

Julian Hofmann, Peter Schleiffer, Niels Döscher, Loisa Welfers, Tim Franke, Roger Häußling, Andreas Witte, Gunnar Ketzler, Michael Leuchner, Thomas Wintgens & Holger Schüttrumpf

Vom Regen bis zur Maßnahme: Analyse und Modellierung eines lokalen Starkregenereignisses zeigen die Chancen interdisziplinärer Forschung im Rainwater Living Lab

From Rain to Action: A Model-Based Analysis of an Extreme Rainfall Events Revealing Opportunities of Interdisciplinary Research at the Rainwater Living Lab

Das Thema Starkregen und urbane Sturzfluten gewinnt weltweit zunehmend an Relevanz. Daten europäischer Klimamodelle legen nahe, dass im Zuge des voranschreitenden Klimawandels von einer neuen Gefährdungslage durch extreme Unwetterereignisse auszugehen ist. Die Stadt Aachen war im Jahr 2018 gleich zweimal innerhalb eines Monats (29. April 2018 und 29. Mai 2018) von Starkniederschlägen betroffen und auch die Extremereignisse im Juli 2021 richteten erhebliche Schäden in der Region an. Vor diesem Hintergrund wurde an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH Aachen University) das Reallabor "Rainwater Living Lab Aachen" ins Leben gerufen. Ziel war es, durch einen interdisziplinären Ansatz eine ganzheitliche Beschreibung und Analyse von Starkregenereignissen durchzuführen sowie eine nachhaltige Überflutungs- und Schadensvorsorge zu erarbeiten. Zu diesem Zweck wurde in der vorliegenden Studie beispielhaft das Ereignis vom 29. Mai 2018 untersucht. In einem ersten Schritt ist mithilfe von Radardaten eine detaillierte meteorologisch-klimatologische Beschreibung des Ereignisses durchgeführt worden. Zur Untersuchung der Auswirkungen von Starkregen auf ein lokales Untersuchungsgebiet der Stadt Aachen wurde anschließend ein bidirektional-gekoppeltes Modell aufgebaut, welches die Interaktion zwischen Oberfläche und Kanalnetz detailliert beschreibt und simuliert, wobei sowohl die Radardaten des Ereignisses als auch Modellregen als Input dienen. Aufbauend auf den Ergebnissen des Modells konnten dann Maßnahmen zur oberflächlichen und kanalseitigen Rückhaltung bzw. Umlenkung konzipiert und auf ihre Wirksamkeit überprüft werden. Abschließend erfolgte eine Bewertung des vorgestellten Verfahrens hinsichtlich seines Nutzens für die Durchführung von interdisziplinären Living Labs als Forschungsdesign. Die Modellergebnisse zeigen allgemein eine gute Übereinstimmung mit in-situ Beobachtungen und es konnten wirkungsvolle Maßnahmen für die Reduktion der Überschwemmung im Untersuchungsgebiet aufgezeigt werden.

Schlagwörter: Sturzfluten, Starkniederschlagsereignisse, hydrodynamisch-gekoppelte Modellierung, Niederschlagsbeobachtungen

The topic of heavy rainfall and urban flash floods is becoming increasingly relevant on a global scale. Data from European climate models suggests that in the course of ongoing climate change, an increasing risk due to extreme weather events can be assumed. In 2018, the city of Aachen was affected by heavy precipitation twice within one month (April 29th 2018 and May 29th 2018) and the extreme events in July 2021 also caused considerable damage in the region. With this in mind, the "Rainwater Living Lab Aachen" was implemented at RWTH Aachen University. The aim was to use an interdisciplinary approach to carry out a holistic description and analysis of heavy rainfall events and to develop sustainable flood and damage prevention measures. For this purpose, the event of May 9th 2018, was examined exemplarily in the present study. In a first step, a detailed meteorological-climatological description of the event was carried out based on radar data. To investigate the effects of heavy rainfall on a local study area, a bi-directionally coupled model was then built that describes and simulates the interaction between the surface and the sewer network in detail. Both the radar data of the event and modelled rainfall were used as input. Based on the results of the model, measures for retention or diversion at the surface or in the sewer network could then be designed and tested for their effectiveness. Finally, the presented method was evaluated regarding its usefulness in interdisciplinary living labs as research design. The model results generally show good agreement with in-situ observations. Effective measures for the reduction of flooding in the study area could be identified as well.

Keywords: Pluvial floods, heavy rainfall events, hydrodynamic-coupled modelling, experimental hydrology

1 Einleitung

Starkregenereignisse haben vor dem Hintergrund des Klimawandels und der zunehmenden Urbanisierung weitreichende sozioökonomische Konsequenzen und stellen auch in Deutschland ein erhebliches Risiko dar (EC, 2016). In den letzten Jahren waren zahlreiche Kommunen in Deutschland durch Starkregen und daraus resultierenden Überflutungen, sogenannte Pluviale Hochwasserereignisse, betroffen. Unwetter wie Stürme und Starkregen verursachten im Jahr 2022 Schäden in Höhe von 4,3 Mrd. € (GDV, 2022). Angesichts der steigenden Frequenz und Intensität solcher Ereignisse ist das Management von Starkre-

genrisiken eine entscheidende kommunale Aufgabe und ein zentraler Aspekt bei der Anpassung an den Klimawandel. Schlüsselstrategien für ein effektives Starkregenrisikomanagement sind differenzierte Risikobewertungen und effektive Vorsorgemaßnahmen, insbesondere durch die Stadtplanung, Verbesserungen beim Überflutungsschutz sowie die Stärkung der Gefahrenabwehr (UBA, 2019).

Hohe Schäden durch Starkregen entstehen oft kleinräumig in urbanen Gebieten, in denen die Vulnerabilitäten bereits grundsätzlich besonders konzentriert sind (BBK, 2015). Verschärft wird diese Vulnerabilität urbaner Gebiete vielfach dadurch, dass

Nutzungsansprüche der Infrastruktur sowohl eine besondere Exposition – infolge versiegelter Oberflächen, tiefliegender Straßenzüge, U-Bahnstationen, Tunnel, Tiefgaragen etc. – als auch eine gesteigerte Sensitivität, z. B. aufgrund wasserempfindlicher Elektronik, gegenüber Überflutungen aufweisen. Gleichzeitig geraten die Funktionen von Straßenräumen in Gefahr, indem Verkehrswege beschädigt und blockiert werden. Intensive Starkniederschlagsereignisse übersteigen schnell die Kapazität der örtlichen Entwässerungssysteme. Fehlende Notwasserwege und Retentionsflächen führen dazu, dass unkontrolliert abfließendes Oberflächenwasser signifikante Schäden an Gebäuden und kritischen Infrastrukturen verursacht. Die Schäden sind vielfältig und umfassen direkte materielle Schäden an Gebäuden und Eigentum, immaterielle Schäden, wie beispielsweise Verletzungen, aber auch indirekte Schäden, wie Umweltschäden durch betroffene Altlasten, Kontaminanten und Gewässerverschmutzungen, oder Unterbrechungen von Transport- und Versorgungsinfrastrukturen.

Die Brisanz extremer Niederschlagsereignisse ergibt sich aus ihrer prognostischen Unsicherheit: Lokale Starkregenereignisse können auch flussferne urbane Hochwasser auslösen. Solche pluvialen Hochwasserereignisse werden von zahlreichen Variablen beeinflusst, die eine rechtzeitige und punktgenaue Vorhersage erschweren. Kleineräumige konvektive Starkregenereignisse, in denen mit mehr als 25 mm Niederschlag pro Stunde zu rechnen ist, sind in der Regel maximal zwei Stunden vor dem Ereignis prognostizierbar (DKKV, 2015; WINTERRATH, 2020). Die Qualität der Wetterwarnungen, welche die Zivilgesellschaft erreichen, hängt außerdem von der Interpretation durch die Nutzenden ab.

Aufgrund wesentlicher Unterschiede im Entstehungs- und Wirkungsprozess können die Konzepte des klassischen Flusshochwasserschutzes nicht auf das Starkregenrisikomanagement übertragen werden. Somit sind ganzheitliche Klimaanpassungsstrategien und neue Herangehensweisen bei der Überflutungsvorsorge im urbanen Raum und der Starkregenrisikokommunikation erforderlich (LAWA, 2017). Effektive Maßnahmen zur Starkregen-Überflutungsvorsorge beinhalten, dass Niederschlagswasser nicht nur auf klassischem Wege schadlos abgeleitet, sondern zusätzlich auch zurückgehalten und sinnvoll vor Ort genutzt werden kann. An dieser Stelle bedarf es neuer interdisziplinärer Ansätze, digitaler Techniken und stadtplanerischer Konzepte für eine wasserbewusste Stadtentwicklung. Für die nachhaltige Sensibilisierung relevanter Anspruchsgruppen im Kontext von Starkregenereignissen sollten aktuelle Warnketten sowie Strategien der langfristigen Risikokommunikation überdacht werden.

Vor diesem Hintergrund wurde das Real-labor "Rainwater Living Lab Aachen" ins Leben gerufen. Ziel war es, interdisziplinäre Analyse- und Planungstools für eine ganzheitliche und nachhaltige Überflutungs- und Schadensvorsorge zur erarbeiten. Insbesondere wurde eine "Proof-of-Concept Methode" entwickelt, um eine Wirkungsanalyse verschiedener Maßnahmen zur Reduk-

tion des Starkregen-Überflutungsrisikos, wie beispielsweise eine nachhaltige Regenwasserbewirtschaftung nach dem Prinzip der Schwammstadt, durchzuführen. Exemplarisch vorgestellt wird das Vorgehen im Rahmen dieser Studien für ein Untersuchungsgebiet im Aachener Stadtgebiet und anhand des Starkregenereignisses, das die Stadt Aachen im Mai 2018 betraf. Kapitel 2 stellt Living Labs als Forschungsdesign vor, das einen lokalen und problemorientierten Fokus als Ausgangspunkt für interdisziplinäre, technologische Innovationsprozesse nimmt. Zur Analyse des Starkregenereignisses vom Mai 2018 stehen zunächst Daten und Methoden der meteorologischen Analyse im Mittelpunkt. Anschließend wird die numerische Entwicklung eines 1D-Kanalnetzmodells, eines 2D-Oberflächenabflussmodells sowie deren Kopplung zur Durchführung einer Hindcast-Analyse dargestellt, bevor potenzielle stadtplanerische Maßnahmen zur Reduktion des Starkregenrisikos diskutiert werden. Kapitel 3 beinhaltet die Ergebnisse der meteorologischen und der modellbasierten hydrologisch-hydraulischen Analysen sowie der Implementierung und Evaluierung der stadtplanerischen Maßnahmen. Abschließend wird das interdisziplinäre Vorgehen im ERS Rainwater Living Lab reflektiert und zentrale Prozesselemente herausgestellt.

2 Material und Methoden

2.1 Living Labs und Reallabore als Forschungsdesign

In Reallaboren oder auch "Realexperimenten" (engl. "regulatory sandbox") werden die Herausforderungen sozial-ökologischer Transformationen und die Adaption an sich verändernde klimatische Bedingungen experimentell bearbeitet (BERGMANN et al., 2021; KOFLER, 2023). Reallabore beschreiben eine Vielzahl heterogener Forschungsdesigns, die sich anhand ihrer Situationsgebundenheit, z. B. Feldbeobachtung vs. Laborexperiment, und ihrer chronologischen Verortung im Forschungsprozess, z. B. wissensgenerierende Livings Labs oder technologische Implementierungen, unterscheiden lassen (SCHNEIDEWIND & SCHECK, 2013). Einer eindeutigen Begriffs- oder Verfahrensdefinition entzieht sich das Konzept bisher (BMW, 2019; FRANKE & KAIP, 2021), dennoch lassen sich einige leitende Prinzipien festhalten, wie Transdisziplinarität, die Orientierung an realweltlichen Problem- und Fragestellungen, partizipative Elemente sowie ein Nachhal-

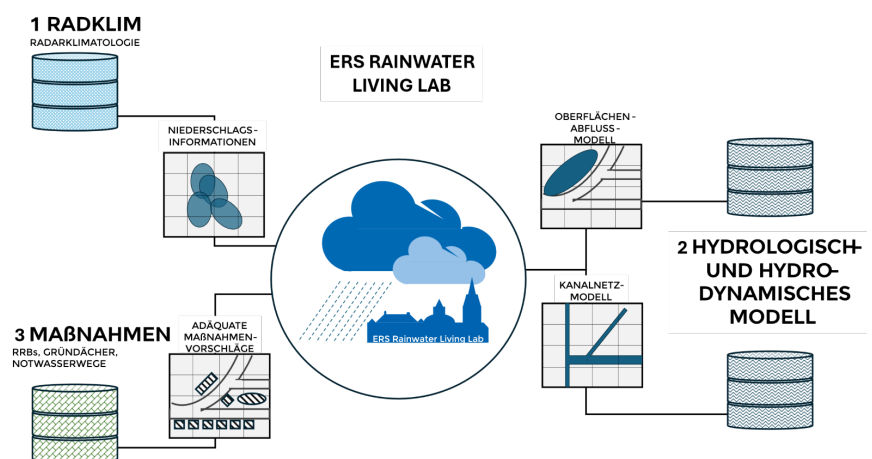


Abbildung 1

Interdisziplinärer Aufbau des ERS Rainwater Living Lab.

Interdisciplinary structure of the ERS Rainwater Living Lab.

tigkeits- und Resilienzsteigerungsfokus (BEERCROFT et al., 2018; HÄUßLING, 2021). Metastudien identifizierten erste Erfolgsfaktoren für die Gestaltung von Reallaboren, wie z. B. aktive Kommunikation oder die Verfügbarkeit von ausreichend finanziellen sowie zeitlichen Ressourcen (BERGMANN et al., 2021). Living Labs stellen eine spezifische Version von Reallaboren dar; einen Testraum für frühe Phasen technologischer und sozialer Innovationen. Im ERS Rainwater Living Lab wurde der Fokus auf die interdisziplinäre Analyse des Starkregenereignisses in Aachen gelegt, dessen Verlauf meteorologisch rekonstruiert, hydrologisch modelliert und anhand dessen präventive Maßnahmen zum Schutz vor urbanen Starkregenereignissen abgeleitet werden sollten.

Das ERS Rainwater Living Lab stellt aus Sicht der Innovationsforschung zunächst die Phase der Invention (HUGHES, 1989) eines soziotechnischen Innovationsprozesses dar: eine sehr frühe Phase des Experimentierens mit vergleichsweise konstanten Randbedingungen, in der die Invention lokaler und technologischer Lösungsansätze in ökonomisch geschützten Nischen als Ausgangspunkt für die transformative Entwicklung urbaner städtischer Nachhaltigkeitsziele herangezogen werden (BULKELY et al., 2017; GEELS, 2019).

2.2 Vorstellung und Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Die Region um die Stadt Aachen liegt am nördlichen Rand der Eifel und umfasst das Dreiländereck Niederlande, Belgien, Deutschland (Abb. 2 A). Geomorphologisch ist Aachen charakterisiert durch eine Kessellage mit zahlreichen von Süden her in die Stadt verlaufenden Bachtälern und einem Abfluss über das nördlich gelegene Gewässer Wurm. Für das Starkregenereignis im Mai 2018 liegt keine detaillierte meteorologisch-klimatologische Einordnung vor, wie sie etwa für Extremwetterereignisse im Juli 2021 erstellt wurden, da es sich um einen konvektiven und kleinräumigen Starkregen handelte, der ausschließlich die Stadt Aachen betraf. In der meteorologischen Analyse wird daher der zeitliche und räumliche Verlauf des Starkregenereignisses

zunächst in einem 22 km x 27 km regionalen Untersuchungsgebiet (Abb. 2 B) um die Stadt Aachen nachvollzogen, bevor die hydrologisch-hydraulischen Analysen auf ein lokales Untersuchungsgebiet im Bereich um den Bahnhof Aachen-West fokussiert werden (Abb. 2 C). Dieser Bahnhof war durch eine Überstausituation im Bereich der Gleisunterführung in besonderer Weise vom Starkregenereignis betroffen (Abb. 7). Zudem ist das Untersuchungsgebiet ein in sich geschlossenes Teileinzugsgebiet, das als Grundlage für die hydrologischen und hydrodynamischen Analysen genutzt wurde. Insbesondere war dies aus numerischen Gründen notwendig, da bi-direktional gekoppelte Simulationsläufe hohe Anforderungen an Rechensysteme stellen. Eine Abgrenzung des Teileinzugsgebiets war aufgrund seiner topografischen und entwässerungstechnischen Charakteristik gut möglich.

2.2 Vorstellung und Verarbeitung der Niederschlagsdaten

Für die meteorologische Analyse des Ereignisses wurden sowohl geeichte NiederschlagsradarDaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) als auch lokale Niederschlagsschreiberdaten herangezogen. Die Radardaten stammen aus dem vom DWD entwickelten Verfahren RADKLIM, bei dem es sich um die Klimaversion des Routineverfahrens RADOLAN (Radar-Online-Aneichung) handelt (WINTERRATH et al., 2018). Aus der Kombination punktueller Messwerte von Bodenstationen und flächendeckender Informationen von 17 Wetterradaren liefert das Verfahren räumlich und zeitlich hochaufgelöste Niederschlagsdaten für Deutschland (DWD, 2018a). Für die historischen RADKLIM-Daten, die ab dem Jahr 2001 vorliegen, wurden die Daten des operationellen RADOLAN-Verfahrens mit einer einheitlichen Methode reprozessiert (WINTERRATH et al., 2017). Dadurch sind die Daten aller Zeitpunkte miteinander vergleichbar und es können entsprechend klimatologische Analysen durchgeführt werden. Die Niederschlagsraster des RADKLIM-Datensatzes haben eine räumliche Auflösung von 1 km x 1 km und liegen in Zeitschritten von 1 Stunde (RW) und 5 Minuten (YW) vor. Für die Analyse des Niederschlagsereignisses vom 29. Mai 2018

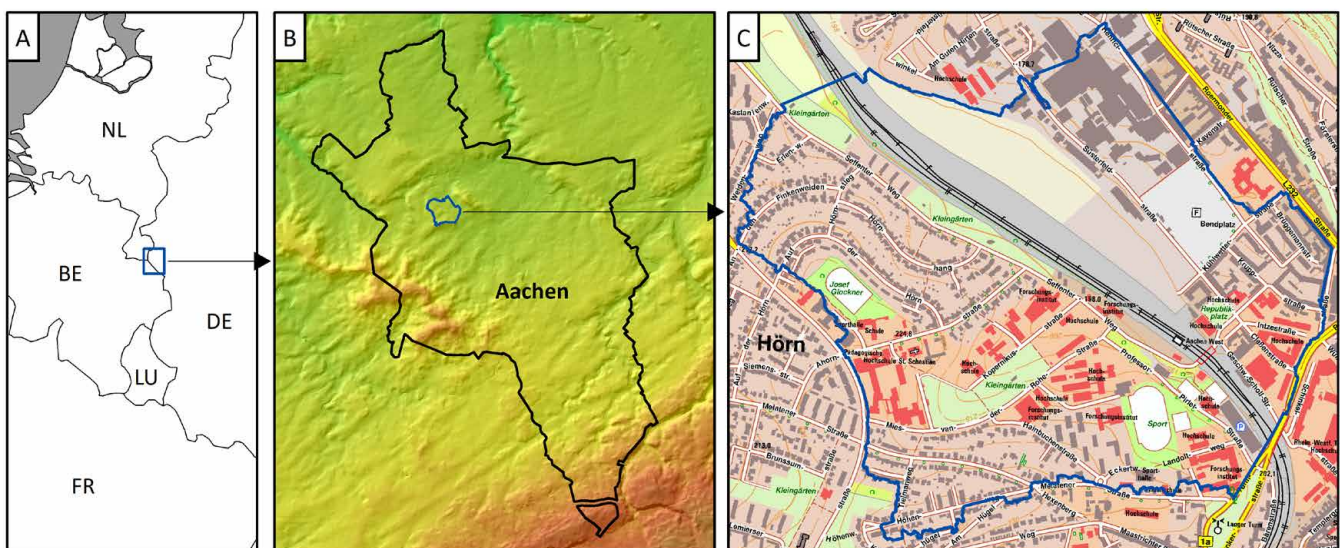


Abbildung 2

Übersicht der geographischen Lage des Untersuchungsgebiets (blau) (Datenquellen: SANDVIK, 2008; EEA, 2016; STADT AACHEN, 2022; BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2023 a).

Overview of the geographical location of the study area (blue).

wurden die 5-minütigen RADKLIM-Daten der Reprozessierungs-version 2017_002 verwendet (DWD, 2018b), da die hohe zeitliche Auflösung eine detaillierte Analyse des Ereignisverlaufs zulässt.

Die zusätzlich verwendeten Niederschlagsdaten von Bodensmessstationen im Raum Aachen wurden mit denen des RADKLIM-Datensatzes verglichen. Es fanden hierfür nur solche Stationen Anwendung, deren Daten nicht schon in die Aneicherung des RADKLIM-Verfahrens eingegangen sind. Dies traf auf sechs Stationen zu: 1. Burtscheid, 2. Heizkraftwerk, 3. Aachen-Hörn, 4. Soers, 5. Eilendorf und 6. Horbach. Die Lage der Stationen ist in Abbildung 6 zu sehen. Die Daten der Station 3 stammen aus eigenen Messungen (LEUCHNER et al., 2019), wobei dort zum Ereigniszeitpunkt lediglich ein Tropfenzähler verfügbar war und somit nur die Gesamtsumme analysiert wurde. Die Daten der übrigen Stationen wurden vom Wasserverband Eifel-Rur bereitgestellt (WVER, 2020) und beruhen auf Messungen des WVER (Stationen 4 bis 6), des LANUV (Station 1) sowie der Stadtwerke Aachen (Station 2). Bei Station 2 wird der Niederschlag mithilfe des Wägeprinzips erfasst, bei allen anderen Stationen wird mithilfe einer Kippwaage bzw. Wippe gemessen.

Die Verarbeitung der Daten erfolgte in der Programmiersprache R, Version 4.3.0., mit dem Geoinformationssystem ArcGIS, Version 10.7.1. Die Niederschlagsraster für den 29. Mai 2018 wurden in einem ersten Schritt auf das regionale Untersuchungsgebiet zugeschnitten und anschließend visuell analysiert, um den relevanten Zeitabschnitt des Starkregenereignisses zu identifizieren. Im Zuge dessen erwiesen sich 18 Zeitschritte von 14:00 bis 15:30 Uhr (MESZ) als relevant für die Analyse. Alle Uhrzeiten werden im Folgenden in der am Tag des Ereignisses in Aachen gültigen mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ = UTC+2) angegeben.

Ziel der nächsten Schritte war es, die räumliche und zeitliche Bewegung des Ereignisses zu erfassen. Zunächst wurde für jedes der 18 5-Minuten Raster der Schwerpunkt des Niederschlags im regionalen Untersuchungsgebiet ermittelt. Um nur die Bereiche mit besonders hohen Niederschlagswerten in die Berechnung miteinzubeziehen, wurde zunächst für jedes der Raster das 85 % Perzentil der Niederschlagswerte ermittelt. Daraufhin war es nötig, alle Zellen mit Werten unterhalb des jeweiligen Perzentils auf NA (Fehlwert) zu setzen. Die so entstandenen Rasterdatensätze wurden anschließend in vektorbasierte Punktdatensätze umgewandelt, wobei in jedem Punkt der Niederschlagswert der entsprechenden Rasterzelle als Attributwert gespeichert wurde. Die Koordinaten des Schwerpunktes ($\bar{x}_w$, $\bar{y}_w$) ergeben sich dann aus den mit dem Niederschlag gewichteten Mittelwerten der x- bzw. y-Punktkoordinaten (x_i , y_i) eines jeweiligen 5-Minuten Zeitschritts nach folgender Formel, wobei w_i die Gewichtung (Niederschlagswert) des Punktes i ist:

$$\bar{x}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \bar{y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Durch die Verknüpfung der einzelnen Schwerpunkte ließ sich nun die Zugbahn des Ereignisses bzw. die Zugrichtung bestimmen.

2.3 Aufbau des numerischen Modells für Strömungs- und Überflutungsprozesse

Zur Modellierung der oberflächlichen und unterirdischen Strömungs- und Überflutungsprozesse für den Untersuchungsbereich um den Aachener Westbahnhof diente ein hydrodynamisches, bidirektional gekoppeltes Niederschlags-Abfluss-Modell. Dazu wurden zunächst ein 1D-Kanalnetzmodell sowie ein 2D-Oberflächenabflussmodell entwickelt und anschließend miteinander verbunden. Die bidirektionale Kopplung der Modelle ermöglicht eine detaillierte Beschreibung der Interaktionsprozesse zwischen Kanalnetz- und Oberflächenabfluss.

Die Daten, die zur Erstellung des 1D-Kanalnetzmodells im Untersuchungsgebiet notwendig waren, wurden durch die Regionetz GmbH, den lokalen Kanalnetzbetreiber in der Stadt Aachen, bereitgestellt (REGIONETZ, 2020). Die Daten umfassen unter anderem alle relevanten Angaben zur Lage und Geometrie der Haltungen und Schächte, wie beispielsweise Schachtmittelpunkte, Höhenlagen oder Profilformen. Weiter enthalten sie Informationen zum jeweiligen Entwässerungssystem und damit darüber, ob es sich um Schmutz-, Regen- oder Mischwasserkanäle handelt. Ebenfalls enthalten sind Daten zu den Teileinzugsgebieten im Untersuchungsgebiet. Neben deren Geometrie und damit insbesondere deren Größe umfassen die Daten auch Informationen zu den Befestigungsgraden der Teileinzugsgebiete.

Im Anschluss an die Erstellung der Kanalnetzgeometrie wurden im Modell die Teileinzugsgebiete hinterlegt und den Haltungen zugewiesen, in die sie jeweils entwässern. Auf Grundlage der Informationen zur Größe und dem Grad der Befestigung der Teileinzugsgebiete ist das Modell in der Lage, die abflusswirksamen Niederschläge zu berechnen, die dem Kanalnetz von der Oberfläche her zufließen. Die Befestigungsgrade hängen von der Flächennutzung und Beschaffenheit der Teilflächen ab, sodass im Modell für jedes Einzugsgebiet ein individueller Befestigungsgrad hinterlegt ist. Im Untersuchungsgebiet variieren diese zwischen 0 % und 100 %, wobei die hohen Befestigungsgrade von > 80 % im Bereich von Straßen und anderen asphaltierten Flächen vorliegen, wohingegen niedrige Befestigungsgrade < 0 % insbesondere Grün- und Parkflächen zuzuordnen sind. Eine Übersicht über das erstellte Kanalnetzmodell zeigt Abbildung 3 A.

Für eine Beurteilung der Kapazitäten des Kanalnetzes sowie zur Plausibilisierung der Kanalnetzdaten und Funktionsfähigkeit des Modells wurden Simulationen mit verschiedenen Modellregen durchgeführt. Modellregen nach Euler Typ II ermöglichten es, eine möglichst realitätsnahe Darstellung des Niederschlags zu erreichen. Bei ihrer Erstellung wurden Wiederkehrzeiten zwischen 3 Jahren und 100 Jahren gewählt.

Für eine detailliertere Beschreibung der oberflächlichen Abflüsse wurde ein 2D-Modell erstellt (Abb. 3 B). Als primäre Modellgrundlage dienten das digitale Geländemodell (DGM) mit einer Auflösung von 1 m x 1 m (DGM1) (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2021) sowie ergänzend Gebäudepolygone und ATKIS-Flächennutzungsdaten der Geobasisdaten NRW (<https://www.opengeo-data.nrw.de/produkte/>). Das numerische Rechengitter wurde zunächst auf Grundlage des DGM1 erstellt, welches anschließend durch zusätzliche abflussrelevante Oberflächenstrukturen, insbesondere Gebäudepolygone, erweitert wurde. Die abschließende Zuweisung von Oberflächenrauheiten erfolgte auf Grundlage

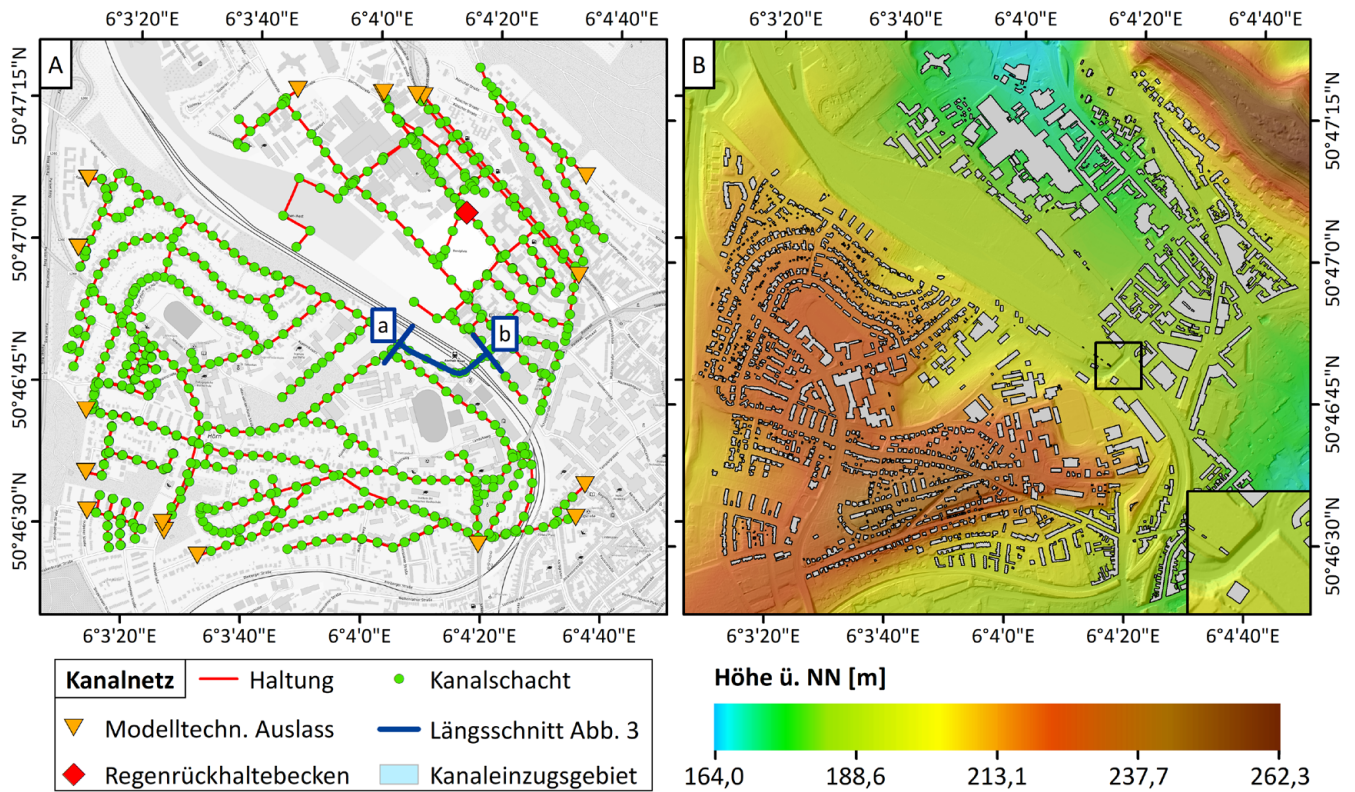


Abbildung 3

(A) Übersicht des 1D-Kanalnetzmodells im Modellgebiet (Datenquellen: REGIONETZ, 2020; BKG, 2022), (B) 2D-Oberflächenabflussmodell mit Darstellung des digitalen Geländemodells mit einer Auflösung von 1 m x 1 m (Datenquelle: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2021).

(A) Overview of the 1D sewer system model within the model area, (B) 2D surface runoff model with representation of the digital elevation model, with a resolution of 1 m x 1 m).

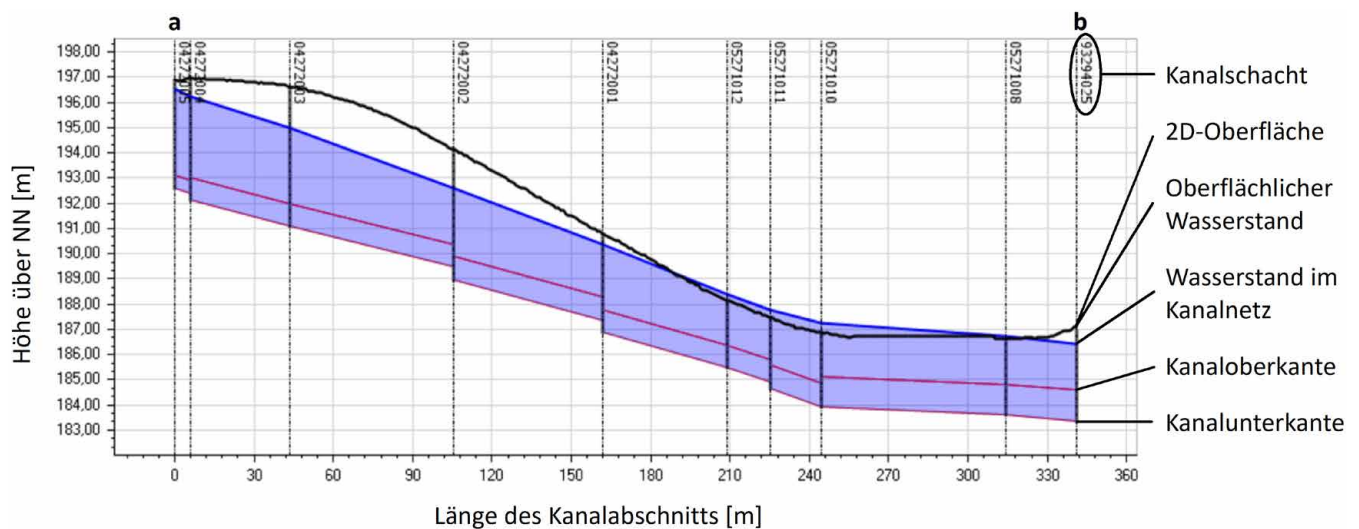


Abbildung 4

Längsschnitt eines gekoppelten 1D-2D-Modells an einer ausgewählten Stelle (Abb. 3 A, a-b).

Longitudinal section of a coupled 1D-2D model at a selected location (fig. 3 A, a-b).

der ATKIS-Daten zur Flächennutzung. Die Auflösung des Rechen-netzes betrug 1 m x 1 m.

2.4 Kopplung des (1D)-Kanalnetzmodells mit dem (2D)-Oberflächenabflussmodell

Zur vollständigen Abbildung der Interaktionen zwischen Oberflächenabfluss und Kanalisation wurden das 1D-Kanalnetzmodell und das 2D-Oberflächenabflussmodell bidirektional gekoppelt. Das Kopplungsverfahren basiert auf der geografischen Zuordnung von Kanalisationsaus- bzw. -einlässen, wie beispielsweise Schächten, mit der nächstliegenden Zelle des numerische Rechengitters. Dieses Verfahren ermöglicht es, mit dem Modell anschließend sowohl den Wassereintritt als auch -austritt aus der Kanalisation detailliert abzubilden. Abbildung 4 zeigt den Längsschnitt entlang einer Kanalhaltung innerhalb des gekoppelten Bereichs.

Für die bidirektionale Kopplung mit dem Oberflächenabflussmodell wurde das Kanalnetzmodell geringfügig angepasst: Zunächst wurden die den Haltungen zugehörigen Teileinzugsgebiete entfernt. Stattdessen wurden Gebäudedaten importiert, als Einzugsgebiete definiert und den geometrisch nächsten Haltungen zugeordnet. Sowohl das in den jeweiligen Gebäuden anfallende Schmutzwasser wie auch das das abfließende Niederschlagswasser von den Dachflächen der Gebäude können so an das Kanalnetzmodell übergeben und somit in diesem berücksichtigt werden. Auf diese Weise flossen auch Gründächer oder ähnliche Retentionseigenschaften der Gebäude ins Modell ein.

Im Anschluss an diese Anpassungen wurden in dem gekoppelten Modell Niederschlagsinformationen hinterlegt. Die als Einzugsgebiete definierten Gebäudeflächen bekamen dabei jeweils einen zeitlich differenzierten 1D-Niederschlag zugewiesen. Für die restlichen Flächen des Untersuchungsgebiets konnte auf Grundlage der Radardaten ein sowohl zeitlich als auch räumlich differenzierter 2D-Niederschlag hinterlegt werden.

2.5 Erstellung eines drohnenbasierten digitalen Geländemodells

Mit dem Ziel, ein im Vergleich zum digitalen Geländemodell 1 m x 1 m (DGM1) deutlich höher aufgelöstes DGM für das Untersuchungsgebiet zu erstellen, erfolgte eine Drohnenbefliegung mit einer DJI Drone Phantom IV. In Vorbereitung der Befliegung wurde das Untersuchungsgebiet in 20 überlappende Gebiete eingeteilt und der Drohne jeweils die Flugroute der einzelnen Gebiete mit Hilfe der Software Agisoft (Vers. 4.1) vorgegeben, sodass diese die Aufnahmen während der Befliegung vollautomatisch erstellen konnte. Insgesamt wurde die Befliegung über einen Zeitraum von vier Tagen durchgeführt. Geflogen wurde in einer Höhe von 70 m. Die Kamera hatte dabei einen Neigungswinkel von 90 Grad. Die Wetterverhältnisse waren überwiegend sonnig. Auffällig war, dass die Drohne bei zu direkter Sonneneinstrahlung in die Sensoren ihren Flug unterbrach.

Die photogrammetrische Bearbeitung der Aufnahmen erfolgte mit Hilfe der Software Agisoft Metashape (Vers. 4.1). So konnte aus 10.370 Einzelbildern zunächst ein Orthophoto und anschließend ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) mit einer Auflösung von 7,0 cm/Pixel erstellt werden (Abb. 5). Die Genauigkeit der Höhenwerte lag im Vergleich zu terrestrisch gemessenen Fixpunkten bei ca. 5 cm. Die Entfernung der Vegetation und Objekte erfolgte mit Filtermechanismen und manuellen Korrekturen innerhalb der Software Agisoft.

2.6 Infrastrukturelle Anpassungsmaßnahmen zur Reduktion des Starkregenrisikos

Verschiedene Maßnahmen sind einsetzbar, um Niederschlag schadlos abzuleiten, zwischenspeichern oder einen verzögerten Abfluss zu erreichen. Notwasserwege ermöglichen beispielsweise eine kontrollierte schadhafte Ableitung von Niederschlagswasser auf Retentionsflächen. Es handelt sich dabei um einfache bautechnische Anpassungen, z. B. Einsatz von Mittelrinnen im V-Profil, die bestenfalls bereits in der Straßenplanung berücksichtigt werden. Allgemein sollten Freiräume

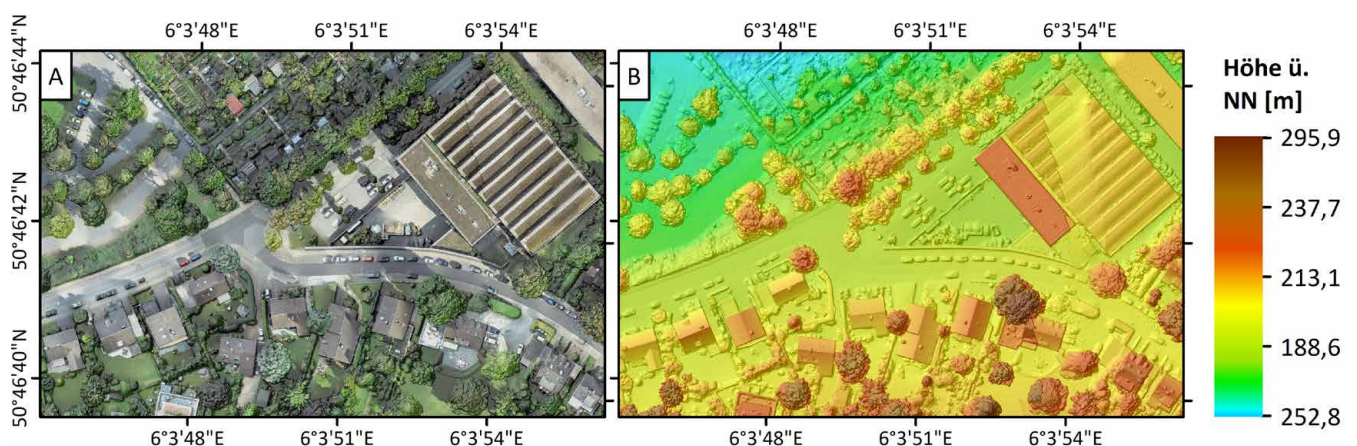


Abbildung 5

(A) 3D-Punktwolke eines Ausschnitts im Untersuchungsgebiet um den Aachener Westbahnhof, (B) Drohnenbasiertes digitales Oberflächenmodell (DOM) aus der 3D-Punktwolke.

(A) 3D point cloud of a part within the study area Aachen Westbahnhof, (B) Drone-based digital surface model (DSM) generated from the 3D point cloud.

und Grünflächen so gestaltet werden, dass ein temporärer Regenrückhalt möglich ist. Hier kann auch oftmals die natürliche Topographie von Nutzen sein. Bei der Planung der Maßnahmen sind vor allem ganzheitliche Ansätze zu empfehlen.

Einen solchen ganzheitlichen Ansatz verfolgen die wassersensible Stadtentwicklung und das Schwammstadtprinzip. Dabei wird auf Maßnahmen gesetzt, die Synergieeffekte aufweisen. Das Schwammstadtprinzip verfolgt das Ziel, Wasser zu speichern und es anschließend durch Verdunstung und gezielte Bewässerung wieder abzugeben. Somit vereint dieses Prinzip Maßnahmen zur Anpassung an die verschiedenen Klimafolgen, wie Starkregen, Hitze und Trockenheit (UBA, 2022). Die genannten Ansätze sollten ebenfalls bei der Straßenraumgestaltung Berücksichtigung finden. Mit entsprechenden Maßnahmen kann so das Niederschlagswasser im Straßenraum zurückgehalten und gleichzeitig eine effektive Hitzevorsorge erzielt werden (z. B. Bewässerung der Pflanzen, Erhöhung der Verdunstungsleistung). Dezentrale Versickerungselemente, beispielsweise in Form von Tiefbeeten, Versickerungsmulden oder wasserdurchlässigen Bodenbelägen, sind Maßnahmen, die nicht nur einen guten Überflutungsschutz bei Starkregen bieten, sondern auch zu einer wassersensiblen Straßenraumgestaltung eingesetzt werden können (BENDEN, 2014; BLUEGREENSTREETS, 2020).

Im baulichen Umfeld können Dachbegrünungen einen Beitrag zum Wasserrückhalt und zeitlich verzögertem Regenwasserabfluss leisten. Diese entlasten nicht nur die Kanalisation und wirken Überschwemmungen entgegen, sondern tragen auch zur Förderung der Biodiversität und der Verdunstungskühlung bei. Die Retentionsleistung der Gründächer ist abhängig von der Mächtigkeit der Substratschichtdecke und der Dachneigung. Mit zunehmender Dachneigung sinkt das Retentionsvermögen. Bei einer Dachneigung von > 15 Grad ist eine Dachbegrünung nicht zu empfehlen (Tab. 1). Je nach Aufbau können Gründächer bis zu 99 % des Jahresniederschlags zurückhalten (BUGG, 2022), während Zisternen das Regenwasser für die Bewässerung der Pflanzen speichern können (BRUNE et al., 2017).

3 Ergebnisse

3.1 Meteorologische Analyse des Starkregenereignisses

Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Ablauf des Ereignisses vom 29. Mai 2018 zwischen 14:00 Uhr und 15:30 Uhr in drei Zeitschritten à 30 Minuten (Abb. 6 A–C) sowie als Summe dieser drei Zeitschritte (Abb. 6 D) in seiner flächigen Struktur. Für jeden 30-Minuten Zeitschritt wurde die Summe der 5-Minuten Niederschlagsraster berechnet, die der jeweiligen Zeitspanne zuzuord-

nen sind. Zur Beschreibung des Ereignisses wurden neben dem RADKLIM-Datensatz auch Daten von sechs Bodenstationen ausgewertet, deren Position und Nummerierung aus Abbildung 6 A hervorgeht. Abbildung 6 D zeigt außerdem die Schwerpunkte des Niederschlags im Aachener Stadtgebiet in 5-minütiger zeitlicher Auflösung von 14:05 Uhr, dem Zeitpunkt des ersten registrierten Niederschlags in der Stadt Aachen, bis 15:20 Uhr. Die Zeitangaben geben dabei immer den Beginn der 5-minütigen Messung an.

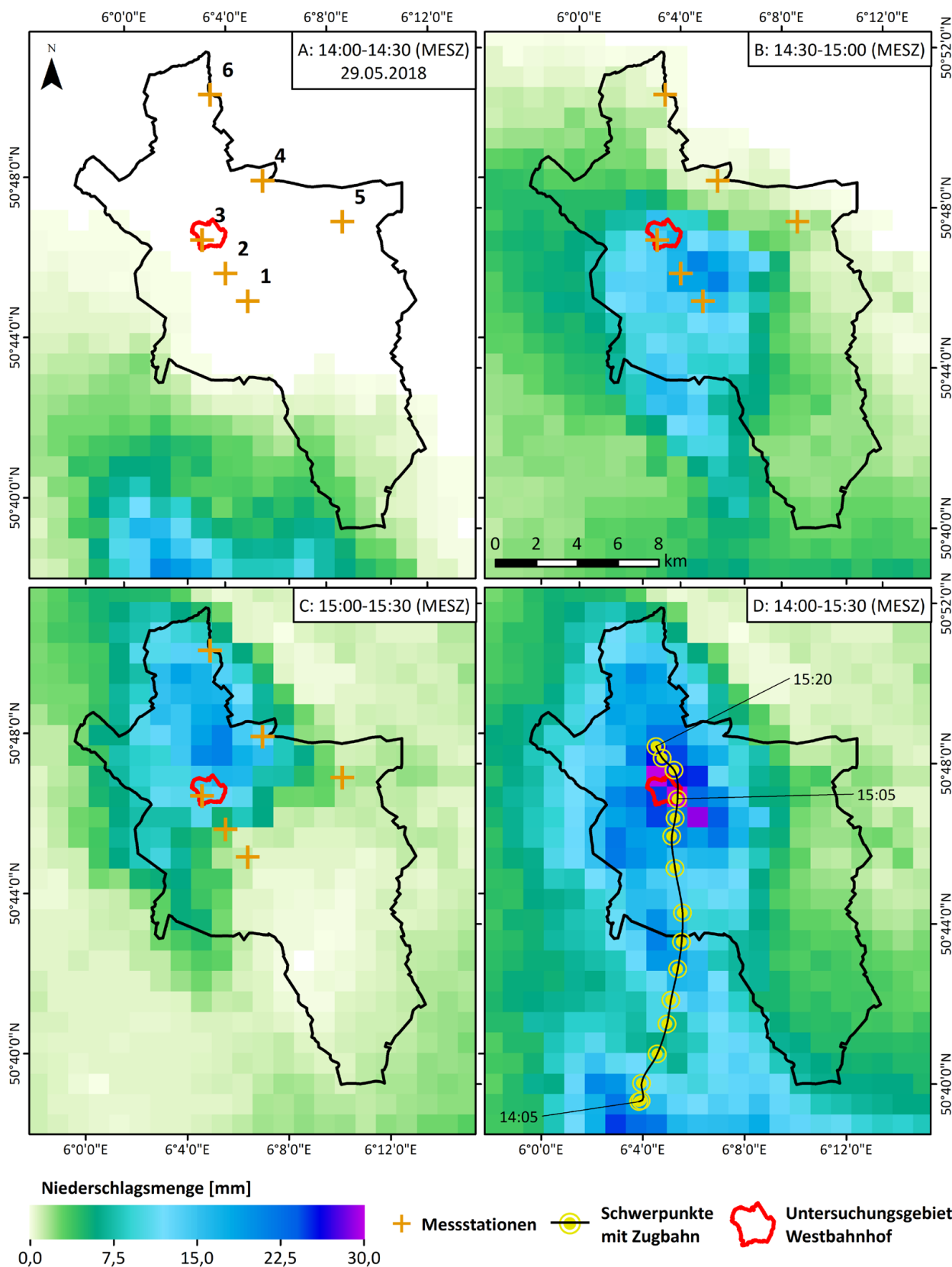
Das Niederschlagsereignis bewegte sich auf einer Süd-Nord Achse über das Aachener Stadtgebiet hinweg, wobei zwischen 14:30 Uhr und 15:30 Uhr die höchsten Niederschlagswerte (Abb. 6 B: 21 mm; Abb. 6 C: 20,1 mm) sowohl im Allgemeinen als auch im Bereich der Innenstadt und des Untersuchungsgebiets verzeichnet wurden. Das Untersuchungsgebiet lag bezogen auf das Gesamtereignis (Abb. 6 D) im Bereich der höchsten von RADKLIM registrierten Niederschlagsmengen (30,3 mm und 29,9 mm).

Mit Blick auf die Daten der Niederschlagsmessstationen in Tabelle 2 stellt sich die Bewegung des Ereignisses grundsätzlich ähnlich dar. Beim Vergleich der Stationsdaten mit den entsprechenden 30-Minuten-Summen des RADKLIM-Datensatzes der zugehörigen Rasterzelle ergeben sich jedoch teils deutliche Unterschiede: Zwischen 14:30 Uhr und 15:00 Uhr werden an Station 1 und 2 Niederschlagswerte von 47,1 mm und 31,2 mm registriert. Die Werte des RADKLIM-Datensatzes für den gleichen Zeitraum liegen bei 14,9 mm für Station 1 und 18,6 mm für Station 2, was auf eine Unterschätzung der gemessenen Niederschlagsmenge durch das RADKLIM-Verfahren hindeutet. Für den Zeitraum 15:00 Uhr bis 15:30 Uhr, in dem die Niederschlagsintensität allgemein nachließ, verzeichneten die Stationen 4 und 6 etwas niedrigere Niederschlagsmengen als der RADKLIM-Datensatz.

Laut KOSTRA-Datensatz wäre für die Aachener Innenstadt ein Niederschlag von 19,2 mm in 10 Minuten im Wiederkehrintervall 100a zu erwarten gewesen (MALITZ & ERTTEL, 2015). An der Station 2 (Heizkraftwerk) wurde eine maximale Intensität von 22,3 mm in 10 Minuten gemessen. Dieser Wert wurde an der Station Aachen-Orsbach in den 12 Jahren ihres Bestehens allerdings bereits einmal leicht übertroffen. Aufgrund der Verlegung der Aachener DWD-Station im Jahr 2011 basiert die Bestimmung der Wiederkehrzeit auf zwei unterschiedlichen Datenreihen und ist somit in dieser zeitlichen Auflösung mit Unsicherheiten behaftet. Trotzdem kann das Ereignis zwar als außergewöhnlich, aber nicht uneingeschränkt als "Jahrhundertereignis" gekennzeichnet werden.

Tabelle 1
Retentionspotenzial Dachbegrünung (Datenquelle: LANUV, 2022).
Retention potential of green roofs.

Art der Dachbegrünung	Dicke der Substratschicht	Retentionsvermögen bei Dachneigung	
		bis 5°	$> 5^\circ$ bis $\leq 15^\circ$
Extensives Gründach	10 cm	50 %	40 %
Einfache Intensivbegrünung	20 cm	65 %	50 %
Intensive Dachbegrünung	30 cm	80 %	60 %

**Abbildung 6**

Zeitlicher Ablauf des Ereignisses vom 29. Mai 2018 in 30 Minuten Intervallen von 14:00 Uhr bis 15:30 Uhr (MESZ), Gesamtniederschlagssumme dieses Zeitraums und Dynamik der Niederschlagsschwerpunkte im Aachener Stadtgebiet nach RADKLIM (Datenquellen: WINTERRATH et al., 2018; STADT AACHEN, 2022).

Time sequence of the event on the 29th of May 2018 in 30-minute intervals from 14:00 to 15:30 (CEST), total precipitation sum of this period and dynamics of precipitation centroids in the urban area of Aachen according to RADKLIM.

Tabelle 2

Vergleich der Niederschlagsdaten von Messstationen und denen aus RADKLIM.
Comparison of precipitation data from stations and RADKLIM.

Niederschlagsstationen		1	2	3	4	5	6
Messungen der Stationen	Einsetzen des Niederschlags	14:35	14:40	14:50	14:55	14:55	15:00
	Maximum der Niederschlagsintensität	14:45	14:55	-/-	15:05	15:00	15:15
	Niederschlagssumme (mm/14:00–14:30)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Niederschlagssumme (mm/14:30–15:00)	47,1	31,2	-/-	0,2	0,4	0,0
	Niederschlagssumme (mm/15:00–15:30)	3,1	10,1	-/-	7,9	1,6	10,2
	Ende des Niederschlags	15:55	16:00	-/-	16:10	16:05	16:25
	Niederschlagssumme (mm/Ereignis)	50,4	41,6	40,4	8,5	2,2	10,8
RADKLIM-Zellwerte an Koordinaten der Stationen	Einsetzen des Niederschlags	14:35	14:35	14:35	14:45	14:45	14:55
	Maximum der Niederschlagsintensität	14:50	14:50	14:50	15:05	14:55	15:15
	Niederschlagssumme (mm/14:00–14:30)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Niederschlagssumme (mm/14:30–15:00)	14,9	18,6	13,9	0,7	1,5	0,8
	Niederschlagssumme (mm/15:00–15:30)	1,4	2,8	10,9	12,7	1,7	13,8
	Ende des Niederschlags	15:55	15:55	15:55	16:10	16:20	16:30
	Niederschlagssumme (mm/Ereignis)	17,3	22,7	25,7	14,2	4,2	16,3

Fett: Maximale Niederschlagsintensität/30 min Zeitschritt der jeweiligen Niederschlagsstation bzw. der RADKLIM-Daten am 29. Mai 2018; Niederschlagsstationen: 1: Burtscheid, 2: Heizkraftwerk, 3: Aachen Hörn, 4: Kläranlage Aachen-Soers, 5: Kläranlage Eilendorf, 6: Kläranlage Horbach; Datenquellen: RADKLIM-Daten: WINTERRATH et al., 2018, Niederschlagsstationen: 1, 2, 4–6: WVER 2020, 3: LEUCHNER et al., 2019 (nur Tropfenzähler verfügbar).

Bei der Einordnung des Niederschlagsereignisses in den größeren Gesamtkontext auf Grundlage der RADKLIM-Daten, die inzwischen für die Jahre 2005 bis 2020 – also die Hälfte einer klimatologischen Normalperiode – vorliegen, lassen sich zwei Kernaussagen treffen: Ereignisse mit vergleichbarer oder höherer Niederschlagsintensität treten vor allem während der klimatologischen Sommermonate von Juni bis August auf. Das betrachtete Niederschlagsereignis kann, trotz des Auftretens Ende Mai und damit formal gerade außerhalb dieses Zeitraums, aufgrund der Witterungssituation als ein typisch sommerliches Ereignis betrachtet werden. Es weist außerdem eine Besonderheit in Bezug auf seine Anströmungsrichtung auf. Starkregenereignisse im Raum Aachen sind meist mit westlicher bis südwestlicher Anströmungsrichtung verbunden. Eine südliche Anströmung, die, wie in diesem Fall, parallel zur Entwässerungsrichtung der Hauptabflüsse im Einzugsgebiet verläuft, ist hingegen selten.

3.2 Hydrologisch-Hydraulische Hindcast-Analyse des Starkregenereignisses 29. Mai 2018 in Aachen

Im Nachgang zur Aufbereitung und Analyse der RADKLIM-Daten wurde in einem ersten Schritt auf Grundlage des hydrodynamisch, bidirektional gekoppelten Niederschlags-Abfluss-Modells eine Hindcast-Analyse, das heißt eine Nachrechnung des Ereignisses vom 29. Mai 2018, durchgeführt. Hierzu wurden dem Modell die aufbereiteten RADKLIM-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km und einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten als Input übergeben. Dokumentationsdaten in Form von Bildaufnahmen dienten als Validierungsgrundlage für das Modell und den mit diesem erzeugten Simulationsergebnissen.

Die Gegenüberstellung der simulierten Überflutungen hinsichtlich Ausdehnung und Überflutungstiefe weisen dabei grundsätz-

lich eine gute Übereinstimmung mit den In-situ-Beobachtungen auf. Für den Tiefpunkt unter dem Aachener Westbahnhof ist dies exemplarisch in Abbildung 7 dargestellt. Die mit dem Modell simulierte Wassertiefe liegt hier bei 0,35 cm, die In-situ-Abschätzung beträgt anhand von zwei knietief im Wasser stehenden erwachsenen männlichen Personen circa 0,40 cm. Kritische Überstauschächte, das heißt Schächte, aus denen Wasser aus der Kanalisation an die Oberfläche dringt, waren insbesondere in Fließrichtung der Kanalisation kurz vor dem Tiefpunkt unter dem Aachener Westbahnhof zu verorten. Sehr hohe und fehlerhafte Wasserstände an Gebäuden ergaben sich durch eine fehlende Beschreibung der lokalen Drainagesysteme innerhalb des Modells.

In einem zweiten Schritt erfolgte eine Sensitivitäts- und Schwachstellenanalyse des Kanalnetzes, indem verschieden intensive Modellregen (Euler Typ II) auf das Kanalnetzmodell angewendet wurden. Ziel der Analyse war es, Überstaubereiche des Kanalnetzes in Korrelation der Niederschlagsintensität zu lokalisieren und kritische Lastfälle zu identifizieren. Für den besonders überflutungsgefährdeten Bereich unter dem Aachener Westbahnhof zeigte sich, dass es bis zu einer Jährlichkeit des Niederschlagsereignisses von 10 a zu keinem Überstau, das heißt keinem Austritt von Wasser aus der Kanalisation, kommt. Erst ab einer Auftretenswahrscheinlichkeit des Niederschlagsereignisses von 20 a ist ein Überstau im Bereich unter dem Aachener Westbahnhof zu vermerken.

Tabelle 3 zeigt die weiteren Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Es wird deutlich, dass ein möglicher Retentionsraum im Bereich der Mies-van-der-Rohe-Straße allein nicht ausreicht, um die Überstausituation im Bereich des Aachener Westbahnhofs zu verbessern. Bereits ab einem Volumen von 300 m³ kann durch

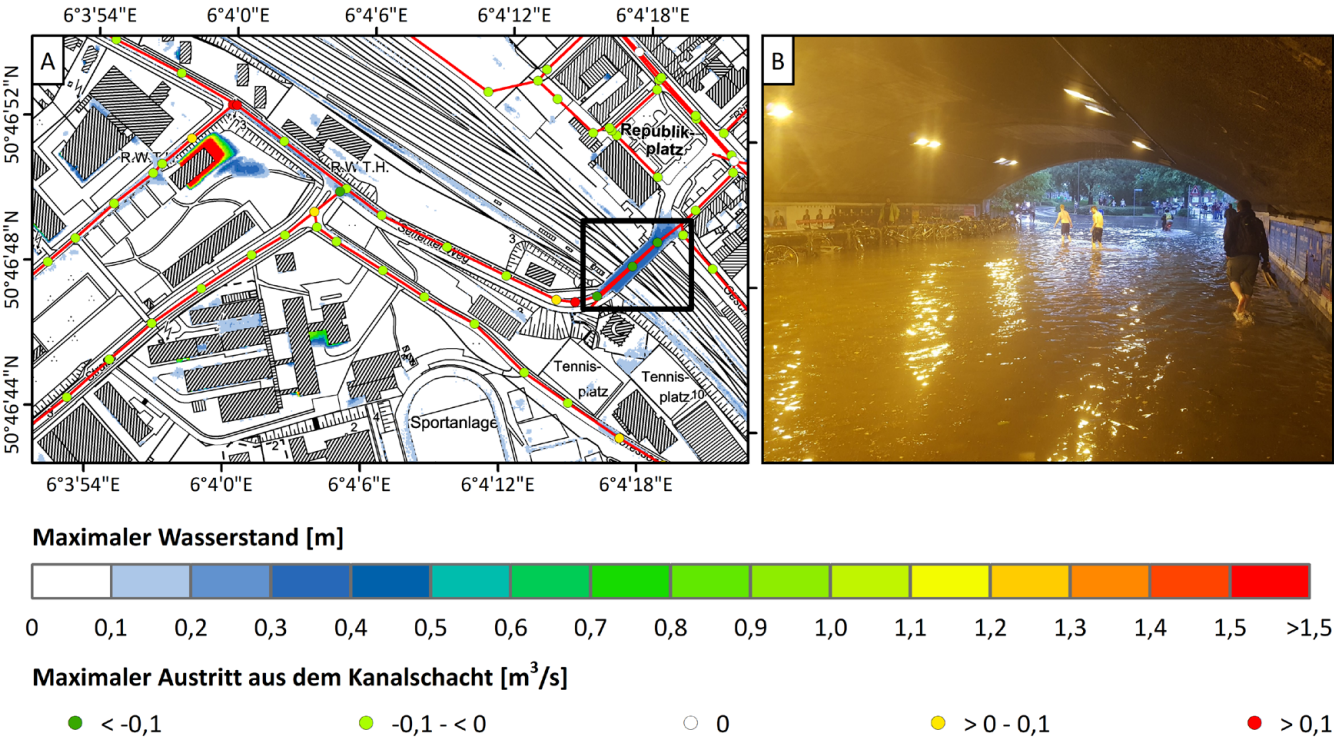


Abbildung 7
(A) Ergebnis der Simulation mit dem hydrodynamisch, bidirektional gekoppelten Niederschlags-Abfluss-Modells für das Niederschlagsereignis am 29. Mai 2018 (Datenquelle: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2023 b), (B) Aufnahme des Überflutungsereignisses am Tiefpunkt unter dem Aachener Westbahnhof am 29. Mai 2018 (HOFMANN, 2018).
Result of the simulation with the hydrodynamic, bidirectionally coupled model for the rainfall event on the 29th of May 2018, (B) Image of the flooding event at the low point under the Westbahnhof of the city of Aachen on the 29th of May 2018.

Tabelle 3 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (+ kein Überstau; - minimaler Überstau; -- Überstau). Results of the sensitivity analysis (+ no overflow; - minimal overflow; -- overflow).													
V	T	Mies-van-der-Rohe-Str.				Seffenter Weg				Republikplatz			
		20 a	30 a	50 a	100 a	20 a	30 a	50 a	100 a	20 a	30 a	50 a	100 a
0 m³		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
300 m³		+	--	--	--	+	-	--	--	+	-	--	--
600 m³		+	--	--	--	+	+	-	--	+	+	-	--
1.000 m³		+	-	--	--	+	+	+	--	+	+	+	--
1.200 m³		+	-	--	--	+	+	+	-	+	+	+	-
1.400 m³		+	-	--	--	+	+	+	+	+	+	+	+
1.600 m³		+	-	--	--	+	+	+	+	+	+	+	+

den Retentionsraum keine Verbesserung mehr erreicht werden. Für den Überstau im Bereich des Aachener Westbahnhofs scheint der über die Mies-van-der-Rohe-Straße zufließende Teil des Kanalnetzes also eine eher eine untergeordnete Rolle zu spielen. Eine größere Bedeutung kann dem zufließenden Wasser über den Strang des Seffenter Wegs zugesprochen werden. Mit zunehmender Schaffung von Retentionsraum für das Abwasser kann die Überstausituation im Bereich des Aachener Westbahnhofs entspannt werden. Auch das Schaffen eines Retentionsraums unter dem Republikplatz kann einen Überstau der Kanali-

sation verhindern. Die kritische Überstausituation im Bereich des Aachener Westbahnhofs kann also sowohl durch eine Drosselung des Zuflusses von oberhalb als auch durch eine Reduzierung des Rückstaus von unterhalb gelöst werden.

3.3 Sensitivitätstests des drohnenbasierten DGM
Im Folgenden wurde eine Sensitivitätsanalyse des drohnenbasierten DGM (Drohnen-DGM) durchgeführt, um dessen Qualität und Einfluss auf die Oberflächenabflusssimulationen zu prüfen. Vorab kann die These aufgestellt werden, dass durch eine

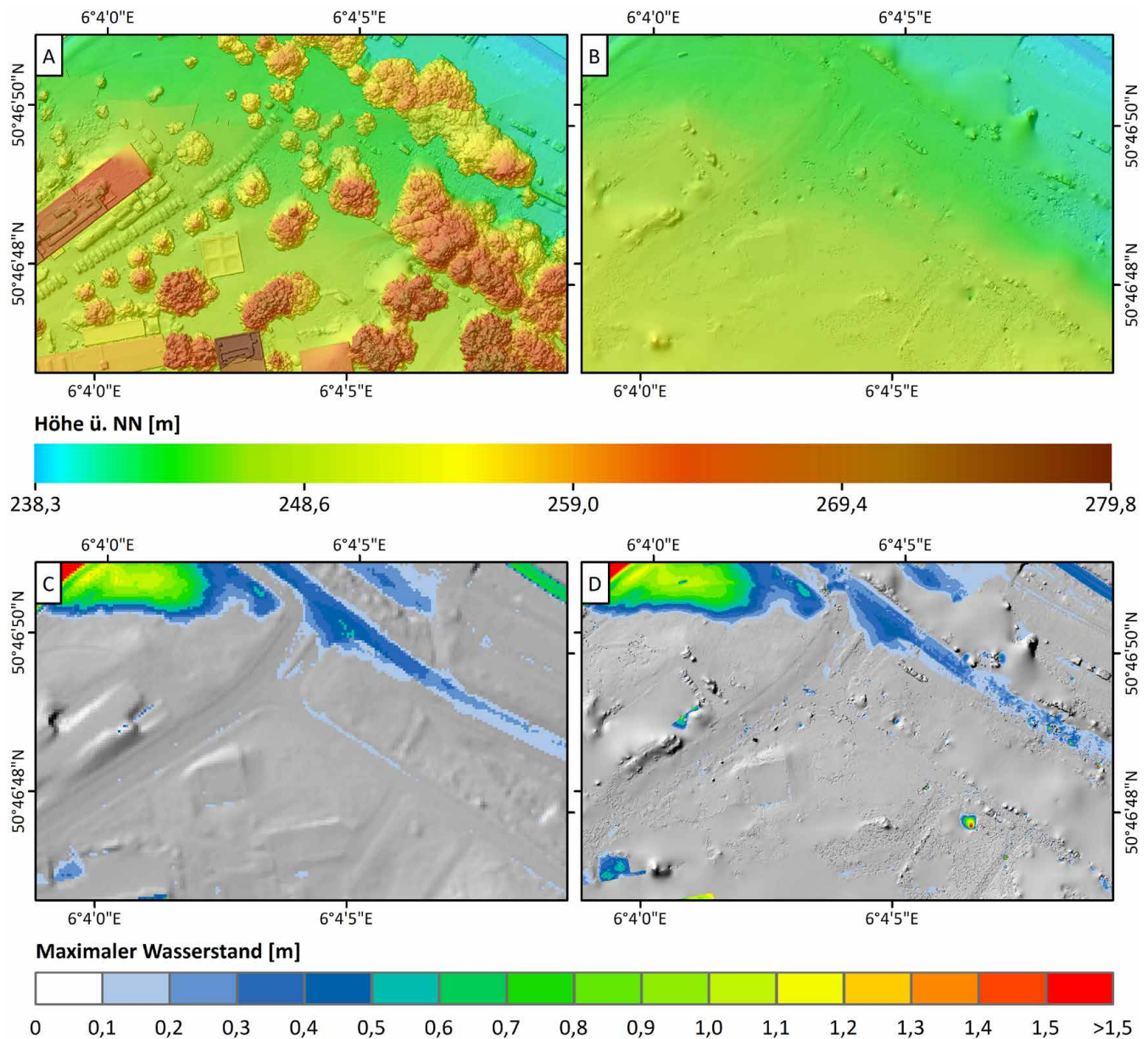


Abbildung 8

A) Drohnenbasiertes digitales Oberflächenmodell (DOM), (B) Prozessiertes drohnenbasiertes digitales Geländemodell (DGM), (C) 2D-Abflusssimulation auf Grundlage des DGM1, (D) 2D-Abflusssimulation auf Grundlage des drohnenbasierten DGM.

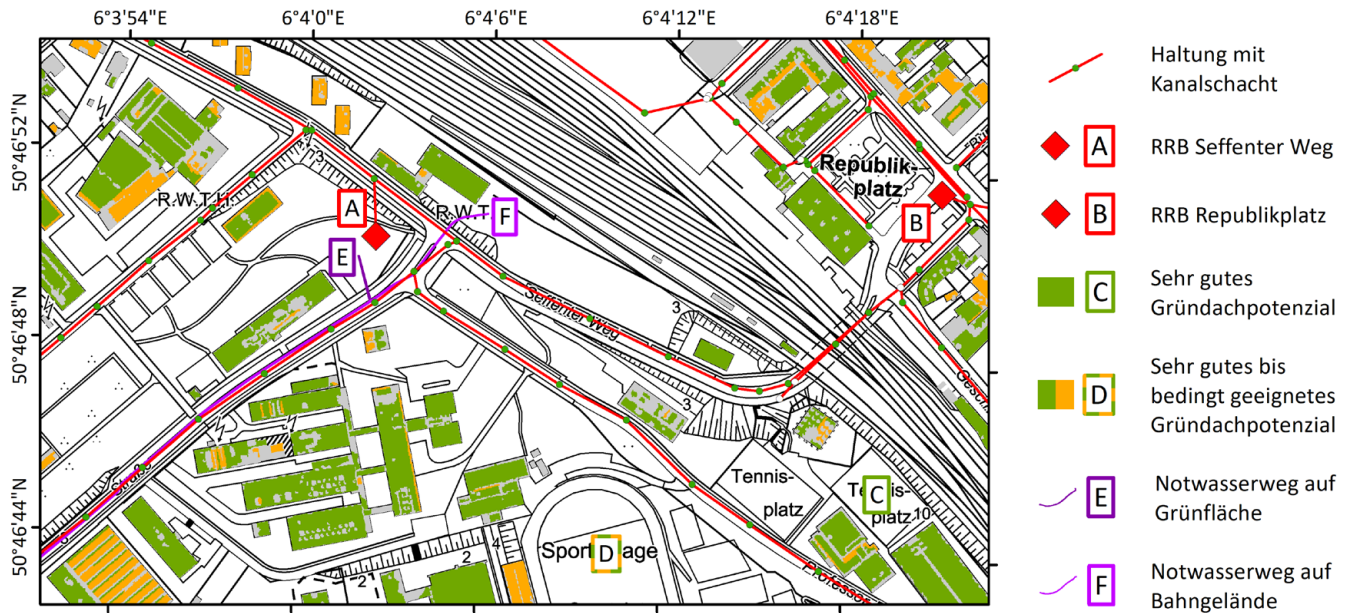
(A) Drone-based digital surface model (DSM), (B) Processed drone-based digital elevation model (DEM), (C) 2D runoff simulation based on the DEM1, (D) 2D runoff simulation based on the drone-based DEM.

höhere Auflösung im Vergleich zum DGM1 ebenfalls die Genauigkeit der Abflusssimulationen anzunehmen ist.

Zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse musste in einem ersten Schritt das Drohnen-DOM in ein Drohnen-DGM überführt werden, indem die Vegetation sowie temporäre Hindernisse, wie beispielsweise Autos, für 2D-Abflusssimulationen (Abb. 8 A) vom DOM herausgefiltert werden. Dieser Prozessierungsschritt ist erforderlich, da diese Objekte auf der Oberfläche zu unrealistischen Abflussverhältnissen innerhalb der Simulation führen. So würden in einem unbearbeiteten Drohnen-DGM abgebildete Autos oder Bäume inkl. Baumkrone vollständig umflossen. Die

teils automatisch, teils händisch vorgenommene Anpassung bzw. Filterung führte in der Folge zu kleinen Fehlstellen im DGM (Abb. 8 B).

Der Vergleich der Abflusssimulationen zeigt Abbildung 8 (A) Drohnen-DGM ohne Korrektur und (B) das Drohnen-DGM nach der Korrektur. Die Ergebnisse zeigen, dass innerhalb des Drohnen-DGM durch die Filterung entstandenen Senken und Mulden aufgefüllt werden. In der Folge zeigen sich geringfügige Unstimmigkeiten in den Überflutungskarten. Der direkte Vergleich des Drohnen-DGM (Abb. 8 C) mit dem DGM1 (Abb. 8 D) zeigte keine großen Unterschiede zwischen beiden DGMs.

**Abbildung 9**

Entwickelte Maßnahmen im Modellgebiet (A + B: Regenüberlaufbecken (RRB), C + D: Dachbegrünung, E + F: Notwasserwege)
(Datenquelle: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2023 b).

Developed measures in the model area (A + B: retention basin, C + D: Roof greening, E + F: Emergency waterways).

3.4 Erarbeitung und Analyse möglicher städtebaulicher Maßnahmen

In Folge des Starkregenereignisses am 29. Mai 2018 wurde u. a. die Unterführung des Aachener Westbahnhofs stark überflutet. Vor diesem Hintergrund sind für den Untersuchungsraum Maßnahmen identifiziert worden, die zur Reduzierung des Überflutungsrisikos beitragen. Auf Grundlage des hydrodynamischen Modells konnten die ausgewählten Maßnahmen im Untersuchungsraum getestet werden.

Das Untersuchungsgebiet ist geprägt durch zwei Straßen, die ein relativ großes Gefälle aufweisen: Mies-van-der-Rohe-Straße und Seffenter Weg. Aufgrund der vorliegenden topographischen Gegebenheiten können hier bei einem Starkregenereignis enorme Oberflächenabflüsse entstehen, die Richtung der Unterführung fließen. Entsprechend lag der Schwerpunkt der Untersuchung im Bereich dieser beiden Straßen. Aufgrund der Längsneigung der Straßen sind Maßnahmen wie das Anlegen von Stau- und Rückhalteräumen auf straßenbegleitenden Parkplätzen, Versickerungsmulden oder die Zwischenspeicherung von Regenwasser am Fahrbahnrand ungeeignet bzw. nicht möglich. So wurde im Modell beispielhaft ein Notwasserweg auf der Mies-van-der-Rohe-Straße implementiert, über den die Starkniederschläge kontrolliert in eine angrenzende Grünfläche (Abb. 9, Maßnahme E) bzw. Bahnfläche (Abb. 9, Maßnahme F) abgeleitet werden. Mit Hilfe dieser Simulation konnte überprüft werden, ob ein Notwasserweg die Folgen des Starkregenereignisses minimieren könnte.

Auch das Kanalnetz bietet Möglichkeiten, um Maßnahmen zur Überflutungsvermeidung infolge von Starkniederschlagsereignissen zu implementieren. Durch das Schaffen von Retentionsräumen im Kanalnetz kann das im Fall von Starkniederschlägen anfallende Wasser aufgefangen und verzögert wieder abgege-

ben werden. An welchen Stellen sich solche Retentionsräume umsetzen ließen und wie groß diese sein müssten, um im Bereich des Aachener Westbahnhofs einen Überstau des Kanalnetzes zu verhindern, sollte mittels einer Sensitivitätsanalyse ermittelt werden. Aufbauend auf dieser Analyse wurden zwei Regenrückhaltebecken (RRB) konzipiert. Ein RRB (Seffenter Weg) wurde oberhalb des Aachener Westbahnhofs im Modell implementiert (Abb. 8, Maßnahme A), wobei ein zweites RRB am Republikplatz unterhalb des Aachener Westbahnhofs gesetzt wurde. Ziel war es, den Effekt einer Drosselung des Zuflusses zum gefährdeten Bereich darzustellen. Anhand der Sensitivitätsanalyse konnte das jeweilige Retentionsvolumen der beiden RRB bestimmt werden, welches notwendig ist, um eine Überflutung im Aachener Westbahnhof verhindern zu können. Dabei wurden verschiedene Wiederkehrzeiten des Niederschlags berücksichtigt, bis hin zu einer maximalen Jährlichkeit von 100 Jahren.

Des Weiteren wurden beispielhaft Gründächer in das Modell integriert (Abb. 8, Maßnahme C und D). Als Grundlage dafür diente das digitale Gründachkataster NRW, welches das LANUV bereitstellt. Dieses beinhaltet u. a. Informationen darüber, ob eine Dachfläche potenziell für eine nachträgliche Dachbegrünung geeignet ist. Im Rahmen des Projektes wurde für zwei Substratschichtdecken eine Simulation durchgeführt. Für das Modell wurde ein Bemessungsregen von 47 mm/h (Euler Typ II, 100-jährliches Niederschlagsereignis der Dauerstufe 1 h) angesetzt. Somit war es möglich, zu analysieren, inwiefern eine extensive (10 cm) oder intensive (30 cm) Dachbegrünung die Abflussspitze hätte reduzieren können.

3.5 Modellbasierte Evaluation städtebaulicher Maßnahmen

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse erfolgte anschließend die Wirksamkeitsanalyse der vorgestellten Maßnahmen auf Grund-

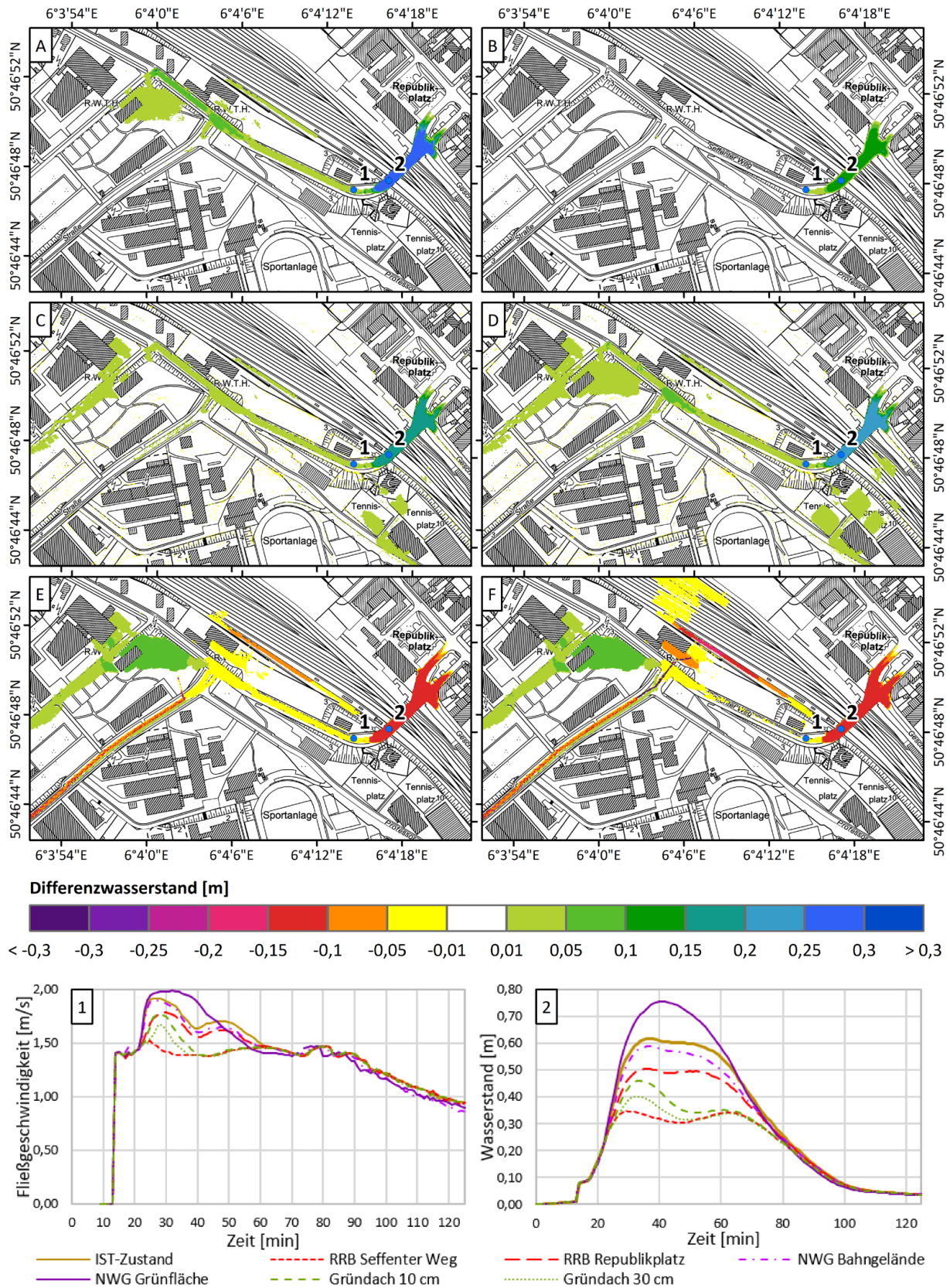


Abbildung 10

Wasserstandsdifferenzen (PLAN – IST) für die Maßnahmen: (A) Regenrückhaltebecken (NRB) Seffenter Weg, (B) NRB Republikplatz, (C) Gründach 10 cm, (D) Gründach 30 cm, (E) Notwasserweg (NWG) Grünfläche, (F) NWG Bahngelände; Messungen an den Beobachtungspunkten 1 und 2 (Datenquelle: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2023 b).

Water level differences for the measures: (A) Retention basin Seffenter Weg, (B) Retention basin Republikplatz, (C) Green roof 10 cm, (D) Green roof 30 cm, (E) Flood drainage path Grünfläche, (F) Flood drainage path Bahngelände; measurements at observation points 1 and 2.

lage des gekoppelten Modells. Zwecks Vergleichbarkeit wurde hierzu ein Modellregen $T_N = 100$ a, Typ Euler II mit einer Niederschlagsintensität von 47 mm/h angesetzt. Dies entspricht gemäß KOSTRA-DWD einem 100-jährlichen Starkregenereignis für die Stadt Aachen und zeigt ähnliche eine ähnliche Intensität wie die des Ereignisses am 29. Mai 2018. Abbildung 10 stellt die Ergebnisse der verschiedenen Maßnahmen in Form von Wasserstandsdifferenzen (PLAN-IST) gegenüber. Zur Ermittlung der Differenzen wurden die Wasserstände des Referenzereignisses (Modell ohne Maßnahmen) von den Wasserständen der jeweiligen Maßnahmen (Kap. 2.6) subtrahiert. Zudem wurden ein numerischer Wasserstandsmesser (Abb. 10, Punkt 1 und Punkt 2) in der Unterführung sowie ein Fließgeschwindigkeitsmesser kurz vor der Unterführung implementiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Maßnahme RRB Seffenter Weg (Abb. 10, Maßnahme A) die größte Wirksamkeit aufweist, indem sie größere Überflutungsflächen im umliegenden Bereich reduziert und insbesondere die Überflutungstiefe in der Unterführung um bis zu 30 cm mindert. Neben einer Reduktion der Fließgeschwindigkeit wirkt sich Maßnahme A ebenfalls reduzierend auf die Überflutungsflächen für die umliegenden Bereiche aus. Im Vergleich führte das RRB Republikplatz (Maßnahme B) lediglich zu einer Reduktion der Überflutungsfläche und -tiefe in der Unterführung und hat aufgrund der topografischen Lage keinen größeren Effekt auf andere Überflutungsbereiche. Ebenfalls als wirksam erwiesen sich die Maßnahmen der Gründächer (Abb. 10, Maßnahme C und D). Nicht bzw. nachteilig wirkte sich die Maßnahme zum oberflächlichen Abfluss "Notwasserweg Bahngelände" (Abb. 10, Maßnahme F) aus. Die Vertiefung im numerischen Modell bewirkte, dass sich das Wasser von angrenzenden Flächen akkumulierte und damit die Überflutungstiefen anstiegen.

3.6 Multi-, Inter- und Transdisziplinarität in Living Labs

Living Labs stellen eine Form von Reallaboren dar, die sich stärker an technologischen, sog. "Open Innovation"-Ansätzen (HOSSAIN et al., 2019; CHESBROUGH, 2003) orientieren. Das urbane Starkregenereignis vom 29. Mai 2018 in Aachen bildet den gemeinsamen Anwendungskontext des Konsortiums und wurde anhand des Westbahnhof analysiert. Die Forschenden weisen einen lokalen Bezug auf und haben das Ereignis zum Teil miterlebt und in situ-Dokumentation durchgeführt. Der konkrete Bezug schärft den Forschungsfokus, erlaubt den Test bestehender disziplinärer Forschungsmethoden, stärkt die Forschungsmotivation und strukturiert den Forschungsprozess. Die Lokalität des untersuchten Ereignisses ist sowohl charakteristisch für Living Labs als Forschungsdesign als auch erforderlich für die adäquate Modellierung von Starkregenereignissen (ASSMANN, 2023). Zuvor getrennte Analysen werden anhand des lokalen Ereignisses durchgeführt (multidisziplinär) und anschließend in einer Modellierung (interdisziplinär) zusammengeführt. Zwei Aspekte sind für die Konzeption zukünftiger Living Labs relevant:

PRODEMANN et al. (2017) beschreiben, dass sich technologische Lösungen kombiniert mit sozialen Praktiken (ergo: soziotechnische Lösungen) im Zentrum von extremwetterbedingten Katastrophen und der mittel- bis langfristigen Adaption an ebendiese befinden, weshalb die wissenschaftliche Community immer öfter auf interdisziplinäre Ansätze zurückgreift. Von entscheidender Bedeutung für die Zusammenführung von multi- in interdisziplinäre

linäre Forschungssequenzen war es, die Daten in eine Modellierung zu überführen: Die meteorologische Analyse rekonstruiert das kleinräumige Starkregenereignis über Aachen. Die Radarklimatologie (Kap. 2.2) lieferte die Niederschlagsinformationen, die anschließend in ein bidirektional-gekoppeltes Oberflächenabfluss- und Kanalnetzmodell einfließen, zu einer Hindcast- sowie Sensitivitäts-Analyse beitrugen und mit Dokumentationsdaten validiert wurden (Kap. 3.2). Als Lösungsansätze wurden dann verschiedene städtebauliche Maßnahmen entlang lokaler Gegebenheiten eruiert (RRBs, Dachbegrünung, Notwasserwege, s. Abb. 9, 10) und in einer Wirksamkeitsanalyse integriert. Die Modellierung wird somit zu einem entscheidenden technologischen "intermediary object" (VINK & PÉREZ-MARTELO, 2023), dass es ermöglicht, Wissen zwischen den Disziplinen zirkulieren zu lassen. Die Relevanz vermittelnder Objekte in der Forschung war in den "Science and Technology Studies" schon früh Thema (LATOUR, 1986). Ihre Bedeutung für die Koordination und Integration speziell interdisziplinärer Ansätze bleibt jedoch eine relevante Forschungsfrage (VINK & PÉREZ-MARTELO, 2023). Neben seinem integrativen Moment wirkt der Fokus auf eine Modellierung gleichzeitig exkludierend: Soziale Prozesse, in denen über den potenziellen Einsatz von Starkregenvorsorge-Technologien entschieden wird, die für die Diffusion der Innovation unerlässlich sind, und, anhand derer sich die Bedingungen der Übernahme individueller Eigenverantwortung erklären ließe, folgen nicht notwendigerweise identifizierbaren Regeln und Mustern, weshalb sie nur bedingt modellierbar sind (AKRICH et al., 2002; OSTROM, 2009).

Der Schwerpunkt des durchgeführten Living Labs lag auf der Entwicklung einer interdisziplinär entwickelten Modellierung, die – anders als bestehende Hochwassergefahren- und Risikokarten – urbane Starkregenereignisse in den Blick nimmt. Da städtebauliche Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Reduktion des Starkregenrisikos eruiert werden können, bietet das Modell eine konstruktive Erweiterung bestehender Starkregengefahrenkarten und des kommunalen Starkregenrisikomanagements. Aus innovationssoziologischer Perspektive folgt auf die im Living Lab durchgeführte Phase der Invention zunächst die Phase der Entwicklung, in der das Verfahren in einem Prototyp zusammengeführt und sich in verschiedenen Praxistests bewähren muss. In der dritten Phase der Innovation wäre es anschließend das Ziel, nach einer geeigneten Systemarchitektur zu suchen und die technologische Invention durch die Integration verschiedener Akteure in eine sozio-technische Innovation zu überführen (HUGHES, 1989; LAUX, 2021).

Für die Konzeption des Living Labs ist außerdem die Frage nach der Temporalität entscheidend: In der Projektlaufzeit konnte zunächst ein Modell zur interdisziplinären Analyse von lokalen Starkregenereignissen erarbeitet werden. Multi- und Interdisziplinarität waren im Forschungsprozess weniger abgrenzbare methodologische Qualitätskriterien als vielmehr Phasen im Forschungs- und Innovationsprozess, in der disziplinär entwickelte State-of-the-Art-Ansätze multidisziplinär auf ein konkretes Ereignis angewendet und interdisziplinär in einer Modellierung zusammengeführt wurden. Für eine weiterführende transdisziplinäre Phase des Projekts wäre es denkbar, die simulierten Maßnahmen mit Akteuren eines kommunalen Starkregenrisikomanagements zu diskutieren und zu bewerten sowie ggf. die Modellierung um zusätzliche Anpassungen und Maßnahmen zu erweitern. Außerdem könnten Anwohner eingebunden

werden, um neben der kommunalen Fürsorgepflicht auch die Eigenverantwortung zu stärken (ASSMANN, 2023). Schließlich ließe sich das Modell lokal erweitern, sofern dabei seine Granularität gewährleistet bleibt. Bei der Konzeption von Living Labs und Reallaboren gilt es daher zu beachten, dass Multi-, Inter- und Transdisziplinarität nicht nur als methodologische Qualitätskriterien aufgeführt, sondern Schritt für Schritt vollzogen und somit auch zeitlich berücksichtigt werden müssen.

4 Diskussion und Fazit

Vergangene Starkregenereignisse verdeutlichen, dass sich sozio-ökonomischen Risiken nicht auf flussnahe Gebiete beschränken. Um die Gefahren und Risiken für die Bevölkerung sowie die Folgen der Extremwetterereignisse möglichst gering zu halten und darüber hinaus Betroffene zu einer schnellen Reaktion zu befähigen, ist ein entsprechendes Risikobewusstsein unerlässlich. Orts- und ereignisspezifische Analysen, wie sie in dem vorliegenden Beitrag durchgeführt wurden, erlauben eine interdisziplinäre, holistische Betrachtung des Starkregenereignisses, da sie nicht nur das Starkregenereignis und die entstehende Überflutung detailliert beschreiben, sondern auch infrastrukturelle Maßnahmen implizieren und evaluieren.

Die durchgeführte meteorologische Analyse beinhaltete den Vergleich der Radar- und Niederschlagsschreiberdaten des Starkregenereignisses am 29. Mai 2018 in Aachen. Die Gegenüberstellung der RADKLIM-Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und davon unabhängiger Bodenstationsdaten in Aachen zeigte eine teils hohe Abweichung der registrierten Niederschlagsmengen, insbesondere bei hohen Niederschlagsintensitäten. Der zeitliche Ablauf hingegen stellt sich in beiden Datensätzen ähnlich dar. Grund für diese Unterschiede könnte sein, dass lediglich zwei DWD-Niederschlagsstationen im Aachener Gebiet für die Aneicherung der Niederschlagsradarprognosen benutzt werden. Insgesamt lassen die Ergebnisse den Rückschluss zu, dass weiterhin enormer Forschungsbedarf in der Verbesserung der radarbasierten Vorhersagen (Komposit) notwendig ist.

Die im Anschluss durchgeführte hydraulische Überflutungsanalyse wurde auf Grundlage des hydrodynamisch gekoppelten Modells durchgeführt. Die Kopplung des 1D-Kanalnetzmodells mit dem 2D-Oberflächenabflussmodell ermöglichte sowohl die effektive Nachrechnung (Hindcast) des Ereignisses am 29. Mai 2018 als auch eine Sensitivitätsanalyse der Entwässerungssysteme. Simulierte Überflutungen konnten auf Grundlage einer Fotoaufnahme validiert werden und zeigen hohe Übereinstimmungen zu den in-situ beobachteten Überflutungen im Bereich des Aachener Westbahnhofes. Für eine umfängliche Validierung wären zeitlich versetzte Aufnahmen des Standorts oder kontinuierliche Wasserstandsmessungen notwendig. Die Sensitivitätsanalyse zeigte, dass es ab Starkregenereignissen mit 20-jährlicher Auftrittswahrscheinlichkeit (TN 20 a) zu Überflutungen im Bereich des Aachener Westbahnhofes kommen kann. Bei der Schaffung von zusätzlichem Retentionsraum im Kanalnetz am konkreten Anwendungsbeispiel des Aachener Westbahnhofes ist die gezielte Standortauswahl teils wichtiger als die geschaffene Volumengröße.

Aus städtebaulicher Perspektive wurden verschiedene Maßnahmen in die Simulation integriert und evaluiert. Als besonders wirksam erwiesen sich zwei Maßnahmen: Einerseits die

Schaffung eines Retentionsraums am Seffenter Weg und andererseits das Anlegen von Gründächern, die ab einer Substratschichtdicke von 10 cm das Überflutungsrisiko im Bereich des Aachener Westbahnhofes reduzieren können. Aus numerischer Perspektive stellte sich heraus, dass Maßnahmen zur gezielten Überflutungslenkung nur unzureichend im hydro-numerischen Modell abgebildet werden konnten. So kann die Simulation beispielsweise Absenkungen im Gelände oder auch Anpassungen des Straßenprofils aufgrund der horizontalen und vertikalen Auflösung nicht effektiv abbilden. In der Folge schränkte dies die Evaluation dieser Maßnahmen innerhalb dieser Studie ein. Des Weiteren zeigte sich, dass der Aufwand für die Erstellung eines drohnenbasierten DGM mittels Photogrammetrie und einer anschließenden Auswertung der Luftbilder einen sehr hohen Aufwand im Verhältnis zum gewonnen Erkenntnisgewinn bedeutet, wenn 1D-Kanalnetzmodelle mit gekoppelten 2D-Oberflächenabflussmodellen verwendet werden. Der im Beitrag dargestellte Ansatz der modelltechnischen Abbildung städtebaulicher Maßnahmen mittels hydraulischer Simulationen inkl. Plan-Ist-Vergleich zeigt gute Anwendungsmöglichkeiten auf, um die Effektivität der Maßnahmen zu visualisieren und zu bewerten. Ebenso kann er für eine wirksame Kommunikation mit der Öffentlichkeit gut genutzt werden.

Als Living Lab befand sich das Projekt in einer frühen Phase eines soziotechnischen Innovationsprozesses, in der sich die interdisziplinäre Zusammenführung der Forschungsperspektiven in einem Modell als zielführend erwies. Multi-, Inter- und Transdisziplinarität wurden nicht als abgrenzbare Qualitätskriterien, sondern als Phasen im Forschungsprozess herausgestellt. Zukünftige und anschließende Living Labs ließen sich durch räumliche Variationen erweitern sowie um transdisziplinäre Elemente, in welchen das entwickelte Verfahren mit zusätzlichen, nicht-wissenschaftlichen Interessengruppen auf seine Eignung für die kommunale Starkregenvorsorge und Stadtplanung geprüft werden könnte.

Conclusions

Past heavy rainfall events demonstrate that socio-economic risks are not limited to areas close to rivers. To minimize the hazards and risks for the population as well as the consequences of extreme weather events, and to enable those affected to react quickly, appropriate risk awareness is essential. Location- and event-specific analyses, such as those carried out in the present paper, allow an interdisciplinary, holistic view of a heavy rain event, which not only describes the heavy rain event and the resulting flooding in detail but also implies and evaluates infrastructural measures.

The meteorological analysis performed included the comparison of radar and rain gauge data of the heavy rain event on May 29th, 2018, in Aachen. The comparison of the RADKLIM data of the DWD and independent ground station data in Aachen showed a partly high deviation of the registered precipitation amounts, especially at high precipitation intensities. The temporal sequence, however, is similar in both data sets. The reason for these differences could be that only two DWD precipitation stations in the Aachen area are used for the calibration of the precipitation radar forecasts. Overall, the results lead to the conclusion that there is still an enormous need for research in the improvement of radar-based predictions (composite).

The hydraulic flooding analysis carried out was based on the hydrodynamically coupled model. The coupling of the 1D sewer network model with the 2D surface runoff model enabled the effective recalculation (hindcast) of the event on May 29th, 2018 as well as a sensitivity analysis of the drainage systems. Simulated flooding showed very good matches to in-situ observed flooding in the area of Aachen Westbahnhof. The sensitivity analysis showed that flooding in the area of Aachen Westbahnhof can occur from heavy rainfall events with a twenty-year probability of occurrence. When creating additional retention space in the sewer network, site selection is more important than the volume of the newly created retention space.

From an urban planning perspective, various measures were integrated into the simulation and evaluated. Two measures were identified as particularly effective: On the one hand, the creation of a retention area at Seffenter Weg and, on the other hand, the installation of green roofs, which can reduce the risk of flooding in the area of Aachen Westbahnhof from a substrate layer thickness of 10 cm. From a numerical perspective, it turned out that measures for targeted flood control could only be represented inadequately in the hydro-numerical model. For example, subsidence in the terrain or adjustments of the road profile cannot be effectively represented in the simulation due to the horizontal and vertical resolution. This effect limited the evaluation of these measures within this study. Furthermore, it became apparent that the effort for the creation of a drone-based DTM and the subsequent evaluation of the aerial images is disproportionate to the knowledge gained when they are used in 1D channel network models with coupled 2D surface runoff models. The possibilities presented in the article for modeling urban planning measures, including their comparison with differential maps, is a target-oriented method for evaluating the effectiveness of the measures.

Designed as a living lab, the project was in an early phase of a socio-technical innovation process in which the interdisciplinary combination of research perspectives in one modelling approach proved to be beneficial. Multi-, inter- and transdisciplinarity were not emphasized as separable quality criteria, but rather as phases in the research process. Subsequent living labs could be expanded to include spatial variations and transdisciplinary elements, in which the developed procedure would be tested for its suitability for municipal heavy rainfall prevention and urban planning with additional, non-scientific interest groups.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Für die Forschung wurden Daten akquiriert und verwendet, die lizenz- und datenschutzrechtlich geschützt sind. Somit ist die Weitergabe der Daten eingeschränkt und in Teilen untersagt. Die uneingeschränkte Weitergabe sowie Veröffentlichung der Daten sind nicht möglich.

Danksagung

Die Grundlage für den Beitrag bildete die Zusammenarbeit verschiedener Lehrstühle und Institute der RWTH Aachen University. Gefördert wurde die Zusammenarbeit durch den ERS Seed Fund der RWTH Aachen University, dessen Ziel es ist, neue interdisziplinäre Forschungsfelder zu identifizieren. Die Autoren und Autorinnen bedanken sich für die Förderung. Ein weiterer Dank gilt dem Wasserverband Eifel-Rur und dem Landesamt für

Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen für die Bereitstellung einzelner Niederschlagsdaten.

Anschriften der Verfasser

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Dr.-Ing. Julian Hofmann
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
der RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 17, 52074 Aachen
schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de
hofmann@iww.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Wintgens
Peter Schleiffer, M. Sc.
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Wassergüterwirtschaft und Institut für Siedlungswasserwirtschaft
der RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
wintgens@isa.rwth-aachen.de
schleiffer@isa.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr. Michael Leuchner
Dr.-Ing. Gunnar Ketzler
Niels Döscher, M. Sc.
Lehr- und Forschungsgebiet für
Physische Geographie und Klimatologie
der RWTH Aachen University
Wüllnerstraße 5b, 52062 Aachen
michael.leuchner@geo.rwth-aachen.de
gunnar.ketzler@geo.rwth-aachen.de
niels.doescher@geo.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Andreas Witte
Loisa Welfers, M. Sc.
Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr
der RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
witte@isb.rwth-aachen.de
loisa.welfers@eschweiler.de

Univ.-Prof. Dr. Roger Häußling
Tim Franke, M. A.
Lehrstuhl für Technik- und Organisationssoziologie
der RWTH Aachen University
Eilfschornsteinstraße 7, 52062 Aachen
rhaeussling@soziologie.rwth-aachen.de
tfranke@soziologie.rwth-aachen.de

Literaturverzeichnis

- AKRICH, M., M. CALLON & B. LATOUR (2002): The key to success in innovation (Part I+ II). – *International Journal of Innovation Management*, 6 (2), 187-225.
- ASSMANN, A. (2023): Starkregen und Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten – Auswirkungen. – PORTH, M., SCHÜTTRUMPF, H. & OSTERMANN, U. (Hrsg.): *Wasser, Energie und Umwelt. Aktuelle Beiträge aus der Zeitschrift Wasser und Abfall III*. Springer Vieweg, 123-131.
- BBK BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (2015): *Die unterschätzten Risiken "Starkregen" und "Sturzfluten". Ein Handbuch für Bürger und Kommunen*. Online verfügbar unter: <https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/ExterneLinks/DE/Download/starkregen-publikation-kurzlink.html>.

- BENDEN, J. (2014): Möglichkeiten und Grenzen einer Mitbenutzung von Verkehrsflächen zum Überflutungsschutz bei Starkregenereignissen. Berichte des Instituts für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen University. Bericht 57.
- BEECROFT, R., H. TRENKS, R. RHODIUS, C. BENIGHAUS & O. PARODI (2018): Reallabore als Rahmen transformativer und transdisziplinärer Forschung. – DEFILA, R. & DI GIULO, A. (Hrsg.): Transdisziplinär und transformativ forschen. Eine Methodensammlung. Springer VS, 75-101.
- BMW, BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (2019): Freiräume für Innovationen. Das Handbuch für Reallabore. Online verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/handbuch-fuer-reallabore.pdf?__blob=publicationFile; zuletzt geprüft am: 07.02.2024.
- BERGMANN, M., N. SCHÄPKE, O. MARG, F. STELZER, J. LANG, M. BOSSERT et al. (2021): Transdisciplinary sustainability research in real-world labs: Success factors and methods for change. – Sustainability Science, 16, 541-564. <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00886-8>.
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2021): Digitales Geländemodell – Gitterweite 1 m. Online verfügbar unter: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/hoeihenmodelle/digitale-gelaendemodelle/digitales-gelaendemodell>; zuletzt geprüft am: 07.07.2023.
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2023 a): Digitale Topographische Karte 1 : 10 000 NRW. Online verfügbar unter: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/topographische-karten/aktuelle-topographische-karten/digitale>; zuletzt geprüft am: 30.06.2023.
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2023 b): Amtliche Basiskarte (Schwarz-Weiß). Online verfügbar unter: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/liegenschaftskataster/liegenschaftskataster-zentraler-1>; zuletzt geprüft am: 07.07.2023.
- BLUEGREENSTREETS (Hrsg.) (2020): BlueGreenStreets als multicodierte Strategie zur Klimafolgenanpassung – Wissenstand 2020. Statusbericht im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme "Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft" (RES:Z).
- BKG, BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2022): WMS TopPlusOpen. Online verfügbar unter: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/webdienste/topplus-produkte/wms-topplusopen-wms-topplus-open.html>; zuletzt geprüft am: 07.07.2023.
- BBK, BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (2023): Ergebnisse der Umfrage zum bundesweiten Warntag 2022. Online verfügbar unter: https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Warnung-Vorsorge/Umfrageergebnisse-BWT-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=6; zuletzt geprüft am: 07.08.2023.
- BRUNE, M., S. BENDER & M. GROTH (2017): Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Report 30. Climate Service Center Germany, Hamburg.
- BUGG, BUNDESVERBAND FÜR GEBÄUDEGRÜN E.V. (2022): BuGG-Fachinformation "Positive Wirkungen von Gebäudebegrünungen (Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung)". Online verfügbar unter: https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/Dachbegruenung/BuGG_Fachinfo_Positive_Wirkungen_Positionspapier_20-04-2022.pdf; zuletzt geprüft am: 09.01.2023.
- BULKELEY, H., L. COENEN, N. FRANZESKAKI, C. HARTMANN, A. KRONSELL, L. MAI, S. MARVIN, K. MCCORMICK, F.V. STEENBERGEN & Y.V. PALGAN (2016): Urban Living Labs: governing urban sustainability transitions. – Current Opinion in Environmental Sustainability, 22, 13-17. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.02.003>
- CHESBROUGH, H. (2003): Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology. Harvard Business.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (2018a): Datensatzbeschreibung. Aktuelle stündliche RADOLAN-Raster der Niederschlagshöhe (GIS-lesbar). Online verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/hourly/radolan/recent/asc/BESCHREIBUNG_gridsgermany-hourly-radolan-recent-asc_de.pdf; zuletzt geprüft am: 07.04.2022.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (2018b): RADKLIM – Erstellung einer radargestützten hochaufgelösten Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderungen des Extremverhaltens von Niederschlag. Beschreibung des Kompositformats und der verschiedenen Reprozessierungsläufe – Version 1.0. Online verfügbar unter: http://141.38.2.22/climate_environment/GPCC/radarklimatologie/Dokumente/RADKLIM-Kompositformat_1.0.pdf; zuletzt geprüft am: 07.04.2022.
- EC, EUROPEAN COMMISSION & WGF, WATERGROUP FLOODS (2016): Pluvial Flooding: An EU Overview. Hg. v. European Commission (EC) and Water Group Floods (WGF). Berlin.
- EEA, EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2016): European Digital Elevation Model (EU-DEM), version 1.1. Online verfügbar unter: <http://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products/eu-dem/eu-dem-v1.1/view>; zuletzt geprüft am: 30.06.2023.
- FRANKE, T. & E. KAIP (2021): ERS Rainwater Living Lab Aachen – Regen als Risiko und die "Crisis Informatics". – HÄUßLING, R. & LEMM, J. (Hrsg.): Reallabore als Gestaltungsräume für soziotechnische Innovationen. Schriftenreihe empirische Studien zur angewandten Technik- und Organisationssoziologie, Häußling, R. (Hrsg.), Shaker, 128-146.
- FROMMANN, R., J.T. KLEIN, C. MITCHAM, & N. TUANA (2007): Interdisciplinary Studies in science, technology and society: "New Directions: Science, Humanities, Policy". – Technology in Society, 29, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2007.01.002>.
- FRP, FLOOD RESILIENCE PORTAL (2022): PERC Ereignisanalyse Hochwasser "Bernd". Zurich Insurance Group. Online verfügbar unter: https://www.drk.de/fileadmin/user_upload/Forschung/aktuelle_Projekte/HW/IFRC_PERC_Ereignisanalyse_Bernd.pdf zuletzt geprüft am: 06.01.2023.
- GDV, GESAMTVERBAND DER VERSICHERER (2022): Naturgefahrenbilanz 2022: Mit 4,3 Milliarden Euro ein durchschnittliches Schadenjahr für Versicherer. Online verfügbar unter: <https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/naturgefahrenbilanz-2022-mit-4-3-milliarden-euro-ein-durchschnittliches-schadenjahr-fuer-versicherer-116996>; zuletzt geprüft am: 29.06.2023.
- GEELS, F.W. (2019): Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the Multi-Level-Perspective. – Current Opinion in Environmental Sustainability, 39, 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.06.009>.
- HÄUßLING, R. (2021): Reallabor als soziologische Forschungsmethodik – eine Einordnung. – Ders. & LEMM, J. (Hrsg.): Reallabore als Gestaltungsräume für soziotechnische Innovationen. Schriftenreihe empirische Studien zur angewandten Technik- und Organisationssoziologie, Häußling, R. (Hrsg.), Shaker, 13-46.
- HUGHES, T.P. (1989): The evolution of large technological systems. – BIJKER, W.E., HUGHES, T. P., PINCH, T. (Hrsg.): The social construction of technological systems: New directions in the sociology and history of technology. MIT Press, 51-82.
- HOSSAIN, M., S. LEMINEN & M. WESTERLUND (2019): A systematic review of living lab literature. – Journal of Cleaner Production, 213, 976 – 988. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.257>.
- KOFLER, I. (2023): Beyond Disciplinary Constraints: Designing Transdisciplinary Research and Collaboration in Real-World Laboratories. – Societies, 13(9): 205. <https://doi.org/10.3390/soc13090205>.

- LANUV, LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2022): Methodik – Papier zum Handlungsfeld Planung und Bau: Gründachkataster NRW. Online verfügbar unter: https://www.klimaatlas.nrw.de/sites/default/files/2022-11/Methodik_Planung_Bau_GruendachkatasterNRW_0.pdf; zuletzt geprüft am: 09.01.2023.
- LATOUR, B. (1987): *Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers through Society*. Harvard University Press.
- LAUX, H. (2021): Innovation als Prozess der Netzbildung. – BLÄTTEL-MINK, B., SCHULZ-SCHAEFFER, I. & WINDELER, A. (Hrsg.): *Handbuch Innovationsforschung*. Springer VS, 163-181.
- LAWA (2017): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. LAWA-Kleingruppe "Starkregen", Darmstadt.
- LEUCHNER, M. & G. KETZLER (2019): Monatsberichte 2018; <https://www.klimageo.rwth-aachen.de/cms/klimageo/Das-Lehr-und-Forschungsgebiet/Ausstattung/Wetterstationen/Klimamessstation-Aachen-Hoern/~shdi/Berichte/> zuletzt geprüft am: 21.08.2023.
- MALITZ G. & H. ERTLE (2015): KOSTRA-DWD-2010. Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010). Abschlussbericht. Deutscher Wetterdienst (DWD).
- OSTROM, E. (2009): A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. – *Science*, 325, 419-422. DOI:10.1126/science.1172133.
- REGIONETZ (2020): Kanalnetzdaten des Untersuchungsgebiets Westbahnhof Aachen. Persönliche Mitteilung an Julian Hofmann.
- SANDVIK, B. (2008): TM_WORLD_BORDERS-0.1. Online verfügbar unter: http://thematicmapping.org/downloads/world_borders.php; zuletzt geprüft am: 22.03.2021.
- STADT AACHEN, FACHBEREICH GEOINFORMATION UND BODENORDNUNG (2022): Stadtbezirke Stadt Aachen als Shape in ETRS89/UTM. Online verfügbar unter: <https://offenedaten.aachen.de/dataset/stadtbezirksgrenzen/resource/dadb47c2-e367-4c58-afd5-b1eca21618e3>; zuletzt geprüft am: 07.04.2022.
- SCHNEIDEWIND, U. & H. SCHECK (2013): Die Stadt als "Reallabor" für Systeminnovation. – RÜCKERT-JOHN, J. (Hrsg.): *Soziale Innovation und Nachhaltigkeit*. Springer VS, 229-249.
- UBA, UMWELTBUNDESAMT (2022): Forschungskonferenz Klimaresiliente Schwammstadt. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/forschungskonferenz-klimaresiliente-schwammstadt>; zuletzt geprüft am: 16.06.2023.
- UBA, UMWELTBUNDESAMT (2019): Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung – Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs.
- VINCK, D. & C. PÉREZ-MARTELO (2023): Circulating Knowledge through Intermediary Objects in Scientific Cooperative Networks. – KEIM, W. & MEDINA, L. R. (Edt.): *Routledge Handbook of Academic Knowledge Circulation*. Routledge International Handbooks, 251-263.
- WVER, WASSERVERBAND EIFEL RUR (2020): Niederschlagsdaten der Stationen Burtscheid, Heizkraftwerk, Soers, Eilendorf und Horbach. Persönliche Mitteilung an Julian Hofmann.
- WINTERRATH, T., C. BRENDL, M. HAFER, T. JUNGHÄNEL, A. KLAMETH, K. LENGFELD, E. WALAWENDER, E. WEIGL & A. BECKER (2018): Radar climatology (RADKLIM) version 2017.002. Gridded precipitation data for Germany (quasi gauge-adjusted five-minute precipitation rate). Online verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/help/landing_pages/doi_landingpage_RADKLIM_RW_V2017.002-en.html; zuletzt geprüft am: 07.04.2022.
- WINTERRATH, T., C. BRENDL, M. HAFER, T. JUNGHÄNEL, E. WALAWENDER, E. WEIGL & A. BECKER (2017): Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.
- WINTERRATH, T. (2020): RADVOR (Radarbasierte Niederschlagsvorhersage im Kurzzeitzeitraum). Ein Verfahren aus dem Projekt "RADVOR-OP" der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser. Herausgegeben vom Deutschen Wetterdienst (DWD).