

ISRV – Intelligente starkregenbedingte Überflutungsrisikowarnung im Verkehrssektor

Abschlussbericht des Verbundprojekts für den Projektzeitraum 11/2021 bis 10/2024

Version 04/2025



Dr.-Ing. Julian Hofmann¹
Paul Hassenjürgen, M.Sc. RWTH¹
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf¹
Michael Thiemann M.Sc.²
Marianne Brumm M.Sc.²
Christian Weinreis M.Sc.³
Florian Kretschmann M.Sc.³
Dr.-Ing. Christoph Schwietering³
Henric Breuer B.Sc.⁴
Benjamin Jung B.Eng.⁴



Gefördert durch:



Bericht B2025008

Abschlussbericht ISRV – Intelligente starkregenbedingte Überflutungsrisikowarnung im Verkehrssektor

Zuwendungsempfänger:

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und
Wasserwirtschaft (IWW)

Förderkennzeichen: 01FV2008A



Kisters AG

Förderkennzeichen: 01FV2008B



Schwietering-BUNG Ingenieure GmbH

Förderkennzeichen: 01FV2008C



4traffic SET GmbH

Förderkennzeichen: 01FV2008D



Laufzeit des Vorhabens (inkl. Berichtszeitraum):

01.11.2021 bis 30.04.2025

Aachen, im April 2025

Im vorliegenden Abschlussbericht wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass alle Geschlechter gleichermaßen gemeint sind, sofern die inhaltliche Aussage dies erfordert.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Voraussetzungen für das Vorhaben	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	9
1.4.1	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte	10
1.4.2	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie benutzter Informations- und Dokumentationsdienste	10
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2	Eingehende Darstellung	12
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis	12
2.1.1	Erreichte Ziele	12
2.1.2	Projektmanagement	15
2.1.3	Technische Arbeiten	15
a)	AP1 - Entwicklung eines Starkregenszenarien-Generators und Erzeugung hydrodynamischer Trainingsdaten	15
b)	AP2 - Aufbereitung von mobilitätsrelevanten Datensätzen und -Quellen	21
c)	AP3 - Entwicklung eines DL-Modells und Integration eines Demonstrators zur integrierten Vorhersagelösung	22
d)	AP4 - Rückkopplung der Modelle in der SC-Plattform	25
e)	AP5 - Verkehrsregelungskonzepte bei Starkregenereignissen	25
f)	AP6 - Entwicklung eines Webservice für Live-Schnittstellen und Datenbereitstellung	36
2.2	Herausforderungen und Lessons Learned	41
2.3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	42
2.4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	42
2.5	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	43
2.6	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	45
2.7	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	46
3	Literaturverzeichnis	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematische Darstellung des Workflows im Forschungsprojekt ISRV	5
Abbildung 2 Visualisierung eines mittels des X-Band Radardaten erstellten Niederschlagsfeldes im Demonstrator	16
Abbildung 3 Visualisierung von Nowcastdaten in datasphere	18
Abbildung 4 Durchschnittlicher FSS für alle analysierten Ereignisse über vier verschiedene Aggregationsebenen. Der referenzierte durchschnittliche FSSuniform ist zum Vergleich hinzugefügt.	19
Abbildung 5. Ausführung von Externen Modellen im KISTERS Real-time Analytics Framework.....	23
Abbildung 6 Visualisierung eines Niederschlag-Nowcasts für ein Ereignis im Mai 2024 als Eingangsdatensatz für das floodGAN-Modell	24
Abbildung 7 Darstellung der vom DL-Modell berechneten Überschwemmungstiefen in datasphere...	24
Abbildung 8 Kartenwerk vulnerable Infrastruktur der Stadt Aachen, hier: Versorgungsobjekte	28
Abbildung 9 Kartenwerk vulnerable Infrastruktur der Stadt Aachen, hier: Öffentliche Einrichtungen...	29
Abbildung 10 Exemplarisches Verkehrsregelungskonzept für den Westbahnhof in Aachen	30
Abbildung 11 Ablaufdiagramm zur strukturierten und zeitlich abgestimmten Handlungsempfehlung auf kommunaler Ebene.	32
Abbildung 12 Starkregenbedingtes Überflutungsereignis vom 02. Mai 2024 am Westbahnhof.....	34
Abbildung 13 Trips von FCD-Fahrzeugen am 02.05.2024.....	36
Abbildung 14 Standorte der integrierten Detektorboxen	37
Abbildung 15 Darstellung lokaler Wetterbeobachtungen im Demonstrator	38
Abbildung 16 Darstellung von mittels des ICON D2 Modells vorhergesagter Temperatur im datasphere	39
Abbildung 17 Darstellung von mittels des ICON D2 Modells vorhergesagter Windrichtung im datasphere	40
Abbildung 18 Anzeigen der Beschreibung des DWD-ICON Produktes	40
Abbildung 19 Anzeige einer Vorhersage von Windgeschwindigkeit an einem beliebigen Ort in der datasphere-Schnittstelle	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Meilensteine des Teilvorhabens	5
Tabelle 2 Untersuchte optische Flussmethoden für das Nowcasting	17
Tabelle 3 Beschreibung der Nowcastdaten.....	17
Tabelle 4 Kategorisierung kritischer Infrastrukturobjekte bei starkregenbedingtem Hochwasser (LUBW 2016).....	26
Tabelle 5 Datengrundlage des GIS-Tools	26
Tabelle 6 FCD-Verkehrsdatenanalyse zum Ereignis vom 02. Mai 2024	35
Tabelle 7 Beschreibung der Wettervorhersagedaten.....	38

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel des vorliegenden Projektes “Intelligente starkregenbedingte Überflutungsrisikowarnung im Verkehrssektor - ISRVR“, im Folgenden nur als ISRVR bezeichnet, ist es ein KI-basiertes Frühwarnsystem für starkregeninduzierte Überflutungen zu entwickeln, welches in Kombination mit Echtzeit-Verkehrsinformationssystemen die Sicherheit und Handlungsfähigkeit im Verkehrssektor erhöht.

Die zunehmende Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen stellen Städte und ihre Infrastrukturen vor erhebliche Herausforderungen. Urbane Räume sind durch hohe Versiegelung, komplexe Verkehrsnetze und eine dichte Bebauung besonders anfällig für Überflutungen. Diese Ereignisse verursachen nicht nur infrastrukturelle Schäden, sondern beeinträchtigen auch die Mobilität erheblich und gefährden Menschenleben sowie wirtschaftliche Güter. Trotz bestehender Frühwarnsysteme fehlt es bislang an einer vollintegrierten Lösung, die hydrodynamischen Vorhersagen in Echtzeit mit Verkehrsführung kombiniert. Zu diesem Zweck haben sich die Verbundpartner des ISRVR-Projekts die folgenden Ziele gesetzt:

RWTH Aachen – Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW): Als Projektkoordinator übernahm das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen die wissenschaftlich-technische Leitung und Gesamtsteuerung des ISRVR-Projekts. Die zentrale Zielstellung lag in der Entwicklung eines KI-gestützten, echtzeitfähigen Frühwarnsystems für starkregeninduzierte urbane Überflutungen. Grundlage dafür bildete ein interdisziplinärer Ansatz, der hydrodynamische Modellierung, meteorologische Datenverarbeitung und Deep-Learning-Verfahren synergetisch verband.

Das IWW war verantwortlich für die Erstellung eines hochaufgelösten hydrodynamischen 2D-Modells für das Stadtgebiet Aachen. Darauf aufbauend wurden mithilfe eines Generative Adversarial Network (synRainGAN (Welten et al. 2022)) synthetische Starkregenereignisse erzeugt und in realitätsnahe Überflutungsszenarien überführt. Diese Szenarien dienten als Trainingsdatensatz für das Deep-Learning-Modell (floodGAN (Hofmann und Schüttrumpf 2021)), das eine präzise Vorhersage von Wasserständen und Überflutungsflächen in kürzester Zeit ermöglicht. Die Ergebnisse zeigten eine hohe Übereinstimmung zwischen prognostizierten und beobachteten Überflutungen, insbesondere am Beispiel des Starkregenereignisses vom 02. Mai 2024.

Darüber hinaus koordinierte das IWW die Datenflüsse zwischen den Projektpartnern, übernahm die wissenschaftliche Begleitung der Schnittstellenentwicklung und verantwortete zentrale Beiträge zu Dissemination und Publikation.

KISTERS AG: Das Teilvorhaben der KISTERS AG verfolgte das Ziel, ein exemplarisches technisches Setup für die Integration des Deep Learning (DL)-Modells in eine operationelle Vorhersagelösung zu schaffen. Im Fokus stand dabei die performante Modellimplementierung auf geeigneter Hardware und die Einbettung in ein Echtzeitsystem zur Hochwasserfrühwarnung.

Zentraler Bestandteil war die Kopplung des trainierten DL-Modells mit aktuellen Niederschlagsdaten – insbesondere aus einem eigens betriebenen X-Band-Radar – und dessen Integration in die cloudbasierte KISTERS-Plattform datasphere. Diese Plattform ermöglicht eine automatisierte

Weiterverarbeitung und Visualisierung der Modellergebnisse und erlaubt es, Überflutungsprognosen nahezu in Echtzeit verfügbar zu machen. Ergänzend wurde ein robuster Webservice zur Datenbereitstellung entwickelt, der die generierten Prognosedaten über standardisierte Schnittstellen (z. B. API-Endpunkte) für nachgelagerte Systeme und Entscheidungsträger zugänglich macht.

Neben der technischen Umsetzung begleitete KISTERS die Projektpartner bei der Systemintegration und unterstützte die Einbindung der unterschiedlichen Datenquellen und des Vorhersagemodells in den operationellen Demonstrator.

SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH: Ziel des Teilvorhabens von SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH (IBS) ist, mittels eines (auf andere Kommunen übertragbares) GIS-Werkzeugs standardisierte Handlungsempfehlungen und Ablaufpläne für die kommunale Praxis zu formulieren. Dazu wurden u.a. die Identifizierung und Bewertung der vulnerablen Infrastruktur im Stadtgebiet Aachen durchgeführt. Aufbauend auf den Überflutungskarten und Verkehrsanalysen wurden für besonders gefährdete Standorte wie den Westbahnhof oder den Kaiserplatz spezifische Maßnahmen- und Beschilderungskonzepte in Abhängigkeit des Starkregenszenarios erarbeitet. Im Rahmen des Projekts wurde auch ein Strategie- und Maßnahmenbaukasten entwickelt, der zur Konzeption und Planung für Verkehrsmanagementmaßnahmen im Falle von Starkregenereignissen genutzt werden kann.

4traffic SET GmbH: 4traffic erfasste und analysierte den Verkehrsfluss im Stadtgebiet Aachen mittels Detektorboxen und Daten von Dritten. Dazu wurde eine Smart City-Plattform aufgebaut, welche die Daten aus den Modellen über Schnittstellen in mögliche Handlungsempfehlungen und Warnungen überführte. Ziel war es, die Reaktionen des Verkehrs auf Starkregenereignisse zu analysieren und adaptive Handlungsempfehlungen zu entwickeln. Diese sollen bei eintretenden Überflutungen automatische Umleitungen ermöglichen und die Sicherheit im Straßenverkehr erhöhen.

Die praxisnahe Umsetzung des Teilvorhabens zeigt, wie ein innovatives, KI-basiertes System zur Starkregenwarnung erfolgreich in bestehende Infrastrukturen integriert werden kann. Durch die automatisierte Verarbeitung von Radar- und Vorhersagedaten sowie die nahtlose Einbettung in die cloud-basierte Plattform konnte eine echtzeitfähige, skalierbare Lösung realisiert werden. Die Anbindung über standardisierte Schnittstellen ermöglicht eine flexible Nutzung in kommunalen Warnsystemen und schafft eine wertvolle Grundlage für künftige Anwendungen im urbanen Krisenmanagement.

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Das ISRV-Projekt wurde durch einen Verbund an wissenschaftlichen Partnern und Partnern aus der Praxis bearbeitet. Im Rahmen des Förderprogramms mFUND – des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) - wurde ein Fördervolumen von 439.630€ bereitgestellt. Das Projekt begann am 01.11.2021 und wurde innerhalb einer Laufzeit von 36 Monaten am 31.10.2024 erfolgreich abgeschlossen. Für die Umsetzung des ISRV-Systems waren eine Vielzahl an fachlichen Kompetenzen und technischen Infrastrukturen erforderlich, die durch das Projektkonsortium vollständig abgedeckt werden konnten.

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW), RWTH Aachen University

Das IWW verfügt über jahrzehntelange Erfahrungen in der hydrodynamischen Modellierung urbaner Überflutungen und seit 2020 auch Knowhow in der Entwicklung datenbasierter Methoden zur Wasserstandsvorhersage. Basierend auf vergangenen Forschungsprojekten und innovativen Ansätzen war das IWW sehr gut für die 2D-Oberflächenabflussmodellierung für das Stadtgebiet Aachen sowie die

Erzeugung synthetischer Starkregenereignisse aufgestellt. Erste Ansätze von Deep-Learning Verfahren wurden ebenfalls bereits erprobt und konnten im Projekt weiterentwickelt werden. Dank der vorhandenen Forschungsinfrastruktur und der langjährigen Expertise im Bereich urbaner Wasserwirtschaft konnte das IWW die wissenschaftliche Leitung und Projektkoordination übernehmen.

KISTERS AG

Die KISTERS AG gehört zu den führenden IT-Lösungsanbietern in den Bereichen Energie, Wasserwirtschaft, Umweltschutz, Arbeitsschutz und Produktsicherheit. Die Unternehmensgruppe mit mehr als 600 Mitarbeitern bietet unter anderem die KISTERS-Ressourcen-Management-Systeme an, welche weltweit im Einsatz sind. Im deutschsprachigen Raum sind KISTERS-Systeme heute Marktführer in der Wasserwirtschaft und im Energiedatenmanagement, bei Gefahrstoff und Gefahrgut ebenso wie im Arbeitsschutz. 2022 erwirtschaftete die AG einen Umsatz von mehr als 80 Mio. Euro.

In den Tätigkeitsgebieten stellt die KISTERS AG den kompletten Datenverarbeitungsprozess von der Datengewinnung über die Datenverarbeitung und -Auswertung sowie die Bereitstellung über unterschiedliche Kanäle (u.a. auch Cloud-Anwendungen) ab. Dabei übernimmt die KISTERS AG die Entwicklung und Implementierung aller dazu notwendigen Datenverarbeitungstools sowie das Hosting und den Betrieb komplexer Lösungen.

Die Business-Unit HydroMet der KISTERS AG (<https://www.kisters.eu/de/wasser-wetter-umwelt/>) bietet mit über 140 Mitarbeitern professionelle Softwarelösungen in den Bereichen Meteorologie, Hydrologie und Gewässerkunde. Dies umfasst unter anderem integrierte Datenbank- und Vorhersagelösungen z.B. in Sachsen-Anhalt und für die Vietnam Meteorological Hydrological Administration oder Services wie das Meteorological Data Collection Center (MDCC) für das European Flood Awareness System (EFAS) des Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission. Weiterhin konzipiert, entwickelt und betreibt KISTERS moderne Cloud-Dienste wie den HydroMaster (<https://app.hydromaster.com/applications/login/>) zur Früherkennung und Warnungen vor Starkregenereignissen und den Cloud-Dienst „datasphere“ zur Integration von Sensordaten.

Betrieben im KISTERS-eigenen Rechenzentrum ermöglicht der multi-mandatenfähige KISTERS Service **datasphere** Zugang zu öffentlichen Daten von deutschen und globalen Anbietern inklusive Wasserstands- und Durchflussmessungen, meteorologischen Messdaten (wie z.B. Lufttemperatur oder Niederschlag), Niederschlags-schätzungen von Radar oder Satellit, sowie Kurzzeit- und Langzeitwettervorhersagen. Dabei werden sowohl historische als auch Echtzeitdaten in der Form von Skalaren oder Rasterzeitreihen verwaltet. Nutzer des Systems können hierbei eigene Messdaten ins System einspielen.

Mittels datasphere hatte die KISTERS AG somit die technischen Voraussetzungen, um den Demonstrator für das ISRVR Vorhaben zu entwickeln.

Eine weitere Voraussetzung, um das Vorhaben erfolgreich abzuschließen, ist die wachsende Verfügbarkeit von offenen Wetterdatenmessungen und Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes, sowie die Bereitstellung von Echtzeit-Niederschlagsdaten durch einen hochauflösenden Wetterradar auf dem KISTERS Firmengelände in Oberforstbach bei Aachen.

Damit, sowie mit der Expertise der Projektpartner (siehe Kap. 1.5) sind alle Voraussetzungen hinsichtlich Ressourcen und technischer Expertise für eine erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens gegeben.

SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH

Die SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH planen, beraten und forschen seit Jahren für überwiegend öffentliche Auftraggeber im Bereich des kollektiven Verkehrsmanagements und bringen ihr Knowhow im Bereich der Erarbeitung von Verkehrsmanagementstrategien, Verkehrsregelungssysteme, Auswirkung kooperativer Systeme und automatisiertes Fahren mit in das Projekt ein.

Durch die umfangreiche Anzahl an OpenData-Quellen hatte die SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH die Möglichkeit, mit einem GIS-Werkzeug sämtliche Daten zu vereinigen und zu analysieren. Dabei wurde die umfassende Kompetenz in der Identifizierung und Bewertung kritischer Infrastrukturen und Kommunikations- bzw. Warnmöglichkeiten von Verkehrsteilnehmern sowie Planung von Verkehrskonzepten eingebracht. Nach einer Analyse gefährdeter Verkehrsknotenpunkte wurden lokal angepasste Umleitungskonzepte entwickelt und technische Maßnahmen wie Schrankenanlagen, Warnschilder oder Notfallrouten definiert. Zudem entstand ein strukturierter Maßnahmenkatalog, der den kommunalen Entscheidungsträgern zur Integration in ihre Einsatzpläne bereitgestellt wurde.

4traffic SET GmbH

4traffic verfügte über ein etabliertes System zur Erfassung und Analyse von Verkehrsflüssen mittels Detektorboxen. So konnten Verkehrsmuster in Echtzeit erfasst und daraufhin das Verhalten bei Überflutungsereignissen untersucht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Entwicklung adaptiver Verkehrsführungskonzepte, die den Verkehr in kritischen Situationen frühzeitig umlenken und auf sicheren Routen halten sollen. Dazu konnte mit der Erfahrung aus vorherigen Projekten als auch aus Projekten im urbanen Raum ein Katalog mit Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

In dieser Konstellation stellten die Projektpartner gemeinsam sicher, dass alle organisatorischen, fachlichen und IT-bezogenen Voraussetzungen für das ISRV-Vorhaben erfüllt waren und die technische Umsetzung bis hin zur operationellen Nutzbarkeit realisiert werden konnte.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Durchführung des Vorhabens ISRV erfolgte anhand eines strukturierten Vorgehensmodells, das sich in mehrere logisch aufeinander aufbauende und miteinander verzahnte Arbeitspakete (AP) gliederte. Abbildung 1 visualisiert diesen schematischen Workflow und die Interaktion der Arbeitspakete.

Ausgangspunkt bildete die systematische Analyse meteorologischer Daten (historische Wetter- und Radardaten), auf deren Basis mittels KI-gestützter Verfahren synthetische Starkregenszenarien generiert wurden (1). Diese Szenarien dienten als Input für detaillierte hydrodynamische Überflutungssimulationen im urbanen Raum Aachens (2), um physikalisch plausible Trainingsdaten für nachfolgende Modelle zu erzeugen. Parallel erfolgte die Erfassung und Analyse von Echtzeit-Verkehrsdaten mittels spezifischer Sensorik (u.a. Detektorboxen), um das Verkehrsgeschehen unter potenziellen Überflutungsbedingungen zu charakterisieren (3).

Die gewonnenen meteorologischen, hydrologischen und verkehrstechnischen Daten bildeten die Grundlage für die Entwicklung eines integrierten KI-Modells (4). Dieses Modell wurde darauf trainiert, Niederschlagsprognosen direkt mit Überflutungssimulationen zu verknüpfen, um eine echtzeitnahe Risikobewertung zu ermöglichen. Die Modellergebnisse wurden genutzt, um vulnerable Bereiche der

Verkehrsinfrastruktur zu identifizieren (5) und darauf aufbauend adaptive Konzepte für das Verkehrsmanagement und die Verkehrsregelung bei Starkregenereignissen zu entwickeln (6).

Ein weiteres zentrales Element war die Konzeption und prototypische Implementierung einer Softwarearchitektur (7), die auf Webservices und standardisierten Schnittstellen basiert. Ziel war es, die Interoperabilität der entwickelten Systemkomponenten sicherzustellen und eine technische Grundlage für die Bereitstellung von Projektergebnissen zu schaffen. Dies umfasste auch die exemplarische Aufbereitung ausgewählter Datensätze und Konzepte zur Veröffentlichung über die Mobilthek des BMDV (8), um die Nachnutzbarkeit der Resultate zu fördern.

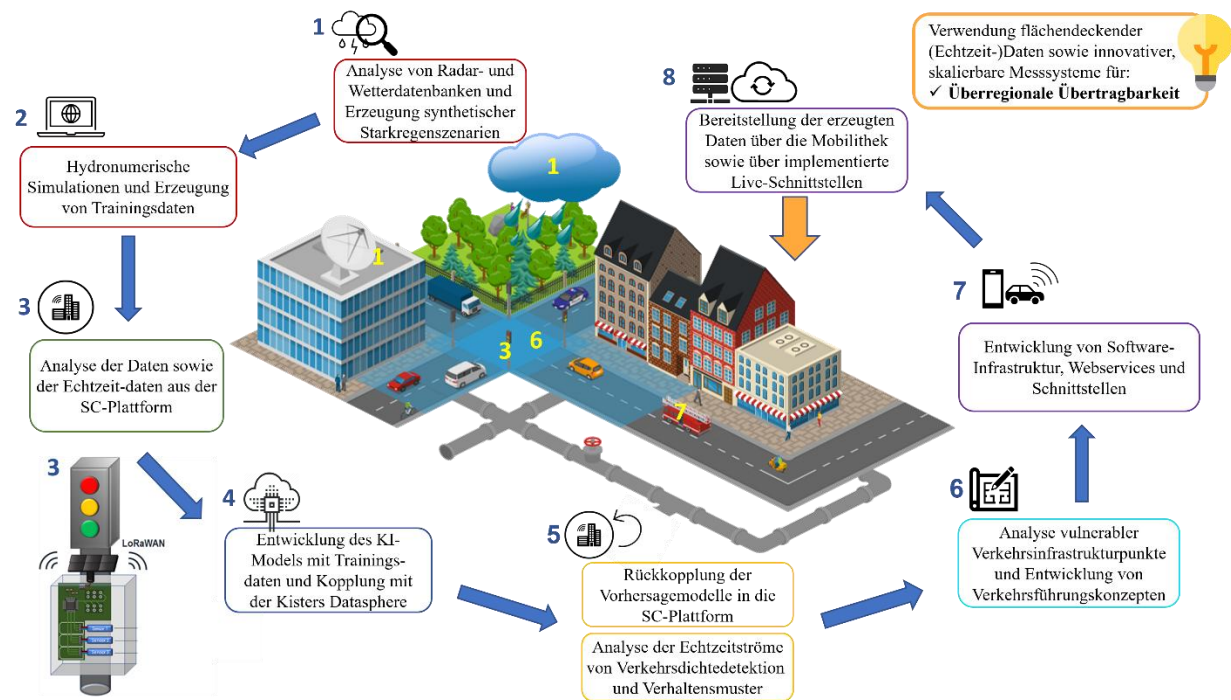


Abbildung 1 Schematische Darstellung des Workflows im Forschungsprojekt ISRV

Innerhalb des 36-monatigen Projektzeitraums wurden die in Tabelle 1 aufgezählten Meilensteine des Gesamtvorhabens unter Berücksichtigung der Beiträge der Projektpartner (siehe Kap. 1.5) erreicht.

Tabelle 1 Meilensteine des Teilvorhabens

Arbeitspaket des Gesamtvorhabens	Meilenstein	Detailliertes Vorgehen
AP1	Entwicklung des Starkregenszenarien-Generators, Erzeugung von synthetischen Starkniederschlagsereignissen, hydrodynamische	<p>IWW:</p> <ul style="list-style-type: none"> Analyse historischer Radolan-Daten (DWD) für das Training eines Generative Adversarial Networks für die Generierung synthetischer Starkregenereignisse. Generierung von über 900 synthetischen hochintensiven Starkregenszenarien im Gebiet der Stadt Aachen.

	<p>Überflutungssimulationen, Bündelung der Trainingsdaten</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz des MIKE Flow Modells (2D) zur hydrodynamischen Simulation für das Stadtgebiet Aachen (61 km², differenzierte Auflösung von 4 m² urban bis 9 m² nicht-urban) • Simulation von 160 Starkregenereignissen in 5-Minuten-Schritten (inkl. Nachlaufzeit) • Kombination von Wasserstandskarten und Niederschlagsrastern als Trainingsdatensätze für das KI-Modell <p>Kisters:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines dataspHERE basierenden Demonstrator mit einheitlichen Schnittstellen zur Akquise und Bereitstellung der relevanten Datensätze. • Entwicklung eines auf Daten des Aachener X-band Radars basierenden und Kurzzeitvorhersage-Algorithmus („Radar-Nowcast“) • Einbindung von Niederschlagsschätzungen und -Nowcasts des Aachener X-band Radars und meteorologische Messungen an lokalen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Quasi-Echtzeit Nutzung und späterer Analyse. • Vergleich der Genauigkeit der Radar-Nowcasts basierten Niederschlagsintensitäten und -volumen mit den später mit dem Radar gemessenen Variablen.
<p>AP2</p>	<p>Aufbereitung von mobilitätsrelevanten Datensätzen und -Quellen</p>	<p>4traffic:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Installation der acht Detektorboxen am Kaiserplatz in Aachen. • Einrichtung eines LoRaWAN-Gateways zur Sicherstellung eines stabilen Übertragungsnetzwerks. • Test und Validierung der Verbindung zwischen Detektorboxen und Gateway. • Weiterleitung der erfassten Daten an die SC-Plattform in Echtzeit. • Zusammenführung der Sensordaten mit externen Datensätzen (z.B. Kisters, ASEAG-ÖPNV) auf der SC-Plattform.

		<ul style="list-style-type: none"> • Kanalisierung der zusammengeführten Datenströme entsprechend den Anforderungen der definierten Modelltypen. • Bereitstellung der finalen Daten in einem kompatiblen Format für die Modellierung. • Prüfung und Sicherstellung der Qualität und Konsistenz der Verkehrsdaten. • Erstellung einfacher Diagramme zur anschaulichen Visualisierung der Echtzeitdaten. • Durchführung der Validierung der Verkehrsdaten über Kurvenverläufe und visuelle Kontrollen.
AP3	Entwicklung eines DL-Modells und Integration eines Demonstrators zur integrierten Vorhersagelösung	<p>IWW:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines Deep-Learning-Modells (FloodGAN) basierend auf U-Net und PatchGAN-Discriminator, adversarial und L1-Loss • Training des Modells mit generierten Starkregen- und Überflutungsdaten zur Vorhersage realistischer Hochwasserereignisse • Cloudbasierte Bereitstellung der automatisierten KI-Ausgabe zur Darstellung in der Datasphere. <p>Kisters:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung einer Echtzeit-Integrationsplattform welche die Einbindung von externen Modellen in den Demonstrator. • Integration des IWW DL-Modells, insbesondere in Bezug auf den Datenaustausch und die Darstellung von 2-dimensionalen Überflutungsfeldern. • Einrichtung von automatischen Modellausführungen.
AP4	Rückkopplung der Modelle in der SC-Plattform, Integration und Korrelation der Daten ins Stadtbild	<p>4traffic:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vergleich und Validierung bereits bekannter Muster mit den Echtzeitdaten der Verkehrsdichtedetektion. • Analyse der Übereinstimmung zwischen modellierten und tatsächlich beobachteten Verkehrssituationen. • Betrachtung spezifischer Verhaltensmuster des öffentlichen Personennahverkehrs in Echtzeit.

		<ul style="list-style-type: none"> • Abstimmung eines geeigneten Formats zur Ableitung konkreter Weisungsempfehlungen in enger Zusammenarbeit mit der Stadt Aachen. • Aufbereitung der Analysen und Ergebnisse aus AP 4.2 in das abgestimmte Format. • Überprüfung der Kompatibilität des Formats zur Nutzung in bestehenden städtischen Infrastrukturen. • Bereitstellung einer klaren und verständlichen Erläuterung der Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Weisungen. <p>IWW:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cloudbasierte Bereitstellung der automatisierten KI-Ausgabe zur Darstellung. <p>Kisters:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schaffung eines Zugangs zur SC-Plattform von 4traffic. • Exemplarische Akquise und Darstellung von 4traffic Echtzeitdaten. • Wegen erheblicher Verzögerungen bei den Installations- und Abstimmungsarbeiten der 4traffic Detektoren konnten diese Daten jedoch nicht operationell eingebunden und getestet werden.
<p>AP5</p>	<p>Verkehrsregelungskonzepte bei Starkregenereignissen</p>	<p>IBS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifizierung und Bewertung vulnerabler Infrastruktur • Erstellung eines dynamischen GIS-Tools zur Darstellung und Verwaltung vulnerabler Infrastruktur, vorhandener Verkehrsmanagementsysteme und Maßnahmen sowie Überlagerung von (historischen) Überflutungsszenarien • - Entwicklung eines auf beliebige Kommunen anwendbaren Maßnahmenbaukastens und Anwendung am Beispiel der Stadt Aachen • Organisieren von Verkehrsdaten (FCD) zur Analyse des Verkehrsverhaltens bei Starkregenereignissen.

		<ul style="list-style-type: none"> Vereinigung sämtlicher Daten zur Erstellung von Verkehrsführungs- und Kommunikationskonzepten für unterschiedliche starkregenbedingte Überflutungsszenarien. <p>IWW:</p> <ul style="list-style-type: none"> Bereitstellung der automatisierten KI-Ausgaben für die zu analysierenden Beispielszenarien. Expertise zur Interpretation des Kartenmaterials.
AP6	Entwicklung eines Webservice für Live-Schnittstellen und Datenbereitstellung	<p>Kisters:</p> <ul style="list-style-type: none"> Konzipierung der Software-Infrastruktur des Webservice Implementierung via datasphere erst als Prototyp und dann als verfeinerte Version. Seit Anfang 2021 Bereitstellung des Zugangs für Verbundpartnern, der Stadt Aachen und der ASEAG. Jedoch verzögerte sich die Abstimmung mit Stadt Aachen und anderen regionalen Stakeholdern so das weitere Daten nicht in vorhandene Vorhersage- und ‚Critical Event Management‘-Systeme eingebunden werden konnten. <p>IWW:</p> <ul style="list-style-type: none"> Bereitstellung konzeptioneller Daten in der Mobiltheke

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Vorhersage urbaner Überflutungen stellt angesichts der komplexen Wechselwirkungen zwischen meteorologischen, hydrologischen und infrastrukturellen Prozessen eine besondere Herausforderung dar (Beven 2011). In Städten mit hohem Versiegelungsgrad und begrenztem Rückhaltevermögen können sich bei Starkregen großflächige Überflutungen in kürzester Zeit entwickeln. Konventionelle physikalisch-basierte Modellansätze, etwa auf Basis der Flachwassergleichung, erlauben zwar eine detaillierte Abbildung der Wasserbewegung (DHI 2025; Rossman 2010), sind jedoch angesichts notwendiger hoher Auflösung, Diskretisierung und aufwendiger Randbedingungen (Topographie, Gebäudestrukturen, variierende Rauheit) enorm rechenintensiv (Henonin et al. 2013; Zanchetta und Coulibaly 2020). Dies limitiert ihre Anwendbarkeit für Vorhersage, Frühwarnung und weitere Echtzeitanwendungen, da sie häufig nicht in der notwendigen Geschwindigkeit auch auf Hochleistungsrechnersystemen ausführbar sind (Bates et al. 2010). Obwohl dringender Handlungsbedarf zur Erhöhung der zivilen (Verkehrs-

)sicherheit besteht, weist die Naturgefahr Starkregen und Sturzfluten sowie deren Vorhersagbarkeit noch viele Forschungslücken auf (Braud et al. 2018).

1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Generelle Online-Wetterdienste (z. B. WetterOnline, The Weather Channel, Weather Underground) stellen zwar umfangreiche Vorhersagen für Endnutzer bereit, bieten jedoch keine hochaufgelösten, kommunal orientierten Hochwasserwarnungen. Kommerzielle Spezialanbieter (z. B. Meteomatics, DTN) decken häufig nur Teilmärkte wie Agrar-Meteorologie ab und vernachlässigen punktuelle Starkregenereignisse. Ingenieurbüros in Deutschland (Hydrotec, Spekter) liefern kommunale Warnsysteme, die meist auf lokal definierte Modell-Setups oder punktuelle Sensorik fokussieren. Operationale Behörden-Systeme (etwa das Community Hydrologic Prediction System, CHPS, in den USA) beruhen auf komplexen hydrologisch-hydraulischen Modellen, die hohes Fachpersonal erfordern und für urbane Starkregenszenarien in Echtzeit oft zu grobkörnig sind.

Neue, teil- oder vollautomatische Ansätze integrieren dagegen KI-Methoden, Cloud-Infrastrukturen und Fernerkundungsdaten, um auch lokal-extreme Phänomene abzudecken. Datengetriebene Verfahren wie Generative Adversarial Networks (GANs) – etwa synRainGAN (Welten et al. 2022), das auf historischen Niederschlagsdaten basiert, oder floodGAN (Hofmann und Schüttrumpf 2021), können synthetische, hochintensive Szenarien erzeugen und in Kombination mit KI-Vorhersagemodellen hochaufgelöste Überschwemmungskarten deutlich schneller liefern als klassische numerische Simulationen. Die Qualität solcher datengetriebenen Ansätze wird durch physikalisch-basierte 2D-Modelle (Henonin et al. 2013; Kumar et al. 2023) gesichert, die trotz beschleunigter Berechnungen auf modernen GPU- und Multi-Core-Architekturen (Lacasta et al. 2015) heute noch nicht flächendeckend operationell einsetzbar sind.

Ein entscheidender Baustein für belastbare Starkregenprognosen ist die Verfügbarkeit hochauflösender Echtzeitdaten. X-Band-Radarsysteme ermöglichen Messungen in bis zu 25 m räumlicher Auflösung und werden über Kalibrierungen an feste Stationen oder Citizen-Weather-Observer-Daten (CWOP) weiter verfeinert. Optisch-flussbasierte Nowcasting-Verfahren (Pulkkinen et al. 2019) projizieren die beobachteten Niederschlagsfelder im 5- bis 15-Minuten-Rhythmus und erzielen Vorwarnzeiten von bis zu einer halben Stunde für kleinräumige, konvektive Ereignisse. Moderne Cloud-Infrastrukturen (z. B. dataspHERE) sorgen für nahezu latenzfreie Datenbereitstellung, während Deep-Learning-Algorithmen Radar- und Wetterdaten kontinuierlich verarbeiten. Die Verknüpfung dieser Prognosen mit verkehrsrelevanten Parametern (etwa über Detektorsysteme) eröffnet weitere Möglichkeiten zur frühzeitigen Verkehrslenkung bei drohenden Überflutungen.

Im Vergleich zu den genannten Diensten und Systemen verfolgt das ISRV-Projekt einen innovativen Ansatz, der alle folgenden Aspekte kombiniert: Es entwickelt ein hochauflösendes, KI-basiertes Vorhersage- und Warnsystem, das neben offenen Niederschlagsdaten lokale Radar-, Verkehrs- und Wasserstandsdaten integriert und damit nahezu Echtzeit-Überflutungsprognosen ermöglicht. Durch standardisierte Schnittstellen und Cloud-Dienste werden die erarbeiteten Prognosen zudem direkt für kommunale Akteure nutzbar gemacht.

1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie benutzter Informations- und Dokumentationsdienste

Die entwickelten Modell- und Warnsystemkomponenten greifen auf frei zugängliche Wetterbeobachtungen und Vorhersagen vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zurück, darunter Messdaten regionaler

DWD-Wetterstationen und Komposit-Radarprodukte. Gleichzeitig werden Daten privater Wetterstationen (z. B. das Citizen-Weather-Observer-Program) und eigene Messungen im Stadtgebiet durch 4traffic und RWTH-institutseigene Stationen eingebunden. Als Nowcasting-Lösung kam in Teilen die Open-Source-Bibliothek pySTEPS zum Einsatz (Pulkkinen et al. 2019). Zusätzliche Dokumentations- und Informationsdienste beziehen sich auf kommerzielle Wetteranbieter sowie wissenschaftliche Publikationen zum Thema Deep-Learning-gestützte Hochwasserprognosen. Die Modellierung der Stadt Aachen erfolgte in der lizenzpflichtigen Software Mike FM sowie Mike +, welche es erlaubt hoch komplexe hydrodynamische Prozesse auf einer 2D Oberfläche abzubilden (DHI 2025). Das KI-Modell wurde ebenfalls in Python erarbeitet und nutzte vorwiegend die Open-Source-Bibliothek Pytorch. Für die Visualisierung der Verkehrskonzepte für unterschiedliche Starkregenszenarien wurde die Open-Source-basierte Geoinformationssystemsoftware „QGIS“ verwendet, worin u.a. die frei zugänglichen, offenen Daten der Stadt Aachen sowie die im Projekt entwickelten Ergebnisse mittels der integrierten Python-Konsole verschnitten wurden.

Durch die Verschneidung dieser vielfältigen Datenquellen und Tools gelingt die Echtzeitvorhersage urbaner Überschwemmungen, wie sie vom ISRV-Projekt angestrebt und prototypisch realisiert wird.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Entwicklung des ISRV-Demonstrators erfolgte in Zusammenarbeit mit:

- dem Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen,
- der Kisters-AG,
- der 4traffic SET GmbH und
- der SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH

Zusätzliche Zusammenarbeit erfolgt mit

- dem Referat Digitalität und Innovation in der Mobilität (FB 68/001) der Stadt Aachen,
- der Aachener Straßenbahn und Energieversorgungs-AG (ASEAG) und
- der Regionetz GmbH

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzieltes Ergebnis

Im Folgenden werden die Projektergebnisse je Arbeitspaket und entsprechend der Ziele der jeweiligen Arbeitspakete dargestellt.

2.1.1 Erreichte Ziele

Zu den Gesamtzielen des Verbundvorhabens ISRV trugen das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, die KISTERS AG, die 4traffic SET GmbH sowie die SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH bei.

Arbeitspaket 1 (IWW, KISTERS): Entwicklung eines Starkregenszenarien-Generators und Erzeugung hydrodynamischer Trainingsdaten

Wesentliche Ziele:

- Entwicklung eines Machine-Learning-basierten Generators zur automatischen Erzeugung realitätsnaher synthetischer Starkregenereignisse.
- Aufbau, Erweiterung und Validierung eines hydrodynamischen Modells zur Simulation von Überflutungen unter Berücksichtigung komplexer Interaktionen.
- Hydrodynamische Simulation generierter Szenarien sowie deren GIS-basierte, risikoanalytische Bewertung.

Umsetzung:

Ein Szenarien-Generator, basierend auf verschiedenen meteorologischen Datenquellen, wurde entwickelt und erfolgreich validiert. Das zugrunde liegende hydrodynamische Modell wurde um zusätzliche Module erweitert und umfassend anhand realer historischer Starkregenereignisse überprüft. Die daraus erzeugten Szenarien wurden simuliert, ausgewertet und zu hochwertigen Trainingsdatensätzen zusammengeführt.

Ergänzend dazu wurde eine Echtzeit-Schnittstelle zur Erfassung und Visualisierung relevanter Open Data entwickelt. Für den Raum Aachen wurden außerdem Niederschlagsschätzungen des KISTERS X-Band-Radars integriert. Auf dieser Grundlage entstand eine nahezu in Echtzeit arbeitende Nowcasting-Lösung, die zusätzlich auf Wetterstationsdaten aus dem DWD-Netzwerk zurückgreift. Diese Daten werden ebenfalls archiviert und stehen für weiterführende Analysen zur Verfügung.

Die Genauigkeit, der vom KISTERS-Radar-Nowcast erzeugten Niederschlagsintensitäten und -volumina wurde mit tatsächlich gemessenen Radardaten verglichen. Die im Jahr 2022 erfassten Daten zeigen, dass die kurzfristigen Prognosen der räumlichen Niederschlagsintensität für einen Zeitraum von bis zu 60 Minuten im Durchschnitt eine ausreichende Genauigkeit aufweisen, um als Eingangsgröße für das IWW DL-Modell zur Vorhersage urbaner Überflutungen verwendet zu werden.

Arbeitspaket 2 (4traffic): Aufbereitung von mobilitätsrelevanten Datensätzen und -quellen

Wesentliche Ziele:

- Einrichtung einer leistungsfähigen Echtzeit-Erfassungsinfrastruktur für Verkehrsdaten am Überflutungsschwerpunkt Kaiserplatz in Aachen.
- Integration, Standardisierung und Aufbereitung der erhobenen Verkehrsdaten für die Nutzung innerhalb der Modellierungsprozesse und der Smart-City-Plattform.

Umsetzung:

Insgesamt wurden acht Detektorboxen installiert und über LoRaWAN-Gateways in ein robustes Echtzeit-Datennetzwerk eingebunden. Die erfassten Verkehrsdaten wurden mit weiteren Datenquellen, darunter KISTERS und ASEAG, verknüpft, standardisiert und fortlaufend validiert. Abschließend wurden die Daten im Sinne von Open Data öffentlich zugänglich gemacht. Allerdings kam es zu erheblichen Problemen bei der Stromversorgung, wodurch die Datenerfassung nur sehr lückenhaft erfolgen konnte. Eine genaue Identifizierung der Fehlerursache seitens des Netzbetreibers war nicht möglich.

Arbeitspaket 3 (IWW, KISTERS): Entwicklung eines DL-Modells und Integration eines Demonstrators zur integrierten Vorhersagelösung

Wesentliche Ziele:

- Entwicklung eines leistungsstarken Deep-Learning-Modells (DL-Modell) zur Echtzeitvorhersage starkregeninduzierter Überflutungen auf Basis generierter Trainingsdaten.
- Technische Integration des DL-Modells mit dem Echtzeit-Niederschlagsvorhersageplattform Datasphere.
- Evaluation der Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit des entstandenen Demonstrators.

Umsetzung:

Es wurde ein Convolutional Neural Network (CNN)-basiertes DL-Modell entwickelt, das komplexe räumliche und zeitliche Zusammenhänge zuverlässig prognostiziert. Dieses DL-Modell wurde in den Demonstrator integriert. Die Eingabedaten wurden dem Modell in Form von Nowcasts der Radar-Niederschlagsfelder bereitgestellt, und die Modellergebnisse anschließend zur Visualisierung wieder in die Plattform zurückgeführt. In diesem Zusammenhang wurden Echtzeitdaten der 4traffic-Detektorboxen im Demonstrator eingebunden, um ein besseres Verständnis der Korrelation zwischen Verkehr und Starkregen zu ermöglichen und darauf basierend Empfehlungen abzuleiten. Abschließende Tests zeigten, dass das System in Bezug auf Genauigkeit und Verarbeitungsgeschwindigkeit praxistauglich ist.

Arbeitspaket 4 (4traffic, IWW, KISTERS): Rückkopplung der Modelle in der SC-Plattform, Integration und Korrelation der Daten ins Stadtbild

Wesentliche Ziele:

- Integration und Rückkopplung der entwickelten Vorhersagemodelle zur Auswertung von Verkehrsverhaltensmustern während Starkregenereignissen in der Smart-City-Plattform.
- Umfassende Analyse der Echtzeitdaten zur Identifikation von Verkehrsverhalten unter Starkregenbedingungen.
- Entwicklung von datenbasierten Weisungsempfehlungen für bestehende städtische Verkehrsregelungssysteme, insbesondere Lichtsignalanlagen.

Umsetzung:

Es wurde eine Schnittstelle entwickelt, die die Integration und Interpretation verschiedener Modelle ermöglicht und eine Rückkopplung in die SC-Plattform erlaubt. Aufgrund anhaltender Probleme mit der Stromversorgung der im Projekt eingesetzten Detektorboxen mussten ergänzend Daten aus weiteren Projekten herangezogen und mit den bestehenden Projektdaten kombiniert werden. Auf dieser Grundlage konnten Vorhersagen abgeleitet werden, die sich grundsätzlich für die Ableitung von Handlungsempfehlungen eignen. Das System befindet sich derzeit noch im Prototypstadium und ist daher noch nicht für den praktischen Einsatz geeignet.

Arbeitspaket 5 (IBS, IWW): Verkehrsregelungskonzepte bei Starkregenereignissen

Wesentliche Ziele:

- Entwicklung eines allgemeingültigen Verkehrsführungskonzeptes und geeigneter Informationsstrategien bei Starkregenereignissen.
- Konkrete Anwendung und Anpassung dieses Konzeptes am Beispiel der Stadt Aachen.
- Evaluation der Konzepte hinsichtlich Wirksamkeit, Umsetzbarkeit und Übertragbarkeit auf andere Kommunen.

Umsetzung:

Mögliche vulnerable Infrastrukturbereiche wurden identifiziert, analysiert und in einem auf andere Kommunen übertragbaren Konzept zusammengefasst. In einem nächsten Schritt wurden mögliche Verkehrsmanagementmaßnahmen und deren Informationsverbreitungsmethoden erhoben und ebenfalls in einem auf andere Kommunen übertragbaren Konzept zusammengefasst. Anschließend wurde ein auf die Stadt Aachen anwendbares Konzept aufgestellt, mit den lokalen Stakeholdern abgestimmt und die Szenarien mit potenziellen Überflutungsgebieten der Stadt Aachen kombiniert. Nach Rückmeldung der Stakeholder wurde sowohl das allgemeine Verkehrsführungskonzept als auch spezifisch auf Aachen übertragene Konzept detailliert ausgearbeitet und nochmals mit lokalen Stakeholdern abgestimmt.

Arbeitspaket 6 (KISTERS, IWW): Entwicklung eines Webservice für Live-Schnittstellen und Datenbereitstellung

Wesentliche Ziele:

- Entwicklung und Implementierung einer modularen Software-Infrastruktur zur Bereitstellung von Echtzeitdaten über Webservices und nutzerspezifische Schnittstellen.
- Sicherstellung einer breiten Nutzbarkeit der Schnittstellen durch verschiedene Endgeräte und Nutzergruppen.

- Veröffentlichung statischer Daten wie Verkehrsführungskonzepte und Gefahrenkarten in der Mobiltheke

Umsetzung:

Eine zuverlässige Software-Infrastruktur des Webservices bzw. des Demonstrators wurde konzipiert und mithilfe des datasphere-Produkts implementiert. Damit werden Echtzeitdaten sowie allgemeingültige Datensätze effizient bereitgestellt. Die statischen Projektergebnisse wurden in der Mobiltheke öffentlich zugänglich gemacht, wodurch eine nachhaltige Nutzbarkeit gewährleistet ist.

2.1.2 Projektmanagement

Das Projektmanagement wurde durch regelmäßige Projekttreffen realisiert, bei denen sämtliche Projektpartner umfassend eingebunden waren. Diese Treffen dienten der transparenten Abstimmung von Fortschritten, Herausforderungen und nächsten Schritten. Neben den internen Besprechungen fand eine intensive externe Koordination statt, die auch gezielt Workshops umfasste. Bei diesen Workshops wurden externe Stakeholder eingeladen, um im Rahmen von Informationsaustausch und Nutzenanalysen praxisnahe Erkenntnisse zu gewinnen und so die weitere Entwicklung optimal auszurichten. Durch diese kombinierte Vorgehensweise konnte eine enge Abstimmung zwischen allen Beteiligten erzielt und der Projekterfolg nachhaltig unterstützt werden.

2.1.3 Technische Arbeiten

a) AP1 - Entwicklung eines Starkregenszenarien-Generators und Erzeugung hydrodynamischer Trainingsdaten

Ein Starkregenereignis definiert sich durch hohe Niederschlagsmengen innerhalb kurzer Zeit auf begrenztem Raum, dazu gehören kurze Vorwarnzeiten, was die Vorhersage betroffener Gebiete erschwert.

Der Deutsche Wetterdienst definiert Starkregenereignisse anhand von Schwellwerten der Niederschlagsintensität sowie der Niederschlagsmenge und kategorisiert diese in unterschiedliche Schweregrade (DWD 2025):

- Markantes Wetter: Regenmengen 15 bis 25 l/m² in 1 Stunde oder 20 bis 35 l/m² in 6 Stunden
- Unwetterwarnung: Regenmengen > 25 bis 40 l/m² in 1 Stunde oder > 35 l/m² bis 60 l/m² in 6 Stunden
- extremes Unwetter: Regenmengen > 40 l/m² in 1 Stunde oder > 60 l/m² in 6 Stunden

Radardaten

Um diese kleinräumigen intensiven Starkregenzellen zu erfassen, wurden im Projekt Daten des am KISTERS Hauptquartier in Aachen installierten X-Band-Radars benutzt. Das Radar liefert alle 5 Minuten Schätzungen der Niederschlagsintensität für Aachen (in etwa 8 km Entfernung) und die umliegende Region mit einer Auflösung von 25 m und 125 m. Die Kalibrierung der Daten erfolgt anhand von Niederschlagsbeobachtungen an 70 Stationen des Messnetzes des DWD sowie dem MADIS/CWOP (Citizen Weather Observer Program). Das Radar liefert somit Niederschlagsfelder mit einer viel höheren Auflösung und Nähe am Untersuchungsgebiet als andere verfügbare Open-Data-Produkte wie z.B. das „DWD Radar Composite for Germany“. Abbildung 2 zeigt eine Visualisierung der vom Radar geschätzten Niederschlagsfelder mit einer Auflösung von 125 m für Aachen Anfang 2022.

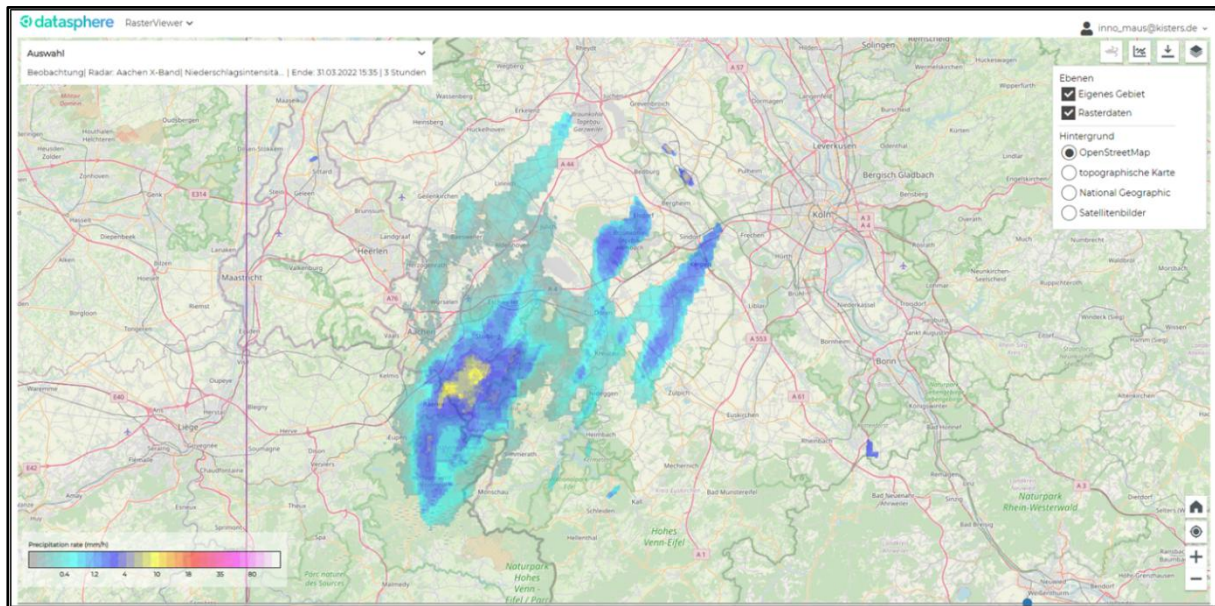


Abbildung 2 Visualisierung eines mittels des X-Band Radardaten erstellten Niederschlagsfeldes im Demonstrator Radar-Basiertes Nowcasting

Das implementierte Nowcasting basiert auf der Python-Bibliothek PySTEPS (siehe auch: <https://pysteps.readthedocs.io/en/stable/index.html>). Verschiedene Methoden wurden beispielhaft mit den Eumetsat H SAF Niederschlagsabschätzungen als Eingangsdatensatz implementiert.

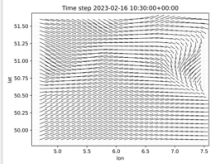
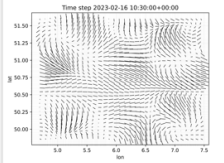
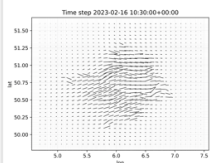
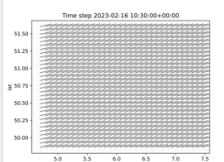
Eine Sequenz von mindestens zwei der neuesten Radarbilder wird dabei mit Hilfe von Optical-Flow-Methoden verwendet, um ein Bewegungsfeld des Niederschlags-Intensitätsmusters zu berechnen. Der Nowcast extrapoliert die zukünftige Position jeder Intensität des letzten Niederschlagsbildes entlang der Trajektorien, die durch das berechnete Bewegungsfeld gegeben sind.

Es gibt verschiedene Methoden, um das Bewegungsfeld zu berechnen. Abhängig von Mustern, Verteilungen, Bewegungen und Entwicklungen auf einer Niederschlagsbildsequenz führen die verschiedenen optischen Flussmethoden zu unterschiedlicher Nowcast-Qualität.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die ausgewerteten Flow-Methoden:

1. Variational Echo Tracking (VET)
<https://pysteps.readthedocs.io/en/latest/generated/pysteps.motion.vet.vet.html>
2. Dynamische und adaptive Radarverfolgung von Stürmen (DARTS)
<https://pysteps.readthedocs.io/en/stable/generated/pysteps.motion.darts.DARTS.html>
3. Anisotrope Diffusionsmethode nach Proesmans et al. (1994)
<https://pysteps.readthedocs.io/en/stable/generated/pysteps.motion.proesmans.proesmans.html>
4. Konstantes Bewegungsfeld (höchste Korrelation zweier Bilder)
<https://pysteps.readthedocs.io/en/stable/generated/pysteps.motion.constant.constant.html>

Tabelle 2 Untersuchte optische Flussmethoden für das Nowcasting

Method	Calculation of motion vectors	dynamic of the motion	note
VET	slow		Best dynamic! No edge issues. Good smoothness!
DARTS	very fast		Circle symmetry! Few moving across radar view circle.
proesmans	slow		Focused on the inner circle. No radar view circle crossing.
constant	fast		Too simple! Maybe good first guess for VET.

Für den Radar-Nowcast wurde die VET Methode gewählt. Obwohl es sich um eine der langsamsten Methoden handelt, liefert sie die besten Prognoseergebnisse. Tabelle 3 zählt relevante Parameter des implementierten Nowcasts-Datensatzes auf.

Tabelle 3 Beschreibung der Nowcastdaten

Bereitsteller	Produkte	Abdeckung	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Aktualisierungsintervall
GAMIC (Nowcast von KISTERS)	Radarnowcast: Aachen X-Band	Aachen und Umgebung 2 Std. in die Zukunft	125m	5 Min.	Alle 10 Min.

Die Visualisierung des Nowcastings im Demonstrator ist in Abbildung 3 dargestellt. Neben der flächigen Darstellung der Nowcast-Daten ist es auch möglich, den vorhergesagten zeitlichen Verlauf der Niederschlagsintensität an einem Punkt für die nächsten 2 Stunden abzufragen. Dies ist im unteren Teil der Abbildung 3 zu sehen.

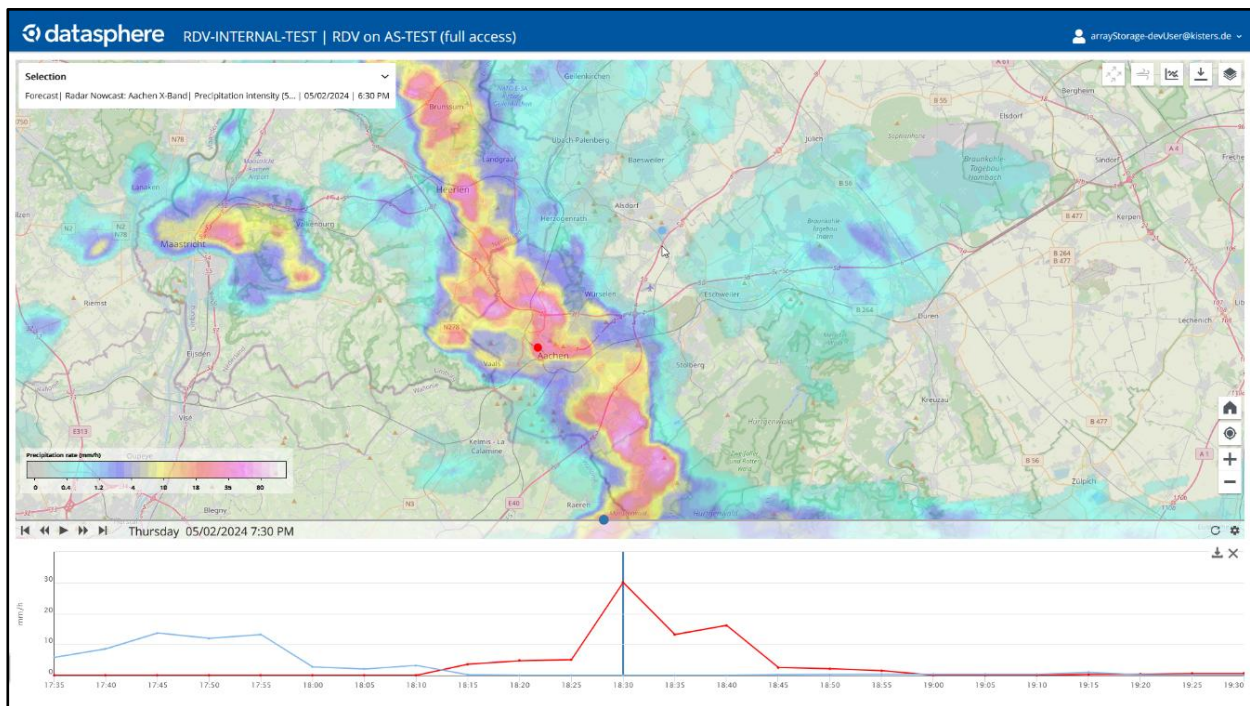


Abbildung 3 Visualisierung von Nowcastdaten in datasphere

Analyse

Die Genauigkeit dieser Vorhersagen wurde im Rahmen des Projekts anhand der vom X-Band-Radar geschätzten Niederschläge analysiert. Dazu wurde der Fraction Skill Score für zehn verschiedene Ereignisse in Aachen zwischen 2022 und 2023 berechnet, die eine Minstdauer von zwei Stunden aufwiesen und bei denen eine Niederschlagsrate von mindestens 1 mm/h beobachtet wurde. Der FSS ist eine unscharfe Metrik, die die Qualität einer Vorhersage im Vergleich zu Beobachtungen in Abhängigkeit von einem Ereignisschwellenwert und der räumlichen Vergleichsskala bewertet. Der FSS ermöglicht den Vergleich hochauflösender Produkte auf verschiedenen Aggregationsebenen, beispielsweise von der Raster- bis zur Einzugsgebietskala.

Wir vergleichen den FSS mit einer rasterbasierten, gemittelten Basislinie von $FSS_{\text{uniform}} = 0.5 + f_0/2 = 0.543$, die zwischen einer perfekten Vorhersage und keiner Vorhersagefähigkeit liegt, wobei f_0 die beobachtete Ereignishäufigkeit ist. Wenn der Nowcast-FSS höher als FSS_{uniform} ist, kann er als nützlich angesehen werden.

Die Ergebnisse in Abbildung 4 zeigen, dass die Genauigkeit je nach Ereignis variiert. Sie stellt den durchschnittlichen FSS für jedes bewertete Ereignis und jede räumliche Skala da. In Fettdruck ist der mittlere FSS für alle Ereignisse auf jeder Aggregationsebene dargestellt. Die Analyse deutet darauf hin, dass Nowcast-Vorhersagen mit einer räumlichen Auflösung von 100 Metern für einen Zeitraum von 15 bis 40 Minuten in die Zukunft nützlich sind. Bei einer räumlichen Auflösung von 5 Kilometern verlängert sich dieser Zeitraum auf 25 bis 60 Minuten. Aus dieser Perspektive sollten die Nowcast-Vorhersagen eine effektive Vorwarnzeit von etwa 30 Minuten ermöglichen.

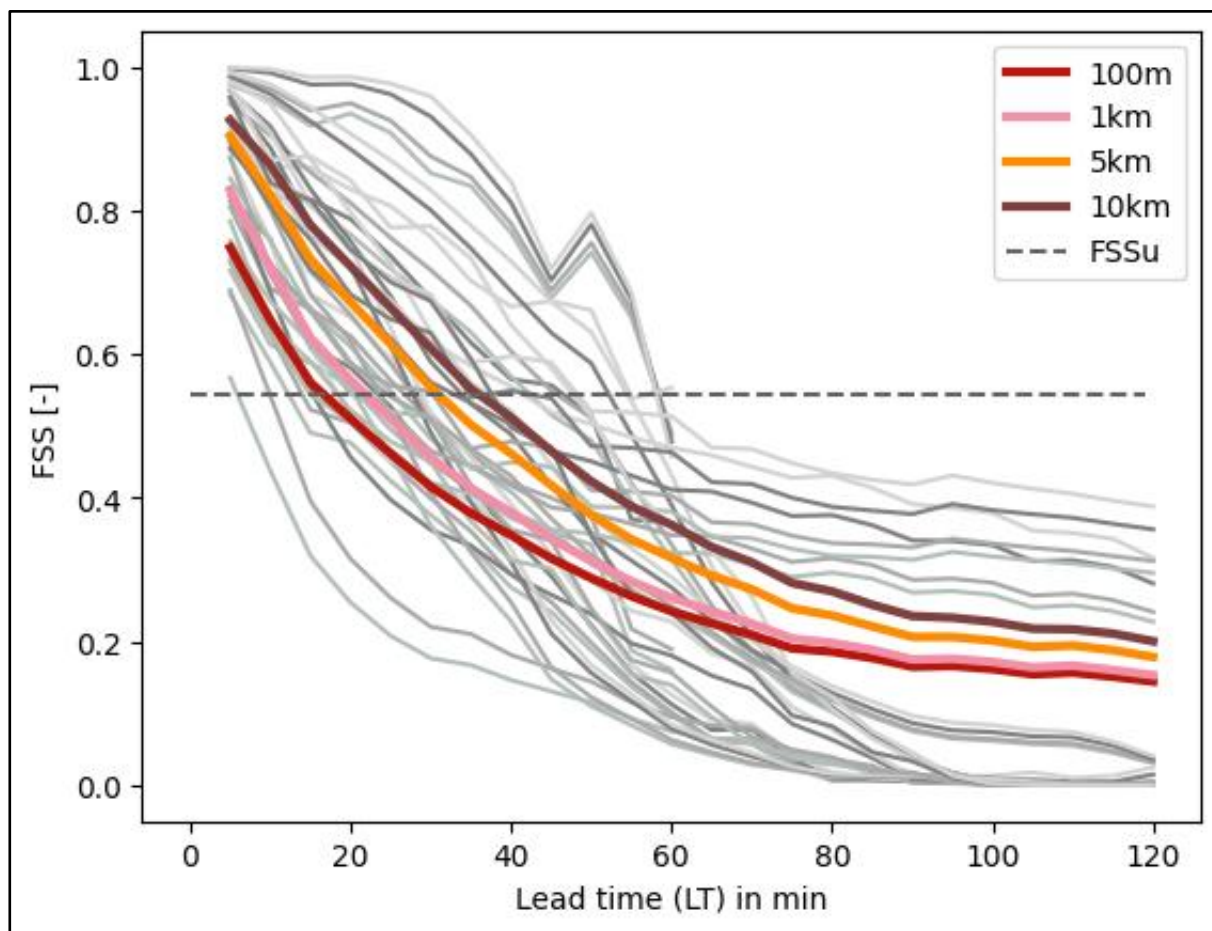


Abbildung 4 Durchschnittlicher FSS für alle analysierten Ereignisse über vier verschiedene Aggregationsebenen. Der referenzierte durchschnittliche FSSuniform ist zum Vergleich hinzugefügt.

Entwicklung eines Starkregenszenarien-Generators

Im Rahmen des Projekts wurde ein innovativer Ansatz verfolgt, um realitätsnahe Starkregenszenarien zu generieren und gleichzeitig hydrodynamische Trainingsdaten für die Überflutungsrisikoanalyse zu erstellen. Zunächst wurde ein Machine-Learning-basierter Generator entwickelt, der mithilfe eines Generative Adversarial Network (GAN) synthetische Regenfelder erzeugt. Historische Niederschlagsdaten, beispielsweise das Radolan-Produkt des DWD oder die durch KISTERS erfassten Niederschlagsraster, dienten als Trainingsgrundlage, sodass der Generator in der Lage ist, zeitlich und räumlich variable Starkregenereignisse realitätsnah nachzubilden. Dabei sorgt der iterativ arbeitende Prozess zwischen Generator und Diskriminator dafür, dass die synthetisch erzeugten Niederschlagsfelder frei von typischen Messartefakten sind und somit als qualitativ hochwertiger Input für weitere Modellierungsschritte genutzt werden können.

Das GAN basiert auf zwei antagonistisch agierenden neuronalen Netzwerken: dem Generator (G) und dem Diskriminator (D). Der Generator wandelt einen zufällig ausgewählten Eingabevektor über mehrere Schichten, beginnend mit einer voll verbundenen Schicht, welche den Vektor in eine kompakte, räumliche Darstellung transformiert, mittels transponierter Faltungs- und Upsampling-Schichten in ein 32×32 Regenfeld um. Dabei werden Batch-Normalisierungen und Aktivierungsfunktionen wie ReLU und tanh eingesetzt, um die Stabilität des Trainings zu erhöhen und realistische Strukturen in den erzeugten Bildern zu gewährleisten. Gleichzeitig verarbeitet der Diskriminator die Eingabedaten durch

convolutionel Schichten, extrahiert die relevanten räumlichen Merkmale und reduziert schrittweise die Dimensionalität, um letztlich über eine abschließende voll verbundene Schicht zu bestimmen, ob das betrachtete Regenfeld real oder synthetisch ist.

Der Trainingsprozess unterteilt sich in zwei Phasen: In der ersten Phase wird der Diskriminator mit einem zufällig ausgewählten Halbbatch aus realen und synthetischen Regenfeldern trainiert, sodass er lernt, beide Datenarten voneinander zu unterscheiden. Sobald der Diskriminator eine definierte Genauigkeit erreicht hat, folgt die zweite Phase, in der der Generator trainiert wird. Hier generiert G neue synthetische Regenfelder, die durch den vortrainierten Diskriminator bewertet werden, ohne dass in diesem während des Generatortrainings Gewichte angepasst werden. Durch die Rückpropagation der Fehlersignale werden die Parameter des Generators kontinuierlich angepasst, um den Unterschied zwischen den synthetischen und den realen Regenfeldern zu minimieren. Dieser adversariale Trainingsprozess führt dazu, dass der Generator mit der Zeit immer realistischere Niederschlagsmuster erzeugt.

Der gesamte Trainingsablauf wird unter Einsatz moderner Optimierungsalgorithmen wie Adam (mit typischer Lernrate von 0,0002 und den gängigen β -Werten) durchgeführt, was eine stabile Konvergenz und effiziente Modellanpassung ermöglicht. Durch diese Methode entsteht ein synthetischer Datensatz, der die variablen Charakteristika von Starkregenereignissen detailliert abbildet, dabei jedoch frei von Messrauschen und anderen Artefakten ist. Die Kombination aus der innovativen GAN-Architektur und dem sorgfältig abgestimmten Trainingsverfahren bildet somit eine solide Grundlage für weiterführende hydrodynamische Simulationen und präzise Überflutungsrisikoanalysen in urbanen Räumen.

Erzeugung hydrodynamischer Trainingsdaten

Parallel dazu wurde in der Software MIKE+ ein hydrodynamisches Modell speziell für den urbanen Raum von Aachen aufgebaut, das auf den shallow water equations (SWE) basiert und mittels unstrukturierter Netzdiskretisierung die komplexen Wechselwirkungen von Oberflächenabfluss und Gewässern präzise abbilden kann. Dabei erfolgt die räumliche Diskretisierung durch den Einsatz adaptiver Meshverfahren, die es ermöglichen, das Modellgebiet in kritischen Bereichen, beispielsweise an Gebäudekanten, engen Straßenzügen und in Regionen mit komplexer Topographie, feiner aufzulösen, während in weniger kritischen Zonen gröbere Netze verwendet werden. Solche unstrukturierten Netze werden mithilfe verschiedener Ansätze zur Darstellung urbaner Strukturen erstellt, etwa durch die Building-Shape-Methode, bei der Gebäudeumrisse direkt in das digitale Geländemodell (DGM) integriert werden, sodass Gebäudestrukturen exakt abgebildet werden und der Einfluss urbaner Bebauung auf den Oberflächenabfluss realistisch berücksichtigt wird.

Zur Anpassung an die speziellen Anforderungen städtischer Infrastrukturen wurden automatisierte Schnittstellen implementiert, die den direkten Einsatz der synthetisch generierten Niederschlagsfelder ermöglichen. Die räumlichen und zeitlichen Eingabedaten, charakterisiert durch hohe Auflösung und variierende Intensitäten, werden nahtlos in das Modell übernommen, sodass automatisierte und kontinuierliche Simulationen urbaner Überflutungsszenarien realisiert werden können. Zusätzlich wurden die Rand- und Anfangsbedingungen detailliert auf die urbanen Gegebenheiten abgestimmt. Parameter wie differenziell ermittelte Rauheitswerte, die je nach Flächennutzung (z. B. Siedlungsflächen, Vegetation, Industrie) variieren, sowie vereinfachte Darstellungen des Kanalnetzes in Form von Quell- und Senktermen oder flächigem Niederschlagsabzug, fließen in die Modellierung ein.

Modernste GPU-gestützte Parallelisierungsverfahren kamen zum Einsatz, um den hohen Rechenaufwand, der durch die feine Netzauflösung und komplexe Geometrien entsteht, erheblich zu reduzieren.

Mithilfe von CUDATM-Technologien und der parallelen Berechnung von Finite-Volumen-Methoden werden Simulationen in kurzen Zeiten durchgeführt, die in klassischen CPU-basierten Systemen mehrere Stunden in Anspruch nehmen würden, so können hochauflösende Simulationen beispielsweise wenigen Stunden bis Minuten realisiert werden.

Die Validierung des MIKE+ Modells erfolgte durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten realer Flutereignisse, insbesondere anhand eines Überflutungsereignisses vom 29.05.2018 in Aachen. Aus Bildmaterial konnte eine hohe Übereinstimmung hinsichtlich der prognostizierten Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten ermittelt werden, sodass die Modellgenauigkeit als überzeugend bewertet werden konnte.

Die generierten Starkregenszenarien wurden in das validierte hydrodynamische Modell eingespeist, um detaillierte Simulationen von Überflutungsszenarien zu erstellen. Hieraus resultierten umfangreiche Trainingsdatensätze in Form von Wasserstandskarten, Fließgeschwindigkeitsverteilungen und räumlichen Überflutungsflächen. Diese Simulationsergebnisse wurden anschließend in einem GIS-basierten System weiterverarbeitet, wo sie mit räumlichen Infrastrukturdaten, wie Gebäude- und Straßennetzinformationen, verknüpft werden. Durch diese risikoanalytische Bewertung können potenzielle Risikogebiete präzise identifiziert, Flutschadenspotenziale quantifiziert und daraus gezielt Maßnahmen für die Verkehrlenkung sowie für Notfall- und Krisenmanagement abgeleitet werden.

Die Modellierung in MIKE+ baut zudem auf aktuellen methodischen Ansätzen zur effizienten Netzgenerierung und zur Aufteilung großer Untersuchungsgebiete in handhabbare Untereinheiten auf. Durch den gezielten Einsatz von Puffern an den Grenzen der Modellgebiete konnte der Einfluss benachbarter Bereiche minimiert und die Übergänge zwischen lokalen und globalen Auflösungen harmonisiert werden. Diese methodischen Anpassungen gewährleisten, dass selbst in städtischen Räumen mit hoher baulicher Dichte und komplexer Topographie realitätsnahe Überschwemmungsvorhersagen generiert werden können, ohne dass die Rechenressourcen übermäßig beansprucht werden.

Insgesamt ermöglicht dieser integrative Ansatz, von der präzisen Netzgenerierung und GPU-beschleunigten Simulation bis zur GIS-basierten Risikoanalyse, eine effiziente und präzise Modellierung urbaner Überflutungsszenarien, die als Grundlage für operative Frühwarnsysteme und strategische Maßnahmen im Katastrophenmanagement dient.

b) AP2 - Aufbereitung von mobilitätsrelevanten Datensätzen und -Quellen

Im Rahmen des Arbeitspakets 2 wurde die systematische Aufbereitung mobilitätsrelevanter Datensätze aus unterschiedlichen Quellen vorgenommen. Zur Datenerhebung wurden insgesamt acht Sensorboxen an ausgewählten Standorten im Stadtgebiet installiert, ergänzt durch zusätzliche Sensoren der Projektpartner KISTERS sowie weiterer externer Anbieter. Während der Implementierungsphase zeigten sich Herausforderungen bei der Stromversorgung der eingesetzten Sensorboxen, da seitens der STA-WAG keine dauerhafte Stromversorgung an den hierfür vorgesehenen Straßenlaternen zur Verfügung gestellt werden konnte. Infolgedessen kam es regelmäßig zu Stromausfällen, deren genaue Ursache trotz intensiver technischer Untersuchungen bisher nicht abschließend identifiziert werden konnte. Ein möglicher Zusammenhang mit einem erhöhten Aufkommen von Vandalismus wird als Ursache vermutet und ist Gegenstand weiterer Betrachtungen.

In Kooperation mit dem IWW wurden in einer kontrollierten Umgebung, der Flutungshalle, verschiedene Abstandssensoren hinsichtlich ihrer Eignung für den Außeneinsatz evaluiert. Insbesondere die Messung des Abstandes zu beweglichen Wasseroberflächen mittels Ultraschalltechnologie stellte hierbei

eine technische Herausforderung dar, die durch systematische Tests und vergleichende Analysen der Messgenauigkeit und Robustheit unterschiedlicher Sensoren erfolgreich adressiert werden konnte. Diese Evaluierung ermöglichte schließlich die Auswahl geeigneter Sensortechnik für den realen Einsatz im Außenbereich.

Zusätzlich konnten externe Datenquellen erfolgreich integriert werden. Hierzu zählten insbesondere die API der ASEAG sowie weitere Sensordatenquellen aus dem Ac-DatEP-Projekt der mFUND-Reihe, welche die vorhandenen Datenbestände wesentlich erweiterten. Zur effizienten und standardisierten Bereitstellung der Daten wurden entsprechende Schnittstellen mittels der InfluxDB API implementiert, wodurch die Daten direkt in die Mobilithek übertragen werden konnten. Dies ermöglichte eine zentrale, standardisierte und nachhaltige Verfügbarkeit der aufbereiteten Daten für weiterführende wissenschaftliche Analysen und mobilitätsbezogene Anwendungen.

c) AP3 - Entwicklung eines DL-Modells und Integration eines Demonstrators zur integrierten Vorhersagelösung

DL-Modellentwicklung

Aufbauend auf den zuvor generierten synthetischen Starkregenereignissen und den daraus erstellten hydrodynamischen Simulationen wurde im Rahmen des Projekts ein leistungsstarkes Deep-Learning-Modell (DL-Modell) zur Echtzeitvorhersage urbaner Überflutungen entwickelt. Das eingesetzte Modell, bezeichnet als „floodGAN“, nutzt dabei ebenfalls die Methodik eines generativen adversarialen Netzwerks (GAN), jedoch mit einem spezifischen Fokus auf die schnelle und exakte Übersetzung von Niederschlagsrastern in realitätsnahe, hochauflösende Überflutungskarten. Die Modellarchitektur basiert auf einer U-Net-Struktur mit einem Encoder-Decoder-System, das gezielt räumliche Zusammenhänge in den Eingangsdaten extrahiert und daraus Überflutungstiefen und -flächen ableitet. Ein speziell auf die Erkennung lokaler Details ausgerichteter PatchGAN-Diskriminator prüft dabei kontinuierlich die Qualität der erzeugten Überflutungskarten hinsichtlich ihrer Authentizität gegenüber den Ergebnissen der hydrodynamischen Simulationen. Durch diesen iterativen Trainingsprozess wird die Genauigkeit und visuelle Plausibilität der Vorhersagen kontinuierlich gesteigert. Die resultierende Modellkonfiguration ermöglicht es, komplexe Überflutungsszenarien in Echtzeit vorherzusagen und erreicht eine enorme Beschleunigung der Prognoserechnung im Vergleich zu klassischen hydrodynamischen Modellen, ohne dabei wesentliche Einbußen in der Genauigkeit hinnehmen zu müssen. Umfangreiche Validierungstests, die sowohl synthetische Starkregenereignisse als auch historische Ereignisse aus Aachen umfassten, bestätigten die hohe Effizienz und Praxistauglichkeit des entwickelten DL-Modells für operative Einsatzbereiche.

Modellintegration

Mithilfe des KISTERS Real-time Analytics Framework (RTAF) können verschiedenste Abflussmodelle und hydraulische Modelle automatisiert ausgeführt und deren Resultate in der datasphere bereitgestellt werden. Dies beinhaltet die Verwaltung von Modellkonfigurationen sowie von internen Modellvariablen (Abbildung 5).

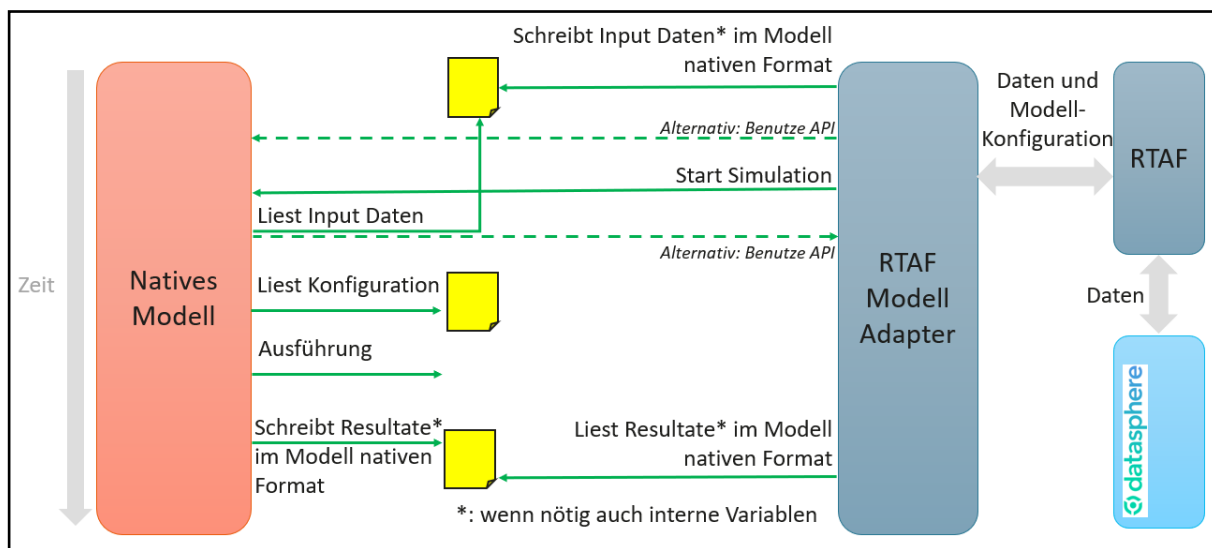


Abbildung 5 Ausführung von Externen Modellen im KISTERS Real-time Analytics Framework

Hierbei werden die eingebetteten Modelle in Containern (aktuell Docker) bereitgestellt, damit sie sowohl lokal als auch in der Cloud operationalisiert und skaliert werden können. Das Ziel-Betriebssystem ist dabei eine Open Source LINUX Distribution (bei Bedarf auch Windows).

In diesem Rahmen wurden mehrere allgemeine Microservices für das Vor- und Nachbearbeitung von Daten und zur Modellansteuerung bereitgestellt, um das trainierte floodGAN-Modell in den Demonstrator zu integrieren.

Der wichtigste Input für das floodGAN-Modell sind die Niederschlagsvorhersagen (Abbildung 6 zeigt die Eingangsdaten für ein Ereignis vom 2. Mai 2024 in der datasphere Visualisierungsplattform). Im aktuellen Projekt läuft das eigentliche Modell in der IWW-Infrastruktur, und datasphere verwaltet alle erforderlichen Schnittstellen für Ein- und Ausgaben. Das floodGAN-Modell interagiert direkt mit der externen API von datasphere, um die Niederschlagsdaten in ein cloudbasiertes Verzeichnis herunterzuladen, von wo aus dem Modell läuft.

Neue Dateien lösen daraufhin das floodGAN-Modell aus und erzeugen automatisiert Überflutungskarten für die Stadt Aachen in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten über einen Zeitraum von einer Stunde und 55 Minuten generiert. Das DL-Modell wird am IWW ausgeführt und die Ergebnisse werden als getaggte Bilddateien (TIFs) in ein zwischengeschaltetes Datenarchiv übertragen. Ein der datasphere vorgeschaltetes Datenextraktions-, Transformations- und Lademodul prüft alle 15 Minuten die Verfügbarkeit neuer Dateien und importiert diese Daten, wenn ein minimaler, konfigurierbarer Schwellenwert erreicht wird. Dies dient dazu, die E/A-Leistung (Input/Output) des Systems zu erhöhen und den Datenbedarf zu reduzieren, während die relevanten Informationen auf dem neuesten Stand gehalten werden.

Die resultierenden Daten haben eine Auflösung von 2 m, was ausreicht, um lokal begrenzte urbane Überflutungen zu erkennen. Die Erstellung der Eingabedaten und der Import der resultierenden Daten können dank der Versionierungs- und Revisionsfähigkeiten des RTAF flexibel an Änderungen der Daten angepasst werden. Dadurch bleibt der Prozess auch bei zukünftigen Modell-Upgrades widerstandsfähig.

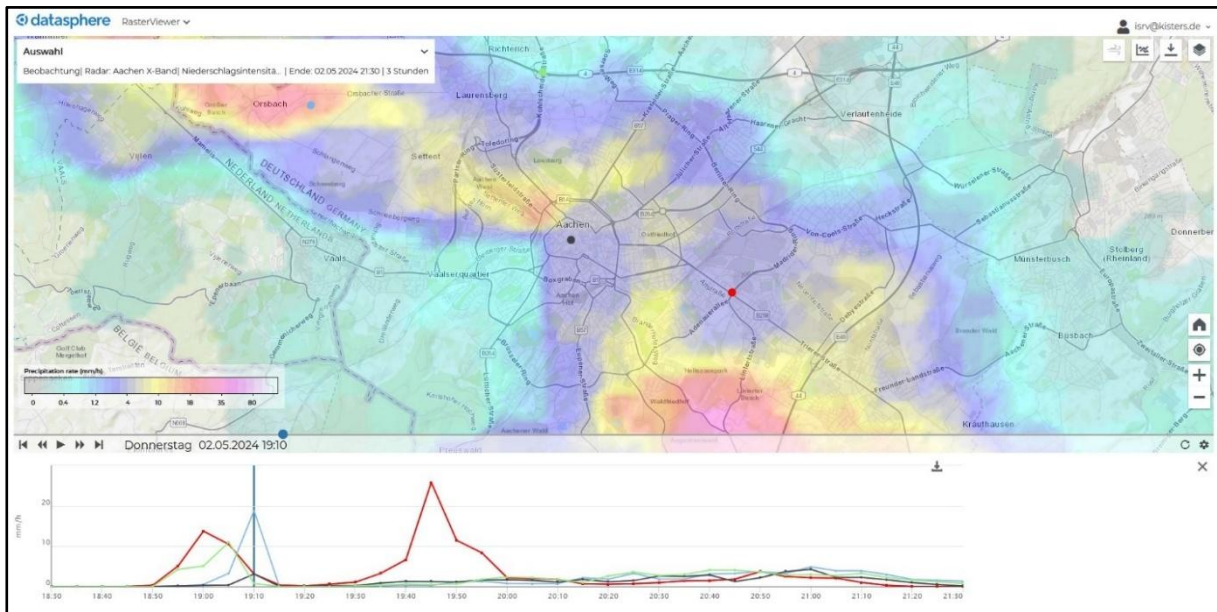


Abbildung 6 Visualisierung eines Niederschlag-Nowcasts für ein Ereignis im Mai 2024 als Eingangsdatensatz für das floodGAN-Modell

Die letzten 3 Tage der Modellläufe werden im Systemcache aufbewahrt, ansonsten werden die Daten archiviert. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse des DL-Hochwassermodells für ein Ereignis im Mai in der Visualisierungsplattform.

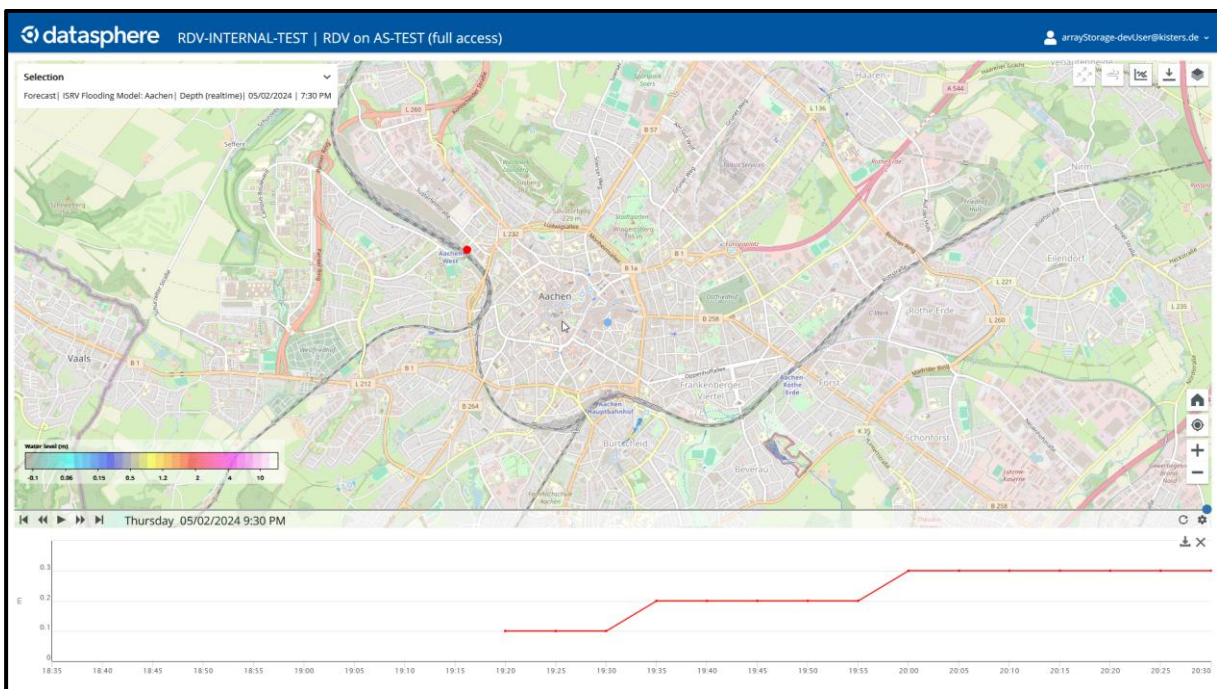


Abbildung 7 Darstellung der vom DL-Modell berechneten Überschwemmungstiefen in datasphere

Die Funktionsfähigkeit und Praxistauglichkeit des Demonstrators konnte exemplarisch beim Starkregenereignis am 2. Mai 2024 in Aachen unter Beweis gestellt werden. Dabei zeigte sich, dass die prognostizierten Überflutungsflächen, insbesondere im Bereich des Westbahnhofs, sowohl räumlich als auch in Bezug auf die prognostizierten Wasserstände mit den realen Beobachtungen und dokumentierten Eindrücken vor Ort übereinstimmten. Der Demonstrator ermöglichte damit eine frühzeitige

Identifikation kritischer Hotspots und liefert eine belastbare Grundlage für gezielte Maßnahmen im Verkehrs- und Katastrophenmanagement. Die erfolgreiche Kopplung von Deep-Learning-gestützter Überflutungsvorhersage mit meteorologischer Echtzeitdatenerfassung in einem operationellen System unterstreicht das große Potenzial dieses Ansatzes für eine resilientere Stadtentwicklung und einen proaktiven Umgang mit urbanen Starkregenereignissen.

d) AP4 - Rückkopplung der Modelle in der SC-Plattform

Es erfolgte eine systematische Rückkopplung der entwickelten Vorhersagemodelle und Verhaltensmuster in die SC-Plattform. Die im Projekt identifizierten starkregenbedingten Verhaltensmuster, resultierend aus Korrelationen zwischen Starkniederschlagsdaten und aktueller Verkehrssituation, wurden von 4traffic, IWW und KISTERS abgestimmt und es wurde an Möglichkeiten gearbeitet, diese in die SC-Plattform zu integrieren. Es wurde keine ideale Lösungsmöglichkeit gefunden werden, die Rückkopplung vollautomatisiert durchzuführen. Aus den abgestimmten Modellergebnissen konnten spezifische Datenprodukte abgeleitet werden, die zukünftig als Weisungsempfehlungen für die Zentralrechner der Lichtsignalanlagen der Stadt Aachen dienen können. Hierzu wurden entsprechende Handlungsempfehlungen entwickelt.

Zudem wurden durch 4traffic die Echtzeitdaten der Verkehrsdichtedetektion umfassend analysiert, um bekannte und potenziell neue Verhaltensmuster mittels moderner datenanalytischer Methoden zu identifizieren und zu verifizieren. Neben der Analyse allgemeiner Verkehrsmuster wurden hierbei auch spezifische Muster des öffentlichen Personennahverkehrs berücksichtigt. Mittels korrelativer Auswertung unterschiedlicher Schnittstellen wurden dabei potenzielle Handlungsfelder identifiziert und dokumentiert.

In enger Abstimmung mit der Stadt Aachen wurden abschließend die erarbeiteten Ergebnisse aus AP 4.2 zur Ableitung konkreter Weisungsempfehlungen aufbereitet und in einem praxisnahen Format dokumentiert. Diese Ergebnisse wurden anschließend im OpenData-Portal zur Verfügung gestellt. Zudem wurde der Stadt Aachen ein detaillierter Katalog mit abgeleiteten Weisungsempfehlungen übergeben. Aufgrund bestehender Kapazitätsengpässe konnte die Stadt Aachen diesen Katalog bislang jedoch nicht abschließend bewerten.

e) AP5 - Verkehrsregelungskonzepte bei Starkregenereignissen

Beschaffung und Zusammenführung der Datengrundlagen zur Erstellung der Verkehrsregelungskonzepte

Für die Erstellung von Verkehrsregelungskonzepten bei Starkregenereignissen für die Stadt Aachen sind neben den simulierten Wasserhöhen aus dem Geländemodell aus den AP 1 und 3 sowie den Verkehrsdaten weitere Daten und Prozessschritte nötig.

Dafür wird zunächst zur Kartengrundlage (hier die Stadt Aachen) die vulnerable Infrastruktur ergänzt. Diese bildet ab, an welchen Schwerpunkten mit zusätzlichen Einsatzmaßnahmen zu rechnen ist. Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) definiert vulnerable Infrastrukturanlagen als “[...] Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden.” und sind daher besonders vor Schäden wie bspw. durch Starkregen sowie Überflutung zu schützen. (BBK 2025)

In Bezug auf Starkregenereignisse lassen sich die betroffenen kritischen Infrastrukturobjekte zu folgenden Kategorien zusammenfassen (Tabelle 4):

Tabelle 4 Kategorisierung kritischer Infrastrukturobjekte bei starkregenbedingtem Hochwasser (LUBW 2016)

Kategorie	Infrastruktur
Öffentliche Einrichtungen und Versorgungsobjekte	Krankenhäuser, Kindergärten, Schulen, Alten- und Pflegeheime
	Wasser- und Abwasserversorgungssysteme
	Einrichtungen der Energieversorgung, Funk- und Fernmeldewesen
	Verkehrswege und Knotenpunkte wie Bahnhöfe und U-Bahnhöfe
	Tankstellen und Lager für wassergefährdende Stoffe
Kritische Objekte mit Gefährdung der Allgemeinheit	Kläranlagen, landwirtschaftliche Betriebe mit Chemikalienlagern und/oder Tierhaltung
	Produktionsanlagen und Chemielager
	Einrichtungen, die bei einem Ausfall die öffentliche Sicherheit oder Versorgung massiv beeinträchtigen könnten, wie z. B. Rettungswachen, Feuerwehrezentralen und Polizeistationen
Besonders sensible Infrastrukturanlagen	Freizeiteinrichtungen mit hohem Publikumsverkehr, wie Sportstadien und Veranstaltungshallen
	Brücken und Durchlässe, die durch Verklausungen oder Erosionsprozesse stark gefährdet sind
	Geländetiefpunkte wie Unterführungen und Senken, die schnell überflutet werden können
Infrastrukturelemente mit besonderer Gefährdung	Tiefliegende Fußgängerpassagen und öffentliche Tiefgaragen, die durch hohe Wasserstände schnell unpassierbar werden

Auf Basis dessen können für das Untersuchungsgebiet Aachen die kritischen Infrastrukturobjekte lokalisiert werden. In Tabelle 5 sind die weiteren jeweiligen Datenquellen, die für das GIS-Werkzeug genutzt werden, je nach Zugang und Quelle aufgelistet.

Tabelle 5 Datengrundlage des GIS-Tools

Daten	Quelle	Zugang
Kartengrundlage	<ul style="list-style-type: none"> Open Data Aachen (Stadtplan) 	Öffentlich

	<ul style="list-style-type: none"> • Geobasis NRW (Amtl. Basiskarte) • Openstreetmap 	
Wasserhöhen	IWW	Projektintern
Straßennetz	Open Data Aachen	Öffentlich
ÖV-Netz	Open Data ÖPNV	Öffentlich
Baustellen	Open Data Aachen	Öffentlich
Gebäudeinfrastruktur (Schulen, Kitas, JVA, ...) für ggf. Evakuierung	OSM TagFinder	Öffentlich
Techn. Infrastruktur	OSM TagFinder	Öffentlich
BOS	OSM TagFinder	Öffentlich
Hochwasserbedingte Feuerwehreinsätze	Feuerwehr	Projektintern
RBL media Werbeflächen	RBL media	Projektintern
Verkehrsdaten	Stadt Aachen	Projektintern
Standorte wassergefährdender Stoffe	Stadt Aachen	Projektintern

Zusammen mit dem Verkehrsnetz (Straßennetz + ÖV-Netz) sowie den Überflutungskarten können gefährdete Bereiche sowie sichere Korridore identifiziert werden. Dabei rücken zwei Risikogebiete (Senken) besonders in den Fokus: Die Unterführung des Westbahnhofs sowie der Kaiserplatz. In Abbildung 8 (Szenario: 40mm/h nach 90min) wird exemplarisch die technische Infrastruktur wie die Stromversorgung (bzw. Transformatoren und Umspanneinrichtungen) sowie Standorte wassergefährdender Stoffe (hier: Tankstellen) für die Stadt Aachen dargestellt. Dabei ist in Abbildung 8 ersichtlich, dass die starkregenbedingte Überflutung kaum Einfluss auf die vorhandene kritische Infrastruktur hat.

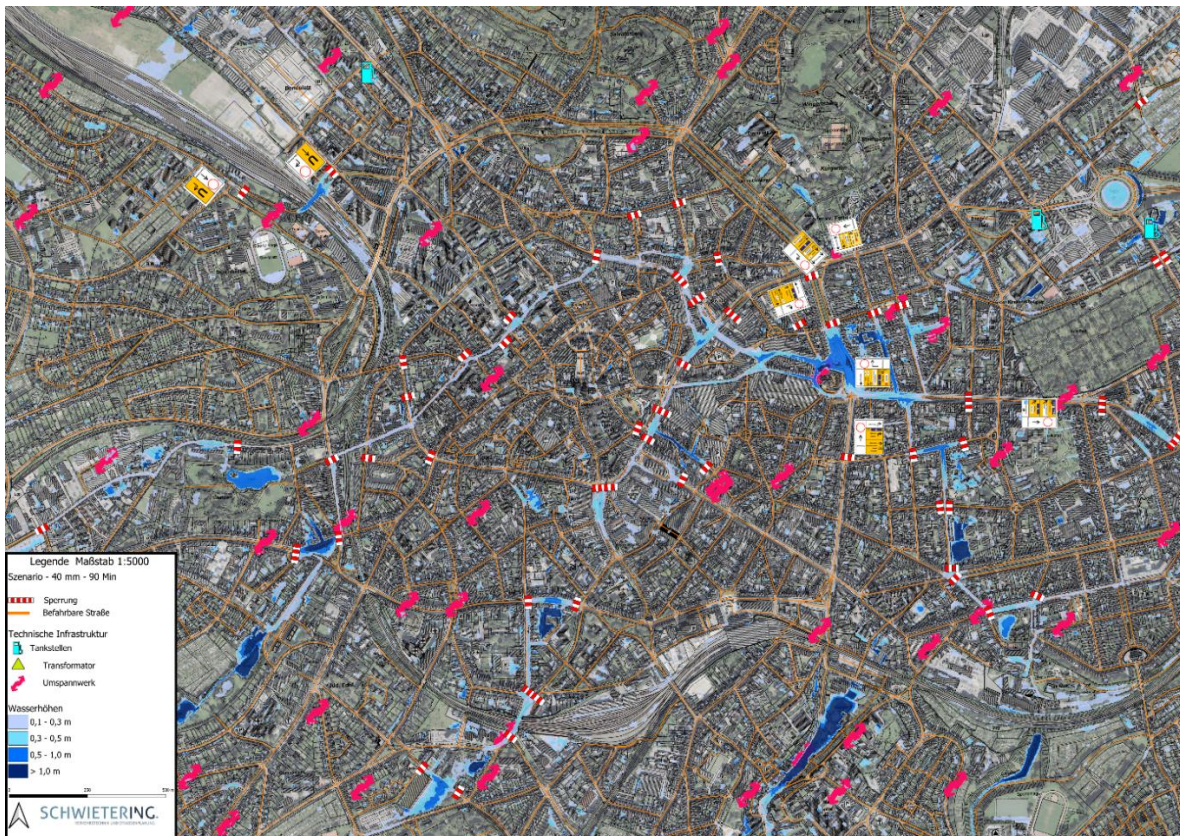


Abbildung 8 Kartenwerk vulnerable Infrastruktur der Stadt Aachen, hier: Versorgungsobjekte

In Bezug auf kritische Infrastruktur aus dem Öffentlichkeitsbereich wie bspw. Krankenhäuser, Bildungseinrichtungen etc. besteht die Möglichkeit, dass besorgte Angehörige, Erziehungsberechtigte, etc. Personen aus den jeweiligen Einrichtungen selbst abholen wollen, da von diesen Personen befürchtet wird, dass bspw. die Kinder sonst nicht mehr nach Hause kommen. Das Problem dabei ist, dass mit dem erhöhten Verkehrsaufkommen die BOS zusätzlich behindert werden können, um ggf. Evakuierungsmaßnahmen oder andere Einsätze in extremen Szenarien durchführen zu können. Die folgende Abbildung 9 (Szenario: 40mm/h nach 90min) bietet einen Überblick über die Anzahl an öffentlichen Einrichtungen, auch wenn im Aachener Stadtbereich nur wenige direkt überflutungsgefährdet sind.

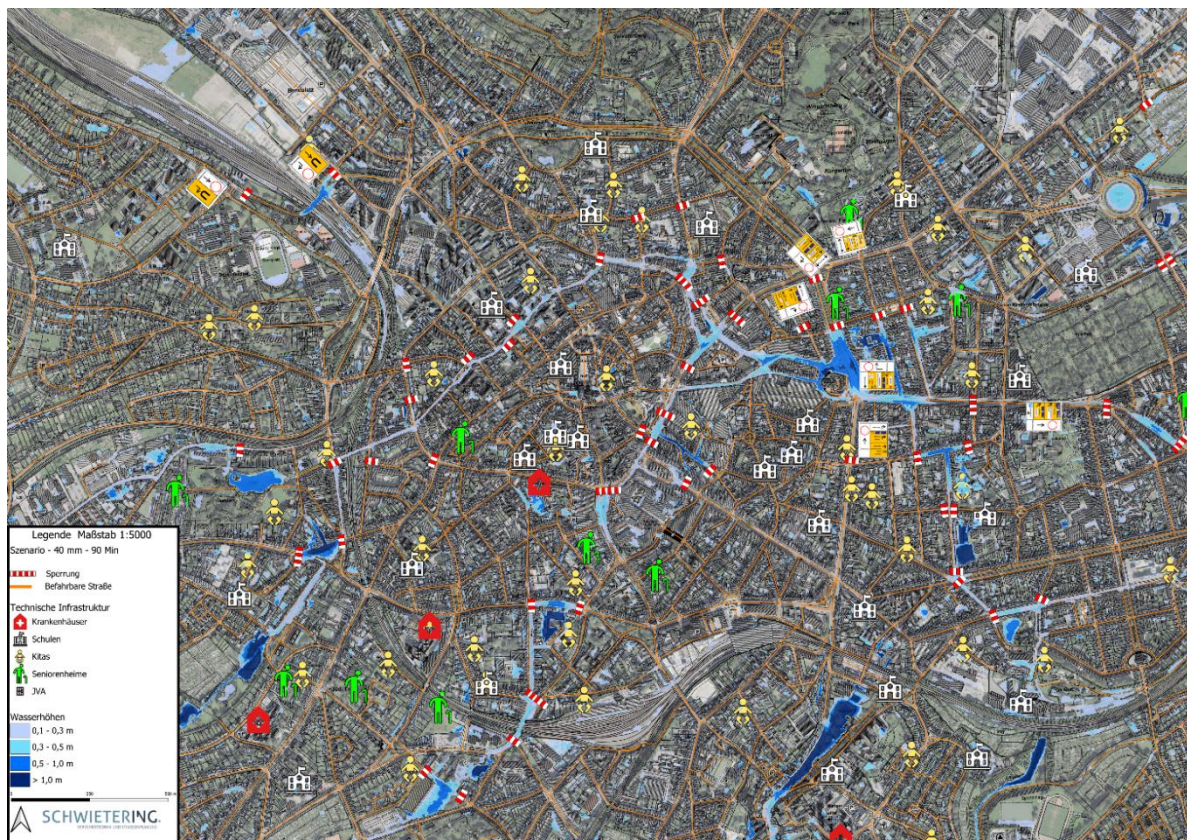


Abbildung 9 Kartenwerk vulnerable Infrastruktur der Stadt Aachen, hier: Öffentliche Einrichtungen

Erstellung von Verkehrsführungskonzepten

Bei der Erstellung von Verkehrsführungskonzepten werden für den Verkehrssektor unterschiedliche Wattiefen angenommen. Diese legen fest, welche Bodenfahrzeuge durch welche Wassertiefen fahren können. Dabei wird differenziert zwischen (Unterreitmeier et al. 2013)

- Kfz-Verkehr (Wattiefe <0,3m)
- ÖV (Wattiefe <0,3m)
- BOS (Wattiefe <0,6m)

Mit der Kombination aus den vom IWW zur Verfügung gestellten, in 5min-Intervallen aggregierten, stark-regenbedingten Überflutungsraster für die Niederschlagsintensitäten

- 30mm/h
- 40mm/h
- 47mm/h
- 70mm/h

lassen sich die Überflutungsszenarien für die Verkehrsregelungskonzepte festlegen. Diese wurden für jede der o.g. Intensität für den Wasserstand nach 30, 60, 90 und 120 Minuten angesetzt. Mit dem in QGIS integrierten Python-Tool lässt sich für jedes Szenario ein noch befahrbares Straßennetz (Wattiefe <0,3m) ermitteln und anhand dessen Sperrungen, Beschilderung, Umleitungen (Kfz und ÖV), Anfahrtswege BOS, Positionen für Hinweisschilder zur Warnung von Verkehrsteilnehmern.

Weiter differenzieren lassen sich die Bereiche, indem hochwasserbedingte Feuerwehreinsätze, Verkehrsdaten (aus Verkehrsdetektoren, -zählungen oder FCD), digitale Werbeflächen zur Darstellung von Echtzeit-Verkehrsinformationen usw. herangezogen werden. Mit der Kombination der unterschiedlichen Daten lassen sich je nach betroffenem Bereich spezifische Verkehrsführungskonzepte entwickeln. Exemplarisch wird hier der Bereich des Westbahnhofs (markiert mit einem roten Kreis) als einer der betroffenen Schwerpunkte gewählt. Dabei wird in der folgenden Abbildung 10 (Szenario: 40mm/h nach 90min) die Verkehrsführung inkl. Beschilderung für die Verkehrsteilnehmer sowie die erforderlichen Anfahrtswege der Feuerwehr dargestellt. Die Anfahrtswege der Feuerwehr lassen sich darüber hinaus in Einsatzpläne integrieren.

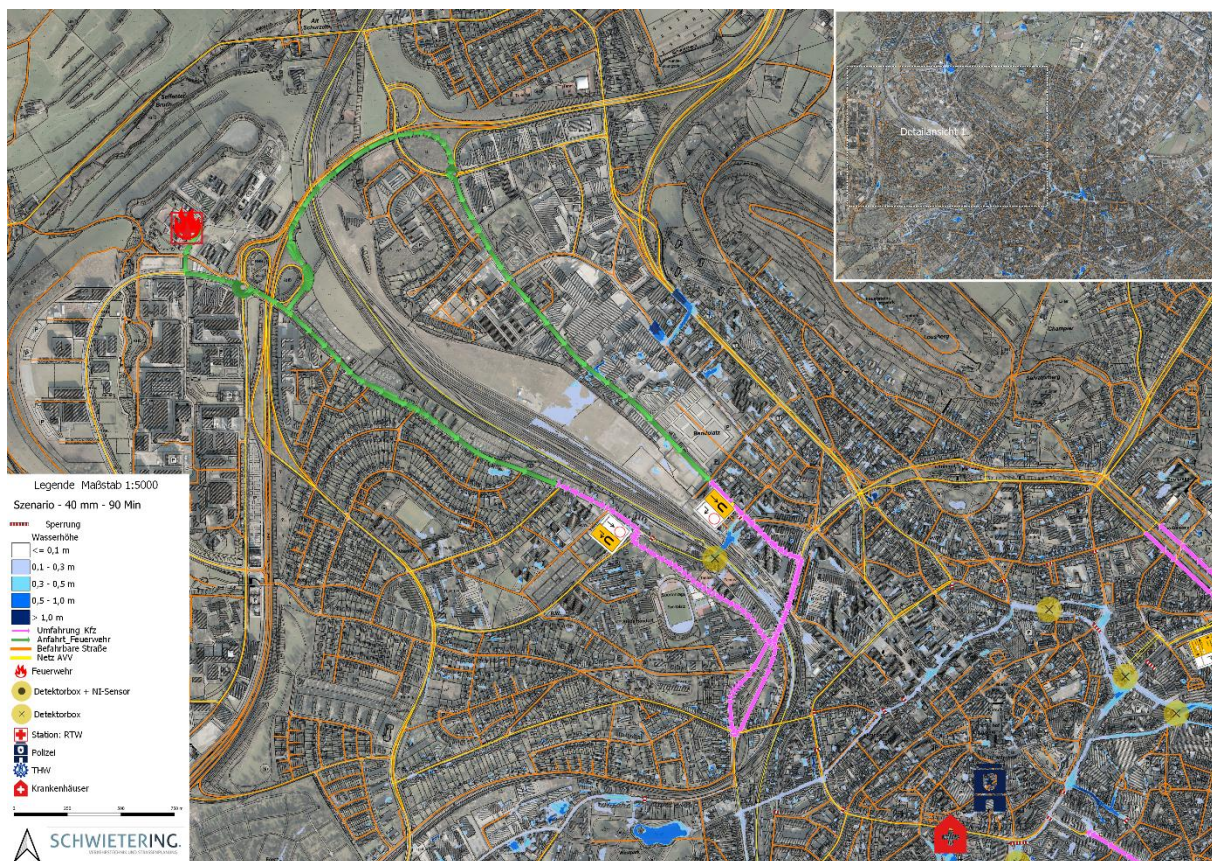


Abbildung 10 Exemplarisches Verkehrsregelungskonzept für den Westbahnhof in Aachen

Je nach Wasserstandszenario lassen sich damit feste Umleitungsrouten für den MIV sowie den ÖV festlegen. Diese werden durch das Beschilderungskonzept rechtzeitig vorgegeben und lassen sich bei Bedarf durch vorbereitete Straßensperrungen der betroffenen Bereiche ergänzen. Die Beschilderung kann dabei durch Klappschilder, Wendepismen oder dynamische LED-Tafeln erfolgen.

Maßnahmen und notwendige Informationssysteme im Straßenverkehr

Die notwendige Infrastruktur für die Informationssysteme wurde ebenfalls erarbeitet. Hierzu gehört die Integration von Sensoren und Echtzeitüberwachungssystemen, die kontinuierlich Daten zur Verkehrsstärke und zu potenziellen Gefahrenquellen, wie ansteigendem Wasserstand, liefern, sowie die Möglichkeit, Verkehrsteilnehmende rechtzeitig zu warnen und zu informieren. Diese Systeme stellen sicher, dass in kritischen Situationen schnell und präzise reagiert werden kann, indem beispielsweise Warnschilder automatisch aktiviert oder der Verkehr umgeleitet wird.

Daraus resultierend lässt sich eine strukturierte und zeitlich abgestimmte Handlungsempfehlung auf kommunaler Ebene herleiten. Diese lässt sich u.a. in folgende Aktionsbereiche gliedern:

- Informationsquelle: Wann können welche (Wetter-/Niederschlags-)Vorhersagen getroffen und erste Überflutungsszenarien erfasst werden?
- Koordination: Welcher Akteur koordiniert die Informationsweitergabe sowie die Aufgabenverteilung im Ereignisfall?
- Operative Umsetzung: Welcher Akteur übernimmt wann welche aktive Aufgabe zur Prävention von Risiken und Bewältigung von Aufgaben rundum das Überflutungsszenario?
- Warnung und Kommunikation: Über welche Informationskanäle kann was, wann und wie gewarnt werden?

Dies lässt sich entlang eines Zeitstrahls (beginnend bei mehr als 48 Stunden vor einem potenziellen Ereignis bis zum Ereignis) veranschaulichen. Im folgenden Ablaufdiagramm (Abbildung 11) wird aufgezeigt, welche Akteure wann einzubinden sind und welche Aufgaben übernommen werden. Die Position und Breite der dargestellten Aufgaben (grau) ordnet dabei sowohl den Beginn als auch die ungefähre Dauer der jeweiligen Maßnahmen zeitlich ein.

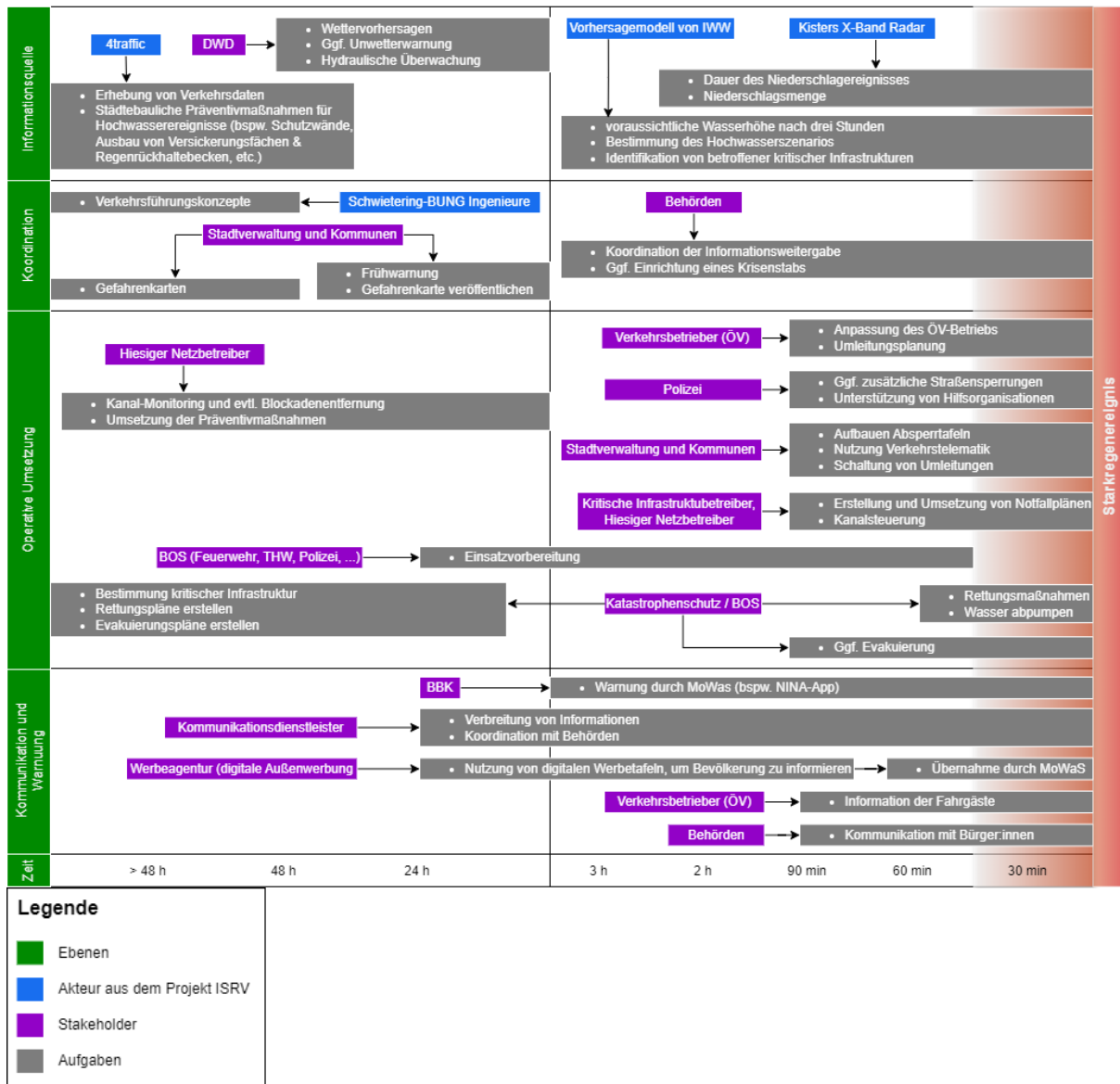


Abbildung 11 Ablaufdiagramm zur strukturierten und zeitlich abgestimmten Handlungsempfehlung auf kommunaler Ebene.

Auf der Ebene der Informationsquellen beginnt der Prozess mit der Erhebung und Bereitstellung relevanter Daten. Dies geschieht im Voraus als Vorbereitungsmaßnahme. So liefern beispielsweise 4traffic frühzeitig belastbare Verkehrsdaten und Informationen zu städtebaulichen Präventionsmaßnahmen wie Schutzwällen oder Rückhaltebecken. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt rund 24-48h vor dem Ereignis gegebenenfalls Unwetterwarnungen zur Verfügung und erhöht damit die Aufmerksamkeit von Projektpartnern und Stakeholdern. Detailliertere Informationen, wie die zu erwartende Niederschlagsdauer, -menge und mögliche betroffene Infrastrukturen, werden 30 Min bis 2 h vor dem Ereignis durch das ISRV-Vorhersagemodell des IWW mittels der des Kisters X-Band Radars ermittelten Daten bereitgestellt.

Auf der Ebene der Koordination werden als vorbereitende Maßnahme durch SCHWIETERING-BUNG Ingenieure die Verkehrskonzepte für unterschiedliche Szenarien entwickelt. Die Stadt- bzw. Kommunalverwaltung kann auf Basis dessen szenarienbasierte Gefahrenkarten für den Ereignisfall erstellen. Auf diese kann die Verwaltung wiederum zugreifen, wenn durch den DWD ein Ereignis vorhergesagt wird, um sich sowie die Bevölkerung auf unterschiedliche Szenarien vorzubereiten. Sobald detaillierte Informationen zum Ereignis durch das ISRVR-Vorhersagemodell vorliegen, können zuständige Behörden zur Bewältigung des Ereignisses die weitere Koordination sowie Informationsweitergabe übernehmen. Dazu kann auch je nach Szenario die Einrichtung eines Krisenstabs erforderlich sein.

In der Phase der operativen Umsetzung folgen konkrete vorbereitende und reagierende Maßnahmen. Der örtliche Netzbetreiber übernimmt jederzeit das Monitoring von Kanälen und die Umsetzung baulicher Präventionsmaßnahmen. BOS können aus den bereitgestellten Gefahrenkarten und Verkehrskonzepten Rettungs- und Evakuierungspläne erstellen sowie Einsatzpläne an kritischer Infrastruktur anpassen. Sobald ein Ereignis bevorsteht, können BOS auf Grundlage dessen schnell szenarienbasierte Einsatzpläne vorbereiten. Rund 90min bevor durch den Starkregen das Überflutungsereignis ausgelöst wird, können Verkehrsbetreiber des ÖV den Betrieb anpassen und auf Umleitungen aus dem Verkehrskonzept zurückgreifen. Die Polizei kann Straßensperrungen vorbereiten und an wichtigen Stellen bei Bedarf die Verkehrlenkung übernehmen sowie andere Hilfsorganisationen unterstützen. Die Verwaltung kann mit Hilfe von Absperrtafeln sowie ggf. Verkehrstelematik den Verkehr gemäß der vordefinierten Umleitungskonzepte je nach Szenario umleiten. Parallel monitoren Betreiber von kritischer Infrastruktur ihre Systeme und nutzen ihre Notfallpläne zur Aufrechterhaltung zentraler Versorgungsstrukturen. Bevor lokal die ersten kritischen Wasserhöhen erreicht werden, kann sich der Katastrophenschutz zusammen mit der Feuerwehr für Einsätze positionieren und je nach Szenario Evakuierungen durchführen.

Die Ebene der Kommunikation und Warnung dient der gezielten Information der Bevölkerung bzw. der Verkehrsteilnehmer. Etwa 24h vor dem Ereignis kann die Bevölkerung bereits über unterschiedliche Kanäle informiert werden. Warnmeldungen können ab 2h vor dem Ereignis zeitlich und lokal abgegrenzt werden. Offizielle (Unwetter-)Warnungen im Rahmen des Bevölkerungsschutzes werden vom BBK gesammelt und die Bevölkerung über das sog. „Modulare Warnsystem“ (MoWaS) des BBK sowie den zugehörigen Warnmultiplikatoren – zuständige Person oder Einrichtung in einem Lagezentrum, die Informationen über ein Medium (Warnmittel) verbreitet – gewarnt. Zur Warnung der Bevölkerung können unterschiedliche Informationskanäle, wie

- fahrzeugseitig, bspw. durch Verkehrsfunk oder Navigationsgeräte,
- im Verkehrsraum, bspw. durch Sirenen oder digitale Werbetafeln sowie
- durch personenbezogene Geräte wie bspw. Fernseher oder Smartphones (Warn-Apps, Cell-Broadcast)

verwendet werden. Unterstützt werden kann dies durch Anzeige von frühzeitigen Warnmeldungen durch digitale Werbetafeln, welche unmittelbar vor dem Ereignis automatisch durch das MoWaS übernommen werden, sowie digitaler Fahrgastinformationen im ÖV und an Haltestellen. Darüber hinaus können digitale LED-Verkehrstafeln auch als Parkleitsystem oder zur Verkehrsführung bei Events oder anderen Ereignissen genutzt werden.

Das Ablaufdiagramm macht deutlich, dass mit zunehmender Nähe zum Ereignis sowohl die Zahl der beteiligten Akteure als auch die Intensität der Maßnahmen zunimmt. Durch das gestufte Vorgehen – von der Datenerhebung über die Koordination bis hin zu operativen Maßnahmen und öffentlicher Warnung – entsteht ein ganzheitliches, kommunal einsetzbares Handlungskonzept für Starkregenereignisse.

Beispielszenario anhand des Ereignisses am 02.05.2024

Während der Projektlaufzeit kam es, wie zuvor schon benannt, am 02. Mai 2024 zu einem kleinerem Starkregenereignis mit lokalen Überschwemmungspunkten in Aachen. Im Hinblick auf die Unterführung des Westbahnhofs als eine von Aachens Risikogebieten bzw. Senke konnten für den Zeitraum von 19:00 bis 20:00 Uhr Überschwemmungen von > 0,3m festgestellt werden. Wie zuvor in AP3 zur Validierung der Modelle bzw. des Demonstrators kann dieses Ereignis auch zur Untersuchung des Verkehrsverhaltens genutzt werden. Die folgende Abbildung 12 zeigt das in das GIS-Werkzeug geladene Realszenario für die Unterführung des Westbahnhofs für den genannten Zeitraum von 19:30 bis 19:45 Uhr.

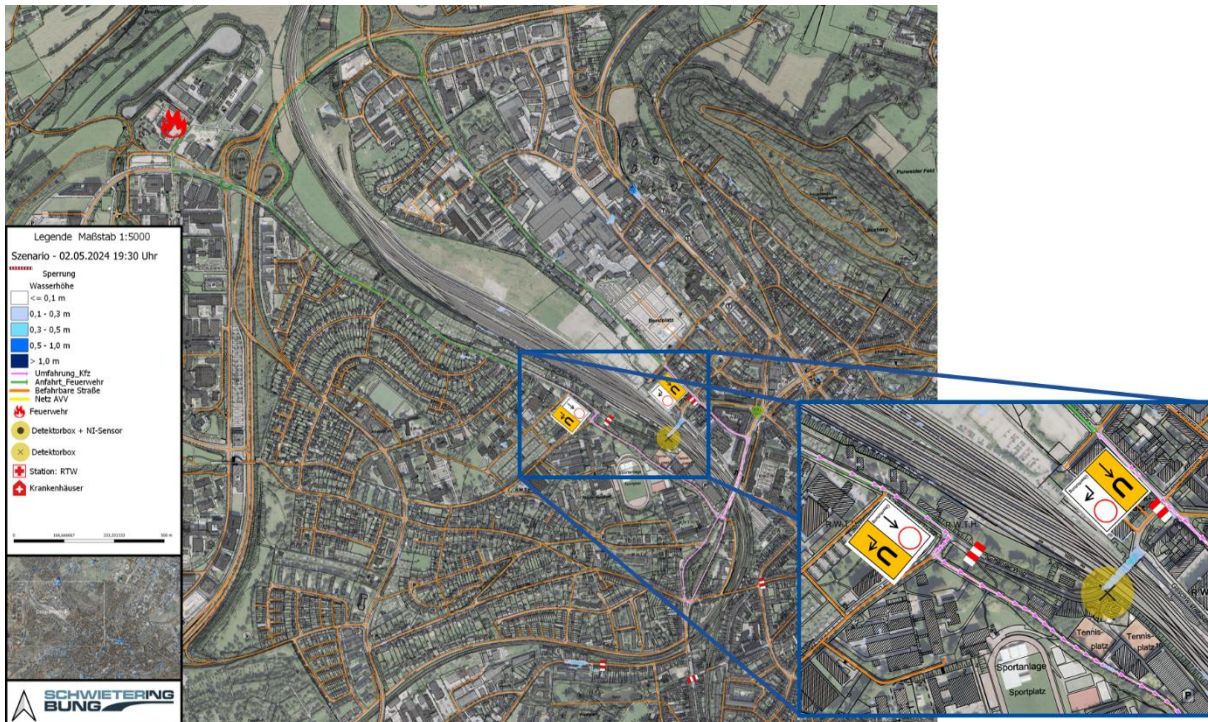


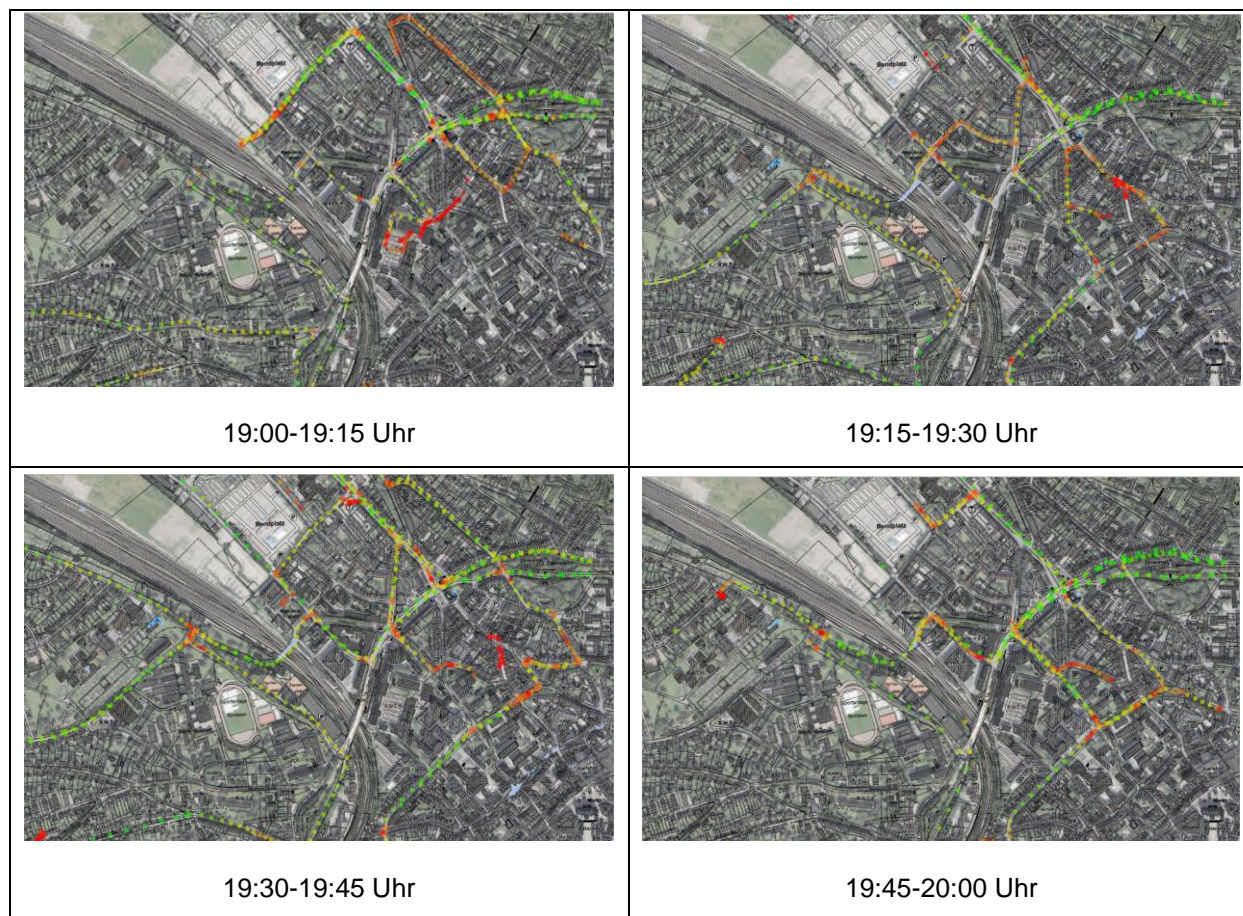
Abbildung 12 Starkregenbedingtes Überflutungsereignis vom 02. Mai 2024 am Westbahnhof

Bei diesem Ereignis wäre die Umleitungsbeschilderung des Verkehrskonzeptes aktiviert worden, sodass keine Fahrzeuge den überfluteten Gefahrenbereich befahren dürften.

Leider kam es u.a. während des Starkregenereignisses am 2. Mai 2024 zu temporären Ausfällen der Detektorboxen, wobei die fehlenden Verkehrsdaten am Ereignistag durch FCD kompensiert wurden, um eine gesamtheitliche Verkehrsanalyse des Ereignisses zu gewährleisten. In Tabelle 6 sind für den Zeitraum von 19:00 bis 20:00 Uhr des Ereignistages im Bereich des Westbahnhofs die FCD, in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit, in 15-Minuten Intervallen dargestellt. Damit wird geprüft zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Geschwindigkeit Fahrzeuge durch die Unterführung gefahren sind. Der Anteil von FCD zu der Gesamtverkehrsmenge ist in der Regel recht gering und muss daher mit der

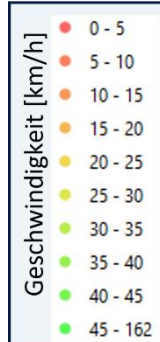
sog. Durchdringungsrate hochgerechnet werden. Dazu werden Verkehrsdaten (mit Erfassung aller Fahrzeuge in mindestens einer Stunde) anderer Quellen herangezogen, um damit die Durchdringungsrate, also den Anteil der Fahrzeuge die FCD bereitstellen, zu bestimmen. Sowohl für den Ereignistag als auch für die Referenztage (14.03.2024 und 30.04.2024) liegen für das Stadtgebiet keine Daten zur Bestimmung der Durchdringungsrate vor, liegen aber in der Regel zwischen 2 und 8 %. Aufgrund dessen können im Folgenden nur Beobachtungen, jedoch keine Aussagen, getroffen werden, da lediglich der geringe Anteil an FCD-Fahrzeugen betrachtet werden kann.

Tabelle 6 FCD-Verkehrsdatenanalyse zum Ereignis vom 02. Mai 2024



Im Zeitraum von 19:15 bis 19:30 Uhr ist auffällig, dass auf jeweils beiden Seiten vor der Unterführung FCD-Fahrzeuge gewendet haben, sodass keine einziges durchgefahren ist. Erst ab dem Zeitraum von 19:45 bis 20:00 Uhr wird die Unterführung wieder stärker frequentiert.

Bei der Analyse der Trips der FCD, also Betrachtung einer Kfz-Fahrt von Start und Ziel einer Route, ließen sich keine konkreten Muster identifizieren. Im Falle des exemplarischen Zeitraums von 19:15 bis 19:30 Uhr konnte lediglich festgestellt werden, dass das FCD-Fahrzeug, welches vor der Unterführung stand, an den Startort zurückgekehrt ist (s. Abbildung 13). Dabei war die lokale Überflutung am Westbahnhof nicht ausschlaggebend, da das FCD-Fahrzeug mit einer Fahrtzeit von ca. 45 Minuten verschiedene Station im Stadtgebiet abgefahren hat.



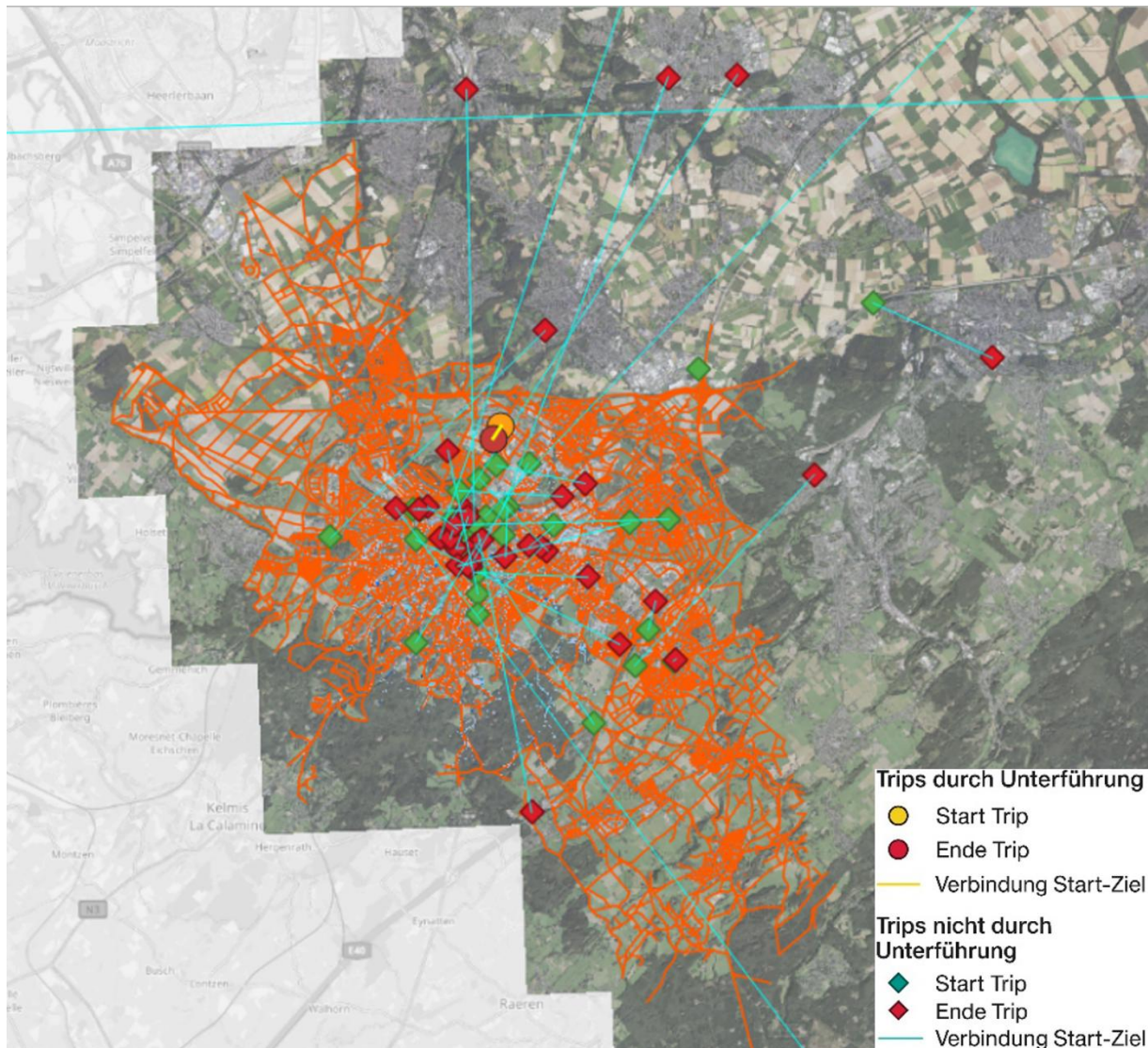


Abbildung 13 Trips von FCD-Fahrzeugen am 02.05.2024

Im Vergleich zu den Trips im selben Zeitraum an den Referenztagen lassen sich keine Veränderungen von Mustern in den Trips feststellen. Lediglich die Anzahl der FCD-Fahrzeuge ist am Ereignistag etwas geringer als an den Referenztagen, was sich jedoch nicht nachweislich mit dem Ereignis in Verbindung bringen lässt.

Durch den Einsatz moderner Datenanalyseverfahren konnten Verhaltensmuster im Verkehr identifiziert und bewertet werden, welche unter anderem durch extreme Wetterereignisse wie Starkregen beeinflusst werden. Beispielsweise zeigte sich eine Verlagerung des Verkehrsflusses von tief liegenden Straßenabschnitten zu höher gelegenen Alternativrouten während Starkregenereignissen. Neuralgische Punkte, wie Kreuzungen ohne ausreichende Drainagesysteme, wiesen eine Zunahme der Stauhäufigkeit auf. Diese Muster wurden durch moderne Analyseverfahren wie Clustering-Algorithmen und Mustererkennung aus den kombinierten Sensor- und FCD-Daten identifiziert

f) AP6 - Entwicklung eines Webservice für Live-Schnittstellen und Datenbereitstellung

Die Software-Infrastruktur eines Webservices bzw. eines Demonstrators konzipiert und mittels des dataspHERE Produkts implementiert wurde. Der Webservice integriert die während des Projekts erzeugten

Betriebsdaten, einschließlich der Modellergebnisse. Die folgenden Kapitel legen dar, wie das Konzept implementiert wurde.

Web-Plattform

Das KISTERS datasphere-Produkt, welches schon prototypenhaft als Web-Service zur Visualisierung von Wetterstations- und Pegeldaten entwickelt war, wurde als Basis für den Demonstrator benutzt. datasphere verfügte bereits über ein akzeptables Datenspeicherungs- und Managementsystem, welches im Teilvorhaben noch performanter gemacht wurde.

Verkehrsdaten

Daten aus den 4Traffic-Detektorboxen wurden in den Demonstrator integriert, einschließlich der von den Regenmessern geschätzten Niederschläge sowie dynamischer Messungen des Abstands zwischen Boden und Sensor. Die Daten wurden direkt über die 4traffic-API bezogen und konnten über die grafischen Werkzeuge der datasphere als separate Zeitreihen visualisiert werden.

Abbildung 14 zeigt die Standorte der integrierten Detektorboxen, einschließlich eines Demo-Standorts, der ausschließlich zu Testzwecken verwendet wurde.

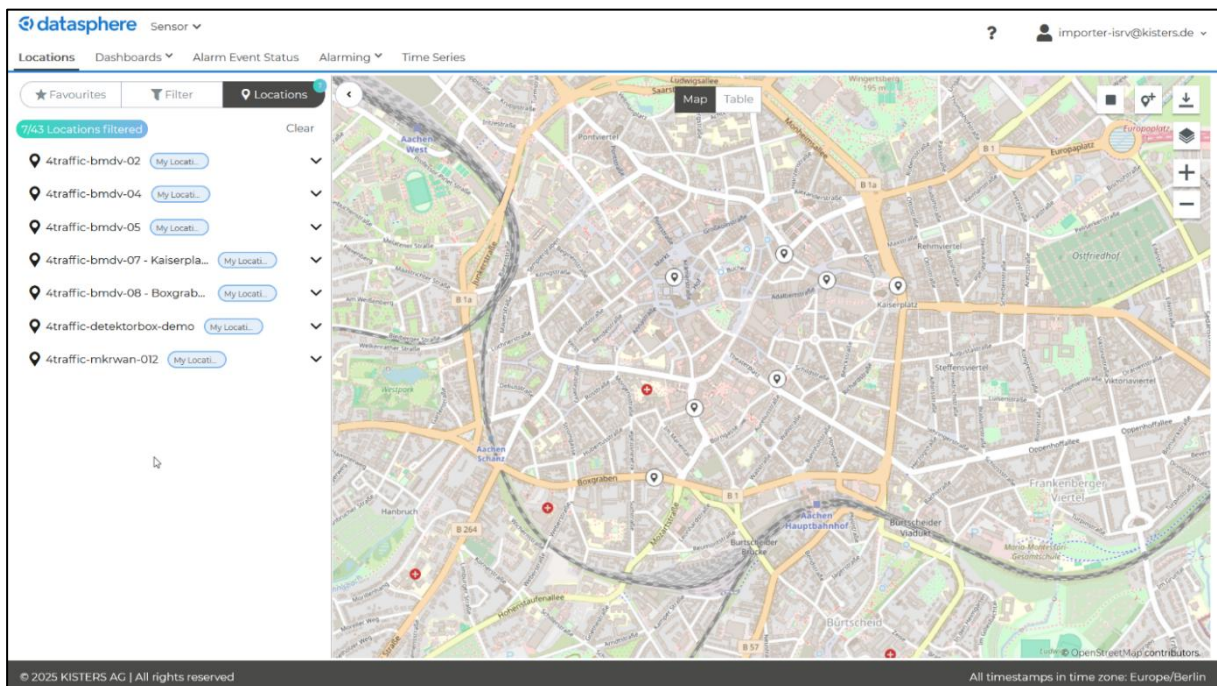


Abbildung 14 Standorte der integrierten Detektorboxen

Lokale Wetterbeobachtungen

Daten von drei an der RWTH installierten Wetter-Stationen wurden in die Demonstrator-Plattform integriert, um die Nowcasts besser zu validieren und ein umfassenderes Verständnis der räumlichen Verteilung von Niederschlagsereignissen zu ermöglichen. Alle 11 bereitgestellten Wetterstationsparameter wurden als separate Zeitreihen integriert, einschließlich des Batteriestatus.

Abbildung 15 zeigt die verfügbaren Wetterparameter sowie einen Vergleich der gemessenen Niederschläge an zwei Stationen über einen Zeitraum von zwei Wochen Ende Juni und Anfang Juli 2024.

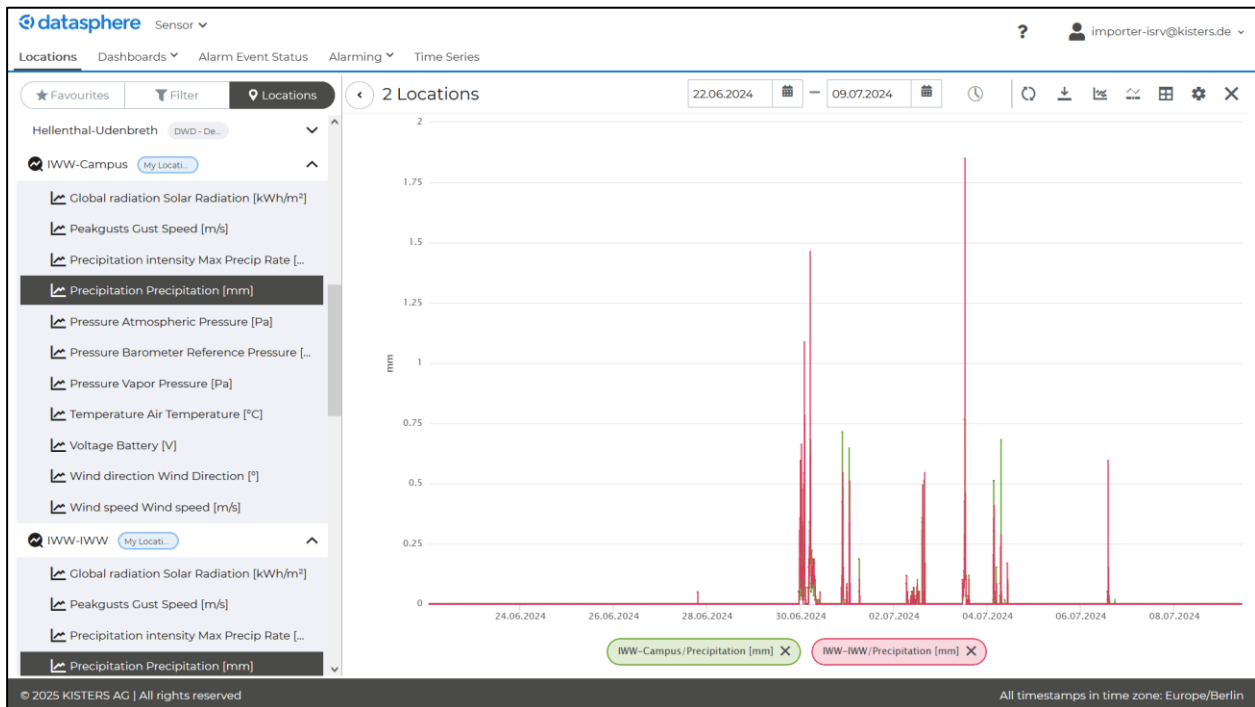


Abbildung 15 Darstellung lokaler Wetterbeobachtungen im Demonstrator

Wettervorhersagen

Tabelle 7 beschreibt die implementierten Wettervorhersagedaten. Die dazu nötigen Arbeiten umfassten die Weiterentwicklung von ETL (extract, transform and load - Extrahieren, Transformieren und Laden)-Funktionen, welche regelmäßig

- die bereitgestellten Wettervorhersagedaten von Servern der Anbieter (siehe Tabelle 7) als Dateien im Anbieter-nativen Format herunterladen,
- die Wettervorhersagedaten aus diesen Dateien extrahieren und in die von datasphere benötigten Koordinatensysteme und räumlichen Auflösungen transformieren und
- diese Daten dann in die datasphere Datenbank zur weiteren Verwendung ablegen

Die Wettervorhersagedaten beinhalten hierbei deterministische Produkte. Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen ausgewählten Parametern in datasphere. Abbildung 18 demonstriert, wie Endnutzer weitergehende Beschreibungen zu den Produkten einsehen können. Abbildung 19 bildet die manuelle Extraktion von Vorhersagedaten an beliebigen Punkten ab.

Während des Projekts wurden die ETL-Prozesse und die Speicherlösungen auf eine neue Version aktualisiert, um die Speicher- und Abrufleistung der datasphere zu verbessern. Es wurde erheblicher Aufwand betrieben, um alle zugehörigen Parameter und Konfigurationen zu migrieren.

Tabelle 7 Beschreibung der Wettervorhersagedaten

Bereitsteller	Produkte	Abdeckung	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Aktualisierungsintervall
Deutscher Wetterdienst (DWD)	ICON D2 Deterministische Standardprodukte	Europa 48 Std. in die Zukunft	0.02 ° (~2km)	15 Min. oder 1 Std.	Alle 3 Std.

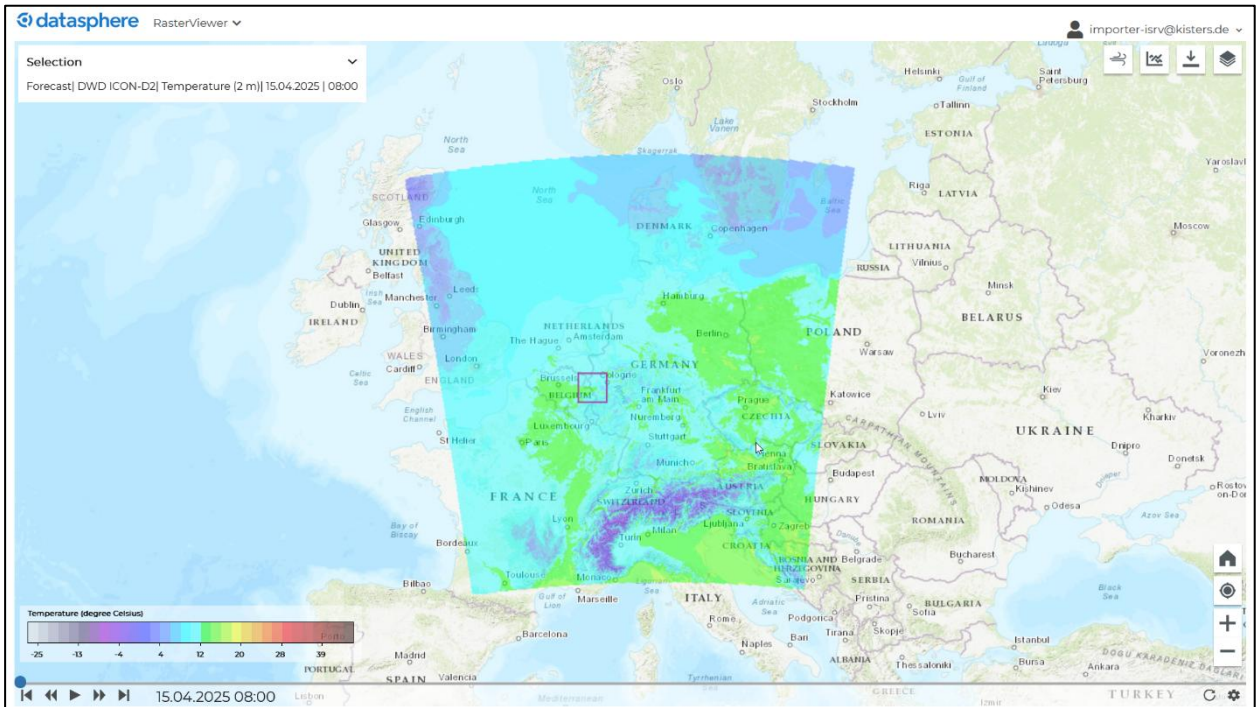


Abbildung 16 Darstellung von mittels des ICON D2 Modells vorhergesagter Temperatur im datasphere

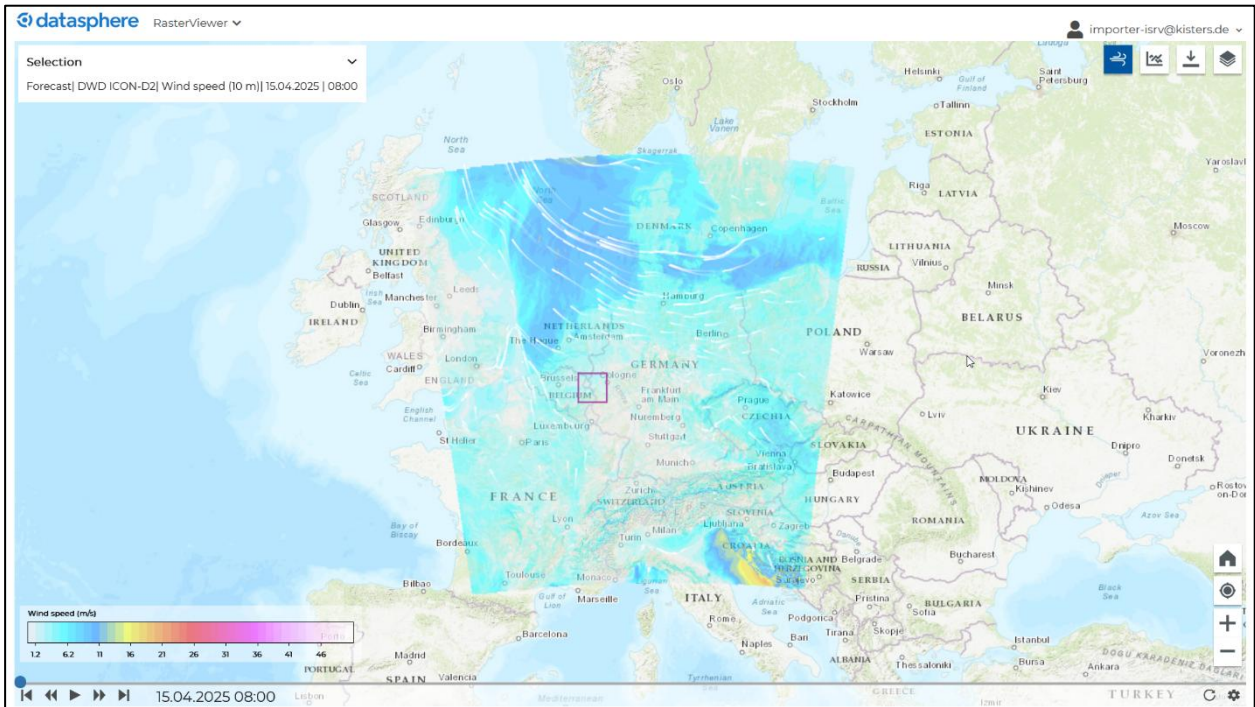


Abbildung 17 Darstellung von mittels des ICON D2 Modells vorhergesagter Windrichtung im datasphere

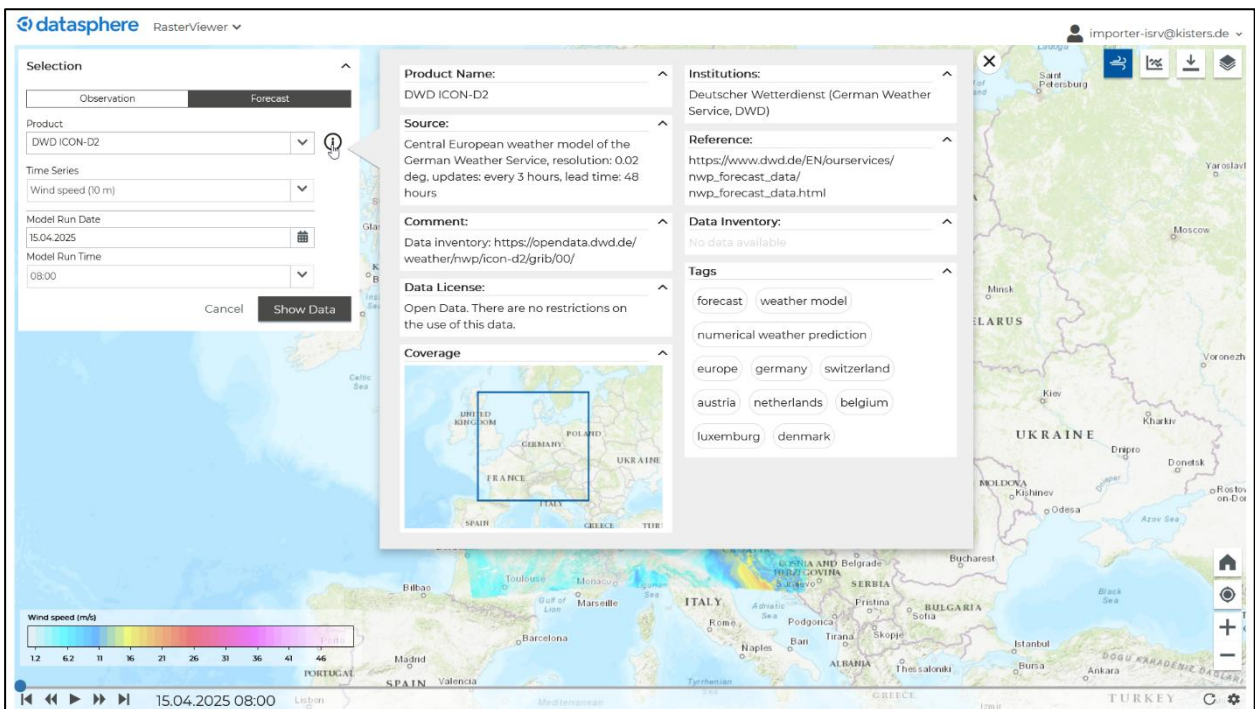


Abbildung 18 Anzeigen der Beschreibung des DWD-ICON Produktes

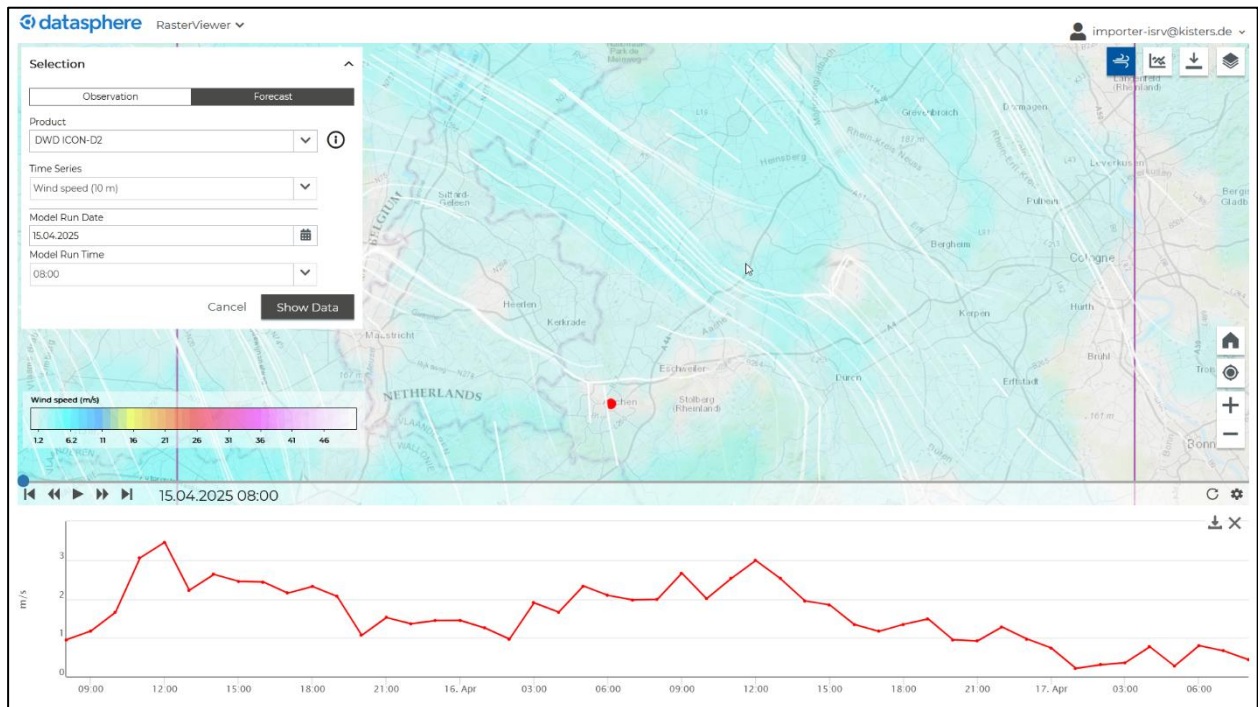


Abbildung 19 Anzeige einer Vorhersage von Windgeschwindigkeit an einem beliebigen Ort in der datasphere-Schnittstelle

2.2 Herausforderungen und Lessons Learned

Im Rahmen des Projekts ISRV konnten zahlreiche wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, die sowohl bestehende Herausforderungen als auch zentrale Lessons Learned betreffen.

In Bezug auf die urbane Hochwasservorhersage zeigte sich, dass prinzipiell sehr präzise Vorhersagen auf rasterbasierter Basis möglich sind, was eine große Stärke der entwickelten Methodik darstellt. Durch die Nutzung hochauflösender Niederschlagsmessungen und die robuste Modellierung konnten verlässliche Aussagen über Überflutungsereignisse getroffen werden, ohne dabei aufwendige Rechenzeiten in Kauf nehmen zu müssen. Gleichzeitig offenbarte sich, dass die Qualität der Vorhersagen stark von der Güte und Aktualität der Niederschlags erfassung abhängt. Insbesondere bei punktuellen oder kleinräumigen Starkregenereignissen war eine flächendeckende Validierung nur eingeschränkt möglich, da reale Beobachtungsdaten entweder fehlten oder nur lokal vorlagen.

Eine weitere Herausforderung bestand darin, dass die trainierten Vorhersagemodelle ausschließlich für 1-Stunden-Szenarien entwickelt wurden. Dadurch ergaben sich Limitierungen bei der Prognose längerer oder komplexerer Ereignisse. Zudem zeigte sich, dass die präzise Modellierung der Wassermassenreduktion ohne explizite Berücksichtigung des Kanalnetzes schwierig ist, was zu Unsicherheiten in den Prognoseergebnissen führte.

Im Bereich der Verkehrsführung lag eine wesentliche Stärke darin, dass für jedes Niederschlagsszenario individuelle Verkehrsführungskonzepte entwickelt werden konnten. Mithilfe von GIS-basierten Tools gelang eine Trennung verschiedener Verkehrsteilnehmergruppen wie PKWs, LKWs, ÖV und Einsatzfahrzeugen sowie die gezielte Ausgabe differenzierter Routenführungen. Diese Ansätze ermöglichen eine flexible Reaktion auf unterschiedliche Szenarien und Anforderungen. Allerdings wurden während

des Projektzeitraums technische Herausforderungen bei der Datenerfassung offensichtlich: Insbesondere bei Starkregenereignissen konnten nicht in ausreichendem Maße Verkehrsdaten gewonnen werden, sei es aufgrund technischer Probleme der Sensorinfrastruktur oder einer insgesamt zu geringen Ereignisdichte. Die daraus resultierende eingeschränkte Datenbasis wirkte sich wiederum negativ auf die Modellkalibrierung und die Ableitung belastbarer Verkehrsführungsstrategien aus.

Ein zentrales Lesson Learned betrifft daher die Notwendigkeit, die Datensensorik langfristig stabil zu betreiben und den Datenpool durch zusätzliche Ereigniserfassungen deutlich zu erweitern. Nur durch eine breite und kontinuierliche Erfassung von Starkregen- und Verkehrsdaten kann die Vorhersage- und Steuerungsqualität signifikant gesteigert werden. Parallel dazu erwies sich die Erweiterung der Verkehrsmanagementstrategien als sinnvoll, um dynamisch und lageangepasst auf unterschiedliche Starkregenszenarien reagieren zu können.

Ein Blick in die Zukunft zeigt: Um die Überflutungs- und Verkehrsprognosesysteme weiter zu verbessern, ist es notwendig, den Vorhersagezeitraum über die bisher trainierten Szenarien hinaus zu erweitern und kurzfristige Prognoseunsicherheiten gezielt zu adressieren. Gleichzeitig sollte die Datenerfassung intensiviert werden, um eine größere Vielfalt an Ereignissen und Verkehrssituationen abzudecken. Auch die dynamische Anpassungsfähigkeit der Systeme im Betrieb muss weiter ausgebaut werden, um flexibel auf aktuelle Entwicklungen reagieren zu können. Langfristiges Ziel ist es, die entwickelten Ansätze erfolgreich auf weitere urbane Räume zu übertragen und so einen breiteren Schutz vor starkregenbedingten Überflutungen im Verkehrssektor zu gewährleisten.

2.3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Beim IWW gab es drei wesentliche Positionen in der Kostenaufstellung. Von der Gesamtsumme machten die Personalkosten mit ca. 95% den größten Anteil aus, da die wissenschaftliche Bearbeitung der Themengebiete, die Entwicklung des hydrodynamischen Modells sowie die Erstellung und Validierung der Deep-Learning-Ansätze einen hohen Arbeitsaufwand erforderten. An zweiter Stelle standen die Investitionskosten für technische Hardware und an dritter Stelle die Reisekosten. Diese entstanden hauptsächlich durch die Teilnahme an Fachkonferenzen und Tagungen, auf denen das Projekt ISRV vorgestellt, beworben und mit der Fachwelt diskutiert wurde. Durch diese Maßnahmen konnte die Sichtbarkeit des Projekts gesteigert und der Wissenstransfer aktiv gefördert werden.

Seitens KISTERS ist die wichtigste und einzige Position des zahlenmäßigen Nachweises die Personalkosten. Verkalkulierte Reisekosten fielen nicht an da alle Projekttreffen in Aachen stattfanden.

Seitens 4traffic sind die Personalkosten ebenfalls die größte Position. Reismittel wurden genutzt für Veranstaltungen des Fördergebers und nahezu vollständig verbraucht.

Auch seitens SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH fielen fast ausnahmslos Personalkosten an. Die Reisekosten fielen deutlich geringer aus als geplant.

2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen haben in den letzten Jahren deutlich zugenommen, sodass kommunale Verkehrsnetze und urbane Infrastrukturen einer wachsenden Gefahr durch plötzliche Überflutungen ausgesetzt sind. Herkömmliche Frühwarnsysteme basieren meist auf punktuellen Pegelmessungen oder flussorientierten Modellen und bieten nicht die räumliche und zeitliche Auflösung, die für eine effektive Verkehrsführung in Echtzeit erforderlich ist. Ein System, das sowohl

hochauflösende Niederschlags-Nowcasts als auch datenbasierte Überflutungsvorhersagen mit Verkehrsinformationen verknüpft, war daher bislang nicht verfügbar und wurde dringend benötigt .

Das ISRVR-Projekt hat diese Lücke geschlossen, indem es synthetisch erzeugte Starkregenszenarien (synRainGAN) und hydrodynamische Trainings-daten mit einem floodGAN-Modell kombiniert. Überflutungskarten werden in wenigen Minuten generiert und automatisch in die cloud-basierte KISTERS dataspHERE-Plattform eingespeist. Parallel dazu liefern drahtlos vernetzte Sensorboxen Echtzeitdaten zum Verkehrsfluss, was adaptive Umleitungsstrategien bei drohenden Überflutungen ermöglicht.

Die Komplexität dieses Vorhabens erforderte interdisziplinäre Kompetenzen, die kein einzelner Partner allein hätte abbilden können:

- Die hydrodynamische Modellierung und KI-Entwicklung durch das IWW der RWTH Aachen,
- die Nowcasting- und Cloud-Integration durch die KISTERS AG,
- die Installation und Auswertung von Verkehrssensoren durch 4traffic SET GmbH,
- sowie die GIS-gestützte Konzeptentwicklung zur Verkehrsführung durch SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH.

Erst diese enge Verzahnung von Wasserwirtschaft, Data Science, Meteorologie und Verkehrsmanagement ermöglichte es, ein durchgängig echtzeitfähiges Gesamtsystem zu realisieren. Die Förderung durch das mFUND-Programm des BMDV war dabei unerlässlich, um die finanziellen Risiken für die etablierten Partner zu minimieren und eine umfassende technische Infrastruktur aufzubauen.

2.5 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Im Hinblick auf die weitere Verwertung streben alle Partner an, die im ISRVR-Projekt erzielten Lösungen und Erkenntnisse in neuen Forschungsvorhaben und praktischen Anwendungen fortzuführen. Am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen werden die entwickelten Modellarchitekturen (synRainGAN, floodGAN) als Grundlage für Folgeprojekte genutzt, die z. B. die zeitliche Dynamik von Überflutungsprozessen mittels RNN/LSTM-Erweiterungen untersuchen und eine Kopplung mit kanalnetzorientierten Modellen vorsehen.

Die KISTERS AG plant, innerhalb der nächsten 6–12 Monate weitere Aufträge im Bereich angewandter Forschung und kundenspezifischer Systemintegration zu akquirieren, um die dataspHERE-Plattform zu erweitern.

Die 4traffic SET GmbH beabsichtigt, ihre erprobte Sensorinfrastruktur und Smart-City-Plattform in weiteren Kommunen auszurollen und die Drittsensorik in ihr Produktportfolio aufzunehmen. Die gewonnene Erfahrung im Bereich Rückkopplung und Analyse ist eine signifikante Verbesserung für das Software-Produkt der 4traffic. Die erarbeiteten Lösungen besitzen zudem erhebliches Transferpotenzial auf andere Kommunen und Städte, wodurch sich perspektivisch neue Marktsegmente für die 4traffic SET GmbH erschließen lassen. Schließlich ermöglicht die Verfügbarkeit dieser Daten und Analyseergebnisse eine nachhaltige Zusammenarbeit mit Städten, Kommunen und weiteren Partnern aus Forschung und Wirtschaft, um innovative Mobilitätslösungen gemeinsam weiterzuentwickeln und marktfähig zu machen.

Die SCHWIETERING-BUNG Ingenieure GmbH plant, mittels des entwickelten Strategie- und Maßnahmenbaukastens, der zur Konzeption und Planung für Verkehrsmanagementmaßnahmen im Falle von Starkregenereignissen genutzt werden kann, weitere Kommunen und Städte bei der Erstellung von

Verkehrsführungs- und Kommunikationskonzepten unterstützen zu können. Konzepten unterstützen zu können.

Interesse externer Anwender

- Die Stadt Aachen (FB 36/300), die Städteregion Aachen sowie der Wasserverband Eifel-Rur haben bereits Interesse an lokalen Wetter- und Überflutungsdaten für ihre Einsatz- und Schutzkonzepte bekundet.

Erfüllung der Verwertungsverpflichtungen

1. Während der Projektlaufzeit sind die Forschungsergebnisse zu sichern, z.B. in Form von Patenten oder dokumentierten Verfahren, Algorithmen etc.
 - Alle Algorithmen (Nowcasting, floodGAN, Datenschnittstellen) sind in den jeweiligen Code-Repositories von KISTERS (ausschließlich Nowcasting), IWW (ausschließlich floodGAN) und 4traffic (ausschließlich Smart City Plattform) dokumentiert und versioniert.
2. Die gewonnenen Erkenntnisse sind national und international zu publizieren, um einen langfristigen wissenschaftlichen Dialog auf dem Fachgebiet zu etablieren
 - Erste Fachartikel sind in Kapitel 2.6 aufgeführt.
3. Direkt im Anschluss an das Projekt sind, aufbauend auf den erarbeiteten Ergebnissen, neue Forschungsthemen für die Anwendung von innovativen Verkehrsführungskonzepten zu identifizieren.
 - Der ISRV-Demonstrator bildet die Grundlage für KISTERS Forschungsvorhaben Inno_MAUS (FKZ 02WEE1632C) und PROWAVE (DBU 38969). Weitere Anträge (KI-gestützte Kanalnetzwarnung, multimodale Evakuierungsplanung) sind in Arbeit.
4. Die Erkenntnisse sind durch die Einbindung und Ausbildung von Studenten und Doktoranden während des Vorhabens direkt an den wissenschaftlichen Nachwuchs weiterzureichen.
 - Studentische Hilfskräfte, Masteranden und Promovierende wurden aktiv in Entwicklung und Dissemination eingebunden.
5. Die Integration der Projektergebnisse in die KISTERS Cloud-Plattform "datasphere" mit einem Frühwarnsystem und einem konkreten Vermarktungsziel ist anzustreben.
 - Dies ist geschehen mit dem Ziel die Projektergebnisse als kommunales Hochwasservorhersagetool zu vermarkten. Dazu ist eine Partnerschaft mit der Firma FloodWaive Predictive Intelligence GmbH, die das von der RWTH entwickelte DL-Modell weiterentwickelt und als AI-FloodCast vermarktet in Arbeit.
6. Das Forschungsprofil ist zu schärfen und das bestehende und im Projekt weiter auszubauende Netzwerk mit Forschungseinrichtungen und Industriepartnern zu nutzen und zu festigen.
 - Durch regelmäßige Workshops und der Teilnahme an verschiedenen Veranstaltungen, den Austausch wissenschaftlicher Daten und gemeinsame Publikationen konnte das Forschungsprofil geschärft und das Netzwerk aus Forschungseinrichtungen und Industriepartnern nachhaltig gefestigt werden.
7. Akquisition von Neuaufträgen durch die Weiterentwicklung der erzielten Ergebnisse.
 - Dazu wurden die im Projekt weiterentwickelten Modellintegrationsmechanismen wie folgt für neue Produktangebote genutzt.

- i. KI-basierte Durchflussvorhersage HydroForecast (in Zusammenarbeit mit Upstream Tech, USA)
 - ii. KI-basierte Fremdwasserbestimmung WATER+ (in Zusammenarbeit mit der Pluvion GmbH)
 - iii. KI-basierte Vorhersage von Regenwasserkanalfüllungen (in Zusammenarbeit mit Technolog, UK)
 - iv. Optimierung der Bewirtschaftung von ‚blau-grünen‘ Dächern (in Zusammenarbeit mit Polypipe und anderen Unternehmen, UK)
 - v. Optimierung von Talsperrenbewirtschaftung für die Wasserkrafterzeugung (Kanada)
8. Öffentliche Bereitstellung der untersuchten Datenformate in der Mobilithek.
- o Beispielhafte Zeitreihen der Nowcasts, prognostizierte Überflutungsflächen und Verkehrsdaten liegen als CSV und GeoJSON oder TIFF-Dateien in der Mobilithek bereit.

2.6 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf nationaler und internationaler Ebene gibt es bereits eine Reihe von Angeboten, die Wetter-, Radar- und Hochwasserdaten bereitstellen. Viele Datenportale greifen hierfür auf öffentlich verfügbare Beobachtungs- und Vorhersagedaten zurück und stellen diese über interaktive Benutzeroberflächen bereit – zum Teil bieten sie sogar Alarmfunktionen bei Grenzwertüberschreitungen. Allerdings kennt bislang keine Plattform ein Angebot, das einerseits ein ebenso breites Spektrum öffentlicher Wetter- und Vorhersagedaten (von globalen Wettermodellen bis hin zu lokalen X-Band-Radaren) umfasst, andererseits das eigenständige Einspielen eigener Mess- und Sensordaten (etwa Detektorboxen oder kommunaler Pegel) erlaubt und sich flexibel um physikalische oder datengetriebene Modelle (synthetische Starkregen-Generatoren, hydrodynamische Simulationen, KI-Vorhersagen) erweitern lässt, sodass unterschiedlichste operationelle Fragestellungen im Wasser- und kommunalen Sektor simultan bearbeitet werden können.

Ingenieurbüros wie Hydrotec oder Spekter realisieren punktuelle Starkregen- und Überflutungswarnsysteme auf Basis klassischer hydrodynamischer Modelle, die jedoch meist lokal zugeschnitten, wenig modular und nicht für Echtzeit-Integrationen mit Verkehrssteuerung ausgelegt sind. Forschungsbasiert kommen inzwischen Verfahren wie synRainGAN zum Einsatz, um synthetische Starkregenfelder auf Basis historischer RADOLAN-Daten zu erzeugen, und floodGAN, das mit U-Net- und PatchGAN-Architekturen in Sekunden hochaufgelöste Überflutungskarten liefert – ein Tempo, das klassische Modelle bei Weitem übertrifft. Nowcasting-Ansätze auf pySTEPS-Basis projizieren Radar-Beobachtungen in 5-Minuten-Intervallen in die Zukunft, ermöglichen Vorwarnzeiten von 15 bis 60 Minuten, bleiben jedoch isoliert ohne direkte Einbindung in Verkehrsmanagement. Darüber hinaus bieten Cloud-Lösungen wie die KISTERS datasphere eine zentrale Verwaltung, Visualisierung und Versionierung hydrologischer Datenströme, besitzen aber keine integrierte Schnittstelle zur Echtzeit-Verkehrsanalyse oder zur flexiblen Kopplung weiterer Modelle.

Trotz dieser vielen Einzelansätze fehlt bislang eine durchgängige, modulare Plattform, die alle diese Komponenten – von öffentlichen Wetter- und Vorhersagedaten über eigene Sensordaten bis hin zu physikalischen und KI-Modellen sowie Verkehrsflussanalysen und adaptiver Verkehrssteuerung – nahtlos verbindet. Genau hier schließt das ISRV-System die Lücke: Es vereint ein umfassendes Data-Ingestion-Framework mit flexibler Modellintegration und Echtzeit-Verkehrsdaten in einer nahezu echtzeitfähigen Überflutungsrisikowarnung speziell für den Verkehrssektor.

2.7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die folgenden projektbezogenen Artikel wurden veröffentlicht oder sind in Vorbereitung zur Veröffentlichung.

- Ein Poster wurde auf der mFUND-Konferenz im Dezember 2023 präsentiert, mit dem Titel „ISRV: Intelligente starkregenbedingte Überflutungs-Risikowarnung im Verkehrssektor“;
- Eine Publikation, die alle relevanten Aspekte des Projekts umfasst, wird derzeit zur Einreichung beim Journal of Hydrology fertiggestellt. Der Titel lautet: „Intelligent Flood Forecasting and Traffic Management in Urban Areas“.

3 Literaturverzeichnis

- Bates, Paul D.; Horritt, Matthew S.; Fewtrell, Timothy J. (2010): A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. In: *Journal of Hydrology* 387 (1-2), S. 33–45. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.03.027.
- Beven, Keith (2011): *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=822562>.
- DHI (Hg.) (2025): mikeplus:start [wiki.mikepoweredbydhi.com]. Online verfügbar unter <https://wiki.mikepoweredbydhi.com/mikeplus/start>, zuletzt aktualisiert am 28.04.2025, zuletzt geprüft am 28.04.2025.
- DWD (2025): *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar - Starkregen*. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html>, zuletzt aktualisiert am 28.04.2025, zuletzt geprüft am 28.04.2025.
- Henonin, Justine; Russo, Beniamino; Mark, Ole; Gourbesville, Philippe (2013): Real-time urban flood forecasting and modelling – a state of the art. In: *Journal of Hydroinformatics* 15 (3), S. 717–736. DOI: 10.2166/hydro.2013.132.
- Hofmann, Julian; Schüttrumpf, Holger (2021): floodGAN: Using Deep Adversarial Learning to Predict Pluvial Flooding in Real Time. In: *Water* 13 (16), S. 2255. DOI: 10.3390/w13162255.
- Kumar, Vijendra; Sharma, Kul; Caloiero, Tommaso; Mehta, Darshan; Singh, Karan (2023): Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches: A Review of Recent Advances. In: *Hydrology* 10 (7), S. 141. DOI: 10.3390/hydrology10070141.
- Lacasta, Asier; Morales-Hernández, Mario; Murillo, Javier; García-Navarro, Pilar (2015): GPU implementation of the 2D shallow water equations for the simulation of rainfall/runoff events. In: *Environ Earth Sci* 74 (11), S. 7295–7305. DOI: 10.1007/s12665-015-4215-z.
- Pulkkinen, Seppo; Nerini, Daniele; Pérez Hortal, Andrés A.; Velasco-Forero, Carlos; Seed, Alan; Germann, Urs; Foresti, Loris (2019): Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1.0). In: *Geosci. Model Dev.* 12 (10), S. 4185–4219. DOI: 10.5194/gmd-12-4185-2019.
- Rossman, Lewis A. (2010): *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*.
- Welten, Sascha; Holt, Adrian; Hofmann, Julian; Schelter, Lennart; Klopries, Elena-Maria; Wintgens, Thomas; Decker, Stefan (2022): Synthetic rainfall data generator development through decentralised model training. In: *Journal of Hydrology* 612, S. 128210. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128210.
- Zanchetta, Andre; Coulibaly, Paulin (2020): Recent Advances in Real-Time Pluvial Flash Flood Forecasting. In: *Water* 12 (2), S. 570. DOI: 10.3390/w12020570.