abgeleitet mit dem RadEF-Verfahren für den Anwendungsfall „I – Echtzeit“ im Vergleich zur Referenzsimulation von 10 Starkregenereignissen im Zeitraum 2002 bis 2023. Mit * markierte Ereignisse gingen in die Entwicklung des Verfahrens ein.
*Results of the maximum water level based on RadEF for a threshold exceedance of 0,5 m ($w > 0,5$ m) for the use case "I – real-time" in comparison with the reference simulation of 10 heavy rain events in the period 2002 to 2023. Events marked with * were used in the development of the procedure.*

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	0,30	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	0,80	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

Tabelle 2
 Wie Tabelle 1, aber für den Anwendungsfall „II – Vorhersage“ zum Zeitpunkt $t - 60$ min, d. h. eine Stunde vor Ereignisende, im Vergleich zur Referenzsimulation von 6 Starkregenereignissen im Zeitraum 2002 bis 2019.
Same as table 1, but for the use case "II - forecast" at time $t - 60$ min, i.e., one hour before the end of the event, in comparison with the reference simulation of 6 heavy rain events in the period 2002 to 2019.

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

Festlegung, anhand welcher Datenbasis – der Überflutungskarte „I – Echtzeit“ oder „II – Vorhersage“ – Maßnahmenvorschläge erfolgen sollen.

Das RadEF-Verfahren bietet gegenüber KI-basierten Ansätzen wie neuronalen Netzen (NN) oder Convolutional Neural Networks (CNN) mehrere Vorteile. Die Übertragbarkeit und die Aktualisierung sind wesentlich einfacher, da kein umfangreiches Training mit großen Datenmengen benötigt wird. Zudem ist das Verfahren transparent und schrittweise nachvollziehbar, was das Verständnis von Simulationsergebnissen erleichtert. Gerade im Fall von Starkregenereignissen, bei denen unzutreffende Vorhersagen und Fehlalarme immer mitgedacht werden müssen, stellt die Erklärbarkeit einen Vorteil gegenüber Black-Box-Modellen wie NN oder CNN dar. Das RadEF-Verfahren kann eine Alternative, aber auch eine sinnvolle Ergänzung zu KI-basierten Methoden darstellen, um Vergleichsdaten zu generieren und im Ereignisfall eine robustere Entscheidungsgrundlage zu schaffen. Ein weiterer Aspekt des RadEF-Verfahrens ist, dass es einen klaren Zusammenhang zwischen Niederschlag und Überflutung nutzt und herausstellt. Die Darstellung dieses Zusammenhangs kann als Anregung dafür dienen, Hinweiskarten zu Starkregengefahren in Verbindung mit aktuellen Niederschlagsdaten zu verwenden und zu interpretieren.

4.5 Darstellung von aktuellen Messdaten im Digitalen Zwilling

Der Digitale Zwilling verarbeitet die erfassten Echtzeitmessdaten, synchrone Ergebnisse der Simulationsmodelle von Kanalisation und Kläranlagen sowie spezielle Informationen an den Gewässern. Angezeigt werden sowohl aktuelle Messwerte als auch per Simulation vorhergesagte Prozessdaten. Zusätzliche Layer für frei wählbare Teilbereiche des Gesamtsystems sind anwählbar mit:

- alphanumerischen Anzeigen weiterer vorausgewählter Messgrößen in Info-Fenstern, mit farblicher Kennzeichnung von Warn-, Melde- und Auslösestufen,
- Gangliniendarstellung vorausgewählter Messgrößen einer Messstelle und Simulationsergebnisse, einschließlich Vorhersagedaten an Modellknoten, mit veränderlichem Zeitfenster per Zoomfunktion,
- Gangliniendarstellung von Hydraulik sowie Abwasser- und Wasserbeschaffenheit mit ihren Abhängigkeiten für vorausgewählte, interessante Teilbereiche; z. B. Überlaufereignisse und Regenwasser-Einleitungen und die daraus resultierenden qualitativen Effekte im Gewässer,
- Darstellung stufenweiser Schutzmaßnahmen aus dem städtischen Hochwassereinsatzplan bei Überschreitung von Grenzwasserständen an den Gewässerpegeln, in Info-Fenstern.

Die vorausgewählten Gangliniendiagramme erlauben die Abbildung des Prozessgeschehens sowohl an einzelnen interessanten Punkten des Entwässerungssystems als auch entlang des Fließwegs in Gewässer und Kanal. Diese übersichtliche Darstellungsform unterstützt bei Ursache-Wirkungsanalysen der Zustände von Hydraulik und Wasserbeschaffenheit. Die Auswirkungen von empfohlenen Eingriffen ins System lassen sich zudem im Voraus abschätzen.

4.6 Aufbau einer nachvollziehbaren Entscheidungsassistenz zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

Als weitere Teilkomponente des Digitalen Zwillings wurde eine Entscheidungsassistenz entwickelt, die das Betriebspersonal bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen für den Umgang mit Extremwetter Szenarien unterstützen soll. Diese Assistenz basiert auf einer erweiterbaren Wissens- bzw. Fallbasis und nutzt nachvollziehbare, regelbasierte Ansätze.

Um das vorhandene Erfahrungswissen nutzbar zu machen, wurde zunächst eine Wissens- bzw. Fallbasis aufgebaut. Dazu fanden eine Untersuchung möglicher Quellen von explizitem und implizitem Wissen beim Netzbetreiber sowie Befragungen des Betriebspersonals statt. Im Fokus standen die Leitwarten für Kanalnetz- und Klärwerksbetrieb, denn dies sind die verantwortlichen Stellen zur Veranlassung von kanal- und klärwerksbezogenen Maßnahmen. Als weitere Quellen für den Aufbau der Wissens- bzw. Fallbasis fungierten Informationen über Gegenmaßnahmen, welche die Ordnungsdienste, d. h. Polizei, Feuerwehr oder Katastrophenschutz, bei Überflutungsfällen an relevanten Lokationen im Stadtgebiet ergriffen haben, sowie Informationen aus vorhandenen Dokumentationen, z. B. Betriebsanweisungen und dem Hochwassereinsatzplan. Die resultierende Wissensbasis enthält maschinenlesbare Informationen zu Auswirkungen historischer Starkregenereignisse und zu möglichen Gegenmaßnahmen in den einzelnen Teilbereichen des Entwässerungssystems.

Gegenstand der Betrachtung sind u. a. Pegelstände in den Flüssen, Wasserstände in den einzelnen Sammlern und Überflutungshöhen an der Oberfläche. Durch Vergleiche mit zuvor festgelegten Grenzwerten werden Warnstufen bestimmt und dazu passende, warnstufen-spezifische Maßnahmenvorschläge für die verschiedenen, im Starkregenfall betroffenen städtischen Akteure abgeleitet. Exemplarische Maßnahmen auf Basis der Überflutungsvorhersage an potenziellen Problemstellen führt Tabelle 3 auf. Die Wissensbasis stellt in Kombination mit Messwerten und Simulationsergebnissen die Basis für die Ableitung von Handlungsempfehlungen dar. Es ist vorgesehen, dass Erweiterungen des Erfahrungswissens im Digitalen ZwiLLIE

Tabelle 3
Exemplarische oberirdische Maßnahmen auf Basis der Überflutungsvorhersage.
Exemplary above-ground measures based on the flooding forecast.

Ort	Geokoordinaten		Art der Lokalität	Überflutungshöhe y in m	Handlungsempfehlung
Stadtteil 1/Musterstr. 1	X,XX ° W	Y,YY ° N	Schulgelände	y > 0,3	Warnung „Überflutungsgefahr“ auf digitaler Hinweistafel an Schule und Parkplatz anzeigen
Stadtteil 1/Musterstr. 2	X,XX ° W	Y,YY ° N	Innenhof/Straße	y > 0,5	Warnung: „Überflutungsgefahr – Nutzung einstellen/ Autos entfernen“, auf digitaler Hinweistafel anzeigen, Absperrung/Evakuierung in Betracht ziehen

ling halbautomatisch generiert und manuell ergänzt werden können.

5 Integrierte Visualisierung und Entscheidungsassistentz im Digitalen Zwilling

Durch Anwendung des Digitalen Zwillings greifen Teilkomponenten ineinander und werden derart kombiniert, dass am Schluss Handlungsempfehlungen für die Betriebsmitarbeitenden der Stadtentwässerung Hannover (SEH) abgeleitet werden können. Das Visualisierungskonzept ist darauf ausgerichtet, dass sowohl Mitarbeitende aus dem Bereich Kanal als auch aus dem Bereich Klärwerke jeweils die Informationen effizient abrufen können, die für sie relevant sind. Das Front-End ist mehrstufig aufgebaut. Die oberste Ebene dient als Übersichtsebene dazu, einen schnellen Überblick über die Gesamtsituation zu erlangen. Auf einen Blick soll ersichtlich sein, ob sich alle Systembereiche im Normalzustand befinden oder ob es Anlass für eine genauere Betrachtung gibt. Dazu werden Bereiche farblich hervorgehoben, in denen Belastungssituationen auftreten oder Grenzwerte überschritten werden. Darunter liegt die Detailebene, die die Systemzustände in den Teilbereichen des Entwässerungssystems darstellt.

Die Übersichtsebene ist in vier Karten gegliedert, die jeweils die wichtigsten Informationen zur aktuellen Situation auf Basis von Mess- und Vorhersagedaten zusammenfassen (Abb. 6). Die vier Karten zeigen:

1. die Niederschlagsituation im Stadtgebiet als maßgebliche Belastungsgröße,
2. die Belastung im Kanalnetz und den Kläranlagen einschließlich der Eingangspumpwerke,
3. die Belastung an der Oberfläche in Form einer Risikokarte für das Auftreten von Überflutungen,
4. den Zustand der Gewässer und Einleitungen hinsichtlich Hydraulik und Wasserqualität.

Die Detailebene verzweigt in diese vier Bereiche und enthält für jeden Bereich genauere und weiterführende Informationen. Sie wird durch Mausklick auf die entsprechende Karte der Übersichtsebene erreicht und bietet interaktive Funktionen: ein Klick auf Messpunkte öffnet die zugehörigen Diagramme, verschiedene Mess- und Vorhersagezeiträume werden nach Auswahl in einem Drop-Down-Menü angezeigt, bei Klick auf ein Icon sind die Handlungsempfehlungen einsehbar. Die Inhalte der vier Bereiche in der Detailebene erscheinen wie folgt:

Niederschlag (1): In der Detailansicht zum Niederschlag zeigt das Interface links eine Karte mit einem Niederschlagsfilm, der Messwerte der letzten drei Stunden und Vorhersagen für die nächsten zwei Stunden umfasst. Rechts werden aggregierte Niederschläge über die vergangenen 2 bis 24 Stunden sowie Vorhersagesummen über mehrere Vorhersagezeiträume zwischen 1 und 12 Stunden angegeben, wobei die Vorhersagen als Ensemble mit 10 Karten dargestellt sind. Das Beispiel in Abbildung 7

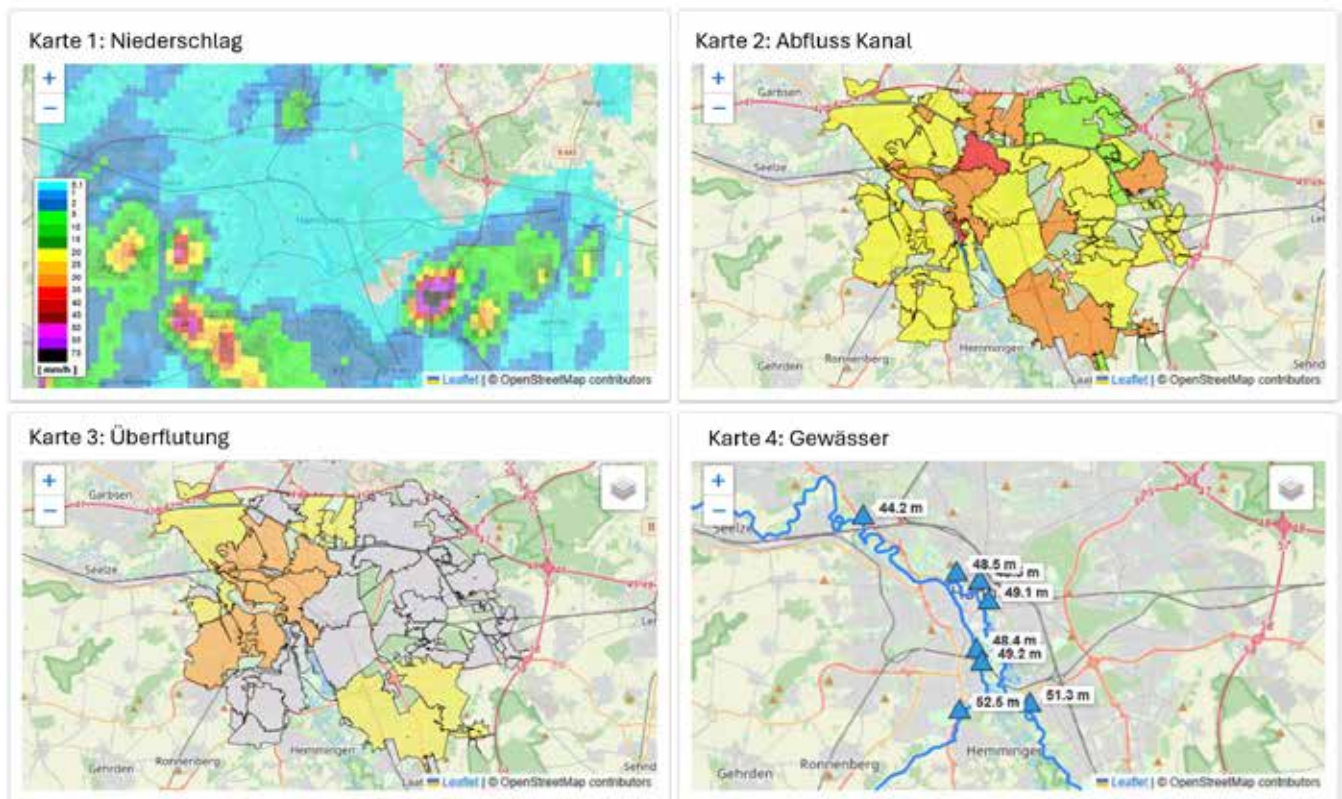


Abbildung 6

Aufteilung der Übersichtsebene im Front-End des Digitalen Zwillings mit 4 Karten: 1: Niederschlagsituation, 2: Belastungssituation der Kanalisation / Sammler, 3: Überflutungssituation auf der Oberfläche, 4: Situation im Gewässer mit Pegelständen (in m üNN).

Overview layer in the front-end of the Digital Twin with 4 maps: 1: precipitation situation, 2: load situation of the sewer and collection drains, 3: surface-level flooding situation, 4: situation in water bodies with water levels (in m a. s. l.).

zeigt links die Radarmessung und rechts die Stundensumme der vergangenen Stunde am Beispiel eines Ereignisses vom 12. September 2023.

Kanal und Klärwerke (2): Die Visualisierung des aktuellen Systemzustandes des Kanalnetzes geschieht über die Einfärbung der 83 Teilgebiete von Hannover unter Verwendung eines diskreten Farbcodes: Trockenwetterabfluss, erhöhter Abfluss, Einstau und Überlauf (Abb. 8).

Oberfläche bzw. Überflutung (3): Links im Interface sind zwei stadtweite Karten zu sehen, die die Situation an der Oberfläche auf Basis gemessener und vorhergesagter Niederschläge anzeigen. Das Risiko für eine Überflutung wird auf Teileinzugsgebietsebene angezeigt, unterteilt in fünf Risikoklassen, wobei eine höhere Klasse für einen höheren Anteil überfluteter Flächen und einen höheren mittleren Wasserstand steht. Nutzende können zwischen der Anzeige der mittleren, wahrscheinlichsten und der maximalen Prognose auf Basis der Ensemble-Vorhersagen umschalten, um Unsicherheiten zu visualisieren. Rechts wird eine Karte mit dem Wasserstand auf einem 3m-Raster dargestellt. Bei Klick auf ein Teileinzugsgebiet auf eine der Karten auf der linken Seite erscheint rechts der zugehörige Kartenausschnitt mit dem Wasserstand (Kap. 4.4). Die Karte ist zoombar bis hinunter auf die Ebene einzelner Straßenzüge (Abb. 9). Wenn Handlungsempfehlungen für eine aktuelle Situation vorliegen, werden diese mittels eines Markers auf der Überflutungskarte angezeigt.

Gewässer und Einleitungen (4): Der Fokus liegt in diesem Bereich auf der Echtzeit-Darstellung der hydraulischen und wasserqualitativen Zustände der Gewässer in Hannover. Die Visualisierung

von Messdaten von Sensoren, die sowohl in der Kanalisation und Kläranlage als auch direkt in den Gewässern installiert sind, erfolgt mittels zweier Karten und mehrerer Gangliniendarstellungen, um ein umfassendes Bild der aktuellen Situation zu liefern. Die Messgrößen umfassen u. a. Wasserstände, Durchflüsse, Temperatur, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt und verschiedene chemische Parameter wie TOC, CSB und Ammonium. Zusätzlich zu den Messdaten werden auf der Karte auch die Ergebnisse des Simulationsmodells für die Kanalisation und Kläranlagen angezeigt. Durch die Kombination von Messdaten und Simulationsergebnissen lassen sich sowohl aktuelle Zustände als auch Prognosen visualisieren. Die Karte bietet interaktive Funktionen, die es Nutzenden ermöglichen, detailliertere Informationen zu bestimmten Messpunkten oder Gewässerabschnitten abzurufen. Sie sind z. B. in der Lage, sich Gangliniendiagramme für ausgewählte Größen anzeigen zu lassen. Zusätzlich werden bei Überschreitung von definierten Grenzwerten Informationen zu den Schutzmaßnahmen ausgegeben, die im Hochwassereinsatzplan vorgesehen sind.

Die Entscheidungsassistenz des Systems offeriert dem SEH-Betriebspersonal sowie den im Starkregenfall involvierten weiteren städtischen Akteuren Maßnahmenvorschläge zum Management des aktuellen Niederschlagsereignisses sowie zur proaktiven Vorbereitung auf bevorstehende Ereignisse. Dazu gehören u. a. Vorschläge in Bezug auf eine – zunächst manuell umzusetzende – Steuerung des Abflussgeschehens in den vier Hauptsammlern in Hannover, wie eine Änderung der Förderraten der einzelnen Pumpen in den beiden Eingangspumpwerken oder die Betätigung von Schiebern. Der wesentliche Zweck dieser Maßnahmen ist eine Reduktion von Mischwasserüberläufen.

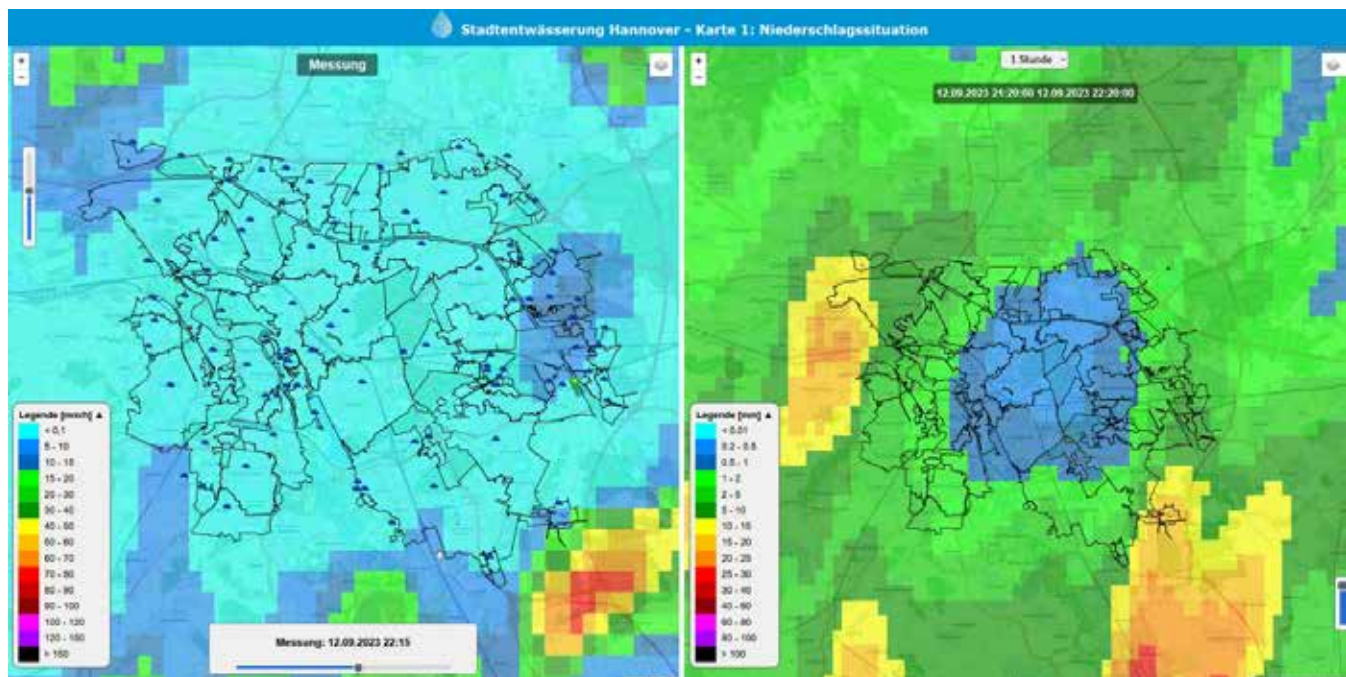


Abbildung 7

Darstellung einer Niederschlagssituation im Stadtgebiet Hannover mit der aktuellen Niederschlagsintensität (links) und der Stundensumme des Niederschlags über die vergangene Stunde (rechts), vom 12. September 2023 um 22:20 Uhr UTC.

View of a precipitation situation in the Hanover urban area with the current precipitation intensity (left) and the precipitation aggregated over the past hour (right), dating from Sept 12, 2023, at 22:20:00 UTC.

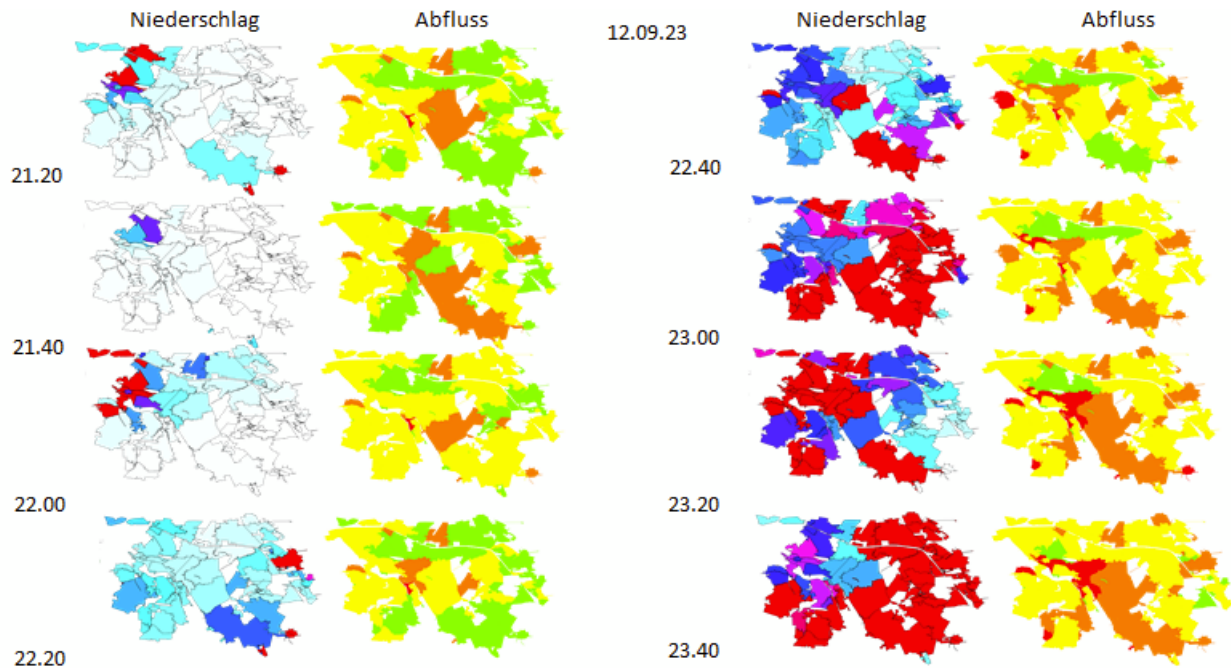


Abbildung 8

Beispielhafte Darstellung des Niederschlags-Abflussgeschehens während des Ereignisses am 12. September 2023 durch entsprechende Einfärbungen von Polygonen.

Exemplary representation of the precipitation-and-run-off situation during the event on Sept 12, 2023, with corresponding colouring of polygons.

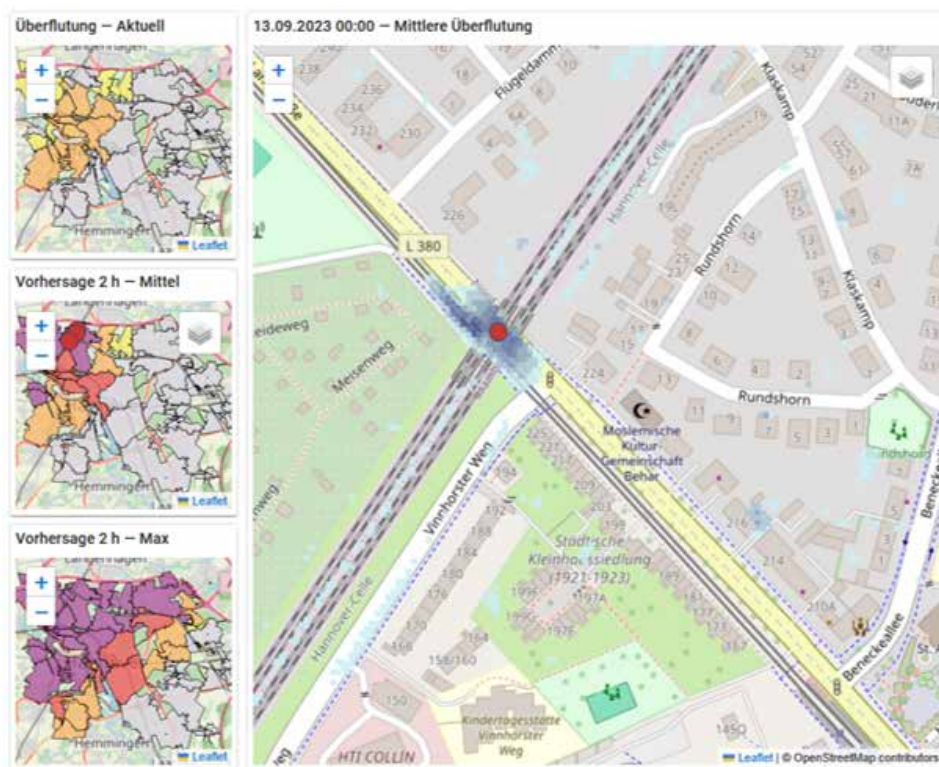


Abbildung 9

Visualisierung des Überflutungsrisikos im Stadtgebiet Hannover auf Basis von Niederschlagsmessungen (links oben), Vorhersage (links Mitte) und maximaler Vorhersage auf Basis von 10 Ensembles (links unten) am Beispiel des 12. September 2023 um 22:00 Uhr UTC. Die zoombare Wasserstandskarte (rechts) stellt nach Klick auf ein Teileinzugsgebiet die zugehörigen Wasserstände dar. Rote Marker zeigen an, dass Maßnahmenvorschläge vorliegen.

Visualisation of the flooding risk in the urban area of Hannover based on precipitation measurements (top left), forecasts (middle left) and maximum forecast of 10 ensembles (bottom left) with the example of Sept 12, 2023, at 23:00 UTC. The zoomable water level map (right) displays the corresponding water levels when clicking on a sub-catchment area. Red markers indicate available suggestions for measures.

Das System gibt aber auch Hinweise zur Absperrung von Unterführungen und Straßen, zur Aktivierung von Warnhinweisen bzw. -anzeigen in überflutungsgefährdeten Bereichen sowie zur Evakuierung gefährdeter Liegenschaften und Sicherungen mittels lokaler Schutzmaßnahmen, z. B. temporärer Abschottungen. Basis für diese Maßnahmenvorschläge zur Abflusssteuerung ist das im Digitalen Zwilling implementierte Simulationsmodell des Kanalnetzes. Die in Echtzeit mitlaufende Simulation beobachtet das System und gibt in Abhängigkeit vom Systemzustand gegebenenfalls Warnungen an das Betriebspersonal aus.

Anwendungen des leistungsfähigen Simulationsmodells sind darüber hinaus auch unmittelbar für eine modellprädiktive Steuerung und Regelung des Wassersystems denkbar (SCHÜTZE & ALEX, 2022). Die Handlungsempfehlungen in Bezug auf aktuelle bzw. zu erwartende Überflutung im Stadtgebiet beziehen sich auf festgelegte, mit GIS-Koordinaten hinterlegte Orte. Durch Vergleiche mit der Überflutungskarte kann das System automatisiert bestimmen, ob die am jeweiligen Ort aktuelle bzw. erwartete Überflutungshöhe einen Grenzwert überschreitet, und die zugehörige Maßnahme anzeigen. Auf diese Weise werden die aktuellen Daten des ZWILLE-Monitorings mit der Wissensbasis verknüpft. Die Maßnahmen werden dann 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.

Starkregenereignisse gehen als kommunale Gemeinschaftsaufgabe über den Zuständigkeitsbereich der SEH hinaus. Im Fall von extremen Starkregenereignissen wird ein Krisenstab eingerichtet und die Umsetzung von Maßnahmen erfolgt in Abstimmung zwischen SEH, Tiefbauamt, Polizei und Feuerwehr. Für einige der genannten Maßnahmen, wie z. B. Absperrung von Unterführungen, existieren noch keine klaren Meldekettens und Abläufe. Mit der Bereitstellung der Echtzeitinformationen im Digitalen Zwilling wurde aber eine wichtige Voraussetzung dafür geschaffen, um diese zukünftig zu entwickeln und in Abstimmung zwischen den Entscheidungsträgern weitere Maßnahmen zu ergänzen, die zum Schutz der Bevölkerung beitragen.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die integrierte Betrachtung von Kanalnetz, Kläranlagen und Gewässern mithilfe eines Digitalen Zwillings eröffnet vielfältige Möglichkeiten, um das Management von Wasserextremereignissen zu verbessern. Um einen Digitalen Zwilling zu erstellen, müssen alle Prozesse ausreichend abgebildet sein, in Abhängigkeit von den verfügbaren Eingangsdaten. Praktische Probleme bei der Umsetzung sind zu lösen, die neben der Datenverfügbarkeit und Datenanbindung auch rechtliche Probleme und Aspekte der IT-Sicherheit umfassen. Diese stehen insbesondere in Zusammenhang mit der Weitergabe von Daten und dem Zugriff auf Systeme, die Teil kritischer Infrastruktur sind. Außerdem reichen die vorhandenen Messstellen häufig nicht aus, so dass weitere installiert werden müssen. Die Einrichtung eines Digitalen Zwillings geht daher mit einem hohen Anfangsaufwand einher. Dies stellt einerseits einen Nachteil dar, andererseits motiviert die Einrichtung eines Digitalen Zwillings dazu, bestehende Probleme anzugehen, praktikable Lösungen zu finden und klare Abläufe zu definieren, was insgesamt zu einem verbesserten System und Management beiträgt.

Der im Projekt ZWILLE entwickelte Digitale Zwilling koppelt komplexe, echtzeitfähige Modelle in einer geschlossenen Anwendung. Das Management von Wasserextremereignissen kann insbesondere durch die integrierte Entscheidungsassistenten verbessert und erleichtert werden, wenn das im Laufe der Jahre akkumulierte Erfahrungswissen zukünftig jederzeit digital im System verfügbar ist. Die erarbeitete Methodik, um aus einem detaillierten hydrodynamischen Kanalnetzmodell in wenigen Schritten automatisiert ein echtzeitfähiges, reduziertes Modell zu erstellen, stellt ein Novum dar und erlaubt es, ähnliche Modelle für Digitale Zwillinge aufwandsarm auch für andere Stadtentwässerungssysteme zu erstellen. Das neue, radarbasierte Verfahren RadEF zur Abschätzung von überfluteten Flächen lässt sich ebenfalls mit geringem Aufwand aktualisieren und ist übertragbar auf Städte mit ähnlichen Bedingungen wie Hannover, d. h. mit einer vorwiegend flachen Topografie. Es stellt damit eine Alternative zu Machine-Learning-Verfahren dar. Die Einschränkungen in der Genauigkeit der geschätzten bzw. vorhergesagten Wasserstände spielen im Starkregenfall eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu sonstigen Unsicherheiten, insbesondere solchen aus der Niederschlagsvorhersage, aber auch durch z. B. mögliche Verstopfungen von Gullys und Durchlässen. Damit erfüllt das Verfahren wichtige Voraussetzungen für den Einsatz in der Praxis.

Der Digitale Zwilling wurde zunächst in Form eines Demonstrators mit historischen Ereignissen umgesetzt und wird derzeit als Echtzeit-Demonstrator intern bei der Stadtentwässerung Hannover (SEH) aufgesetzt. Dort soll er dem Betriebspersonal parallel neben dem Prozessleitsystem zur Verfügung stehen, sodass Informationen daraus nutzbar sind und sich Erfahrungen hinsichtlich aller Systemkomponenten sammeln lassen.

Conclusion

The integrated consideration of sewer networks, wastewater treatment plants and water bodies with the use of a Digital Twin offers numerous possibilities for improving the management of extreme water events. To create a Digital Twin, all the relevant processes must be adequately represented in accordance with the available input data. Practical challenges must be addressed, not only including data availability and integration, but also legal issues and IT security factors relating to data sharing and access to the systems that are part of the critical infrastructure. In addition, existing measurement stations are often insufficient, necessitating the installation of further sensors. Creating a Digital Twin therefore requires a high initial effort. While this may be seen as a disadvantage, the process helps drive the resolution of existing problems, encourages the development of practical solutions and helps define clear workflows, ultimately leading to an improved system and more effective management.

The Digital Twin (DT) developed in the ZWILLE project integrates complex, real-time capable models into a single unified application. The management of extreme water events can be significantly improved and simplified through integrated decision-making support, particularly if the expertise accumulated over the course of past years is always available digitally within the system. The developed methodology for automatically generating a real-time capable, reduced model from a detailed hydrodynamic sewer network model in just a few steps is an innovative approach. It also allows similar models for Digital Twins to be created for other urban drainage systems with minimal

effort. The new radar-based RadEF method for the assessment of flooded areas is also easily updatable and transferable to other cities with similar conditions to Hanover, i.e. which have a largely flat topography, thereby providing an alternative to machine learning approaches. The limitations in the accuracy of the estimated or predicted water levels play a subordinate role in extreme rainfall events compared with other uncertainties, especially those relating to precipitation forecasts, but also to possible obstructions of gullies and culverts. Therefore, this method meets the essential requirements for practical implementation.

The Digital Twin was initially implemented as a demonstrator with the use of historical events. Currently, it is being set up as a real-time demonstrator within SEH. In this way, it will be available to operational staff alongside the process control system, allowing information to be used and experience to be gathered relating to all system components.

Hinweis zur Datenverfügbarkeit

Die dem Projekt und den Modellen zugrunde liegenden Daten sind teilweise frei zugänglich. Die Niederschlagsvorhersagen basieren auf gemessenen Niederschlagsdaten, die der DWD frei zum Download anbietet (<https://opendata.dwd.de/>). Weitere Datensätze, die die SEH zum Projekt beigetragen hat und die nicht öffentlich zugänglich sind, können nicht zur Verfügung gestellt werden. Die verwendeten Modelle zur Niederschlagsvorhersage und Abflusssimulation sind kommerzielle Produkte und nicht frei verfügbar. Eine Bereitstellung des auf historischen Daten basierenden ZWILLE-Demonstrators und von ausgewählten Datensätzen ist über den Innovationsatlas Wasser (<https://www.innovationsatlas-wasser.de/>) geplant.

Danksagung

Das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR, ehemals Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)) fördert das Verbundprojekt „Zwille – Digitaler Zwilling zum KI-unterstützten Management von Wasser-Extremereignissen im urbanen Raum“ zur Fördermaßnahme „Wasser-Extremereignisse (WaX)“ im Rahmen des Bundesprogramms „Wasser: N“. Wasser: N ist Teil der BMFTR-Strategie „Forschung für Nachhaltigkeit (FONA)“.

Anschriften der Verfasser

Alrun Jasper-Tönnies
Bruno Castro
Melissa Pimiento Castañeda
Thomas Einfalt
hydro & meteo GmbH
Breite Str. 6-8, 23552 Lübeck
jasper-toennies@hydrometeo.de
b.castro@hydrometeo.de
m.pimiento@hydrometeo.de
einfalt@hydrometeo.de

Joachim Schmidt
Robert Fetter
IAB Weimar gemeinnützige GmbH
Über der Nonnenwiese 1, 99428 Weimar
j.schmidt@iab-weimar.de
r.fetter@iab-weimar.de

Christian Hübner
Manfred Schütze
Institut für Automation und Kommunikation e. V. (ifak)
Geschäftsfeld Wasser und Energie
Werner-Heisenberg-Str. 1, 39106 Magdeburg
christian.huebner@ifak.eu
manfred.schuetze@ifak.eu

Stefanie Maßmann
Michael Pabst
Sara De Toffol
Stadtentwässerung Hannover
Eigenbetrieb der Landeshauptstadt Hannover
Sorststraße 16, 30165 Hannover
stefanie.massmann@hannover-stadt.de
michael.pabst@hannover-stadt.de
sara.detoffol@hannover-stadt.de

Erik Ristenpart
Alida Reinsch
ifs Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH
Stiftstr. 12, 30159 Hannover
ristenpart@ifs-hannover.de
reinsch@ifs-hannover.de

Alexander Krebs
Gudrun Tschirner-Vinke
Eviden Germany GmbH – ein Unternehmen der Atos Gruppe
Zukunftsmeile 2, 33102 Paderborn
alexander.krebs@eviden.com
gudrun.tschirner-vinke@eviden.com

Literaturverzeichnis

- ALEX, J. (2021): Anwendungen digitaler Zwillinge bei der Planung und zur Betriebsunterstützung von Kläranlagen. – Digital Tools & Twins, Digitale Woche DWA, 8. bis 12.3.2021.
- 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., M. SCHÜTZE, C. HÜBNER & M. OGUREK (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.
- AYZEL, G. & M. HEISTERMANN (2025): Brief communication: Training of AI-based nowcasting models for rainfall early warning should take into account user requirements. – Natural Hazards and Earth System Sciences, 25(1), 41-47. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-25-41-2025>.
- BATTY, M. (2018): Digital Cities: Big Data and Smart Urban Planning. – The International Journal of Urban Sciences, 22(2), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1177/2399808317751169>.
- BERKHAN, S. & I. NEUWEILER (2024): Data driven real-time prediction of urban floods with spatial and temporal distribution. – Journal of Hydrology X, 22, 100167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2023.100167>.
- CUT, CONNECTED URBAN TWINS (2025): Urbane Digitale Zwillinge. <https://www.connectedurbantwins.de/urbane-digitale-zwillinge/>, zuletzt aufgerufen am 26.2.2025.
- DWA, DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL (2021): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 3: Immissionsbezogene Bewertungen und Regelungen. DWA-M 102-3.

- DWA & BWK, DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL & BUND DER INGENIEURE FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABFALLWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (2020): Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Teil 1: Allgemeines. DWA-A 102-1/BWK-A 3-1. Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen. DWA-A 102-2 / BWK-A 3-2.
- DWA, DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL (2024): Arbeitsblatt DWA-A 118: Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (2023): Koordinierte Starkregenauswertung und -regionalisierung des Deutschen Wetterdienstes. <https://dwd.de/kostra>, zuletzt aufgerufen am 26.2.2025.
- FIWARE (2024): The FIWARE Smart Water Reference Architecture. https://www.fiware.org/wp-content/uploads/FIWARE_ReferenceArchitecture_SmartWater.png, zuletzt aufgerufen am 26.2.2025.
- FIWARE (2025): context.Orion-LD. <https://github.com/FIWARE/context.Orion-LD/tree/develop/doc/manuals-ld>, zuletzt aufgerufen am 26.2.2025.
- HOFMANN, J. & H. SCHÜTTRUMPF (2021): floodGAN: Using Deep Adversarial Learning to Predict Pluvial Flooding in Real Time. – *Water*, 13(16), 2255. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13162255>.
- HYDRO & METEO (2009): The SCOUT Documentation, Version 3.30.
- HÜBNER, C., N. SUCHOLD, J. ALEX, M. THRON, H. ZIPPER & L. RIEGER (2018): Offene Plattform für die Prozessoptimierung – Digitaler Zwilling im Wassermanagement 4.0. AUTOMATION 2018, 3. bis 4.7.2018, Baden-Baden. VDI-Berichte, 2330. VDI Verlag. DOI: <http://dx.doi.org/10.51202/9783181023303-493>.
- IFAK TECHNOLOGY (2024): SIMBA#, Version 6, Manual.
- ITWH GMBH (2023): HYSTEM-EXTRAN, Hydrodynamische Kanalnetz-berechnung, Dokumentation, Version 8.6.
- JASPER-TÖNNIES, A. & M. JESSEN (2014). Improved radar QPE with temporal interpolation using an advection scheme. – *Proceedings ERAD 2014*, Garmisch, 1-5.
- JASPER-TÖNNIES, A., S. HELLMERS, T. EINFALT, A. STREHZ & P. FRÖHLE (2017): Ensembles of radar nowcasts and COSMO-DE-EPS for urban flood management. – *Water Science and Technology*, 2017(1), 27-35. DOI: 10.2166/wst.2018.079.
- LHH, LANDESHAUPTSTADT HANNOVER (2023): Die Starkregenaus-kunft 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>, zuletzt aufgerufen am 26.2.2025.
- OGUREK, M., J. ALEX & M. SCHÜTZE (2024): Integration of selected AI methods into a simulation tool for urban wastewater systems – towards practical application. – *Automatisierungstechnik*, 72(6). DOI: <https://doi.org/10.1515/auto-2023-0236>.
- PICHLER, M., A.W. KÖNIG, S. REINSTALLER & D. MUSCHALLA (2024): Fully automated simplification of urban drainage models on a city scale. – *Water Science and Technology*, 90(9), 2673.
- 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).
- SCHMITT, T.G., M. KRÜGER, A. PFISTER, M. BECKER, C. MUDERSBACH, L. FUCHS, H. HOPPE & I. LAKES (2018): Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. – *Korrespondenz Abwasser Abfall*, 65(2), 113-120.
- SCHÜTZE, M. & J. ALEX (2022): Steuerung und Regelung von Abwasserkanalnetzen – ein praxisgerechter Ansatz zur modellprädiktiven Regelung. *Automation 2022*, Baden-Baden, 28. bis 29.6.2022. VDI-Berichte, 2399. VDI-Verlag. 187-204.
- SCHÜTZE, M., K. DE MATOS, T. SCHMIDT & J. ALEX (2024): Scalable model simplification for hydrodynamic sewer system models. 16th International Conference on Urban Drainage, Delft, 9.-14.6.2024.
- SIDERIS, I.V., L. FORESTI, D. NERINI & U. GERMANN (2020). NowPrecip: Localized precipitation nowcasting in the complex terrain of Switzerland. – *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(729), 1768-1800. DOI: 10.1002/qj.3766.
- STREHZ, A., U. BEHNKEN & T. EINFALT (2021): Analyse der Datenqualität angeeichter Radardaten. Poster, Tag der Hydrologie 2021, Potsdam.
- TAO, F., H. ZHANG & Y. CHENG (2018): Digital Twin in Industry: State-of-the-art. *IEEE Access*, 6, 7084-7097. DOI: 10.1109/TAI.2018.2873186.