

# Der städtische ÖPNV im Klimawandel – Fallbeispiel: Rostock und der Einfluss von Starkregenereignissen

REPORT 37



**Titelbild:** © Foto: P. Seipold / GERICS (bearbeitet)

**Zitierhinweis:** Bender, S., Groth, M., Seipold, P., Wübbelmann, T. & Gehrke, J. (2024): Der städtische ÖPNV im Klimawandel – Fallbeispiel: Rostock und der Einfluss von Starkregenereignissen – Report 37, Climate Service Center Germany, Hamburg.

**Erscheinungsdatum:** Oktober 2024

Dieser Report ist auch online unter [www.climate-service-center.de](http://www.climate-service-center.de) erhältlich.

# **Der städtische ÖPNV im Klimawandel – Fallbeispiel: Rostock und der Einfluss von Starkregenereignissen**

Autoren: Steffen Bender, Markus Groth, Peer Seipold, Thea Wübbelmann und  
Janna Gehrke

**Oktober 2024**



## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	3
1.1. Der Verkehrssektor im Klimawandel .....	3
1.2. Das Untersuchungsgebiet .....	5
1.3. Klimatische Veränderungen .....	6
1.4. Die unternehmensspezifische Vorgehensweise .....	6
2. Anwendung des GERICS-Unternehmensbaukastens .....	8
2.1. Kooperation GERICS - RSAG .....	8
2.2. Sensibilisierung und Informationsvermittlung .....	8
2.3. Änderungen der regionalklimatischen Verhältnisse .....	11
2.4. Historische, wetterbedingte Störungen auf den RSAG-Betrieb .....	14
2.5. Feedback zum Workshop .....	14
2.6. Weiterführende Analyse der Ergebnisse .....	15
2.7. Fazit zur Vorgehensweise .....	16
3. Anwendung des GERICS-Stadtbaukastens .....	18
3.1. Die Modulgruppe „Wasser in der Stadt“ .....	18
3.2. Der Modellansatz mit HEC-RAS .....	19
3.2.1. Modellierung mit HEC-RAS .....	19
3.2.2. HEC-RAS-Ergebnisse .....	21
3.3. Der Modellansatz mit Tygron Engine .....	21
3.3.1. Modellierung mit Tygron Engine .....	21
3.3.2. Tygron Engine-Ergebnisse .....	23
3.4. Modellvergleich Tygron Engine – HEC-RAS .....	25
3.4.1. Ziel und Vorgehensweise .....	25
3.4.2. Ergebnisvergleich Tygron Engine – HEC-RAS .....	26
3.5. Der Modellansatz mit LEAFlood .....	28
3.5.1. Modellierung mit LEAFlood .....	28
3.5.2. LEAFlood-Ergebnisse .....	30
3.5.3. LEAFlood-Fazit .....	32
3.6. Modellergebnisse und Schlussfolgerungen .....	32
4. Anpassung an Überflutungen aufgrund von Starkregen .....	34
4.1. Anforderungen an die Anpassung im Verkehrssektor .....	34
4.2. Verkehrsinfrastruktur als Teil der Stadt .....	36
4.3. Nature Based Solutions (NBS) .....	37
4.4. (Früh-)Warnsysteme als Anpassungsunterstützungsmaßnahme .....	39
4.4.1. Allgemeines .....	39
4.4.2. Machbarkeitsstudie für den Standort Holbeinplatz .....	40
4.4.3. Risikokommunikation .....	44
5. Auf einen Blick .....	45
6. Literatur .....	46

## Abbildungsverzeichnis

Abb.1: HEC-RAS-Modellierung: Modellgrenzen und Ergebnis für den Ausschnitt „Holbeinplatz-Schwanenteichpark.....	20
Abb.2: Modellierung mit Tygron-Engine: Modellgrenzen, Modellteilgebiete und Ergebnis für den Ausschnitt „Holbeinplatz-Schwanenteichpark.....	22
Abb.3 Vergleich der Überflutungsergebnisse (T= 100 a, D= 1 h) berechnet mit MIKE-SHE (links) und Tygron Engine (rechts). Kartenausschnitt des Bereichs Rostock-Biestow.....	24
Abb.4: Modellierung mit Tygron Engine: Modellgrenzen und Ergebnis für den Ausschnitt „Holbeinplatz-Schwanenteichpark.....	25
Abb.5: Vergleich der Überflutungsergebnisse berechnet mit HEC-RAS (links) und Tygron Engine (rechts), Kartenausschnitt .....	26
Abb.6: Screenshot aus dem TAUW-Video zum Bericht „Das Abflussverhalten von Starkniederschlägen im Stadtgebiet Rostock mit der Software „Tygron“.....	28
Abb.7: Modellierung mit LEAFlood: Modellgrenzen.....	29
Abb.8: Modellierung mit LEAFlood: Änderung von Angebot und Nachfrage überflutungsregulierender Ökosystemleistungen im Bereich „Holbeinplatz-Schwanenteichpark.....	31
Abb.9: Anpassungsmaßnahmen in der Stadt – das grün-graue Kontinuum.....	38
Abb.10: Schematischer Aufbau eine Frühwarnsystem-Prototyps .....	40
Abb.11: Potenzieller Bereich für die sensorgesteuerte Wasserstandmessung im Umfeld der Haltestelle Holbeinplatz. ....	41
Abb.12: LoRaWAN®-Gateways (rot markiert) im Umfeld des Holbeinplatzes.....	42

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Auszug aus den Workshopergebnissen, ergänzt mit Angaben aus Felderer et al. (2022).....	10
Tab. 2: Zukunftsprojektionen ausgesuchter Kennwerte für Rostock und den Landkreis Rostock relativ zur Referenzperiode von 1971 – 2000. ....	12
Tab. 3: Klimatische Betroffenheiten einzelner Systemelemente des lokalen Verkehrssektors (Beispiele).....	16
Tab. 4: Zusammenfassender Überblick der in Rostock verwendeten hydrologischen Modelle.....	33

# 1. Einleitung

## 1.1. Der Verkehrssektor im Klimawandel

Eine funktionierende moderne Gesellschaft braucht eine sowohl leistungsfähige als auch resiliente Verkehrsinfrastruktur, die nur wenig Treibhausgasemissionen (THG) verursacht. Aktuell ist der Verkehrssektor immer noch sehr abhängig von fossilen Brennstoffen und damit ein Hauptverursacher von Kohlendioxid, Ozon, Stickoxiden und Feinstaub (Sims et al. 2014). In Deutschland entfallen etwa 20% der THG-Emissionen auf den Verkehrssektor (UBA 2021), wovon der überwiegende Teil (rund 95%) vom motorisierten Straßenverkehr verursacht wird (Flämig et al. 2023).

Durch die Anforderungen politischer und rechtlicher Rahmenbedingungen werden Bemühungen zur Minderung von THG-Emissionen auch bei Verkehrsbetrieben immer wichtiger (Europäische Kommission 2020). Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (2.Änderung) (Deutscher Bundestag 2023a, 2023b) wird festgelegt, dass die Summe aller THG-Emissionen in Deutschland (im Vergleich zu 1990) bis im Jahr 2030 um 65% und bis 2040 um 88% reduziert werden müssen, um im Jahr 2045 netto klimaneutral sein zu können (BMDV 2023). Der Gesamt-THG-Ausstoß kann demnach reduziert werden, unabhängig davon, wo die THG entstehen. Allerdings wird auch der Verkehrssektor zukünftig einen angemessenen Beitrag leisten müssen.

In den letzten Jahren ist es dem Verkehrssektor nicht gelungen, den THG-Ausstoß deutlich zu reduzieren. Ein Grund ist das Fehlen politischer Maßnahmen, die ein notwendiges konsequentes und ambitioniertes Handeln vorantreiben (Martin et al. 2020). Erschwert wird die Suche nach Lösungen insbesondere dadurch, dass basierend auf einem systemischen Verständnis integrative Lösungsansätze benötigt werden, um die THG-Emissionen sinnvoll zu senken (Flämig et al. 2023). Ein wichtiger Baustein ist die Steigerung des umweltfreundlichen Personenverkehrs (Bus, Bahn, Fuß- und Fahrradverkehr) sowie eine bessere Vernetzung verschiedener Verkehrsmittel. Die bisherigen Fortschritte sind jedoch noch nicht ausreichend (UBA 2024).

Neben dem Erreichen der Klimaschutzziele muss auch die Funktionsfähigkeit der Verkehrssysteme gewährleistet werden, da die Infrastruktur zunehmend verwundbarer gegenüber den direkten und indirekten Folgen des Klimawandels wird, wenn sie nicht an die zukünftigen Klimaveränderungen angepasst wird (IPCC 2022a). Den übergreifenden politischen Rahmen liefert dazu das seit Juli 2024 in Kraft getretene Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KanG, BGBl. 2023 I Nr. 393). In ihm sind die Bundesländer – sowie mittelbar Gemeinden und Kreise – angehalten eigene vorsorgende Strategien mit entsprechenden Maßnahmenplänen, auf Basis regionale Daten, zu entwickeln und umzusetzen. Zusätzlich muss die Klimaanpassung bei allen zukünftigen Planungen und Entscheidungen berücksichtigt werden, wobei der jeweilige Fortschritt durch messbare Ziele verfolgbar sein soll.

Aktuell spielt das Thema Anpassung an die Folgen des Klimawandels bei Verkehrsbetrieben nur eine untergeordnete Rolle (Woetzel et al. 2020), obwohl schon heute Verkehrsunternehmen gezwungen sind, sich den Folgen zunehmender Wetterextreme zu stellen (Felderer et al 2022), da sie – insbesondere auch als Betreiber kritischer Infrastrukturen – weitreichende Folgen für die Planung, den Betrieb, die Instandhaltung, das Netz und die Funktionalität von Verkehrsmitteln haben können (Groth et al. 2023a; Wang et al. 2020). Aktuell sind alle Komponenten der Verkehrsinfrastruktur so konzipiert, dass sie einem

bestimmten Grad wetterbedingter Belastungen standhalten. Durch den Klimawandel verschieben sich jedoch die Anforderungen an die technischen Rahmenbedingungen (Klafka 2022), da sich die Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse erhöhen. Eine weitere Herausforderung liegt auch in der bisherigen Risikobetrachtung, diese basiert weitestgehend auf der Auswertung historischer Wetterbedingungen. Veränderungen durch den Klimawandel werden nur sehr selten und wenn, dann sehr vereinfacht, wie durch die Wahl eines „Klimafaktors“ betrachtet (z.B. Jupe et al. 2021), was insbesondere bei einem Vergleich von direkten Messwerten mit Klimaänderungsinformationen (die 30-jährigen Mittelwerten entsprechen) als problematisch anzusehen ist.

Ergänzend ist hervorzuheben, dass insbesondere auch Betreiber öffentlicher Nahverkehrsbetriebe durch das KAnG mit neuen regulatorischen Anforderungen der Klimawandelanpassung konfrontiert sind. So wird dort zum einen als Teil des für vorsorgende Klimaanpassungsstrategien zu adressierenden Clusters Infrastruktur auch das Handlungsfeld Verkehr und Verkehrsinfrastruktur adressiert. Zudem beinhaltet § 8 des KAnG ein Berücksichtigungsgebot, das die Träger öffentlicher Aufgaben verpflichtet, „bei ihren Planungen und Entscheidungen das Ziel der Klimaanpassung (...) fachübergreifend und integriert zu berücksichtigen“. Das umfasst die bereits eingetretenen und die zukünftig zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels.

Um sich an die Folgen des Klimawandels anzupassen, sollte ein Unternehmen somit folgende Fähigkeiten besitzen: a) das Bewusstsein über klimabezogene Risiken, b) das Wissen zur Identifizierung, Bewertung und Umsetzung reaktiver oder proaktiver Anpassungsmaßnahmen und c) die Motivation das Geschäftsmodell so zu gestalten, dass es klimaneutral und klimawandeltauglich ist (Berkhout et al. 2004).

Physische Schäden sind in vielen Fällen mit Beeinträchtigungen der Sicherheit, Effizienz und Pünktlichkeit des Verkehrs verbunden. Darüber hinaus können Verkehrsbehinderungen oder -ausfälle zu Lieferverzögerungen, Störungen der öffentlichen Sicherheit oder Beeinflussungen von Pendlerströmen führen. Als Folge zunehmender Belastungen kommen einzelne Systemkomponenten immer häufiger an ihre Grenzen, wobei vor allem nach großflächigen Ereignissen, die Kosten und die Arbeitszeit für die Instandsetzung und Beseitigung von Schäden ansteigen (Haas et al. 2015). Ohne weitere Anpassungsmaßnahmen – verbunden mit Kosten zur Aufrechterhaltung der Funktionalität – werden zukünftig Funktionsstörungen und Schäden zunehmen (IPCC 2022a). Dies birgt insbesondere beim Personenverkehr auch die Gefahr, dass das Vertrauen und die Zufriedenheit der Fahrgäste beeinträchtigt wird und dies Mobilitätsentscheidungen zulasten des Öffentlichen Personennahverkehrs nach sich ziehen kann, die vor dem Hintergrund der Notwendigkeit eines ambitionierteren Klimaschutzes kontraproduktiv sind.

Die regionalen Folgen des Klimawandels sind sehr vielfältig und zeigen sich auch in Deutschland. Die Verteilung der Temperaturen verschiebt sich hin zu höheren Werten (Friedrich et al. 2023, Pfeifer et al. 2021a). Dieser Anstieg und die häufigeren Hitzetage (Tage mit  $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) führen vermehrt zu Böschungsbränden (BMUV 2020) Gleisverformungen, hitzebedingte Verformung und Aufweichung von bitumen- und teerhaltigen Oberflächen (BMK 2022) – wie Fahrbahnen oder Straßenbahngleis-Einfassungen – sowie tendenziell zu einer stärkeren Abnutzung der Infrastruktur. Im Gegensatz dazu werden zukünftig Frosttage (Tage mit  $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ ) und Eistage (Tage mit  $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$ ) abnehmen, wodurch die Zahl der Verkehrsunterbrechungen durch Eis und Schnee zurückgehen wird. Die Anzahl und Intensität von Starkregenereignissen hat regional zugenommen (Kreienkamp et al. 2021, Papalexidou & Montanari 2019). Dieser Trend wird sich auch zukünftig fortsetzen (Ettrichrätz et al. 2023).



Durch überlastete oder blockierte Drainagesysteme fließt das Wasser fast vollständig auf der Oberfläche ab und sammelt sich in natürlichen oder bebauten Senken, wodurch Straßen, Schienen, Haltestellen, Unterführungen oder Bauwerke überschwemmt und auch unterspült werden können. In einigen Bereichen sind auch Hangrutschungen möglich. Weitere Gefährdungen gehen von Sturmereignissen aus, die für zum Teil großräumige Störungen sorgen können, da an hochragenden Anlagen, wie Oberleitungen und Verkehrsschildern, Schäden entstehen können. Zusätzlich können Gegenstände, Äste oder Bäume auf Fahrwege, Gebäude oder Bauwerke geweht werden, was die Sicherheit und Nutzbarkeit dieser Infrastruktur beeinträchtigen. Auch Blitzschläge während eines Gewitters können Signale oder andere Teile der elektronischen Infrastruktur schädigen beziehungsweise zu Ausfällen der Energieversorgung führen (Kahraman et al. 2022). Auch wenn entsprechende wetterbedingte Schäden aktuell nicht einheitlich erfasst werden, ist jedoch davon auszugehen, dass die Instandhaltungskosten ohne weitere Anpassungsmaßnahmen bis zur Mitte des Jahrhunderts deutlich zunehmen werden (Bednar-Friedl et al. 2015). Unter diesem Gesichtspunkt, der auch für andere Sektoren gilt, sollte auch die Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Verkehrssektor immer stärker ins Zentrum der Aufmerksamkeit und des Handelns rücken. Eine Sammlung von Anpassungsmaßnahmen für den Sektor Verkehr und Mobilität finden sich in Bender et al. (2022). Dort wird auch darauf hingewiesen, dass diese Maßnahmen immer auf die bestehenden Rahmenbedingungen und die systemischen Zusammenhänge auszurichten sind, um den größtmöglichen Nutzen zu erzielen. Da im Bereich des Verkehrssektors wichtige Verkehrsknoten kritisch für die Gesamtfunktionsfähigkeit des Systems sind und zugleich oftmals Hot-Spots der Gefährdung darstellen, gilt es im Rahmen der Analyse ein Hauptaugenmerk auf diese zu richten.

## **1.2. Das Untersuchungsgebiet**

Als Gebiet, in dem die nachfolgenden Untersuchungen stattgefunden haben, wurde die Hansestadt Rostock ausgewählt. Sie liegt im Nordosten von Deutschland an der Ostsee und ist mit über 208.000 Einwohnern (Stand Dez. 2017) die größte Stadt Mecklenburg-Vorpommerns. Die Hansestadt Rostock besteht aus 21 Stadtteilen zu beiden Seiten der Warnow. Das Hauptuntersuchungsgebiet befindet sich im Südwesten der Stadt und reicht in etwa vom Schwanenteichpark bis zum Barnstorfer Wald. Auf dieser rund 4,5 km<sup>2</sup> großen Fläche befinden sich einige wichtige Systemkomponenten der kritischen Verkehrsinfrastruktur, wie das Betriebsgelände der Rostocker Straßenbahn AG (RSAG) sowie der Verkehrsknotenpunkt Holbeinplatz, der in einer Senke liegt und in der Vergangenheit schon mehrfach nach Starkregenereignissen überflutet war, wie etwa im Sommer 2017, 2019, und 2021. Der Holbeinplatz ist heute der zentrale Knotenpunkt von Westen kommend in Richtung Innenstadt, wo sich Bus, Straßenbahn und S-Bahn kreuzen. Seit 1981 führt die Straßenbahnlinie entlang der unter der S-Bahnbrücke eingerichteten Haltestelle.

Die vorherrschende Landnutzung im Hauptuntersuchungsgebiet sind Grünflächen (Parks und Waldflächen) (50%). Es folgen Siedlungs- und Industrieflächen (25%) sowie Verkehrsflächen (23%) (Steinbeis-Transferzentrum Geoinformatik 2017).

### **1.3. Klimatische Veränderungen**

In Mecklenburg-Vorpommern hat sich der 30-jährige Mittelwert der Temperatur im Zeitraum 1991-2020 (9,2°C) im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 (8,2°C) um 1,0°C erhöht (meteoHRO 2021). Regionale Klimaprojektionen zeigen, dass sich dieser Trend auch zukünftig fortsetzen wird (Jacob et al. 2014). Als Folge der Temperaturerhöhung wird auch die Anzahl der Sommertage (Tage mit  $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ ) und Hitzetage (Tage mit  $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) zunehmen (Pfeifer et al. 2021a, Bender et al. 2019).

Dagegen sind Niederschlagsbedingungen nicht so einfach zu erfassen, da hier räumlich größere Unterschiede auftreten können. Im Untersuchungsgebiet Rostock hat sich die jährliche Anzahl der Tage mit mindestens 10 Liter pro Quadratmeter (dies entspricht einer Niederschlagshöhe von 10 mm) seit dem Jahr 1951 kaum geändert (DWD 2018). Trotzdem traten in diesem Zeitraum unregelmäßig Starkregenereignisse auf – wie 2006, 2011, 2012, 2017, 2019, 2023 – die im Stadtgebiet für lokale Überschwemmungen sorgten. Auch wenn die regionalen Klimaprojektionen für Mecklenburg-Vorpommern – und im Speziellen für Rostock – nicht immer klare Tendenzen zeigen, so ist aber physikalisch bekannt, dass die Luft pro 1 Grad Erwärmung 7% mehr Wasserdampf aufnehmen kann, unter günstigen Rahmenbedingungen im Sommer auch die doppelte Wasserdampfmenge (Dahm et al. 2019). Somit ist es wahrscheinlich, dass Starkregenereignisse aufgrund der höheren Temperatur zunehmen werden (Allen & Ingam 2002).

### **1.4. Die unternehmensspezifische Vorgehensweise**

Schon heute treten bei vielen Verkehrsbetrieben wetterbedingte Störungen in Betriebsabläufen und Schäden an der Infrastruktur auf. In einer wärmer werdenden Welt werden sich Anzahl und Intensität von Extremwetterereignissen erhöhen. Das bedeutet für Unternehmen, die auch zukünftig gut aufgestellt sein wollen, die Komponenten und Bereiche zu kennen, die durch Wetterextreme negativ beeinflusst werden. Darauf aufbauend lassen sich dann Anpassungsmaßnahmen entwickeln. Dabei sollte neben der Erhöhung der Klimaresilienz auch der Klimaschutz nicht vernachlässigt werden.

Da viele wetteranfällige Schwachstellen von lokalen beziehungsweise regionalen Rahmenbedingungen abhängen, ist es zunächst wichtig, diese in den individuellen Betriebsabläufen, für die verwendeten Betriebsmittel und –stoffe sowie bei Bauwerken zu kennen. Dies gilt sowohl für aktuelle als auch für zukünftige Gefährdungen. Die Erfahrung zeigt, dass ein Großteil der Schäden an Gebäuden, Straßen und Schienenwegen durch Überschwemmungen nach Starkregenereignissen oder durch Flusshochwasser entstehen (UBA 2020). Aber auch Erd- und Hangrutschungen sind potenzielle Störungen, die in Folge von Regenfällen, teils auch in Kombination mit vorausgegangenen Trockenperioden, auftreten können. Weitere Herausforderungen sind Sturmschäden durch umgefallene Bäume und Windwurf, die zu Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen führen. Darüber hinaus kommt die notwendige Kühlung von Fahrgastinnenbereichen in Bussen und Bahnen bei Hitzewellen zunehmend an ihre Grenzen (INFRAS et al. 2020).

Im Rahmen einer prototypischen Produktentwicklung untersuchte das Climate Service Center Germany (GERICS) zusammen mit der Rostocker Straßenbahn AG (RSAG) exemplarisch die heutigen und zukünftigen Betroffenheiten eines Verkehrsbetriebes im urbanen Bereich. Dazu wurde unter anderem der „GERICS-Unternehmensbaukasten“ eingesetzt, der zur Sensibilisierung und Analyse betrieblicher

Anpassungsstrategien an die Folgen des Klimawandels entwickelt wurde (Groth & Seipold 2017). Aber auch Module aus dem „GERICS-Stadtbaukasten“ (Bender et al. 2017) zur Visualisierung aktueller und zukünftiger Hot-Spots kamen zum Einsatz und wurden im Rahmen einer Kooperationsarbeit weiterentwickelt. Am Beispiel des Verkehrsknotenpunktes Holbeinplatz sowie einem Betriebsgelände sollten potenzielle Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels und zur Vorsorge gegen Überflutungen nach Starkregenereignissen aufgezeigt werden. Dazu kamen verschiedene Modelle zur Anwendung, die unterschiedliche Aspekte des Wasserkreislaufs im Fokus haben. Darüber hinaus wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, mit dem Ziel ein sensorgesteuertes Frühwarnsystem zum Schutz vor Überflutungen zu etablieren.

Obwohl die Entwicklung, Implementierung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen immer individuell an Standorte und unternehmensspezifische Bedarfe angepasst werden müssen, zeigt das nachfolgende Beispiel eine mögliche Vorgehensweise, wie sich Verkehrsbetriebe zukünftigen klimawandelbedingten Herausforderungen stellen können. Da die eingesetzten GERICS-Baukästen einen flexiblen und modularen Aufbau aufweisen, können die einzelnen Module jeweils zusammen mit den Entscheidungsträger:innen aus Unternehmen auf die entsprechenden Bedarfe maßgeschneidert angewendet werden.

## **2. Anwendung des GERICS-Unternehmensbaukastens**

### **2.1. Kooperation GERICS - RSAG**

Vor dem Hintergrund einer zu erwartenden Zunahme wetterbedingter Extremsituationen wird es für Unternehmen immer wichtiger, die unternehmens- und infrastrukturenspezifischen Auswirkungen der Folgen des Klimawandels zu mindern. Dazu wird nachfolgend eine exemplarische Vorgehensweise vorgestellt, wie Unternehmen die neuen Herausforderungen adressieren können, um wichtige betriebliche Schritte abzuleiten, die auch unter zukünftigen Rahmenbedingungen ihre angedachte Funktionalität erfüllen.

Der nachfolgend aufgeführte Auszug von Ergebnissen entstand im Zuge der Zusammenarbeit zwischen dem Climate Service Center Germany (GERICS) und der Rostocker Straßenbahn AG (RSAG) in einem Zeitraum von Juni 2018 bis Februar 2022. Die RSAG ist das Nahverkehrsunternehmen in der Hansestadt Rostock. Sie betreibt im Stadtgebiet sechs Straßenbahn- und 25 Omnibuslinien innerhalb des Verkehrsverbundes Warnow (VWV). Das Netz umfasst eine Streckenlänge von 35,6 km. Die RSAG ist eines von zwei Unternehmen, die in Mecklenburg-Vorpommern Straßenbahnen betreiben (<https://www.rsag-online.de>, Stand 01.01.2023).

### **2.2. Sensibilisierung und Informationsvermittlung**

Die Vorgehensweise stützt sich auf einen dialogbasierten Diskurs mit Entscheidungsträger:innen des Unternehmens, um a) die Konsequenzen der Klimawandels für das betroffene Unternehmen aufzuzeigen, b) die Bedeutung und Notwendigkeit der Anpassung in der Führungsebene von Unternehmen zu verankern und c) das lokal vorhandene Wissen in die Analyse einbinden zu können. Obwohl jedes Unternehmen individuell betrachtet werden muss, da die klimawandelbezogenen Chancen und Risiken von den Unternehmensstandorten und unternehmensspezifischen Prozessen abhängen, gibt das hier beschriebene Beispiel einen Einblick, wie eine unternehmerische Vorgehensweise zur Auseinandersetzung mit den Folgen des Klimawandels aussehen könnte. Im Rahmen der Weiterentwicklung des GERICS-Unternehmensbaukastens wurde zunächst als Teil der Modulgruppe „Sensibilisierung und Informationsvermittlung“ ein Vorgehensmodell entwickelt, mit den Zielvorgaben: a) Klimaänderungsinformationen in betriebliche Abläufe und Prozessketten zu implementieren und b) betriebliche Chancen und Risiken durch die Folgen des Klimawandels aufzuzeigen. Hierbei spielten die zukünftigen Veränderungen der klimatischen Bedingungen eine zentrale Rolle, da man nur mit ihnen frühzeitig zukünftige Hot-Spots oder betriebliche Verwundbarkeiten erkennen kann, um darauf aufbauend Strategien und Maßnahmen entwickeln zu können, mit denen die betrieblichen Folgen proaktiv vermieden, abgemildert oder verbleibende Restrisiken behandelt werden können. Die Ergebnisse sind im Rahmen eines Reports zum GERICS-Prozessmodell festgehalten (Gehrke et al. 2024).

Die Analyse des Einflusses klimatischer Veränderungen erfolgte in einem gemeinsamen Workshop, um bereits erfahrene und potenziell mögliche Betroffenheiten zu sammeln und diese dann anschließend fundiert und objektiv entsprechend ihrer Relevanz zu strukturieren:

In einem ersten Schritt einer mehrstufigen Vorgehensweise fand im Rahmen eines Workshops eine fachliche Einführung in die Thematik „Unternehmen in Zeiten des Klimawandels“ statt, um relevante

Zusammenhänge zwischen Extremwetterereignissen, weiteren zukünftigen klimatischen Veränderungen und ihren betrieblichen Wirkungen aufzuzeigen. Darüber hinaus wurden mögliche Handlungsoptionen erarbeitet und konkrete Praxisbeispiele zur Nutzung regionaler Klimainformationen gegeben. Ferner diente die Einführung dazu, die nachfolgenden Themenfelder einzugrenzen. In einer mehrstufigen Gruppenarbeit wurde zunächst das Verständnis aufgebaut zwischen dem extremen Wetterereignis, den daraus resultierenden physikalischen Folgen und den daraus ableitbaren möglichen betrieblichen Wirkungen zu unterscheiden. Dieser Ablauf orientierte sich an dem Vorgehen zur Erstellung von Klimawirkungsketten, die exemplarisch vom UBA für unterschiedliche Sektoren einen strukturierten Überblick über alle möglichen Betroffenheiten des betrachteten Sektors ermöglichen. Hierbei wurden unter anderem auch die (Wirkungs-)Beziehungen zwischen den einzelnen klimatischen Einflüssen und den jeweiligen Betroffenheiten (Klimawirkungen) sowie auch zwischen den Klimawirkungen untereinander abgebildet (UBA 2016). Das Vorgehen zum Erstellen von Klimawirkungsketten wird im Rahmen des GERICS-Prozessmodells berücksichtigt (Gehrke et al. 2024) und als Schritt der Risikoanalyse vielfach empfohlen (u.a. DIN ISO 14091:2021, UNDRR 2022). Dazu fand als erstes in einem gemeinsamen Brainstorming eine Sammlung möglicher Extremwetterereignisse statt. Die Ergebnisse wurden geclustert und sortiert an einer Metaplanwand präsentiert. In einer kurzen Einzelarbeit überlegten sich die Teilnehmer:innen des Unternehmens grundsätzlich mögliche und bereits in Rostock beobachtete physikalische Folgen mit genauem Bezug zu einem explizit genannten Extremwetterereignis. Die gesammelten Ergebnisse wurden an einer Metaplanwand geordnet aufgelistet und durchnummeriert. Auf Grundlage der so ermittelten Clusterlisten wurden in Anlehnung an die „World-Cafe“-Methode Kleingruppen gebildet, wobei jede Gruppe ein Cluster, das durch Losverfahren ausgewählt wird, zu bearbeiten hatte. Ziel für jede Gruppe war es, sich zu überlegen, welche möglichen betrieblichen Wirkungen für die RSAG sich jeweils aus den einzelnen physikalischen Folgen ergeben könnten. Die erarbeiteten Ergebnisse wurden von den Gruppen präsentiert und von einem Moderator an der Metaplanwand geordnet. Eine ergänzte Auswahl der Ergebnisse ist in Tab.1. aufgeführt, um einen Überblick zu geben, welche meteorologischen Größen für ein Beförderungsunternehmen relevant sein können und welche zugehörigen Wetterereignisse (heute und zukünftig) mitbedacht werden müssen. Die Liste der unmittelbaren physikalischen Folgen ergab eine erste Idee, wie viele Bereiche theoretisch durch klimatische Veränderungen beeinflusst werden können, beziehungsweise wie viele Möglichkeiten vorhanden sind, um Betriebsabläufe auf die eine oder andere Art zu beeinflussen.

Nach Besprechung und Ergänzung der Ergebnisse fand eine Bewertungs- und Priorisierungsrunde statt, um zunächst die wichtigsten unternehmensrelevanten Wirkungen zu ermitteln. Dies erfolgte sowohl für einzelne Funktionsbereiche als auch unternehmensübergreifend. Das Ziel war es hierbei, diejenigen Betroffenheiten zu identifizieren, die das Potenzial besitzen Arbeitsabläufe und Geschäftsprozesse maßgeblich positiv oder negativ zu beeinflussen. Die im Workshop gesammelten negativen betrieblichen Wirkungen auf den Verkehr lassen sich wie folgt unterteilen: Blockierung von Verkehrswegen, Zerstörung von Anlagen, Fahrzeugen und Gebäuden, Gefahr für Leib und Leben von Personal und Fahrgästen, Streckensperrungen sowie Sperrung von Kundenzentren.

Wie die Diskussionen beim Workshop gezeigt haben, besitzt der Parameter Temperatur eine große Bedeutung, da er sowohl in der Extremsituation Kälte als auch bei Hitze gleichermaßen die Betriebskosten erhöht. Sei es durch den Ausfall oder Bedarf an zusätzlichem Personal, eine Erhöhung

des Energiebedarfs zum Heizen beziehungsweise zur Kühlung oder durch steigende Instandhaltungs- und Wartungskosten. Ähnliche Wirkungen gehen auch von Überflutungen nach Starkregenereignissen und durch windbedingtes Stauwasser (sog. "drückendes Wasser") aus der Kanalisation aus, die ebenfalls zu höheren Kosten und Streckenausfällen führen können. Da diese Ereignisse bisher nur in kleiner Zahl, zukünftig aber vermehrt auftreten werden, sollen nachfolgende Kapitel im Bericht zeigen, wie man proaktiv auf diese Herausforderungen reagieren kann.

Tab. 1: Auszug aus den Workshopergebnissen, ergänzt mit Angaben aus Felderer et al. (2022)

Meteorologische Größe	Wetterereignis	Unmittelbare physikalische Folgen	Betriebliche Wirkung
Niederschlag	Dauerregen	Unterspülung, Massenbewegungen	Streckensperrung, steigende Kosten für Instandhaltung der Schieneninfrastruktur
		Anlagenschäden	Streckensperrung, steigende Kosten für Instandhaltung, Schließung von Kundenzentren
		Überschwemmung	Streckensperrung, steigende Kosten für Instandhaltung der Schieneninfrastruktur
	Starkregen	Überschwemmung, Unterspülung, Massenbewegungen	Streckensperrung, steigende Kosten für Instandhaltung der Schieneninfrastruktur und von Bauwerken
		Anlagen- und Gebäudeschäden	Streckensperrung, steigende Kosten für Instandhaltung von Bauwerken
		Überlastete Entwässerungssysteme	Überschwemmung von Gebäuden und Haltestellen, steigende Kosten für Instandhaltung
	Trockenperiode	Staubwolkenbildung	Verkehrseinschränkungen
		Trockenstress bei Schutzwäldern	Adaptiertes Vegetationsmanagement durch das Auftreten neuer Pflanzenarten
		Destabilisierung von Hängen (Erosion, Rissbildung)	Steigende Kosten für Instandhaltung
Temperatur	Kälte	Zerfrieren (Volumenvergrößerung beim Übergang Wasser zu Eis)	Steigende Kosten für Instandhaltung
		Erkrankungen	Steigender Personalbedarf
		Kälte in Bauwerken und Verkehrsmitteln	Steigender Energiebedarf
		Weniger Frosttage	Einsparungen beim Winterdienst
	Hitze	Gleisverwerfungen, Verformungen bei Straßenbelägen	Streckensperrung, steigende Kosten für Instandhaltung
		Erkrankungen	Steigender Personalbedarf
		Ausfallrisiko für elektronische Ausstattung steigt	Steigender Energie- und Instandhaltungsbedarf
		Hitze in Bauwerken und Verkehrsmitteln	Steigender Energiebedarf
		Erhöhte Brandgefahr an Böschungen	Steigender Personalbedarf, steigende Kosten für Instandhaltung

Tab. 1 (Fortsetzung): Auszug aus den Workshopergebnissen

Meteorologische Größe	Wetterereignis	Unmittelbare physikalische Folgen	Betriebliche Wirkung
Wind	Stürme	Winderosion und Staubstürme	Störung bei den Betriebsabläufen bis hin zur Streckensperrung
		Umgestürzte Bäume und Windbruch (Strom- und Oberleitung, Gleisanlagen)	Einstellung von Strecken, hoher Personalbedarf für Beseitigung der Schäden
		Umgestürzte Bäume und Windbruch (Verkehrsmittel, Anlagen, Personen)	Einstellung von Strecken, hoher Personalbedarf für Beseitigung der Schäden, steigende Gesundheitskosten

Für ein wirtschaftlich agierendes Unternehmen spielt der Punkt "Kosten" eine wichtige Rolle, was sich bei der Priorisierung in dem zweitwichtigsten Aspekt widerspiegelte. Ein höheres Ranking fiel nur auf den Aspekt „Einstellung von Strecken“ aufgrund der vielfältigen Sturmschäden. Wie die nachfolgende Diskussion zeigte, treten vergleichbare Herausforderungen bei Überflutungen nach Starkregenereignissen auf, sind bei den Mitarbeitern aber nicht so präsent. Sowohl für Sturm- wie auch Überflutungsfolgen wurden abschließend erste theoretische Anpassungsmaßnahmen gesammelt, deren Umsetzbarkeit in der Folge noch geprüft werden muss.

Nach der Ermittlung des Status Quos wurde abschließend ein Blick in die Zukunft geworfen. Am Beispiel aktueller Klimaänderungsinformationen für die Stadt Rostock (Bender et al. 2019) wurde aufgezeigt, wie man a) generalisiert die Informationen in der Praxis für Unternehmensprozesse nutzen kann, b) wie man Ergebnisbandbreiten verwendet, um daraus mögliche, nach Priorität gestaffelte Klimagefahren herleiten zu können und c) wie man die Ergebnisse verschiedener Klimaparameter kombiniert, um daraus mögliche klimabezogene Risiken für das Unternehmen ableiten zu können.

Zu Auswertung können auch die GERICS-Klimaausblicke für Landkreise verwendet werden ([https://www.gerics.de/products\\_and\\_publications/fact\\_sheets/landkreise/](https://www.gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/landkreise/)), um daraus weitere potenzielle Betroffenheiten zu identifizieren und um die internen Umfrageergebnisse zu ergänzen. Aus unternehmensstrategischer Sicht schließt sich eine detaillierte Bewertung möglicher Betroffenheiten an, die zum Beispiel auf Grundlage direkter und indirekter Kosten sowie auch der jeweiligen Relevanz für die Erreichung der Unternehmensziele erfolgen kann.

### 2.3. Änderungen der regionalklimatischen Verhältnisse

Neben der Bestandsaufnahme bisheriger Wetterereignisse und deren Auswirkungen ist es wichtig, auch die möglichen zukünftigen klimatischen Entwicklungen in den Blick zu nehmen. Dafür ist eine Auseinandersetzung mit Informationen unabdingbar, die wissenschaftlich fundiert Aufschluss über mögliche Veränderungen der regionalklimatischen Bedingungen geben. Am Beispiel des Klimaausblicks für Rostock und den Landkreis Rostock (Pfeifer et al. 2019b) wird nachfolgend exemplarisch aufgezeigt, wie solche Klimainformationen in der Praxis genutzt werden können.

Die dargestellten Ergebnisse sind eine Auswahl von 17 verschiedenen Kennwerten – basierend auf 85 regionalen Klimamodellsimulationen mit einer Auflösung von 12,5 km. Sie umfassen den Referenz-

zeitraum von 1971 bis 2000 beziehungsweise die beiden in die Zukunft gerichteten Perioden 2036 bis 2065 und 2069 bis 2098 (Tab. 2). Die Klimamodelle liefern Antworten auf die Frage, wie sich das Klima unter bestimmten Rahmenbedingungen verändern würde. Die dazu verwendeten Szenarien sind keine Vorhersagen, sondern beschreiben plausible mögliche Entwicklungen. Für die Rahmenbedingungen bezüglich der zeitlichen Verläufe der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre wird dabei der Bezug zu sogenannten Repräsentativen Konzentrationspfaden (representative concentration pathways (RCP)) hergestellt, die auch im 5. Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC) verwendet wurden. Der Klimaausblick nimmt hierbei Bezug auf folgende Szenarien: RCP8.5 (hohes Niveau der Treibhausgasemissionen), RCP4.5 (mittleres Niveau der Treibhausgasemissionen) und RCP2.6 (Klimaschutz-Szenario mit „negativen Emissionen“ zum Ende des 21. Jahrhunderts).

**Tab. 2: Zukunftsprojektionen ausgesuchter Kennwerte für Rostock und den Landkreis Rostock relativ zur Referenzperiode von 1971 – 2000. Abnahmen: blau, (Daten aus Pfeifer et al. 2019b)**

Kennwert	Nahe Zukunft (2036 – 2065)			Ferne Zukunft (2069 – 2098)		
	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6
Temperatur (bodennahe Lufttemperatur 2 m über Grund)	Zunahme	Zunahme	Zunahme	Zunahme	Zunahme	Zunahme
Heiße Tage (Tage mit $T_{max} \geq 30^{\circ}C$ (in 2 m Höhe))	Zunahme	Zunahme	Tendenz zur Zunahme	Zunahme	Zunahme	Tendenz zur Zunahme
Tropische Nächte (Tage mit $T_{min} \geq 20^{\circ}C$ (in 2 m Höhe))	Zunahme	Zunahme	Zunahme	Zunahme	Zunahme	Zunahme
Niederschlagsmenge (Gesamtniederschlag, langjähriges Mittel)	Tendenz zur Zunahme	Tendenz zur Zunahme	Tendenz zur Zunahme	Zunahme	Zunahme	Tendenz zur Zunahme
Trockentage (Tage mit Niederschlagsmenge $< 1$ mm)	Keine klare Tendenz	Keine klare Tendenz	Keine klare Tendenz	Keine klare Tendenz	Keine klare Tendenz	Keine klare Tendenz
Starkregentage (99. Perzentil von N) (Tagesniederschlag, dessen Höhe an 1% der Tage überschritten wird)	Tendenz zur Zunahme	Tendenz zur Zunahme	Tendenz zur Zunahme	Zunahme	Zunahme	Tendenz zur Zunahme
Windgeschwindigkeit (mittlere Windgeschwindigkeit im Jahr in m/s)	Keine klare Tendenz	Keine klare Tendenz	Tendenz zur Abnahme	Keine klare Tendenz	Tendenz zur Abnahme	Tendenz zur Abnahme

Bei den **temperaturbasierten Kennwerten** ist ein recht einheitliches Bild zu erkennen. Für beide Zeiträume und für fast alle Szenarien zeigt sich eine Zunahme der Temperatur, was sich auch in einer größeren Anzahl an heißen Tagen und tropischen Nächten niederschlägt. Damit setzt sich der bereits beobachtete Trend auch zukünftig fort (vgl. dazu auch Bender et al. 2019). Lediglich beim Klimaschutz-Szenario (RCP2.6) ist eine Zunahme der heißen Tage nicht ganz klar ersichtlich, die Tendenz weist aber auf eine Zunahme hin. Betrachtet man die größtmöglichen Werte der Ergebnisbandbreite, so kann sich die Anzahl heißen Tage im Vergleich zur Referenzperiode aber auch um ein Vielfaches erhöhen, sodass die Herausforderung Hitze und ihre direkten und indirekten Folgen an Bedeutung zunehmen wird. Somit wird das Thema Hitze in der Zukunft – am Tag und in der Nacht – auch für Verkehrsbetriebe wie die RSAG weiter an Relevanz gewinnen.

Bei den **niederschlagsbasierten Kennwerten** ist eine Vorhersage zukünftiger Entwicklungen deutlich schwieriger: Die Ergebnisse weisen hier eine größere Bandbreite auf, die von einer Abnahme bis hin zu



einer Zunahme reichen kann. Tendenziell wird sich die jährliche Niederschlagsmenge erhöhen. Die Veränderungen bei der Anzahl der Starkregentage sowie der Anzahl und Länge der Trockenperioden (Pfeifer et al. 2021b, Bender et al. 2019) weisen auf mögliche Veränderungen der Niederschlagsmuster und eine innerjährliche Verschiebung der Niederschläge hin. Dies wird den lokalen Wasserhaushalt einschließlich des jährlichen Verlaufs der Grundwasserstände beeinflussen. Verstärkt wird sich dies noch dadurch, dass durch die höheren Temperaturen auch die Verdunstung steigt. Dies verringert zeitweise die Grundwasserneubildung. Neue Herausforderungen können vor allem im Rahmen der Extremereignisse Trockenheit und Starkregen entstehen. Dies gilt vor allem für die Bereiche, die man schon heute als Hot-Spots kennt.

Bei den mittleren **Windgeschwindigkeiten** kann man aus den Modellergebnissen keine klaren Trends ablesen. Aus den Daten ist es auch nicht möglich, Veränderungen bei der Anzahl und Intensität von Stürmen zu erkennen. Man kann aber davon ausgehen, dass sich die zukünftigen Folgen nicht verringern werden.

Genauere Aussagen über die Veränderungen der **Gewittertätigkeit** sind aktuell noch nicht möglich, da zu wenig Ergebnisse vorliegen.

Die Angaben zur zukünftigen Entwicklung ausgesuchter Klimaparameter können zur Priorisierung von zu adressierenden Klimagefahren herangezogen werden. So kann eine meteorologische Größe, die bereits heute zu physikalischen Schäden an Systemkomponenten führen kann und eine Wirkung auf wichtige betriebliche Abläufe hat, nach der Betrachtung der zukünftigen Entwicklungen und einem zunehmenden Trend noch höher priorisiert werden. Wenn dagegen zukünftig eine Abnahme der Ereignisanzahl möglich ist, kann sie auch in der Priorisierung zurückgestuft werden. Resultieren mehrere Wirkungen auf Betriebsabläufe aus einem Klimaparameter, der in Zukunft eine Zunahme verzeichnet, kann dieser ebenfalls höher gewichtet werden.

Bei der Ableitung von Maßnahmen auf Basis der Klimamodellierungen muss aber stets bedacht werden, dass a) die Angaben der Klimadaten 30-jährige Mittelwerte darstellen und somit Extreme nicht direkt erfasst werden, b) aufgrund der unbekannteren zukünftigen klimatischen Rahmenbedingungen und Modellvereinfachungen mit größeren Ergebnisbandbreiten geplant werden muss und c) alle Klimaparameter eine natürliche Schwankungsbreite aufweisen, die es immer zusammen mit den Veränderungen des Klimawandels zu berücksichtigen gilt.

**Box 1** Historische Temperatur- und Niederschlagswerte in Rostock. (Alle Daten von meteoHRO)

- In Rostock-Warnemünde variierten die mittleren monatlichen Temperaturen im Jahresverlauf bisher zwischen 0,3°C (Januar) und 17,1°C (Juli) (beides für die Zeitperiode 1971-2000). Die höchste gemessene Temperatur lag bei 38,4°C (20.07.2022), die niedrigste bei -18,4°C (16.02.1956).
- Die jährlichen Niederschlagsmengen lagen bisher zwischen 424,4 mm (1976) und 954,6 mm (2011). Die größte Tagesmenge wurde am 22.07.2011 in Rostock-Warnemünde gemessen, wo 111,4 mm in 24 Stunden gefallen waren.

## 2.4. Historische, wetterbedingte Störungen auf den RSAG-Betrieb

Aufbauend auf den Ergebnissen des oben erläuterten Workshops, wurden historische, wetterbedingte Störungen abgefragt. Ein erster wichtiger Schritt bei der Anpassung an die Folgen des Klimawandels ist die Kenntnis bisheriger Hot-Spots, da diese auch zukünftig, zumeist in stärkerem Maße, betroffen sein werden. Beispielhaft sind nachfolgend wetterbedingte Störungen aus dem Jahr 2019 beschrieben:

- Starkregen: 6x im Jahr, in vier Fällen wurde der Verkehr flächendeckend im gesamten Verkehrsnetz durch Starkregen betroffen. Wichtige Hot-Spots mit Überflutungen sind u.a. der Holbeinplatz und der Südring an der Goethebrücke.
- Starkwind/Gewitter: Die Fähre musste rund 20x ihren Betrieb einstellen. Bei der Straßenbahn gab es in zwei Streckenbereichen vier Sperrungen (Hot-Spot: Barnsdorfer Wald). Beim Busverkehr gab es an zwei aufeinander folgenden Tagen im Rahmen der Gewitterereignisse Straßensperrungen durch umgestürzte Bäume.
- Hitze: In mindestens 10 Fällen (mehrheitlich in der Straßenbahn) mussten Fahrgäste medizinisch notversorgt werden (jeweils ca. 15 Minuten Sperrung des Betriebs). Kein erkennbarer Hot-Spot, da die Vorfälle über das gesamte Verkehrsnetz verteilt waren.

Weitere häufiger vorkommende wetterbedingte Störungen treten auf bei:

- Eisregen: Es können unterschiedliche Standorte im gesamten Verkehrsnetz betroffen sein. Das Problem tritt vor allem dann auf, wenn die Fahrleitung noch kalt ist und es zu regnen beginnt. Als Folge daraus müssen Bahnen stehen bleiben.
- Schnee: Kann zwar grundsätzlich im gesamten Verkehrsnetz auftreten, stellt jedoch in der Regel kein Problem dar. Mit Ausnahme der Winter 2010 und 2011 – mit ca. 40 cm Schnee – reichte bislang der normale Winterdienst aus.
- (Fluss-)Hochwasser und Sturmflut: Hierbei besteht keine unmittelbare Relevanz, da keine RSAG-Linienverkehre durch hochwassergefährdete Gebiete führen. Indirekte Folgen durch Grundhochwasser können im direkten Umfeld der Warnow auftreten.

## 2.5. Feedback zum Workshop

Bei der nachgelagerten Abfrage unter den Teilnehmenden zur Bewertung des Workshops wurden einige Punkte genannt, die an dem durchgeführten Workshop noch verbessert werden könnten, sowie die gut gefallen haben. Darunter fanden sich einige generelle Empfehlungen, die es bei der Präsentation komplexer wissenschaftlicher Ergebnisse für Partner aus der Praxis zu beachten gilt:

1. Den Teilnehmenden sollte schon zu Beginn die Relevanz der Anpassung an die Folgen des Klimawandels verdeutlicht werden. Dazu kann man auf lokale Ereignisse zurückgreifen, da mit diesen häufig persönlichen Erfahrungen verknüpft sind. Zusätzlich sollte man hervorheben, dass die Teilnehmenden eine Vorreiterrolle beziehungsweise Leuchtturmfunktion einnehmen.
2. Bei den Vorträgen und der Moderation sollte darauf geachtet werden, eine möglichst nicht-wissenschaftliche Sprache zu verwenden. Auch sollte auf die Nutzung von Abkürzungen verzichtet werden, damit das Publikum gut folgen kann.

3. Die Kategorie „physikalische Folgen“ muss so weit geöffnet werden, dass beispielsweise auch nicht-physikalische Folgen mit Relevanz für das Unternehmen (z.B. Erkrankungen) aufgenommen werden können.
4. Beim Erklären der Vorgehensweise ist es ratsam, nur 1-2 ausgesuchte Beispiele detailliert zu besprechen. Darüber hinaus ist es von Vorteil, die Wirkungskette Schritt für Schritt abzuarbeiten, wobei immer nur der Schritt besprochen wird, der gerade bearbeitet werden soll.
5. Bei Erklärungen, für die Folien benutzt werden, sollte nur die wichtigsten Informationen enthalten sein. Durch das Reduzieren der Inhalte, wird die Wissensvermittlung vereinfacht und erfolgt gezielt.

## **2.6. Weiterführende Analyse der Ergebnisse**

Im Rahmen der Analyse der Workshopergebnisse fand eine Videokonferenz zwischen dem GERICS und einem Abteilungsleiter der RSAG statt, um die bisherigen Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse nochmals zu reflektieren.

Bei der Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen muss zunächst differenziert werden nach den vorhandenen Anpassungskapazitäten der RSAG und dem Handlungsspielraum, über den die RSAG in Eigenregie ohne die Einbindung externer Akteure verfügt. Bei den Betriebshöfen sind schon konkrete Maßnahmen in der Umsetzung, beispielsweise zur Minimierung von Windschäden, die dort ein Hauptproblem darstellen. Anpassungsmaßnahmen für die Bestandsstrecken brauchen dagegen eine längere Vorlaufzeit, da die RSAG hier nicht der Baulastträger ist. Aus diesem Grund können Entscheidungen über Maßnahmen an den Gleisanlagen nicht von der RSAG allein getroffen und umgesetzt werden. Hier wäre es von Vorteil, schon frühzeitig das Umweltamt miteinzubeziehen, beispielsweise wenn es um Grundstücke entlang des Schienenverlaufs geht, wo es Schienen freizuschneiden oder die Gleisdrainage zu optimieren gilt. Dies schränkt bisher den Handlungsspielraum deutlich ein und verlangsamt Prozesse, wie die von der Planung bis hin zur Umsetzung. Hier könnte eine gemeinsame planerische Vorgehensweise die Möglichkeit bieten, auf Basis der Klimaänderungsinformationen zukünftige Baumaßnahmen gemeinsam abzusprechen. In Bezug auf die Netzplanung sind Umsetzungen etwas einfacher, da viele Leitungen ohnehin verlegt werden müssen und ein gemeinsames Interesse mit den Leitungsträgern besteht, ausgesuchte Streckenabschnitte klimaresilient zu gestalten.

Deutlich günstiger stellt sich die Ausgangssituation zur Berücksichtigung von Klimaänderungsinformationen und zur Implementierung von Anpassungsmaßnahmen bei Neuplanungen dar. Hier können die Erkenntnisse aus dem Workshop sowie die regional verfügbaren Klimaänderungsinformationen miteinbezogen werden, um im Rahmen von Beauftragungen Anforderungen für klimawandeltaugliche Gewerke einzubinden und somit entsprechende Bauwerke zu planen und zu bauen.

Das vom GERICS bereitgestellte Prozessmodell (Gehrke et al. 2024) wird von Seiten der RSAG als sehr nützlich bewertet, da es eine gute Hilfe darstellt, um die Geschäftsführung beim Thema „Unternehmen im Klimawandel“ abzuholen und durch die gezeigten und angesprochenen Beispiele thematisch mitzunehmen. Es wird auch als ein guter Ansatz gesehen, um allen Workshopteilnehmenden das Thema näher zu bringen und diese grundsätzlich zu sensibilisieren. Durch die aufgezeigten regionalklimatischen Veränderungen können bei der Erweiterung der Infrastruktur wichtige Hinweise zu Bauweisen oder der

Dimensionierung von Abstandsflächen und Drainagesystemen abgeleitet werden. Für den Bestand kann das neue Wissen jedoch nur schwer angewendet werden, da die RSAG hier nicht immer einen entsprechenden Handlungsspielraum besitzt. Mit Hilfe der aufgezeigten Vorgehensweise können Unternehmen sich der Thematik der Anpassung an die Folgen des Klimawandels nähern und zukünftige Herausforderungen identifizieren, wobei in der ersten Runde die Aussagen für einen ersten Überblick geeignet sind, aber noch recht allgemein bleiben.

In Folgeschritten muss man sich detaillierter mit der Thematik auseinandersetzen. Ein möglicher Ansatz ist das Erstellen einer Tabelle, die den systematischen Überblick ermöglicht, welche Betroffenheiten einzelner Systemelemente in Bezug auf zu erwartende klimatische Veränderungen (Extremwetterereignisse und schleichende Veränderungen) zu erwarten sind (Tab. 3). Für den nachfolgenden Prozess zur Ableitung und Priorisierung von Maßnahmen ist eine Entscheidungsmatrix ein hilfreiches Werkzeug.

**Tab. 3: Klimatische Betroffenheiten einzelner Systemelemente des lokalen Verkehrssektors (Beispiele)**

Klimasignal/ Klimakennwert	Schienenwege Betroffenheit/Chance	Straßen Betroffenheit/Chance	Fahrzeuge Betroffenheit/Chance	(...)
Hitze	Ausdehnung und Verformung von Schienen	Schmelzen und Aufbrechen des Asphalts	Starke Aufheizung der Fahrzeuge	
	Überhitzung der elektronischen Infrastruktur	Bildung von Spurrillen und Wellen	Starke Exposition der FahrerInnen	
	(...)	(...)	(...)	
Sommertrockenheit	In Kombination mit Sturm: Sandstürme und Verwehungen	In Kombination mit Starkregen: Sedimenttransport durch Erosion		
	Erhöhte Gefahr von Wald- und Hangbränden entlang von Streckenabschnitten	Setzung von Infrastruktur wegen veränderter Untergrundverhältnisse		
	(...)	(...)		
Temperaturanstieg (fortschreitend)	Verlängerung der Bausaison	Weniger Wartungskosten im Winter	Veränderte Anforderungen an Kühlung/Heizung	
(...)	(...)	(...)	(...)	

Außerdem müssen von Seiten des Unternehmens der Wille und die Möglichkeit vorhanden sein, die Aussagen bei Strategieentscheidungen mit zu berücksichtigen. Hierzu ist es wichtig, auch die entsprechende Hierarchie-Ebene wiederkehrend über die Ergebnisse zu informieren und deren Relevanz hervorzuheben.

## 2.7. Fazit zur Vorgehensweise

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Anwendung unterschiedlicher Kommunikationsformate vom Vortrag bis hin zum gemeinsamen Erarbeiten im Workshop einen wichtigen Bestandteil zur unternehmensinternen Bewusstseinsbildung darstellen und somit eine gute Basis für strategische Planungen und das Risikomanagement liefert. Darauf aufbauend können Kriterien entwickelt werden, um die Widerstandsfähigkeit von Gebäuden und Infrastruktur zu stärken. Die Vorgehensweise ist unabhängig von etwaigen ortsspezifischen Besonderheiten anwendbar. In der Vertiefung können dann spezifische

Situationen vor Ort identifiziert werden, die einer näheren Betrachtung bedürfen. Letztlich können besonders relevante Bereiche mit Handlungsbedarf vertiefend mittels Simulationen untersucht und visualisiert sowie lokal vorhandenes Wissen zur ergänzenden Überprüfung und Validierung herangezogen werden. Die beispielsweise dadurch entstehenden Karten, in denen die identifizierten Herausforderungen im Raum des Verkehrsnetzes bzw. der Kommune dargestellt werden können, bilden eine wichtige Grundlage zur Anpassung an ausgesuchte Folgen des Klimawandels. Nachfolgend wird der Umgang mit urbanen Überflutungen nach Starkregenereignissen an einem Beispiel thematisiert.

Urbane Überflutungen wurden in der Zusammenarbeit mit der RSAG als weitere, bereits heute bestehende Herausforderungen identifiziert und mit Hilfe von hydrologischen Modellen im Detail untersucht. Ein zentrales Ziel ist es hierbei, die Gefährdungssituation besser zu kennen und darauf aufbauend die Anpassungskapazität der Hansestadt Rostock beziehungsweise der RSAG im Hinblick auf solche Ereignisse zu erhöhen. Mit Kenntnis der Hot-Spots ist es möglich, proaktiv auf Störungen zu reagieren, indem man a) Maßnahmen zur Minderung der Folgen des Klimawandels implementiert, b) Ausweichstrategien erarbeitet, um bei Bedarf überflutungsgefährdete Bereiche zu umfahren oder c) redundante Systeme oder Komponenten bereithält, auf die man bei einem Ausfall zurückgreifen kann, um mögliche Störungen so gering wie möglich zu halten.

### 3. Anwendung des GERICS-Stadtbaukastens

#### 3.1. Die Modulgruppe „Wasser in der Stadt“

Städte und Gemeinden sind wegen der hohen Konzentration von kritischer Infrastruktur, versiegelter Flächen und Menschen besonders anfällig für die Folgen des Klimawandels. Das Gleiche gilt für Unternehmen, die dort angesiedelt und deren Prozesse und Wertschöpfungsketten auf die Bereitstellung von unter anderem Energie, Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Transport und Verkehr oder Telekommunikation angewiesen sind. Da sich Wetterextreme zunehmend negativ in betrieblichen Abläufen bemerkbar machen, gilt es sich an die zunehmende Zahl und Intensität der Ereignisse anzupassen. Im Hinblick auf Stadtverwaltungen wurde seitens des GERICS der Stadtbaukasten entwickelt, um die individuellen Herausforderungen gezielt adressieren zu können (Bender et al. 2017a). Schwerpunkte der bisherigen Bearbeitungen waren die Betrachtung klimatischer Veränderungen – sowohl in der Region als auch in der Stadt – sowie die Auswirkungen von Starkniederschlägen auf den Stadtbereich. Aufbauend auf den Erfahrungen im Rahmen der prototypischen Produktentwicklung in Bleckede (Groth et al. 2020) wurden in Rostock weitere digitale Zwillinge getestet und miteinander verglichen. Ziele der Bearbeitung waren einerseits den Wissenstand für die Hansestadt Rostock zu erhöhen und andererseits der RSAG bei der Anpassung an urbane Überflutungen zu helfen. Hierzu wurde die Modulgruppe „Wasser in der Stadt“ durch neue Werkzeuge und Methoden erweitert. Zudem wurde mit dieser Arbeit an der Schnittstelle von Stadt- und Unternehmensbaukasten gearbeitet, da die Ergebnisse sowohl für die gesamte Stadt Rostock sowie im Detail auch für die RSAG als Unternehmen mit in der Stadt verortetem Betriebsgelände, Verkehrssystem und Betriebsabläufen relevant sind. Das Unternehmen ist somit als Teilsystem in das System Stadt eingebettet und steht daher mit diesem in einer Beziehung.

Nach dem in Bleckede verwendeten Programm Wolk (TAUW) kamen in Rostock das freiverfügbare Programm HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers), die Software Plattform „Tygron Engine“ der TAUW GmbH und das selbstentwickelte LEAFlood (Wübbelmann & Förster 2022) zum Einsatz, um die Folgen eines Starkregens innerhalb des Stadtgebietes zu simulieren.

Durch ihre verschiedenartigen Modellarchitekturen werden von jedem Modell jeweils unterschiedliche Betrachtungsschwerpunkte gelegt, weswegen unterschiedliche Eingangsdatensätze benötigt werden. Als Gemeinsamkeit wird die zeitliche Entwicklung des Oberflächenabflusses nach Niederschlagsereignissen modelliert, wobei je nach Modell unterschiedliche Modifikationen zum Tragen kommen. In einer Studie wurde untersucht, ob auch einfache Modellansätze mit einer begrenzten Anzahl von Eingangsgrößen aussagekräftige Ergebnisse für Stadtplaner:Innen und Entscheidungsträger:Innen liefern können. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass nicht jede Kommune über die ausreichenden finanziellen Mittel verfügt, um eine High End Modellierung zu beauftragen. Zusätzlich sollte gezeigt werden, wie man Anpassungsmaßnahmen in digitale Zwillinge integrieren kann, um damit Entscheidungsträger in ihrem Handeln zu bestärken (Groth et al. 2023b).

Beim Einsatz hydrologischer Modelle muss stets berücksichtigt werden, dass im Digitalen Geländemodell (DGM) nicht alle für den Abfluss notwendigen Komponenten enthalten sind. So fehlen manchmal bauliche Maßnahmen – die Installation von Fließhindernissen, die nicht immer im DGM erfasst sind, in der Realität aber Abflussrichtungen lenken – oder Straßendurchlässe, die nachträglich eingefügt werden müssen,

damit sich das Wasser im Modell realitätsnah bewegen kann. Daher ist es nach dem Erstellen der ersten Simulation wichtig, die angezeigten Hot-Spots vor Ort auf Plausibilität hin zu überprüfen.

Auch bei der Wahl der Bemessungsniederschläge gilt es zu beachten, dass bisher die administrativen Planungen ausschließlich auf historischen KOSTRA-Daten beruhen. Da sich durch den Klimawandel die bestehenden Rahmenbedingungen jedoch verändern werden, was insbesondere bei Bauwerken mit einer Lebensdauer von über 50 Jahren von hoher Relevanz ist, sollte diese aktuell gängige Praxis überdacht und mögliche klimawandelbedingte Einflüsse berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang weist Klafka (2023) darauf hin, dass aktuell immer noch geeignete Methoden und Daten fehlen, um zukünftige extreme Kurzzeitereignisse abbilden zu können. Ihre Untersuchungen zeigen darüber hinaus, dass die Intensität zukünftiger Starkregenereignisse – bei einer gleichzeitigen Verkürzung der Wiederkehrzeiten – um bis zu 28% zunehmen kann. So können Ereignisse, die heute noch als Jahrhundertereignis klassifiziert werden, am Ende dieses Jahrhunderts alle 20 bis 30 Jahre auftreten. Da solche Veränderungen leicht in einem hydrologischen Modell implementiert werden können, lassen sich dadurch proaktiv auch Starkregenszenarien berechnen, die vor Ort bisher noch nicht aufgetreten sind.

## **3.2. Der Modellansatz mit HEC-RAS**

### **3.2.1. Modellierung mit HEC-RAS**

Das Modell HEC-RAS wurde ursprünglich dafür konzipiert, das Fließverhalten in Flüssen und Kanälen zu analysieren. Allerdings kann es aber auch zur Untersuchung des Abflussverhaltens von Starkregenereignissen im urbanen Raum eingesetzt werden (Schütze et al. 2021, Bender et al. 2023a). Seine großen Vorteile sind die freie Verfügbarkeit und eine überschaubare Anzahl von Eingangsparametern sowie die einfache Dateneingabe mit Hilfe von geografischen Informationssystemen, wie beispielsweise ArcGIS Pro (ESRI), die das schnelle Einfügen von Gebäuden, Fließhindernissen oder Dämmen in das Modell ermöglichen. Als Eingangsdaten werden dafür insbesondere die folgenden benötigt: Digitales Geländemodell (z. B. DGM1 mit einer Auflösung von 1 x 1 m), Angaben zu den Gebäuden als Shape File oder als vereinfachte Quader, die in dem Digitalen Oberflächenmodell zusammengefasst werden. Hier sind auch komplexere Ansätze möglich, die beispielsweise die genaue Gebäudehöhe, Dachformen oder Retentionskapazitäten beinhalten. Zur Berechnung des Abfluss- und Infiltrationsverhaltens benötigt man des Weiteren Angaben zur Landnutzung und bodenhydrologische Informationen. Der zeitliche Verlauf des Niederschlagsereignisses kann, basierend auf Beobachtungsdaten oder als theoretischer Ansatz, in definierten Zeitschritten erfolgen. Bei der Wahl der Modellgrenzen muss darauf geachtet werden, dass je nach Lage des Modellgebietes Wasser aus benachbarten Bereichen zu- bzw. Wasser auch aus dem Modellgebiet in angrenzende Bereiche abfließen kann. Am besten eignen sich hierfür Straßen, da der schnelle Oberflächenabfluss – wegen der niedrigen Rauigkeitswerte und den Gebäuden, die als Fließhindernis fungieren – überwiegend dort erfolgt.

Die generellen Ziele der durchgeführten Modellierung waren a) die Identifizierung aktueller und zukünftiger hochwassergefährdeter Bereiche (Hot-Spots) und b) das Aufzeigen des potenziellen räumlichen Abflussverhaltens innerhalb des Stadtgebietes. Dazu wurden verschiedene Szenarien verwendet (Bender et al. 2023a).

## Praxisbeispiel Rostock

Für die Berechnung mit HEC-RAS auf einem handelsüblichen Rechner, wurde als Untersuchungsgebiet eine rund 4,5 km<sup>2</sup> große Fläche in Rostock mit einem Gitterzellenraster von 5 x 5 m (Abb.1) ausgewählt. Das Modellgebiet wurde durch vier Linien begrenzt: Kreisverkehr Goerdeler Str. – Betriebsgelände Nordwasser GmbH im Norden, Carl-Hoop-Str. – Campus Ulmenstr. im Osten, Parkstraße und Satower Str. im Süden sowie Rennbahnallee – Kärntner Str. im Westen.

Zur Vereinfachung des Modellansatzes wurde der Oberflächenabfluss ohne die Entwässerung durch die Kanalisation berechnet. Es fand auch keine Verifizierung durch das Auskartieren von Straßendurchlässen statt. Das Modell berücksichtigte allerdings Infiltration, die auf Basis der Bodenversiegelung, Landnutzung und Bodenfeuchte abgeschätzt wird.

Zur Angleichung an die Courant-Zahl – die Größe, die beschreibt, um wie viele Zellen sich Wasser pro Zeitschritt maximal fortbewegen kann – wurden die Zeitintervalle auf 2 Sekunden gesetzt. Die Wahl des Zeitschritts hat einen direkten Einfluss auf das Erscheinungsbild der Simulation. Bei kleineren Zeitschritten befindet sich rein visuell weniger Wasser im Modell, dadurch weisen Hot-Spots eine geringere Wassertiefe auf (Groth et al. 2023b).

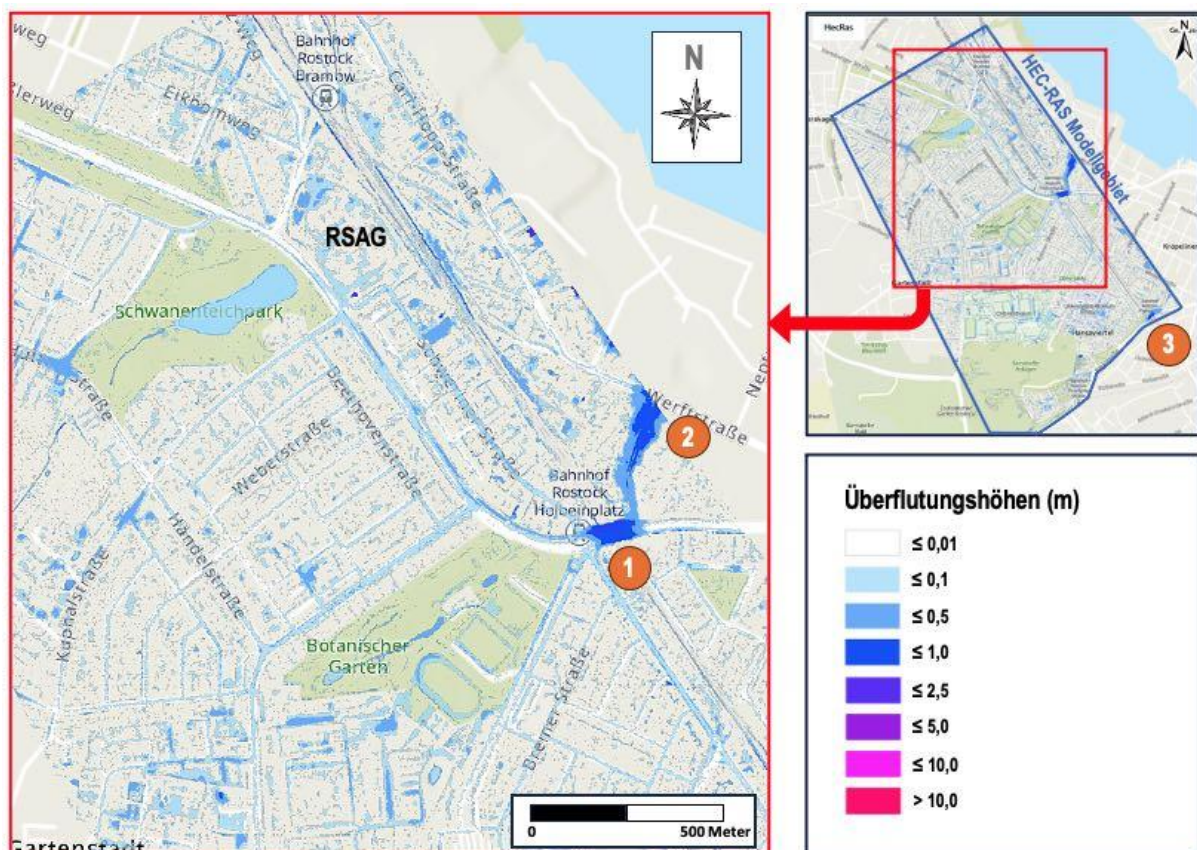


Abb.1: HEC-RAS-Modellierung: Modellgrenzen und Ergebnis für den Ausschnitt „Holbeinplatz-Schwanenteichpark (TAUW, Bauer 2022). Die Zahlen markieren die wichtigsten Hot-Spots.



### **3.2.2. HEC-RAS-Ergebnisse**

Als Hauptüberschwemmungsbereiche mit Wasseransammlungen bis 1 m werden drei Bereiche dargestellt: 1) der Bereich um die Haltestelle Holbeinplatz insbesondere unterhalb der Brücke, 2) ein Bereich südlich der Werftstraße, der eine Verbindung zum Holbeinplatz besitzt und 3) ein Bereich am Bahnhof Rostock-Parkstraße (Abb.1). Darüber hinaus treten im gesamten Modellgebiet viele Wasserflächen mit Wasserhöhen zwischen 0,1 m und 0,5 m auf – beispielsweise im Bereich des Ostseestadions, im Kreuzungsbereich Ulrich-von-Hutten-Straße und Linzer Straße und entlang der östlichen Modellgrenze (Bauer 2022).

### **3.3. Der Modellansatz mit Tygron Engine**

#### **3.3.1. Modellierung mit Tygron Engine**

Erste Untersuchungen zur Modellierung von Oberflächenabflüssen nach Starkregenereignissen zeigten für die Stadt Bleckede, dass auch einfache Ansätze (geringe Anzahl notwendiger Eingangsdaten, keine Datenaufbereitung und keine detaillierte Erfassung des bestehenden Entwässerungssystems) plausible Ergebnisse zu potenziellen Überflutungsbereichen liefern können (Groth et al. 2020). Um die Qualität dieser vereinfachten Modellansätze abschätzen zu können, wurde von der TAUW GmbH eine Vergleichsstudie durchgeführt (Ohligs & Bauer 2020). Als Untersuchungsgebiet wurde auch das Stadtgebiet von Rostock ausgewählt, da dort im Jahr 2018 für das Projekt „Kommunale Gewässer Gemeinschaftlich Entwickeln (KOGGE)“ eine Abflussmodellierung mit der Software MIKE-SHE durchgeführt worden war. Diese Ergebnisse wurden der Simulation mit der Software-Plattform Tygron Engine gegenübergestellt.

Bei der Tygron Engine handelt es sich um eine 3D-Geodesign Plattform mit Cloud-Computing-Technologie, die von der TAUW GmbH genutzt wird, um unter anderem Überflutungsszenarien interaktiv zu visualisieren. Bezogen auf die Bewertung von Starkregenereignissen wird ein 2D-Gitter-basiertes Flachwassermodell verwendet, das auf den 2D-Saint-Venant-Gleichungen basiert (Kurgano & Petrova 2007). Das Modell berücksichtigt Infiltration (gesteuert über Bodeneigenschaften), Verdunstung (gesteuert über Flächenversiegelung und Art der Vegetation), Grundwasserströmung und die Interaktion zwischen gebauten und natürlichen hydraulischen Strukturen. Die Auflösung des Modellgebiets wird vom gewählten Digitalen Geländemodell, hier DGM1, bestimmt. Zusätzlich wurden Informationen aus dem frei verfügbaren DGM20 (Zugriff über Opendataportal, esri data, openstreetmap.com) verwendet.

Das Modell simuliert den Wasserfluss zwischen benachbarten Gitterzellen in diskreten Zeitschritten. Berücksichtigt werden dazu Wasserstände, Oberflächennhöhen, das Versickerungsverhalten und Rauigkeitsfaktoren. Ein hohes Maß der Simulationsgenauigkeit wird durch die Verwendung kleiner Teilschritte erreicht.

In einer zweiten Projektphase wurde das Modellgebiet weiter eingegrenzt und eine Detailstudie für den Bereich zwischen dem RSAG-Gelände und dem Verkehrsknotenpunkt Holbeinplatz durchgeführt (Modellgebiet Holbeinplatz).

## Stadtgebiet Rostock

Das Modellgebiet umfasste eine Fläche von 316 km<sup>2</sup> mit 137 km<sup>2</sup> Stadtgebiet (Abb. 2). Es wurde im Norden von einer Linie Ostsee – Hinrichshagen, im Osten von einer Linie Rövershagen – Bandelstorf, im Süden von einer Linie Autobahnkreuz Rostock – Niendorf und im Westen von einer Linie Bargeshagen – Clausdorf begrenzt.

Zur Modellierung des gesamten Stadtgebietes wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit der Modellregen verwendet, der auch im KOGGE-Projekt zum Einsatz gekommen war (100-jähriges Regenereignis mit einer Regendauer von 60 Min). Zur Berechnung des Niederschlag-Abflussverhaltens eines Starkregenereignisses wurde ein Modellregen vom Euler Typ II nach KOSTRA-Atlas Deutscher Wetterdienst (DWD) 2010R verwendet. Als Input dienen Beobachtungsdaten der Wetterstation Rostock-Warnemünde. Der Niederschlagseintrag erfolgte gleichmäßig über das gesamte Modellgebiet. Da er dynamisch erfolgen sollte, wurden in 5 Minuten-Intervallen unterschiedliche Regenmengen definiert. Die Gesamtniederschlagsmenge betrug 43,5 mm in einer Stunde.

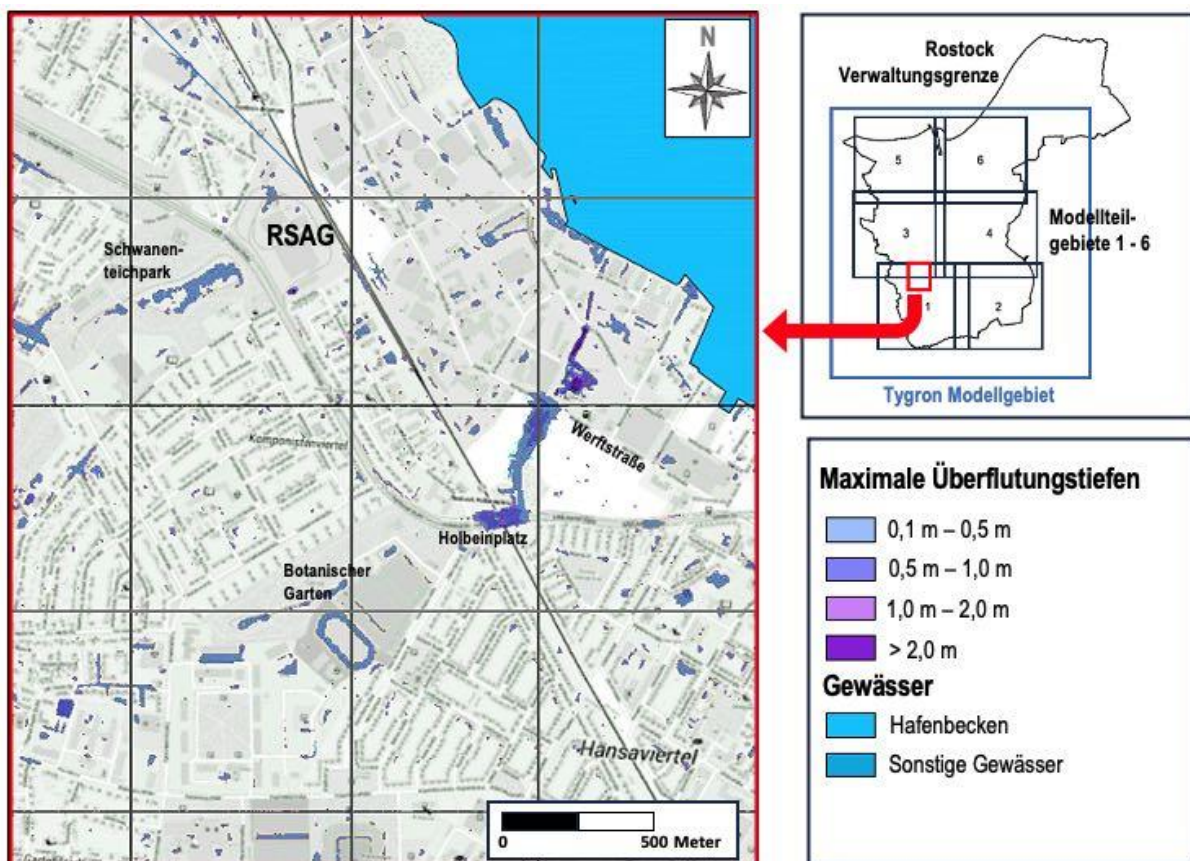


Abb.2: Modellierung mit Tygron-Engine: Modellgrenzen, Modellteilgebiete und Ergebnis für den Ausschnitt „Holbeinplatz-Schwanenteichpark (TAUW, Bauer & Ohligs 2020).

Bei der Berechnung der Oberflächenverdunstung wurde von einer potenziellen Evaporation von 1,5 mm pro Tag ausgegangen. Die tatsächliche Evaporation berechnet sich über Faktoren für die unterschiedlichen Bodenkategorien. Die Infiltration wird durch den K-Wert der Geländeoberfläche bzw. des Bodens charakterisiert. Da für das Kanalnetz keine genauen Informationen vorlagen, wurde das Stadtgebiet in

Bereiche mit und ohne Kanalisation aufgeteilt. Bereichen mit Abwassersystem wurde für jede 1 x 1 m Gitterzelle eine Speicherkapazität von 7 mm sowie eine Pumpenüberkapazität von 15 mm pro Stunde zugewiesen.

### **Modellteilgebiet Holbeinplatz-Schwanenteichpark**

Das Modellteilgebiet hatte eine Größe von rund 10,5 km<sup>2</sup>. Es wurde im Norden von einer Linie Schlachthofstr. – August-Cords-Str., im Osten von einer Linie Zur Feuerwehr – Otto Str., im Süden von einer Linie Kreuzung Max-Plank-Str./Südring – Kreuzung Satower Str./Rennbahnallee und im Westen von einer Linie Kreuzung Barnstorfer Ring/Groß Schwaßer Weg – Walter-Husemann-Str. begrenzt (Abb.2).

In dem Modellteilgebiet wurde die räumliche Auflösung (1 x 1 m Raster) beibehalten. Als Niederschlags-eintrag wurde ebenfalls der Modellregentyp Euler II nach KOSTRA-DWD 2010R verwendet. Die Angaben zur initialen Evaporation und der Infiltration entsprechen denen des Modellgebiets für Rostock. Als Randbedingungen wurden Angaben verwendet, die aus dem Modell für das Stadtgebiet abgeleitet wurden. Bei der Betrachtung der Kanalisation wurde ebenfalls ein vereinfachter Ansatz verwendet. Dabei wurde allen 1 x 1 m Gitterzellen, die im Modell als Straße klassifiziert werden, ein standardisierter Kapazitätswert von 10,82 mm zugewiesen (Bauer 2022).

### **3.3.2. Tygron Engine-Ergebnisse**

#### **Stadtgebiet Rostock**

Vergleicht man zunächst die Ergebnisse der Modellierungen vom KOGGE-Projekt (Tränckner 2018) mit den Tygron-Ergebnissen, so zeigten sich in der KOGGE-Modellierung deutlich mehr überflutete Flächen mit einer geringen Überflutungstiefe (Abb.3). Gründe dafür sind die Nutzung unterschiedlicher Bodenklassen, ein unterschiedliches Geländemodell (Tygron: DGM1; KOGGE: DGM1, DGM2, DGM5 und DGM10) einschließlich der damit verbundenen Höhenungenauigkeiten sowie bei Tygron das vereinzelt Fehlen von Straßendurchlässen sowie ein vereinfachter Entwässerungsansatz durch die Kanalisation (Ohligs & Bauer 2020). Somit spiegeln die Ergebnisse mit Tygron mehr die tatsächliche Morphologie der Oberfläche wider. Überflutungen treten hierbei in Rinnensystemen oder lokalen Senken auf. Dabei deuten höhere Wassertiefen auf einen Aufstau des Wassers hin, wobei die Ursache durch eine Vor-Ort-Begehung verifiziert werden sollte.

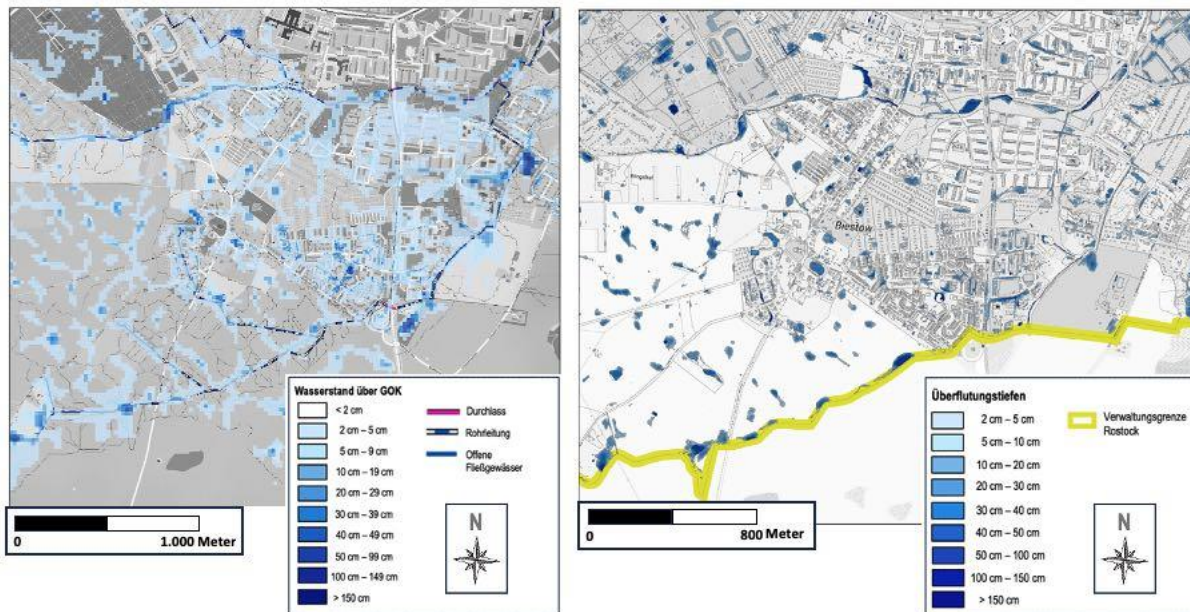


Abb.3 Vergleich der Überflutungsergebnisse (T= 100 a, D= 1 h) berechnet mit MIKE-SHE (links) (Tränckner 2018) und Tygron Engine (rechts) (Ohligs & Bauer 2020). Kartenausschnitt des Bereichs Rostock-Biestow.

In den Bereich des Holbeinplatzes zeigten die Modellergebnisse mit Tygron Engine Überflutungen bis zu 2 m an. Weitere Überflutungen treten rechts und links der Werftstraße auf. Im Umfeld des Botanischen Gartens sowie im Schwanenteichpark sind Überflutungshöhen zwischen 0,5 m und 1 m zu erkennen.

### Modellgebiet Holbeinplatz-Schwanenteichpark

Die Ergebnisse der Modellierung verdeutlichen, dass das größte Gefährdungspotential in Bereich der Haltestelle Holbeinplatz, die sich unterhalb der Bahnbrücke befindet, zu erwarten ist. Hier zeigte das Modell weiträumige Überflutungen an, die ausgehend vom Holbeinplatz in nordöstliche Richtung bis zur Werftstraße – vor dem Einlauf in die Kläranlage – hinaus reichen. Am Holbeinplatz wurden Wasserhöhen zwischen 1,0 bis 2,5 m angezeigt. Diese wurden im Nordosten der Werftstraße noch übertroffen (bis zu 5 m) (Abb.4). Die hohen Wasserstände lassen sich zum Teil damit erklären, dass im Modell der Einfluss der Kläranlage und des Kanalnetzes nur in vereinfachter Form einbezogen wurde. Trotz der damit verbundenen Ungenauigkeiten in den Modellergebnissen sind sie jedoch ein deutlicher Hinweis dafür, dass hier potenziell mit einer erhöhten Wasserlast zu rechnen ist, die man im Falle eines Starkregens beherrschen muss.

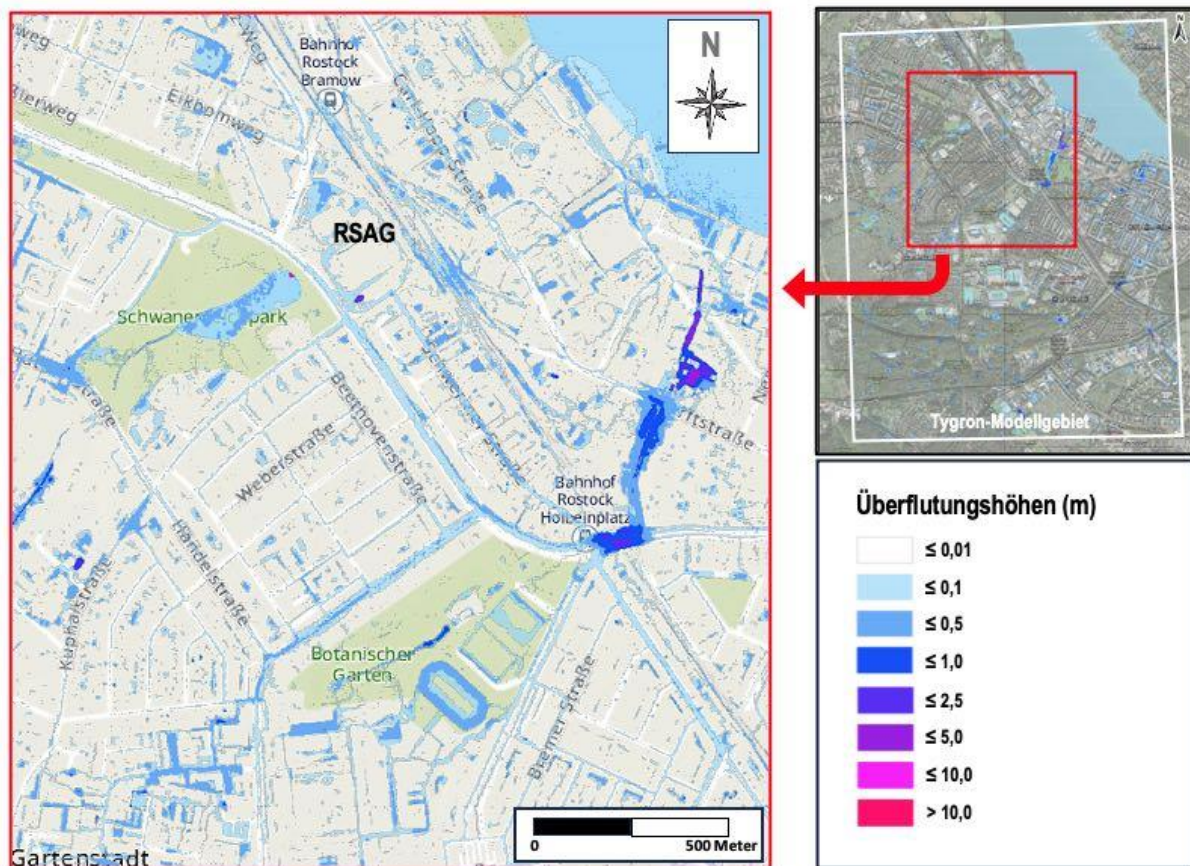


Abb.4: Modellierung mit Tygron Engine: Modellgrenzen und Ergebnis für den Ausschnitt „Holbeinplatz-Schwanenteichpark (TAUW, Bauer 2022).

Weitere nennenswerte Überflutungsflächen bis 0,5 m traten am Botanischen Garten sowie im westlich gelegenen Wohngebiet, im Schwanenteichpark sowie an seiner westlichen Ecke in der Händelstraße auf. Die Fließrichtungen sind hin zu den tieferliegenden Bereichen ausgerichtet, wobei auch Wasser vom Holbeinplatz in Richtung der Werftstraße langsam abfließt. Auf dem RSAG-Gelände akkumulierten sich im Modell geringe Wassermengen (südlich des Parkplatzes). Die im Modell angezeigte kleinräumige Senke in der SE-Ecke des Geländes mit potenziellen Wasserhöhen von bis zu 5 m, konnte bei der Vor-Ort Begehung dadurch erklärt werden, dass es sich hier um ein Rondell zum Eingang eines Gebäudes handelt, was von der Oberfläche bis zum tiefliegenden Kellereingang eine entsprechende Höhe aufweist. Somit könnte als Folge eines Starkregenereignisses das Wasser dort in das Gebäude gelangen und zu einer möglichen Schadenssituation führen.

### 3.4. Modellvergleich Tygron Engine – HEC-RAS

#### 3.4.1. Ziel und Vorgehensweise

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Niederschlag-Abfluss-Modellen zur Visualisierung der Auswirkungen von Starkregenereignissen werden nachfolgend die Ergebnisse von zwei sehr unterschiedlichen Modellansätzen miteinander verglichen. Um die Vergleichbarkeit der Modellergebnisse zu

erhöhen, wurden zum einen vergleichbare Eingangsparameter und Randbedingungen verwendet, zum anderen wurden beide Modellierungen von demselben erfahrenen Team durchgeführt, um den Einfluss eines einzelnen Modellierers auf die Ergebnisse so weit wie möglich zu minimieren (Bauer 2022, Groth et al. 2023b).

Für die vergleichende Untersuchung wurde das Modellteilgebiet „Holbeinplatz-Schwanenteichpark“ ausgewählt, um die Ergebnisse der Abflussmodellierungen mit den Programmen HEC-RAS (Kap. 3.2.2) und Tygron Engine (Kap.3.3.2) miteinander zu vergleichen. Neben dem Ziel der Sensibilisierung der Nutzer:innen von Starkregengefahrenkarten zum kritischen Hinterfragen von Modellierungen, war es ein weiteres Ziel zu ermitteln, welche Aussagen in beiden Modellansätzen und welche Ergebnisse nur in einem Modellansatz sichtbar sind.

### 3.4.2. Ergebnisvergleich Tygron Engine – HEC-RAS

Generell zeigten beide Modelle eine ähnliche räumliche Ausdehnung der Überflutungen im Bereich des Holbeinplatzes, insbesondere unterhalb der Brücke und südlich der Werftstraße. Auch die berechneten Wassertiefen sind miteinander vergleichbar (Abb.5). Die ebenfalls deutlichen Überflutungen nördlich der Werftstraße wurden nur vom Tygron-Modell visualisiert, da sich dieser Bereich außerhalb des Modellgebietes von HEC-RAS befindet. Der Vergleich zeigt dabei eine typische Herausforderung in der Praxis, dass das Fehlen von Informationen dazu führen kann, die Gesamtsituation nicht richtig einzuschätzen, da wichtige Hot-Spots aus modelltechnischen Gründen – hier der Wahl eines zu kleinen Modellgebietes – bei der Entscheidungsfindung „vergessen“ werden. Aus diesem Grund sollte man Karten immer dann kritisch bewerten, wenn sich Hot-Spots in der Nähe von Modellrändern befinden, da eine größere Wahrscheinlichkeit besteht, dass relevante Flächen in ihrer räumlichen Ausdehnung nicht korrekt dargestellt werden.

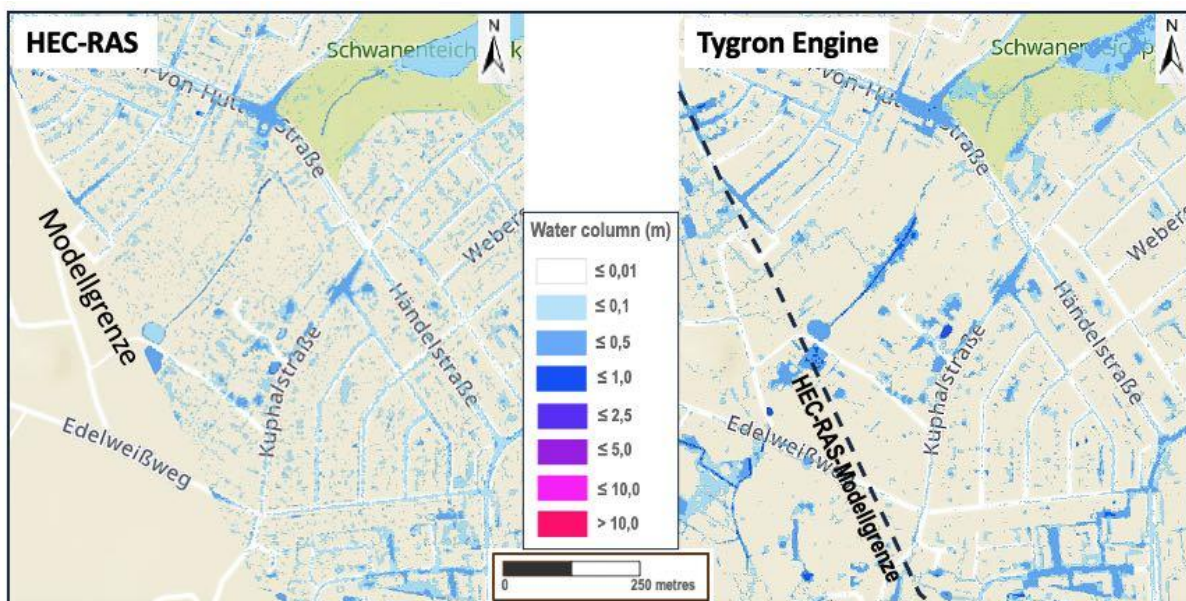


Abb.5: Vergleich der Überflutungsergebnisse berechnet mit HEC-RAS (links) und Tygron Engine (rechts), Kartenausschnitt (Bauer 2022).

Größere Unterschiede zwischen den Modellen zeigten sich in Bereichen, die sich etwas weiter entfernt von diesen Hot-Spots befinden. Bei der HEC-RAS-Modellierung trat eine größere Anzahl von Wasseransammlungen auf den Straßen auf, wohingegen bei der Tygron-Modellierung größere zusammenhängende Wasserflächen mit kleineren Wassertiefen zu sehen waren. Mögliche Gründe dafür sind die Wahl kleinerer Zeitschritte bei der Berechnung sowie die Berücksichtigung der Entwässerungskapazität stellvertretend für die Kanalisation. Dadurch wirkte das Aussehen der Tygron-Darstellungen klarer strukturiert. Groth et al. (2023b) geben darüber hinaus an, dass entlang des westlichen Rands des Modellgebiets von TYGRON Überschwemmungsgebiete modelliert werden, die im HEC-RAS-Modell nicht zu sehen sind. Als möglichen Hauptgrund führen sie an, dass die hydraulischen Verhältnisse in diesem Bereich stark von den Randbedingungen des jeweiligen Modells gesteuert werden. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, nur den zentralen Teil eines Modellgebiets für Interpretationen heranzuziehen, um den Einfluss der Modellgrenzen zu minimieren.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich beide Modelle für die Visualisierung der Starkregengefahren eignen. Eindeutige Hot-Spots und Hauptfließrichtungen werden von beiden Ansätzen ohne große Unterschiede dargestellt. Unterschiedliche Ergebnisse sind überwiegend auf Modelleinstellungen wie die Wahl der Randbedingungen oder die Berücksichtigung beziehungsweise das Fehlen einer Entwässerung nach unten (Infiltration oder Kanalisation) zurückzuführen. Im direkten Vergleich hat der Einsatz von TYGRON insbesondere bei der Modellierung größerer Gebiete deutliche Vorteile, da die beauftragte Firma mit ihrer Software auf eine höhere Rechnerleistung zurückgreifen kann. Dies ermöglicht auch die Ausgabe von 3D-Videos (Abb.6), die durch den gut erkennbaren Ortsbezug und eine eindrucksvollere Darstellung, sich häufig besser dafür eignen Entscheidungsträger:innen hinsichtlich der Problematik zu sensibilisieren.

Ein weiterer Vorteil dieses Programms ist es, dass viele Anfangs- und Randbedingungen auf Grundlage öffentlich verfügbarer Daten automatisiert festgelegt werden. Allerdings werden einige kleinräumige Prozesse des Wasserhaushalts im Modell nicht detailliert berücksichtigt (Bauer 2022). Die Stärke von HEC-RAS sind dagegen die flexibel wählbaren Rastereinstellungen, wodurch Analysen von Prozessen in kleinräumigen Gebieten detaillierter möglich sind. Zudem können sinnvolle Ergebnisse auch mit wenig verfügbaren Daten erzielt werden (Wübbelmann 2023, Bender et al. 2023a). Durch die Nutzbarkeit auf handelsüblichen PCs und relativ kurze Rechenzeiten können mit HEC-RAS Landnutzungsänderungen oder die Auswirkungen von Neubauten auf das Abflussverhalten schnell simuliert werden. Somit ist dieses Modell nicht nur sehr gut als Planungswerkzeug bei eingeschränkten finanziellen und personellen Ressourcen geeignet, sondern auch um die Wirkung unterschiedlicher technischer Anpassungsmaßnahmen visualisieren zu können.

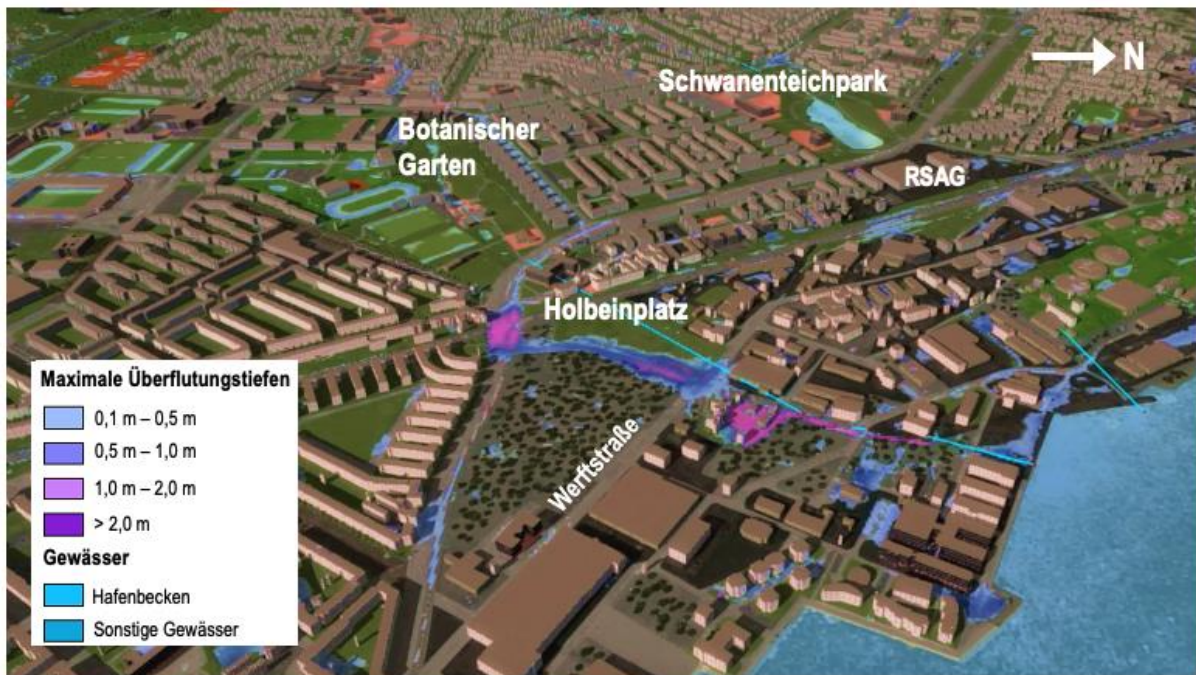


Abb.6: Screenshot aus dem TAUW-Video (verändert) zum Bericht „Das Abflussverhalten von Starkniederschlägen im Stadtgebiet Rostock mit der Software „Tygron“ (Ohligs & Bauer 2020).

### 3.5. Der Modellansatz mit LEAFlood

Um die Folgen des Klimawandels zu mindern, stehen Kommunen schon heute verschiedene Werkzeuge zur Verfügung (Bender et al. 2022). Neben technischen Lösungen können aber auch Ökosysteme einen wertvollen Beitrag dazu leisten. Diese „städtischen Ökosystemleistungen“ bilden eine Komponente innerhalb des „Nature Based Solution“-Konzeptes (Frantzeskaki et al. 2019), wobei als Anpassungsmaßnahmen Naturelemente – wie Straßenbäumen, Grünkorridoren oder Regengärten – zum Einsatz kommen (Kabisch et al. 2022, Hobbie & Grimm 2020). Im Hinblick auf die Folgen von Starkregenereignissen sind in unserem Beispiel auch die natürlichen flutregulierenden Ökosystemleistungen (fÖsl) von Interesse. Um die leistbaren Effekte beurteilen zu können, müssen die Einflüsse der verwendeten Ökosysteme vorab quantifiziert werden. Allerdings gibt es aktuell nur wenige Studien, die den Nutzen von fÖsl nach Starkregenereignissen untersucht haben (Haase et al. 2014, Shen et al. 2019), da die meisten hydrologischen Modelle andere Betrachtungsschwerpunkte besitzen.

#### 3.5.1. Modellierung mit LEAFlood

Durch den zunehmenden Einsatz von Naturelementen im urbanen Raum (Voskamp et al. 2021) wächst auch der Bedarf an Modellen, mit deren Hilfe unterschiedliche Anpassungsszenarien vorab simuliert werden können. Wübbelmann (2023) entwickelte dazu ein neues Modell, um die fÖsl im urbanen Raum hinsichtlich ihrer Funktionstauglichkeit unter sich ändernden Klimabedingungen untersuchen zu können. Ausgehend von den HEC-RAS-Modellergebnissen wurde dazu ein neues 2D hydrologisch-hydrodynamisches Modell, LEAFlood (Landscape and vEgetAtion-dependent Flood model), entwickelt (Wübbelmann & Förster 2022), das auf der modularen Programmbibliothek CMF (Catchment Modelling Framework) für hydrologische Modellierungen (Kraft et al. 2011) basiert. Ziel dieses Modells ist es, eine



detailliertere Darstellung von Interzeption, Kronendachverdunstung, Bodeninfiltration und Oberflächenabfluss auf Grundlage einzelner Landschaftselemente zu erhalten. Als Treiber dienen Zeitreihen meteorologischer Daten wie Niederschlag, Temperatur, Windgeschwindigkeit, relative Feuchte und Sonneneinstrahlung. Der laterale und vertikale Wasserabfluss wird durch Bodenkennwerte, die Topografie und die Oberflächenrauigkeit gesteuert.

Da die Modellgeometrie durch unregelmäßige Polygone definiert wird, kann das Modellgebiet sehr flexibel gewählt werden. Im vorliegenden Fall umfasste es eine Fläche von 4,5 km<sup>2</sup> (Abb.7). Es wurde im Süden von der Satower Str. und der Parkstr., im Westen von einer Linie Rennbahnallee – Kreisverkehr Ulrich-von-Hutten-Str./Goerdeler Str., im Norden von einer Linie Kreisverkehr Ulrich-von-Hutten-Str./Goerdeler Str. – Kreuzung Eikbomweg/Upundalsprung und im Osten von einer Linie Kreuzung Werftstr./Max Eyth Str. – Kreuzung Maßmannstr./ Adolf-Becker-Str. begrenzt.

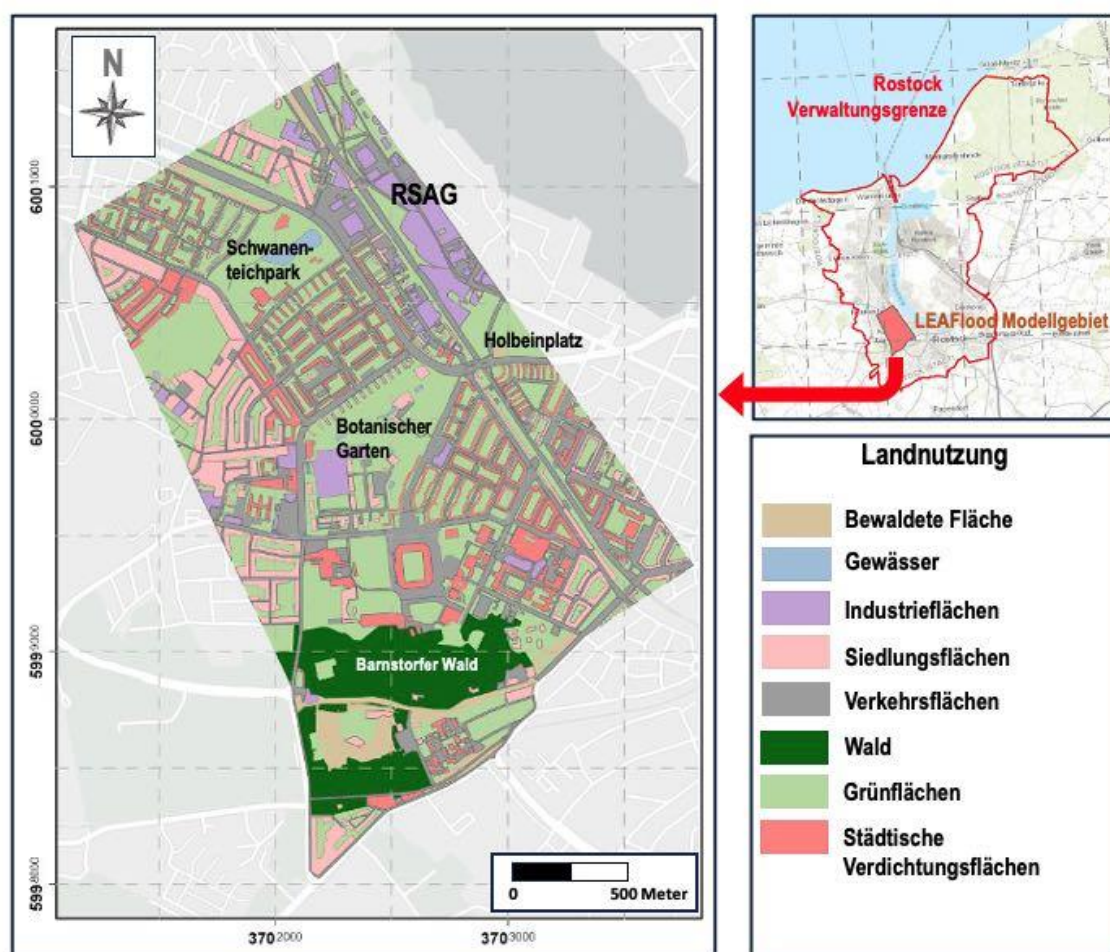


Abb.7: Modellierung mit LEAFlood: Modellgrenzen (Wübbelmann 2023).

Das Modellgebiet weist einen großen Anteil an Grün- und Waldflächen sowie Flächen mit vereinzeltem Baumbestand (hier als Kategorie bewaldete Flächen ausgewiesen) auf (zusammen 50%), wie den Schwanenteichpark, den Barnstorfer Wald oder den Botanischen Garten. Daneben findet sich aber auch ein großer Prozentsatz an Siedlungs-, Industrie- und Verkehrsflächen (zusammen 48%) (Wübbelmann 2023).

Ein Hauptziel der Modellierungen war es, unterschiedliche Landnutzungen und Niederschlagsereignisse im Hinblick auf die sich daraus ergebenden Bedarfe für flutregulierende Maßnahmen (kurz: Bedarfe) sowie für bestehende Potentiale zur Regulierung der Überflutungen (kurz Angebote) gegenüberzustellen. Durch diesen Vergleich können Gebiete identifiziert werden, in denen ungedeckte Bedarfe bzw. ein Angebotsüberschuss vorliegen. Obwohl die Ergebnisse nicht als Absolutwerte wiedergegeben werden, spiegeln sie dennoch Bereiche wider, die gegenüber einer Überflutung anfällig sind oder nicht. Die erzeugten Karten zeigen hierbei die Beiträge natürlicher Ökosysteme zur Hochwasserregulierung.

Bei der Bewertung der Ergebnisse gilt es zu berücksichtigen, dass der Modellansatz keine Entwässerung durch eine Kanalisation beinhaltet, wodurch die flutregulierenden Bedarfe etwas überschätzt werden. Die Abweichungen können jedoch als untergeordnet betrachtet werden, da bei einem kurzzeitigen Starkregenereignis typischerweise so große Wassermengen auftreten, dass die Kapazität der städtischen Entwässerungssysteme in Rostock überschritten wird (Miegel et al. 2014).

Da ein zeitlich kurzes, einstündiges Starkregenereignis, das auf wassergesättigten Boden fällt, den Untersuchungsgegenstand bildete und das Geländere relief im Untersuchungsgebiet relativ flach ist, wurde ein Wasserzufluss aus benachbarten Gebieten vernachlässigt. Gründächer, die ein großes Potential zur Hochwasserregulierung besitzen (Zölch et al 2017), sind im Modell ebenfalls nicht implementiert, da auf Satellitenbildern keine erkennbar waren.

### **3.5.2. LEAFlood-Ergebnisse**

Die Modellierungen von Wübbelmann et al. (2022) bestätigten die Ergebnisse von Burkhard & Maes (2017), dass die Interzeption durch die Vegetation die wichtigste Komponente bei den fÖsl darstellt, insbesondere wenn der Boden stark wassergesättigt ist. Dabei weisen alle Grün- und Waldflächen, positive flutregulierende Wirkungen auf. Von besonderer Bedeutung sind hier Stadtbäume, die durch ihren großen Kronenumfang eine hohe Abfangkapazität aufweisen (Carlyle-Moses et al. 2020).

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Angebotskapazität der vorhandenen Ökosysteme – also das Vermögen dort Wasser aufzunehmen – schon heute bei Starkregen erreicht oder überschritten wird, was zu Überflutungen führt. Morphologische Senken und tiefergelegene Bereiche, wie beispielsweise der Holbeinplatz, weisen einen hohen Regulierungsbedarf auf, was mit einer hohen Überflutungsgefahr gleichgesetzt werden kann. Intensivere Starkregenereignisse, wie sie zukünftig zu erwarten sind, werden den Bedarf an hochwasserregulierenden Maßnahmen noch weiter erhöhen (Abb.8).

Um die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen und intensiveren Starkregenereignissen zu untersuchen, führten Wübbelmann et al. (2023) eine Szenarienanalyse unter Verwendung von zukünftigen Klimabedingungen bei gleichzeitiger Implementierung von Anpassungsmaßnahmen (mehr Bäume, mehr entsiegelte Flächen) durch. Allerdings zeigte sich schon im Modellaufbau, dass es eine große Herausforderung ist, im aktuellen Bestand ausreichend Flächen für Anpassungsmaßnahmen zu finden. Vor allem weil die unterschiedlichen Maßnahmen wie Baumneupflanzungen oder die Entsiegelung auf dieselben Flächen abzielen.

Die Modellergebnisse belegten, dass eine Vergrößerung der Baumkronenfläche eine größere Wasserreduktion bewirkt als Entsiegelungsmaßnahmen. Dies gilt insbesondere dann, wenn a) gesättigte oder trockene Böden vorliegen, da dann keine Infiltration stattfinden kann, oder b) die vorhandenen Flächen



### **3.5.3. LEAFlood-Fazit**

Eine Erhöhung der Niederschlagsintensität führt zu einer Verringerung der Rückhaltewirkung einzelner natürlicher Systeme. Somit werden im Hinblick auf zukünftige intensivere Starkregenereignisse weitere Anpassungsmaßnahmen – sowohl natürlich als auch technisch – benötigt, die es sinnvoll zu kombinieren gilt (Smets et al. 2019).

Da viele Anpassungsmaßnahmen im Bestand immer auf denselben Landnutzungen (hauptsächlich Verkehrs- und Grünflächen) stattfinden und somit um Fläche konkurrieren, müssen für eine Optimierung der Anpassung weitere bisher nur wenig genutzte Flächen, wie beispielsweise Dach- und Fassadenflächen, herangezogen werden. Zusätzlich ist es sinnvoll, Oberflächenwasser gezielt in die Bereiche zu leiten, in denen eine temporäre Überflutung keine nennenswerten Schäden anrichtet.

### **3.6. Modellergebnisse und Schlussfolgerungen**

Wie der Einsatz unterschiedlicher Modellansätze zeigt, sind bereits viele Werkzeuge verfügbar, die für die Simulation aktueller und zukünftiger Überflutungsrisiken in Bezug auf die vorhandene oder geänderte Flächennutzung verwendet werden können. In Tab.4 sind dazu die im Modellgebiet Holbeinplatz-Schwanenteichpark verwendeten Modelle nochmals vergleichend gegenübergestellt. Auch wenn sich im Detail nicht alle Aussagen decken, so bekräftigen jedoch alle drei Modellierungen, dass der Holbeinplatz, der eine zentrale Rolle im öffentlichen Nahverkehr spielt, insbesondere bei Starkregenereignissen eine hohe Überflutungsgefahr aufweist. Angesichts einer zu erwartenden zunehmenden Häufigkeit (Bender et al. 2019) und wahrscheinlich größeren Intensität (Dahm et al. 2020) von Starkregenereignissen in dieser Region, werden proaktive Anpassungsmaßnahmen für den Holbeinplatz dringend empfohlen, um dort die Resilienz zu erhöhen. Im Fall der Überflutungen im Umfeld der Werftstraße bestehen lokale Gefährdungen für einige Gebäude einschließlich eines Tankstellengeländes. Die hydraulische Dynamik zwischen dem Holbeinplatz und dem Hafen wird durch mehrere Straßenquerungen – u.a. die Werftstraße – geprägt, weshalb es hier sinnvoll wäre, die Modelle nochmals durch eine Vor-Ort Begehung zu verifizieren, um beispielsweise den aktuellen Zustand von Straßendurchlässen zu kartieren. Je nach dem vorgefundenen Zustand haben sie einen unterschiedlichen Einfluss auf das Ablaufverhalten des Oberflächenwassers, einschließlich dem Aufstau vor Fließhindernissen.

Basierend auf den Abflussmodellierungen können Abfluss- und Akkumulationsgebiete leicht eingrenzt werden. Kombiniert man die Modellergebnisse mit Beobachtungen historischer Ereignisse, so können die größten Überschwemmungsflächen sehr einfach identifiziert werden. Innerhalb des betrachteten Modellgebiets „Holbeinplatz-Schwanenteichpark“ sind die Gefährdungen durch Überschwemmungen nach Starkregenereignissen lokal begrenzt, da sich – ohne Berücksichtigung von Fließhindernissen – vor allem tiefer gelegene Bereiche mit Wasser füllen. Das können natürliche Senken sein, wie am Holbeinplatz, aber auch Lichtschächte, Kellerabgänge und -wohnungen oder Tiefgaragen.

Tab. 4: Zusammenfassender Überblick der in Rostock verwendeten hydrologischen Modelle

Eingabeparameter und Randbedingungen	HEC-RAS	Tygron Engine	LEAFlood
Modellgebiet	Holbeinplatz-Schwanenteichpark	Holbeinplatz-Schwanenteichpark und Umgebung	Holbeinplatz-Schwanenteichpark
Hydraulische Strukturen	nein	nein	nein
Bodeneigenschaften	ja	ja	ja
Rauigkeitsfaktor	ja	ja	ja
Topographie	DGM1	DGM1 + DGM20	DGM1
Gitterzellen	5 x 5 m	1 x 1 m (315 Millionen Zellen)	1 x 1 m (4.750 Zellen)
Art des Gitters	flexibles Gitter möglich	Nur starres Gitter möglich	flexibles Gitter möglich
Größe des Modellgebiets	4,5 km <sup>2</sup>	10,5 km <sup>2</sup>	4,5 km <sup>2</sup>
Infiltration	Nur durch die Landnutzung kontrolliert	Abhängig vom K-Wert und Bodeneigenschaften	Abhängig von Green-Ampt Infiltration und Brooks-Corey Retention Curve
Kanalnetz	nein	Vereinfachte Aufnahmekapazität: 10,82 mm/h unter den Zellen mit Nutzung „Straße“	nein
Interzeption	nein	nein	ja
Evapotranspiration	nein	Ja, minimal	Verdunstung im Blätterdach
Niederschlagsereignis	43,5 mm in 1h	43,5 mm in 1h	21,74 / 26,31 / 27,83 mm in 1 h
Maximale Abflussgeschwindigkeit	20 m/s	2,5 m/s	Dieser Parameter wurde nicht betrachtet
Hardware	PC oder Laptop	Supercomputer	PC oder Laptop
Maximale Überflutungshöhe	Bis zu 2,5 m	Bis zu 10 m	Bis zu 2,05 m (aktuelle Bedingungen) Bis zu 4,7 m (in 2°C-Welt)

Beim Implementieren von Gebäude- und Bauwerksdaten sowie beim Arbeiten mit digitalen Höhenmodellen wird hier nochmals auf die große Bedeutung der Modellvalidierung hingewiesen. So können häufig numerische Strömungshindernisse entstehen, da nicht alle Durchlässe in Luftbildern erkennbar sind und diese nachträglich in das Modell eingepflegt werden müssen. So wurden beispielsweise beim Ansatz mit Tygron Engine und HEC-RAS einige Durchlässe nach einer Vor-Ort-Kartierung ins Modell eingebaut. Zudem können Wasserhöhen in einigen Bereichen auch überschätzt werden, da das Wasser nicht in Gebäude eindringen kann und sich dort aufstaut (Hofmann & Schüttrumpf 2019).

## 4. Anpassung an Überflutungen aufgrund von Starkregen

### 4.1. Anforderungen an die Anpassung im Verkehrssektor

Wie Beobachtungen vielerorts belegen, werden unterschiedliche Teile der Verkehrsinfrastruktur zunehmend von extremen Wetterereignissen betroffen. Da diese Ereignisse in der Zukunft zunehmen werden, müssen proaktiv entsprechend geeignete Anpassungsmaßnahmen und langfristige Lösungsansätze implementiert werden. Um die Transformation des Verkehrssektors hin zu einem klimawandel-tauglichen und emissionsarmen Sektor zu bewerkstelligen, müssen Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Anpassung Hand in Hand gehen.

Zur Minderung der Treibhausgasemissionen stehen zahlreiche Optionen und Technologien zur Verfügung (Bender et al. 2022). Viele dieser Minderungsstrategien hätten verschiedene zusätzliche positive Nebeneffekte, darunter die Verbesserung der Luftqualität oder gesundheitliche Vorteile (IPCC 2022b). Das übergeordnete Ziel aller Maßnahmen muss es sein, ein funktionsfähiges und sicheres Verkehrssystem zu gewährleisten. Im Wesentlichen müssen mit den Maßnahmen folgende Teilziele verfolgt werden: a) Vermeidung und Minderung von Schäden an der Verkehrsinfrastruktur, b) Schutz der Verkehrsmittel und der Verkehrsteilnehmenden, c) Monitoring der Anpassungserfolge beziehungsweise von Schäden, d) Bewusstseinsbildung bei den Betreibern und Fahrgästen, e) Entwicklung von Strategien zum Umgang mit nicht vermeidbaren Restrisiken und f) Aufrechterhaltung der öffentlichen Mobilität.

Aufgrund der vielen Schienen, Straßen- und Flusskilometer mit unterschiedlichen umweltspezifischen Randbedingungen ist die Anpassung des Verkehrssektor jedoch keine einfache Aufgabe. Als weitere Erschwernisse kommen eine Vielzahl legislativer Vorgaben und Normen, eine sehr große Anzahl verwendeter Materialien, Bauwerke und Fahrzeuge sowie letztlich viele beteiligte Akteure hinzu. Neben den geografischen Herausforderungen, die mit Hilfe von Modellen visualisiert werden können, müssen allerdings auch bisherige Gewohnheiten – innerhalb des Betriebs (wie Arbeitsprozesse) aber auch von Nutzerseite – an die neuen Herausforderungen angepasst werden, zum Beispiel durch eine geeignete Risiko- und Betroffenheitsanalyse. Eine solche kann durchgeführt werden, um wesentliche Klimarisiken zu identifizieren, diese zu priorisieren, mögliche Maßnahmen abzuleiten und auch um die Notwendigkeit und Verhältnismäßigkeit proaktiver Instandhaltungsmaßnahmen zu diskutieren. Diese Vorgehensweise kann für Entscheidungsträger:innen eine große Herausforderung darstellen, vor allem dann, wenn die mit den abgeleiteten Maßnahmen erzielbaren Erfolge sich nicht unmittelbar, sondern erst langfristig in der Zukunft einstellen. Da Planungszeiträume für Infrastrukturprojekte aufgrund aufwändiger Planungs- und Genehmigungsverfahren zumeist 3 bis 5 Jahre überschreiten und die Lebensdauer von gebauten Infrastrukturen oft einen Zeitraum von 30 bis 80 Jahren umfassen können, müssen hier potenzielle Veränderungen mitgedacht werden (EC 2021, Palin et al. 2021, Norpoth et al. 2020). Zudem zeigen aktuelle Entwicklungen, nicht nur im Bereich der kritischen Infrastruktur, dass kurzfristige Einsparungen und die Wahrung des Status Quo aus Bequemlichkeit auf lange Sicht hohe Kosten erzeugen (Sanderson & O'Neill 2020). Aus diesem Grund muss das Bewusstsein für die zu erwartenden Folgen des Nicht-Handelns noch klarer kommuniziert und mit praktischen Beispielen, am besten mit lokalem Ortsbezug, sowohl den potenziell Betroffenen als auch den Entscheidungsträger:innen aufgezeigt werden. Damit werden auch die vielfältigen Folgen des Klimawandels greifbarer, was für das Handeln förderlich sein kann.

In Bezug auf die Ableitung beziehungsweise Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen muss generell unterschieden werden zwischen denen, die in der Planung (Neubau) und die im Bestand umgesetzt werden sollen. In beiden Fällen haben sich als Arbeitsgrundlage zur Ableitung und Planung entsprechender Maßnahmen Instrumente, wie eine regionale Risikokartierung und/oder die Verwendung digitaler Modelle bewährt. Während die Kartierung auf historischen Beobachtungen aufbaut, können mit Hilfe von Modellen Ist-Zustände und vorgegebene Szenarien simuliert werden (Bender et al. 2023b).

Um den Folgen von Starkregenereignissen zu begegnen, wird häufig darauf verwiesen, dass Entwässerungssysteme verbessert werden sollen. Im urbanen Raum ist es daher äußerst sinnvoll, die dazu notwendigen Maßnahmen in die Entwicklungsstrategien für den Aufbau klimaresilienter und gerechter Städte zu integrieren (Sims et al. 2014). Auch großräumige Flächenentsiegelungen gehören zu den Anpassungsmaßnahmen, die häufig genannt werden (Bender et al. 2022). Diese haben darüber hinaus noch den Vorteil, die Hitzebelastung in der Stadt zu senken und die Grundwasserneubildung zu erhöhen. Wie die Modellierungen in Kap.3.5. aber auch zeigen, können nennenswerte Effekte nur dann erzielt werden, wenn ausreichend Flächen entsiegelt werden können. Ein generell hohes Entsiegelungspotential besitzen alle überdimensionierten Verkehrsflächen, großflächige Parkplätze oder Industrieflächen. Hier kann mit Grünstreifen oder versickerungsfähigen Belegen gearbeitet werden. Auch wenn letztgenannte höhere Instandhaltungskosten aufweisen, so liegen diese deutlich unter den Folgekosten, die durch Überflutungen entstehen (CCAP 2011).

Für die Planung einer klimaresilienten Infrastruktur ist es zurzeit gängige Praxis, dass auf Normen und Richtlinien zurückgegriffen wird, die nur unzureichend oder stark vereinfacht die zukünftigen Folgen des Klimawandels berücksichtigen. Häufig gehen die bestehenden Baustandards von konstanten Umweltbedingungen aus (Felderer et al 2022), die aus Beobachtungsdaten abgeleitet werden. Damit bilden sie lediglich vergangene klimatische Bedingungen ab, die maximal einem Klimazuschlag erhalten (Köppke et al. 2013). Für ein vorsorgeorientiertes Bauen, Betreiben und Aufrechterhalten der Verkehrsstruktur ist es jedoch unerlässlich, die sich zukünftig verändernden klimatischen Bedingungen zu berücksichtigen (BMK 2021b).

Einen Aspekt, der bei der Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen häufig vergessen wird, ist die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der Maßnahmen. Hierfür müssen, wie auch für die Instandhaltung der Infrastruktur, jährlich Gelder und Ressourcen zur Kontrolle, Feinjustierung und Optimierung eingeplant werden. Auch müssen Wartungs- und Instandhaltungsintervalle bedarfsgerecht erarbeitet werden. Darüber hinaus ist es sinnvoll, nach der Realisierung der Maßnahmen ein intensives Monitoring zu betreiben, um Schäden oder Schwachstellen frühzeitig erkennen zu können.

Im Rahmen der Vorsorge sollten vorausschauend Maßnahmen erarbeitet und getestet werden, wie man mit einzelnen Störungen, Verspätungen oder Ausfällen umzugehen hat. Dazu gehören mittelfristige Maßnahmen – wie etwa die Planung von Ersatzstrecken, um Hot-Spots umgehen zu können – oder auch langfristige Maßnahmen – wie das Überdenken der Trassenführung oder größere baulichen Anpassungsmaßnahmen insbesondere in Hochrisikogebieten. Wichtig bei diesen Planungsprozessen ist es, eine Herangehensweise zu wählen, bei der sämtliche direkte und indirekte Anfälligkeiten für Wetterextreme und veränderte klimatische Bedingungen berücksichtigt werden. Dies schließt sowohl die Maßnahmen selbst als auch die geplanten Notfall- und Rettungspläne mit ein. Für den gesamten Prozess ist es ratsam, eine verstärkte Zusammenarbeit aller relevanten Akteure zu initiieren.

## 4.2. Verkehrsinfrastruktur als Teil der Stadt

Die Verkehrsinfrastruktur ist ein relevanter Baustein der kritischen Infrastruktur, die eine Stadt benötigt, um reibungslose Abläufe zu ermöglichen (BBK 2021, BBK 2020)). Somit müssen auch die Entscheidungsträger:innen einer Stadt, die klimaneutral und klimaresilient werden will, daran denken, dass alle Komponenten, die den Verkehrssektor direkt oder indirekt betreffen, vor den Folgen des Klimawandels zu schützen. Dabei kann die Sichtweise auf den Verkehrssektor auch etwas von derjenigen abweichen, die beispielsweise ein Betreiber des ÖPNV besitzt. Es gibt aber auch viele Parallelen. So ist es sowohl für den Betreiber als auch für die Stadtverwaltung wichtig, die Gefährdung von Strukturen und Funktionen zu ermitteln und zu beseitigen beziehungsweise zu mindern. Für die Stadtverwaltung bedeutet dies im besten Fall eine ämterübergreifende Koordination, da aktuell verschiedene starr definierte Zuständigkeitsbereiche durch die vielfältigen Klimawandelfolgen direkt oder indirekt betroffen sein werden, und Querschnittsaufgaben noch immer nicht überall klar definiert sind. Darüber hinaus ist es sinnvoll, enger mit wichtigen Entscheidungsträger:innen, unter anderem den Betreibern kritischer Infrastruktur, zusammen zu arbeiten.

Bei vielen Kommunen ist die Grundstruktur der Verwaltungen immer noch sektoral und nach Fachbereichen getrennt. Aus diesem Grund wird der Aufbau von Expert:innen-Netzwerken immer essenzieller, wobei es wichtige Schnittstellen zwischen Handlungsfeldern und Zuständigkeiten zu besetzen gilt, da alle Handlungsfelder im urbanen Raum von den Folgen des Klimawandels betroffen sein werden (Revi et al. 2014). Bei der klimaangepassten Stadtentwicklung muss – wie bei einem Unternehmen – zwischen kurzfristigen, einzelbezogenen Objekt- und Gestaltungsplanungen und langfristigen Maßnahmen in Form der Entwicklung und Umsetzung integrierter Entwicklungskonzepte beziehungsweise des Infrastrukturaumbaus unterschieden werden. Kurzfristige, objektbezogene Maßnahmen führen zu lokalen Verbesserungen, können im Gesamtkontext aber auch mehr Schaden als Nutzen bringen. So kann beispielsweise die Erhöhung von Hochwasserdeichen an einem Standort dort das Überflutungsrisiko minimieren, flussabwärts das Gefährdungs- und Schadenspotenzial aber deutlich erhöhen.

Darüber hinaus bedeutet dies für Kommunen aber auch, dass es zukünftig immer wichtiger wird, Gefährdungs- und Ausfallrisiken bei kritischen Infrastrukturelementen zu kennen, um proaktive Maßnahmen zur Risikominderung erarbeiten zu können. Dies gilt gleichermaßen für Gebäude und technische Anlagen und schließt insbesondere alle Komponenten mit ein, die eine elektrische Energieversorgung benötigen. Als typische Anpassungsmaßnahmen, beispielsweise um das Schadenspotential von Überflutungen nach Starkregenereignissen zu verringern, werden in Anpassungsstrategien immer wieder folgende Maßnahmen genannt (Bender et al. 2022):

- Schaffung zusätzlicher (temporärer) Rückhalteflächen einschließlich zugehöriger Notwasserwege, um Wasser gezielt in Bereiche zu lenken, in denen keine größeren Schäden auftreten
- Erhöhung flutregulierender Ökosystemleistungen innerhalb des zu schützenden Bereichs sowie in seinen Zustromgebieten
- Entsiegelung von Flächen, um Infiltrationsmengen zu erhöhen.
- Maßnahmen zur Motivation und Unterstützung der Eigenverantwortung von Grundstück- und Objekteigentümer:innen
- Prüfung und Verbesserung des Objektsschutzes unter besonderer Berücksichtigung der kurzen Vorwarnzeiten



Generell müssen Maßnahmen der Stadtbe- und -entwässerung mit Maßnahmen der Stadtplanung und Stadtentwicklung verbunden werden. Dabei gilt es jeweils die aktuellen und zukünftigen standort-spezifischen Rahmenbedingungen zu beachten. Aus städtebaulicher Sicht ist es sinnvoll die Herausforderungen gebündelt und gemeinsam zu betrachten, um effiziente Anpassungsmaßnahmen für den gesamten urbanen Raum entwickeln zu können. Dazu werden beispielsweise kombinierte Multi-Gefahrenkarten mit unterschiedlichen Bezeichnungen vorgeschlagen (Bender et al. 2022).

Mit Blick auf das Untersuchungsgebiet fand mit dem Workshopformat „Schwammstadt 2080“ ein erster Ansatz zur gebündelten Betrachtung in der Hansestadt Rostock statt. Bei der Auftaktveranstaltung waren die Betreiber des ÖPNVs allerdings noch nicht sichtbar involviert.

Wie in Kap. 3 gezeigt wurde, ist der Einsatz hydrologischer Modelle für das gesamte Stadtgebiet ein wichtiges Werkzeug, um zunächst in digitaler Form Maßnahmen entwickeln und vergleichen zu können, die einerseits die Auswirkungen von Starkregen minimieren und andererseits, die Funktionalität der kritischen Infrastruktur – im speziellen des ÖPNV – gewährleisten helfen. Darüber hinaus wächst die Bedeutung von Nature Based Solutions für die Regenwasserbewirtschaftung.

### **4.3. Nature Based Solutions (NBS)**

Die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen klimatischen und nichtklimatischen Einflüssen zeigen, dass integrative Lösungen erforderlich sind, um innerhalb einer Stadt, mit all seinen miteinander in Beziehungen stehenden, unterschiedlichen Akteursgruppen, positive Wirkungen für das Klima sowie die Lebensqualität und Gesundheit der Stadtbevölkerung zu erzielen. Bei Anpassungsmaßnahmen richtet sich der Blick vermehrt auf die Ansätze, die neben der Anpassung an die Folgen des Klimawandels auch zum Klimaschutz und im besten Fall noch darüber hinaus dem Umwelt- oder dem Naturschutz beitragen. Die Erhöhung des Grünflächenanteils stellt hier eine der wirkungsvollsten Maßnahmen dar (BMUB 2015). Um das Potenzial bestmöglich ausschöpfen zu können, sind funktionale zusammenhängende und miteinander vernetzte Grünflächen (wie Parks, begrünter Straßenraum oder Grünkorridore) notwendig. Allerdings bestehen bei der Umwandlung von grauer (technische gebaute Infrastrukturelemente ohne Integration von Grünelementen) zu grüner Infrastruktur (natürliche und naturnahe Flächen) innerhalb der Stadt einige Grenzen für die Umsetzung (Abb. 9).

Prinzipiell besitzen ökosystem- oder naturbasierte Lösungen (Nature Based Solutions, NBS) als Universallösung größere Vorteile als technische Maßnahmen. Unter den NBS finden sich die etablierten Ansätze wie „Ökosystemdienstleistungen“, unter anderem auch die in Kap. 3.5 beschriebenen flut-regulierenden Ökosystemdienstleistungen, oder Ansätze zur grün-blauen-Infrastruktur wieder (Nesshöver et al. 2017). Die Europäische Kommission definiert NBS als Maßnahmen, die von der Natur inspiriert und unterstützt werden und gleichzeitig ökologische, soziale und wirtschaftliche Vorteile bieten. Das NBS-Konzept hat wegen seiner Synergieeffekte und der Berücksichtigung von Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Handlungsfeldern ein großes Potential für die Entwicklung klimaresilienter Städte (Raymond et al. 2017), da vor allem die Komponente Natur schwer zu ersetzende Dienstleistungen für die menschliche Gesundheit und das Wohlbefinden erbringt (Keeler et al. 2019, McPhearson 2022).

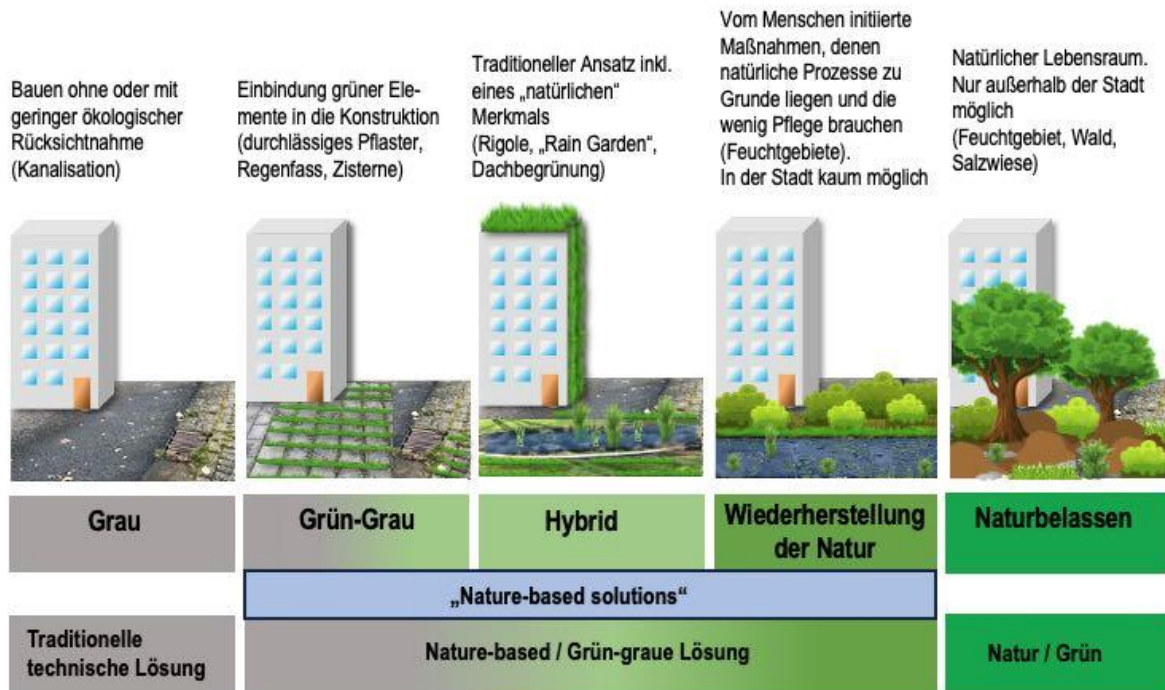


Abb.9: Anpassungsmaßnahmen in der Stadt – das grün-graue Kontinuum (nach Roca et al. 2017 und Martin et al. 2021, verändert).

Die ökosystembasierte Anpassung zielt darauf ab, Ökosysteme wiederherzustellen und die Ökosystemdienstleistungen zu verbessern. Dadurch können die Folgen des Klimawandels gemindert werden und darüber hinaus noch weitere Vorteile, wie die Schaffung gesundheitsfördernder Umwelten oder Erhöhung der Biodiversität, liefern. Die Wirksamkeit der NBS hängt jedoch stark von Faktoren wie dem Kapazitätsaufbau – d.h. dem Prozess Fähigkeiten zu mobilisieren und anzupassen, um eine nachhaltige Entwicklung zu gestalten – und ausreichenden finanziellen Mitteln (zum Bau und der regelmäßigen Instandhaltung) ab. Auch das Einbeziehen lokaler Akteure ist von entscheidender Bedeutung, um die Projekte und Maßnahmen auch über längere Zeiträume so zu unterstützen, dass ihre Funktionalität gewahrt bleibt.

Da die verwendeten Ökosysteme selbst vom Klimawandel betroffen sein können, sollte vorab ihre aktuelle und zukünftige Funktionsfähigkeit analysiert werden (vgl. dazu Bender et al. 2017b), um bei Bedarf unterstützende und funktionserhaltende Maßnahmen im Voraus mitplanen zu können. In Bezug auf flutregulierende Ökosystemleistungen und ihre potenziellen Veränderungen durch den Klimawandel gibt es bisher nur wenig Untersuchungen, wie beispielsweise von Zölch et al. (2017) oder Wübbelmann et al. (2023). Beide Studien kommen zu dem Schluss, dass nur durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen eine bestmögliche Anpassung erreicht werden kann. Auch wenn das Pflanzen von Bäumen und eine weitere Entsiegelung und Begrünung des Straßenraums zu einer Verringerung der Überflutungsgefährdung führen, so ist es gerade im Bestand notwendig, bei begrenzten nutzbaren Flächen und herrschenden Flächenkonkurrenz, weitere und bisher ungenutzte Potentiale zu mobilisieren beziehungsweise bisherige Vorgehensweisen und Strategien in Frage zu stellen. Vielversprechende praktische Ansätze hierzu bietet das Konzept „Blue-Green-Streets“ (BlueGreenStreets 2020), bei dem graue und grüne Infrastruktur kombiniert werden. In den letzten Jahren sind dadurch unter anderem

klimaangepasste Platzgestaltungen in Frankfurt am Main (Stadt Frankfurt am Main 2023) und das Projekt Leipziger Blau-Grün (Leipziger BlauGrün 2023) entstanden.

Darüber hinaus könnte der verstärkte Einsatz digitaler Zwillinge dazu genutzt werden, um mögliche Szenarien (z.B. Überschwemmungen) digital miteinander zu vergleichen (Bender et al. 2023b), um so vulnerable Orte proaktiv zu erkennen und/ oder für die Wirkungen ausgesuchter Anpassungsmaßnahmen eine Rangfolge erstellen zu können (Bender et al. 2023a).

#### **4.4. (Früh-)Warnsysteme als Anpassungsunterstützungsmaßnahme**

##### **4.4.1. Allgemeines**

Eine häufig gewählte Anpassungsmaßnahme, um Schäden durch Extremwetterereignisse zu mindern oder zu vermeiden, ist der Einsatz von (Früh-)Warnsystemen (New et al. 2022), die durch die Erstellung abgestimmter Alarm- und Einsatzpläne ergänzt werden. Generell können Frühwarnsysteme für Sturzfluten in vier Kategorien eingeteilt werden (Acosta-Coll 2018):

- Warnsysteme basierend auf Niederschlagsmessungen (einschließlich Wetterradar) und damit verbundene Kurzzeitvorhersagen
- Drahtlose Sensornetzwerke zur Messung atmosphärischer Variablen
- Messnetze zur Überwachung von Wasserständen in Fließgewässern und Entwässerungskanälen
- Warnsysteme basierend auf konzeptionellen hydrologischen Modellen zur Abschätzung der aktuellen Hochwassergefahr

Das (Früh-)Warnsystem sollte als weitere Komponente vorgegebene Verbreitungswege beispielsweise für spezifische Informationen, für das Notfallmanagement, für die Freihaltung verkehrsrelevanter Unterführungen und Rettungsrouten oder für die Koordinierung der Aufräum- und Reparaturmaßnahmen nach einem Extremwetterereignis enthalten. Der Betrieb von Frühwarnsystemen ermöglicht es, kurzfristig und gezielt Warnungen zu versenden oder potenzielle Gefahrensituationen darzustellen (Buchholz et al. 2013). Als Grundlage für die Gefahrenabschätzungen dienen häufig Beobachtungen und Informationen zu historischen Schadensereignissen.

Bei Überlegungen zur Anpassung muss berücksichtigt werden, dass Überflutungen nach Starkregenereignissen jederzeit und überall auftreten können. Dadurch dass diese Ereignisse zumeist sehr kleinräumig sind, können genaue Vorhersagen nur kurzfristig getätigt werden (Carpenter et al. 1999), weshalb zum Schutz vor den Überflutungen festinstallierte Maßnahmen vorzuziehen sind. Zudem gilt es zu bedenken, dass Überflutungen nicht immer dort entstehen, wo der Niederschlag fällt, da sich das Wasser auf oberirdischen Fließwegen in Richtung tiefer gelegener Gebiete bewegt. Ob ein Starkregen zu Überflutungen führt, hängt von vielen Faktoren ab, wie der Regenintensität, dem Geländere relief, der Bebauung, der Landnutzung, den Bodeneigenschaften oder der Vorsättigung des Bodens. Aus diesem Grund sind die Abflussbedingungen hochkomplex und variieren in Raum und Zeit (Creutin et al. 2013).

Zur Warnung vor Überflutungen werden automatisierte sensorgestützte Monitoringsysteme als vorteilhaft angesehen, mit denen die zeitliche Entwicklung von Wasserständen verfolgt werden kann. Abbildung 10 zeigt die typischen Hauptkomponenten eines (Früh-)Warnsystem-Prototyps.

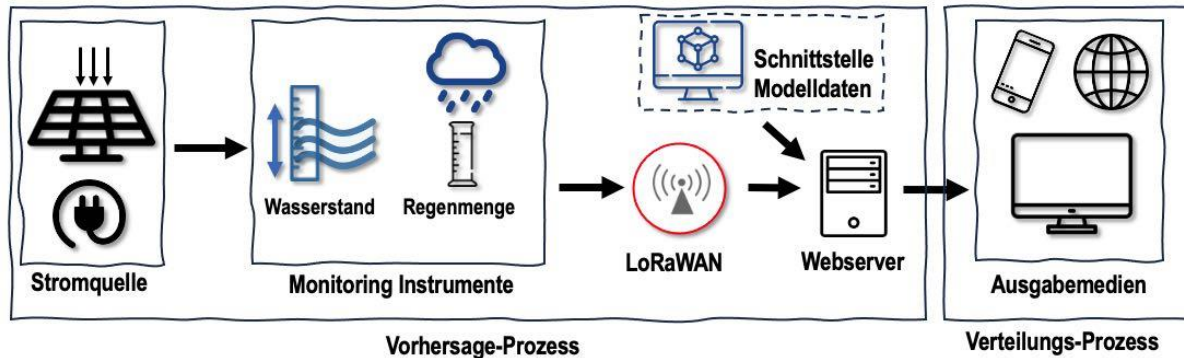


Abb.10: Schematischer Aufbau eines Frühwarnsystem-Prototyps nach Acosta-Coll et al. 2021, verändert.

#### 4.4.2. Machbarkeitsstudie für den Standort Holbeinplatz

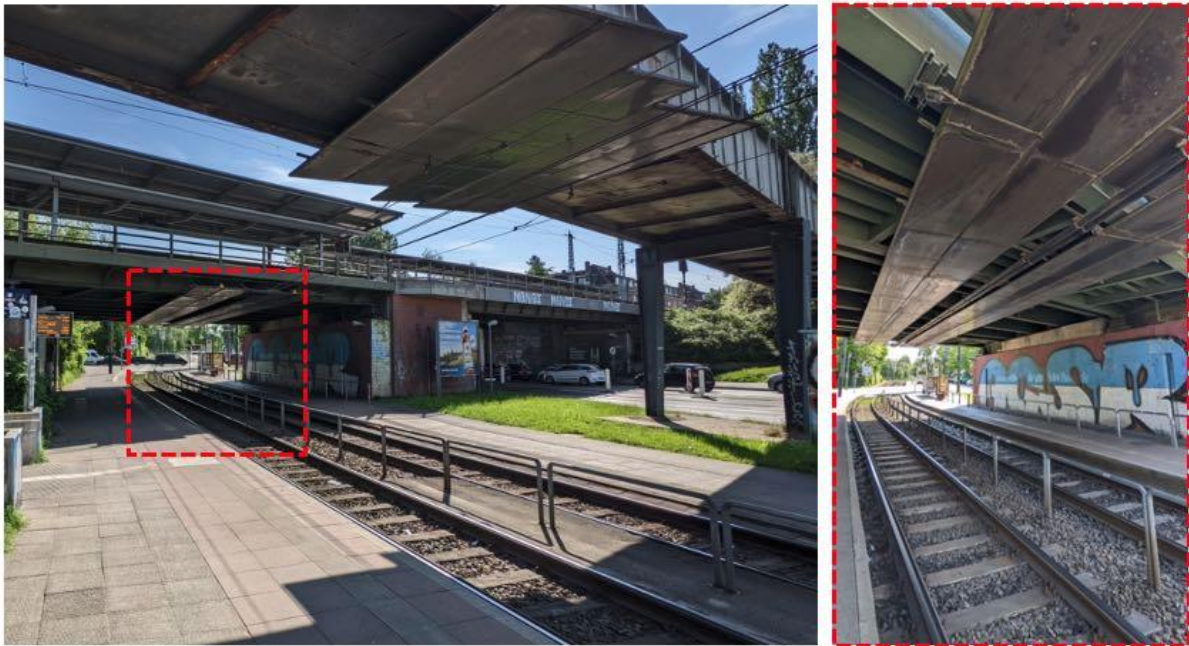
Um mögliche Störungen im ÖPNV proaktiv vorhersagen zu können, sollte für den Verkehrsknotenpunkt Holbeinplatz ein sensorgesteuertes (Früh-)Warnsystem entwickelt werden. Die Idee war es mit Hilfe von Echtzeitmessungen und dem Abgleich der Daten mit zuvor simulierten digitalen Überflutungsszenarien (vgl. Kap. 3) das bevorstehende Ausmaß der Überflutungen so früh abschätzen zu können, dass rechtzeitig Gegenmaßnahmen ergriffen werden können. Ein ähnlicher Ansatz wurde bei dem System Delft-FEWS (Buchholz et al. 2013) sowie auch im Rahmen des Projektes SENSARE (Kolesch et al. 2021) angewendet. Darüber hinaus kann mit Hilfe des zeitlich erfassten Überflutungsverlaufs eine Validierung der Modellergebnisse erfolgen, da die baulichen Veränderungen innerhalb des Modellgebiets – die im urbanen Raum üblich sind – dazu führen, dass sich die Abflussbedingungen in einem einmal erstellten Modell und in der Realität im Laufe der Zeit mehr und mehr unterscheiden.

Für die Entwicklung eines prototypischen (Früh-)Warnsystems für einen überflutungsgefährdeten Stadtbereich wurde im September 2021 vom Climate Service Center Germany (GERICS) eine Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Sensoren zur Wasserstandsmessung bei Breeze Technologies UG in Auftrag gegeben. Die Studie umfasste a) eine Marktanalyse zu geeigneten Sensoren, b) den Test der Datenübertragung mittels Funkstandard (z.B. 4G oder LoRaWAN), c) die Erstellung einer Programmierschnittstelle über die Echtzeitdaten abgerufen werden können und d) die Entwicklung einer prototypischen Datenbanklösung (Breeze Technologies 2022).

#### Standortcharakteristika

Zur Ermittlung potenzieller Sensorstandorte im Bereich des Holbeinplatzes (Abb.11) erfolgte am 18.05.2022 eine Standortbegehung. Hierbei konnten standortspezifische Anforderungen identifiziert und an den Anwendungsfall angepasst werden. Da der Holbeinplatz einen öffentlichen und stark frequen-

tierten Bereich darstellt, musste entsprechend berücksichtigt werden, dass ein hier verbauter Sensor einer erhöhten Gefahr ausgesetzt sein würde, von Vandalismus betroffen zu werden. Eine Verbauung im Bereich der Gleisanlagen wäre aus technischen Gründen schwierig, da eine Wartung des Sensors nur zu betriebsfreien Zeiten stattfinden könnte (nachts zwischen 01:00h und 03:15h oder bei Bauarbeiten). Darüber hinaus war aus Sicherheitsgründen auch keine externe Stromversorgung des Sensors möglich. Aufgrund dieser Einschränkungen wurde eine kompakte Anlage erdacht, die an einem versteckten, nicht leicht zugänglichen Ort angebracht werden sollte. Zusätzlich wurde eine Messtechnik favorisiert, die das Medium (hier Oberflächenwasser eines überfluteten Gleisbettes) ohne direkten Kontakt zum Wasser vermessen kann.



**Abb.11: Potenzieller Bereich für die sensorgesteuerte Wasserstandmessung im Umfeld der Haltestelle Holbeinplatz. Mögliche Installationsorte in der Unterführung (rot markierter Bereich) und zwischen den Schienen. Fotos: P. Seipold / GERICS.**

Wegen der ungünstigen Standortbedingungen wurde ein Sensorsystem mit geringem Wartungsaufwand und minimalem Stromverbrauch bevorzugt. LoRaWAN® -Technologie (Long Range Wide Area Network) erfüllt diese Anforderung, da sie eine Datenübertragung an einen Server bei geringem Energieverbrauch ermöglicht. Entsprechende Gateways sind in der Umgebung des Holbeinplatzes vorhanden (Abb.12). Als Übertragungsraten wären 15 Minuten möglich.

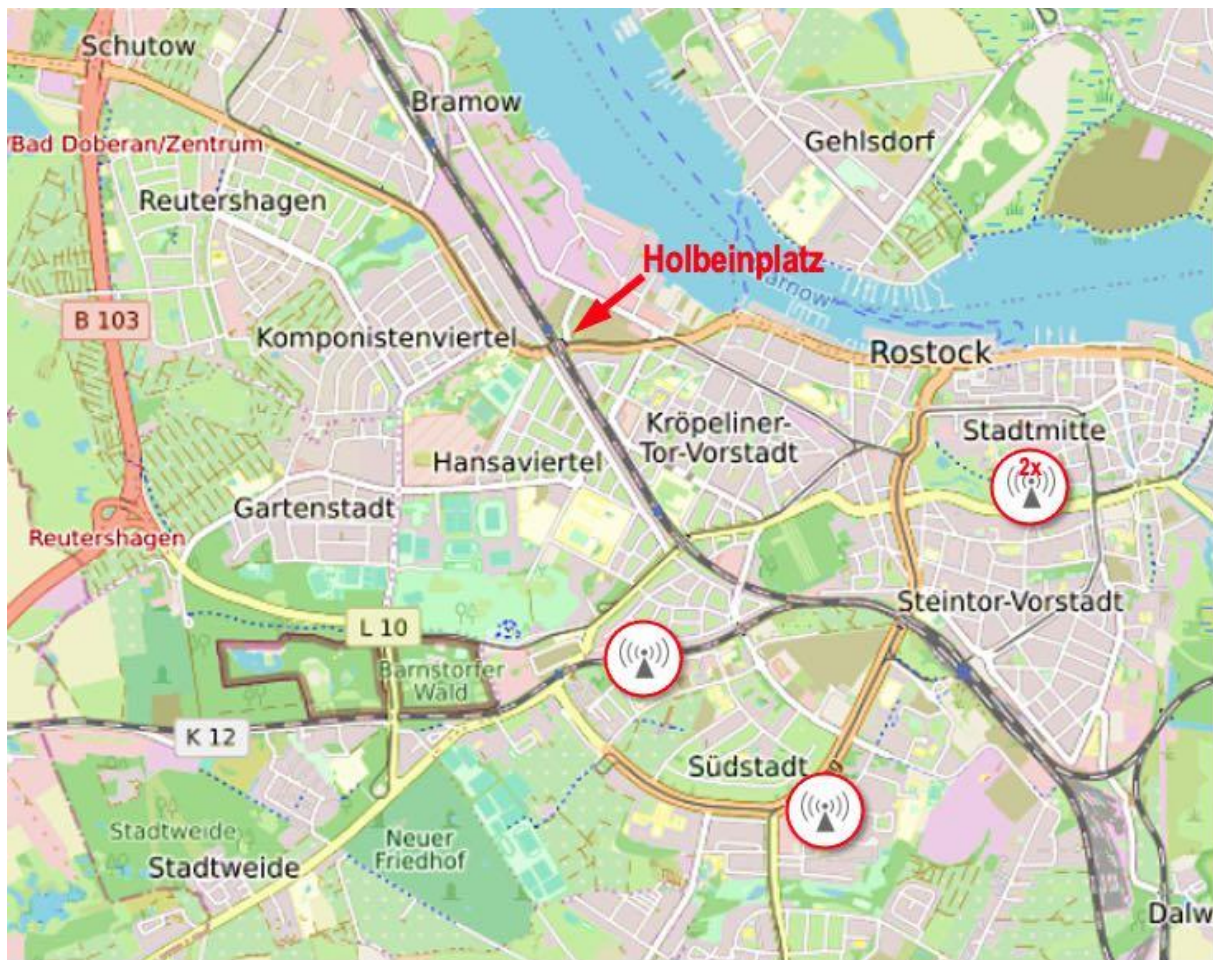


Abb.12: LoRaWAN®-Gateways (rot markiert) im Umfeld des Holbeinplatzes (Quelle TTN-Mapper 2022).

### Marktanalyse Sensortechnik

In einer Marktanalyse wurden zunächst die aktuell handelsüblichen Sonden identifiziert und klassifiziert. Als vergleichende Kategorien wurden Messgenauigkeit, Stromverbrauch, Störanfälligkeit, die Messumgebung, die Einbindungsfähigkeit in aktuelle Funknetze zur Datenübertragung gewählt sowie die Art der Messtechnik (optisch, kapazitiv, Ultraschall, Radar, Wasserdruck) verwendet. Ein besonderer Fokus wurde auf einzelne Sensorkomponenten gelegt, da damit ein System aufgebaut werden kann, das speziell zu den Anforderungen am Holbeinplatz passt. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Datenübertragung per LoRaWAN®. Insgesamt wurde ein System angestrebt, das handlich und einfach zu warten sein sollte.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile wurde ein Sensor zur Ultraschall-Entfernungsmessung präferiert, der über eine Batterie oder ein Solarmodul betrieben werden kann. Dass der Einsatz eines Ultraschallsensors für Wasserstandsmessungen möglich ist, zeigen a) das Citizen Science Projekt „Flood Network“ (Hauptenthal & Fischer-Stabel 2022), bei dem einzelne Sensorhosts zu einem Netzwerk zusammengeschlossen wurden, b) das SENSARE Projekt, in welchem eine sensorbasierte Stadtgebietsanalyse für Starkregengefährdungen zur Warnung und Resilienzverbesserung der Verkehrsinfrastruktur entwickelt

wurde (Kolesch et al 2021) oder c) die Arbeiten von Yake (2020) oder Panagopoulos et al. (2021), die mittels Sensoren Fließgewässer überwachen. Auch wenn die Messungen durch Temperaturschwankungen beeinträchtigt werden, so liegt die Messgenauigkeit immer noch im Zentimeter-Bereich.

### **Software zur Sensorsteuerung**

Im Rahmen dieses „Sensor-Projekts“ wurde ein Software-Prototyp entwickelt, der als Grundlage für ein vollumfängliches System dienen kann. Dazu wurden zunächst ein Datenserver zur Speicherung der Messwerte und ein „Virtueller Sensor“ zum Generieren von Messwerten in „JavaScript (NodeJS)“ erstellt (Breeze Technologies 2022). Der Datenserver ist dabei ein einfacher Prototyp für die spätere Software-Architektur zum Speichern und Verarbeiten der Messdaten. Ein „Virtueller Sensor“ wurde zunächst zur Erzeugung von Messwerten für Wasserstände verwendet und ersetzte den "realen" Sensor, der für die nächsten Projektphase vorgesehen war. Dadurch konnte kostengünstig und effektiv die technische Umgebung für die Datenübertragung und -verarbeitung getestet werden. Mit dem Sensor konnte erfolgreich alle fünf Sekunden ein zufälliger Messwert generiert und versendet werden. Der Prototyp ist allerdings noch nicht in der Lage Metadaten über den Sensor und andere komplexe (voraussichtlich notwendige) Informationen zu speichern.

### **Zwischenfazit**

Die Potenzialanalyse hat einen möglichen Weg für die sensorgestützte Warnung am Standort Holbeinplatz aufgezeigt, Vor- und Nachteile unterschiedlicher Messtechniken dargestellt und unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen eine Empfehlung für einen geeigneten Sensortyp ermittelt. Zudem wurde die theoretische Machbarkeit einer sensorgestützten Datenübermittlung nachgewiesen. Im Gespräch mit einem Entscheidungsträger wurde ein solches System als ein mögliches Mittel zum Umgang mit potenziellen Überflutungen angesehen, da sich am Standort durch bauliche Maßnahmen in absehbarer Zeit das Überflutungs-Restrisiko nicht verringern lässt. Dies liegt vor allem darin begründet, dass bauliche Veränderungen aufgrund begrenzter Fläche und der „Nadelöhr“-Situation aktuell nicht geplant sind. Somit ist die Sensorinstallation zur Frühwarnung für die RSAG ein interessanter Ansatz, da eine Übermittlung von Wassertiefen an die Leitzentrale einen erkennbaren Mehrwert darstellen würde. Aktuell erfolgt eine Warnung nur dann, wenn die Unterführung bereits vollgelaufen ist. Hierzu wird eine Markierung genutzt, bei der die Fahrer:innen der Straßenbahn angehalten sind, vor der Unterführung zu stoppen. Mit der Frühwarnung könnte alternativ das Anfahren des Streckenabschnitts von vornherein vermieden werden und Fahrgäste könnten über Ausweichrouten – auch mit anderen Verkehrsmitteln – die überflutete Stelle umfahren.

Nach erster Einschätzung wäre eine Installation am Geländer in der Mitte der Station kein Problem, zusätzlich könnte ein Regenmengensensor auf dem Fahrgastunterstand platziert werden. Im Rahmen einer späteren zweiten Projektphase könnte ein entsprechender Sensor vor Ort verbaut und ein geeignetes prototypisches Frühwarnsystem für die RSAG etabliert werden.

## **Potenzielle Projektphase 2**

In einer Folgephase könnte der „virtuelle Sensor“ durch einen realen Ultraschall-Sensor ersetzt und zuerst im Labor und dann Vor-Ort mit Hilfe des entwickelten Software-Prototyps unter Realbedingungen getestet werden. Hierbei könnte ein Feintuning der Software erfolgen. Darüber hinaus sollte eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) entwickelt werden, um das System anwendungsfreundlicher zu machen. Vorab müsste geklärt werden, wie die weitere Nutzung der Daten konkret aussehen sollte und wie Nutzende zukünftig mit dem System interagieren möchten.

### **4.4.3. Risikokommunikation**

(Früh-)Warnsysteme im Bereich des Hochwasserschutzes werden weltweit eingesetzt, wobei ihre Funktionsweise und ihr Aufbau sehr unterschiedlich sein können. Gemeinsam ist ihnen nur, dass die größten Herausforderungen bei ihrem Einsatz im Bereich der Risikokommunikation (Umgang und Weitergabe von Informationen nach innen und nach außen) liegen, um Nutzern die Möglichkeit zu geben, auf die Warnungen richtig reagieren zu können. Damit steht und fällt die Effektivität des (Früh-)Warnsystems (Perera et al. 2020, Kreibich et al 2021, Coughlan de Perez et al. 2022).

Aus diesem Grund ist es für den nächsten Schritt wichtig, nach dem Aufbau des Systems die Endnutzer:innen dahingehend zu schulen, wie man auf Warnungen zugreifen kann, wie man sie versteht und wie man gezielt darauf reagieren sollte. Zur Unterstützung dieser Vorgehensweise, kann beispielsweise ein Flyer ein wichtiges Instrument sein, in dem kompakt und leicht verständlich alle wichtigen Informationen enthalten sind. Damit müssen folgende Ziele verfolgt werden: a) das Bewusstsein für das aktuelle und zukünftige Gefährdungspotenzial zu schaffen, b) die Erarbeitung aller potenzieller Gefahren inklusive zugehöriger Warnungen, c) der Bereitstellung und Gewährleistung einer störungsfreien Kommunikation, d) der Verbreitung von Warnungen, die für jedermann verständlich sind und e) der Sicherstellung, dass ausreichende Schutzmaßnahmen im Ernstfall (nicht nur theoretisch, sondern in der Praxis getestet) zur Verfügung stehen. Dazu ist es sinnvoll regelmäßige Übungen im Mitarbeiterkreis durchzuführen, die zeigen sollen, ob unter extremen Randbedingungen die Warnungen zur richtigen Zeit zu den richtigen Personen gelangen, damit diese reagieren können (CREWS 2016).

In der Kommunikation nach außen ist es von großer Bedeutung, die Informationen zu möglichen Gefährdungen oder veränderter Routenführung aufgrund einer Überschwemmung schnellstmöglich über Durchsagen am Bahnsteig, Anzeigen auf Abfahrtstafeln, ggf. Anzeigen im Fahrgastfernsehen und aktuelle Informationen über Verspätungen und Alternativen in Apps und Fahrgastzentren an die Fahrgäste zu kommunizieren.



## 5. Auf einen Blick

Eine funktionierende moderne Gesellschaft kann es nur mit einer leistungsfähigen und resilienten Verkehrsinfrastruktur geben. Da der Verkehrssektor zu den Hauptverursachern von Treibhausgasemissionen gehört und gleichzeitig zunehmend verwundbarer gegenüber den Folgen des Klimawandels wird, müssen die Themen Klimaschutz und Anpassung an Wetterextreme und veränderte klimatische Bedingungen bei Verkehrsbetrieben an Bedeutung gewinnen. Im Rahmen einer prototypischen Produktentwicklung untersuchte das Climate Service Center Germany (GERICS) zusammen mit der Rostocker Straßenbahn AG (RSAG) exemplarisch deren heutige und zukünftige Betroffenheiten. Dazu wurde der „GERICS-Unternehmensbaukasten“ zur Sensibilisierung ausgesuchter Mitarbeiter:innen und zur Analyse betrieblicher Anpassungsmaßnahmen eingesetzt. Zusätzlich wurden Module aus dem „GERICS-Stadtbaukasten“ zur Visualisierung aktueller und zukünftiger Hot-Spots im Rahmen einer Kooperationsarbeit weiterentwickelt.

Durch die Anwendung unterschiedlicher Kommunikationsformate konnte eine gute Basis zur unternehmensinternen Bewusstseinsbildung sowie für strategische Planungen und das Risikomanagement geschaffen werden. Die Vorgehensweise zur Sensibilisierung der Mitarbeiter:innen im Betrieb der RSAG stellt einen Anfangspunkt zur systematischen und dauerhaften Auseinandersetzung mit der Thematik Anpassung an die Folgen des Klimawandels dar, die sich aus Sicht des GERICS an den Auftakt anschließen sollte.

Mit der Kenntnis potenzieller Gefährdungen können Kommunen und Unternehmen proaktiv auf zukünftige Störungen reagieren. Zur Visualisierung der Überflutungsgefährdung im Stadtbereich kamen drei unterschiedliche hydrologische Modellansätze (HEC-RAS, Tygron Engine und LEAFlood) zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen, dass Überflutungsschwerpunkte modellunabhängig gut dargestellt werden können. In Bezug auf Anpassungsmaßnahmen werden mit Ansätzen aus technischen und natürlichen Lösungen, auch unter Verwendung von Ökosystemleistungen, die größten positiven Wirkungen erzielt.

Da (Früh-)Warnsysteme ebenfalls eine wichtige Komponente zur Anpassung an die Folgen von Starkregen sein können, wurde die Firma Breeze Technologies UG von GERICS beauftragt mittels einer Machbarkeitsstudie zu prüfen, wie man für den Verkehrsknotenpunkt Holbeinplatz ein sensorgesteuertes (Früh-)Warnsystem entwickeln könnte. Die Idee war es, mit Hilfe von Echtzeitmessungen und dem Abgleich mit digitalen Überflutungsszenarien das bevorstehende Ausmaß der Überflutungen möglichst früh abschätzen zu können. Im Zuge der ersten Entwicklungsphase konnten die wichtigsten Randbedingungen für einen geeigneten Sensor erarbeitet werden: Ultraschall-Entfernungsmessung, Batteriebetrieb, kleines handliches Gerät, Datenübertragung per LoRaWAN®. Zusätzlich konnte ein Software-Prototyp entwickelt werden, der zum einen aus einem Datenserver-Lösung besteht, welche die Speicherung der Sensor-/Messwerte in einer Datenbank ermöglicht – inklusive Schnittstelle beziehungsweise API zum Abruf der Daten – sowie andererseits aus einem „virtuelle Sensor“, der zum Generieren von Test-Messwerten benötigt wurde.

In einer zweiten Phase müssten die Anforderungen der Nutzer abgefragt und bei der weiteren Entwicklung u.a. der Nutzeroberfläche berücksichtigt werden. Zusätzlich müsste zusammen mit Entscheidungsträgern eine Strategie für die Risikokommunikation entwickelt werden, damit die Effektivität des (Früh-)Warnsystems gegeben ist.

## 6. Literatur

- Acosta-Coll, M., Ballester-Merelo, F., Martinez-Peiró, M. & de La Hoz-Franco, E. (2018): Real-Time Early Warning System Design for Pluvial Flash Floods-A Review. – *Sensors* 18, 2255.
- Allen, M. R. & Ingram, W. J. (2002): Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. – *Nature*, 419, 6903, 224-232, doi: 10.1038/nature01092.
- Bauer, J. (2022): Modelloptimierung und alternative Modellansätze Rostock - Vergleich HEC-RAS - Tygron. – TAUW-Bericht (unveröffentl.), 18 S.
- BBK (2021): Klärung und Erweiterung des KRITIS-Vokabulars". – Online Report, 8 S. (Hrsg.: /Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK)) (aufgerufen: 22.03.2024).
- BBK (2020): 10 Jahre 'KRITIS-Strategie' - Einblicke in die Umsetzung der Nationalen Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen. – 110 S, (Hrsg.: /Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK)).
- Bednar, F. B., Wolkinger, B., König, M., Bachner, G., Formayer, H., Offenthaler, I. & Leitner, M. (2015): Transport. - In: Steininger, K. W. (Hrsg.): Economic evaluation of climate change impacts. - Development of a cross-sectoral framework and results for Austria. Cham, 279–300.
- Bender, S., Groth, M., Wübbelmann, T. & Bockbreder, J. (2023a): Eine Starkregenmodellierung für zentrale Bereiche des Stadtgebiets Geesthacht unter Nutzung des Modells HEC-RAS. – GERICS City Series 04 Climate Service Center Germany (GERICS), 32 S. Hamburg.
- Bender, S., Nolte, A., Wübbelmann, T., Baltruschat, S., Groth, M., Seipold, P. & Gehrke, J. (2023b): Building a digital city with several digital twins? – An exemplary view on water-related questions in urban areas. – Open Access Government eBook, 12 p.
- Bender, S., Groth, M. Seipold, P. & Gehrke, J.-M. (2022): Klimaschutz und Anpassung an die Folgen des Klimawandels – Synergien und Zielkonflikte im Rahmen kommunaler Konzepte und Strategien. – Report der Helmholtz-Climate-Initiative (Cluster 1: Net-Null 2050), 61 S.
- Bender, S., Groth, M. Otto, J., Pfeifer, S. & Seipold, P. (2019): Regionale Klimainformationen für Rostock. – GERICS City Series 03, 19 S.
- Bender, S., Brune, M., Cortekar, J., Groth, M. & Remke, T. (2017a): Anpassung an die Folgen des Klimawandels in der Stadtplanung und Stadtentwicklung – Der GERICS- Stadtbaukasten. – Report 31, Climate Service Center Germany, 75 S.
- Bender, S., Brune, M., Cortekar, J., Groth, M. & Remke, T. (2017b): Klimawandeltaugliche Kompensationsmaßnahmen – Überprüfung der Funktionstüchtigkeit von Kompensationsmaßnahmen unter klimatisch veränderten Bedingungen am Beispiel der Stadt Kiel. – Report 32, Climate Service Center Germany, 73 S.
- Berkhout, F., Hertin, J., Arnell, N., 2004. Business and climate change: measuring and enhancing adaptive capacity. Tyndall Centre for Climate Change Research, Technical Report 11.
- BlueGreenStreets (Hrsg.) (2020): BlueGreenStreets als multicodierte Strategie zur Klimafolgenanpassung – Wissenstand 2020. – Online-Publikation, Statusbericht im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft“ (RES:Z), 155 S.
- BMDV (2023): Überblick: Klimaschutz im Verkehr. – Mobilität. – Online-Artikel vom 13.07.2023 auf <https://bmdv.bund.de> (Hrsg: Bundesministerium für Digitales und Verkehr).
- BMK (2022): Verkehrsinfrastruktur im Klimawandel. – 23 S., Wien (Hrsg. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Österreich (BMK)).
- BMK (2021b): Zweiter Fortschrittsbericht zur österreichischen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. – 578 S., Wien. (Hrsg. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Österreich)
- BMUB (2015): Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft. – Grünbuch Stadtgrün, 96 S. (Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)).
- BMUV (2023): Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KAnG) vom 20. Dezember 2023. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2023 Teil I Nr. 393. <https://www.recht.bund.de/bgbll/1/2023/393/VO>.
- BMUV (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. – Online-Bericht, 127 S. (Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV)).
- Breeze Technologies UG 2022: Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Sensoren zu Wasserstandsmessung. – unveröffentl. Bericht, 33 S.
- Buchholz, O., Schwanenberg, D. & Sommer, B. (2013): Anforderungen an moderne Hochwasser-Vorhersagesysteme - Beispiele für die Umsetzung mit Delft-FEWS. – In: TU Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hrsg.): Bauwerke, Anforderungen, Modelle, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 48, S. 65-74.
- Burkhard, B. & Maes, J. (2017). Mapping Ecosystem Services. – Advanced Books, E-Book, doi: 10.3897/ab.e12837.

- Carlyle-Moses, D. E., Iida, S., Germer, S., Llorens, P., Michalzik, B., Nanko, K., Tanaka, T., Tischer, A. & Levia, D.F. (2020): Commentary: What We Know About Stemflow's Infiltration Area. – *Front. For. Glob. Change, Sec. Forest Hydrology* Vol. 3, doi.org/10.3389/ffgc.2020.577247.
- Carpenter, T. M., Sperflage, J. A., Sweeney, T., Fread, D. L. (1999) National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems. – *J. Hydrol.* 1999, 224, 21–44.
- CCAP (2011): The value of green infrastructure for urban climate adaptation. – 35 S. (Hrsg. Center for Clean Air Policy (CCAP)).
- Coughlan de Perez, E., Berse, K. B., Depante, L. A. C., Easton-Calabria, E., Evidente, E. P. R., Ezike, T., Heinrich, D., Jack, C., Lagmay, A. M. F., Lendelvo, S., Marunye, J., Maxwell, D. G., Murshed, S. B., Orach, C. G., Pinto, M., Poole, L. B., Rathode, K. & Van Sant, S.C. (2022): Learning from the past in moving to the future: Invest in communication and response to weather early warnings to reduce death and damage. – *Climate Risk Management* 38 (2022) 100461.
- Creutin, J. D., Borga, M., Grunfest, E., Lutoff, C., Zoccatelli, D. & Ruin, I. (2013): A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods. – *J. Hydrol.*, 482, 14–24.
- CREWS (2016): CREWS Operational Procedures Note No 1 Programming and Project Development. – CREWS Note, 11 S. (Hrsg.: Climate Risk & Early Warning Systems Initiative (CREWS)).
- Dahm, R., Bhardwaj, A., Sperna Weiland, F., Corzo, G. & Bouwer, L. M. (2019): A Temperature-Scaling Approach for Projecting Changes in Short Duration Rainfall Extremes from GCM Data. – *Water* 2019, 11, 313. <https://doi.org/10.3390/w11020313>.
- Deutscher Bundestag (2023a): Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes– Drucksache 20/8290. Stellungnahme des Bundesrates und Gegenäußerung der Bundesregierung – Drucksache 20/8670, 4 S.
- Deutscher Bundestag (2023b): Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes. – Drucksache 20/8290, 27 S.
- DWD (2018): Klimareport Mecklenburg-Vorpommern – 52 S. (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst (DWD)).
- DIN EN ISO 14091:2021-07 (DIN ISO 14091:2021): Anpassung an den Klimawandel - Vulnerabilität, Auswirkungen und Risikobewertung. Deutsche Fassung EN ISO 14091:2021 – 55 S.
- EC (2021): Commission Notice – Technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027. – *Official Journal of the European Union*, (2021/C 373/01), 92 S.
- Ettrichrätz, V., Beier, Ch., Keuler, K. & Trachte, K. (2023): Identification of regions with a robust increase of heavy precipitation events. – *EGU sphere*, 34 S., <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-552>.
- Europäische Kommission (2020) Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1999 (Europäisches Klimagesetz). COM/2020/80 final, Brüssel 04.03.2020. 7 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020PC0080&from=DE>. Zugriffen: 8. Juli 2021.
- Felderer, A., Balas, M. & Völler, S. (2022): Verkehrsinfrastruktur im Klimawandel – Warum wird die Verkehrsinfrastruktur klimafit gestalten müssen. – Bericht, 23 S. (Hrsg. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie), Wien.
- Flämig, H., Gertz, C. & Mühlhausen, T. (2023): Minderungsstrategien im Personen- und Güterverkehr. – In Brasseur et al. : Klimawandel in Deutschland, 2. Aufl., 415-427.
- Frantzeskaki, N., T. McPhearson, M.J. Collier, D. Kendal, H. Bulkeley, A. Dumitru, C. Walsh, K. Noble, van Wyk, E., Ordóñez, C., Oke, C. & Pintér, L. (2019): Nature-based solutions for urban climate change adaptation: Linking science, policy, and practice communities for evidence-based decision-making. – *BioScience* 69: 455–466. doi:10.1093/biosci/biz042.
- Friedrich, K., Deutschländer, T., Kreienkamp, F., Leps, N., Mächel, H. & Walter, A. (2023): Klimawandel und Extremereignisse: Temperatur inklusive Hitzewellen. – In: Brasseur, G., Jacob, D. & Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland - Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, 61-72.
- Gehrke, J.-M., Groth, M. & Seipold, P. (2024): Ein Prozessmodell zur Berücksichtigung zukunftsgerichteter Klimaänderungsinformationen in Unternehmen. – 72 S., Climate Service Center Germany (GERICS). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10797785>.
- Groth, M., Bender, S., Olfert, A., Schauser, I. und Viktor, E. (2023a): Kaskadeneffekte und kritische Infrastrukturen im Klimawandel. In: Brasseur, G., Jacob, D. und Schuck-Zöller, S. (Hrsg.) 2023: Klimawandel in Deutschland, 2. überarb. und erw. Auflage, Springer/Spektrum Heidelberg. S. 309-322.
- Groth, M., Bender, S. & Wübbelmann, T. (2023b): How hydrological models can support cities to adapt to urban flooding – lessons learned from two transdisciplinary case studies. – *ESG Online-Fullpaper*, 24 S.
- Groth, M., Bender, S. & Wübbelmann, T. (2020): Starkregen und Sturzfluten – Anwendung des GERICS-Stadtbaukasten in Bleckede – Report 34, Climate Service Center Germany, Hamburg

- Groth, M. & Seipold, P. (2017): Prototypische Entwicklung eines Sensibilisierungs- und Analyseansatzes zur unternehmerischen Anpassung an die Folgen des Klimawandels. – *uwf* 25:203–211, DOI 10.1007/s00550-017-0462-7
- Haas, W., König, M., Pech, M., Prettenthaler, F., Prutsch, A., Steininger, K., Themessl, M., Wagner, G. & Wolf, A. (2015): Die Folgeschäden des Klimawandels in Österreich. – Dimensionen unserer Zukunft in zehn Bildern für Österreich. – Austrian Climate Research Programme in Essence, Sonderheft, 51 S.
- Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgström, S., Breuste, J., Gomez-Baggethun, E., Gren, Å., Hamstead, Z., Hansen, R., Kabisch, N., Kremer, P., Langemeyer, J., Rall, E. L., McPhearson, T., Pauleit, S., Qureshi, S., Schwarz, N., Voigt, A., Wurster, D. & Elmqvist, T. (2014): A quantitative review of urban ecosystem service assessments: concepts, models, and implementation. – *Ambio*, vol 43, p 413–433, doi: 10.1007/s13280-014-0504-0
- Hauptenthal, K. & Fischer-Stabel, P. (2022): Smart Citizen Science in pluvial flood disaster risk reduction: Building a mobile application as one tool for drain path identification (Work in Progress) – In: Wohlgemuth, V., Naumann, S., Arndt, H.-K., Behrens, G. & Höb, M. (eds.): Lecture Note in Informatics, *EnvirolInfo 2022, Short-/Work in Progress-Papers*, 65-76.
- Hobbie, S. E. & Grimm, N. B. (2020): Nature-based approaches to managing climate change impacts in cities. – *Philos. Trans. of the Royal Society B: Biological Sciences* 375: 20190124, doi.org/10.1098/rstb.2019.0124.
- Hofmann, J. & Schüttrumpf, H. (2019): Risk-Based Early Warning System for Pluvial Flash Floods: Approaches and Foundations. – *Geosciences*, 9(3), 127, doi.org/10.3390/geosciences9030127.
- INFRAS, Sutter, B. D., Petry, C., Peter, M., & Wunderlich, A.: (2020): Verkehr der Zukunft 2060: Auswirkungen des Klimawandels auf die Verkehrsnachfrage. – 235 S.
- IPCC (2022a): Summary for Policymakers. – In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Pörtner et al. (eds.)), 35 S., doi:10.1017/9781009325844.0
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, A. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Deque, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Hänsler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kroner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moeseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussanna, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B. & Yiou, P. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research – *Regional Environmental Changes*. Vol. 14, Issue 2: 563-578.
- Jupe, T., Emmert, M. & Haakh, F. (2021): Klimawandel und Versorgungssicherheit bei der Landeswasserversorgung – reichen die Ressourcen? - *LW-Schriftenreihe*, Heft 33 2021, 68-79.
- Kabisch, N., Frantzeskaki, N. & Hansen, R. (2022): Principles for urban nature-based solutions. – *Ambio* 51, 1388–1401, <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01685-w>.
- Kahrmann, A., Kendon, E. J., Fowler, H. J. & Wilkinson, J. M. (2022): Contrasting future lightning stories across Europe. – *Environ. Res. Lett.* 17, 114023 DOI 10.1088/1748-9326/ac9b78.
- Keeler, B. L., Hamel, P., McPhearson, T., Hamann, M.H., Donahue, M. L., Prado, K. A. M. & Wood, S. A. (2019): Social-ecological and technological factors moderate the value of urban nature. – *Nature Sustainability*, 2(1), 29–38.
- Klafka, R. (2022): Niederschlagsbasierte Klimarisiken für städtische Infrastrukturplanung – Aktualisierung von Häufigkeits-Intensitäts-Kurven f. d. Region Hamburg basierend auf EURO-CORDEX-Projektionen. – *M.Sc.-Arbeit Uni Augsburg*, 88 S.
- Kolesch, D., Neumann, J., Scheid, Ch., Engel, T., Rentschler, Ch., Langer, M., Führ, A., Reinhardt, M., Radomski, S. & Sauter, D. (2021): SENSARE – Sensorbasierte Stadtgebietsanalyse für Starkregengefährdungen zur Warnung und Resilienzverbesserung der Verkehrsinfrastruktur. – Abschlussbericht des Verbundprojektes, 223 Seiten
- Köppke, K.-E., Sterger, O., Stock, M. & Selbmann, B. (2013): Grundlagen für die Technische Regel für Anlagensicherheit (TRAS) 310. – 208 S. (Hrsg.: Umweltbundesamt)
- Kraft, P., Vaché, K. B., Frede, H.-G. & Breuer, L. (2011). A hydrological programming language extension for integrated catchment models. – *Environ. Modell. Softw.* 26, 828–830. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.12.009.
- Kreibich H., Hudson P. & Merz B. (2021) Knowing what to do substantially improves the effectiveness of flood early warning. – *Bulletin of the American Meteorological Society* 102(7), doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0262.1.
- Kreienkamp, F., Philip, S.Y., Tradowsky, J.S., Kew, S.F., Lorenz, P., Arrighi, J., Belleflamme, A., Bettmann, T., Caluwaerts, S., Chan, S.C., Ciavarella, A., Cruz, H.D., de Vries, H., Demuth, N., Ferrone, A., Fischer, E.M., Fowler, H.J., Goergen, K., Herinrich, D., Heinrichs, Y., Lenderink, G., Kaspar, F., Nilson, E., Otto, F.E.L., Ragone, F., Seneviratne, S.I., Singh, R.K., Skålevåg, A., Termonia, P., Thalheimer, L., van Aalst, M., Van den Bergh, J., Van de Vyver H., Vannitsem, S., van Oldenborgh, G.J., Van Schaeybroeck, B., Vautard, R., Vonk, D. & Wanders, N. (2023): Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. – *Report of World weather attribution*, 50 p.
- Kurganov, A. & Petrova, G. (2007): A second order well balanced positivity preserving central upwind scheme for the Saint-Venant System. – *Commun. Math. Sci.*, Vol. 5, No.1, pp. 133-16, International Press.
- Leipziger Blaugrün (2023): Urbane Wasserwende – Handlungsempfehlungen an die Bundespolitik. – *Policypaper*, 12 S.

- Martin, J. G. C., Scolobig, A., Linnerooth-Bayer, J. A., Liu, W. & Balsiger, J. (2021): Catalyzing Innovation: Governance Enablers of Nature-Based Solutions. – *Sustainability* 2021, 13(4), 1971, doi.org/10.3390/su13041971.
- Martin, B., Pestiaux, J., Schobbens, Q., Emmrich, J. & Hagemann, M. (2020): A radical transformation of mobility in Europe: exploring the decarbonisation of the transport sector by 2040. – CLIMACT-Report, 89 S.
- McPhearson, T., Cook, E., Berbés-Blázquez, M., Cheng, C., Grimm, N.B. Andersson, E., Barbosa, O., Chandler, D. G., Chang, H., Chester, M. V., Childers, D. L., Elser, S. R., Frantzeskaki, F., Grabowski, Z., Groffmann, P., Hale, R. H., Iwaniec, D. M., Kabisch, N., Kennedy, Ch., Markolf, S. A., Matsler, M., McPhillips, L. E., Miller, T. R., Munoz-Erickson, T. A., Rosi, E. & Troxler, T. G. (2022). A social-ecological-technological systems approach to urban eco-system services. – *One Earth*, 5(5), 505–518, doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.007.
- meteoHRO (2021) Entwicklung der Klima-Referenzperioden für Mecklenburg-Vorpommern – Temperatur, Niederschlag und Sonnenschein – <https://mv-wetter.com/2021/01/23/> (aufgerufen 25.05.23).
- Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K.N., Rusch, G.M., Waylen, K.A. and Delbaere, B. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. – *Science of the Total Environment*, 579, 1215–1227.
- New, M., Reckien, D., Viner, D., Adler, C., Cheong, S-M., Conde, C., Constable, A., Coughlan de Perez, E., Lammel, A., Mechler, R., Orlove, B. & Soleck, W. (2022): Decision-Making Options for Managing Risk. – In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)], 2539–2654. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.026>.
- Norpoth, M., Patzwahl, R., Seiffert, R., Bergmann, L., Forbriger, M., Hänsel, S., Hatz, M., Herrmann, C., Hillebrand, G., Lifschitz, E., Lohrengel, A.-F., Nilson, E., Ork, J., Schade, N., Schulz, D., Stachel, H. & Wachler, B. (2020): Konzeptionelle Beiträge zur Auseinandersetzung mit der Anpassung des Bundesverkehrswegesystems an den Klimawandel – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Anpassungsoptionen (SP-107) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks, 96 S., doi: 10.5675/ExpNNM2020.2020.08
- Ohlgs, V. & Bauer, J. (2020): Starkregengefahrenkarte Rostock – Studie zur Bewertung des Abflussverhaltens von Starkniederschlägen im Stadtgebiet Rostock mit der Software "Tygron". – TAUW-Bericht, 12 S.
- Palin, E. J., I. Stipanovic Oslakovic, K. Gavin & Quinn, A. (2021): Implications of climate change for railway infrastructure. – *WIREs Climate Change*. Volume 12, Issue 5. doi.org/10.1002/wcc.728.
- Panagopoulos, Y., Papadopoulos, A., Poulis, G., Nikiforakis, E. & Dimitrou, E. (2021): Assessment of an Ultrasonic Water Stage Monitoring Sensor Operating in an Urban Stream. – *Sensors* 2021, 21(14), 4689. doi.org/10.3390/s21144689.
- Papalexiou, S. M. & Montanari, A. (2019): Global and Regional Increase of Precipitation Extremes under Global Warming. – *Water Resources Research*, 55, 4901–4914, doi.org/10.1029/2018WR024067.
- Perera D, Agnihotri J, Seidou O, Djalante R (2020) Identifying societal challenges in flood early warning systems. – *International Journal of Disaster Risk Reduction* 51:101794, doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101794.
- Pfeifer, S., Bathiany, S. & Rechid, D. (2021a): Klimaausblicke für Landkreise. – GERICS Online Produkt, Stand Juni 2021, [https://www.gerics.de/products\\_and\\_publications/fact\\_sheets/landkreise/index.php.de](https://www.gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/landkreise/index.php.de) (aufgerufen 25.05.2024)
- Pfeifer S, Bathiany S, Rechid D (2021b): Klimaausblick Rostock und Landkreis Rostock. – GERICS-Klimaausblick, 19 S., Version 1.0 Stand Juni 2021, (aufgerufen 24.04.23)
- Raymond, C. M., Frantzeskaki, N., Kabisch, N., Berry, P., Breil, M., Nita, M.R., Geneletti, D. & Calfapietra, C. (2017): A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. – *Environmental Science and Policy*, 77, 15–24.
- Revi, A., Satterthwaite, D. E., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R. B. R., Pelling, M., Roberts, D. C. & Solecki, W. (2014): Urban areas. – In: (Field et al.) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 535-612.
- Roca, M., Escameia, M., Gimeno, O., de Vilder, L., Simm, J.D., Horton, B. & Thorne, C. (2017): Green approaches in river engineering – Supporting implementation of Green Infrastructure. – Report HR Wallingford, 88 S.
- Sanderson, B.M. & O'Neill (2020): Assessing the costs of historical inaction on climate change. – *Nature Scientific Reports* 10:9173, doi.org/10.1038/s41598-020-66275-4
- Schütze, A., Banning, A. & Bender, S. (2021): Kartierung und Simulation von Überschwemmungsflächen in urbanen Räumen nach Starkregenereignissen. – *Grundwasser*, 26(3):1-11, doi.org/10.1007/s00767-020-00470-y
- Shen, J., Du, S., Huang, Q., Yin, J., Zhang, M., Wen, J. & Gao, J. (2019). Mapping the city-scale supply and demand of ecosystem flood regulation services-a case study in Shanghai. *Ecol. Indic.* 106, 105544. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105544
- Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, F., Cruz-Núñez, X., D'Agosto, M., Dimitriu, D., Meza, M. J., Fulton, L., Kobayashi, S., Lah, O., Mckinnon, A., Newman, P., Ouyang, M., Schauer, J.J., Sperling, D., Tiwari, G. (2014): Transport. - In: *Climate Change*

- 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Edenhofer, O. et al. (eds.)), 599-670.
- Smets, V., Wirion, C., Bauwens, W., Hermy, M., Somers, B., & Verbeiren, B. (2019). The importance of city trees for reducing net rainfall: comparing measurements and simulations. – *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, 3865–3884. doi: 10.5194/hess-23-3865-2019.
- Stadt Frankfurt am Main (2023): Leitfaden Klimaangepasste Stadtplatzgestaltung in Frankfurt am Main. – Online-Dokument, 47 S, (Hrsg. Stadt Frankfurt am Main, Grünflächenamt, Stadtplanungsamt, Stadtentwässerung, Umweltamt & Amt für Straßenbau und Erschließung).
- Tränckner, J. (2018) (Hrsg.): „Kommunale Gewässer Gemeinschaftlich Entwickeln,“ Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, 203 S.
- UBA (2024): Umweltmonitor 2024 – Daten zur Umwelt. – UBA-Report, 107 S., (Hrsg. Umweltbundesamt (UBA))
- UBA – Umweltbundesamt (2021) Jährliche Treibhausgas-Emissionen in Deutschland/Annual greenhouse gas emissions in Germany. <https://www.umweltbundesamt.de/diagramm/jaehrliche-treibhausgas-emissionen-in-deutschland-0>, Zugegriffen: 8. Juli 2021
- UBA (2020): Bewertung klimawandelgebundener Risiken: Schadenspotenziale und ökonomische Wirkung von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen. – *CLIMATE CHANGE* 29/2020, 238 S. (Hrsg. Umweltbundesamt)
- UBA (2016): Klimawirkungsketten. Online-Dokument, 15 S., (aufgerufen: 24.07.2023) (Hrsg. Umweltbundesamt (UBA))
- UNDRR (2022): Technical Guidance on Comprehensive Risk Assessment and Planning in the Context of Climate Change. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. – 132 S.
- Voskamp, I. M., de Luca, C., Polo-Ballinas, M. B., Hulsman, H. & Brotsma, R. (2021): Nature-Based Solutions Tools for Planning Urban Climate Adaptation: State of the Art. – *Sustainability*, 13(11):6381. <https://doi.org/10.3390/su13116381>.
- Wang, T., Qu, Z., Yang, Z., Nichol, T., Clarke, G., Ge, Y.E., 2020. Climate change research on transportation systems: Climate risks, adaptation and planning. *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.* 88, 102553.
- Woetzel, J., Pinner, D., Samandari, H., 2020. Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts. McKinsey Global Institute, April 2020.
- Wübbelmann, T. (2023): Dynamics of Flood-Regulating Ecosystem Services in Urban Areas Modelling Heavy Rainfall – Climate Change Impacts and Benefits of Nature-based Solutions. – Diss. Uni Hannover, 152 S.
- Wübbelmann, T. & Förster, K. 2022: LEAFlood - Landscape and vEgetAtion-dependent Flood model (Version 1), doi.org/10.5281/zenodo.6594181.
- Wübbelmann T., Bouwer L.M., Förster K., Bender S., Burkhard B. (2022). Urban ecosystems and heavy rainfall – A Flood Regulating Ecosystem Service modelling approach for extreme events on the local scale. *One Ecosystem* 7, doi.org/10.3897/oneeco.7.e87458.
- Wübbelmann, T., Förster, K., Bouwer, L.M., Dworczyk, C., Bender, S. & Burkhard, B. (2023): Urban flood regulating ecosystem services under climate change – How can Nature-based Solutions contribute? – *Frontiers in Water* 5:1081850, doi: 10.3389/frwa.2023.1081850
- Yake, D. (2020): Evaluating Maxbotix Ultrasonic Sensors for Monitoring Stream Base Flow. – *Enviro DIY, Tips and Pointers* (abgerufen: 13.06.2022)
- Yarnvudhi, A., Leksungnoen, N., Tor-Ngern, P., Premasathira, A., Thinkampheang, S., & Hermhuk, S. (2021). Evaluation of regulating and provisioning services provided by a park designed to be resilient to climate change in Bangkok, Thailand. – *Sustainability* 13, 13624. doi: 10.3390/su132413624
- Zölch, T., Henze, L., Keilholz, P. & Pauleit, S. (2017). Regulating urban surface runoff through nature-based solutions – an assessment at the micro-scale. – *Environ. Res.* 157, 135–144. doi: 10.1016/j.envres.2017.05.023

### Bildnachweise für Abb.10:

Die Icons wurden freundlicherweise von der Plattform [www.flaticon.com](http://www.flaticon.com) zur Verfügung gestellt. Nachfolgend die Einzelnachweise der einzelnen Icons (Stand: 20.11.2023):

- [Solar panel icons created by Freepik - Flaticon](https://www.flaticon.com/free-icons/solar-panel "solar panel icons")
- [Stecker Icons erstellt von Freepik - Flaticon](https://www.flaticon.com/de/kostenlose-icons/stecker "stecker Icons")
- [Herrscher Icons erstellt von Good Ware - Flaticon](https://www.flaticon.com/de/kostenlose-icons/herrscher "herrscher Icons")
- [Wasser Icons erstellt von Elias Bikbulatov - Flaticon](https://www.flaticon.com/de/kostenlose-icons/wasser "wasser Icons")
- [Regen Icons erstellt von Vectors Market - Flaticon](https://www.flaticon.com/de/kostenlose-icons/regen "regen Icons")
- [Messzylinder Icons erstellt von Freepik - Flaticon](https://www.flaticon.com/de/kostenlose-icons/messzylinder "messzylinder Icons")
- [Simulation icons created by Freepik - Flaticon](https://www.flaticon.com/free-icons/simulation "simulation icons")
- [Server icons created by srip - Flaticon](https://www.flaticon.com/free-icons/server "server icons")

[Übertragung Icons](https://www.flaticon.com/de/kostenlose-icons/ubertragung "Übertragung Icons") erstellt von Freepik - Flaticon

[Welt Icons](https://www.flaticon.com/de/kostenlose-icons/welt "Welt Icons") erstellt von Stockio - Flaticon

[Smartphone Icons](https://www.flaticon.com/de/kostenlose-icons/smartphone "smartphone Icons") erstellt von xnimrodx - Flaticon

[Computer Icons](https://www.flaticon.com/de/kostenlose-icons/computer "computer Icons") erstellt von xnimrodx - Flaticon

**Kontakt:**

Climate Service Center Germany (GERICS)  
Chilehaus, Eingang B  
Fischertwiete 1  
20095 Hamburg

Tel. 040-226 338-0  
Fax. 040-226 338-163

[www.climate-service-center.de](http://www.climate-service-center.de)

ISSN 2509-386X

Eine Einrichtung des

