



Fotos © FfW e. V.

BMBF-Fördermaßnahme „Regionale Informationen zum Klimahandeln (RegIKlim)“

# R2K-Klim+

Strategisches Entscheidungsunterstützungstool zur Anpassung an den Klimawandel auf regionaler und kommunaler Ebene im Rheineinzugsgebiet

**Gemeinsamer Schlussbericht des Verbundvorhabens**

Förderkennzeichen: 01LR2008A – 01LR2008F

Projektlaufzeit: 01.06.2020 – 31.08.2023

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**FONA**  
Klimaforschung

**Reg i Klim**

Regionale Informationen zum Klimahandeln



BMBF-Fördermaßnahme „Regionale Informationen  
zum Klimanhandeln (RegIKlim)“

Verbundvorhaben

**R2K-Klim+**

Strategisches Entscheidungsunterstützungstool zur  
Anpassung an den Klimawandel auf regionaler und  
kommunaler Ebene im Rheineinzugsgebiet

FKZ 01LR2008A-F



# IMPRESSUM

## Verbundkoordination



**Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen (FiW) e. V.**  
Kackertstraße 15 – 17  
52072 Aachen  
Dr. sc. Dipl.-Ing.  
Frank-Andreas Weber  
Mark Braun

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium für Bildung und Forschung**

IM RAHMEN DES BMBF-PROGRAMMS

**FONA**

Klimaforschung

**RegiKlim**

Regionale Informationen zum Klimahandeln

BETREUT DURCH



**DLR** Projektträger

## Projektpartner



**Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen (FiW) e. V.**  
Mark Braun  
Dr. sc. Dipl.-Ing.  
Frank-Andreas Weber  
Eleonore Thekla Hövel  
Vivien Heider  
Rona Michaelis  
Abdur-Rahman Jimoh



**Stadt Duisburg**  
Dr. Thomas Griebe  
Gabriel Spitzner  
Thomas Kuhn  
Rolf Schrapers



**ZLV der Universität Duisburg-Essen**  
Prof. Dr. Dirk Wittowsky  
Maik Luksch  
Rick Hollmann



**gaiac an der RWTH Aachen e. V.**  
Dr. Gottfried Lennartz  
Andreas Toschki  
Quintana Rumohr



**geomer GmbH**  
Dr. André Assmann  
Felix Schmenger  
Isabelle Beutelspacher



**Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH**

**Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH**  
Dr.-Ing. Thomas Siekmann  
Jan-Henrik Kruse  
Laura Berresheim



**RISP an der Universität Duisburg-Essen (UDE)**  
Joachim Liesenfeld  
Frederik Brandenstein  
Oliver Hamann



**Prognos AG**  
Oliver Lühr  
Lukas Eiserbeck  
Viktoria Leuschner

## Zitierhinweis

Braun, M., Weber, F.-A., Assmann, A., Berresheim, L., Beutelspacher, I., Brandenstein, F., Eiserbeck, L., Griebe, T., Hamann, O., Hövel, E., Heider, V., Hollmann, R., Jimoh, A.-R., Kruse, J.-H., Kuhn, T., Lennartz, G., Leuschner, V., Liesenfeld, J., Lühr, O., Luksch, M., Michaelis, R., Rumohr, Q., Schmenger, F., Schrapers, R., Siekmann, T., Spitzner, G., Toschki, A., Wittowsky, D. (2023): Strategisches Entscheidungsunterstützungstool zur Anpassung an den Klimawandel auf regionaler und kommunaler Ebene im Rheineinzugsgebiet (R2K-Klim+).

Schlussbericht im BMBF-Verbundvorhaben R2K-Klim+, Förderkennzeichen 01LR2008A – 01LR2008F, FiW e. V., Aachen.

## Förderkennzeichen:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01LR2008A – 01LR2008F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

<https://www.fiw.rwth-aachen.de/referenzen/r2k-klim>  
<https://r2k-klim.net>

**Aachen, August 2023**



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation und Aufgabenstellung (Einleitung)</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Projektkonsortium (bisherige Arbeiten der Institutionen)</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Planung und Ablauf des Vorhabens</b> .....	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Stand von Wissenschaft und Technik</b> .....	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>22</b>
5.1	Modellierung des Status Quo .....	22
5.1.1	Makroebene.....	22
5.1.1.1	Hydrologische Modellierung .....	22
5.1.1.2	Flood Risk Analysis mit FloRiAn.....	24
5.1.1.3	Ökonomische Vulnerabilitätsanalyse.....	25
5.1.1.4	Ökologische Vulnerabilitätsanalyse.....	31
5.1.2	Mikroebene.....	32
5.1.2.1	Hochwasser – hydraulische Modellierung und Schadenspotenzialanalyse.....	32
5.1.2.2	Starkregen – hydrologische und hydraulische Modellierung.....	45
5.1.2.3	Modellierung der Auenvegetation.....	48
5.1.2.4	Stadtökologie.....	50
5.1.2.5	Verkehrsmodellierung.....	61
5.2	Integration von Klimaszenarien .....	73
5.2.1	Makroebene.....	75
5.2.1.1	Hydrologische Modellierung .....	75
5.2.1.2	Ökonomische Vulnerabilitätsanalyse.....	77
5.2.1.3	Ökologische Vulnerabilitätsanalyse.....	83
5.2.2	Mikroebene.....	84
5.2.2.1	Hochwasser – hydraulische Modellierung und Schadenspotenzialanalyse.....	84
5.2.2.2	Starkregen – hydrologische und hydraulische Modellierung.....	87
5.2.2.3	Modellierung der Auenvegetation.....	87
5.2.2.4	Stadtökologie.....	88
5.3	Partizipationsprozess.....	89
5.3.1	Stakeholderanalyse – Verkehrsträger Binnenschiff.....	89
5.3.2	Unternehmensbefragung – Verkehrsträger Binnenschiff .....	91
5.3.3	Unternehmensbefragung – Verkehrsträger Straße .....	93
5.3.4	Haushaltsbefragungen .....	99
5.3.5	Anwendungspotenzial in der Stadt Duisburg.....	109
5.4	Anpassungsmaßnahmen.....	110
5.5	Unsicherheiten von Kostenschätzungen .....	112

---

5.6	Integration von Maßnahmen im EUS.....	113
5.7	Entwicklung eines Bewertungsansatzes.....	114
5.7.1	Ausgangssituation .....	114
5.7.2	Methodisches Vorgehen.....	116
5.7.3	Indikatoren.....	117
5.8	Entscheidungsunterstützungssystem .....	118
<b>6</b>	<b>Verwertung der Ergebnisse .....</b>	<b>130</b>
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>135</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Arbeitspakete (Bausteine) des Vorhabens.....	13
Abbildung 2: Modellnetzwerk der makroebene, jeweils zuständige Projektpartner sind farblich gekennzeichnet (grau: Prognos AG, blau: Siekmann GmbH, rot: FiW e.V., grün: gaiac e.V.) .....	17
Abbildung 3: Modellnetzwerk der Mikroebene, jeweils zuständige Partner sind farblich gekennzeichnet (gelb: RISP, rot: FiW e.V., grün: gaiac e.V., orange: geomer GmbH, blau: ZLV). .....	17
Abbildung 4: Links: Rheineinzugsgebiet (innerhalb der Grenzen Deutschlands) mit Darstellung der TEZG (rot eingefärbt) sowie maßgeblichen Gewässer I. und II. Ordnung (blaue Linien) und der Stadt Duisburg (grau eingefärbt). Mitte: Landnutzungsdaten auf Basis der CORINE-Daten (farblich hervorgehoben) im Rheineinzugsgebiet. Rechts: Bodentypen innerhalb der TEZG im Rheineinzugsgebiet. ....	22
Abbildung 5: Grafische Darstellung der monetären Schäden im Untersuchungsgebiet mit Hilfe von FloRiAn bei Hochwasserereignissen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten. ....	25
Abbildung 6: Zuschnitt der 15 gebildeten Wirtschaftsregionen (eigene Darstellung).....	26
Abbildung 7: Abflusszeitreihe Pegel Duisburg-Ruhrort für den Zeitraum 1910 – 2022.....	33
Abbildung 8: Aufbereitetes DGM für die Hochwassermodellierung; a) Ausschnitt Stadtgebiet Duisburg; b) Ausschnitt mit geschlossenem Hochwassersperrtors im Verbindungskanal zwischen Ruhr und Rhein-Herne-Kanal inkl. Berechnungsnetz und Breaklines (rot). ....	36
Abbildung 9: HQ <sub>100</sub> Hochwasserganglinie und Mittelwasserabfluss MQ des Pegels Duisburg-Ruhrort (rot, gewässerkundlicher Hauptwert nach [63]). ....	37
Abbildung 10: Ergebnisse der Hochwassermodellierung für maximale Überflutungstiefen: a) HQ <sub>2</sub> , b) HQ <sub>10</sub> , c) HQ <sub>100</sub> , d) HQ <sub>500</sub> ; Hintergrundkarte: Digitale Topographische Karte 1:25 000 / © Bezirksregierung Köln. ....	38
Abbildung 11: Vergleich der max. Überflutungstiefen in Duisburg-Ruhrort a) ohne und b) mit der Maßnahme Hochwasserschutzwand (rote-schwarze Linie); Hintergrundkarte: TopPlusOpen Light Grau © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Datenquellen: <a href="https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/datenquellen/Datenquellen_TopPlusOpen.html">https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/datenquellen/Datenquellen_TopPlusOpen.html</a> .....	39
Abbildung 12: Kindertagesstätten und Wohnhäuser in Duisburg mit und ohne Keller (Ausschnitt).....	42
Abbildung 13: Der fullHAUSde-Datensatz mit den für die Sektoren relevanten Gebäudekategorien (grün). ....	43
Abbildung 14: Schematische Darstellung des Berechnungsvorgangs zur Bestimmung des potenziellen Schadens im Falle des Gebäudeschadenmodells (oben) und des flächenbasierten Schadenmodells (unten). ....	44
Abbildung 15: Starkregengefahrenkarte der Stadt Duisburg bei einem 50 mm/h-Szenario. .	47
Abbildung 16: Differenz der Überflutungstiefen bei einem 50 mm/h-Szenario mit und ohne Maßnahmen. ....	48

Abbildung 17: Durchschnittliche jährliche Überflutungsdauer der Jahre 1971 bis 2020 je Zelle und Biotoptyp für den direkt vom Rhein beeinflussten Bereich der Roos. .	50
Abbildung 18: Kenngrößen der Stadt Duisburg. Oben: Grünvolumen; Unten: Bauvolumen; jeweils links: Ebene Baublock; jeweils rechts: Ebene der Flächennutzungstypen / Biotoptypen. ....	53
Abbildung 19: Kenngrößen der Stadt Duisburg. Oben: Gesamtversiegelungsgrad; Unten: Beschattungsgrad durch Bäume; jeweils links: Ebene Baublock; jeweils rechts: Ebene der Flächennutzungstypen / Biotoptypen. ....	54
Abbildung 20: Bewertungseinheiten zum Stadtklima der Stadt Duisburg. Oben: Klimatische Ungunsträume; Unten: Abflussbeiwerte; jeweils links: Ebene Baublock; jeweils rechts: Ebene der Flächennutzungstypen / Biotoptypen. ....	55
Abbildung 21: Bewertungseinheiten zur Biodiversität der Stadt Duisburg. Links: Bewertung der Stadtstrukturtypen nach dem Biotop-Werteverfahren der LANUV NRW, Rechts: Aufwertung der Biotope durch ihre Lage in Schutzgebiete. ....	56
Abbildung 22: Schema der Vulnerabilitätsanalyse. ....	57
Abbildung 23: Vulnerabilität der einzelnen Baublöcke in Duisburg (rechts: 7-stufig, links: mäßig bis höchst vulnerable Baublöcke). ....	57
Abbildung 24: Korrelation zwischen den stadtstrukturellen Kenngrößen Grünvolumen (oben) und Gesamtversiegelungsgrad (unten) mit der nächtlichen Abkühlungsrate (FITNAH-Modellierung, RVR 2023). ....	59
Abbildung 25: Verlagerung der Verkehrsträger bei Niedrigwasser. ....	68
Abbildung 26: Darstellung der Hafengebiete. ....	69
Abbildung 27: Belastung gemäß Verkehrssimulation bei Starkregen. ....	69
Abbildung 28: Belastung gemäß Verkehrssimulation bei Hochwasser. ....	70
Abbildung 29: Belastung gemäß Verkehrssimulation bei Hitze. ....	71
Abbildung 30: Belastung gemäß Verkehrssimulation bei Niedrigwasser. ....	72
Abbildung 31: Die SSP-Szenarien (© DKRZ nach [101]). ....	74
Abbildung 32: Potenzielle Auswirkungen von Niedrigwasser im RCP 8.5-Szenario auf den regionalen Produktionswert in Duisburg. ....	80
Abbildung 33: Potenzielle Auswirkungen von Niedrigwasser im RCP 8.5-Szenario auf den regionalen Produktionswert in der Region Mannheim-Ludwigshafen. ....	81
Abbildung 34: Mittlere Anzahl der Tage, an denen im Monat der Schwellenwert T1 (links) und T2 (rechts) überschritten wird, dargestellt als Mittelwerte über 30 Jahre für den Bezugszeitraum (1971 bis 2000, rot), die nahe (2031 bis 2060, grün) und ferne Zukunft (2070 bis 2099, blau). Die Simulationen wurden mit dem Wassergütemodell QSim auf Basis von fünf Mitgliedern des BfG-Ensembles „Wassergüte“ und unter Annahme des Szenarios RCP8.5 durchgeführt (BfG 2022). ....	84
Abbildung 35: Ergebnisse der Extremwertstatistik (LN3 MLM) für den Pegel Duisburg-Ruhrort für verschiedene Klimamodellkombinationen des RCP8.5-Szenarios und den Status Quo (rot). ....	86

Abbildung 36: Perzentile der Ergebnisse der Extremwertstatistik (LN3 MLM) für den Pegel Duisburg-Ruhrort für verschiedene Klimamodellkombinationen des RCP8.5-Szenarios und den Status Quo (rot). .....	86
Abbildung 37: Biotoptypenkarte im IST-Zustand des Altarms „Die Roos“ in der Rheinaue Friemersheim im Süden von Duisburg mit Ausschnitt des digitalen Abbildes im LandS-Modell. ....	88
Abbildung 38: Schlüsselergebnisse der Stakeholderbefragung der Binnenschifffahrt auf dem Rhein. ....	90
Abbildung 39: Darstellung des Netzwerks aus Personen in Vertretungsstrukturen der Organisationen der Binnenschifffahrt, die im Rahmen der Stakeholderanalyse erhoben wurden, Wenige Organisationen im Zentrum sind über Funktionsträger miteinander verbunden. ....	91
Abbildung 40: Betroffenheit der Unternehmen in den letzten 10 Jahren (Skala: sehr stark (1) – überhaupt nicht (5)). ....	94
Abbildung 41: Betroffenheit bei Starkregen, Mittelwerte (Skala: sehr wahrscheinlich (1) – sehr unwahrscheinlich (5)). ....	95
Abbildung 42: Betroffenheit bei Hitze, Mittelwerte (Skala: sehr wahrscheinlich (1) – sehr unwahrscheinlich (5)). ....	96
Abbildung 43: Betroffenheit bei Niedrig-/Hochwasser, Mittelwerte (Skala: sehr wahrscheinlich (1) – sehr unwahrscheinlich (5)). ....	97
Abbildung 44: Vergleich der Auswirkungen von vier Klimasignalen. ....	98
Abbildung 45: Wahrgenommene Hitzebelastung an verschiedenen Orten. ....	101
Abbildung 46: Auswertung zur Frage: Wer steht laut den Befragten in der Pflicht, sie über hitzehemmende Maßnahmen und das richtige Verhalten bei thermischer Belastung zu informieren? .....	103
Abbildung 47: Anwendung bzw. Nicht-Anwendung von individuellen Hitzeschutzmaßnahmen. ....	104
Abbildung 48: Bereitschaft der Duisburger:innen sich als ehrenamtliche Freiwillige an einem Buddy-System zu beteiligen. ....	106
Abbildung 49: Vulnerabilität verschiedener Cluster der Duisburger Stadtgesellschaft. ....	108
Abbildung 50: Kommunaler Entscheidungsprozess mit bezeichnenden Charakteristika. ...	110
Abbildung 51: Arbeitsschritte zur Auswahl von Maßnahmen. ....	111
Abbildung 52: Exemplarische Maßnahmenbündel für die Klimasignale Starkregen und Hochwasser. ....	113
Abbildung 53: Modellierbare Maßnahmen in Duisburg-Ruhrort für Hochwasser, Starkregen und Hitze. ....	114
Abbildung 54: Entwicklungsansatz der Bewertungsmethodik. ....	117
Abbildung 55: Bewertungsindikatoren je Klimasignal und Rezeptor. ....	118
Abbildung 56: Architektur und Komponenten des EUS. ....	120
Abbildung 57: Modularer Aufbau der Client-Anwendung. ....	123
Abbildung 58: Berechneter potenzieller Schaden für ein ausgewähltes Gebiet anhand des flächenbasierten Schadenmodells als Diagramme in der Sidebar (links) sowie die zugehörige berechnete Kartendarstellung (rechts). ....	125

- Abbildung 59: Animierte Darstellung eines 100-jährlichen Starkregenereignisses in Duisburg.  
..... 126
- Abbildung 60: Berechnete Kartendarstellung der Hitzedefiziträume (rechts) mit  
Indikatorauswahl in der Sidebar (links unten). Alternativ ist eine Darstellung  
der zugrundeliegenden Lasträume als Karten-Layer möglich (links oben).  
..... 127
- Abbildung 61: Kartendarstellung der regionalen ökonomischen Veränderungen (rechts) mit  
Auswahl- und Filteroptionen in der Sidebar (links). Die Sidebar zeigt  
darüber hinaus die ökonomischen Veränderungen nach Branche. .... 129

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die 15 gebildeten Wirtschaftsregionen des Rheineinzugsgebietes. ....	26
Tabelle 2: Variablen der Grundregressionsgleichung. ....	28
Tabelle 3: Übersicht der Messpunkte in den einzelnen Rheinabschnitten und die von gaiac ermittelten Temperaturschwellenwerte. ....	32
Tabelle 4: Hochwasserabflüsse verschiedener Jährlichkeiten für den Pegel Duisburg-Ruhrort .....	34
Tabelle 5: Eingangsdaten zum Aufbau des 2D-Hochwassermodells. ....	35
Tabelle 6: Ausschnitt der in der fullHAUSde-Datenbank enthaltenen Parameter. ....	41
Tabelle 7: Nettoanlagevermögen zu Wiederbeschaffungspreisen nach Sektoren und Fläche. .....	43
Tabelle 8: Bewertung der Stadtstrukturen bzgl. ihrer klimatischen Ausstattung anhand ausgewählter Kenngrößen (Vers. = Versiegelungsgrad, BV = Bauvolumen, GV = Grünvolumen). ....	52
Tabelle 9: Beispielhafte Darstellung der nächtlichen Abkühlungsraten (siehe RVR 2023) ausgewählter Stadtstrukturtypen in Grad Celsius. ....	60
Tabelle 10: Verkehrsrelevante Schwellenwerte bei stehendem Oberflächenwasser. ....	63
Tabelle 11: Modellierte Effekte bei Starkregen und Hochwasser. ....	64
Tabelle 12: Verkehrsrelevante Schwellenwerte bei Hitze. ....	66
Tabelle 13: Modellierte Effekte bei Hitze.....	67
Tabelle 14: Verkehrsnachfrage der Hafengebiete.....	69
Tabelle 15: Modellkombinationen des BfG-Ensembles für RCP8.5.....	76
Tabelle 16: Kennzahlen der Ensemblemitglieder zur Modellierung der Niedrigwasserphasen. Die Spalte „Wertebereich“ gibt den minimalen und maximalen Wert an Niedrigwassertagen pro Jahr aus, die in der Ensemblemembersmodellierung auftraten. ....	78
Tabelle 17: Auswahl der repräsentativen Jahre aus den Ensemblemitgliedern für die Modellierung. In fett gedruckt sind die Ensembles und deren Jahre, die für die Modellierung herangezogen wurden. ....	79
Tabelle 18: Modellkombinationen der für RCP5.8 hinsichtlich Starkregen ausgewertete Zeitreihen .....	87
Tabelle 19: Informationen im Maßnahmenkatalog.....	112

## 1 Motivation und Aufgabenstellung (Einleitung)

Die Auswirkungen des globalen Klimawandels sind auch in Deutschland erkennbar. In den vergangenen Jahren sind sowohl großräumige Ereignisse wie Hoch- und Niedrigwasser an den größten Flüssen in Deutschland als auch lokale Extremwetterereignisse wie Starkniederschläge oder kleinräumige thermische Belastungen in urbanen Siedlungsgebieten mit größerer Häufigkeit und Intensität aufgetreten. Die unterschiedlichen Klimasignale wirken sich auf eine ganze Reihe von Rezeptoren aus: Die Auswirkungen von Hochwasser, Niedrigwasser, Starkregen, Hitze und Dürre auf die Bevölkerung, Infrastruktur, Umwelt und Wirtschaft differenziert dabei stark in Abhängigkeit der regionalen und lokalen Standortfaktoren und Wechselwirkungen der Systeme.

Im BMBF-Forschungsprojekt „Strategisches Entscheidungsunterstützungstool zur Anpassung an den Klimawandel auf regionaler und kommunaler Ebene im Rheineinzugsgebiet – R2K-Klim+“ hat sich ein interdisziplinäres Konsortium zusammengeschlossen, um die Auswirkungen dieser Klimasignale auf zwei Ebenen zu untersuchen: auf der Makroebene betrachtete das Projekt in der FuE-Phase I die Entwicklungen im gesamten Rheineinzugsgebiet und setzte dabei einen Fokuspunkt auf den Logistikstandort Duisburg (Mikroebene), an dessen Beispiel die Wirkungen der Makroebene, kleinräumige lokale Ereignisse und der sozioökonomische Kontext einer Strategie zur kommunalen Klimafolgenanpassung untersucht wurde.

Das Ziel des Projektes war die Entwicklung einer Methodik für eine gekoppelte integrale Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels auf unterschiedliche Rezeptoren im Hinblick auf ökologische, ökonomische und soziale Bewertungsindikatoren. Die technische Umsetzung erfolgte durch die Konzeptionierung und Programmierung eines Entscheidungsunterstützungstools, das der Kommune in der FuE-Phase II technisch zugänglich gemacht werden soll. Um Strategien zur Klimaanpassung auch langfristig einen Mehrwert bieten zu können, wurde auch eine Methodik zur Integration von Klimaszenarien entwickelt, die in der kommenden Phase mit den aktuellsten Daten des IPCC (CMIP6-Szenarien) bespielt werden soll.

Seit der Antragstellung hat die Dringlichkeit und Notwendigkeit der angestrebten Ergebnisse noch einmal zugenommen. In den Jahren 2019 – 2022 ist es zu weiteren Extremereignissen im Untersuchungsgebiet gekommen, die in ihrer Periodizität und gleichzeitigen Intensität bislang nicht durch klimatologische und hydrologische Modellierungen gedeckt waren. Das R2K-Konsortium zielte daher darauf ab, auch Zwischenergebnisse zu generieren und zu veröffentlichen, die den Anwendungspartner:innen in den Kommunen, der Bevölkerung und der Wirtschaft auch schon während der Projektlaufzeit einen Mehrwert für ihre Strategien zur Klimaanpassung bieten können.

## **2 Projektkonsortium (bisherige Arbeiten der Institutionen)**

### **FiW an der RWTH Aachen e. V.**

Das FiW legt als anwendungsorientiertes Transferinstitut einen besonderen Fokus auf den Transfer der Forschungsinhalte in praxisorientierte Anwendungsprozesse. Im Themenfeld Klimafolgenanpassung koordinierte das FiW u. a. das BMBF-Verbundvorhaben „DynAKlim“, in dessen Rahmen u. a. die EUS KlimaFlex und Adaptus gemeinsam mit den Praxisakteuren entwickelt wurden. Weitere aktuelle Projekte zur Klimafolgenanpassung sind und waren beispielsweise LINEG 2050, der Klimaresilienz-Check für die Metropole Ruhr, Klimoprax oder iResilience, in denen gemeinsam mit den Akteuren vor Ort (Kommunen, Verbände, Unternehmen, Gesellschaft) die erforderlichen Prozesse, Konzepte und Tools für eine integrierte Klimaanpassung erarbeitet wurden. Darüber hinaus besitzt das FiW eine langjährige Erfahrung in der Gesamtkoordination von BMBF-Vorhaben im Bereich Wassermanagement und Klimafolgenanpassung. Hier sind neben den bereits genannten Projekten DynAKlim und Klimoprax u. a. noch die nationalen Projekte render, RiverView® und mobileVIEW, als auch internationale Verbundprojekte wie InoCotton-GROW, INTEWAR, HOWAMAN und RAIN zu nennen.

### **Stadt Duisburg**

Die Stadt Duisburg an Rhein und Ruhr gilt als größter Stahlproduktionsort und beheimatet ebenso den größten Binnenhafen des Kontinents. Klimarisiken nehmen bereits heute maßgeblichen Einfluss auf Mensch, Umwelt und Wirtschaft. Durch die langanhaltende Dürre und damit einhergehende Niedrigwasserepisode im Sommer 2022 wurden Transportströme im Duisburger Raum beeinträchtigt. Das Thema fand überregional Berichterstattung, ebenso wie die mediale Präsenz der Überflutungsereignisse 2021 in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen, welche in Duisburg die Bestrebungen in der Starkregenvorsorge intensivierten. Hinsichtlich der wachsenden Konfrontation wurde ein Klimafolgenanpassungskonzept für die Stadt Duisburg erarbeitet, und der Rat hat die Verwaltung mit der Konkretisierung von Maßnahmen beauftragt. Im regionalen Kontext der Klimaanpassung besteht Kontakt zu den interkommunalen Austauschformaten der Zukunftsinitiative „Klima.Werk“ von Emschergenossenschaft/Lippeverband und den Kommunen des Ruhrgebiets. In der Region hat sich zudem der Regionalverband Ruhr mit seinen Kommunen in der „Charta Grüne Infrastruktur“ für Lebensqualität im klimaresilienten Raum positioniert. Die Projektbegleitung von R2K-Klim+ findet seitens der Stadt Duisburg durch das Sachgebiet Klima- und Hochwasserschutz im Umweltamt statt.

### **gaiac an der RWTH Aachen e.V.**

Das gaiac bringt drei Modelle (zwei GIS-Tools, ein prozessorientiertes Landschaftsmodell) für zwei sehr unterschiedliche ökologische Systeme (Fließgewässer inkl. Auen und Ökosystem Stadt) auf verschiedenen räumlichen Ebenen in das Projekt ein. Für den Rhein (Fließgewässer inkl. Auen auf Makroebene) wird das im BMBF-Verbundprojekt REISE entwickelte und im Wuppereinzugsgebiet erprobte GIS-Tool (SRL 5) zur Ermittlung der ökologischen

Vulnerabilität (inkl. monetäre Bewertung von Schäden) genutzt und vor allem hinsichtlich der Niedrigwasserthematik im Fließgewässer weiterentwickelt. Das prozessorientierte Landschaftsmodell (LandS-Modell, bzw. bei ältere Modellversion GraS-Modell, SRL 6) von gaiac, entwickelt und angewandt im Nationalpark Eifel und auf den Kyrill-Windwurfflächen in NRW (Projekt Virtuelle Wald III NRW), wird für die dynamische Simulation der Auen in Duisburg (Mikroebene: Auewälder, Auewiesen etc.) eingesetzt.

Im Themenfeld Stadtökologie (Stadt Duisburg, Mikroebene) steht zum einen die Analyse der grünblauen Stadtinfrastruktur im Vordergrund und zum anderen deren „Verdichtung“ als wesentliche Klimaanpassungsmaßnahme in Stadtgebieten. Das im Rahmen des EFRE-Projekts „Decision Support Infrastruktur“ entwickelte und in Köln-Nippes erprobte GIS-Tool (SRL 5) zur Analyse der Stadtinfrastruktur wird weiterentwickelt und auf Duisburg angewandt. Die Erweiterung dieses Tools zielt auf die Implementierung stadtstruktureller Klimaanpassungsmaßnahmen (siehe Leitfaden des DBU-Verbundprojekt MURIEL) sowie auf die Analyse städtischer bzw. stadtoökologischer Vulnerabilitäten (u.a. Klimaresistenz von Stadtbäumen).

### **geomer GmbH**

geomer setzt im Bereich seiner Projekte unterschiedliche Web-Technologien vielfältig ein. Hier können die Entwicklung und Bereitstellung von verschiedenen Diensten im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte (sdkama, RIESGOS) dienen, aber auch die operativ betriebenen Seiten wie [www.starkregengefahr.de](http://www.starkregengefahr.de) und [www.steb-koeln.de/hochwasser-und-ueberflutungsschutz/akutes-hochwasser/ueberflutungsgefahrenkarten/ueberflutungsgefahrenkarten.jsp](http://www.steb-koeln.de/hochwasser-und-ueberflutungsschutz/akutes-hochwasser/ueberflutungsgefahrenkarten/ueberflutungsgefahrenkarten.jsp) bzw. das interne EUS der Stadt Köln, bei dem Schutzmaßnahmen und deren aktueller Durchführungsstand abgebildet sind.

Im Bereich Starkregenmodellierung ist geomer einer der Vorreiter und erstellt seit ca. 20 Jahren Starkregengefahrenkarten und betreut den nachfolgenden Risikomanagementprozess. Insbesondere wurden auch unterschiedliche Pilotprojekte bearbeitet, u. a. das dem Leitfaden Baden-Württemberg zugrunde liegende Glems-Projekt wie auch Pilotprojekte in Bayern und im Saarland. Bereits 2003 wurde das hydraulische Modell FloodArea um die Funktionalität „Starkregen“ erweitert. Seit sechs Jahren wird auch ein vereinfachtes hydrologisches Modell (HydroRAS) angeboten, das genau auf die Anforderungen der Starkregenmodellierung und die Datenanforderungen von FloodArea abgestimmt ist. Beide Modelle werden weltweit kommerziell vertrieben und haben die entsprechende Marktreife.

### **Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbh**

Die Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbh beschäftigt sich als Planungsbüro intensiv mit (siedlungs-)wasserwirtschaftlichen Fragestellungen. Neben der Erstellung einer Vielzahl von Hochwasser- und Sturzflutvorsorgekonzepten zählt die eigentliche Umsetzung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen zu ihrem Kerngeschäft. Im Sinne einer effizienten Umsetzung nachhaltiger Maßnahmen wurde durch die Ingenieurgesellschaft in enger Zusammenarbeit mit



dem Umweltministerium des Landes Rheinland-Pfalz (MKUEM, früher MUEEF) und dem Informations- und Beratungszentrum Hochwasservorsorge Rheinland-Pfalz (IBH) ein Leitfaden entwickelt, der auf Basis von Kosten-Nutzen-Verhältnissen eine Priorisierung von Maßnahmen ermöglicht.

### **RISP an der Universität Duisburg-Essen (UDE)**

Das RISP befasst sich seit rund 15 Jahren mit der Klimafolgenanpassungsforschung mit spezieller Expertise im Bereich sozioökonomischer Parameter der Klimafolgenanpassung und im Kontext kommunaler und regionaler Governanceforschung. Diese Expertise hat das Institut unter anderem als Forschungspartner des Verbundprojekts DynAKlim (2009-2014) im BMBF-Förderschwerpunkt KLIMZUG entwickelt, dort verantwortlich für den Bereich „Politik, Planung und Verwaltung“. Im Rahmen des Verbundprojekts render (2014-2018) im BMBF-Förderschwerpunkt „Innovationsgruppen für nachhaltiges Landmanagement“ wurde der regionale Energiedialog an der Schnittstelle zwischen Politik und Verwaltung, Zivilgesellschaft und Wissenschaft gestaltet, mit dem Energieplan Aachen 2030 als Ergebnis. Aus der Beteiligung am NRW-Forschungskolleg „Future Water“ (2017-2022) und weiteren Projekten aus dem Bereich der Wasserwirtschaft und zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie sind breite methodische Kompetenzen in der Netzwerkanalyse, quantitativen Sozialforschung sowie der Analyse von Zahlungsbereitschaften hervorgegangen. Als Projektpartner im Projekt Sim4Dialog, gefördert im Programm „progres.nrw“ (2022-2025), erforscht und gestaltet das Institut den Einsatz eines AR/VR-basierten Dialog-, Planungs- und Simulationstools für Windenergieanlagen. Das RISP ist Mitglied des Zentrums für Wasser- und Umweltforschung (ZWU) und des Zentrums für Logistik und Verkehr (ZLV) der UDE.

### **ZLV (imobis und GS) der Universität Duisburg-Essen**

Das Zentrum für Logistik und Verkehr (ZLV) vereint eine Vielzahl von Lehrstühlen der Universität Duisburg-Essen für die interdisziplinäre Konzeption, das Management und den Transfer von wissenschaftlichem Arbeiten im Zusammenhang mit globalen Lieferketten, Logistik, Mobilität und Verkehr aus verschiedenen Fachbereichen). Das ZLV orientiert sich dabei an langfristig zukunftsfähigen, ökonomisch förderlichen sowie ökologischen und sozialverträglichen Innovationen. Die Vision ist, ein international anerkanntes Wissensgenerations- und Transferzentrum für exzellente und innovative transdisziplinäre Forschung zu globalen nachhaltigen Lieferketten, Logistik und Mobilität in einem Mehrebenensystem (Multi-Level-Governance) zu werden. Das Institut für Mobilitäts- und Stadtplanung (imobis) beschäftigt sich vor dem Hintergrund sich verändernder Rahmenbedingungen wie der Energiewende, Klimawandel und Digitalisierung mit fundamentalen Fragen in Bezug auf Wechselwirkungen zwischen Stadt, Infrastrukturen und Mobilität. Dabei stehen Aspekte des Verkehrsverhaltens, der nachhaltigen Stadtplanung sowie die (Um-)Gestaltung der Verkehrssysteme genauso im Fokus wie die Entwicklung von nachhaltigen Logistikkonzepten auf der Last-Mile. Komplexe Herausforderungen

sowie technische und soziale Innovationen erfordern neue, effiziente und integrierte Verkehrslösungen für die urbanen Systeme der Zukunft.

### **Prognos AG**

Die Prognos AG hat in Aufträgen für das BMWi (Deutsche Anpassungsstrategie / Aktionsplan Anpassung sowie Planungs-Tool KLIMACHECK) operative Anpassungslösungen erarbeitet. Der KLIMACHECK ist dabei ein Bewertungstool für die autonome Anpassung von industriellen und gewerblichen Unternehmen inkl. der Verbindungen in der Supply Chain der Unternehmen. Zudem verantwortete Prognos die Aktualisierung und Weiterentwicklung des Klimalotsen für das UBA. Derzeit ist die Prognos AG federführend in das Management des "Netzwerks Klimaanpassung & Unternehmen.NRW" eingebunden und betreut dieses bis 2026 gemeinsam mit weiteren Partnerinstitutionen. Darüber hinaus war die Prognos AG bis Juli 2023 Teil des Forschungsprojektes "Evolving Regions", das sich mit der Erstellung von Anpassungs-Roadmaps in sieben ländlichen Regionen in Nordrhein-Westfalen auseinandersetzte – hier wurden durch die Prognos AG insbesondere die Wirkungsbeziehungen der Anpassungsmaßnahmen und deren Impacts bewertet. Zusätzlich ist die Prognos AG in der monetären Bewertung bzw. Feststellung der ökonomischen Klimawandelfolgen aktiv, so unter anderem durch die Studie "Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland".

Unabhängig von der expliziten Klimaanpassung besitzt die Prognos AG als eines der ältesten privaten Wirtschaftsforschungsinstitute Europas neben mehreren makroökonomischen Modellen unter anderem ein eigenes regionalökonomisches Modell (REGINA) in der regelmäßigen Anwendung, welches auf der Basis regionalisierter Input/Output-Tabellen Schadensfunktionen und Investitionsimpulse integrieren und modellieren kann. Zusätzlich verfügt Prognos über langjährige Expertise in der Modellierung und Prognose von Verkehrsdaten, spezifisch im Bereich der Binnenschifffahrt. Im Bereich der Logistik verfügt sie über relationsbezogene Daten zum Güterverkehr nach Fahrtzwecken und Transportgütern, mit denen multimodale Transportketten abgebildet werden können.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung der in der Förderrichtlinie „RegIKlim – Regionale Informationen zum Klimahandeln“ geförderten Verbundprojekte erfolgte anhand fünf ausgewählter Bausteine A bis E mit folgenden Bezeichnungen:

Baustein A: Verwaltung, Planung, Schnittstelle

Baustein B: Regionale Anpassungskapazität und Anpassungsnotwendigkeit

Baustein C: Integrierte Bewertung auf Makro- und Mikroebene

Baustein D: Daten und Modelle

Baustein E: Projektkoordination

Die Zusammenhänge der einzelnen Bausteine sind in der folgenden Grafik (Abbildung 1) dargestellt:

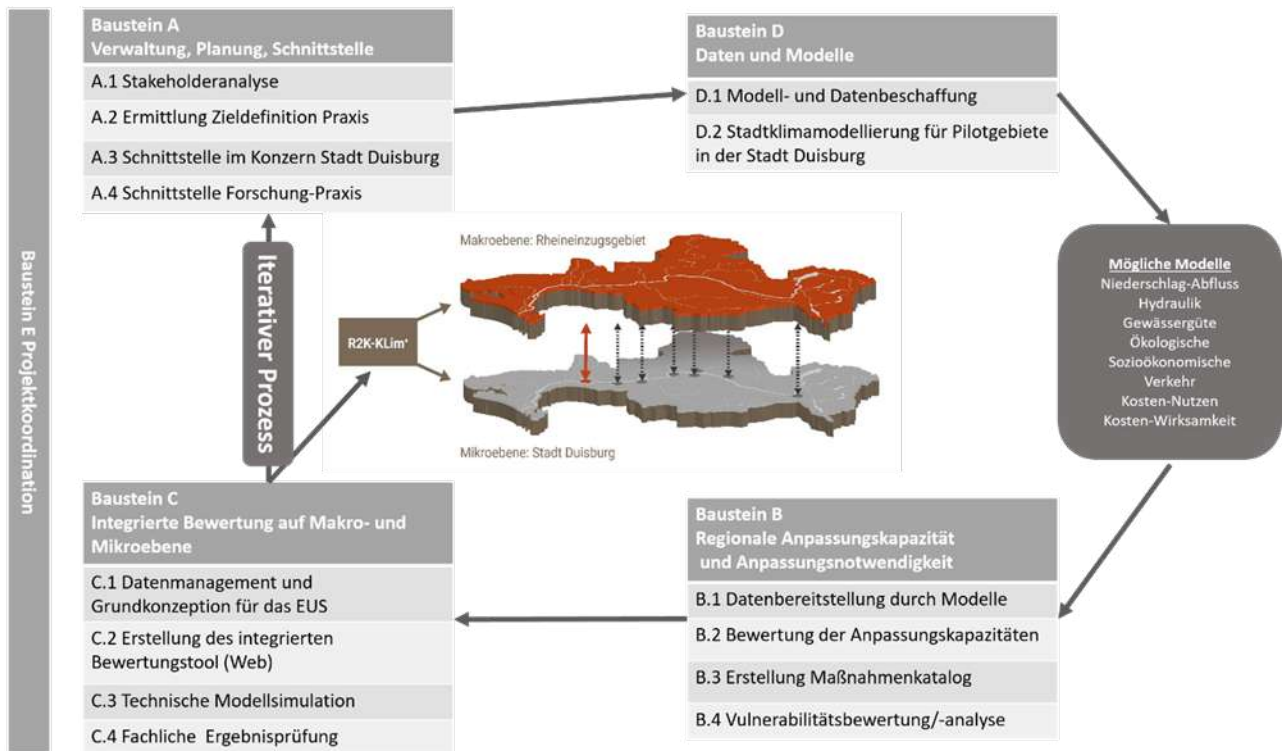


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Arbeitspakete (Bausteine) des Vorhabens.

Aus der Grafik wird ersichtlich, dass sich das Projekt R2K-Klim+ schwerpunktmäßig mit zwei räumlichen Ebenen beschäftigt hat: die Makroebene Rheineinzugsgebiet und die Mikroebene Stadt Duisburg. Im Zuge der sektorübergreifenden, integralen und gesamträumlichen Betrachtungsweise wurden dementsprechend auch Wechselwirkungen zwischen den beiden Ebenen identifiziert. Die Arbeiten der Bausteine A bis E liefen dabei nicht ausschließlich chronologisch, sondern teilweise auch parallel oder in Form von iterativen Prozessen ab.

Das Gesamtziel von R2K-Klim+ ist die Verbesserung der strategischen kommunalen Klimaanpassung in der Modellregion. Im Zentrum der methodischen Entwicklung steht ein technisches

Entscheidungsunterstützungssystem (EUS), das ein Aufzeigen potenzieller Handlungsoptionen gegenüber verschiedenen Klimasignale sowie eine Bewertung und Priorisierung dieser Optionen ermöglicht. Der Fokus der FuE-Phase I lag auf der Konzeptionierung des EUS und der zugrundeliegenden Wirkmodelle der einzelnen Konsortialpartner sowie der Entwicklung eines Prototyps des EUS.

**Baustein A** lieferte in diesem Gesamtkonzept die Perspektive des späteren Anwenders des EUS. Hierfür wurde eine Identifikation der relevanten Stakeholder und Schnittstellenpartner in der Stadt Duisburg sowie die Definition der Zielvorgaben für die praktische Anwendung angesetzt.

In **Baustein B** wurde die Identifikation von Anpassungskapazitäten der vom Klimawandel betroffenen Rezeptoren geplant. Grundlage für die Quantifizierung und Bewertung der Auswirkungen von Klimasignalen auf die Rezeptoren bildeten die von den Konsortialpartnern eingebrachten Wirkmodelle. Die Beschaffung der erforderlichen Inputdaten und Lizenzen für weitere Software erfolgte zuvor in **Baustein D**. Um auch Zukunftsbetrachtungen zu ermöglichen, verständigten sich die Projekte der Förderrichtlinie auf eine Integration von Klimadaten, die durch das Querschnittsprojekt NUKLEUS zur Verfügung gestellt werden sollten. Mithilfe der Klimadaten und der Auswahl von Anpassungsmaßnahmen (Maßnahmenkatalog) sollten anschließend potenzielle Zukunftsszenarien betrachtet und die Auswirkungen der Klimasignale auf die Rezeptoren analysiert werden.

Um eine sektorübergreifende, integrale und ganzheitliche Betrachtungsweise der in ihren Wirkungen doch sehr unterschiedlichen Klimasignale zu ermöglichen, war die Entwicklung einer Bewertungsmethodik erforderlich. An dieser Stelle erfolgte der Übergang zwischen der Vulnerabilitätsbewertung aus Baustein B zur Darstellung der Ergebnisse in einem technischen Webtool. Dies wurde in **Baustein C** konzipiert und aufgesetzt und enthielt das Datenmanagement für die in Baustein B modellierten Daten und Ergebnisse. Die modellierenden Partner lieferten über diese Schnittstelle ihre Ergebnisse zur Einbindung in das EUS, in dem der Vergleich der einzelnen Klimasignale und die Bewertung der konkreten Auswirkungen ermöglicht wurde.

In **Baustein E** wurden u.a. die Koordination, Veranstaltungsorganisation, Öffentlichkeitsarbeit, das Controlling des Gesamtprojektes sowie die externe Kommunikation und Repräsentation des Verbundes gebündelt.

R2K-Klim+ wurde so konzipiert, dass es neben der Gesamtkoordination des Projektes, welche durch das FiW an der RWTH Aachen e.V. wahrgenommen wurde, in Abhängigkeit der vorliegenden Expertise der Konsortialpartner jeweils weitere verantwortliche Rollen im Bereich der Bausteine (A bis E) sowie der dazugehörigen Arbeitspakete definiert wurden. Der Projektansatz ist inter- und transdisziplinär aufgebaut, was sich nicht nur in den verschiedenen Fachbereichen der einzelnen Institutionen, sondern auch an den zahlreichen Schnittstellen innerhalb der Arbeitspakete widerspiegelt.

Die Stadt Duisburg nimmt im Hinblick auf die Verwertung der Ergebnisse eine ganz entscheidende Rolle ein. Sie sichert die Praxistauglichkeit des zu entwickelnden Tools sowie die Bedarfsorientierung hinsichtlich der Entwicklung der Benutzeroberfläche, der Schnittstellen zu bestehenden Anwendungen im Konzern Stadt Duisburg und die sinnhafte Verwendung der erzielten Ergebnisse. Die zu setzenden Kriterien, Zieldefinitionen und wesentliche Kernelemente des EUS werden so durch die späteren Anwender direkt mit erarbeitet. Die Stadt Duisburg dient darüber hinaus auch als Netzwerker und Moderator innerhalb des Konzerns Stadt Duisburg. Somit ist die Integration bspw. des Hafens Duisburg, der Wirtschaftsbetriebe Duisburg oder auch der städtischen Versorger sichergestellt. Ebenso bildet die Stadt Duisburg – zusammen mit weiteren Teilprojekten – auch die Schnittstelle mit der gesamten Duisburger Stadtgesellschaft. Hierzu ist u.a. die Einbindung von Wirtschaft, Zivilgesellschaft, Kammern, Verbänden und weiteren Akteuren zu zählen.

Um eine möglichst breite Verankerung des Projektes in den relevanten Themenfeldern zu ermöglichen, arbeitete das Konsortium auch mit verschiedenen assoziierten Partnern zusammen, u. a. die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), der Hafen Duisburg (duisport), der Regionalverband Ruhr (RVR) und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).

Zur kritischen Diskussion und Evaluierung von Projektfortschritten und Zwischenergebnissen hat das Konsortium zudem einen projektspezifischen Begleitkreis mit Mitgliedern aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft zusammengestellt.

## 4 Stand von Wissenschaft und Technik

Das Erfordernis einer gesamtgesellschaftlichen Klimaanpassung ist in den vergangenen Jahren auf globaler, nationaler und lokaler Ebene in den Fokus gerückt. Klimaanpassung, also die Anpassung unserer sozialen, ökologischen und ökonomischen Systeme an die Auswirkungen des Klimawandels, ist dabei vom Klimaschutz, also dem Schutz der Umwelt vor den Auswirkungen menschlichen Handelns, abzugrenzen. Nichtsdestotrotz bestehen zahlreiche Synergieeffekte. Der Klimaschutz kann als präventive Maßnahme gegenüber potenziellen Auswirkungen des Klimawandels als ein Instrument einer Strategie zur Klimaanpassung beitragen.

### Förderlandschaft

Die europäische und deutsche Forschungslandschaft beschäftigt sich bereits seit einigen Jahren mit dem Thema und hat eine Vielzahl von Rahmenprogrammen und Fördermaßnahmen (u. a. L'Instrument Financier pour l'Environnement (LIFE+), Horizon 2020, Forschung für Nachhaltige Entwicklung, KLIMZUG, Stadtklima im Wandel, KLIWAS) aufgesetzt. In den genannten Förderprogrammen reichten die räumlichen Einheiten von der kleinräumigen Quartiersebene (Stadtklima im Wandel) bis hin zur großräumigen regionalen Ebene (KLIMZUG). Als Ziel hatten alle Förderprogramme gemeinsam, dass die in den Projekten erarbeiteten Ergebnisse und Instrumente die Akteure vor Ort (Politik, Verwaltung, Planung, Ver- und Entsorgung, u. a.) in die Lage versetzen sollten, auf die zukünftigen Herausforderungen angemessen und nachhaltig reagieren zu können.

Die in den genannten Förderprogrammen entwickelten Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) beziehen sich jedoch häufig nur auf eine einzelne räumliche Ebene (Quartier, Stadt, Region) und haben selten einen raumübergreifenden Bezug. Darüber hinaus besitzen sie in der Regel immer nur eine eingegrenzte fachliche Sichtweise (nach Exposition, d.h. Hochwasser oder Starkregen oder Hitze oder betrachtetem Rezeptor wie Mensch oder Umwelt) und keine integrale Betrachtung möglicher Einflüsse und Folgen auf unterschiedliche Rezeptoren. Dies betrifft auch die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen, deren additive Effekte bzw. Wechselwirkungen (auch konträre Effekte) meist unberücksichtigt bleiben.

### Zusammenführung von Klimadiensten

Im Bereich der Integration von Daten und Modellen geht die aktuelle Entwicklung in Richtung der Bereitstellung und Integration verschiedener Dienste, die dann an zentraler Stelle orchestriert werden. Der Vorteil eines Systems aus dezentralen und modularen Diensten ist, dass je nach Bedarf einzelne Komponenten ausgetauscht werden können und so auch Nutzer:innen z.B. aus verschiedenen Datenquellen oder Modellen auswählen kann. Für die Kommunikation von Modellen oder bei der Datenbereitstellung gibt es verschiedene Geo-IT-Standards und Spezifikationen (ISO, OGC, W3C, INSPIRE, GEOSS und Copernicus, [live.osgeo.org/archive/11.0/de/standards/wps\\_overview.html](http://live.osgeo.org/archive/11.0/de/standards/wps_overview.html)).

Die interdisziplinäre und sektorübergreifende Betrachtung und Bewertung der Auswirkungen von fünf Klimasignalen auf vier Rezeptoren ist daher auch der zentrale Schwerpunkt des Projektes. Die Klimasignale Hochwasser, Niedrigwasser, Starkregen, Dürre und thermische Belastung werden im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Bevölkerung, die Infrastruktur, die Umwelt und die Wirtschaft analysiert. Hierbei sind zahlreiche Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen den spezifischen Themenfeldern und Modellen vorhanden, deren Zusammenspiel im folgenden Modellnetzwerk (Abbildung 2, Abbildung 3) grafisch aufbereitet wurde:

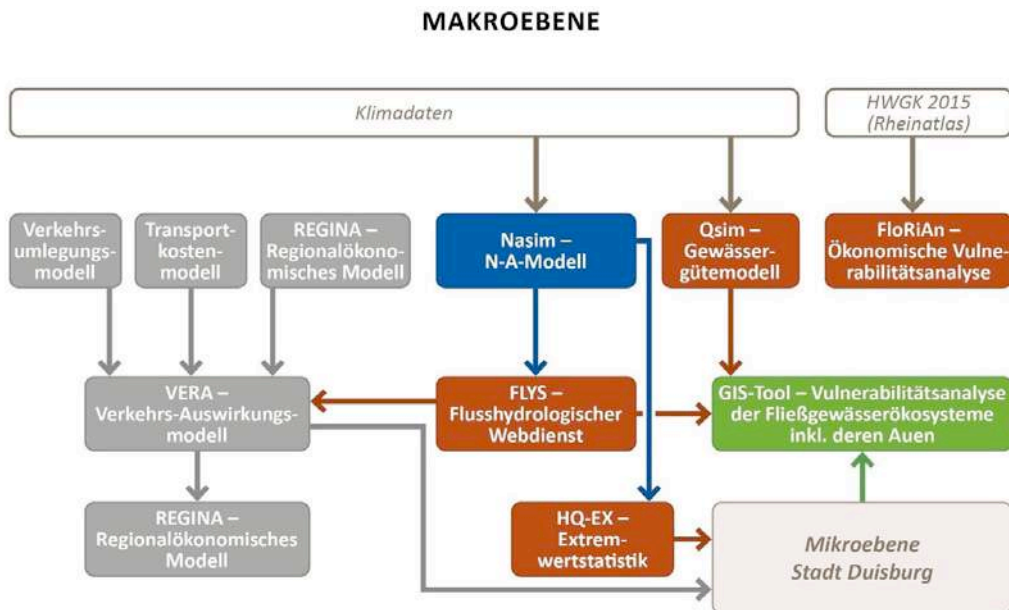


Abbildung 2: Modellnetzwerk der makroebene, jeweils zuständige Projektpartner sind farblich gekennzeichnet (grau: Prognos AG, blau: Siekmann GmbH, rot: FiW e.V., grün: gaiac e.V.).

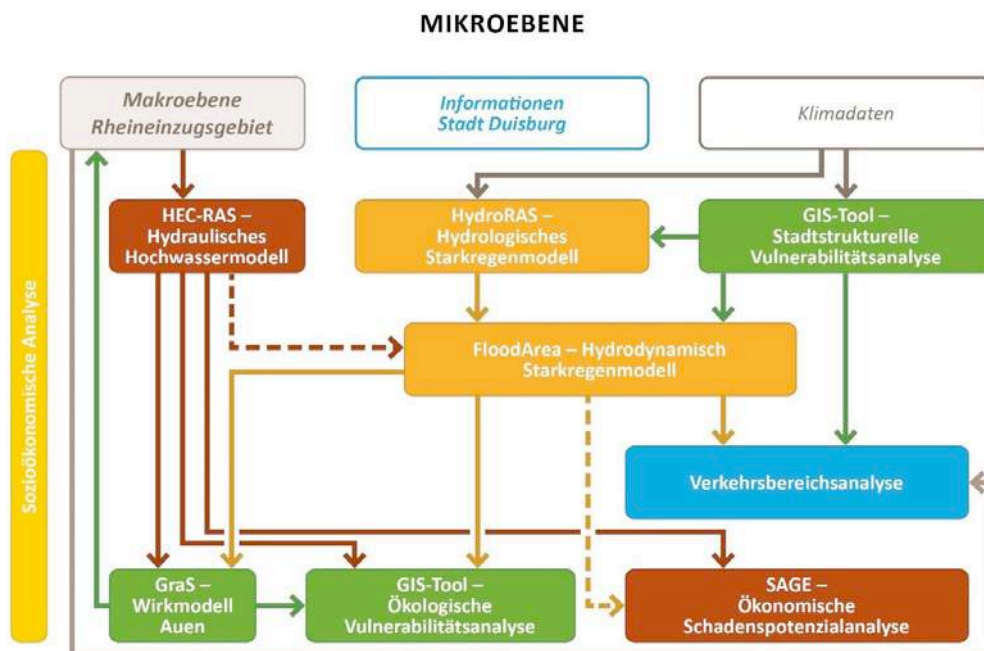


Abbildung 3: Modellnetzwerk der Mikroebene, jeweils zuständige Partner sind farblich gekennzeichnet (gelb: RISP, rot: FiW e.V., grün: gaiac e.V., orange: geomer GmbH, blau: ZLV).

Das Thema **Hochwasserschutz** ist in der Modellregion historisch bekannt, bereits seit Jahrzehnten stützen sich Schutzkonzepte auf vorhandene Modellierungen. Um auch zukünftige Klimaszenarien in die Betrachtung zu integrieren, wurde ein eigenes **hydrologisches Modell** aufgebaut. Das Konsortium wählte die Software NASIM der Fa. Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, die die Komplexität der Abflussbildung infolge von Niederschlag im Rheineinzugsgebiet auch unter Verwendung aufbereiteter Klimadaten abbilden kann. Die resultierenden Abflussdaten dienen im nächsten Schritt der **hydraulischen Modellierung** mit der frei verfügbaren Software HEC-RAS. Dies ermöglicht sowohl die Berechnung der Ausdehnung von Überflutungen und maximalen Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten sowie von Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten über den zeitlichen Verlauf für verschiedene Abflusskurven [1]. Zum aktuellen Zeitpunkt sind zweidimensionale hydraulische Modelle (2D-Modelle) ein weit verbreitetes Werkzeug zur Hochwassermodellierung [2].

An hydraulische Modellierung schließt sich einerseits eine ökonomische **Schadenspotenzialanalyse** an. Als Grundlage für existierende Vermögenswerte wurde der BEAM-Datensatz [1] verwendet, der auch von der LAWA empfohlen wird. Auch die Binnenschifffahrt und anliegenden Wirtschaftssektoren können von Hochwasserereignissen betroffen sein. Die Schadenspotenziale liegen in diesem Fall aber deutlich unter denen des Klimasignals **Niedrigwasser**.

Von diesem Klimasignal ist der Rhein als Deutschlands wichtigste Binnenwasserstraße in besonderem Ausmaß betroffen. In der **Binnenschifffahrt** wurden 2022 ca. 85 % der insgesamt 182 Millionen transportierten Tonnen auf dem Rhein befördert [3]. Langanhaltende Niedrigwasser haben den **Güterverkehr** und die Binnenschifffahrt in den vergangenen Jahren erheblich beeinflusst, mit direkten Folgen für die anliegende Wirtschaft. Die Studie „The case of low water levels on the Rhine river“ des Kiel Institute for the World Economy untersucht die Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf die Wirtschaftstätigkeit in Deutschland. Die Studie stellte heraus, dass in einem Monat mit 30 Tagen Niedrigwasser die Industrieproduktion in Deutschland um etwa 1 Prozent zurück geht [4]. Im Jahr 2022 wurde am Pegel Emmerich sogar erstmals ein negativer Pegelstand gemessen [5].

Vorhersagen zur Entwicklung der Schiffbarkeit vor dem Hintergrund des Klimawandels sind jedoch weiterhin mit hoher Ungewissheit verbunden. Eine systematische wissenschaftliche Aufarbeitung des Verhaltens von Akteuren der Binnenschifffahrt im Rahmen langanhaltender Einschränkungen liegt bisher noch nicht vor. Als Reaktion auf das Niedrigwasser 2018 erarbeitete das Bundesverkehrsministerium einen „Aktionsplan Niedrigwasser Rhein“ [6]. Dieser enthält insgesamt acht Maßnahmen in vier Handlungsfeldern, mit denen den klimabedingten Herausforderungen am Rhein begegnet werden soll.

Für **Auenmodellierungen** werden von der BfG bislang *regelbasierte* Auenmodelle, insbesondere CASIMIR und INFORM, angewendet, die auf der Abfolge von Sukzessionsreihen basieren und zum Teil schon zur Modellierung von Klimafolgen eingesetzt werden [7, 8]. Die Anwendung *dynamischer und prozessorientierter* Modelle wie das LandS-Modell werden als



entscheidender Fortschritt verstanden, gerade wenn zukünftige Entwicklungen in Abhängigkeit vom Klimawandel analysiert werden sollen.

Die Gefahr durch **Starkregen** hat in den vergangenen Jahren zugenommen, der Umgang mit diesem Klimasignal ist allerdings noch nicht so etabliert wie mit Hochwasser. Die Veröffentlichung zahlreicher Leitfäden und Handlungsanweisungen, u. a. die Arbeitshilfe kommunales Starkregenerisikomanagement [9], sowie der landesweiten Starkregengefahrenkarte für Nordrhein-Westfalen [10] waren wichtige Meilensteine für den Umgang mit diesen Ereignissen.

Im Hinblick auf die **thermischen Belastungen** ist der Stand der Wissenschaft empirisch vorangeschritten. Verdichtete urbane Räume, wie sie in einigen Duisburger Stadtteilen vorliegen, und die dort lebende Bevölkerung sind besonders stark von thermischer Belastung betroffen. Als ursächlich gilt der sogenannte **urbane Hitzeinseleffekt (UHI-Effekt)**. Gemeint ist die überproportionale Erhitzung von urbanen Räumen durch, unter anderem, eine hohe Versiegelung, wenig Stadtgrün und hitzespeichernde Baumaterialien, die die über den Tag aufgenommene thermische Belastung nachts wieder abgeben. Alle drei genannten Phänomene führen dazu, dass die nächtliche Abkühlung nur deutlich abgeschwächt wirkt [11]. Desto weniger überraschen zum Teil nächtliche Temperaturunterschiede von bis zu 10°C zwischen urbanen Hitzeinseln und angrenzenden ländlichen Gebieten [12], [13]. Einen dramatischen Effekt hat dies auf die Morbidität und Mortalität von vulnerablen Gruppen, wenn die zum Teil überlebenswichtigen, regenerativen kühlen Stunden in der Nacht fehlen [14], [12].

Eine **Stadtstrukturanalyse** liefert im Vergleich mit den in der Praxis häufig angewendeten Stadtklimamodellierungen den Vorteil eines weniger komplexen und deutlich kosteneffizienteren Ansatzes zur Ermittlung von Bedarfsflächen für Anpassungsmaßnahmen. Obwohl eine solche Analyse einen umfangreichen Einblick in die blau-grüne Infrastruktur von Städten liefert, wird diese Methodik bisher nicht bzw. nur selten für die Ableitung von Klimaanpassungsmaßnahmen genutzt. Dies wird vor allem auf nicht vorhandene GIS-Tools zurückgeführt, die in der Praxis von den Kommunen einfach genutzt werden könnten.

Die Forschung zur Klimaanpassung im **Logistik- und Verkehrssektor** befindet sich bei der Bestimmung von Klimarisiken noch im Anfangsstadium [15]. Neben der Risiko- und Vulnerabilitätsbewertung ist in den letzten Jahren die Resilienz des (Güter-) Verkehrs zu einem wichtigen Konzept für die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels geworden (z. B. [16, 17]). In der Literatur finden sich zahlreiche Forschungsarbeiten über die Auswirkungen des Klimas auf den Verkehr auf nationaler und multiregionaler Ebene [16]. Es finden sich Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf wichtige Binnenwasserstraßen [18, 19, 20], auf den Straßenverkehr [z. B. 21, 22, 23], den Schienenverkehr [z. B. 24, 25], sowie vereinzelt zu verkehrsträgerübergreifenden Ansätzen [z. B. 26, 27]. In Deutschland gibt es erste Studien, die sich mit dem Resilienzmanagement als Konzept auseinandersetzen und die Herstellung der Funktionsfähigkeit von Straßen- und Schieneninfrastrukturen als Thema adressieren (vgl. [28, 29]) Gerade die Kosten für den Ausfall der Verkehrsinfrastruktur wie Fernstraßen, Tunnel

oder Schienenstrecken kann zu hohen volkswirtschaftlichen Kosten führen. Es fehlt bislang an lokalen und verkehrsträgerübergreifenden Analysen sowie an Analysen von Sekundärauswirkungen und indirekten wirtschaftlichen Verlusten [15]. In R2K-Klim+ wurde daher eine **verkehrsträgerübergreifende Analyse** durchgeführt, indem die Effekte einer eingeschränkten Binnenschifffahrt infolge von Niedrigwasser auf das Straßennetz in Duisburg untersucht wurden. Darüber hinaus konnten die Auswirkungen verschiedener Klimasignale auf einzelne Objekte des Verkehrssystems gezeigt sowie die wirtschaftlichen Verluste mittels nicht-monetärer Indikatoren wie z. B. dem Zeitverlust im gesamten Verkehrssystem bei Eintritt von Extremereignissen bewertet werden.

### Entscheidungsunterstützung

Seit Beginn der Projektlaufzeit weitet sich die Landschaft klimabezogener **Entscheidungsunterstützungssysteme** aus. Größere Bekanntheit erlangten sogenannte Klima-Checks, nachdem deutsche Städte als Reaktion auf die Fridays-for-Future-Bewegung Klimanotstände ausgerufen haben. Mit den Klima-Checks werden Beschlussvorhaben hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Klimawandel eingestuft, also hinsichtlich Klimaschutz oder -schädigung. Größte Aufmerksamkeit kam der vom Difu veröffentlichten Orientierungshilfe zu [30], welche von vielen deutschen Städten adaptiert und ggf. modifiziert wurde (s. [31–37].) Einige Checks wurden in Eigenregie von Behörden entwickelt und orientierten sich dabei an politisch legitimierten Kriterien, die aus ihren jeweils beschlossenen, kommunalen Leitbildern hervorgehen [38, 39]. Die Checks sind meist als abgestufte Prüfverfahren aufgebaut und ordnen ein Vorhaben anhand ihrer abgeschätzten Treibhausgasemissionen ein. Klimawandelanpassung findet nur in einigen der Klima-Checks Berücksichtigung [40]. Zu dieser Thematik wurden während des Projekts dezidierte Vorhaben veröffentlicht, wie der Klima-Check in der BLP/RWTH Aachen BeST [41] und die Handlungshilfe zum Berücksichtigungsgebot des Klimaanpassungsgesetz NRW (KlAnG). Die gesetzliche Verpflichtung, Klimawandelanpassung gezielt in Vorhaben zu berücksichtigen, ist eine Neuerung (Gesetzesentwurf der Bundesregierung zum bundesweiten Klimaanpassungsgesetz KAnG vom 13.07.2023) und in der Anpassungsforschung herrscht rege Diskussion, mit welchen Kriterien und Richtwerten rechtssicher Anpassungskapazitäten, -notwendigkeiten sowie Maßnahmen bewertet werden können. In diesem Zusammenhang sind auch die Transferierbarkeit von Tools in andere Anwendungsregionen und die bundesweite Verfügbarkeit der Datengrundlagen von größter Bedeutung. Hier gibt es Bestrebungen mehrerer Bundesländer, ihre digitalen Geodaten innerhalb eines Open Data Portals verfügbar zu machen.

### Klimaszenarien

Für die Berücksichtigung von **Klimaszenarien** in der Modellierung waren während der FuE-Phase I die CMIP5-Szenarien des IPCC, auch RCP-Szenarien genannt, relevant. Die CMIP6-Szenarien (Coupled Model Intercomparison Project) des IPCC (2021) befinden sich für

Deutschland aktuell noch im Prozess des Downscaling. Das Querschnittsvorhaben NUKLEUS führt diesen Prozess aktuell parallel zu den Tätigkeiten der Modellregionen im Rahmen der Förderrichtlinie durch. Der Fokus wird auf dem **SSP3-7.0-Szenario** liegen.

Zur Integration beispielhafter Klimadaten und dem Proof of Concept der Modellkette wurde vorübergehend auf das **RCP8.5-Szenario** aus den CMIP5-Szenarien zurückgegriffen. Vom Umweltbundesamt (UBA) wurde das RCP8.5-Szenario als Grundlage für die „Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland“ verwendet, aus „Vorsorgegründen, um eine ausreichende Dimensionierung möglicher Anpassungsmaßnahmen sicherzustellen“ ([42] S. 22).

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Modellierung des Status Quo

#### 5.1.1 Makroebene

##### 5.1.1.1 Hydrologische Modellierung

Die Niederschlags-Abfluss-Modellierung (N-A-Modell) verarbeitet in der Modellkette die eingehenden Niederschlagsdaten zu Abflusszeitreihen für den Rhein. Hierfür wurde die Software NASIM der Fa. Hydrotec GmbH verwendet. Für den Aufbau des Modells und die Durchführung der N-A-Simulationen wurden verschiedene teileinzugsgebietspezifische Geodaten zusammengestellt und ausgewertet. Dabei wurde überwiegend auf frei verfügbare Daten (Open Data) zurückgegriffen. Die Bearbeitung des Gewässereinzugsgebietes sowie aller Teileinzugsgebiete (TEZG) inklusive der Ermittlung von Landnutzungstypen, Bodenarten sowie weiterer notwendiger Parameter für das Modell wurde mit Hilfe des Open Source Geoinformationssystems QGIS durchgeführt.

Für die Modellierung des Rheineinzugsgebietes wurden die frei zugänglichen Informationen zu den TEZG von der BfG zur Verfügung gestellt [43]. Weitere Informationen wurden aus dem Copernicus-Landdienst (CLC (CORINE Land Cover)-Landnutzungsdaten) [44] sowie aus Bodenarten in Oberböden Deutschlands der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [45] bezogen (s. Abbildung 4).

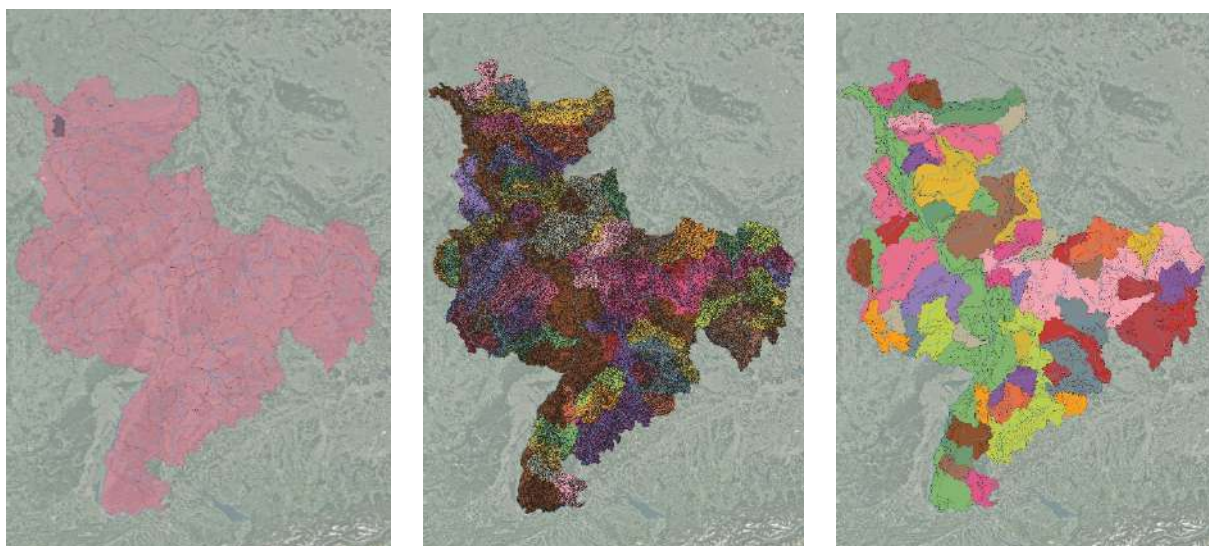


Abbildung 4: Links: Rheineinzugsgebiet (innerhalb der Grenzen Deutschlands) mit Darstellung der TEZG (rot eingefärbt) sowie maßgeblichen Gewässer I. und II. Ordnung (blaue Linien) und der Stadt Duisburg (grau eingefärbt). Mitte: Landnutzungsdaten auf Basis der CORINE-Daten (farblich hervorgehoben) im Rheineinzugsgebiet. Rechts: Bodentypen innerhalb der TEZG im Rheineinzugsgebiet.

Für die simulationstechnische Nachbildung der Abflussbildung und Berechnung der Abflussbeiwerte wurden die Landnutzungs- und Bodenarten hinsichtlich ihrer Flächenanteile in den

Gewässerteileinzugsgebieten analysiert. Als weitere Datengrundlage für die Abbildung des Rheineinzugsgebietes in NASIM wurden zudem die Längen der Gewässerverläufe (I. und II. Ordnung) innerhalb der Teileinzugsgebiete sowie die Geländehöhen an Mündung und Quelle zusammengestellt.

Für die Abbildung des Rheineinzugsgebietes auf der Makroebene wurde in NASIM ein Systemplan (Rheineinzugsgebiet) anhand der verschiedenen Teileinzugsgebiete strukturiert und aufgeteilt. Jedes Systemelement spiegelte dabei ein TEZG wider. Insgesamt wurden für die Nachbildung des Rheineinzugsgebietes 133 Systemelemente (TEZG) angelegt. Für die Durchführung der Simulationen mussten diese Elemente mit ihren teileinzugsgebietspezifischen Kenndaten versehen werden. Dies erfolgte anhand der bereits durch geoinformationsgestützte Auswertungen und Analysen generierten Geodaten. Den einzelnen TEZG wurden in ihren Elementdaten im Systemplan u. a. Informationen zur Gesamtfläche, basierend auf den Einzugsgebietsdaten der BfG [43], Landnutzung [44], Bodenart [45] und Gewässerlänge [43] hinterlegt. Für den Test auf Funktionsfähigkeit des Modells und zur Prüfung auf Fehler bzw. fehlender Informationen, wurden beispielhaft Einzelereignisse (Bemessungsereignisse), z. B. ein einstündiges Niederschlagsereignis mit einer Intensität von 50 mm, angewandt. Die Anpassung und Sicherstellung der Lauffähigkeit erfolgte dabei in mehreren Iterationsschritten.

Zur Kalibrierung des N-A-Modells wurde auf historische Niederschlagsereignisse bzw. Niederschlagsaufzeichnungen im Einzugsgebiet über längere Zeiträume (Zeitreihen) aus dem Open Data Portal des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen [46]. Die Niederschlagsaufzeichnungen wurden in das von NASIM verwendete Dateiformat konvertiert, als Zeitreihen in NASIM eingeladen und den entsprechenden TEZG im Systemplan zugeordnet.

Außerdem können historische Daten zu Temperaturverläufen und Verdunstungsraten verwendet werden. Aufgrund fehlender Daten hierzu, wurde hierfür auf die softwareinternen Standarddatensätze von NASIM zurückgegriffen. Eine Kalibrierung der Simulationsergebnisse, also die Abflussmengen an den Systemelementen (TEZG) im Systemplan, wurde mit den tatsächlich gemessenen Abflussmengen an den Pegelstandorten des Rheins durchgeführt. Die Informationen dazu konnten über die Informationsplattform Undine der BfG [47] abgerufen werden.

Die Kalibrierung des Modells erfolgte über die programminternen Möglichkeiten der Anpassung der Eichparameter, u. a. Niederschlag, Versiegelung oder Retention. Dies kann sowohl für das gesamte System einheitlich erfolgen als auch für jedes einzelne Systemelement (Teileinzugsgebiet) individuell. Die Kalibrierung des Modells erfolgte dabei iterativ und wird zu Beginn der FuE-Phase II weiter fortgesetzt. Um die Modellierungskette dennoch bedienen zu können, wurden daher zunächst historische Abflussganglinien von der BfG zur Verfügung gestellt.

Über den Flusshydrologischen Webdienst (FLYS) stellt die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) u. a. Wasserstands-Abfluss-Beziehungen in Form von Abflusskurven für die Pegel des

Rheins zur Verfügung [48]. Mit Hilfe dieser Abflusskurven wurden die Abflusszeitreihen der einzelnen Rheinpegel vom FiW automatisiert mit einem Python-Skript in Wasserstandszeitreihen umgerechnet.

### 5.1.1.2 Flood Risk Analysis mit FloRiAn

Hochwassergefahrenkarten (HWGK) zeigen das Ausmaß der Überflutung sowie die maximale Wassertiefe und ggf. Fließgeschwindigkeit von Hochwasserereignissen mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten. Auf der Makroebene wurden hierfür die Daten des Rheinatlases von der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) genutzt. Um die Überflutungsflächen der HWGK in eine für Entscheidungsträger nutzbare Argumentationsgrundlage zu überführen, wurden im Anschluss ökonomische Schadenspotenzialanalysen für das Rheineinzugsgebiet (Makroebene) durchgeführt. Hierfür wurde das Economy-Modul des IKSR-Tools FloRiAn (Flood Risk Analysis) verwendet, das u. a. Schadensfunktionen für mobile und immobile Vermögensgegenstände enthält [49]. Als Grundlagendaten wurden Überschwemmungstiefen aus dem Rheinatlase 2015 entnommen, die Hochwasserszenarien für drei Eintrittswahrscheinlichkeiten (HQ<sub>10</sub>, HQ<sub>100</sub> und HQ<sub>1.000</sub>) beinhalten [50]. Zusätzlich wurden die CLC-Landnutzungsdaten aus dem Copernicus Landdienst [51] und Daten zu Vermögenswerten aus der Vermögenswertkartierung BEAM (Basic European Asset Map) des Copernicus EMS-Dienstes (Emergency Management Service) verwendet [52].

Als Ergebnis der Schadenspotenzialanalyse mit FloRiAn wurden monetäre Schadenspotenziale für sechs Nutzungsklassen (Siedlung, Industrie, Verkehrsflächen, landwirtschaftliche Fläche, Forst und Sonstige) ausgegeben (vgl. Abbildung 5). Die Auflösung der Hochwassertiefen und der Landnutzung war mit einem Raster von 100 m vergleichsweise niedrig, sodass die Vermögenswerte und Nutzungsklassen aggregiert werden mussten und sich lediglich grob aufgelöste Ergebnisse ergaben. Diese wurden zu Beginn des Projektes mit dem Ziel durchgeführt, erste Anhaltspunkte zu den Schadenspotenzialen infolge von Hochwasser im Rheineinzugsgebiet zu erhalten und in Form von Karten dargestellt. Aufgrund der geringen Auflösung wurde die Schadenspotenzialanalyse auf der Makroebene bei der weiteren Analyse, insbesondere auf der kommunalen Ebene, jedoch nicht weiterverfolgt. Die Berücksichtigung von klimatischen Veränderungen bei der Erarbeitung von Indikatoren für kommunale Entscheidungsträger erfolgte auf der Mikroebene.

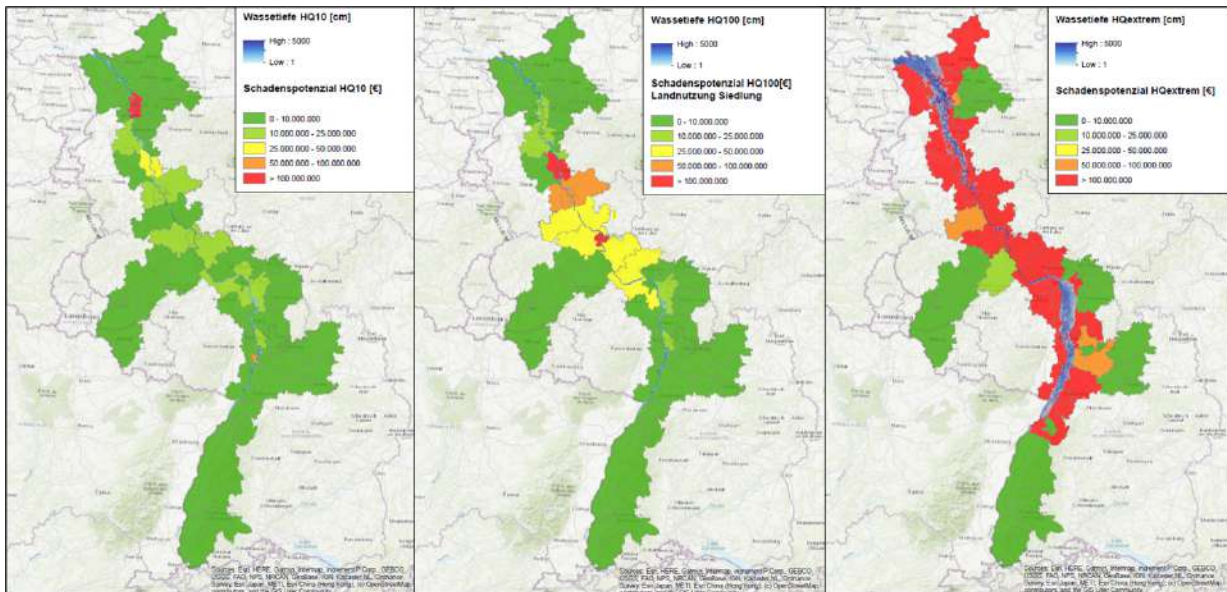


Abbildung 5: Grafische Darstellung der monetären Schäden im Untersuchungsgebiet mit Hilfe von FloRiAn bei Hochwasserereignissen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten.

### 5.1.1.3 Ökonomische Vulnerabilitätsanalyse

Die ermittelten Rheinpegel wurden als Inputdaten für die ökonomische Vulnerabilitätsanalyse verwendet. Die Analyse zeigte die Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen auf die Binnenschifffahrt und die von ihr abhängigen Wirtschaftssektoren auf. Die regionalwirtschaftlichen Effekte wurden dabei anhand der folgenden drei Indikatoren wiedergegeben:

- Veränderung des Produktionswertes einer Region.
- Veränderung der Bruttowertschöpfung einer Region.
- Veränderung der Anzahl der Erwerbstätigen einer Region.

In der Logik des Modells stellten die durch Niedrigwasser ausbleibenden oder verzögerten Transporte einen angebotsseitigen Schock in Form des Rückgangs von Importen bzw. deren Wert dar, die zu einer Verringerung des wirtschaftlichen Outputs führen.

Die Modellierung dieses Outputs erfolgte anhand der folgenden Schritte:

1. Räumliche Abgrenzung des Untersuchungsgebietes und Bestimmung der Regressionssets

Die Analyse beschränkte sich räumlich auf das Rheineinzugsgebiet sowie seine wichtigsten Güter-führenden Zuflüsse (Saar, Mosel, Neckar, Main) in Deutschland, in dem sich insgesamt 15 sogenannte Wirtschaftsregionen (Tabelle 1, Abbildung 6) befinden. Diese wurden zur Reduzierung der Komplexität zu drei Zonen zusammengefasst. Ausschlaggebend für die Zuordnung war der für die Binnenschifffahrt ausschlaggebende Pegel der Wirtschaftsregion (Emmerich, Duisburg-Ruhrort, Kaub). Des Weiteren wurden nicht nur innerdeutsche Binnenschiffs-transporte berücksichtigt, sondern auch relevante Importe aus dem Ausland auf Basis der Datensätze von Destatis.

Tabelle 1: Die 15 gebildeten Wirtschaftsregionen des Rheineinzugsgebietes.

Nr.	Gebietsname	Konstituierende Kreise bzw. kreisfreie Städte
1	Niederrhein	Kleve, Wesel, Borken
2	Duisburg	Duisburg
3	Westliches Ruhrgebiet	Essen, Mülheim an der Ruhr, Oberhausen, Bottrop, Gelsenkirchen, Recklinghausen, Bochum, Dortmund, Herne
4	Region Düsseldorf	Düsseldorf, Krefeld, Rhein-Kreis Neuss
5	Region Köln	Mettmann, Köln, Leverkusen, Rhein-Erft-Kreis
6	Region Bonn	Bonn, Rhein-Sieg-Kreis
7	Unteres Mittelrheintal	Ahrweiler, Mayen-Koblenz, Neuwied
8	Region Koblenz und Rheingau	Wiesbaden, Rheingau-Taunus-Kreis, Koblenz, Rhein-Hunsrück-Kreis, Rhein-Lahn-Kreis
9	Gebiet um Saar und Mosel	Cochem-Zell, Trier, Bernkastel-Wittlich, Trier-Saarburg, Merzig-Wadern, Saarlouis
10	Rhein-Main-Gebiet	Darmstadt, Frankfurt am Main, Offenbach am Main, Darmstadt-Dieburg, Main-Taunus-Kreis, Offenbach
11	Region Mainz	Bergstraße, Groß-Gerau, Mainz, Worms, Alzey-Worms, Mainz-Bingen
12	Rhein-Neckar-Gebiet	Heilbronn (Stadt), Heilbronn (Landkreis), Heidelberg, Neckar-Odenwald-Kreis, Rhein-Neckar-Kreis
13	Region Mannheim-Ludwigshafen	Frankenthal (Pfalz), Ludwigshafen am Rhein, Speyer, Rhein-Pfalz-Kreis, Mannheim
14	Region Karlsruhe	Germersheim, Baden-Baden, Karlsruhe (Stadt), Karlsruhe (Landkreis), Rastatt
15	Region Freiburg und Schwarzwald	Freiburg im Breisgau, Breisgau-Hochschwarzwald, Emmendingen, Ortenaukreis, Lörrach

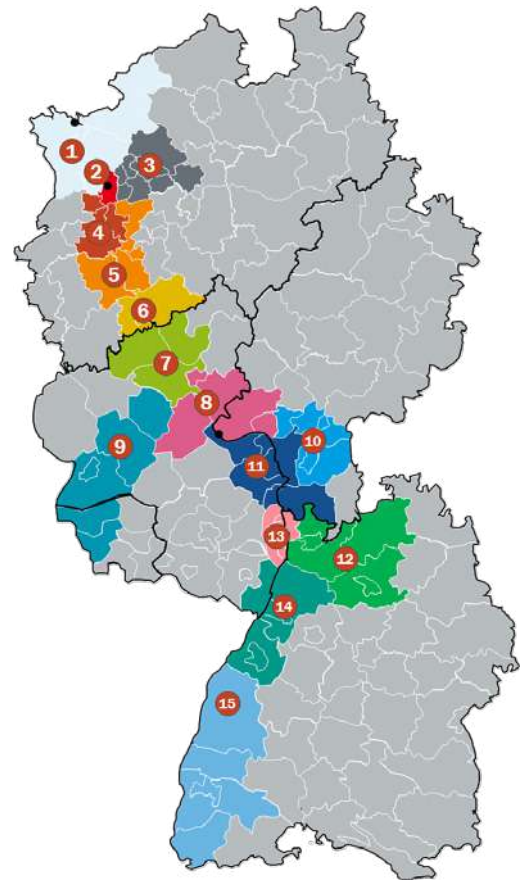


Abbildung 6: Zuschnitt der 15 gebildeten Wirtschaftsregionen (eigene Darstellung).



Für die Transportbeziehungen der Importe in eine der drei Zonen (aus einer der anderen drei Zonen, aus Zonen außerhalb des Rheineinzugsgebietes aus Deutschland, aus den relevanten Ländern aus dem Ausland) wurde in einem nächsten Schritt jeweils der ausschlaggebende Pegel (Emmerich, Duisburg-Ruhrort, Kaub) bestimmt. Die Transportbeziehungen, die über die gleiche Zielzone, als auch denselben ausschlaggebenden Pegel verfügen, wurden zu jeweils einem Regressionsset zusammengeführt, um die Bearbeitung im Folgenden zu erleichtern. Es resultierten sieben Regressionssets, für die jeweils eine branchenspezifische Regressionsanalyse durchgeführt wurde.

## 2. Aufstellen der Grundregressionsgleichung

Mithilfe der Regressionsanalyse wurde überprüft, welchen Einfluss Niedrigwasser auf die per Binnenschiff gehandelte Gütermenge hat. Statistisch signifikante Ergebnisse lassen Rückschlüsse darüber zu, wie einzelne oder mehrere Niedrigwasserereignisse in einem Monat auf die per Binnenschiff gehandelten Gütermenge wirken. Dabei wird die Regressionsanalyse vielfältig auf verschiedene Branchenperspektiven und Routenbeziehungen angewendet. Insgesamt liegen in dieser Analyse 20 verschiedene Branchen sowie sieben verschiedene aggregierte Routenbeziehungen (Regressionssets) vor, welche insgesamt 140 Regressionsanalysen ergeben.

Theoretisch könnte für jede dieser Analysen eine neue Regressionsgleichung aufgesetzt werden. Zur Vereinfachung wurde jedoch eine Grundregressionsgleichung aufgestellt, welche die Basis für alle 140 Regressionsgleichungen lieferte. In der Aufstellung der Grundregressionsgleichung wurden verschiedene Variablen berücksichtigt. Die Variablen wurden auf die Annahmen einer linearen multiplen Regression hin geprüft und die Gleichung so verändert, dass alle Annahmen erfüllt sind. Die Regressionsanalyse wurde auf Monatsbasis für den Zeitraum von Januar 1993 bis Dezember 2021 durchgeführt.

Die Datengrundlage bildete neben den Pegelständen der drei Hauptpegel die per Binnenschiff transportierte Gütermenge (in Tonnen, [3]) in Form einer Wachstumsrate im Vergleich zum jeweiligen Vormonat. Aus den Pegelständen konnten anhand der Grenzwerte zur Klassifikation eines Niedrigwassers [53] die „Anzahl an Tagen im Monat mit Niedrigwasser“ ermittelt werden. Die monatliche Betrachtung ergibt sich aus den vorliegenden Gütermengen, die lediglich als Monatsvariablen zur Verfügung standen. Als geeignete Variablen für die Grundregressionsgleichung ergaben sich die „Anzahl an Tagen im Monat mit Niedrigwasser“ und die „Veränderung der Anzahl an Tagen im Monat mit Niedrigwasser im Vergleich zum Vormonat“, da die reine Anzahl an Tagen im Vormonat eine Multikollinearität mit der ersten Variablen aufgezeigt hätte. Das Akaike-Information-Kriterium zeigte zudem, dass diese Variable einer nicht-transformierten Variable, einer logarithmierten Variablen sowie einer potenzierten Variablen vorzuziehen ist. Die Pegelstände basieren auf dem Pegelmessort Kaub, da dieser das „Nadelöhr“ des Rheineinzugsgebietes darstellt.

Um konjunkturelle und saisonale Effekte der gehandelten Gütermengen abzubilden, wurden weitere unabhängige Variablen eingeführt, die „Wachstumsrate der Gesamtimporte eines Monats im Vergleich zum Vormonat“ und eine Saisonalitätsvariable. Die finale Grundregressionsgleichung erfüllt somit alle Annahmen einer linearen multiplen Regression. Damit ist diese Regressionsgleichung den einschlägigen statistischen Prüfkriterien gegenüber robust.

Tabelle 2: Variablen der Grundregressionsgleichung.

Variable	Quelle
<b>Per Binnenschiff gehandelte Gütermenge</b> (abhängige Variable)	DESTATIS
<b>Pegelstände der drei Hauptpegel</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Basisszenario</b></li> <li>• <b>Schockszenario</b></li> </ul>	Output aus hydrol. Modellierung
<b>Pegelgrenzwerte für Niedrigwasser</b>	CONTARGO
<b>Importe nach Deutschland</b>	EUROSTAT
<b>Saisonalität</b>	DESTATIS

### 3. Vervielfältigung der Regressionssets

Mit der zuvor identifizierten Grundregressionsgleichung sowie den Regressionssets, ließen sich im nächsten Schritt die Regressionsgleichungen für das Basisszenario (ohne Berücksichtigung des Klimaschocks) sowie das Vergleichsszenario (mit Berücksichtigung des Klimaschocks) durchrechnen. Die einzige Variable, die sich im Vergleichsszenario ändert, ist die Pegelvariable mit der „Differenz der Anzahl an Tagen im Monat mit Niedrigwasser im Vergleich zum Vormonat“. Die 140 vorliegenden Regressionsgleichungen erforderten dabei Vereinfachungen, bspw. wurden lediglich relevante Güterklassen (> 3 % Anteil am jeweiligen Regressionsset) berücksichtigt. Neben den Daten und Variablen fanden auch die Informationen über die Regressionssets und die Grundregressionsgleichung Eingang in den Arbeitsschritt.

Es resultierten zwei Outputvariablen

- 1) Die erste Outputvariable resultierte aus der Berechnung der Basisszenario-Regressionsgleichungen und stellt die abhängige Variable (als Wachstumsrate der per Binnenschiff gehandelten Gütermenge) dar. Dies umfasste allerdings lediglich diejenigen Regressionsgleichungen mit signifikanten Regressionsergebnissen. Alle anderen wurden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

- 2) Die zweite Outputvariable resultierte aus der Berechnung der Vergleichsszenario-Regressionsgleichungen und stellte wiederum die abhängige Variable (als Wachstumsrate der per Binnenschiff gehandelten Gütermenge) dar. Da ein einziges Jahr als Klimaschock in die Vergleichsszenario-Berechnungen eingeht, ist auch dieses Jahr (nach Monaten differenziert) der ausgegebene Output. Die Klimaschock-Berechnungen wurden lediglich für die Güterklassen und Regressionssets durchgeführt, die im Basisszenario signifikante Regressionsergebnisse aufgewiesen haben.

Neben den beiden Wachstumsraten der abhängigen Variablen wurden zudem aus dem Basisszenario die Koeffizienten der Pegelvariable ausgegeben. Diese wurden als Input für die Verkehrsmodellierung in der Stadt Duisburg benötigt.

#### 4. Berechnung der Schocks für jedes Regressionsset

Für die weitere Verwendung im Input-Output-Modell wurden die Monatsbetrachtungen auf ein Jahr aggregiert. Dafür wurden die Wachstumsraten mit den tatsächlich im Basisjahr 2016 gehandelten Gütermengen in absolute Werte verrechnet. Aus den absoluten Jahreswerten konnten dann für Basis- und Schockszenario wiederum Wachstumsraten für das entsprechende Jahr ermittelt werden.

Das Ergebnis war ein Schockwert in Form einer relativen Veränderung auf Jahresbasis für das Jahr 2016 je signifikantes Regressionsset und Güterklasse.

#### 5. Vervielfältigung des nach Sets vorliegenden Schocks auf die Wirtschaftsregionen

Bis zu diesem Schritt lagen die Schocks nur übergeordnet auf der Ebene der Regressionssets vor. Um die tatsächlichen Auswirkungen der Schocks auf die regionale Wirtschaft zu bestimmen, erfolgte in diesem Schritt die Vervielfältigung der Schocks in Form der Zuordnung der Regressionssets auf die Wirtschaftsregionen bzw. deren Importstrukturen. So konnte für jede Wirtschaftsregion ein spezifischer Schock abgeleitet werden, der sich in der Folge individuell auf die regionalwirtschaftliche Entwicklung auswirkt. Hierfür wurden neben den Schocks selbst die Definitionen der Regressionssets und der 15 Wirtschaftsregionen benötigt.

#### 6. Gewichtung der Schocks

Nachdem Schocks für alle 15 Wirtschaftsregionen vorlagen, wurden sie mit den tatsächlich in einer jeweiligen Wirtschaftsregion per Binnenschiff gehandelten Gütermengen gewichtet. Dieser Arbeitsschritt folgte aus der Logik, dass jede Wirtschaftsregion andere Importstrukturen aufweist und diese bisher in den relativen Änderungen des Schocks noch nicht berücksichtigt waren. Hierbei wurde aufgrund der Struktur des Input-Output-Modells zwischen Importen aus dem Inland und Ausland differenziert. Aus dem Vergleich der absoluten Importmengen aus dem Basisszenario mit dem Vergleichsszenario ergab sich eine Wachstumsrate (relative Veränderung), ausgehend von dem Klimaschock. Als Ergebnis lag anschließend die Veränderung der Binnenschiff-Importmengen je Wirtschaftsregion und Güterklasse für Importe aus dem Inland und Ausland vor.

#### 7. Aufteilung der veränderten Binnenschiffsimporte auf die Gesamtimportmenge durch Anwendung des Modal Split

Die Veränderungen beschrieben bis hierhin die Veränderungen der per Binnenschiff gehandelten Gütermenge. Da das Input-Output-Modell jedoch nicht zwischen den Verkehrsträgern Schiene, Straße und Binnenschiff differenziert, war eine Verrechnung mit dem Modal Split zur Ermittlung der gesamten gehandelten Gütermenge erforderlich. Der in den vorherigen Schritten ermittelte Schock wurde mit dem Anteil der Binnenschifffahrt an den Gesamtimporten (Modal Split der Binnenschifffahrt) multipliziert, da sich durch das Niedrigwasser (da in der FuE-Phase I keine Betrachtung von Verlagerungseffekten etc. stattfindet) nur Auswirkungen auf den Anteil des Binnenschiffs ergaben. Der Modal Split der Binnenschifffahrt wurde auf Basis der Verkehrsverflechtungsprognose für 2030 (aktuelle Version) und dem Jahr 2014 berechnet.

#### 8. Umschlüsselung der in Güterklassen vorliegenden Informationen in Wirtschaftszweig-Klassen

Die bisher vollständig in der Klassifikation der Transportgüterstruktur (NST) in Tonnen vorliegenden Informationen mussten zur weiteren Verwendung in dem Input-Output-Modell in Produktions- bzw. Wirtschaftszweiginformationen (CPA) in monetäre Einheiten (Euro) umgerechnet werden. Aus diesem Grund wurde eine Umschlüsselungsmatrix erstellt, die eine Konkordanz beider Klassifikationssysteme zueinander herstellt. Die resultierenden relativen Veränderungen in den jeweiligen CPA-Klassen konnten so als Schock in das regionalökonomische Input-Output-Modell eingespielt werden.

#### 9. Einpflegen der veränderten Importwerte in die Multiregionale Input-Output-Tabelle des Rheineinzugsgebiets und Ableitung der Effekte für Bruttowertschöpfung und Erwerbstätige

Auf Basis der Input-Output-Tabellen der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung berechnete das REGINA-Modell für einen beliebig gewählten regionalen Fokus die regionsspezifische Input-Output-Tabelle. Diese Input-Output-Tabellen wurden für die 15 Wirtschaftsregionen erstellt und in Form einer multiregionalen Input-Output-Tabelle (MRIO) aufbereitet. Diese stellte neben den intraregionalen Verflechtungen auch die Verflechtungen jedes Wirtschaftszweigs einer Region zu jedem Wirtschaftszweig jeder anderen Region dar. Für die Berechnung der makroökonomischen Effekte (Produktionswert, Bruttowertschöpfung, Erwerbstätige) waren darüber hinaus die allgemeine Input-Output-Tabelle der inländischen Produktion als auch die Input-Output-Tabelle der Importe von Deutschland relevant: Hier wurde für die jeweiligen Wirtschaftsregionen die Verflechtung der Importstruktur für Importe aus dem Inland basierend auf der Struktur der inländischen Produktion Deutschlands angenommen. Für die Importe aus dem Ausland wurde eine Verteilung analog zur Importstruktur Deutschlands aus dem Ausland angenommen.

Die Auswirkungen der durch Niedrigwasser verursachten Veränderungen der Gesamtimporte auf die makroökonomischen Indikatoren des Produktionswertes, der Bruttowertschöpfung sowie der Erwerbstätigen je Wirtschaftsregion wurden in einem letzten Arbeitsschritt durch die Anwendung eines angebotsseitigen Schocks auf die Wirtschaftsstruktur in Form der Ghosh-Inverse berechnet.

#### **5.1.1.4 Ökologische Vulnerabilitätsanalyse**

Die ökologische Vulnerabilitätsbewertung wurde zur Ermittlung der Wirkung des Klimawandels auf die Lebensgemeinschaft im Fließgewässerkörper des Rheins und den angrenzenden Außenlandschaften durchgeführt.

Zur Ermittlung der Vulnerabilität der im Rhein lebenden Organismen wurde die Wirkung des Niedrigwassers und in dieser Folge die Veränderung der Wassertemperatur als Bewertungskriterium festgelegt. Die Veränderung der Temperatur des Wassers wurde in den Vordergrund gestellt, da 1.) mittels des Modells QSim diese von der BfG simuliert werden konnte und 2.) Veränderungen der Wassertemperatur im Rahmen des Klimawandels entscheidend für das Leben der Organismen im Rhein sind.

Mittels einer statistischen Auswertung des Makrozoobenthos sowie ergänzenden Daten zu den temperatursensiblen Fischen im Rhein wurden für die einzelnen Rheinabschnitte zwei Temperaturschwellenwerte definiert, die ein unterschiedliches Vulnerabilitätsniveau aufweisen. Diese Schwellenwerte wurden im zweiten Schritt mit dem Modell QSim für die einzelnen Rheinabschnitte ermittelt.

Folgende Schwellenwerte waren für die Betrachtung relevant:

Mittleres Vulnerabilitätsrisiko (Temperatur 1): 75 % der temperatursensiblen Arten des Makrozoobenthos bewegen sich außerhalb ihres Temperaturoptimums, d.h. diese Arten sind in ihrem Lebensraum beeinträchtigt.

Hohes Vulnerabilitätsrisiko (Temperatur 2): 25 % der temperatursensiblen Arten des Makrozoobenthos bewegen sich außerhalb ihrer Temperaturtoleranz, d.h. diese Arten werden im Rhein wahrscheinlich nicht mehr überleben können.

Tabelle 3: Übersicht der Messpunkte in den einzelnen Rheinabschnitten und die von gaiaac ermittelten Temperaturschwellenwerte.

Rheinabschnitt	kurz	Koordinate N	Koordinate E	Fluss-km	T1 (°C)	T2 (°C)
Oberrhein: Neu- burg bis Bingen	OR2	49.325.611	8.450.722	400,7	26,2	29,2
	OR2	49.839.000	8.380.222	476,1	26,2	29,2
Mittelrhein: Bin- gen bis Bonn	MR	50.138.417	7.726.833	554,3	27,5	30
	MR	50.363.028	7.607.278	592,0	27,5	30
Niederrhein: Bonn bis Bim- men/Lobith	NR1	50.948.361	6.968.778	689,3	28	30
	NR1	51.701.472	6.461.000	827,6	28	30

Bezieht man die temperatursensiblen Fischarten mit ein (Hauptart: Nase; Begleitarten: Äsche, Flunder, Bachneunauge), die eine obere Letaltemperatur (50 % der adulten Fische sterben) von ca. 26°C aufweisen, ergibt sich bei Erreichen der Temperatur 1 ein zusätzliches Risiko für einzelne Fischarten im Rhein, vor allem für die im Rhein in höheren Dichten vorkommenden Nase. Diese Einstufung der Vulnerabilität basiert auf Angaben zur Temperatur, gravierende Wirkungen hätte der Sauerstoffgehalt, der aber mit den gewählten Modellen nicht modelliert werden konnte.

## 5.1.2 Mikroebene

### 5.1.2.1 Hochwasser – hydraulische Modellierung und Schadenspotenzialanalyse

Zur Betrachtung des Klimasignals Hochwasser wurden vom FiW auf der Mikroebene Hochwassermodellierungen für die Stadt Duisburg durchgeführt. Für Hochwasserereignisse mit einer hohen ( $HQ_{10} - HQ_{50}$ ), einer mittleren ( $HQ_{100}$ ) und einer niedrigen ( $> HQ_{250}$ ) Wahrscheinlichkeit werden für den Rhein, entsprechend der EG-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie [54], bereits Hochwassergefahrenkarten (HWGK) über OpenGeodata.NRW bereitgestellt [55]. Für die Erstellung der HWGKs wurden keine eigenen hydraulischen Berechnungen durchgeführt, sondern Wasserspiegellagen aus stationären eindimensionalen Berechnungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ausgespiegelt, um Überflutungsflächen auf den Vorländern zu ermitteln [56]. In R2K-Klim+ wurde dagegen der Einsatz eines instationären, hydrodynamischen zweidimensionalen Modells gewählt. Hierfür wurde die frei verfügbare Software HEC-RAS des U.S. Army Corps of Engineers' Hydrologic Engineering Center eingesetzt [1].

Entsprechend der Modellkette in Abbildung 2 und Abbildung 3 war der Hochwassermodellierung eine extremwertstatistische Auswertung von Abflussdaten des Rheins vorangegangen. Langfristig sollen hierfür die Abflussdaten aus der N-A-Modellierung mit NASIM verwendet werden. Da die Kalibrierung des N-A-Modells zum Berichtszeitpunkt noch nicht abgeschlossen war, wurde für die FuE-Phase I eine Abflusszeitreihe des Rheinpegels Duisburg-Ruhrort vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rhein (WSA) zur Verfügung gestellt. Der Rheinpegel Duisburg-Ruhrort befindet sich im Duisburger Stadtteil Ruhrort bei Rheinstromkilometer 780,80 [57]. Die bereitgestellte Zeitreihe enthält tägliche Abflusswerte für den Zeitraum 01.11.1910 bis 31.10.2022 und ist in Abbildung 7 grafisch dargestellt.

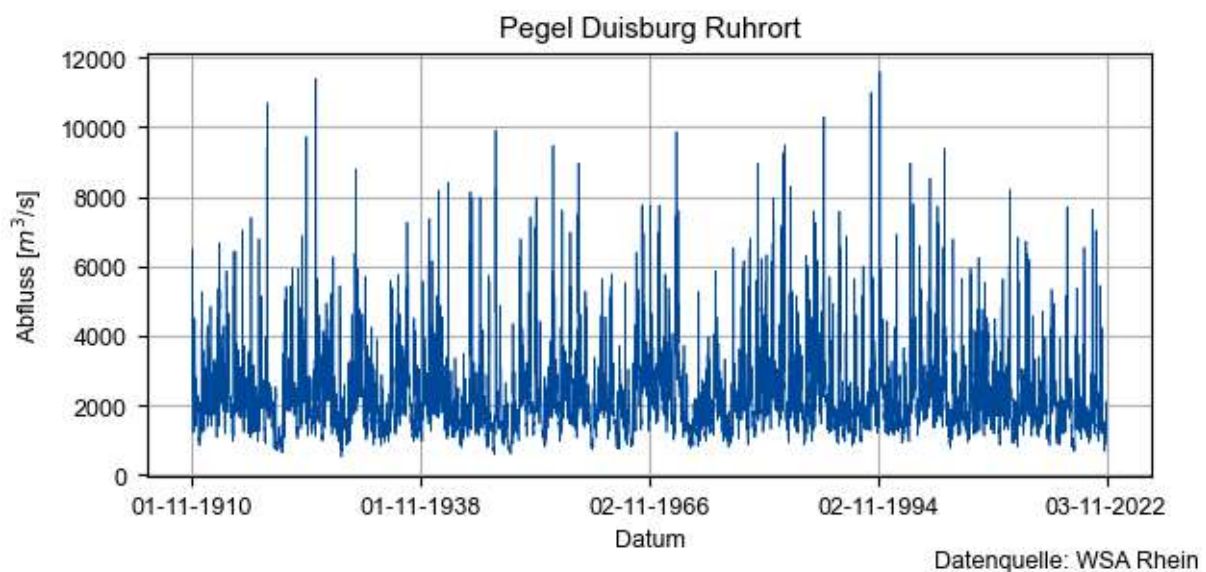


Abbildung 7: Abflusszeitreihe Pegel Duisburg-Ruhrort für den Zeitraum 1910 – 2022.

### Extremwertstatistische Auswertung

Für die extremwertstatistische Auswertung der Abflusszeitreihe setzte das FiW die Software HQ-EX 4.0 von der DHI WASY GmbH ein [58], und in Übereinstimmung mit dem Merkblatt DWA-M 522 zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten [59] entwickelt wurde. Zunächst wurde hierfür eine jährliche Serie erstellt. Diese enthält entsprechend DWA-M 522 die höchsten Abflüsse des Pegels für jedes Jahr der Zeitreihe. Mit HQ-EX wurde eine Prüfung der jährlichen Serie auf Ausreißer und eine Trendanalyse durchgeführt. Sowohl Ausreißer als auch ein signifikanter Trend lagen nicht vor. Anschließend wurde eine Schätzung von Hochwasserwahrscheinlichkeitsverteilungen durchgeführt. Hierbei berechnete HQ-EX die Parameter sieben analytischer Verteilungsfunktionen (Extremwertverteilung Typ 1, Allgemeine Extremwertverteilung, Rossi-Verteilung, Logarithmische Normalverteilung, Pearson-Typ 3-Verteilung, Logarithmische Pearson-Typ 3-Verteilung und Weibull-Verteilung) mit Hilfe drei unterschiedlicher Methoden (Momentenmethode, Maximum-Likelihood-Methode und Methode der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente). Das Ergebnis waren jeweils Abflüsse für verschiedene statistische Wiederkehrintervalle für die Verteilungsfunktionen. In Abstimmung mit der Stadt Duisburg und den Wirtschaftsbetrieben Duisburg wurde entschieden, für die

Hochwassermodellierungen in R2K-Klim+ die mit der Logarithmischen Normalverteilung (LN3) und der Maximum-Likelihood-Methode (MLM) berechneten Abflüsse zu verwenden. Diese Abflüsse wiesen die höchsten Übereinstimmungen mit den von der Bezirksregierung Düsseldorf vorgeschriebenen Werten für die Erstellung der HWGKs und mit den in Duisburg verwendeten Werten auf. Die Abflüsse Q und die entsprechenden Wiederkehrintervalle T sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Hochwasserabflüsse verschiedener Jährlichkeiten für den Pegel Duisburg-Ruhrort.

T [a]	Q [m <sup>3</sup> /s]		
	R2K-Klim+ (LN3 MLM)	HWGK [56]	Stadt Duisburg [60]
1,1	4.150		
2	6.320		
5	8.180		8.110
10	9.320	9.470 (HQ <sub>häufig</sub> )	8.952
20	10.400		9.733
25	10.700		
50	11.700		10.760
100	12.600	12.400	12.000
200	13.500		13.400
300	14.100		
500	14.700		14.800 (BHQ <sub>2004</sub> )
1.000	15.600	15.800 (HQ <sub>extrem</sub> )	

### Methodik

Für die in Tabelle 4 aufgeführten Hochwasserabflüsse (außer HQ<sub>1.000</sub>) wurden in Abstimmung mit der Stadt Duisburg und den Wirtschaftsbetrieben Duisburg hydraulische Hochwassermodellierungen durchgeführt, um jeweils die Ausdehnung der Überflutung, die max. Überflutungstiefen und die maximalen Fließgeschwindigkeiten zu ermitteln. Hierfür wurde ein instationäres, hydrodynamisches zweidimensionales Modell mit der Software HEC-RAS 6.1.0 [1] für die



Mikroebene aufgebaut. Zur Simulation des Abflussgeschehens löst HEC-RAS die diffusiven Wellengleichungen. Diese sind eine Vereinfachung der zweidimensionalen Flachwassergleichungen, welche auf der Kontinuitätsgleichung zur Massenerhaltung und der Navier-Stokes-Gleichung zur Impulserhaltung beruhen. Zur numerischen Lösung der Gleichungen verwendet HEC-RAS das implizite Finite-Volumen Verfahren. Die räumliche Diskretisierung erfolgte mit einem unstrukturierten Berechnungsnetz. In Tabelle 5 sind die Eingangsdaten und deren Quellen, die für den Aufbau des 2D-Modells genutzt wurden, zusammengefasst.

Tabelle 5: Eingangsdaten zum Aufbau des 2D-Hochwassermodells.

Beschreibung	Datenquelle
<b>Digitales Geländemodell</b>	OpenGeodata.NRW, aufbereitet von geomer (Stand 2021)
<b>Digitales Geländemodell Gewässerschlauch des Rhein (DGM-W_760-810)</b>	BfG (Stand 2012)
<b>Querprofile der Ruhr</b>	Ruhrverband (Stand 2020)
<b>Peildaten Hafenbecken</b>	Duisport (Stand 2021)
<b>Peildaten Rhein-Herne-Kanal</b>	WSV (Stand 2021)
<b>Peildaten Schifffahrtskanal</b>	WSV (Stand 2021)
<b>Gebäude (fullHAUSde-Datensatz)</b>	geomer (Stand 2022)
<b>Hochwasser-Schutzanweisungen</b>	Stadt Duisburg (Stand 2021)
<b>Informationen zum Ablauf bei Hochwasser</b>	WSA (Stand 2022)
<b>Landnutzungskategorien Wasserflächen</b>	BfG (Stand 2021)
<b>Landnutzungskategorien Stadtgebiet Duisburg</b>	Realfächenkartierung der Stadt Duisburg (Stand 2020)
<b>Landnutzungskategorien Umland</b>	ALKIS (2021)
<b>Abfluss Ruhr bei Raffelberg</b>	Elwas-web (Stand 2022)
<b>Abfluss Schifffahrtskanals</b>	Wasserkraftwerk Raffelberg (Stand 2022)
<b>Abfluss Rhein</b>	Extremwertstatistik

Für die Abbildung der Geländeoberfläche im Modell wurde das digitale Geländemodell (DGM) für Nordrhein-Westfalen mit einer Rastergröße von 1 m als Grundlage verwendet. In diesem DGM ist im Bereich von Wasserflächen die Gewässersohle nicht abgebildet, da diese durch flugzeuggestützte Laserscanning-Daten nicht ermittelt werden kann. Aus diesem Grund wurden zusätzlich Daten zur Gewässersohle für Rhein, Ruhr, Kanäle und Hafenbereiche in das DGM eingepflegt. Gebäude wurden berücksichtigt, indem die Geländehöhen an den entsprechenden Stellen pauschal um 20 m erhöht wurden, sodass das Wasser im Modell um diese herum fließt. Hochwasserschutzanweisungen der Stadt Duisburg und Informationen zum Ablauf bei Hochwasser wie das Schließen von Schleusentoren und des Hochwassersperrtors im Verbindungskanal zwischen Ruhr und Rhein-Herne-Kanal wurden ebenfalls im DGM abgebildet. Hierzu wurde das DGM an den entsprechenden Stellen in HEC-RAS so modifiziert, dass bei Hochwasser geschlossene Dammbalkenverschlüsse und Tore durch Mauern dargestellt wurden. Das fertige DGM ist in Abbildung 8 dargestellt. Das unstrukturierte Berechnungsnetz von HEC-RAS wurde über Breaklines an relevanten Stellen an das DGM angepasst und wenn notwendig verfeinert.

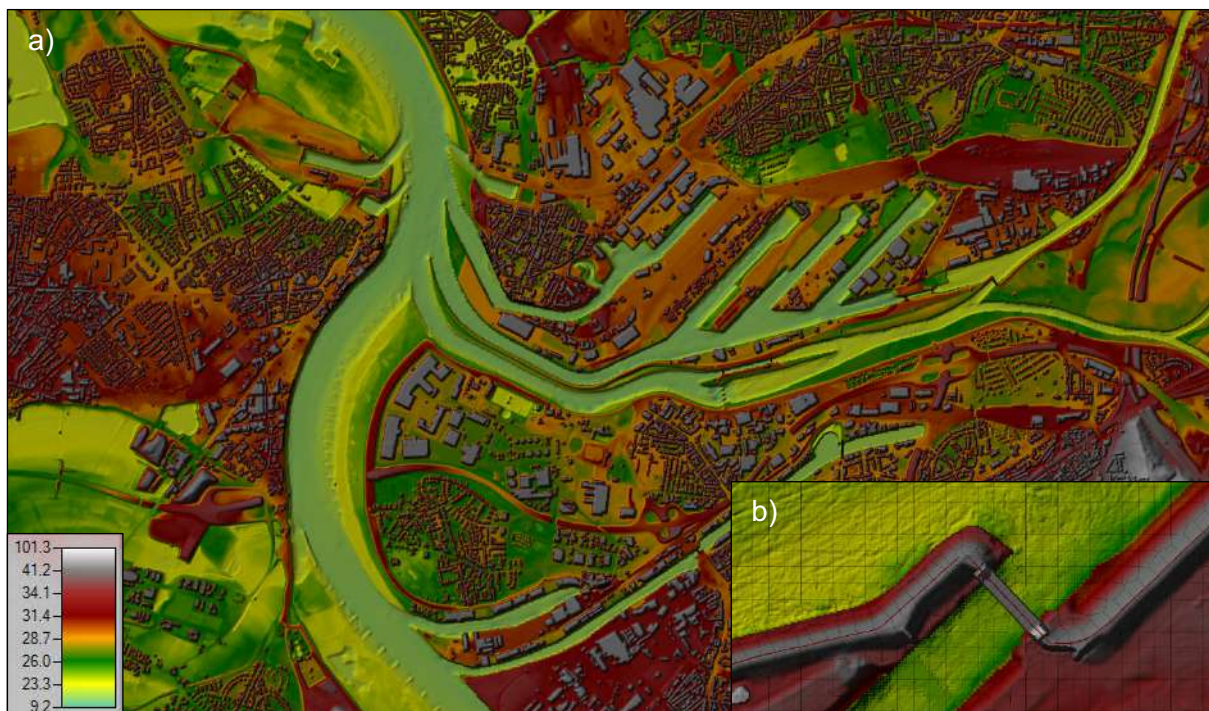


Abbildung 8: Aufbereitetes DGM für die Hochwassermodellierung; a) Ausschnitt Stadtgebiet Duisburg; b) Ausschnitt mit geschlossenem Hochwassersperrtors im Verbindungskanal zwischen Ruhr und Rhein-Herne-Kanal inkl. Berechnungsnetz und Breaklines (rot).

Die verschiedenen Datensätze der Landnutzungskategorien wurden in ein gemeinsames Shape überführt, in insgesamt 16 Kategorien aggregiert und in HEC-RAS eingelesen. Den Kategorien wurden Rauheitsbeiwerte in Anlehnung an das HEC-RAS 2D User's Manual zugeordnet. In Abstimmung mit der Stadt Duisburg wurde für die Ruhr und den Schifffahrtskanal ein stationärer Abfluss als Randbedingung für den gesamten Simulationszeitraum der einzelnen Hochwassermodellierungen eingestellt. Für die Ruhr wurde hierbei ein

Mittelwasserabfluss von  $77 \text{ m}^3/\text{s}$  angenommen (regionalisierter Kennwert nach [61]) und für den Schifffahrtskanal ein Abfluss von  $105 \text{ m}^3/\text{s}$  [62]. Für den Rhein wurde für jeden der in Tabelle 4 aufgeführte Spitzenabflüsse eine instationäre Hochwasserganglinie erstellt und als Randbedingung eingestellt. Als Vorlage für die Hochwasserganglinie wurde das Hochwasserereignis am Pegel Duisburg Ruhrort im Winter 1925/1926 ausgewählt und die damals aufgezeichnete Hochwasserganglinie entsprechend skaliert. In Abbildung 9 ist beispielhaft die für das  $HQ_{100}$  erstellte Hochwasserganglinie dargestellt.

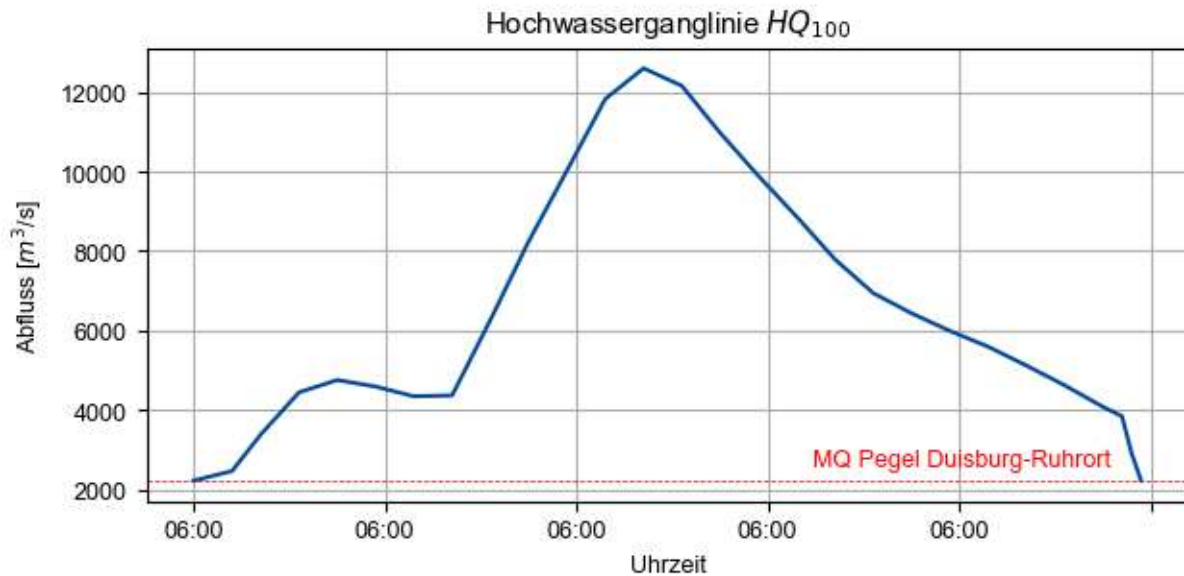


Abbildung 9:  $HQ_{100}$  Hochwasserganglinie und Mittelwasserabfluss MQ des Pegels Duisburg-Ruhrort (rot, gewässerkundlicher Hauptwert nach [63]).

Eine Kalibrierung des Hochwassermodells war nur anhand der Abflusskurve der BfG für den Pegel Duisburg Ruhrort möglich [48]. Anhand dieser Informationen wurde die Rauheit im Bereich der Wasserflächen jeweils für die einzelnen Abflüsse so eingestellt, dass der entsprechende Wasserstand am Pegel nach der Wasserstands-Abfluss-Beziehung erreicht wird. Für eine Kalibrierung verwendbare Aufzeichnungen vergangener Hochwasserereignisse in Duisburg lagen nicht vor.

### Ergebnisse

Die Ergebnisse der Hochwassermodellierungen wurden gemeinsam mit der Stadt Duisburg plausibilisiert. Die HWGKs wurden ebenfalls zur Plausibilisierung der Ergebnisse genutzt. Eine Kalibrierung oder Validierung anhand der HWGKs war aufgrund der unterschiedlichen methodischen Ansätze nicht möglich.

Die Ergebnisse der Hochwassermodellierung wurden in das EUS integriert und zusätzlich in Kartenform bereitgestellt. In Abbildung 10 sind Ausschnitte der maximalen Überflutungstiefen für  $HQ_2$ ,  $HQ_{10}$ ,  $HQ_{100}$  und  $HQ_{500}$  dargestellt.

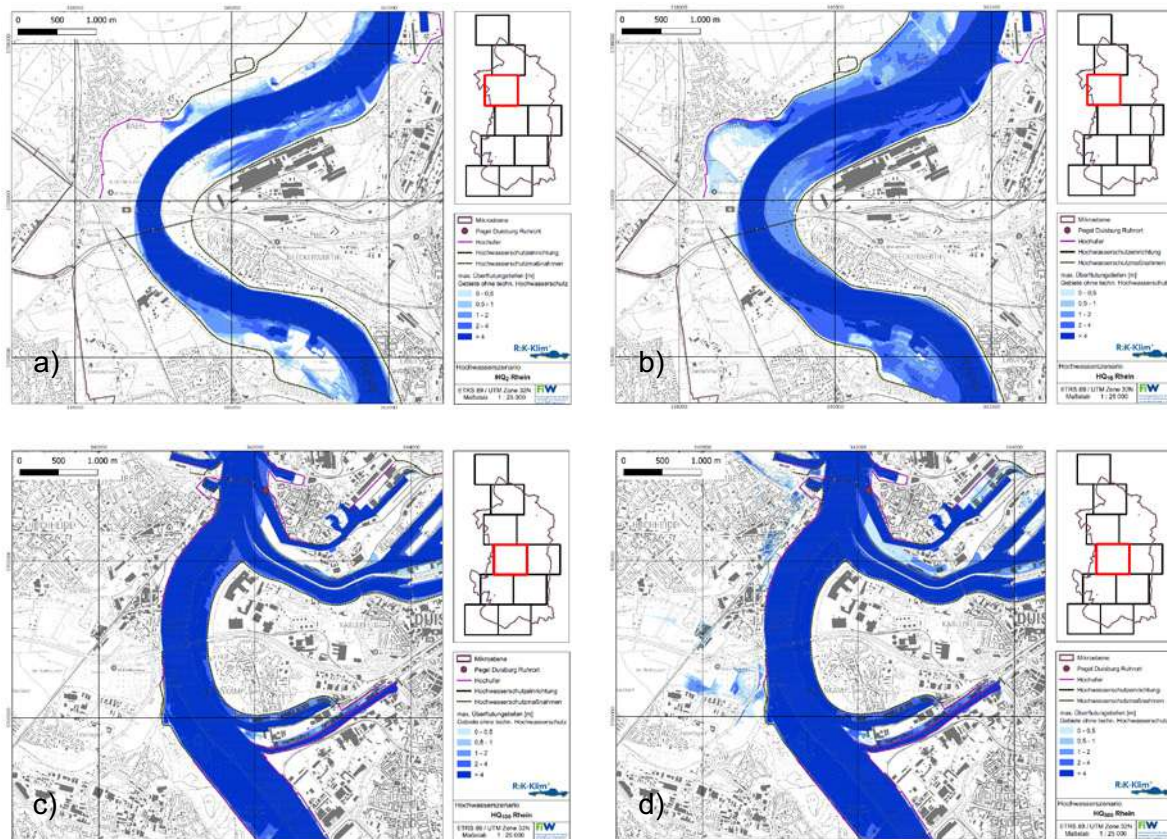


Abbildung 10: Ergebnisse der Hochwassermodellierung für maximale Überflutungstiefen: a) HQ<sub>2</sub>, b) HQ<sub>10</sub>, c) HQ<sub>100</sub>, d) HQ<sub>500</sub>; Hintergrundkarte: Digitale Topographische Karte 1:25 000 / © Bezirksregierung Köln.

### Maßnahmenmodellierung

Wie in Kapitel 5.6 erläutert, wurden Maßnahmen beispielhaft im Duisburger Ortsteil Ruhrort untersucht. Während eines Hochwasserereignisses kommt es hier zu Überflutungen im Bereich des Binnenhafens. Aufgrund der dichten Bebauung bieten sich hier nur Hochwasserschutzwände bzw. -mauern oder mobile Hochwasserschutzmaßnahmen an. Im Rahmen der Hochwassermodellierung wurden dazu Hochwasserschutzwände modelliert, sodass die dahinterliegenden Flächen vor einer Überflutung geschützt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 dargestellt.

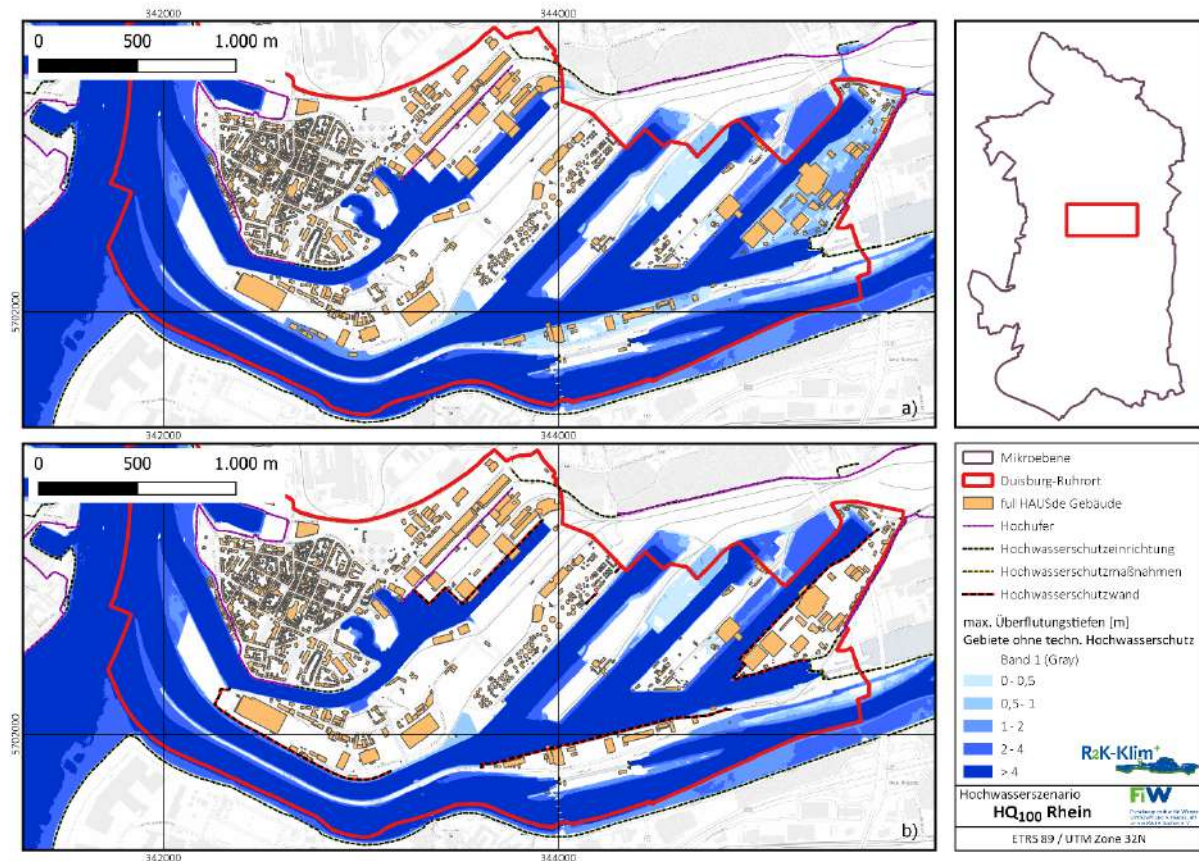


Abbildung 11: Vergleich der max. Überflutungstiefen in Duisburg-Ruhrort a) ohne und b) mit der Maßnahme Hochwasserschutzwand (rote-schwarze Linie); Hintergrundkarte: TopPlusOpen Light Grau © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Datenquellen: [https://sg.geodatenzentrum.de/web\\_public/gdz/datenquellen/Datenquellen\\_TopPlusOpen.html](https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/datenquellen/Datenquellen_TopPlusOpen.html)

Die Ergebnisse wurden ebenfalls in das EUS integriert.

### Schadenspotenzialanalyse (SAGE-Modul)

#### Methodisches Vorgehen – flächen- vs. gebäudebasiert

Die Schadensermittlung erfolgte über zwei unterschiedliche Modelle, mithilfe des gebäudebasierten und des flächenbasierten Ansatzes. Innerhalb des EUS ist das Schadensmodell frei auswählbar.

Im Rahmen des flächenbasierten Ansatzes wurden die Vermögenswerte pro Fläche nach Landnutzungskategorien differenziert. Diese wurden mit nutzungsspezifischen Schadensfunktionen in Abhängigkeit des Wasserstandes verknüpft, um die Schädigungsgrade der Fläche ableiten zu können. Mithilfe definierter nutzungsspezifischer Vermögenswerte konnten die Schädigungsgrade in absolute Schäden umgerechnet werden.

Der gebäudebasierte Ansatz hingegen betrachtet die objektspezifische Ermittlung der Schäden nach dem gebäudetypologischen Ansatz [64]. Basierend auf der Gebäudetypologie eines definierten Untersuchungsgebietes wurden für jeden quantitativ relevanten Gebäudetyp spezifische Schadensfunktionen entwickelt bzw. bestehende Schadensfunktionen übertragen. Zur

Entwicklung der Schadensfunktion ist eine bau- und nutzungsspezifische Analyse der Gebäudetypen notwendig. Auf dieser konnte dann in Zusammenhang mit definierten Überflutungsstufen die Schadensabschätzung erfolgen.

Für die Entwicklung der Schadensfunktionen bildet eine detaillierte baukonstruktive und nutzungsspezifische Analyse charakteristischer Repräsentanten die Grundlage. Darauf aufbauend wurden Überflutungsstufen definiert, für die eine genaue Schadensabschätzung erfolgte. [64]

#### Immobilie Vermögensermittlung

Als Grundlage für die Schadensberechnung wurden von geomer zwei aktuelle Datensätze in das EUS eingebracht: Das gebäudebasierte Schadensmodell setzte dabei auf *fullHAUSde* [65] auf. Hierbei handelt es sich um einen jährlich aktualisierten, georeferenzierten Gebäudedatensatz, der sämtliche amtlich erfassten Gebäude Deutschlands abbildet. Neben Umrissgeometrie, Gebäudeflächen und Vermögenswerten stehen weitere wertvolle Attribute, wie z.B. Gebäudenutzung, Gebäudetyp und Einwohnerzahl zur Verfügung (vgl. Tabelle 6). Die Gebäudedaten stammen aus den amtlichen Hausumringen und den amtlichen LoD2-Gebäudedaten und wurden in einem Aufbereitungsworkflow unter Anwendung etlicher Plausibilisierungs- und Korrekturmaßnahmen kombiniert. Die zugrundeliegenden Vermögenswerte wurden auf Basis des Gebäudevolumens, des Gebäudetyps und der Nutzungsform in Zusammenhang mit Baukostenindizes des Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (BKl) ermittelt [66]. Regionale Disparitäten wurden dabei berücksichtigt. Angegeben ist das Nettoanlagevermögen (Herstellungskosten, mittlerer Zeitwert der Immobilie). Das Gebäudealter und der Sanierungszustand des Einzelgebäudes wurden hierbei nicht erfasst, ebenso wurden Abweichungen in Bauweise und Bauqualität vom Mittelwert nicht berücksichtigt.

Tabelle 6: Ausschnitt der in der fullHAUSde-Datenbank enthaltenen Parameter.

Parameterbezeichnung
<b>Eindeutige Indizierung der Gebäudeumringe</b>
<b>Stockwerksanzahl</b>
<b>Wohnfläche</b>
<b>Energiebezugsfläche</b>
<b>Gebäudevolumen</b>
<b>Einwohnerzahl</b>
<b>Gebäudegrundfläche</b>
<b>Gebäudeklasse</b>
<b>Gebäudetyp</b>
<b>Nutzung</b>
<b>Vermögenswert</b>

Es wurden für alle Gebäude im Stadtgebiet Duisburg objektspezifische Informationen aus der von geomer entwickelten fullHAUSde-Datenbank zur Ermittlung von Vermögenswerten sowie zur Zuordnung der Objekte auf die unterschiedlichen Nutzungskategorien zugrunde gelegt. Zusätzlich hat das FiW weitere Attribute betrachtet, die auf der Mikroebene, einen Einfluss auf den immobilien Vermögenswerten nehmen. Dabei wurden u. a. das Vorhandensein von Kellern für Wohngebäude und Kindergärten, das Vorhandensein von unterirdischen U-Bahn-Stationen sowie von Tiefgaragen berücksichtigt. Im Stadtgebiet Duisburg sind ca. 37 % der untersuchten Wohnhäuser und ungefähr 7 % der Kindergärten unterkellert (vgl. Abbildung 12). Die Keller wurden anhand von Lichtschächten im Satellitenbild kartiert.

Weiter wurde der Einfluss der Gebäudehöhe und der Dachform, der prozentuale Anteil von Wohn- und Mischnutzung sowie die BKI-Kategorie durch FiW untersucht.

Die Ermittlung von mobilen und immobilien Vermögenswerten wurde anhand von Literatur zur Ableitung von Vermögenswerten durchgeführt. Zusätzlich haben das FiW und geomer gemeinsam ausgewählte Risikoobjekte identifiziert.



Abbildung 12: Kindertagesstätten und Wohnhäuser in Duisburg mit und ohne Keller (Ausschnitt).

Der flächenbasierte Ansatz basierte auf dem von geomer im Rahmen des Copernicus-Frameworks erstellten BEAM-Datensatz. Die Nutzungsinformation in BEAM entstammt u.a. Urban Atlas und CORINE Land Cover. Über ein statistisches Disaggregationsverfahren wurden bei der Erstellung von BEAM jeder Teilfläche Vermögenswerte für unterschiedliche volkswirtschaftliche Kategorien zugeordnet.

So konnten Schadenspotenziale für die Nutzungskategorien privates Wohnvermögen, Industrievermögen, Handel- und Dienstleistungen und Landwirtschaft ermittelt werden. Die Angaben zur Wassertiefe für Hochwasserereignisse mit unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeit wurden aus den hydraulischen Modellierungen mit HEC-RAS entnommen.

### Mobile Vermögensermittlung – Eine Prinzipberechnung

Im Rahmen der Berechnung mobiler Vermögen durch das FiW wurden die Nettoanlagen zu den Wiederbeschaffungspreisen herangezogen. Über DESTATIS lassen sich die Nettoanlagen, aufgeteilt nach Bundesländern und Sektoren, für das Jahr 2019 abrufen [67]. Die Sektoren beziehen sich auf die Wirtschaftszweiggliederung in den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen nach WZ 2008 (Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008) und beinhalten die Sektoren Land-, Forstwirtschaft und Fischerei (A), Produzierendes Gewerbe (B-F) und Dienstleistungsbereiche (G-T). Um einen sektorenspezifischen monetären Schadenswert pro Quadratmeter zu erhalten, wurden die Vermögenswerte für Nordrhein-Westfalen durch die Fläche des jeweiligen Sektors dividiert. Für die Berechnung der Fläche wurde der fullHAUSde-Datensatz von geomer [65] verwendet. Dieser Datensatz enthält alle erforderlichen Informationen wie z.B. relevante Gebäude in einer kategorisierten Form. Nun erfolgte in einem Zwischenschritt die Zuteilung der Gebäude auf die Sektoren. Nicht vertretene



Gebäudekategorien, wie Wohnungen oder Garagen, wurden vernachlässigt. Abbildung 13 stellt die relevanten Gebäudekategorien (grün) und die entfernten Gebäude (grau) dar.



Abbildung 13: Der fullHAUSde-Datensatz mit den für die Sektoren relevanten Gebäudekategorien (grün).

Als nächstes wurden die fullHAUSde-Daten anhand der Bezirksgrenzen in fünf Gebiete unterteilt und die daraus berechneten Flächen zusammenaddiert. Im letzten Schritt wurden die Vermögenswerte durch die Gesamtfläche der jeweiligen Sektoren geteilt. Abbildung 13 beinhaltet die Flächen der Sektoren und die berechneten Nettoanlagevermögen. Diese Berechnung stützt sich auf die Arbeit von [68]. Sie vernachlässigt jedoch die zusätzliche Berechnung des Vorratsvermögens, da hierzu die Datengrundlage unzureichend ist.

Tabelle 7: Nettoanlagevermögen zu Wiederbeschaffungspreisen nach Sektoren und Fläche.

	Sektor_1	Sektor_2	Sektor_3
Gesamtfläche [km <sup>2</sup> ]:	133,72	320,80	449,27
2019; Nettoanlagevermögen (Ausrüstungen und sonstige Anlagen) zu Wiederbeschaffungspreisen [Mio. Euro]:	6887,59	141255,45	213298,27
Nettoanlagevermögen (Ausrüstungen und sonstige Anlagen) zu Wiederbeschaffungspreisen [Euro / m <sup>2</sup> ]:	51,50947338	440,3192877	474,7698582

## Risikoanalyse

Im Rahmen des SAGE (Semantic Geospatial Analytics)-Forschungsprojektes wurde von geomer ein Prototyp zur Bewertung von Vermögensschäden infolge von Hochwasser entwickelt. In R2K-Klim+ hat geomer die Software-Komponenten aus SAGE zur Schadenspotenzialanalyse komplett überarbeitet, um wesentliche Features ergänzt und mit einem angepassten Datenmodell in das EUS integriert (vgl. Abbildung 14). Die Risikoberechnung setzte dabei auf Simulationsdaten auf, die von einem Hydraulik-Modell ausgegeben wurden. Die Modellierung der Hochwasserereignisse und Erstellung der zugrundeliegenden HWGK wurden hierbei vom FiW übernommen. Im ersten Schritt wurden die Simulationsergebnisse in Form von rasterbasierten HWGK in das Datenbanksystem eingespielt. In Form eines Präprozessierungsschrittes erfolgte anschließend eine Verschneidung zwischen den jeweiligen Einstauhöhen und dem fullHAUSde-, bzw. BEAM-Datensatz. geomer hat hierfür die beiden Kommandozeilen basierten Tools building-flood-process und beam-flood-process entwickelt, über welche dieser Vorgang automatisiert wurde. Für beide Schadensmodelle sind sektor- und modellspezifische Schädigungsfunktionen hinterlegt, die den Schädigungsgrad an Vermögenswerten in Abhängigkeit der Einstauhöhe berechnen. Auf Basis der Schädigungsfunktionen, der szenariospezifischen Gefahrenkarten und der hinterlegten Vermögenswerte konnte somit der potenzielle Schaden ermittelt werden. Die Berechnung erfolgt hierbei gebäudescharf, bzw. im Falle des flächenbasierten Schadensmodells pro Rasterzelle (momentan 5m x 5m).

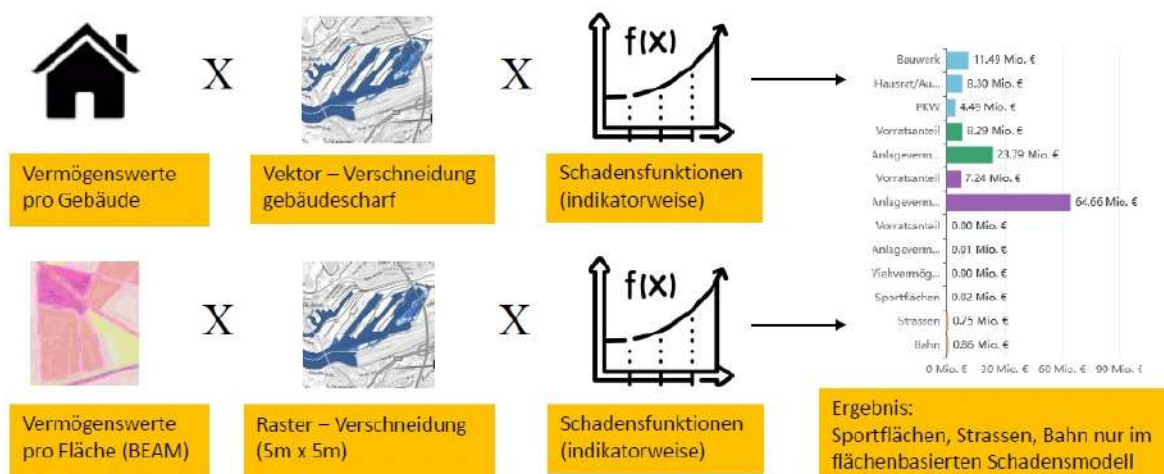


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Berechnungsvorgangs zur Bestimmung des potenziellen Schadens im Falle des Gebäudeschadenmodells (oben) und des flächenbasierten Schadenmodells (unten).

Eine erste technische und fachliche Verifizierung der Resultate erfolgte anhand von zwei Test-szenarien, einem „HQ<sub>100</sub>“ und einem „HQ<sub>extrem</sub>“, welche dem Geodatenportal NRW entstammen. Nachfolgend wurde der gesamte Integrationsprozess anhand eines Testdatensatzes des FiW evaluiert. Abschließend erfolgte die Einbindung von finalen Ergebnisdaten aus Szenario- und maßnahmenbedingten Modellläufen des FiW sowie eine Plausibilisierung der Ergebnisse.

Sowohl das gebäudebasierte als auch das flächenbasierte Schadensmodell sind vollständig in das EUS integriert und es findet jeweils eine interaktive Berechnung auf Basis der Benutzerauswahl statt. Ein besonderes Augenmerk war hierbei auf die Rechenzeiten der Modelle zu legen. Der Gebäudedatensatz für Duisburg umfasst ca. 180.000 Gebäude, hinsichtlich BEAM wurden 160.000 Flächen für den gesamten Regierungsbezirk Düsseldorf im System hinterlegt. Im Zuge der technischen Überprüfung wurden verschiedene Datenstrukturen und Datenbankabfragen optimiert, um einen Echtzeitbetrieb zu gewährleisten. Im Falle der Gebäudevulnerabilitäten erfolgt die Berechnung der kartographischen Darstellung ebenfalls vollständig dynamisch und in Echtzeit.

### 5.1.2.2 Starkregen – hydrologische und hydraulische Modellierung

Für die Starkregensimulationen in der Stadt Duisburg war die geomer GmbH zuständig. Für diese Simulationen wurde ein gekoppeltes Niederschlags-Abfluss-Modell unter Einbeziehung eines zweidimensionalen, instationären Hydraulikansatzes verwendet.

Die Berechnung der Hydrologie des Gebiets ist zweigeteilt. Die Abflussbeiwerte für das Stadtgebiet Duisburg wurden von gaiac ermittelt. Alle nicht abgedeckten Bereiche des Simulationsgebietes wurden auf Grundlage der Versiegelung, Landnutzung, Bodentyp und der Topographie mit der von geomer eigens entwickelten Software Hydro<sup>ras</sup> (Version 1.1) modelliert. Die in der hydraulischen Berechnung benötigten Abflussbeiwerte und Berechnungsganglinien wurden als Inputdaten für die Simulation mit diesem Tool flächendetailliert generiert. Alle Eingangs- und Ausgangsdaten werden im GeoTIFF-Format erzeugt. Anschließend wurden beide Datensätze zusammengefügt.

Für die hydraulische Berechnung kam das Modell FloodArea<sup>HPC</sup> (Version 11.4) der geomer GmbH zum Einsatz. Ein solches Modell (2D-HN-Modell) kann Gerinnesysteme und abflussrelevante Strukturen erfassen und darstellen. Die zeitliche Entwicklung von Fließgeschwindigkeit und Überflutungstiefe sowie die Wirkung baulicher Vorsorgemaßnahmen wurden mit den 2D-HN-Modellen simuliert. Der Vorteil dieses Vorgehens ist eine detaillierte Darstellung der Strömungsverhältnisse, der Geschwindigkeiten, der Wasserspiegellagen und der Überflutungstiefe.

Als Datengrundlage wurde das freiverfügbare DGM des Landes Nordrhein-Westfalen [69] mit einer Auflösung von 1m x 1m verwendet. Die HWGK-Gewässer und Informationen zu der Landnutzung stammen aus dem BasisDLM-Datensatz [70]. Als Gebäudegrundlage werden die fullHAUSde verwendet. Die Bodenart wurde aus der BK50 [71] abgeleitet.

#### Methodik

Die Methodik zur Verarbeitung der Rohdaten hin zu Ergebnissen der Starkregenmodellierung entspricht einem sich aufbauenden Prozess. Die Rohdaten wurden verwendet, um eine erste Simulation zu starten, welche als Grundlage für die Kartierung diente. Im Februar 2020 wurden

in zwei Kartierkampagnen in der Stadt Duisburg fließwegrelevante Strukturen, wie Verdolungen, Unterführungen, Mauern usw. kartiert. Hierbei wurde stichprobenartig vorgegangen. Nach der Integration der neu aufgenommenen Informationen wurde die Simulation erneut durchgeführt. Die vorläufigen Ergebnisdaten wurden für die Projektpartner auf der projektinternen NextCloud bereitgestellt und die Karten der Stadt Duisburg zur Validierung übermittelt. Die Stadt Duisburg hat zur Validierung die gewässerunterhaltungspflichtigen Körperschaften (WBD, RV, EGLV, LINEG) herangezogen. Da sich durch die Überlagerung der Teileinzugsgebiete ein unrealistisches Aufsummieren der Abflüsse ergeben würde, wird bei Starkregensimulationen normalerweise das Wasser jeweils bei Erreichen größerer HWGK-Gewässer aus dem Modell entnommen. Dadurch wurde eine inhaltliche Überlagerung von HWGK und Starkregengefahrenkarten vermieden. Das heißt, bei Starkregengefahrenkarten wurde für die HWGK-Gewässer keine vom Gewässer ausgehende Überflutung angenommen.

Da sich die Daten der CMIP6-Szenarien der Begleitforschung während der FuE-Phase I noch im Aufbau befanden, wurde eine Strategie entwickelt, um ein abgestuftes Szenarienbündel im Rahmen der CMIP5-Szenarien abzubilden. Für die Hauptsimulationen wurden folgende Szenarien mit einem einstündigen endbetonen Niederschlag ausgewählt: 40 mm/h, 50 mm/h, 60 mm/h, 70 mm/h, 80 mm/h, 90 mm/h. Nach der ersten Stunde mit Beregnung folgten zwei Stunden Nachlaufzeit.

### Ergebnisse

Als Ergebnis jeder Simulation wurden die Fließgeschwindigkeit, die Fließrichtung und die Überflutungstiefe für jede Minute als GeoTIFF herausgeschrieben. Diese Ergebnisse werden als animierte Starkregengefahrenkarte des Szenarios 50 mm/h im Entscheidungsunterstützungssystem dargestellt. Für die anderen Szenarien wurden jeweils Maximalraster erstellt, was bedeutet, dass für jedes Pixel der Maximalwert aus allen 180 Zeitschritten bestimmt wird. Ein Beispiel (Szenario 50 mm/h) ist in Abbildung 15 zu sehen:

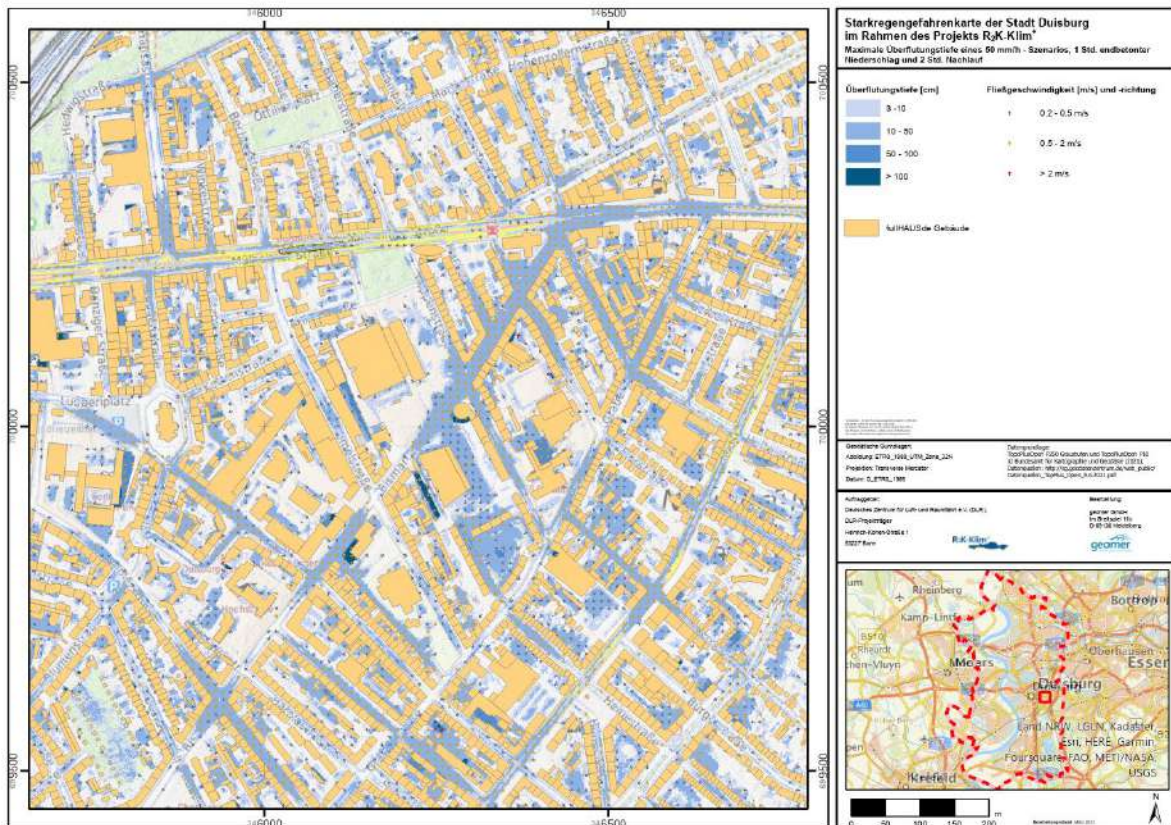


Abbildung 15: Starkregengefahrenkarte der Stadt Duisburg bei einem 50 mm/h-Szenario.

### Maßnahmenmodellierung

Eine Betrachtung von Maßnahmen wurde beispielhaft im Duisburger Ortsteil Ruhrort durchgeführt, in welchem neben Wohnvierteln auch der Binnenhafen (duisport) liegt (s. Kapitel 5.6). Es wurden hydrologische Maßnahmen wie Dachbegrünung und Entsiegelung und hydraulische Maßnahmen wie Tieferlegungen von öffentlichen Plätzen und Einleitung in Grünflächen modelliert. Durch Änderungen in den Abflussbeiwerten (hydrologische Änderung) können auch positive Synergieeffekten für andere Klimawirkungen entstehen. Mit eingebauten Maßnahmen wurden auf Grundlage des 50 mm/h-Ereignisses der Ortsteil modelliert. Die Auswirkungen von zwei hydraulischen Maßnahmen auf den Oberflächenabfluss sind anhand von zwei Beispielen als Differenz der Überflutungstiefen in Abbildung 16 zu sehen. Die grünen und rötlichen Bereiche weisen durch die Maßnahmen induzierte geringere bzw. höhere Überflutungstiefen aus.

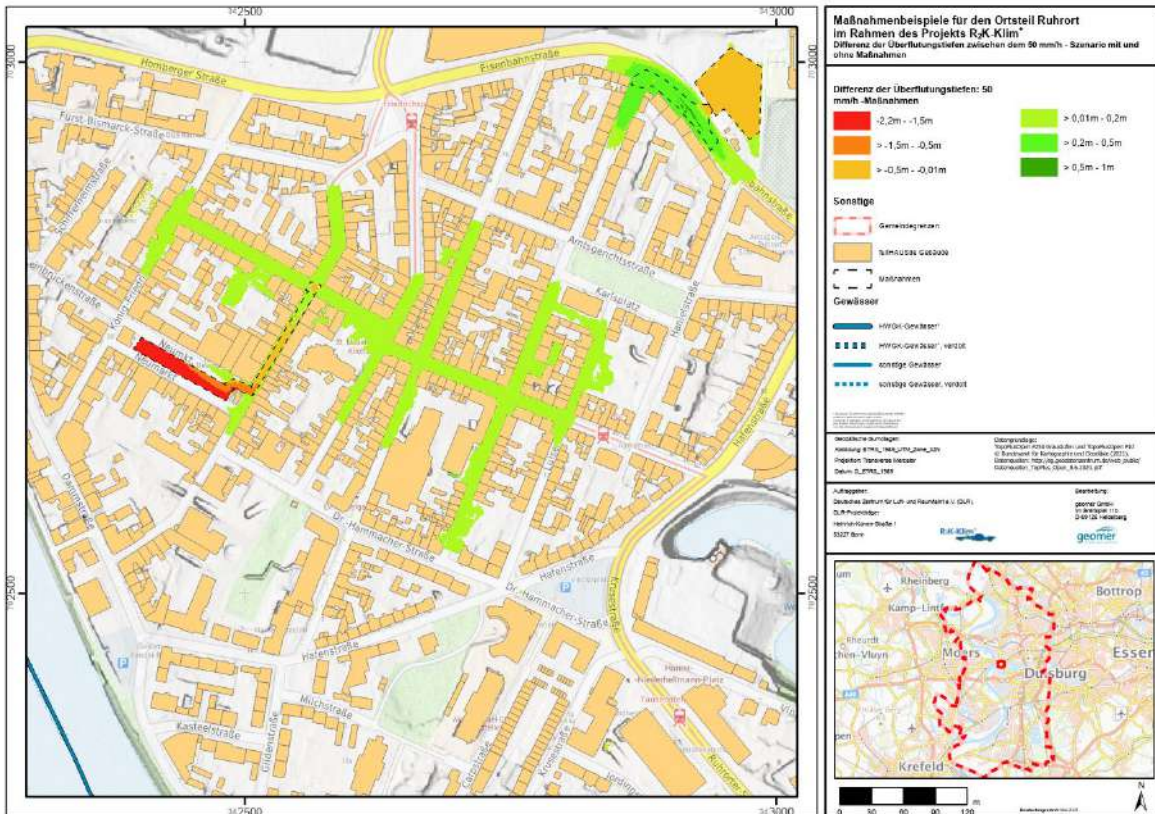


Abbildung 16: Differenz der Überflutungstiefen bei einem 50 mm/h-Szenario mit und ohne Maßnahmen.

### 5.1.2.3 Modellierung der Auenvegetation

Das Ziel der Auenmodellierung war, das von gaisac entwickelte dynamische und prozessorientierte Landschafts-Simulationsmodell (LandS-Modell ehem. GraS-Modell) modelltechnisch so zu erweitern, dass es auch auf Auenlandschaften anwendbar ist. Die Anwendbarkeit des LandS-Modell wurde hierbei an ausgewählten Auebereichen in Duisburg getestet (Testgebiete). Wesentlich für die Modellierung von Auelandschaften im Klimawandel war dabei die Kopplung des LandS-Modells mit hydraulischen 3D-Modellen.

Das LandS-Modell wurde während der Projektlaufzeit modelltechnisch weiterentwickelt und zur Modellierung der Auenvegetation um die in diesem Lebensraum entscheidenden Umwelteinflüsse (Überflutungsdauer und Fließgeschwindigkeit) ergänzt. Zudem wurde eine Methode entwickelt, mit deren Hilfe der Modelloutput aus dem hydraulischen Modell mit dem rasterbasierten LandS-Modell verknüpft werden kann. Dabei wird der Modelloutput aus dem hydraulischen Modell in einer statistischen Analyse mit dem Digitalen Geländemodell (DGM) verschnitten und dafür genutzt, tägliche Überflutungsparameter pro Raster für das LandS-Modell zu erhalten. Da die Pflanzen bzw. die Vegetationseinheit pro Raster bekannt sind, können somit die Überflutungsparameter (u.a. Überflutungsdauer) direkt pro Raster (aktuell 1m x 1m-Raster) mit der Vegetation verknüpft werden. Je nach pflanzen- bzw. vegetationsspezifischer Anpassungskapazität bzgl. der u. a. Überflutungsdauer verändern sich entsprechend die Vegetationseinheiten. Damit konnten für die Zukunft Veränderungen der etablierten Vegetation bei

einem sich verändernden Überflutungsregime oder baulichen Maßnahmen wie z.B. dem Anschluss von Altarmen simuliert werden. Der Modellierung nachstehend ist somit eine Vulnerabilitäts- bzw. Risikoabwägung möglich.

#### Vorstellung Modellerweiterung und -output LandS-Modell

Als Testgebiete für die Erweiterung des Landschaftsmodells auf den Lebensraum Aue dienten in der Mikroebene der Bereich des Altarms „Die Roos“ im Naturschutzgebiet Rheinaue Friemersheim im Süden von Duisburg und das Deichvorland der Walsumer Rheinaue im Norden von Duisburg (FFH-Gebiet).



Als Inputdaten wurden neben den oben beschriebenen Überflutungsparametern aus der Modellkette auch Vegetationsaufnahmen benötigt. Für beide Modellgebiete wurden deshalb detaillierte Biotoptypkarten erstellt und stichprobenhaft Vegetationsaufnahmen mit genauen Bedeckungen der Pflanzen in den verschiedenen Biotoptypen durchgeführt.

Zur Entwicklung und Erprobung der Modellerweiterung wurde das Gebiet an der Roos ausgewählt, da hier durch die räumlichen Gegebenheiten ein starker Gradient von Flussregimeparametern über eine schmale räumliche Ausdehnung zu beobachten war. Insbesondere wurde der direkt an den Rhein angrenzende, vordere Bereich an der Roos betrachtet, da die Dynamik im Altarm weniger von der Überflutung und Fließgeschwindigkeit geprägt ist, als vom Rest- und Stehwasser, welches durch den fehlenden Anschluss bedingt ist. Die Integration dieses Teilbereiches in das LandS-Modell wird in der FuE-Phase II anvisiert.

Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 17) zeigt die Abhängigkeit der Vegetationseinheiten innerhalb des Testgebietes Roos von der Überflutungsdauer. Im vorderen Bereich (rd. 200 Tage überflutet) finden sich Pioniergesellschaften, gefolgt von verschiedenen typischen Flutrasen der Auelandschaften (u. a. Knickfuchsschwanz-Flutrasen rd. 150 Tage überflutet). Im hinteren Bereich von Auelandschaften (< 50 Tage überflutet) finden sich oft Brennessel-Hochstaudenfluren, wie sie auch im Testgebiet Roos ausgebildet sind.

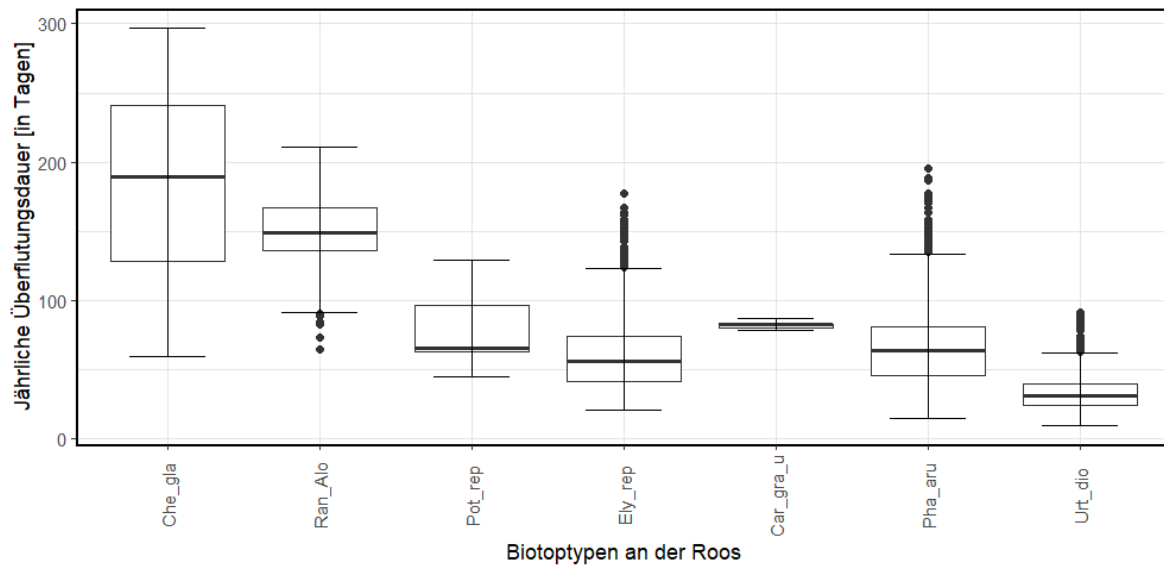


Abbildung 17: Durchschnittliche jährliche Überflutungsdauer der Jahre 1971 bis 2020 je Zelle und Biotyp für den direkt vom Rhein beeinflussten Bereich der Roos.

Nach dem aktuellen Entwicklungsstand des LandS-Modell konnte die Biotypenkarte (GIS-Shape) der Aue eingeladen und mit den Überflutungsparametern (Überflutungsdauer, Fließgeschwindigkeit) auf einem 1m x 1m-Raster verknüpft werden. Im ersten Kalibrierungsschritt und zur Testung des Modells ging es darum, den IST-Zustand der Aue abzubilden. Hierdurch konnte geprüft werden, ob alle relevanten Prozesse, die zur Darstellung der auetypischen Vegetationseinheiten notwendig sind, im Modell enthalten sind. Die Funktionsfähigkeit zur Darstellung des IST-Zustandes konnte durch erste Simulationsläufe nachgewiesen werden.

#### 5.1.2.4 Stadtökologie

Ein wesentlicher Aspekt der stadtökologischen Forschung besteht in der Klassifikation und Untersuchung von Lebensräumen (Biotypen, Stadtstrukturtypen), die spezifisch in Siedlungsgebieten vorkommen. Diese auch als Stadtstrukturtypen bezeichneten Lebensräume sind überwiegend auch in den Biotopkartierungsanleitungen der Bundesländer aufgeführt wie beispielsweise Sport- und Erholungsanlagen (HU), Parkplatz (HV3) oder Industriebrachgelände (HW4). Aber auch unterschiedliche Wohnbauflächen wie beispielsweise Blockbebauung (SB1a), Wohnhaus 1-1,5-stöckig (Einfamilienhausbebauung, SB2a), Reihenhausbauung (SB2b) werden als Biotypen (Stadtstrukturtypen) in manchen Bundesländern (u. a. NRW) gelistet. Die Stadtstrukturtypen (Biotypen) lassen sich aufgrund verschiedenster Kenngrößen (Versiegelungsgrad, Überbauungsgrad, Grünanteil etc.) und der Nutzung differenzieren, die im Wesentlichen die Artenzusammensetzung (Biodiversität) als auch das Stadtklima beeinflussen.

Vor diesem stadtökologischen Hintergrund wurde von gaiac eine stadtstrukturelle Analyse durchgeführt als Grundlage zur Ableitung von thermischen Lastgebieten, zur Bewertung der städtischen Biodiversität, zur Durchführung unterschiedlicher Vulnerabilitätsanalysen sowie letztendlich zur Ableitung stadtstruktureller Klimaanpassungsmaßnahmen. Die eigenen



Analysen und Ergebnisse wurden dann mit den Ergebnissen Dritter (u. a. Stadt Duisburg, Klimamodellierung des Regionalverbandes Ruhr) verglichen, um die eigene Methodik zu validieren. Folgende Arbeitsschritte wurden in der Projektlaufzeit durchgeführt:

- Biotypenklassifikation auf Grundlage der Flächennutzungskartierung vom RVR.
- Ermittlung stadtstruktureller Kenngrößen durch Fernerkundung: Grünvolumen ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ), Grünanteil in %, Bauvolumen ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ), Überbauungsgrad in % (Anteil Gebäude), Versiegelungsgrad in %, Gesamt-Versiegelungsgrad in %, unversiegelt in %, Beschattung durch Bäume in % (nach Grünanteil in 5 m Höhe).
- Ableitung Bewertungseinheiten aus den Kenngrößen:
  - a.) Klimatische Gunst- und Ungunsträume (5-stufige Bewertung).
  - b.) Abflussbeiwerte (zwischen 0 und 1).
  - c.) Übertragung in das Biotop-Wertepunktverfahren (Ökopunkte) der LANUV NRW als Bewertungsgrundlage für das Thema Biodiversität.
- Erstellung einer Vulnerabilitätsanalyse bezüglich Hitze und Gesundheit.
- Implementierung Vulnerabilitätsanalyse in das Entscheidungsunterstützungssystem.

#### Vorstellung der Ergebnisse der durchgeführten Arbeitsschritte

Die Ergebnisse der Analysen sind überwiegend in GIS-Shapes hinterlegt und wurden in Form von Karten entsprechend aufbereitet. Die fernerkundliche Analyse der stadtstrukturellen Kenngrößen wurde auf der räumlichen Ebene der Flächennutzungs-/Biotypen durchgeführt und dann auf die Ebene der Baublöcke hochgerechnet. Dies war notwendig, da nur auf höherer Raumebene Bevölkerungsdaten zur Verfügung stehen, die zur Durchführung einer Vulnerabilitätsanalyse zum Thema Hitze erforderlich sind.

Zur Ableitung von günstigen bzw. ungünstigen Stadtstrukturen (= thermische Lastgebiete) wurden die Kenngrößen Versiegelungsgrad, das Verhältnis von Grün- zu Bauvolumen, das Grünvolumen als auch die Flächengröße genutzt. Je höher der Versiegelungsgrad der Flächennutzungstypen und je höher das Bauvolumen im Verhältnis zum Grünvolumen ist, desto ungünstiger ist die Stadtstruktur bzgl. ihrer klimatischen Ausstattung. Dagegen wirken sich große unversiegelte Flächen mit einem hohen Grünvolumen (u. a. alte Parkanlagen) positiv auf das Stadtklima aus.

Tabelle 8: Bewertung der Stadtstrukturen bzgl. ihrer klimatischen Ausstattung anhand ausgewählter Kenngrößen (Vers. = Versiegelungsgrad, BV = Bauvolumen, GV = Grünvolumen).

Stufen	Vers.		GV/BV		GV		Flächen- größe
<b>Sehr ungünstige Stadtstrukturen</b>	> 50 %	und	< 0,5				
<b>Ungünstige Stadtstrukturen</b>	> 50 %	oder	< 0,5				
<b>Mittel (un-)günstige Stadtstrukturen</b>	< 50 %	und	> 0,5				
<b>Günstige Stadtstrukturen</b>	< 10 %	und	> 0,5	und	> 1		
<b>Sehr günstige Stadtstrukturen</b>	< 10%	und	> 0,5	und	> 3	und	> 1 ha

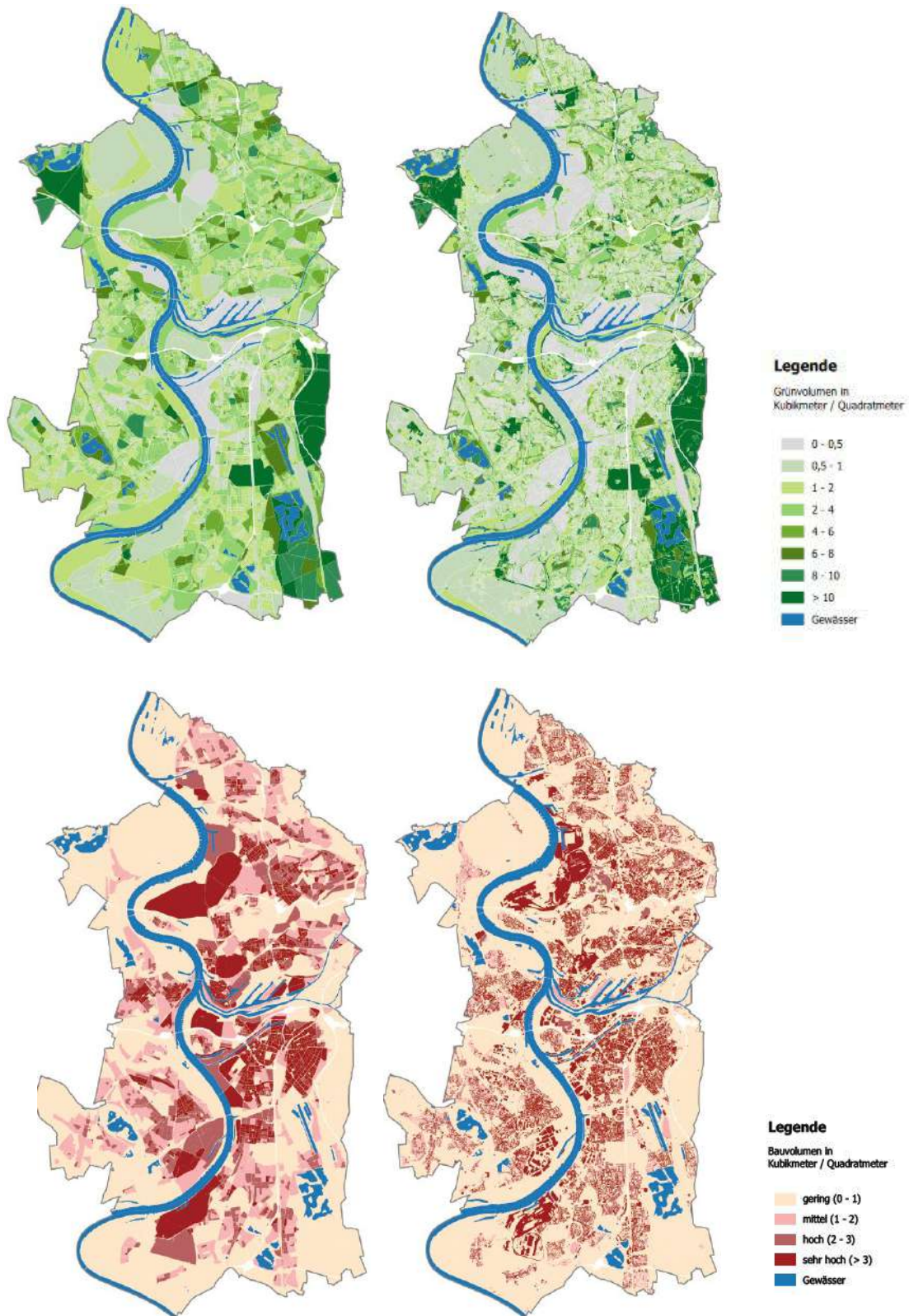


Abbildung 18: Kenngrößen der Stadt Duisburg. Oben: Grünvolumen; Unten: Bauvolumen; jeweils links: Ebene Baublock; jeweils rechts: Ebene der Flächennutzungstypen / Biototypen.

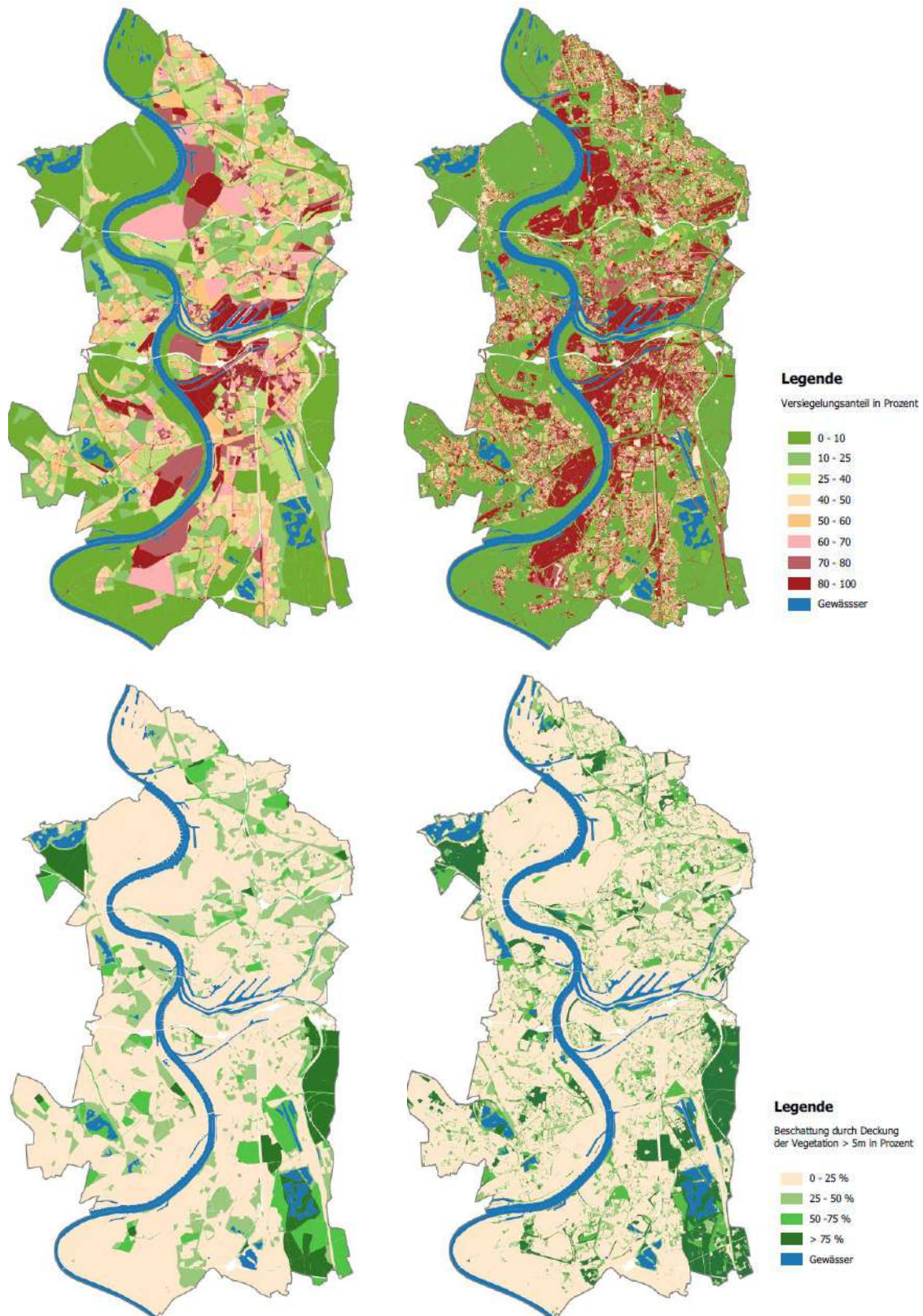


Abbildung 19: Kenngrößen der Stadt Duisburg. Oben: Gesamtversiegelungsgrad; Unten: Beschattungsgrad durch Bäume; jeweils links: Ebene Baublock; jeweils rechts: Ebene der Flächennutzungstypen / Biotoptypen.

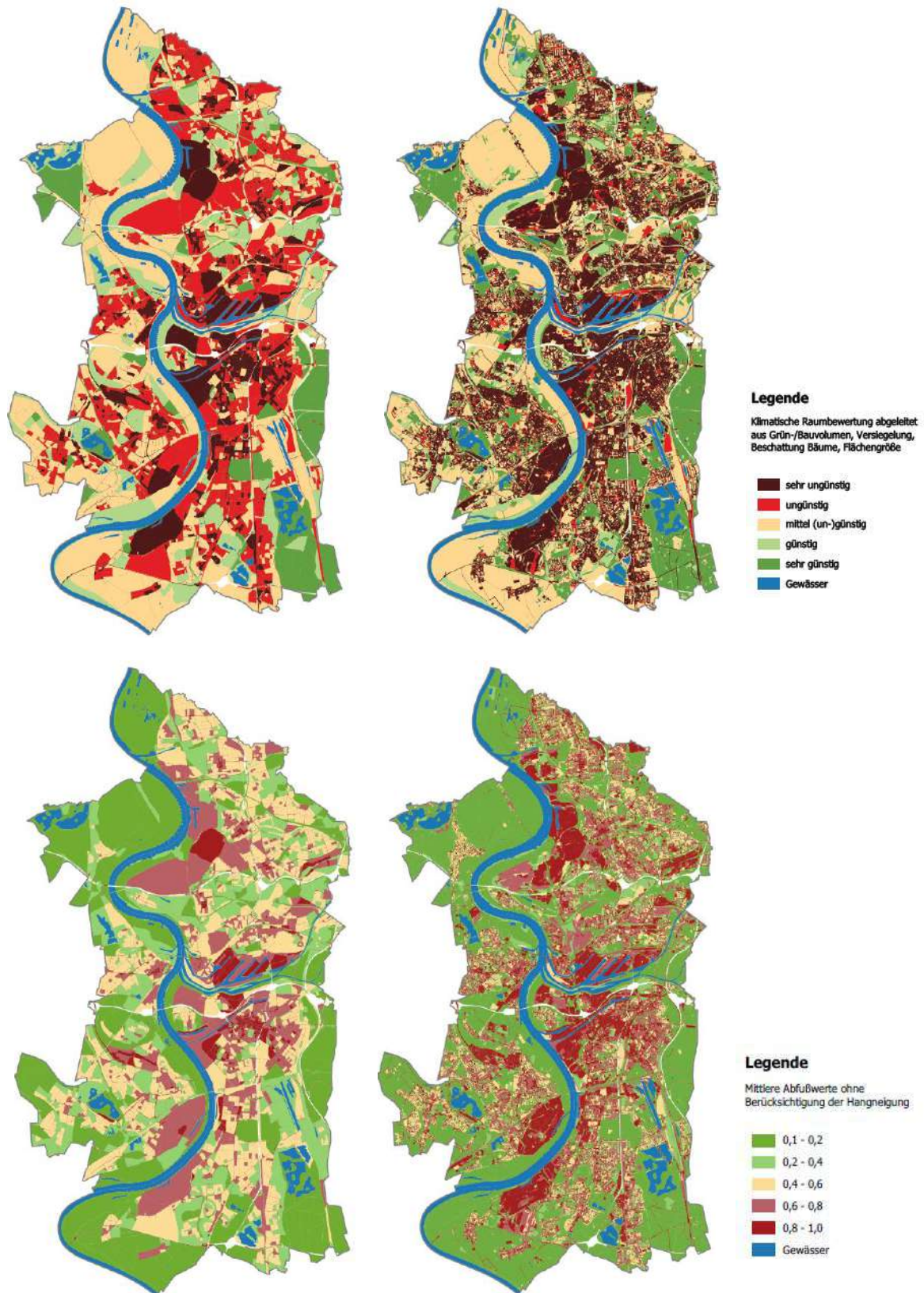


Abbildung 20: Bewertungseinheiten zum Stadtklima der Stadt Duisburg. Oben: Klimatische Ungunsträume; Unten: Abflussbeiwerte; jeweils links: Ebene Baublock; jeweils rechts: Ebene der Flächennutzungstypen / Biotoptypen.

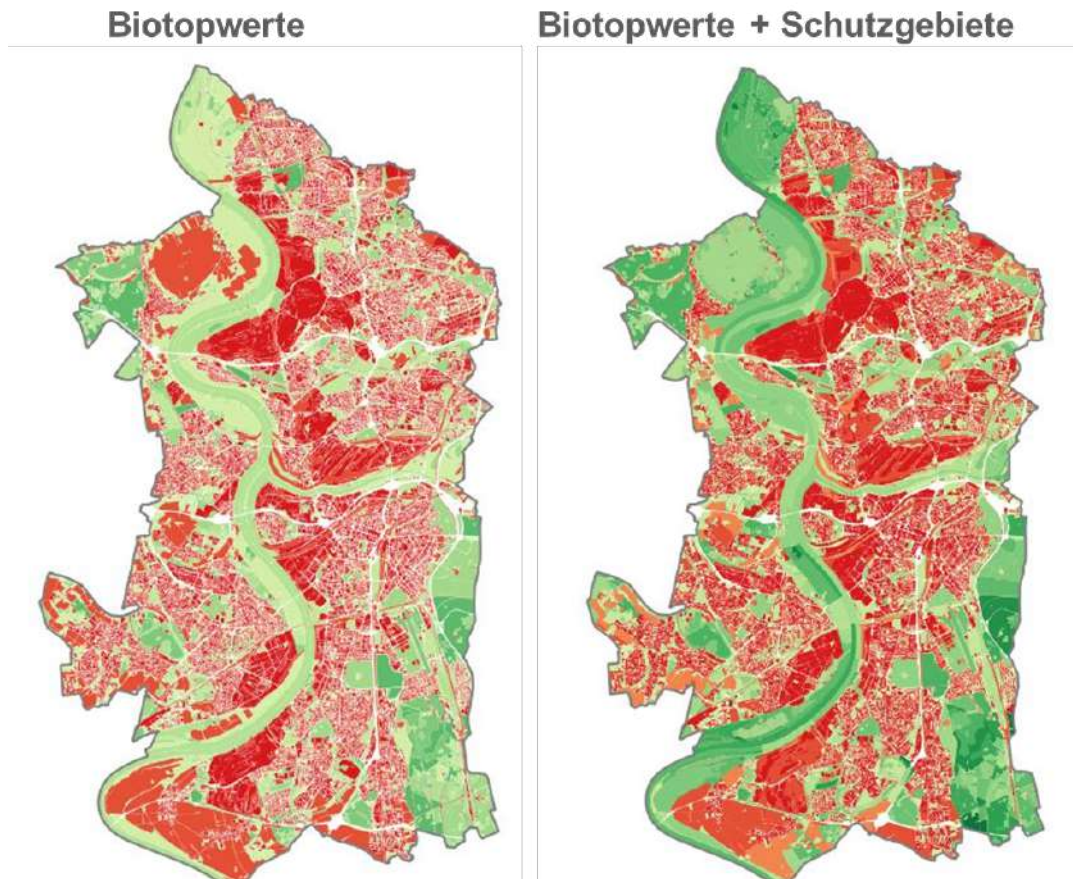


Abbildung 21: Bewertungseinheiten zur Biodiversität der Stadt Duisburg. Links: Bewertung der Stadtstrukturtypen nach dem Biotop-Werteverfahren der LANUV NRW, Rechts: Aufwertung der Biotope durch ihre Lage in Schutzgebieten.

### Vulnerabilitätsanalyse zum Thema Hitze

Auf der Grundlage der ermittelten stadtstrukturellen Kenngrößen (Abbildung 17, Abbildung 18) und den daraus abgeleiteten günstigen bzw. ungünstigen Stadtstrukturen (Abbildung 19) wurde eine Vulnerabilitätsanalyse zum Thema Hitze durchgeführt. Hierbei wurde angenommen, dass es sich bei den ungünstigen Stadtstrukturen um thermische Lastgebiete handelt. Entsprechend der Methodik von Vulnerabilitätsanalysen wurden die ermittelten Gunst-/Ungunsträume mit sensitiven Kriterien bezüglich Hitze (Bevölkerungsdichte, Anteil Personen > 65 Jahre, sensitive Einrichtungen) verschnitten und nach dem Maximum-Prinzip zusammengeführt. Das Ergebnis ist ein 7-stufiges Vulnerabilitätsrisiko bzgl. Hitze für die einzelnen Baublöcke auf der Mikroebene (Abbildung 23).

Als ein wesentliches allgemeines Problem wird angesehen, dass weder die Ausweisung von thermischen Lastgebieten noch die Kriterien zur Verwendung der sensitiven Strukturen definiert sind. Eine Vergleichbarkeit der Vulnerabilitätsanalysen verschiedener Städte ist somit bisher nicht gegeben. Die ausgewählten sensitiven Kriterien richten sich bei der eigenen Analyse nach dem Handbuch Stadtklima des MULNV NRW [72].

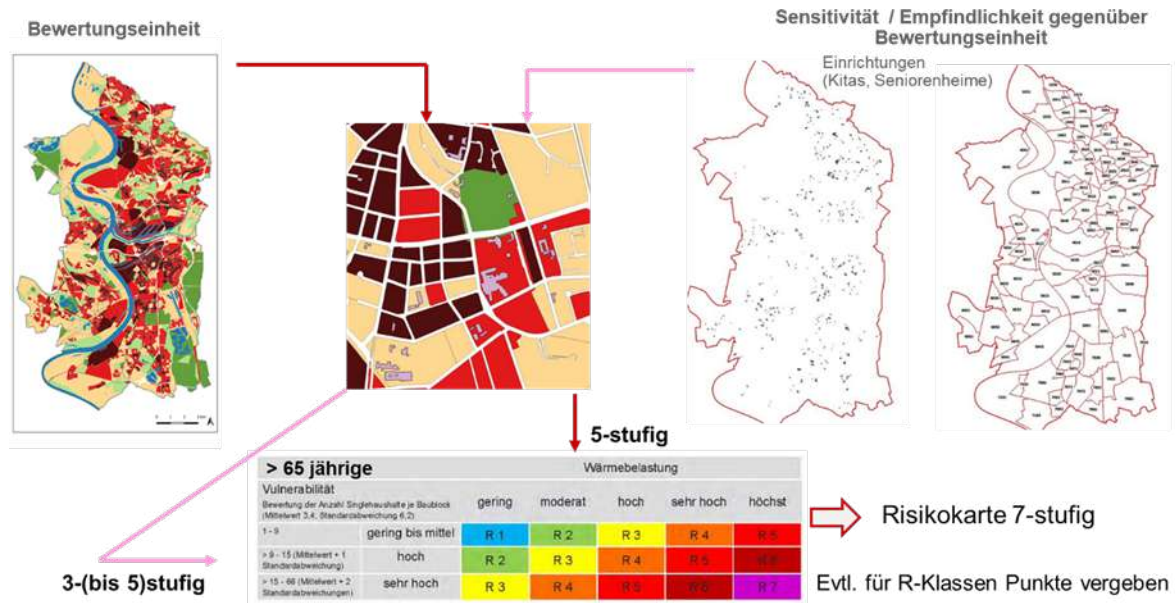


Abbildung 22: Schema der Vulnerabilitätsanalyse.

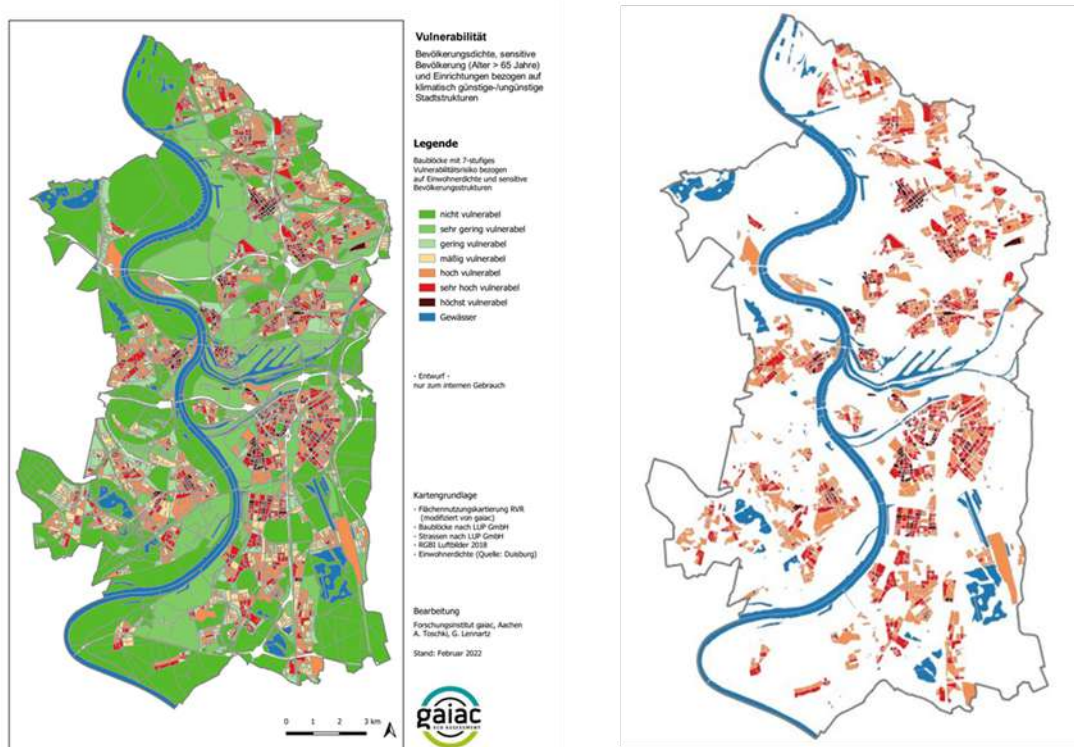


Abbildung 23: Vulnerabilität der einzelnen Baublöcke in Duisburg (rechts: 7-stufig, links: mäßig bis höchst vulnerable Baublöcke).

Die Ergebnisse entsprachen der Erwartungshaltung und wurden insgesamt als plausibel eingestuft. So finden sich die Problemgebiete vor allem in der Innenstadt und in den Stadtbezirken, wo in den einzelnen Baublöcken eine hohe Bevölkerungsdichte vorliegt und ein hoher Anteil an Menschen im Alter über 65 Jahre leben (u. a. Marxloh, Wanheimerort). Wesentlich ist zudem, dass die Standorte zahlreicher sensibler Einrichtungen (u. a. Kitas, Seniorenheime) in den Problemgebieten der Hitzebelastung liegen.

Die hier dargestellte Vulnerabilitätsanalyse wurde anschließend in das EUS eingebunden.

#### Vulnerabilitätsanalyse zum Thema Biodiversität

Zur Durchführung einer Vulnerabilitätsanalyse zum Thema Biodiversität galt es zuerst einmal eine Bewertungsgrundlage zu schaffen, auf deren Ergebnissen ein Vulnerabilitätsanalyse durchgeführt werden konnte. Die Klassifikation der Lebensräume und deren Bewertung wurde an das Biotop-Wertepunktverfahren (Ökopunkte) des LANUV NRW angelehnt [73]. Dieser Ansatz konnte grundsätzlich über die ermittelten stadtstrukturellen Kenngrößen umgesetzt werden, wobei bei einigen Typen plausible Annahmen hinterlegt werden mussten, z.B. hinsichtlich der konkreten Artenzusammensetzung, die aus den fernerkundlichen Daten nicht abgeleitet werden konnten (siehe Abb. 20). Neben der Klassifikation und Bewertung der Lebensraumtypen in Duisburg wurden zudem die Straßenbäume, deren Standort pro Baumart bekannt ist, nach Roloff [74] hinsichtlich ihrer Trockentoleranz und Winterhärte bewertet.

Der Hotspot der Biodiversität in Duisburg sind die Auen, die teilweise als Schutzgebiet (FFH-Gebiet) ausgewiesen sind. Die Wirkung des Klimawandels auf die Biodiversität der Auendlandschaft wurde mit dem LandS-Modell modelliert (siehe Auenmodellierung).

Während der Projektlaufzeit wurden demzufolge Grundlagen geschaffen, um eine Vulnerabilitätsanalyse zum Thema Biodiversität durchzuführen. Diese Grundlagen sind in der FuE-Phase II mit Veränderungen des Niederschlags sowie mit der Zunahme der Dauer von Trockenphasen zu korrelieren.

#### Vergleich der eigenen Analysen zum Thema Hitze mit Daten Dritter

Der Vergleich der fernerkundlichen Methodik von gaiac mit der Klimaanalyse Duisburg des RVR's (RVR 2022, Klimaanalyse Duisburg) ergab, dass es im Kern der Analysen größere Übereinstimmungen gibt, aber auch Abweichungen. Mittels der Methodik von gaiac wurden beispielsweise mehr Ungunsträume (thermische Lastgebiete) ausgewiesen, als durch die Klimaanalyse vom RVR, die mittels einer FITNAH-Modellierung erstellt wurde.

Des Weiteren wurden statistische Korrelationen zwischen stadtstrukturellen Kenngrößen und beispielsweise den vom RVR mittels FITNAH ermittelten nächtlichen Abkühlungsraten erstellt.



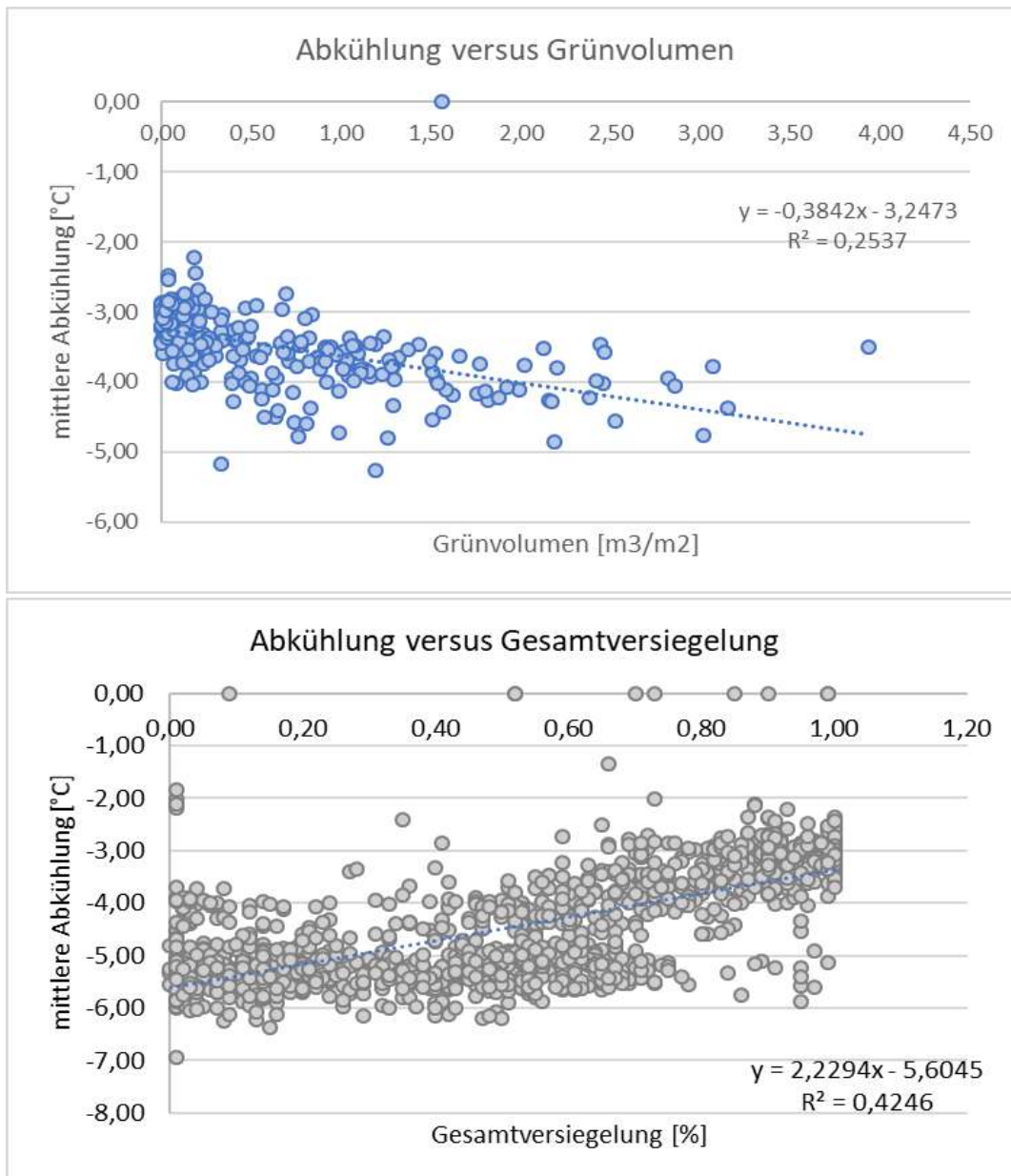


Abbildung 24: Korrelation zwischen den stadtstrukturellen Kenngrößen Grünvolumen (oben) und Gesamtversiegelungsgrad (unten) mit der nächtlichen Abkühlungsrate (FITNAH-Modellierung, RVR 2023).

Die untere Abbildung (Abbildung 24) zeigt, dass zu 100 % versiegelte Flächen im Mittel eine nächtliche Abkühlungsrate von rd.  $-3^{\circ}\text{C}$  aufweisen. Bei unversiegelten, grünen Flächen im Siedlungsgebiet kann die nächtliche Abkühlung bis zu  $-7^{\circ}\text{C}$  erreichen, im Mittel rd.  $-5,5^{\circ}\text{C}$ . Auffallend ist zudem, dass bei einer Gesamtversiegelung von größer 70 % die Streuung der Abkühlungsraten deutlich abnimmt. Daraus ist abzuleiten, dass Versiegelungsgrade von Flächen über 70 % relativ stark die nächtliche Überhitzung von Siedlungsgebieten fördern bzw. dass sich ein Grünanteil von mindestens 30 % positiv auf das Stadtklima auswirkt.

Die Korrelation zwischen Grünvolumen und Abkühlung ist deutlich geringer ( $r^2 = 0,25$ ) als zwischen der Gesamtversiegelung und der Abkühlungsrate ( $r^2 = 0,45$ ). Auch Flächen mit einem geringen Grünvolumen (u. a. Zierrasen oder Wiesen,  $< 1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) können günstige Abkühlungsraten aufweisen. Demzufolge sind auch kurzrasige Dachbegrünungen positiv zu werten, da

sie vor allem die nächtliche Überhitzung von Städten minimieren. Ein hohes Grünvolumen scheint vor allem dort sinnvoll zu sein, wo gleichzeitig ein hohes Bauvolumen (u. a. mehrstöckige Blockbebauung) vorliegt.

Die bislang ausgewerteten Daten verdeutlichen, dass es keine einfachen linearen Zusammenhänge zwischen der grünen Infrastruktur und dem Stadtklima gibt. Kurzrasige Flächen wie beispielsweise Dachbegrünungen oder Rasenflächen können sich positiv auf die nächtliche Überhitzung von Städten auswirken, sind jedoch tagsüber aufgrund mangelnder Beschattung durch Hitze geprägt. Andererseits spenden Bäume tagsüber Schatten, können aber die nächtliche Abkühlung bzw. Kaltluftleitbahnen behindern. Die Berücksichtigung dieser Zusammenhänge in der Bewertungsmethodik wird in FuE-Phase II vorgenommen.

#### Klimaanpassungsmaßnahmen auf Grundlage der stadtstrukturellen Analyse

Dieser Ansatz verfolgte das Ziel, die unterschiedlichen Stadtstrukturen (= Biotoptypen) hinsichtlich Stadtklima unter Berücksichtigung weiterer Parameter wie Biodiversität oder Abflussbeiwerte zu optimieren, ohne deren Flächennutzung einschneidend zu verändern. Um diesbezüglich erste Hinweise zu erhalten, wurden die unterschiedlichen Stadtstrukturtypen mit der nächtlichen Abkühlungsrate korreliert (nach [75], Klimaanalyse Duisburg, Tabelle 9).

*Tabelle 9: Beispielhafte Darstellung der nächtlichen Abkühlungsraten (siehe RVR 2023) ausgewählter Stadtstrukturtypen in Grad Celsius.*

Stadtstrukturtypen/Biotoptypen	Anzahl	Mittelwert	Min.	Max.	Differenz
<b>Hausgärten</b>	84	-5,25	-3,71	-6,24	2,53
<b>Hausnahe Grünanlagen</b>	51	-4,24	-3,67	-5,87	2,20
<b>Gewerbe, Lagerflächen</b>	101	-3,19	-2,16	-5,61	3,45
<b>Wohnhaus bis 5-stöckig</b>	43	-3,94	-3,35	-4,8	1,45

Diese Analyse lieferte zum einen Hinweise über die Stadtstrukturtypen, die keine bzw. nur eine sehr geringe nächtliche Abkühlung zeigen (u.a. stark versiegelte Gewerbeflächen, mehrstöckige Wohnblöcke) sowie deren mögliches Entwicklungspotential (siehe Tab. 9). Aus dem Vergleich von Flächen gleicher Nutzung mit einer geringen (Minimum) und einer guten (Maximum) Abkühlungsrate konnte grundsätzlich abgeleitet werden, wie die jeweiligen Stadtstrukturtypen bzgl. nächtlicher Überhitzung klimaoptimiert gestaltet werden könnten.

Dieser Ansatz ist unterstützend zu den Arbeiten von Siekmann, FIW und der Stadt Duisburg zu verstehen, die sich intensiv mit der Erarbeitung eines Maßnahmenkatalogs, mit der Integration der Anpassungsmaßnahmen in das EUS sowie mit der Entwicklung einer Bewertungsmethodik beschäftigen.

### 5.1.2.5 Verkehrsmodellierung

Die Analyse der Klimawirkungen auf das Verkehrsnetz der Stadt Duisburg wurde vom ZLV durchgeführt. Sie basierte auf einem bestehenden Verkehrsnachfragemodell der Stadt Duisburg, welches von der PTV Transport Consult GmbH und der PTV Planung Transport Verkehr AG erstellt wurde. Der Modellraum umfasste das gesamte Duisburger Stadtgebiet. Um alle relevanten Verkehrsströme im Planungsraum durch das Verkehrsmodell abbilden zu können, wurden die umliegenden Städte Mülheim an der Ruhr, Oberhausen, Dinslaken, Hünxe, Wesel, Rheinberg, Kamp-Lintfort, Neukirchen-Vluyn, Moers, Krefeld, die nördlichen Stadtgebiete von Düsseldorf und Ratingen (erweiterter Planungsraum) sowie die Verkehrsverflechtungen (Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehre) im Verkehrsmodell abgebildet, welche zwischen dem Planungsraum und den umliegenden Städten und Landkreise existieren (Außenraum).

Im Wesentlichen werden beim Verkehrsnachfragemodell der Personen- und der Wirtschaftsverkehr über separate Modelle erzeugt. Das Personenverkehrsmodell beschreibt alle Wege bzw. Fahrten an einem durchschnittlichen Werktag für folgende Verkehrsmodi: a) Fußgänger- und Radverkehr, b) ÖPNV sowie c) Kfz-Verkehr (inkl. Mitfahrer). Zum Güterverkehrsmodell zählen der Güterverkehr sowie der Personenwirtschaftsverkehr. Der Güterverkehr beschreibt alle Fahrten mit Lastwagen, Lieferwagen und Pkw mit dem Zweck der Beförderung von Gütern aller Art. Dagegen beschreibt der Personenwirtschaftsverkehr alle dienstlichen Fahrten mit dem Pkw. Das Güterverkehrsmodell bezieht sich ausschließlich auf das Fahrtaufkommen, d. h. die beförderten Gütermengen spielen für diesen Ansatz keine Rolle. Darüber hinaus stellen der Güterverkehr via Bahn und Binnenschiff sowie Binnenverkehrsfahrten von Nicht-Bewohner:innen (z. B. durch Hotelgäste und touristische Fahrten) keinen Bestandteil des Modells dar.

Das Verkehrsnachfragemodell wurde als aktivitätenkettenbasiertes Vierstufenmodell umgesetzt, d. h. die Berechnung der Verkehrserzeugung basiert auf Aktivitätsketten, welche eine chronologische Reihenfolge von verschiedenen Aktivitäten (z.B. Wohnen-Arbeit-Einkauf-Wohnen) darstellen, woraus sich Wegketten ableiten lassen. Die räumliche Verkehrsverteilung innerhalb einer Wegekette wird über die beiden Größen „Widerstand“ (Lagegunst eines Verkehrsbezirks) und das „Zielpotenzial eines Verkehrsbezirks“ bestimmt. Anschließend wird die erzeugte Verkehrsnachfrage auf die verschiedenen Verkehrsmittel verteilt und auf die Netze umgelegt. Die Verkehrsmittelwahl ist abhängig von der Attraktivität der Modi und der unterschiedlichen Erreichbarkeit der Ziele mit den einzelnen Verkehrsmitteln. Grundsätzlich wurde das Verkehrsmodell durch die Integration von Ganglinien (zeitliche Verteilung der Wegeaufkommen nach Wegezwecken) als 24-Stunden-Modell zur Berechnung des durchschnittlichen Verkehrs an einem Werktag ( $DTV_{w5}$ ) aufgebaut. Das Verkehrsnachfragemodell wurde in die Software PTV Visum implementiert, in welcher die Modellschritte Verkehrserzeugung, -verteilung, -mittelwahl und -umlegung unter Zuhilfenahme von integrierten Skripten durchgeführt werden.

Die Datenbasis des Verkehrsnachfragemodells setzt sich aus Daten des Verkehrsnetzes (z. B. Lage der Straßen und ihre Eigenschaften, Linien und Fahrpläne des öffentlichen Verkehrs), Raumstrukturdaten (z. B. Einwohnerzahlen, Altersstruktur, Pkw-Verfügbarkeit, Anzahl und Art von Arbeitsplätzen) sowie Verkehrsverhaltensdaten (Mobilitätsraten, Ganglinien, Verhaltensparameter) zusammen. Eine Haushaltsbefragung aus dem Jahr 2015 stellte die wesentliche Datengrundlage für das Verkehrsverhalten dar, weshalb das Bezugsjahr des Verkehrsmodells ebenfalls 2015 darstellt. Darüber hinaus wurde ein Prognoseszenario für das Jahr 2030 gebildet, welche auf einer Fortschreibung und Ergänzung von Strukturdaten sowie ausgewählten infrastrukturellen und städtebaulichen Maßnahmen basiert.

### Auswirkungen von Starkregen und fluvialem Hochwasser

Starkregen und fluviales Hochwasser können erhebliche Auswirkungen auf den Verkehr und dessen Infrastruktur haben. Direkte Folgen von Starkregen sind verschlechterte Sichtverhältnisse, Durchnässung bzw. Wasserzufluss von angrenzenden Flächen, Hochwasser bei benachbarten Fließgewässern sowie ein Wasserfilm auf der Fahrbahn, der durch die Kapazitätsüberschreitung der Entwässerung oder einen zu langsamen Abfluss von der Fahrbahn verursacht werden kann. Diese eintretenden Umstände können zu einer Vielzahl von Problemen führen. Dazu zählen Wasserstau in Senken (Troglagen, Tunnel, Fahrbahn-Tiefpunkte), Aquaplaning, Rutschungen, Schlammablagerung, Kurzschlüsse an elektrischer Ausstattung und Ausfall von verkehrsbeeinflussenden Anlagen sowie Überschwemmungen und Ausspülungen von Fundamenten oder Unterbauten. Die Effekte von Starkregenereignissen oder Hochwasser auf das Verkehrssystem können schließlich zu einer reduzierten Geschwindigkeit, Unfällen und Fahrzeugschäden sowie Staus und Sperrungen von Streckenabschnitten führen [76].

Zur Abbildung der beschriebenen Auswirkungen von Starkregen und Hochwasser auf das Verkehrssystem kann die Einstautiefe (Wasserhöhe in überfluteten Gebieten) als wesentlicher Faktor herangezogen werden. In Tabelle 10 sind die zu erwartenden Auswirkungen von Starkregen und Hochwasser auf das Verkehrssystem in Abhängigkeit der Einstautiefe dargestellt. Bei einer Einstautiefe von 1 cm wird auftretendes Aquaplaning als erster Schwellenwert festgelegt. Aquaplaning beschreibt den Haftverlust des Reifens zur Straße infolge einer Unterspülung. Entscheidend für Aquaplaning sind die Geschwindigkeit, Reifendrehzahl und Wasserfilmdicke. Die Wasserfilmdicke beschreibt den Abstand der Oberkante des Straßenbelags bis zur maximalen Einstautiefe. Da die Einstautiefe in direktem Bezug zum Straßennetz ermittelt wurde, kann im Folgenden vereinfacht mit der Einstautiefe als Wasserfilmdicke fortgeföhren werden [77]. Das Risiko für Aquaplaning ist abhängig von der Einstautiefe, der vorhandenen Profiltiefe (Mindestprofiltiefe: 1,6 mm nach §36 StVZO und 8 mm bei Neureifen) und der geföhrenen Geschwindigkeit. Für die Ermittlung der kritischen Wasserfilmdicke wurde vom Worst Case ausgegangen und eine Profiltiefe von 1,6 mm angesetzt. Für die in der Stadt geltende Geschwindigkeit (50 km/h nach §3 StVO) wird eine Wasserfilmdicke von 0,7 mm als kritische Wasserfilmdicke angenommen. Für die unterschiedlichen Fahrbahnbeläge werden mittlere

Rautiefen [mm] angegeben, die einen Einfluss auf das Aquaplaning-Verhalten haben. Der Einfluss der Fahrbahnbeläge und der Längs-/Querneigung der Straße wird aufgrund fehlender Daten nicht mit einbezogen.

Tabelle 10: Verkehrsrelevante Schwellenwerte bei stehendem Oberflächenwasser.

Einstautiefe	Effekt
≤ 1cm	Verringerung der Fahrgeschwindigkeit infolge reduzierter Sichtweite
≤ 3cm	Verringerung der Fahrgeschwindigkeit infolge reduzierter Sichtweite; erhöhte Unfallgefahr durch Aquaplaning
≤ 10cm	Verringerung der Fahrgeschwindigkeit infolge reduzierter Sichtweite; erhöhte Unfallgefahr durch Aquaplaning; verminderte Fahrgeschwindigkeit durch Verlust von Bezugspunkten
≤ 25cm	Starke Verringerung der Fahrgeschwindigkeit infolge reduzierter Sichtweite; erhöhte Unfallgefahr durch Aquaplaning; verminderte Fahrgeschwindigkeit durch Verlust von Bezugspunkten
> 25cm	Stark eingeschränkte Durchfahrt; hohes Risiko für Fahrzeugschäden bei Querung

Der zweite Schwellenwert wurde auf 3 cm festgelegt. Dies entspricht der vorgeschriebenen Bordhöhe für barrierefreie Querungsstellen für Fußgänger. Die Ausführung mit durchgehend abgesenkter Bordsteinkante wird in der Norm DIN 18040-3:2014-12 Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen – Teil 3: Öffentlicher Verkehrs- und Freiraum beschrieben [78]. Ab einer Einstautiefe von 3 cm wird der Bordstein überschwemmt, was zum Verlust eines Bezugspunktes führt. Ohne Bezugspunkte ist die visuelle Einordnung der Befahrbarkeit eingeschränkt. Der dritte Schwellenwert entspricht der vorgeschriebenen Bordhöhe bei anbaufreien Hauptverkehrsstraßen und wird aufgrund der Datenlage für das gesamte Stadtgebiet angenommen. Die Wattiefe gibt an, bis zu welcher Einstautiefe ein Fahrzeug mit langsamer Geschwindigkeit schadensfrei eine Strecke passieren kann. Die Wattiefe ist für jedes Fahrzeug individuell und ist von vielen Fahrzeugeigenschaften, wie der Lage der einzelnen Fahrzeugkomponenten im Chassis, abhängig. Laut dem ADAC ist das Passieren einer Wattiefe von 20-25 cm mit einer geringen Geschwindigkeit möglich. Größere Wattiefen sollten gemieden werden, um den Schutz des Fahrers und des Fahrzeuges zu gewährleisten [79]. Jedoch sinkt die Wattiefe bei fließendem Wasser mit einer Geschwindigkeit von über 3 m/s deutlich [80]. Dies ist jedoch für die Stadt Duisburg nicht der Fall, da die im Projekt ermittelten Starkregengefahrenkarten zeigen, dass die Fließgeschwindigkeit im Straßenraum zu keinem Zeitpunkt 3 m/s überschreitet.

Um die Effekte von Starkregen und fluvialem Hochwasser auf das Verkehrsnetz des Duisburger Stadtgebietes zu modellieren, erfolgte eine Verknüpfung mit den Ergebnissen der Starkregen- und Hochwassermodellierung. Demnach wurden bei Starkregen Niederschläge von 50 mm und 80 mm (jeweils dreistündige Beregnung des Stadtgebietes) und bei Hochwasser ein Ereignis mit einer statistischen Wiederkehrzeit von  $T = 100$  Jahre als Input für die

Verkehrsmodellierung verwendet, indem die Ergebnisse der Starkregen- und Hochwassermmodellierung als GIS-Karten mit der Verkehrsinfrastruktur und entsprechenden Verkehrsbelastungen überlagert wurden. In Tabelle 11 sind die angepassten Modellparameter für die Verkehrsmodellierung dargestellt. Zum einen wird die zulässige Geschwindigkeit auf den überfluteten Streckenabschnitten in Abhängigkeit der vorhandenen Einstautiefen reduziert. Zum anderen werden alle Streckenabschnitte mit einer Einstautiefen größer gleich 0,25 m für den Verkehr gesperrt. Zur Darstellung der Modellierungsergebnisse erfolgte ein Vergleich zwischen dem angepassten Modell sowie dem Standard-Modell, wodurch sich absolute und relative Veränderungen (z. B. Verkehrsbelastung, Verlustzeit) für die jeweiligen Klimawirkungen im Vergleich zum Ausgangszustand zeigen lassen.

Tabelle 11: Modellierte Effekte bei Starkregen und Hochwasser.

<b>Starkregen und Hochwasser</b>				
<b>Schwellenwert der Einstautiefe</b>	<b>Art der Verlagerung</b>			<b>Modellierter Effekt</b>
	Modal	Zeitlich	Räumlich	
<b>&lt;0,01m</b>				Keine
<b>&lt;0,03m</b>			x	Reduktion der Geschwindigkeit
<b>&lt;0,10m</b>			x	Reduktion der Geschwindigkeit
<b>&lt;0,25m</b>			x	Reduktion der Geschwindigkeit
<b>&gt;0,25m</b>		x	x	Streckensperrung
<b>Während des Regens</b>		x	x	Reduktion der Geschwindigkeit

### Auswirkungen von Hitze

Hitze nimmt Einfluss auf den Menschen, die Maschinen und die vorhandene Infrastruktur. So können hitzebedingte Schäden an der Schienen- und Straßeninfrastrukturen, Brücken sowie Fahrzeugen, ein erhöhter Instandhaltungsaufwand, gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen sowie ein erhöhter Logistikaufwand die Folge von hohen Temperaturen sein. Im Folgenden werden die verkehrsbeeinflussenden Faktoren beschrieben, die eine Relevanz für die Verkehrsmodellierung haben. Anschließend wurden aus den dargestellten Faktoren die Veränderungen der Modellparameter abgeleitet, um die Effekte von extremer Hitze auf den Verkehr modellieren zu können.

Extremhitze wirkt als Belastung für den verbauten Oberbau. Der Straßenbelag kann als Teil des Oberbaus in seiner Widerstandsfähigkeit überbeansprucht werden, insbesondere, wenn

eine Hitzeperiode länger anhält. Hohe Temperaturen führen zu Dehnungen, wodurch sich innere Spannungen ergeben [22]. Diese Spannungen können u.a. zu Rissen und Schäden an Fugen und Anschlussmaterialien und somit zu Unebenheiten in der Fahrbahn führen. Kommt es nach einer erhöhten thermischen Belastung zu einer rapiden Abkühlung, wie z. B. durch ein Gewitter, sind plastische Verformungen, sowie Blow-Ups [81] und Risse häufig das Resultat [82]. Speziell bei Fahrbahnbelägen aus Asphalt können hohe Temperaturen den Asphalt erweichen, was bei zusätzlicher Belastung durch Achsübergänge zu Spurrillenbildung oder unter Last in seltenen Fällen zur Asphalterschmelze führen kann [83, 84]. Darüber hinaus kann es zu einer thermischen Alterung des Asphalts kommen [82], der den Asphalt poröser, rissiger und weniger stabil werden lässt.

Thermische Schäden an Brücken können durch extreme Temperaturen und Temperaturwechsel auftreten [81]. Gerade bei einer nicht homogenen Infrastruktur wie einer Brückenkonstruktion, divergiert der Wärmeleitkoeffizient und die verbauten Komponenten dehnen sich in unterschiedlichem Maße aus. Folgeschäden sind z. B. Defekte an Dehnungsfugen, Lagerschäden, oder das Beulen von Brücken [82, 22]. Neben direkten Schäden durch innere Spannungen sinkt die Bemessungslast der Brücke. Zur Vermeidung von Folgeschäden muss die Geschwindigkeit und oder die einwirkende Last (hier durch den Verkehr) reduziert werden, um die Stabilität zu gewährleisten [15, 22].

Nicht nur die Infrastruktur, sondern auch die Leistungsfähigkeit und Sicherheit von Fahrzeugen kann durch Hitze eingeschränkt werden [85]. Speziell Fahrzeugreifen können von Hitze beeinflusst werden. So können sich Fahrzeugreifen bei hohen Temperaturen ausdehnen und der Reifeninnendruck kann sich verändern. Dies führt zu einer schnelleren Abnutzung bis hin zum Platzen der Reifen. Zudem kann Hitze auch die Dauerhaftigkeit des Motors einschränken. Durch anhaltende intensive Wärme bauen sich Schmierstoffe im Motor leichter ab, oder verflüchtigen sich. Darüber hinaus stellt das steigende Innenraumklima in den Fahrzeugen, vornehmlich im Bereich der Personenbeförderung, ein akutes Problem dar.

Extreme Hitze kann zu Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führen. Typische Symptome sind Kopfschmerzen, Erschöpfung, Benommenheit, Regulationsstörungen oder Kreislaufprobleme. Speziell ältere Menschen, Kinder und Personen mit chronischen Vorerkrankungen sind von diesen Symptomen besonders betroffen [86]. Diese gesundheitlichen Belastungen infolge von Hitze kann die Verkehrssicherheit sowie Leistungsfähigkeit von Personal beeinträchtigen. Kommt es zu einer verlängerten Hitzeexposition, so sinkt die Konzentrationsfähigkeit und das Unfallrisiko erhöht sich [83, 22, 86]. Eine eingeschränkte Leistungsfähigkeit tritt in den meisten Berufsfeldern bei 24,8°C auf, bzw. 22°C bei schweren Tätigkeiten ein. Beschränkungen in der Arbeitstätigkeit beginnen in der Regel bei 29,5°C (85°F). Eine Hitzeerschöpfung ist ab 40,5°C (105°F) möglich [84, 87]. Laut Arbeitsstättenverordnung (ArbStättVO) ist der Arbeitgeber dazu verpflichtet für eine angepasstes Arbeitsumfeld (Ausnahme Homeoffice) zu sorgen. Ab einer Lufttemperatur von 26°C ist der Arbeitgeber aufgefordert

Maßnahmen zu ergreifen. Ab 30°C folgt der Aufforderung eine Umsetzungspflicht. Ab einer Raumtemperatur von 35°C ist das Arbeiten nicht mehr möglich [88]. Eine gängige Maßnahme zur Minderung der Auswirkungen von Hitze, ist die Verlegung der Arbeitszeit in die kühleren Morgen- oder Abendstunden, bzw. eine Veränderung der Nachfrageganglinie.

Hitze kann in verschiedener Hinsicht die Logistik beeinflussen. Neben den größeren Faktoren wie Mensch, Transportmittel und Infrastruktur, spielt die mögliche Veränderung der Nachfrage eine Rolle [89]. Zudem steigt die Belastung von temperaturgeführten Gütern [15].

Auf Basis der Literaturrecherche wurden generelle Schwellenwerte für verschiedene Temperaturbereiche gebildet (siehe Tabelle 12), um die Effekte von Hitze auf das Verkehrssystem abzubilden. Die abgebildeten Effekte schließen Schäden an der Verkehrsinfrastruktur, Veränderung des Mobilitätsverhaltens sowie die gesundheitliche Belastung und Reduzierung der Leistungsfähigkeit mit ein.

Tabelle 12: Verkehrsrelevante Schwellenwerte bei Hitze.

Temperatur	Effekt
<29,5°C	Abnahme der Leistungsfähigkeit ab 24°C; Aufforderungen für Hitzeschutzmaßnahmen für Arbeitnehmer ab 26°C;
>29,5°C	Einschränkung von Bauarbeiten aufgrund Arbeitsschutzes
>32,0°C	Kriechen und Erweichen von Asphalt, Bildung von Spurrillen
>35,0°C	Arbeitsschutzrechtliche Grenze für das Erbringen von Arbeit
>40,5°C	Hitzeerschöpfung
>43,0°C	Gleisverformungen, Erhöhte Gefahr von Geräteausfällen

### Methodik

Um die Effekte von Hitze auf das Verkehrsnetz des Duisburger Stadtgebietes zu modellieren, wurde verschiedene Parameter des Verkehrsmodells angepasst (siehe Tabelle 13). Zunächst wurde das Verkehrsnetz mit den im Projekt identifizierten thermischen Gunst- und Ungunsträumen überlagert, um streckenspezifische Temperaturen abbilden zu können. In Abhängigkeit der streckenspezifischen Temperaturen wurden die Geschwindigkeiten reduziert und Streckenabschnitte gesperrt, um so eine reduzierte Konzentrationsfähigkeit sowie hitzebedingte Streckenschäden im Modell abbilden zu können. Um die hitzebedingten Veränderungen des Mobilitätsverhaltens sowie der Güterverflechtungen im Modell darstellen zu können, wurden die Nachfrageganglinien entsprechend angepasst. Die Darstellung der Modellierungsergebnisse erfolgt analog zum Vorgehen wie bei der Starkregenmodellierung. Demnach erfolgte ein Vergleich zwischen dem Modell mit den angepassten Parametern sowie dem Standard-Modell, wodurch sich absolute und relative Veränderungen (z. B. Verkehrsbelastung, Verlustzeit) für die jeweiligen Klimawirkungen im Vergleich zum Ausgangszustand zeigen lassen.



Tabelle 13: Modellierte Effekte bei Hitze.

Hitze				
Schwellenwert der Temperatur	Art der Verlagerung			Modellierter Effekt
	Modal	Zeitlich	Räumlich	
<29,5°C		x		Keine
>29,5°C		x		Reduktion der Geschwindigkeit, Anpassung der Nachfrageganglinie
>32,0°C		x	x	Reduktion der Geschwindigkeit, Anpassung der Nachfrageganglinie
>40,5°C	x	x	x	Reduktion der Geschwindigkeit, Anpassung der Nachfrageganglinie
>43,0°C	x	x	x	Reduktion der Geschwindigkeit, Anpassung der Nachfrageganglinie, Streckensperrung

### Niedrigwasser

Niedrigwasser kann zu einer Einschränkung der Schiffbarkeit von Wasserstraßen führen. Dies kann zu einer zusätzlichen Belastung des Straßenverkehrs in Duisburg führen, wenn sich ausgefallene Güterverkehre der Binnenschifffahrt auf die Straße verlagern. Um diese Mehrbelastung der Straße zu modellieren, werden die bei Niedrigwasser ausbleibenden Importe, die mit dem Binnenschiff transportiert werden, durch den Lkw-Verkehr ersetzt. Es werden ausschließlich die Verkehre mit dem Binnenschiff berücksichtigt, die das Endziel Duisburg aufweisen. Da Transporte mit dem Binnenschiff häufig multimodal gestaltet sind, kann der Duisburger Hafen jedoch nicht nur als Ziel, sondern auch als Zwischenziel fungieren kann. Deshalb wird zunächst die prozentuale Gütermenge betrachtet, die tatsächlich Duisburg als Ziel hat (siehe Abbildung 25). Zur Analyse der Güterverkehre, welche mit dem Binnenschiff nach Duisburg transportiert werden, wurde die Güterverkehrsmatrix der Verflechtungsprognose 2030 des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur herangezogen. Die Güterverkehrsmatrix bildet alle Verflechtungen des Güterverkehrs innerhalb Deutschlands auf Kreisebene sowie mit dem Ausland ab und unterscheidet darüber hinaus zwischen den genutzten Verkehrsträgern und den transportierten Güterarten [90]. Es zeigt sich, dass im Jahr 2030 ausgehend von allen Quellverkehren insgesamt 49,9 Mio. Tonnen Güter per Binnenschiff nach Duisburg transportiert werden. Mit 96,3 % hat der Großteil der Güterverkehre ihr Endziel in Duisburg. Lediglich 1,8 Mio. Tonnen (3,7 %) werden in Duisburg umgeschlagen und in andere Verkehrsbezirke außerhalb von Duisburg weitertransportiert. Auf Basis der Analyse wird für die Modellierung der Verkehrsverlagerung angenommen, dass 96,3 % der substituierenden Lkw-

Verkehre Duisburg als Ziel haben. Des Weiteren wird im Rahmen der Modellierung des Niedrigwasserereignis und dessen Folgen auf das Straßenverkehrsnetz der Extremfall abgebildet, d. h. es findet infolge von Niedrigwasser kein Binnenschiffsverkehr mehr statt und alle Binnenschiffsverkehre mit dem Ziel Duisburg werden auf die Straße verlagert.

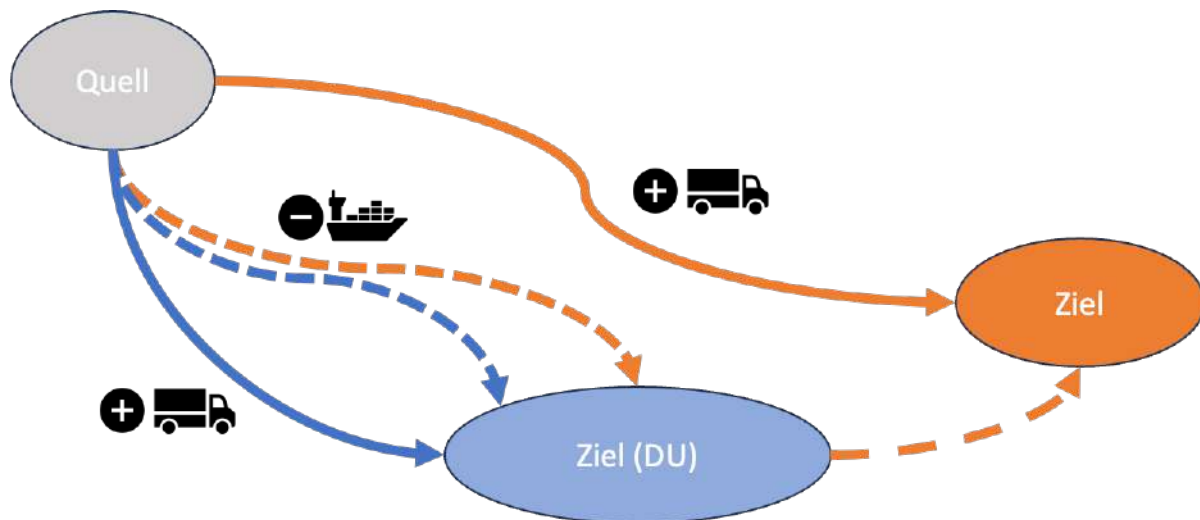


Abbildung 25: Verlagerung der Verkehrsträger bei Niedrigwasser.

Die Notwendigkeit des Bezugs von Waren wird vorausgesetzt. Die verlagernden NST07 Abteilungen B1 (Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft sowie der Fischerei), B5 (Kokerei- und Mineralölzeugnisse) und B6 (Chemische Erzeugnisse, Mineralerzeugnisse) weisen im Durchschnitt Lager für Rohstoff- und Vormaterialbeständen von 1,68 Wochen bis 3,17 Wochen auf [91]. Aufgrund der Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die Transportkosten ist eine größere Abnahmemenge vorteilhaft. Für die Berechnung der Mehrmengen wird angenommen, dass die Gütermenge von einer Woche mit fünf Werktagen verlagert wird. Die resultierende Mehrbelastung wird zum  $DTV_{SV}$  im Modell addiert. Errechnet wird die Nachfrage aus Veränderungen des Modal Splits, Abdeckung der Entfernungsbereiche und einer durchschnittlichen Transporteinheit, je nach NST-07 Abteilung. Betrachtet wird der Zeitraum August bis Oktober. In Verbindung mit der Wachstumsrate der täglichen Änderungsrate der transportierten Gütermengen, geliefert durch die ökonomische Vulnerabilitätsanalyse, wurde die genaue Anzahl an benötigten Lkw bestimmt. Die Nachfrageganglinie wurde nicht verändert. Die resultierende Mehrbelastung ist in Tabelle 14 dargestellt, welche auf die Bezirke 240-245 und 250 (siehe Abbildung 26) aufgeteilt wurde. Für die Verteilung der Mehrbelastung ist der bestehende Schwerverkehrs-Zielanteil maßgebend. Die Darstellung der Modellierungsergebnisse erfolgte analog zu dem Vorgehen wie bei den anderen Klimasignalen. Demnach erfolgt ein Vergleich zwischen dem Modell mit den angepassten Parametern sowie dem Standard-Modell, wodurch sich absolute und relative Veränderungen (z. B. Verkehrsbelastung, Verlustzeit) für das Niedrigwasserszenario im Vergleich zum Ausgangszustand zeigen lassen.

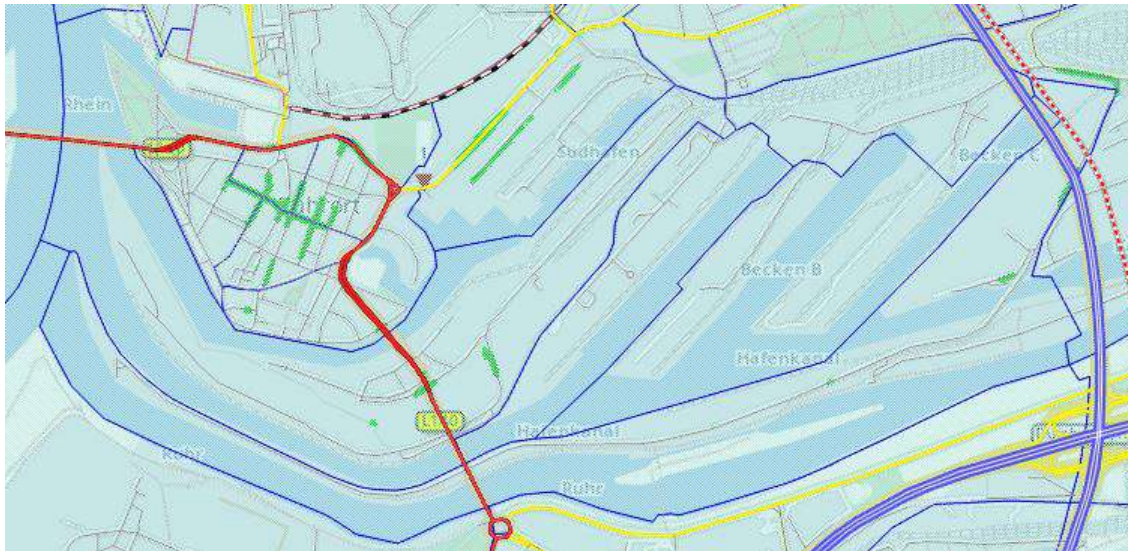


Abbildung 26: Darstellung der Hafenbezirke.

Tabelle 14: Verkehrsnachfrage der Hafenbezirke.

#Bezirk	Stadtteil - Beschreibung	Nachfrage ohne Niedrigwasser in Lkw/d	Nachfrage bei Niedrigwasser in Lkw/d
240	Ruhrort - Stahlinsel, Speditionsinsel	201,71	325,42
241	Ruhrort - Ölinsel/TanQuid	11,54	18,63
242	Ruhrort - Kohle-/Schrotinsel	0	0
243	Ruhrort - Pontwert	33,34	53,79
244	Ruhrort - Mühlenweide	32,46	52,53
245	Ruhrort - Werfthafen	559,19	966,68
250	Ruhrort - Stahlinsel	59,26	95,60

Modellierungsergebnisse: Starkregen und direkte Folgen von Hochwasser

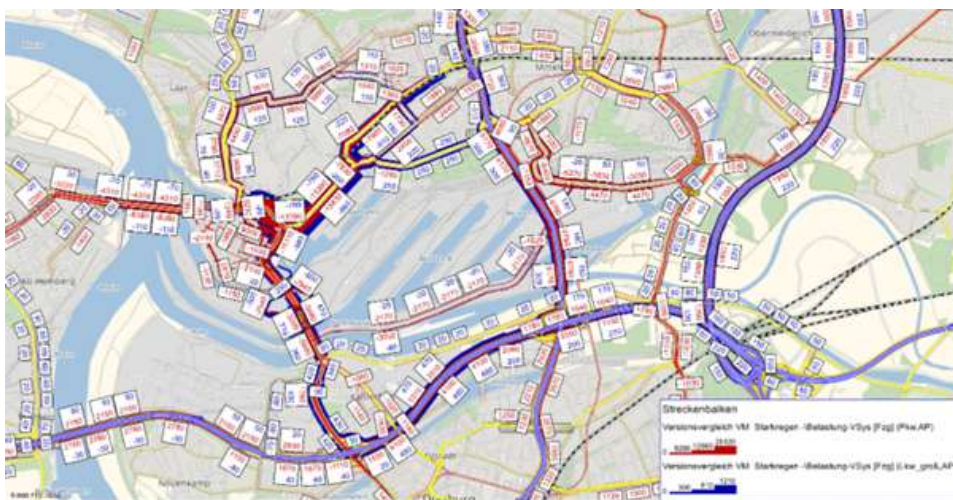


Abbildung 27: Belastung gemäß Verkehrssimulation bei Starkregen.



Abbildung 28: Belastung gemäß Verkehrssimulation bei Hochwasser.

Starkregen und direkte Folgen von Hochwasser haben einen starken Einfluss auf das Verkehrssystem und die Logistik. Die Auswirkungen sind hierbei von einer hohen Intensität, aber oftmals von kurzer Dauer. Die Verkehrssicherheit und der Verkehrsablauf sind während des Ereignisses und später durch nicht abfließendes Oberflächenwasser beeinflusst. Der Receptor Mensch ist bei diesem Klimasignal außen vor. Für Starkregen und Hochwasser sind vier Schwellenwerte für die jeweiligen Einstautiefen ermittelt worden. Diese beziehen sich auf die Aspekte der Verkehrssicherheit und die technischen Möglichkeiten der Fahrzeuge. Neben Aquaplaning ist das Passieren von Straßenabschnitten ohne Bezugspunkte für die visuelle Einordnung der Befahrbarkeit eingeschränkt. Ab einer Einstautiefe von 25 cm ist die Wattiefe der meisten Pkw erreicht und höhere Wasserstände können zu Schäden am Fahrzeug führen. Obgleich Lkw meist eine höhere Wattiefe als Pkw aufweisen, ist hier der Pkw für die Logistik der limitierende Faktor. Die Expositionsanalyse zeigt, dass viele wichtige Verbindungsstraßen von Starkregen stark betroffen sind. Eine Umfahrung von Abschnitten mit einer Einstautiefe von >25 cm ist daher dringend ratsam. Eine frühzeitige Sperrung bekannter Risikostellen kann hier Abhilfe schaffen. Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass durch Starkregen und Hochwasser Teile des Hafens, Becken B und C, nicht erreichbar sind. Durch das Sperren der wichtigen Verbindungsstraße „Am Nordhafen“, nördlich des Hafens infolge Starkregen verlagert sich der Pkw- und Lkw-Verkehr auf Alternativrouten. Eine Starke Mehrbelastung (Bis zu > 6000 Pkw/d und > 300 Lkw/d mehr) der Autobahnen A3, A40 und A59 ist zu erwarten, sowohl durch Pkw als auch durch den Lkw. Die Mehrbelastung auf den ohnehin kapazitätsausgereizten Autobahnen wird unvermeidlich zu einem Verkehrskollaps führen. Ebenso betroffen wird die „Westender Straße“ sein, die eine erhebliche Mehrbelastung (> 2.000 Pkw/d mehr) durch den Pkw-Verkehr widerfährt. Durch Hochwasser wird eine wichtige Verbindungsstraße, die „Sympherstraße“ überflutet. Muss diese gesperrt werden, so resultiert dies in einer Mehrbelastung (> 1000 Pkw/d und > 90 Lkw/d) der A59. Ein Teil der Lkw (> 100 Lkw/d) wird über die A40 und den Ruhrdeich umgeleitet. Der Hochwasserschutz in Duisburg ist weitestgehend ausgebaut. Durch die zunehmende Abundanz an Hochwasserereignissen wird hier dennoch

ein Handlungsbedarf für den Bereich des Erhalts der Straßenverfügbarkeit aufgezeigt. Insgesamt kommt es durch eine eingeschränkte Straßenverfügbarkeit zu extremen Leistungseinbußen im Gesamtnetz. Signifikant erhöhte Verlustzeiten und Reisezeiten geht mit einer erhöhten Belastung einher. Infolge nicht abfließendem Oberflächenwasser wird das Verkehrsnetz stark beeinflusst.

### Modellierungsergebnis: Hitze

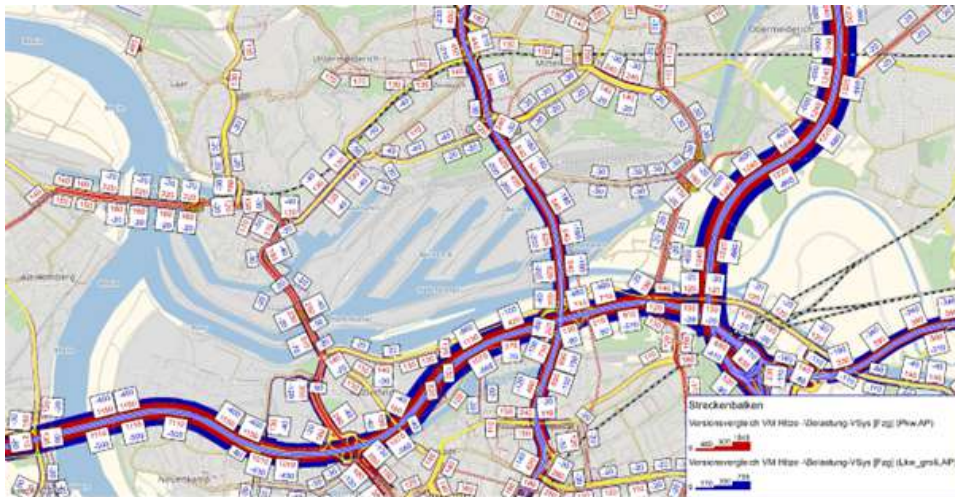


Abbildung 29: Belastung gemäß Verkehrssimulation bei Hitze.

Die Analyse der aktuellen Forschung zeigt, dass Hitze einen Einfluss auf das Verkehrssystem hat. Hitze hat Auswirkungen auf die vorhandene Infrastruktur, wie Straßenbeläge, Schienen und Brücken, auf den Verkehrsträger Straße selbst, den Menschen und den Logistikaufwand. Die Expositionsanalyse, die für das Duisburger Stadtgebiet durchgeführt wurde, zeigt, dass aktuell keiner der verkehrlich relevanten Straßenabschnitte in einem kritischen Bereich liegen. Langfristige Effekte, die nicht ausschließlich von der Temperatur abhängen, sind in der Expositionsanalyse nicht betrachtet. Das Alter des Straßenbelags und der Druck durch die passierenden Fahrzeuge kann Folgen, die ab 32°C eintreten, auch früher eintreten lassen. Neben Straßenbelägen sind auch Tragwerkskonstruktionen wie Brücken und Schleusen betroffen, die durch Hitze eine erhöhte Belastung widerfahren. In hitzesensiblen Bereichen mit hohem Straßenalter und einer hohen Anzahl an 10t-Achsübergängen (oder auch generell Schwerverkehrsanteil) wird dringend dazu geraten, Alternativrouten auszuweisen, bzw. die Straßen zumindest zu einem Teil der Sonnenstunden für den Schwerverkehr zu sperren. Die Modellierung enthält den Transportrückgang, der in der Unternehmensbefragung ermittelt wurde und das veränderte Mobilitätsverhalten der Menschen. Der Effekt, der durch die Veränderung der Nachfrageganglinie auftritt, bleibt bei der Betrachtung eines ganzen Werktages aus. Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass sich der Verkehr infolge Hitze nur wenig verändert. Wichtig zu betrachten ist, dass in der Modellierung nur direkte Folgen von Hitze abgebildet werden. Streckensperrungen durch Infrastrukturschäden sind nicht inkludiert. Die Belastung des Schwerverkehrs sinkt auf allen betrachteten Strecken, währenddessen die Belastung durch

den Pkw zunimmt. Hitze hat einen moderaten, dennoch negativen direkten Einfluss auf das Verkehrssystem und die Logistik. Kommt es infolge extremer Hitze, bzw. extremen Temperaturwechseln zu Infrastrukturschäden, so haben diese einen vehementen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtnetzes.

### Modellierungsergebnisse: Niedrigwasser und Folgen von Hochwasser



Abbildung 30: Belastung gemäß Verkehrssimulation bei Niedrigwasser.

Niedrigwasser und indirekte Folgen von Hochwasser führen zu einer Einschränkung der Schiffbarkeit und haben damit einen vehementen Einfluss auf die Wertschöpfungskette. Für den Untersuchungsraum Duisburg ist die Wirkung von Niedrigwasser auf die Einschränkung der Schiffbarkeit von höherer Relevanz als Hochwasser. Es wird von indirekten Folgen gesprochen, da in der vorliegenden Verkehrsmodellierung primär der Verkehrsträger Straße betrachtet wurde und die Effekte von Hochwasser vielmehr aus modalen Verlagerungen oder ausbleibenden Transporten resultieren. Beispiele aus der Vergangenheit, wie das extreme Niedrigwasser 2018 am Rhein, zeigen eindrücklich, welchen Effekt Niedrigwasser haben kann. In der Modellierung wird angenommen, dass 5 d Niedrigwasser in den tatsächlich verlagerten NST-Klassen über den Lkw substituiert werden. Dies entspricht einer Anzahl von 599 Lkw/d. Die Mehrbelastung (ca. 200 Lkw/d) wird hauptsächlich über die A40 und A59 verlagert. Zusätzlich wird ein Teil aus dem Norden (>2 00 Lkw/d) über die A59, Abfahrt DU-Ruhrort und anschließend über die Straße „Am Nordhafen“ geführt. Diese Mehrbelastung wird unweigerlich das vorhandene überlastete Verkehrssystem weiter auslasten und es wird zu Staus und Verkehrsverzögerungen, sowie einer Erhöhung der Verlust- und Reisezeit kommen. Niedrigwasser hat einen sehr starken Einfluss auf die Wertschöpfungskette und die damit verbundenen vor- und nachgelagerten Transporte.

## 5.2 Integration von Klimaszenarien

Im Gegensatz zum Wetter, welches den momentanen physikalischen Zustand der Atmosphäre an einem Ort beschreibt, bezeichnet Klima den statistisch mittleren Zustand der Atmosphäre über einen längerfristigen Zeitraum (üblicherweise 30 Jahre als Normalperiode) [92]. Über Klimaprojektionen wird das zukünftige Klima über lange Zeiträume bis hin zu mehr als 100 Jahren mit numerischen Modellsimulationen berechnet, basierend auf festgelegten Randbedingungen [93]. Diese komplexen Klimamodelle beschreiben sowohl Prozesse und Interaktionen des Klimasystems, als auch anthropogene Einflüsse wie sozio-ökonomische, technologische, demographische und ökologische Entwicklungen [94]. Da zukünftige Entwicklungen nicht vorhersagbar sind, werden vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) verschiedene potentielle (Emissions-)Szenarien entwickelt. Ein Szenario ist eine Beschreibung oder Narrativ, wie die politische, wirtschaftliche und ökologische Lage und / oder Entwicklung einer zukünftigen Gesellschaft sich entwickeln könnte. Diese Annahmen werden anhand von Triebkräften, wie Demografie, wirtschaftliche Prozesse, technologische Innovation usw. getroffen. Diese Szenarien dienen als Hauptannahmen für Klimaprojektionen und liefern die Basis zur Berechnung von Treibhausgasemissionen oder -konzentrationen und somit für die Basis für die Randbedingungen der Modellsimulationen ([94], [95]). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Klimaszenarien keine Vorhersagen sind und daher auch nicht anhand von Wahrscheinlichkeiten evaluiert werden. Sie legen stattdessen dar, was das Resultat bestimmter Entscheidungen sein kann und entsprechen somit Wenn-Dann-Beziehungen. [96]

Als Klimamodelle werden sogenannte globale Klimamodelle bzw. allgemeine Zirkulationsmodelle (General Circulation Models, GCM) eingesetzt, der betrachtete Zeitraum reicht aktuell meist bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Die Auflösung solcher globalen Modelle ist für Aussagen zum regionalen Klima jedoch zu gering, deshalb werden sie für einzelne Regionen mittels Regionalisierungsverfahren auf höhere räumliche Auflösungen gebracht (Downscaling). Dazu können dynamische regionale Klimamodelle (RCM) oder statistische Methoden eingesetzt werden, deren Antriebsdaten aus den GCMs stammen. [97] Da numerische Modelle die realen Bedingungen nicht exakt abbilden können, werden Unsicherheiten erfasst und durch den Vergleich mit Observationen und mehreren Modellsimulationen minimiert [95]. Ein solcher Satz von parallelen Simulationen mit unterschiedlichen Klimamodellen oder eines Klimamodells mit geringen Variationen im Modellaufbau wird als Ensemble bezeichnet [94].

Als Grundlage für die Sachstandsberichte (Assessment Reports, AR) des IPCC wurden verschiedene Emissionsszenarien zum Antrieb von Klimamodellen entwickelt: die SRES (Special Report on Emissions Scenarios, [98], AR3 und AR4), die RCP (Representative Concentrations Pathways, [96], AR5) und die SSP (Shared Socio-economic Pathways, [99], AR6) Szenarien. Ein aktuell weit verbreitetes Szenario ist das RCP8.5 Szenario, in welchem eine intensiverte Nutzung fossiler Brennstoffe und ein hohes Bevölkerungswachstum angenommen wird. Vom Umweltbundesamt (UBA) wurde das RCP8.5 Szenario als Grundlage für die „Klimawirkungs-

und Risikoanalyse 2021 für Deutschland“ verwendet, aus „Vorsorgegründen, um eine ausreichende Dimensionierung möglicher Anpassungsmaßnahmen sicherzustellen“ ([42] S. 22). Dieses Szenario enthält einen zusätzlichen Strahlungsantrieb von  $8.5 \text{ W/m}^2$  und einen Temperaturanstieg zwischen  $3,3^\circ\text{C}$  und  $5,4^\circ\text{C}$  (5-95 Perzentil) bis zum Ende des Jahrhunderts [100]. Im Gegensatz zu den RCP-Szenarien legen die neueren SSP-Szenarien einen größeren Wert auf Demografie- und Wohlstandsentwicklungen und Armut, um Aussagen über die Anfälligkeit der Gesellschaft gegenüber dem Klimawandel machen zu können (s. Abbildung 31) ([101], [102]). Die SSPX-Y Szenarien bestehen aus zwei Hauptelementen, einem qualitativen Element X, welches narrative Handlungsstränge wiedergibt und einem quantitativen Element Y, das die Entwicklung in einer räumlich aggregierten oder aufgelösten Skala wiedergibt [97]. Das Element X beschreibt mögliche alternative Trends in der sozioökonomischen Entwicklung über den Zeitraum eines Jahrhunderts in Abwesenheit des Klimawandels oder einer Klimapolitik. Das Element Y repräsentiert den ungefähren Strahlungsantrieb, der bis 2100 erreicht wird, dieser liegt zwischen  $1,9$  bis  $8.5 \text{ W/m}^2$ . Beispielsweise stellt SSP5-8.5 ein Szenario dar, in welchem keine weiteren Klimaschutzmaßnahmen getroffen werden und ein Strahlungsantrieb von  $8,5 \text{ W/m}^2$  am Ende des Jahrhunderts erreicht wird. Das Szenario unterscheidet sich insofern vom RCP8.5, als das sich die  $\text{CO}_2$  Emissionen bis 2050 im Vergleich zu den aktuellen etwa verdoppeln,  $\text{CH}_4$ -Emission abnehmen und höhere Temperaturen erreicht werden. ([97], [103]) Das SSP3-7.0 stellt dagegen ein mittleres bis hohes Referenzszenario dar, in diesem Szenario erstarkt der Nationalismus und Klimaschutzmaßnahmen haben eine niedrige Priorität in der internationalen Politik. Der hohe Rohstoff- und Energiebedarf wird hauptsächlich mit fossilen Energieträgern gedeckt. Das Szenario hat die höchsten  $\text{CH}_4$ - und  $\text{NO}_x$ -Emissionen sowie ähnliche  $\text{CO}_2$ -Emissionen wie das RCP8.5-Szenario. [103]

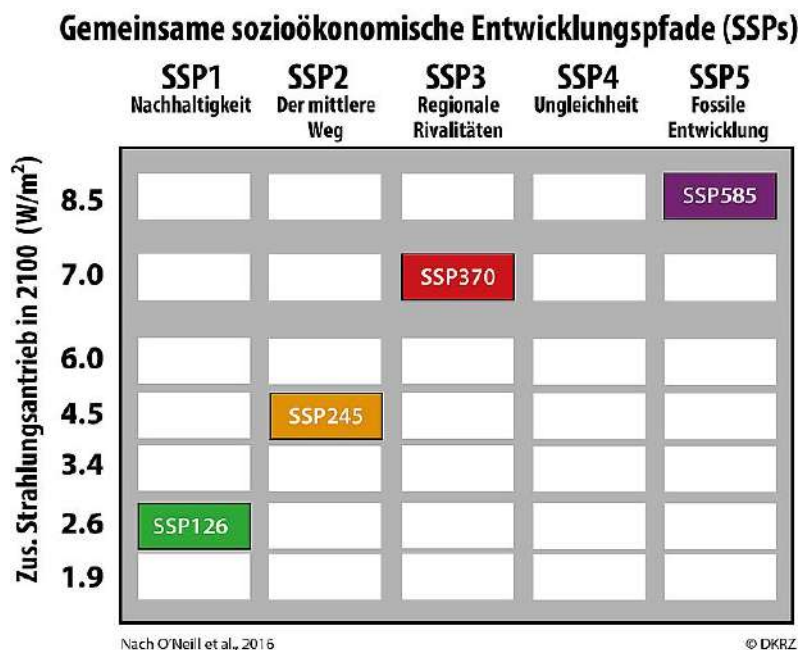


Abbildung 31: Die SSP-Szenarien (© DKRZ nach [101]).



Das Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) koordiniert weltweit die Klimamodellierung der verschiedenen Klimaszenarien im Rahmen des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP). Wie in Kapitel 4 bereits erläutert, hat das Konsortium gemeinsam mit den anderen Modellregionen und den Querschnittsaktivitäten WIRKSAM und NUKLEUS der ReglKlim-Förderrichtlinie entschieden, zur Betrachtung einer möglichen klimatischen Entwicklung der Mikro- und Makroebene das SSP3-7.0 Szenario zu verwenden.

Da das Downscaling der CMIP6-Globalmodellsimulationen für dieses Szenario während der FuE-Phase I noch nicht abgeschlossen war, wurde hierfür stattdessen das RCP8.5-Szenario verwendet. Von der Querschnittsaktivität NUKLEUS wurden über die Freva-Plattform bias-korrigierte Daten mit einer Auflösung von ca. 12 km zur Verfügung gestellt. Diese Daten basieren auf den CMIP5-Globalmodellsimulationen und wurden im Rahmen der EURO-CORDEX-Initiative, dem europäischen Ableger der internationalen Initiative CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) des WCRP regionalisiert. Von NUKLEUS wurde als Grundlage ein Ensemble von GCM-RCM-Kombinationen empfohlen (s. [104]), welches „das Deutsche Klima besonders gut repräsentiert. [...] [Es] reflektiert die beste Einschätzung der Unsicherheit und Genauigkeit für den gegebenen Maßstab der CORDEX-Simulationen (etwa 11 km) und des Bereichs (Zentraleuropa)“ ([104], aus dem Englischen).

## 5.2.1 Makroebene

### 5.2.1.1 Hydrologische Modellierung

Aufgrund der noch nicht vollendeten Kalibrierung des NASIM-Modells wird der direkte Vergleich des Status Quo mit einem Zukunftsszenario erst in der FuE-Phase II durchgeführt. Testweise wurden über Freva bereitgestellte Zeitreihen für das RCP8.5-Szenario in das NASIM Modell eingespielt. Als Testdaten wurde auf Tageswerte/-summen von Niederschlag und Temperatur für jedes der 133 Teileinzugsgebiete zurückgegriffen (Klimamodelldaten: RCP85\_cnrm-cerfacs-cnrm-cm5-dmi-hirham5-v2, GCM: CNRM-CM5, RCM: DMI-HIRAM5). Zur Nutzung innerhalb des NASIM-Modells erfolgte zunächst eine Umrechnung der Einheiten (für NASIM: in mm/d und °C) sowie eine Konvertierung in das softwareinterne Zeitreihenformat für alle Datensätze.

Um den Betrieb der nachgeschalteten Modelle zu ermöglichen, wurden für die FuE-Phase I Abflussprognosen der BfG verwendet. Von der BfG wurden Wasserhaushaltssimulationen für verschiedene Klimaszenarien mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME durchgeführt, wodurch unter anderem Abflüsse an großen Fließgewässern wie dem Rhein generiert wurden [105]. Die Daten werden über den DAS-Basisdienst von der BfG bereitgestellt [106]. Die zugrundeliegenden Klimadaten für die Modellierungen stammen aus dem DWD-Referenz-Ensemble von GCM-RCM-Modellketten ([107], [108]), die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) aufbereitet wurden ([107], [109]). Anhand verschiedener Bewertungskriterien hat die BfG das

DWD-Referenz-Ensemble weiter reduziert auf ein BfG-Ensemble mit insgesamt 16 Klimasimulationen für RCP8.5 [107]. Eine Übersicht über das Ensemble der Abflusssimulationen der BfG und die zugrundeliegenden Klimamodelle ist in Tabelle 15 gegeben. Der Aufbau der Namen der Modellkombinationen wie folgt: Emissionsszenario\_Globalmodell\_Regionalmodell\_hydrologisches Modell.

Tabelle 15: Modellkombinationen des BfG-Ensembles für RCP8.5.

Name Modellkombination	GCM	RCM
RCP85_CANESM2_r1_REMO_BC-EXP_LSM-ME	CCCMA-CanESM2 Lauf 1	REMO
RCP85_ECEARTH_r12_CCLM_BC-EXP_LSM-ME	ICHEC-EC-Earth Lauf 12	CCLM 4-8-17
RCP85_ECEARTH_r1_RACMO_BC-EXP_LSM-ME	ICHEC-EC-Earth Lauf 1	KNMI-RACMO22E
RCP85_ECEARTH_r12_RACMO_BC-EXP_LSM-ME	ICHEC-EC-Earth Lauf 12	KNMI-RACMO22E
RCP85_ECEARTH_r12_REMO_BC-EXP_LSM-ME	ICHEC-EC-Earth Lauf 12	REMO
RCP85_ECEARTH_r12_RCA_BC-EXP_LSM-ME	ICHEC-EC-Earth Lauf 12	SMHI-RCA4
RCP85_HADGEM2_r1_RACMO_BC-EXP_LSM-ME	MOHC-HadGEM2-ES Lauf 1	KNMI-RACMO22E
RCP85_HADGEM2_r1_REMO_BC-EXP_LSM-ME	MOHC-HadGEM2-ES Lauf 1	REMO
RCP85_HADGEM2_r1_RCA_BC-EXP_LSM-ME	MOHC-HadGEM2-ES Lauf 1	SMHI-RCA4
RCP85_IPSL_r1_RCA_BC-EXP_LSM-ME	IPSL-IPSL-CM5A-MR Lauf 1	SMHI-RCA4
RCP85_MIROC5_r1_CCLM_BC-EXP_LSM-ME	MIROC-MIROC5 Lauf 1	CCLM 4-8-17

RCP85_MIROC5_r1_REMO_BC- EXP_LSM-ME	MIROC-MIROC5 Lauf 1	REMO
RCP85_MPIESM_r1_CCLM_BC- EXP_LSM-ME	MPI-M-MPI-ESM-LR Lauf 1	CCLM 4-8-17
RCP85_MPIESM_r1_REMO_BC- EXP_LSM-ME	MPI-M-MPI-ESM-LR Lauf 1	REMO
RCP85_MPIESM_r2_REMO_BC- EXP_LSM-ME	MPI-M-MPI-ESM-LR Lauf 2	REMO
RCP85_MPIESM_r1_RCA_BC- EXP_LSM-ME	MPI-M-MPI-ESM-LR Lauf 1	SMHI-RCA4

Die Ermittlung der Rheinpegelstände für die Abflussprognosen erfolgte analog zum Status Quo durch das FiW.

### 5.2.1.2 Ökonomische Vulnerabilitätsanalyse

Die Modellierung der ökonomischen Effekte der Niedrigwasserphasen kann aufgrund der Limitationen der Input-Output-Logik nicht für den gesamten Modellzeitraum erfolgen, sondern immer nur für ein einzelnes Jahr. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, eine begründete Annahme zur Auswahl des Szenariokorridors zu treffen, um die Bandbreite der möglichen Ergebnisse (bedingt durch die Unsicherheiten und geänderten Randbedingungen in der Klimamodellierung) angemessen wiederzugeben. Diese Auswahl muss auch daher getroffen werden, da eine vollständige Modellierung der Effekte aller Ensemblemitglieder und Jahre die verfügbare Rechenleistung und -zeit übersteigen würde.

Die auf den Daten der BfG (siehe vorheriges Kapitel) bereitgestellten Pegelstände für den Zeitraum bis 2100 durch das FiW ermittelten tagesscharfen Pegelstände je Ensemblemitglied wurden anschließend, um repräsentative Ensemblemitglieder und deren Einzeljahre auswählen zu können, ausgewertet. Hierzu wurde die Anzahl der Tage, an denen der kritische Wert von 80 cm am Pegel Kaub pro Jahr unterschritten wurde, ermittelt, und anschließend ein Wertebereich inklusive Median und Durchschnitt für das Ensemblemitglied gebildet.

Tabelle 16: Kennzahlen der Ensemblemitglieder zur Modellierung der Niedrigwasserphasen. Die Spalte „Wertebereich“ gibt den minimalen und maximalen Wert an Niedrigwassertagen pro Jahr aus, die in der Ensemblemitglied-modellierung auftraten.

Nr.	Modellkombination	Wertebereich	Median	Durchschnitt
1	RCP85_CANESM2_r1_REMO_BC-EXP_LSM-ME	0-231	34	46,2
2	RCP85_ECEARTH_r12_CCLM_BC-EXP_LSM-ME	0-247	31,5	43,0
3	RCP85_ECEARTH_r1_RACMO_BC-EXP_LSM-ME	0-181	29,5	45,9
4	RCP85_ECEARTH_r12_RACMO_BC-EXP_LSM-ME	0-211	16,5	38,8
5	RCP85_ECEARTH_r12_REMO_BC-EXP_LSM-ME	0-218	36	50,1
6	RCP85_ECEARTH_r12_RCA_BC-EXP_LSM-ME	0-267	44	65,4
7	RCP85_HADGEM2_r1_RACMO_BC-EXP_LSM-ME	0-203	28,5	42,8
8	RCP85_HADGEM2_r1_REMO_BC-EXP_LSM-ME	0-255	40	50,1
9	RCP85_HADGEM2_r1_RCA_BC-EXP_LSM-ME	0-339	52,5	64,4
10	RCP85_IPSL_r1_RCA_BC-EXP_LSM-ME	0-173	29	39,7
11	RCP85_MIROC5_r1_CCLM_BC-EXP_LSM-ME	0-198	42	49,0
12	RCP85_MIROC5_r1_REMO_BC-EXP_LSM-ME	0-198	30	41,7
13	RCP85_MPIESM_r1_CCLM_BC-EXP_LSM-ME	0-181	18	32,5
14	RCP85_MPIESM_r1_REMO_BC-EXP_LSM-ME	0-188	24,5	32,4
15	RCP85_MPIESM_r2_REMO_BC-EXP_LSM-ME	0-224	18	32,2
16	RCP85_MPIESM_r1_RCA_BC-EXP_LSM-ME	0-171	24	35,7

Aus diesem Grund wurde in einem ersten Schritt für jedes einzelne Ensemblemitglied untersucht, wie sich innerhalb des Ensemblemitglieds ein moderates Niedrigwasserjahr (als Median der Jahresdaten von 2030 bis 2099) und ein extremes Niedrigwasserjahr (als 90-Perzentil der Jahresdaten von 2030 bis 2099) abbilden, und welche konkreten Jahresscheiben diese Kennwerten am genauesten widerspiegeln. In einem zweiten Schritt wurden dann die vorher ausgewählten Kenndaten-Jahre der Ensemblemitglieder untereinander verglichen, um die Ensemblemitglieder mit der jeweils größten und kleinsten Anzahl an Niedrigwassertagen im Median und 90-Perzentil zu identifizieren. Somit wurden insgesamt vier Jahre als statistische Repräsentanten aus verschiedenen Ensemblemitgliedern für die Modellierung ausgewählt, die den „Möglichkeitskorridor“ des starken Klimawandelszenarios abbilden und gleichzeitig statistische Ausreißer nivellieren.

Tabelle 17: Auswahl der repräsentativen Jahre aus den Ensemblemitgliedern für die Modellierung. In fett gedruckt sind die Ensembles und deren Jahre, die für die Modellierung herangezogen wurden.

Nr.	Modellkombination	Anzahl Tage moderates Niedrigwasserjahr	Jahr	Anzahl Tage extremes Niedrigwasserjahr	Jahr
1	RCP85_CANESM2_r1_REMO_BC-EXP_LSM-ME	44	2053	123	2098
2	RCP85_ECEARTH_r12_CCLM_BC-EXP_LSM-ME	40	2070	112	2060
3	RCP85_ECEARTH_r1_RACMO_BC-EXP_LSM-ME	40	2036	144	2067
4	<b>RCP85_ECEARTH_r12_RACMO_BC-EXP_LSM-ME</b>	<b>15</b>	<b>2036</b>	126	2076
5	RCP85_ECEARTH_r12_REMO_BC-EXP_LSM-ME	40	2068	143	2075
6	<b>RCP85_ECEARTH_r12_RCA_BC-EXP_LSM-ME</b>	63	2085	<b>191</b>	<b>2067</b>
7	RCP85_HADGEM2_r1_RACMO_BC-EXP_LSM-ME	40	2086	120	2090
8	RCP85_HADGEM2_r1_REMO_BC-EXP_LSM-ME	52	2082	121	2091
9	<b>RCP85_HADGEM2_r1_RCA_BC-EXP_LSM-ME</b>	<b>74</b>	<b>2065</b>	178	2096
10	RCP85_IPSL_r1_RCA_BC-EXP_LSM-ME	42	2041	108	2072
11	RCP85_MIROC5_r1_CCLM_BC-EXP_LSM-ME	51	2059	122	2085
12	RCP85_MIROC5_r1_REMO_BC-EXP_LSM-ME	32	2053	108	2067
13	RCP85_MPIESM_r1_CCLM_BC-EXP_LSM-ME	29	2075	90	2036
14	<b>RCP85_MPIESM_r1_REMO_BC-EXP_LSM-ME</b>	29	2033	<b>78</b>	<b>2042</b>
15	RCP85_MPIESM_r2_REMO_BC-EXP_LSM-ME	19	2033	90	2085
16	RCP85_MPIESM_r1_RCA_BC-EXP_LSM-ME	21	2035	90	2082

Auch wenn das RCP 8.5-Szenario im Grundsatz einen ungebremst fortschreitenden Klimawandel beschreibt, so zeigen sich doch u.a. durch die der Tabelle 17 entnehmbaren Unterschiede in den Ensemblemitgliedern stark differierende Ausprägungen eines möglichen Niedrigwasserjahrs. Durch den kontrafaktischen Ansatz (ohne dynamisierte Fortschreibung der Wirtschaftsaktivitäten bis Ende des Jahrhunderts) ist es möglich, die ausgewählten Einzeljahre miteinander zu vergleichen.

### Modellergebnisse der ökonomischen Vulnerabilität für die Regionen Duisburg und Ludwigshafen-Mannheim

Für die Region Duisburg lassen sich so in einem moderaten Niedrigwasserereignis Transportverluste via Binnenschiff von ca. 460.000 t und nachgelagerte Produktionswertverluste von ca. 15 Mio. € erkennen. Den absolut größten Anteil an diesen Verlusten macht dabei die in Duisburg traditionell sehr starke Metallerzeugung und –bearbeitung mit ca. -8,5 Mio. € aus, aber auch die Kokerei und Mineralölverarbeitung ist für einen großen Teil der Rückgänge verantwortlich, wobei in dieser Branche die relativen Rückgänge am größten sind und bis zu -0,5% betragen. Weitere betroffene Branchen sind die Ernährungswirtschaft sowie die Ver- und Entsorgung und die Logistik selbst (Abbildung 32). Insgesamt würden in einem moderaten Szenario nur wenige Arbeitsplätze wegfallen.

Die Betroffenheit der Branchen verstärkt sich in einem extremen Niedrigwasserszenario noch: Hier ergeben sich, basierend auf einem Transportrückgang von 1,7 Mio. t gesamte Produktionswertverluste von ca. 50 Mio. €, von denen die Metallerzeugung und –bearbeitung für ca. 30 Mio. € verantwortlich ist. Die ebenfalls stark betroffene Kokerei könnte hier bis zu 1,7 % ihrer jährlichen Produktion einbüßen, was ca. 8 Mio. € entspräche. Insgesamt könnten somit bis zu 120 Arbeitsplätze verloren gehen.

Es zeigt sich aber auch, dass von den 27 betrachteten Branchen selbst in einem extremen Szenario 20 einen Produktionswertverlust von unter 1 Mio. € zu verzeichnen haben, was in ökonomischen Kenngrößen betrachtet nur eine marginale Betroffenheit bedeutet.

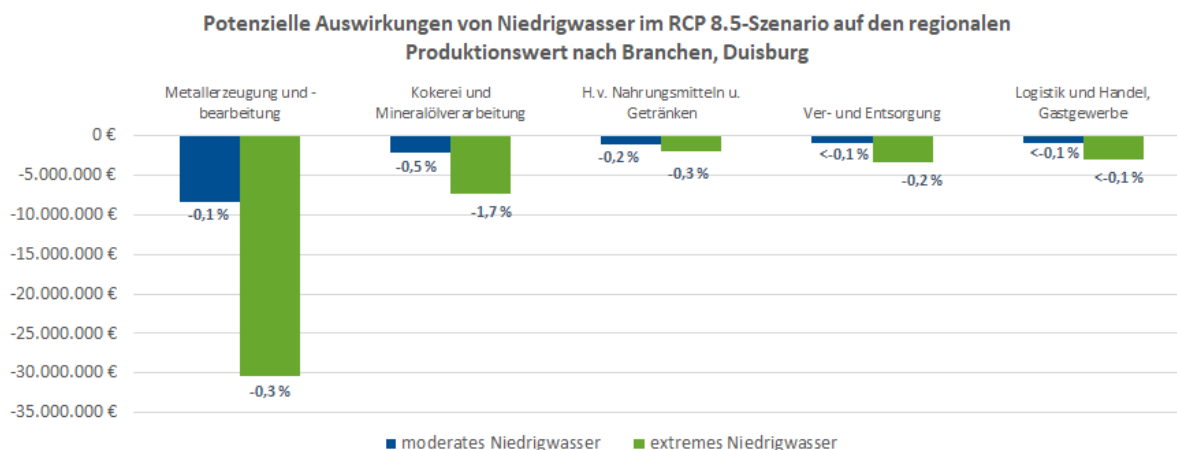


Abbildung 32: Potenzielle Auswirkungen von Niedrigwasser im RCP 8.5-Szenario auf den regionalen Produktionswert in Duisburg.

Ein gänzlich anderes Bild bietet die Region Mannheim-Ludwigshafen. Diese stellt die am stärksten betroffene aller 15 untersuchten Regionen dar. Bereits im moderaten Szenario zeigt sich ein Produktionswertverlust von 310 Mio. € und damit ungefähr der zwanzigfache Wert der Duisburger Verluste, der ausgelöst wird durch einen Transportrückgang um ca. 710.000 t. Maßgeblichen Anteil hat hier die in der Region extrem stark vertretene Chemiebranche, die ca. 1 % ihrer Produktion einbüßen würde. Auch in Mannheim-Ludwigshafen zeigt sich eine überdurchschnittliche Betroffenheit der Kokerei- und Mineralölbranche. Bereits im moderaten Szenario könnten hier 2,7 % der Produktion verlorengehen, und in der Gesamtwirtschaft ca. 500 Arbeitsplätze wegfallen.

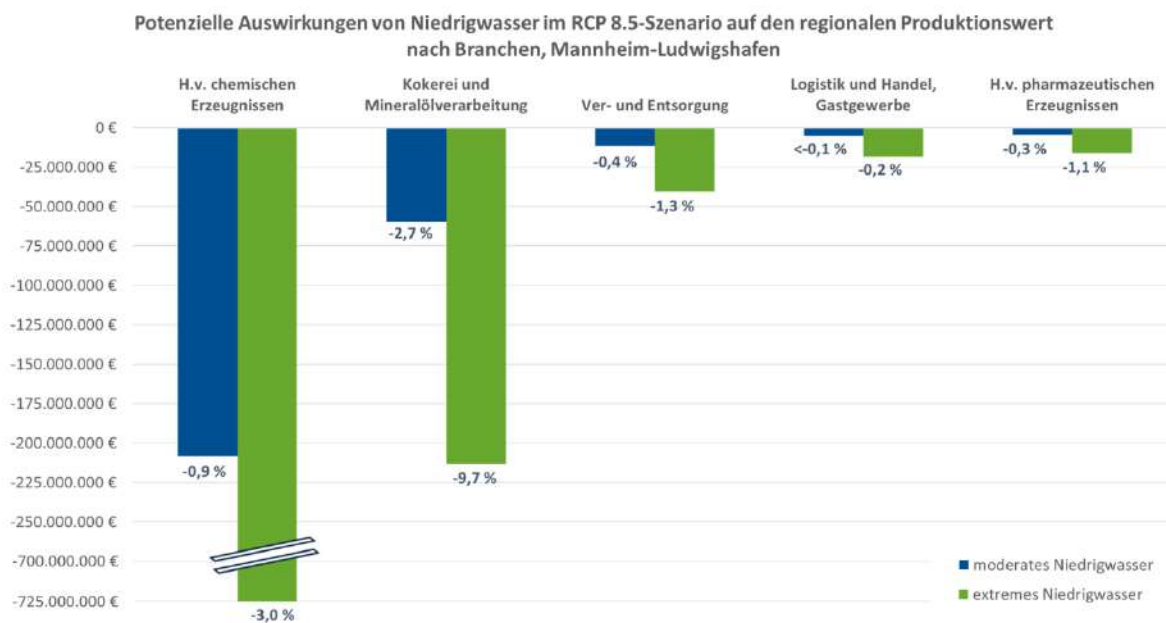


Abbildung 33: Potenzielle Auswirkungen von Niedrigwasser im RCP 8.5-Szenario auf den regionalen Produktionswert in der Region Mannheim-Ludwigshafen.

Auch in Mannheim-Ludwigshafen sind die Veränderungen des extrem ausgeprägten Niedrigwasserjahres um ein Vielfaches höher als die des moderaten Ereignisses: Insgesamt ergeben sich Rückgänge im Transport von ca. 2,5 Mio. t und im Produktionswert von über 1 Mrd. € - die zum größten Teil (ca. 725 Mio. €) in der Chemiebranche entstehen. Auch die relative Betroffenheit der Kokerei verstärkt sich noch weiter und steigt auf einen Verlust von ca. 10 % des gesamten jährlichen Produktionswerts an. Dies ist auf den hohen Anteil des Binnenschiffs an den gesamten Mineralöltransporten und somit der hohen Abhängigkeit vom Verkehrsträger zurückzuführen. Weitere betroffene Branchen sind hier die Ver- und Entsorgung, die Logistik selbst sowie die Pharmaindustrie, die besonders stark indirekt von den Verlusten in der Grundstoffchemie betroffen ist Abbildung 33. Dies schlägt sich in einem Rückgang von über 1.700 Arbeitsplätzen in der Region nieder.

### Übergeordnete Auswertung der Ergebnisse im gesamten Rheineinzugsgebiet und Fazit

Die Auswertung der Modellergebnisse zeigt eindeutig, dass die Regionen flussaufwärts von Kaub deutlich stärker von ökonomischen Einschränkungen durch Niedrigwasser betroffen sind

als flussabwärts gelegene. Darüber hinaus trifft das Niedrigwasser nicht alle Branchen gleich stark – besonders mit Einschränkungen zu rechnen ist infolge des Klimawandels insbesondere in der Chemiebranche, sowie der Mineralölverarbeitung. Besonders deutlich zeigt sich dies in den durch die chemische Industrie geprägten Regionen Mannheim-Ludwigshafen und Karlsruhe. Die Region Duisburg ist dagegen vergleichsweise gut aufgestellt, was die niedrigwasserbedingt verringerten Importe per Binnenschiff betrifft.

Berechnet man die Veränderungen der ökonomischen Kennzahlen über alle Branchen und Regionen hinweg, so ergibt sich ein Rückgang des gesamten Produktionswerts durch ein extremes Niedrigwasser von bis zu 3,4 Mrd. €. Durch das Niedrigwasser würden in der Folge bis zu 8.000 Arbeitsplätze und eine Wertschöpfung in Höhe von ca. 800 Mio. € verloren gehen. Selbst in einem moderaten Ereignis ist jedoch noch mit Wertschöpfungsverlusten in Höhe von 480 Mio. € und 4.700 wegfallenden Arbeitsplätzen zu rechnen.

Es zeigt sich, dass neben den Industriebranchen auch der Handel bzw. die Logistikbranche selbst durch die ausbleibenden Lieferungen von Verlusten betroffen ist, die durch die üblichen Niedrigwasserzuschläge nicht ausgeglichen werden können. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der Modellierung, dass es einen Transformationsdruck vor allem in den von fossilen Brennstoffen abhängigen Branchen gibt. Die relativ ausgedrückt vergleichsweise geringen Rückgänge bzw. regionalwirtschaftlichen Einbußen entbinden die Logistikbranche außerdem nicht davon, sich auf diese strukturellen Umbrüche frühzeitig vorbereiten zu müssen. Insbesondere die Kaskadeneffekte einzelner kurzer, massiver Schocks, bspw. einer fehlenden Treibstoffverfügbarkeit, können im Modell nicht abgebildet werden. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass es sich bei den Ergebnissen um Rückgänge einzelner Jahre handelt. Über einen Zeitraum bis Mitte oder sogar Ende des Jahrhunderts sind mehrere Niedrigwasserperioden zu erwarten, sodass die modellierten Zahlen nicht als Einzelereignisse angesehen werden sollten, sondern sich über den Zeitraum noch weiter kumulieren.

#### Einschränkungen in der Aussagekraft der Modellergebnisse

Die im vorigen Abschnitt präsentierten Modellergebnisse besitzen hinsichtlich ihrer Aussagekraft einige Einschränkungen: Obwohl die den Modellierungen zugrundeliegenden Niedrigwasserereignisse in der Zukunft liegen bzw. liegen werden, wurde die Modellierung im Sinne eines kontrafaktischen Szenarios mit der derzeitigen Wirtschafts- und Verflechtungsstruktur durchgeführt. Dieses Vorgehen war erforderlich, um den Einfluss des Niedrigwassers auf die Wirtschaftsentwicklung isoliert betrachten zu können, und ihn nicht durch eventuelle zeitliche Verschiebungen zu verwässern. Dies bedeutet aber tendenziell, dass den fossilen bzw. von fossilen Grundstoffen abhängigen Branchen (bspw. Mineralölerzeugung, Kohleverstromung, etc.) eine höhere Bedeutung zugemessen wird, als sie zukünftig durch Kohleausstieg und Klimaschutzbemühungen voraussichtlich noch haben werden. Darüber hinaus kann das Modell keine „Kippunkte“ bzw. Wechselbeziehungen mit ökologischen oder sozialen Rahmenbedingungen abbilden. So sind beispielsweise niedrigwasserbedingte Drosselungen in der



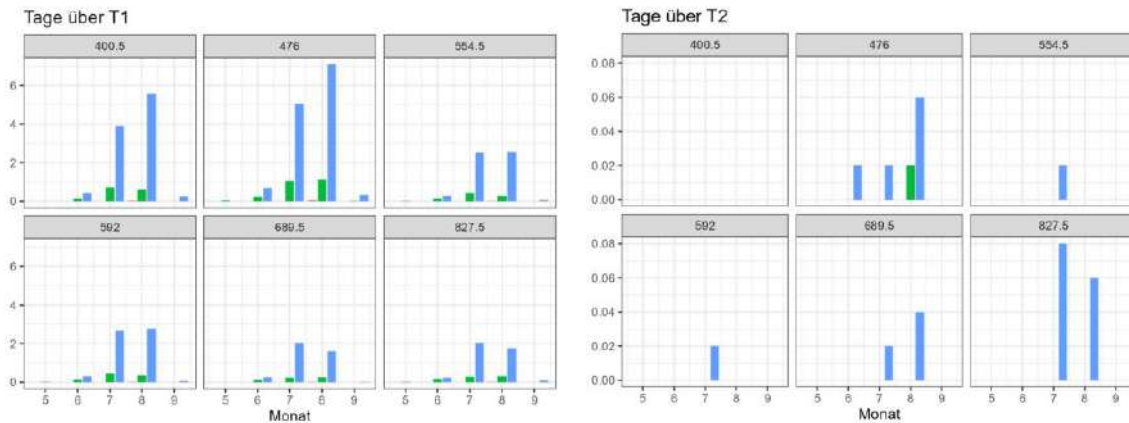
Energieerzeugung durch fehlendes Kühlwasser, und die daraus ggf. entstehenden Drosselungen in den nachgelagerten Industriebetrieben nicht mit abgebildet.

Das Modell berücksichtigt darüber hinaus auch keine Erhöhung der Transportkosten, die sich durch das Niedrigwasser in Form von Kleinwasserzuschlägen ergeben, oder bei einer Umliegung auf einen anderen Verkehrsträger anfallen. Diese würden in der ökonomischen Logik zu einer Weitergabe der Kosten entlang der Wertschöpfungskette und schlussendlich zu einer Erhöhung der Verbraucherpreise oder einem sinkenden Konsum führen. In der Logik der Input-Output-Tabelle ist darüber hinaus zu beachten, dass immer eine Betrachtung ganzjähriger Effekte erfolgt und ausgewiesen wird. Die Betrachtung der Transportströme aus der Vergangenheit zeigt allerdings, dass nach dem Ende einer Niedrigwasserphase ein Erholungseffekt eintritt, der einen Teil der erlittenen Verluste durch erhöhte Transportleistungen / Importmengen wieder ausgleichen kann. Die ganzjährige Betrachtung unterschätzt daher ggf. die kurzfristigen Disruptionen, die sich durch das Niedrigwasser ergeben.

Mit Blick auf die für die Modellierung verwendeten Eingangsdaten ökonomischer und klimatologischer Natur ist nicht zuletzt einschränkend anzumerken, dass die Projektionen der hydrologischen Modelle des BfG in der weiten Vorausschau (insbesondere in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts) von großen Unsicherheiten, bspw. den Anteil des verbleibenden Gletscherwasserabflusses im Rhein betreffend, sind (vgl. [110]). Hinzu kommt, dass die Entwicklungen des Rheinpegels am aktuellen Rand der Zeitreihen (bspw. in 2018 und 2022) noch nicht in die langjährige Trendermittlung als Basis für die zukünftige Modellierung eingehen.

### **5.2.1.3 Ökologische Vulnerabilitätsanalyse**

Die ökologische Vulnerabilitätsanalyse lieferte unter Berücksichtigung des RCP8.5-Szenarios folgende Ergebnisse (Abbildung 34):



Legende Zeitscheiben: rot: 1971-2000 grün: 2031-2060 blau: 2070-2099

Abbildung 34: Mittlere Anzahl der Tage, an denen im Monat der Schwellenwert T1 (links) und T2 (rechts) überschritten wird, dargestellt als Mittelwerte über 30 Jahre für den Bezugszeitraum (1971 bis 2000, rot), die nahe (2031 bis 2060, grün) und ferne Zukunft (2070 bis 2099, blau). Die Simulationen wurden mit dem Wassergütemodell QSim auf Basis von fünf Mitgliedern des BfG-Ensembles „Wassergüte“ und unter Annahme des Szenarios RCP8.5 durchgeführt (BfG 2022).

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass erst in der fernen Zukunft (nach 2070) vor allem im Oberrhein die ermittelten Temperaturschwellenwerte in einer relevanten Häufigkeit erreicht werden. Die Ursache für dieses Ergebnis wird in dem schon heute sehr hohen Anteil an Neozoen im Rhein gesehen, die bereits an höhere Wassertemperatur angepasst sind und zu einer „Homogenisierung“ früher getrenntlebender Flusslebensgemeinschaften führen. Dies zeigt sich u.a. auch durch die relativ geringen Unterschiede zwischen Ober- und Niederrhein.

Die ökologische Vulnerabilitätsanalyse auf der Makroebene lieferte somit u. a. auch die Einschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökologie im Rheinabschnitt der Stadt Duisburg infolge von Wechselwirkungen zur Makroebene (Rheineinzugsgebiet). Die Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Auswirkungen dieser Projektionen durch Anpassungsmaßnahmen auf der Mikroebene ist an dieser Stelle sehr begrenzt. Das Temperaturniveau eines Fließgewässerkörpers mit der Größe des Rheins ist durch lokale Maßnahmen kaum messbar beeinflussbar. Da der Fokus des Projektes auf der fachlichen Entscheidungsunterstützung kommunaler Entscheidungsträger:innen durch ein EUS liegt, wurde die ökologische Vulnerabilitätsanalyse auf der Makroebene nicht weiter verfolgt, da sie neben der Identifikation einer einseitigen Wirkung der Makro- auf die Mikroebene keine verwertbaren Erkenntnisse hervorbringt.

## 5.2.2 Mikroebene

### 5.2.2.1 Hochwasser – hydraulische Modellierung und Schadenspotenzialanalyse

Zur Untersuchung von Hochwasser vor dem Hintergrund des RCP8.5 Szenarios wurden vom FiW, analog zum Status Quo, extremwertstatistische Auswertungen mit HQ-EX 4.0 für den

Pegel Duisburg-Ruhrort durchgeführt. Auch hierfür sollen langfristig Abflussprognosen verwendet werden, welche über die N-A-Modellierung berechnet werden. Da die Kalibrierung des N-A-Modells zum Berichtszeitpunkt noch nicht abgeschlossen war, wurden für die FuE-Phase I Abflussprognosen der BfG verwendet (s. Kapitel 5.2.1.1). Die dafür verfügbaren Modellkombinationen sind in Tabelle 15 aufgeführt. Da GCM-RCM-Modellkombinationen, die von dem GCM HadGEM angetrieben werden, „auffällig viele 1.000-jährliche Hochwasserereignisse“ ([107] S. 67) erzeugen, werden diese für extremwertstatistische Analysen nicht empfohlen [107]. So ergibt sich ein BfG-Extrem-Ensemble mit 13 Klimasimulationen. Die Abflussprognosen der BfG basierend auf diesem Ensemble wurden in der FuE-Phase I extremwertstatistisch ausgewertet. Um eine Vergleichbarkeit mit dem Status Quo zu gewährleisten, wurde als statistische Verteilungsfunktion ebenfalls die LN3 mit der MLM zu Parameterschätzung verwendet. Für Abflussprojektionen basierend auf neun der 13 Klimasimulationen war dies mit HQ-EX möglich, diese wurden für eine weitere Analyse verwendet (s. Tabelle 15 für nähere Informationen):

- RCP85\_ECEARTH\_r1\_RACMO\_BC-EXP\_LSM-ME
- RCP85\_ECEARTH\_r12\_RACMO\_BC-EXP\_LSM-ME
- RCP85\_ECEARTH\_r12\_REMO\_BC-EXP\_LSM-ME
- RCP85\_ECEARTH\_r12\_RCA\_BC-EXP\_LSM-ME
- RCP85\_IPSL\_r1\_RCA\_BC-EXP\_LSM-ME
- RCP85\_MIROC5\_r1\_REMO\_BC-EXP\_LSM-ME
- RCP85\_MPIESM\_r1\_REMO\_BC-EXP\_LSM-ME
- RCP85\_MPIESM\_r2\_REMO\_BC-EXP\_LSM-ME
- RCP85\_MPIESM\_r1\_RCA\_BC-EXP\_LSM-ME

Die Zeitreihen der Abflussprognosen basierend auf Klimasimulationen umfassen jeweils die Jahre 2006 bis 2099. Die Ergebnisse der Extremwertstatistik für die einzelnen Abflussprognosen für den Pegel Duisburg-Ruhrort sind in Abbildung 35 dargestellt. Die rote Linie in der Grafik zeigt zusätzlich die Ergebnisse der Extremwertstatistik für den Status Quo.

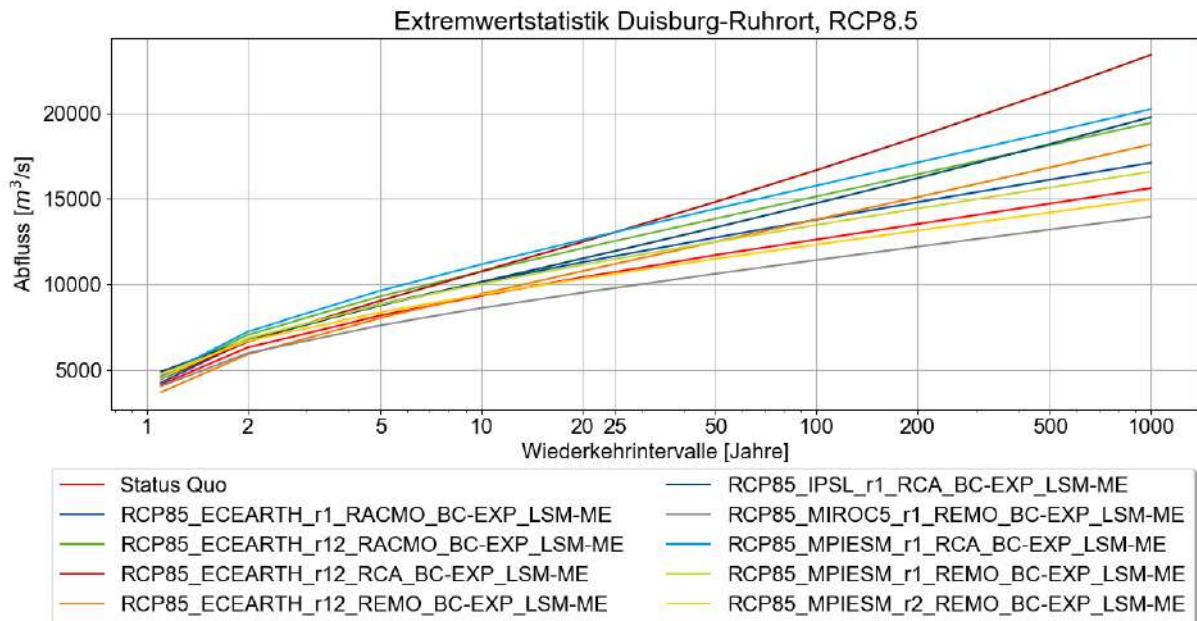


Abbildung 35: Ergebnisse der Extremwertstatistik (LN3 MLM) für den Pegel Duisburg-Ruhrort für verschiedene Klimamodellkombinationen des RCP8.5-Szenarios und den Status Quo (rot).

Abbildung 36 zeigt ebenfalls die Ergebnisse der Extremwertstatistik für RCP8.5, dargestellt in Form von Perzentilen.

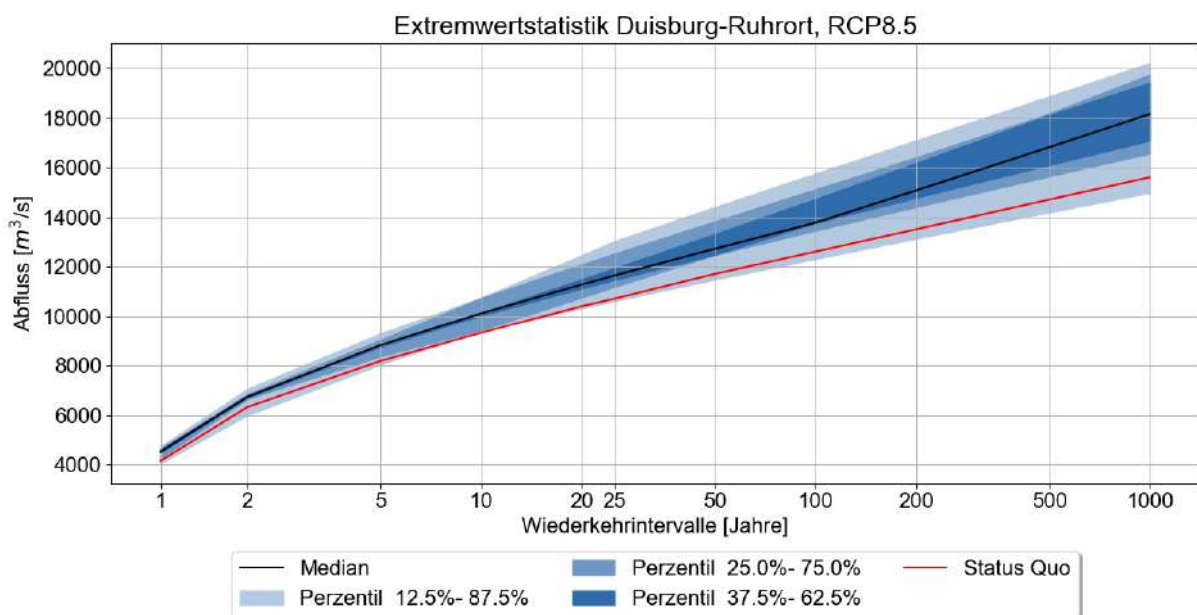


Abbildung 36: Perzentile der Ergebnisse der Extremwertstatistik (LN3 MLM) für den Pegel Duisburg-Ruhrort für verschiedene Klimamodellkombinationen des RCP8.5-Szenarios und den Status Quo (rot).

Wie Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen, kann unter Annahme des RCP8.5-Szenarios mit einer Zunahme von Hochwasserabflüssen im Vergleich zum Status Quo gerechnet werden. Je größer der Wiederkehrintervalle und entsprechend je kleiner die statistische Auftretenswahrscheinlichkeit, desto größer ist die Zunahme der Hochwasserabflüsse. Beispielsweise steigt das  $HQ_{100}$  für RCP8.5 von  $12.600 m^3/s$  auf ca.  $13.800 m^3/s$  (Median). Dies würde eine Zunahme der Überflutungsfläche und der maximalen Überflutungstiefen bedeuten. Der

Abfluss von 12.600 m<sup>3</sup>/s, der aktuell statistisch alle 100 Jahre auftritt, würde zukünftig dagegen statistisch bereits alle 50 Jahre oder noch häufiger (Median) auftreten.

### 5.2.2.2 Starkregen – hydrologische und hydraulische Modellierung

Für die Untersuchung des RCP8.5-Szenarios hinsichtlich Starkregen waren Klimamodelldaten mit einer hohen zeitlichen Auflösung von mindestens einer Stunde notwendig. Über Freva konnten hierfür exemplarisch für die in Tabelle 18 aufgeführten Klimamodellkombinationen Niederschlagszeitreihen für den Simulationszeitraum 2006 bis 2100 bezogen werden.

Tabelle 18: Modellkombinationen der für RCP5.8 hinsichtlich Starkregen ausgewertete Zeitreihen.

Name Zeitreihe	GCM	RCM
Time_series_eur-11_ncc-noresm1-m-clmcom-eth-cosmo-crclim-v1-1-v1_r1i1p1_rcp85_1hr_all	NCC-NorESM1-M, r1i1p1	CLMcom-ETH-COSMO-crCLIM-v1-1
Time_series_eur-11_ncc-noresm1-m-smhi-rca4-v1_r1i1p1_rcp85_1hr_all	NCC-NorESM1-M, r1i1p1	SMHI-RCA4

Bei der Betrachtung der Zeitreihen hinsichtlich der maximalen stündlichen Niederschlagsmengen und der Verteilung der Ereignisse über 10 mm/h ist bei beiden Datensätzen auffällig, dass sich die Anzahl der Ereignisse in der zweiten Hälfte des Auswertungszeitraums erhöhen. Ein Starkregenereignis von über 30 mm/h kommt jedoch nicht in den Ergebnissen vor, somit werden in den beiden (verfügbaren Stundenwerten) Realisationen des RCP8.5 mit zu geringen Werten projiziert, die aktuellen 100-jährlichen Niederschläge liegen in Duisburg bei ca. 50 mm/h.

### 5.2.2.3 Modellierung der Auenvegetation

Für die Auenvegetation werden sich die zukünftigen klimatischen Bedingungen im Wesentlichen durch ein verändertes Überflutungsregime (Veränderung der Überflutungsdauer durch u.a. längere Trockenphasen) ergeben. Diese können entsprechend dem IST-Zustand in das LandS-Modell integriert werden, wodurch sich dann die Vegetationseinheiten und damit die gesamte Auelandschaft verändern wird. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, die standortspezifischen Umweltbedingungen wie Temperatur und Feuchte anhand diverser Klimaszenarien anzupassen, ebenso können unterschiedliche Managementvarianten (Beweidung, Mahd, Branche) eingestellt werden.

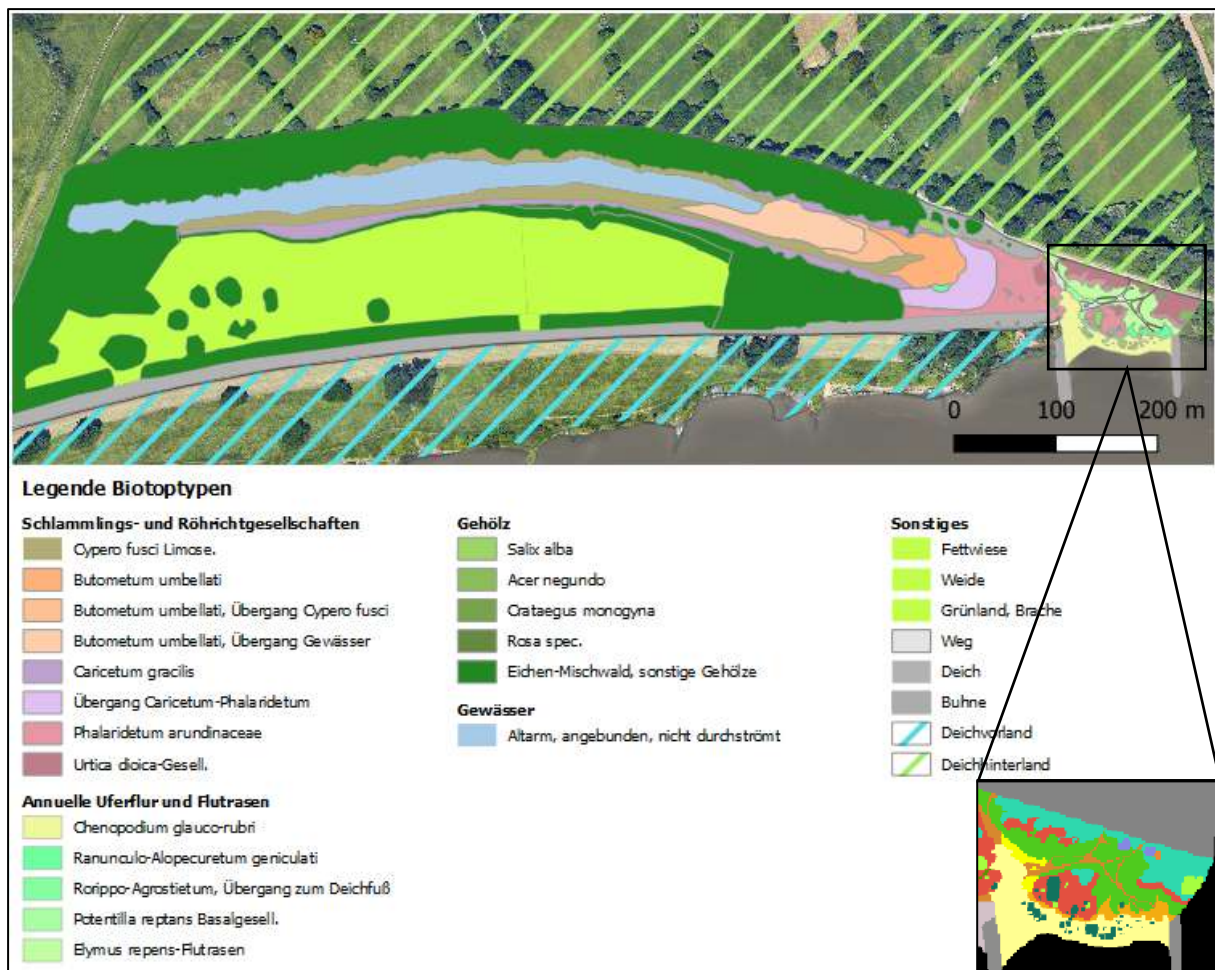


Abbildung 37: Biotoptypenkarte im IST-Zustand des Altarms „Die Roos“ in der Rheinaue Friemersheim im Süden von Duisburg mit Ausschnitt des digitalen Abbildes im LandS-Modell.

Die Ergebnisse des LandS-Modells wurden für die Bewertung der Biodiversität auf Mikroebene verwendet (Abbildung 37). Da die Auen in Duisburg den Hotspot der Biodiversität in diesem Raum darstellen und die AuELandschaften erheblich vom Klimawandel betroffen sind, wurden diese gesondert mit dem LandS-Modell analysiert. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Biodiversitätsbewertung der Mikroebene in das EUS eingebracht.

#### 5.2.2.4 Stadtökologie

Die stadtstrukturelle Analyse zur Ableitung von thermischen Lastgebieten, zur Bewertung der städtischen Biodiversität, zur Durchführung unterschiedlicher Vulnerabilitätsanalysen sowie zur Ableitung stadtstruktureller Klimaanpassungsmaßnahmen stützt sich methodisch auf die Verschneidung stadtstruktureller Kenngrößen.

Da klimatologische Veränderungen in dieser Analyse nicht durch einen Parameter dargestellt wurden, erfolgte an dieser Stelle noch keine Berücksichtigung von Klimaszenarien. Die statistische Korrelation der stadtstrukturellen Kenngrößen mit den ermittelten Klimaparametern (u.a. nächtliche Abkühlungsrate, Tagestemperatur, nächtliche Temperatur) des RVR's (RVR 2022)

bietet die Möglichkeit der Berücksichtigung von Klimaszenarien und wird in der FuE-Phase II durchgeführt.

### 5.3 Partizipationsprozess

#### 5.3.1 Stakeholderanalyse – Verkehrsträger Binnenschiff

Die Stadt Duisburg ist Standort des bedeutendsten Binnenhafens Europas und zentraler Knotenpunkt für die multimodale Logistik. In dieser Position verbindet der Logistikstandort über die Schifffahrt auf dem Rhein auch die Seehäfen Zeebrügge, Antwerpen, Rotterdam und Amsterdam (ZARA) mit ihrem sogenannten Hinterland, also den nachgeordneten Knotenpunkten der über sie abgewickelten Logistikprozesse.

Die Schiffbarkeit des Rheins ist für die Kostenstruktur dieser Transporte von großer Bedeutung. Sowohl Hoch- als auch Niedrigwasser verringern die Transportkapazitäten auf dem Rhein. Eine Verlagerung auf andere Transportmodi, ein Aufschieben der Transporte oder eine Unterauslastung der bei günstigen Wasserständen verfügbaren Kapazitäten verteuert die Logistik per Schiff bis zu einem Punkt, wo diese Form des Transports praktisch ausfällt.

Für die Stadt Duisburg schloss sich hieran die Frage an, welche Folgen solche Einschränkungen der Binnenschifffahrt für das regionale Wirtschafts- und Verkehrssystem haben. Sie berührte damit den Kern der Fördermaßnahme RegIKlim, in der es um den Aufbau entscheidungsrelevanten Wissens zum Klimawandel in Kommunen und Regionen geht, um auf deren Grundlage maßgeschneiderte Klimaservices für die Anpassung zu schaffen.

Die Stakeholderanalyse wurde in drei Abschnitten durchgeführt. Die Stakeholderidentifikation diente der Kartierung der Akteurs- und Organisationslandschaft in diesem Bereich und dem Herausarbeiten der Grundgesamtheit an Akteuren, die in einem späteren Prozess und mit Blick auf die spezifische Fragestellung in den Blick genommen wurden. Hier wurden unterschiedliche Ebenen mit einem Multimethodenansatz systematisch aufgearbeitet.

Im Vorfeld der Datenerhebung wurden auf der Grundlage der Datenbank RuhrAGIS Unternehmen identifiziert, deren Tätigkeit mit dem Modus Binnenschifffahrt im Zusammenhang stehen. Als Kriterien wurden die Branchenzugehörigkeit und die räumliche Nähe zu trimodalen Terminals im Bereich der Stadt Duisburg gewählt. Die relevanten Informationen sind Teil der oben genannten Datenbank. Neben den genuinen Transportdienstleistungen auf dem Rhein erbringen die Unternehmen Leistungen im Bereich der Lagerei, des Frachtumschlags und des Betriebs multimodaler Terminals, des Hafenbetriebs und auch vom Binnenschiff übernommene Transporte auf der Straße.

Die hierdurch gewonnene Liste an Unternehmen bildete die Basis für die Ansprache von Stakeholdern, wobei auf eine Repräsentation der unterschiedlichen Branchen geachtet wurde. Mit zehn von ihnen wurden 60–120-minütige teilstandardisierte Interviews geführt. Je nach

terminlicher Verfügbarkeit und Abwägungen die Corona-Situation betreffend wurden die Gespräche telefonisch, persönlich oder per Videokonferenz geführt.

Eine Analyse der Daten erfolgte qualitativ. Das Ergebnis zeichnet ein Bild zum Umgang der Binnenschifffahrt mit Niedrigwasserperioden am Rhein, mit einem spezifischen Fokus auf den Projektraum Duisburg.



Abbildung 38: Schlüsseergebnisse der Stakeholderbefragung der Binnenschifffahrt auf dem Rhein.



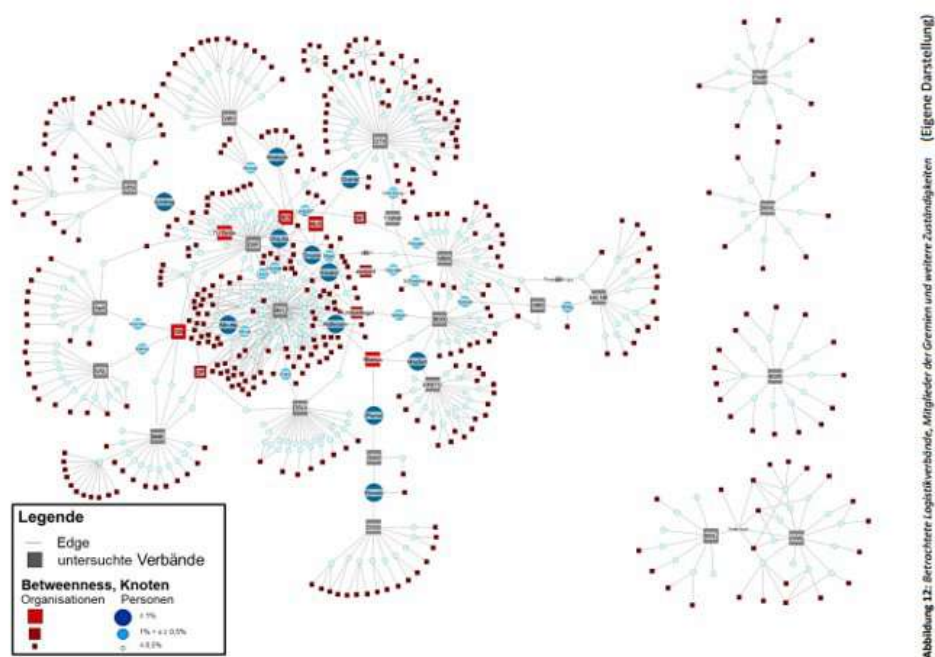


Abbildung 12: Betroffener Logistikverbände, Mitglieder der Gremien und weitere Zuständigkeiten (Eigene Darstellung)

Abbildung 39: Darstellung des Netzwerks aus Personen in Vertretungsstrukturen der Organisationen der Binnenschifffahrt, die im Rahmen der Stakeholderanalyse erhoben wurden, Wenige Organisationen im Zentrum sind über Funktionsträger miteinander verbunden.

### 5.3.2 Unternehmensbefragung – Verkehrsträger Binnenschiff

Sowohl im Rahmen der Stakeholderidentifikation als auch in den Interviews zeigte sich, dass die Binnenschifffahrt auf dem Rhein nicht ohne Weiteres als homogene Branche mit einheitlichen Zielen betrachtet werden kann. In erster Linie verbindet die Stakeholder die Abhängigkeit ihrer Geschäftsprozesse vom Modus Binnenschifffahrt. Ihre Betroffenheit vom Klimasignal und ihr Verhalten können sich aber stark unterscheiden. Besonders negativ betroffen sind die Bereiche, deren Geschäftserfolg vom Transport von Massen(schütt-)gütern abhängen. Hier ist die Marge relativ gering, ein möglichst günstiger Transport mit großen Schiffen ist entscheidend. Andere Transportleistungen sind für die Kunden schwer zu ersetzen und zeitkritisch, beispielsweise der Transport von Industriegasen. Hohe Transportpreise lassen sich daher auf dem Markt durchsetzen. Für die Anbieter von Lagerflächen oder Häfen kann sich eine Verzögerung der Weitertransporte sogar als kurzfristiger ökonomischer Vorteil ausspielen, auch wenn mittelfristig eine erschwerte Binnenschifffahrt nicht von Nutzen ist. Außerdem ist die räumliche Lage am Rhein sehr erheblich für die Vulnerabilität gegenüber Phasen von Niedrigwasser. Das kritische Nadelöhr hier ist der Mittelrhein mit dem Pegel Kaub, während die Strecke am Niederrhein Richtung der belgischen und niederländischen Seehäfen von Niedrigwasser sehr selten kritisch betroffen ist.

Auf einer übergeordneten, strategischen Ebene jenseits des Tagesgeschäfts, haben die Stakeholder deutlich gemacht, dass der Umbau der Binnenschifffahrt in einen "grünen" Transportmodus von großer Bedeutung ist. Hierzu gehören Fragen nach der Antriebstechnik und ihrer Umstellung von Diesel auf andere Energieträger. Da Binnenschiffe eine vergleichsweise lange

Nutzungsdauer – im Vergleich zu Lastkraftwagen – haben, sind hier folgenreiche Weichenstellungen zu treffen. Mit der Dekarbonisierung der Energieerzeugung insgesamt fällt perspektivisch ein wichtiger Teil des Transportvolumens der Binnenschifffahrt weg; hier stellt sich die Frage, durch was dies substituiert werden kann.

In den Interviews haben auch andere übergreifende Fragen eine Rolle gespielt. Sie standen zum einen unter dem Eindruck der Corona-Pandemie, die weltweite Lieferketten erheblich beeinträchtigt hat. Hier wurde die große Ungewissheit globaler Vernetzung deutlich, die offensichtlich bis heute nicht an Brisanz verloren hat. Zum anderen sieht auch diese Branche sich mit Nachwuchssorgen konfrontiert. Auch hier sind es nicht allein die Fachkräfte im engeren Bereich der Binnenschifffahrt, wie bspw. Schiffsführer:innen, die fehlen. Auch der Fachkräftemangel der anderen Verkehrsträger überträgt sich durch gegenseitige Interdependenzen auf die Schifffahrt auf dem Rhein, wenn beispielsweise Zugführer:innen und Fahrer:innen von LKWs fehlen. Generell zeichnet sich das Bild einer Branche im Umbruch ab, für die der Umgang mit extremen Klimasignale wichtig ist, aber keine Priorität vor anderen Problemen hat.

Das Verhalten der Stakeholder bei extremen Pegelständen, das haben die Gespräche gezeigt, ist eingebunden in übergeordnete Entwicklungen der Logistik auf dem Rhein. Bei Massengütern hat sich die Transportkapazität der Schiffe enorm erhöht. Zu deren rentabler Auslastung ist dann aber ein günstiger Pegelstand nötig. Teure Lagerkapazitäten, die im Falle einer Transportunterbrechung ein Abwarten des Weitertransports erlauben, sind zu dem in den vergangenen Jahren abgebaut oder bei insgesamt steigender Transportmenge nicht aufgebaut worden, zu Gunsten des sog. "schwebenden Inventars". Dessen rechtzeitige Verfügbarkeit an nachgeordneten Knotenpunkten der Logistik-Prozesse wird jedoch durch eine Verlangsamung oder Unterbrechung der Schifffahrt auf dem Rhein, wie sie bei Hoch- und Niedrigwasser der Fall ist, gefährdet. Die genannten Entwicklungen wirken eher in Richtung einer Erhöhung der Vulnerabilität gegenüber dem hier betrachteten Klimasignal Niedrigwasser.

Die Befragung hat allerdings auch klar ergeben, dass die Stakeholder Schwankungen des Wasserhaushalts auf dem Rhein grundsätzlich mit gut eingespielten Praktiken und damit auch einer erheblichen Resilienz begegnen. Die sogenannten Kleinwasserzuschläge erlauben das Erheben einer Prämie im Fall durch erhöhte Pegelstände erschwerter Transporte, die freie Vereinbarung entbindet die Anbieter von der Transportverpflichtung bei extremen Pegeln, eine Umsteuerung der Flotten, die mit kleineren Schiffen auf Kanälen mit geringerem Tiefgang fahren, erlaubt eine gewisse Flexibilisierung, Lagerung und Wechsel der Modi schließlich vermeiden den Transport per Schiff für einen gewissen Zeitraum.

In den Stakeholderinterviews wurde im Rahmen des Umgangs mit Niedrigwasserperioden immer wieder der schlechte Zustand der Straßen- und Schieneninfrastruktur thematisiert. Die trimodale Verschränkung von Verkehrsmodi ist für die Binnenschifffahrt immer von großer Bedeutung, daher ist die Unzuverlässigkeit des Transports auf der Straße oder per Zug auch im operativen Tagesgeschäft ein permanentes Problem. Es verschärft sich in dem Moment, in

dem beispielsweise Niedrigwasser eine sehr weitgehende Verlagerung auf andere Modi nahelegt. Extreme Klimasignale können die Binnenschifffahrt vor diesem Hintergrund tatsächlich sogar härter treffen, wenn sie gar nicht direkt die Wasserwege betreffen. Das Ahrhochwasser hat beispielsweise mit seinen Auswirkungen auf die Infrastruktur über Transportketten auch die Binnenschifffahrt betroffen. Im Rahmen der Klimaanpassung ist es daher wichtig, den Blick nicht nur auf den Rhein und seinen Wasserhaushalt zu lenken, den man ohnehin kurzfristig nicht beeinflussen kann. Einer Ertüchtigung der Infrastruktur der Wasserwege selbst wird in diesem Zusammenhang wohl auch eine Rolle beigemessen, aber sie ist nicht so groß wie im Fall der anderen Modi.

Die Stakeholder haben deutlich die Anpassungskapazitäten skizziert. Zum einen sind hier technologische Innovationen zu nennen, die die Schiffe betreffen. Diese können beispielsweise durch Reduzierung des Tiefgangs und Veränderungen beim Antrieb auch bei niedrigen Pegelständen noch effizient betrieben werden. Allerdings beträgt der Lebenszyklus von Binnenschiffen zum Gütertransport häufig 50 Jahre, eine Modernisierung der Flotten würde daher langfristig wirken. Verbesserte Modell der Niedrigwasserprognose, wie sie momentan entwickelt und erprobt werden, machen dagegen eine Anpassung der Transporte an die Pegelentwicklung möglich. Das erlaubt ein vorausschauendes Anpassen der Lieferketten und Lagerhaltung, eventuell auch der Produktion, und damit eine Verringerung der Vulnerabilität. Ein weiteres Feld der Anpassung liegt im Bereich der wirtschaftlichen Prozesse und der Geschäftsmodelle. Langfristigere Verträge über Transportleistungen können hier, eventuell im Verbund mit solchen Prognosen, den Nachteil geringhalten, den teilweise Unterbrechungen der Schifffahrt auf dem Rhein sonst mit sich bringen.

### **5.3.3 Unternehmensbefragung – Verkehrsträger Straße**

Im Rahmen einer Online-Befragung wurden zur Ermittlung der unternehmerischen Betroffenheiten und die erwarteten Verlagerungseffekte Unternehmen befragt, die primär ihren Güterverkehr über den Verkehrsträger „Straße“ abwickeln. Insgesamt haben 18 Unternehmen an der Online-Befragung teilgenommen. Zur Validierung der Ergebnisse der Unternehmensbefragung wurden fünf leitfadengestützte Experteninterviews mit verschiedenen Institutionen (Duisburger Hafen AG, Duisburg Business & Innovation, IHK-Niederrhein, Stadt Duisburg und der bergischen Universität Wuppertal) durchgeführt. Die Experteninterviews basierten im Wesentlichen auf dem erstellten Fragebogen der Unternehmensbefragung. Der generelle Aufbau der Unternehmensbefragung basiert auf Klimawirkungsketten und den Auswirkungen von Starkregen, Extremhitze, Niedrig- und Hochwasser auf die Verkehrsinfrastruktur, -sicherheit und -ablauf sowie auf den Unternehmensprozesse Darüber hinaus lag der weitere Fokus auf Klimaanpassungsmaßnahmen.

#### Allgemein

Die Ergebnisse der Befragungen sind homogen und zeigen den Möglichkeitsraum der Effekte aufgrund von Extremereignissen auf logistische Transportprozesse. So wird auf einer Likert-Skala von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) das Infrastrukturangebot im Durchschnitt mit gut (2,1) und der Verkehrsablauf mit 3,4 bewertet. Die Verkehrssituation in Duisburg ist durch beschädigte oder überlastete Brücken bzw. durch Baustellen negativ beeinflusst. Neben den infrastrukturell wachsenden Herausforderungen sind neue Standorte ein Grund für das wachsende Verkehrsaufkommen. Darüber hinaus wurden die Unternehmen befragt, inwiefern ihr Unternehmensstandort in den letzten 10 Jahren von unterschiedlichen Klimawirkungen betroffen waren (siehe Abbildung 40). Die größte Betroffenheit wird sowohl von den Unternehmen als auch von Experten bei Niedrigwasser gesehen. Neben Niedrigwasser (2,6) zeigten sich in der Vergangenheit durch Hitze, Starkregen und Wind/Sturm (alle 2,9) mäßige Betroffenheiten. Als häufigste Auswirkungen von vergangenen Extremwetterereignissen gaben die befragten Unternehmen eine erhöhte gesundheitliche Belastung (79 %), die Überflutung von Kanalisationen/Straßen (64 %), den Ausfall von Lieferungen (64 %), den Wegfall von Lieferketten (57 %), den Arbeitszeiteinbruch (64 %) und Umsatzeinbußen (57 %) an.

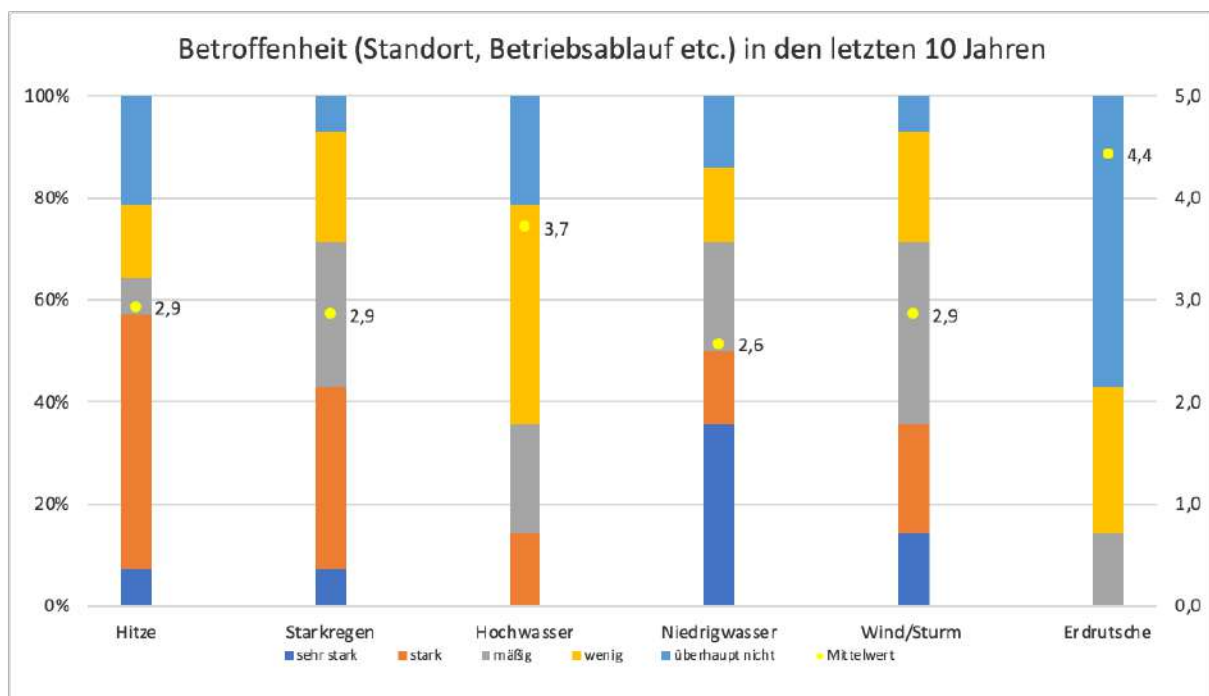


Abbildung 40: Betroffenheit der Unternehmen in den letzten 10 Jahren (Skala: sehr stark (1) – überhaupt nicht (5)).

### Starkregen

Um die Folgen von Starkregen auf die Verkehrsinfrastruktur, -sicherheit und -ablauf abzuschätzen, wurden die Befragten zunächst nach der Eintrittswahrscheinlichkeit (5er-Skala von sehr wahrscheinlich bis sehr unwahrscheinlich) verschiedener Faktoren befragt (siehe

Abbildung 41). Als direkte Folgen von Starkregen auf die Verkehrsinfrastruktur zeigten sich bei der Überflutung von Straßen (1,2), den Schäden an Brücken (1,8) sowie der Überflutung von Tunneln (1,8) die höchsten Eintrittswahrscheinlichkeiten. Das sind auch die Bereiche, die

aktuell in weiteren Forschungen für resiliente Infrastrukturen fokussiert werden. Die befragten Experten gaben zudem an, dass bei Starkregen häufig Schäden an Lagerhallen und Depots eintreten würden. Darüber hinaus kann die Verkehrssicherheit durch Starkregen beeinflusst werden. Die Befragten gaben an, dass Effekte wie eine eingeschränkte Sicht (1,1), Aquaplaning (1,2), reduzierte Fahrgeschwindigkeiten (1,1) und Hindernisse auf der Fahrbahn (1,4) sehr wahrscheinlich eintreten und die Verkehrssicherheit beeinflussen würden. Außerdem gaben die Befragten an, dass es bei einem Starkregenereignis sehr wahrscheinlich ist, dass Stau und Transportzeitenverlängerungen (1,0), sowie Sperrungen von Straßenabschnitten (1,2) und eine damit verbundene Erhöhung der Transportweite (1,2) eintreten. Auf Seiten der Experten werden Zeitverluste und Lieferverzug hervorgehoben, die wiederum Begleiterscheinungen von Stau und Verkehrsverzögerungen sind. Die prognostizierten Effekte auf den Betriebsablauf unterscheiden sich unwesentlich. Es wird mit Mehrkosten (1,4), Mehraufwand (Transportstrecken, Planung), Zeitverlusten und Transportausfällen (1,0) gerechnet. Als unternehmerischer Aspekt werden zusätzlich unfallbedingte Kosten angegeben (2,2). Aus Experten-sicht ist eine Unterbrechung der Supply-Chains eine mögliche Folge.

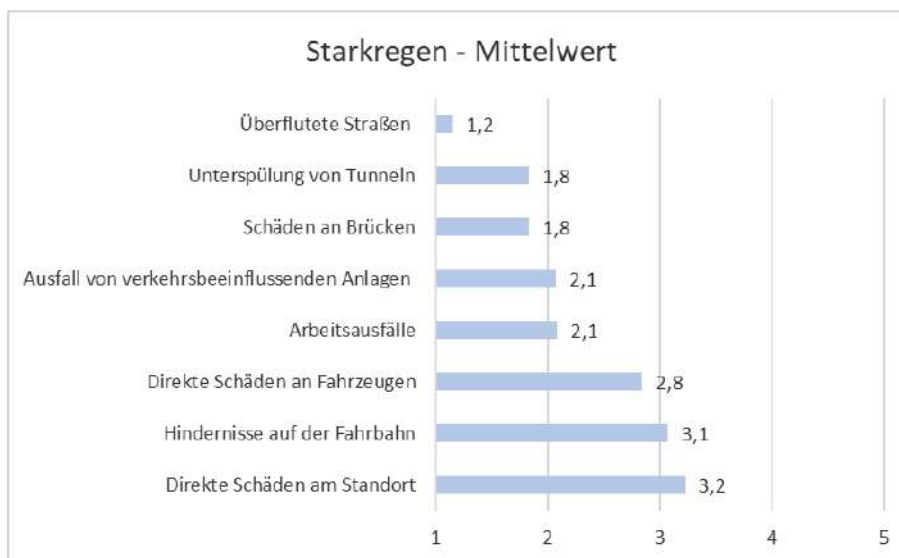


Abbildung 41: Betroffenheit bei Starkregen, Mittelwerte (Skala: sehr wahrscheinlich (1) – sehr unwahrscheinlich (5)).

## Hitze

Zur Hitzethematik wurden die Unternehmen zunächst gefragt, welche Eintrittswahrscheinlichkeiten (5er-Skala von sehr wahrscheinlich bis sehr unwahrscheinlich) verschiedene Gefahren und Schäden haben, die infolge von extremer Hitze auftreten können (siehe Abbildung 42). Es zeigt sich, dass die Unternehmen die Veränderung des Innenraumklimas in Fahrzeugen (1,4) im Durchschnitt als sehr wahrscheinlich bewerten. Zudem bewerteten die Unternehmen den Eintritt von Schäden an hitzeempfindlichen Gütern (1,9), die Gefahr von Wald- und Böschungsbänden sowie hitzebedingte Schäden an Infrastrukturen (1,9) als wahrscheinlich. Der Eintritt von Spurrillen/Rissbildung (2,5), Blow-ups (2,6) sowie hitzebedingter Schäden am Unternehmensstandort bewerteten die befragten Unternehmen im Durchschnitt mit weder

wahrscheinlich noch unwahrscheinlich. Als unwahrscheinlich schätzten die Unternehmen den Ausfall von verkehrsbeeinflussenden Anlagen (3,6) ein. Die befragten Unternehmen gaben an, dass extreme Hitze die Verkehrssicherheit beeinflussen kann. Speziell die Beeinträchtigung der Konzentrationsfähigkeit (1,1) und Hitzestress (1,3) wurden durch Unternehmen als sehr wahrscheinlich bewertet. Außerdem haben die Unternehmen den Einfluss von Hitze auf den Verkehrsablauf abgeschätzt. Der Eintritt von Stau und Verkehrsverzögerungen (2,3) wurde als wahrscheinlich sowie hitzebedingte Sperrungen von Streckenabschnitten und häufigere Baustellen (2,6) wurden als weder wahrscheinlich noch unwahrscheinlich eingeschätzt.

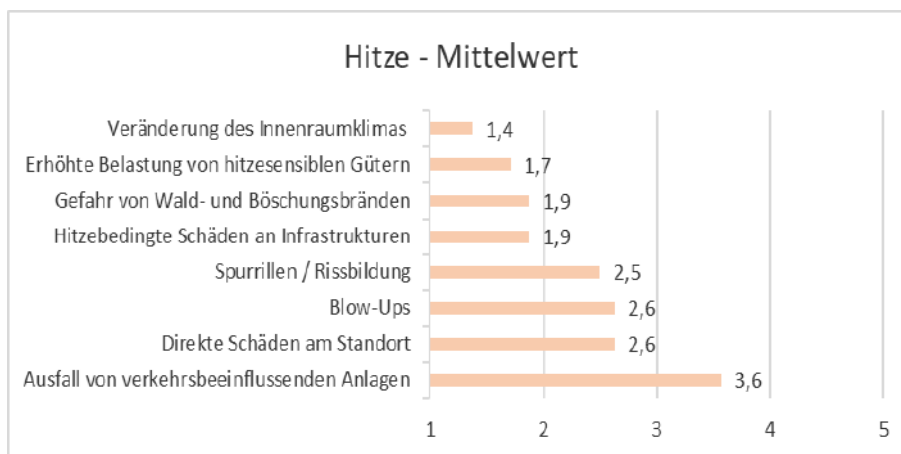


Abbildung 42: Betroffenheit bei Hitze, Mittelwerte (Skala: sehr wahrscheinlich (1) – sehr unwahrscheinlich (5)).

### Hoch-/Niedrigwasser

Um zu untersuchen, welche Folgen eine durch Niedrig- oder Hochwasser eingeschränkte Binnenschifffahrt für den Verkehr und die Unternehmen haben, sollten die Unternehmen die Eintrittswahrscheinlichkeiten (5er-Skala von sehr wahrscheinlich bis sehr unwahrscheinlich) typischer Folgen bewerten (siehe Abbildung 43). Infolge einer eingeschränkten Binnenschifffahrt wurden viele Folgen mit sehr wahrscheinlich bzw. wahrscheinlich bewertet. So kommt es den Befragungen zufolge zu Stau im Hafengebiet (1,6), einem sich verzögernden Lkw Vor- und Nachlauf (1,3), einer eingeschränkten Fristeneinhaltung (2,0), Mehrkosten durch höheren Planungs- und Logistikaufwand (1,4), sowie Überbeanspruchung von Lagerkapazitäten (1,7). Zusätzlich ist laut Experten ebenso die Warenannahme gestört. Ferner wird berichtet, dass es zu Produktionsausfällen kommen kann. Die Meinungen und Beurteilungen der Experten umfassen nicht nur Teilstränge der Supply-Chain, sondern ebenso die vor- und nachgelagerten Prozesse. Als wichtiger Hinweis der Experten wurde weiterhin mitgegeben, dass die Schleusen, Kanäle und Brücken oft nicht für ein Extremereignis ausgelegt sind und diese nur von einem Bruchteil der Schiffe (aufgrund Tiefganges, etc.) befahren werden können.

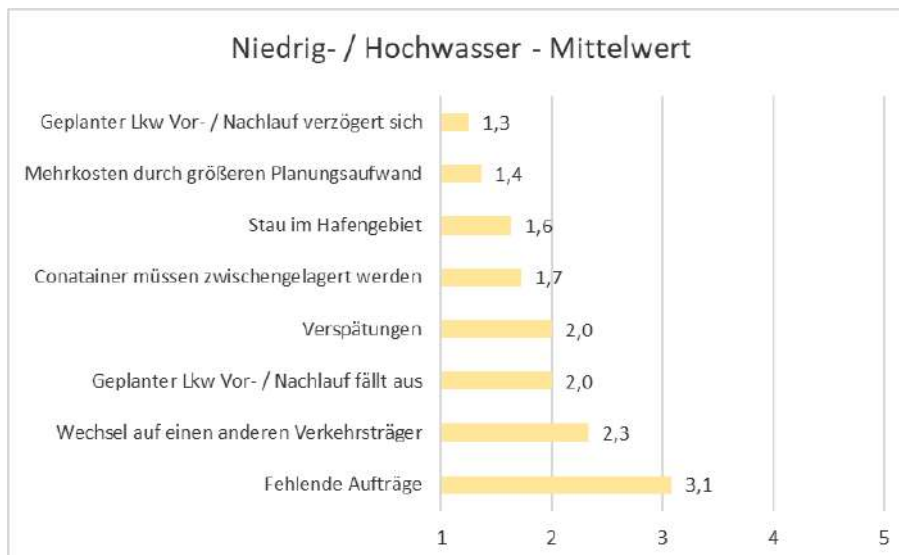


Abbildung 43: Betroffenheit bei Niedrig-/Hochwasser, Mittelwerte (Skala: sehr wahrscheinlich (1) – sehr unwahrscheinlich (5)).

### Betroffenheit & Anpassung

Um die Betroffenheiten und Anpassungsmaßnahmen für die jeweiligen Klimasignale miteinander vergleichen zu können, sollten die Unternehmen die Klimasignale gegeneinander auf einer Skala von +2 (im Vergleich sehr starke Zustimmung) bis -2 (im Vergleich sehr geringe Zustimmung) bewerten (siehe Abbildung 44). Dies ermöglicht eine Rangfolge für die unternehmerischen Betroffenheiten und Anpassungsmöglichkeiten der einzelnen Klimasignale. Es zeigt sich, dass die größte empfundene Betroffenheit Niedrigwasser vorzuweisen hat. Hier werden auch die größten Einschränkungen infolge von Niedrigwasser erwartet. Sowohl Starkregen als auch Hochwasser sorgen für Einschränkungen auf Unternehmerseite. Begründbar ist dies mit einer feineren Betrachtungsebene, die auch die Mikrologistik inkludiert. Diese ist aufgrund der Fahrzeugwahl und den Relationen stärker betroffen als der Fernverkehr. Die größte Anpassungskapazität wird für Hitze ausgesprochen. Für Starkregen ist eine räumliche Verlagerung der Transportrelation eine Anpassungsstrategie, sofern der zeitliche Aspekt dies zulässt. Dennoch bietet eine zeitliche Verschiebung bei Starkregen und Hitze eine Alternative neben der Transportroute. Eine modale Verlagerung der Transporte stellt eine weitere Alternative bei Niedrig- und Hochwasser dar. Primär sollte auf die Schiene verlagert werden, doch die limitierten Kapazitäten stellen ein Hemmnis dar – auch für den kombinierten Ladungsverkehr.

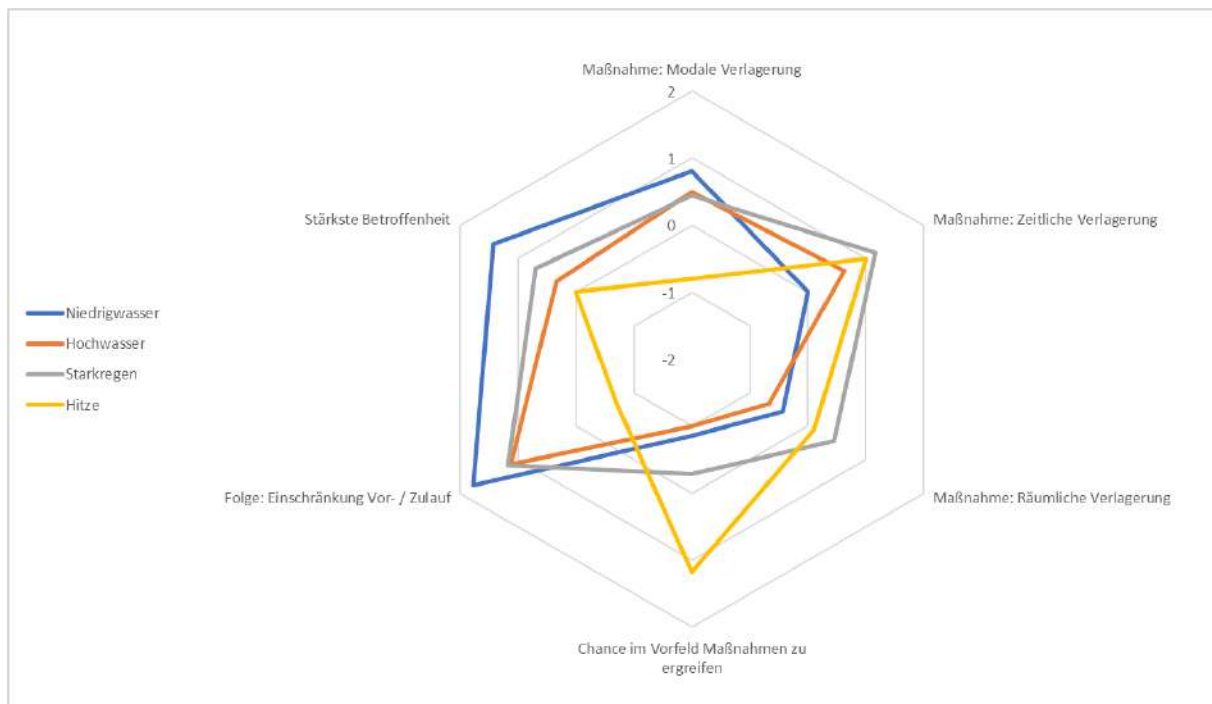


Abbildung 44: Vergleich der Auswirkungen von vier Klimasignalen.

### Anpassung

Neben den dargestellten Ergebnissen der Unternehmensbefragungen, ergaben sich weitere Erkenntnisse durch die Experteninterviews. Als hemmende Faktoren bei der Klimaanpassung wurden die Eigenschaften des Transportgutes, die Eigenschaften der Fahrzeuge, die Eigenschaften der Infrastruktur (Unterdimensionierung), fehlende Terminals für den kombinierten Verkehr, Kosten, fehlende Planungs-/Personenkapazität und die Transportmengen genannt. Die befragten Experten gaben zusätzlich mit, dass oft das fehlende Know-How für den kombinierten Verkehr fehlt. Ferner wurde generell die Aussage getätigt, dass eine fehlende Planungssicherheit in Bezug auf Extremereignisse ein großes Hemmnis darstellt. Als geeignete Anpassungsmaßnahmen werden die Erhöhung des Personals und die erhöhte Kooperation mit anderen Unternehmen genannt. Auch die Anpassung von Sicherheitspuffern stellt eine valide Anpassung dar. Des Weiteren stellen der Rückgang der Just-in-Time Produktion zu vermehrter Lagerhaltung und die Verwendung von robusteren Fahrzeugen in Verbindung mit alternativen Antrieben weitere Anpassungsmöglichkeiten dar. Auf Seiten der Experten sind ein verbesserter Arbeitsschutz, die Durchführung von kürzeren Wartungs- und Instandsetzungsintervallen, die Erstellung von Notfallplänen und der Ausbau von KV-Terminals weitere geeignete Anpassungsmaßnahmen. Kurz- und mittelfristige Lager, bzw. ein Ausbau der Lagerhaltung kann zusätzlich helfen, akute Störungen abzufangen.

Zusammenfassend zeigt die Erhebung, dass Klimaanpassung ein bedeutendes Thema für eine zukunftsfähige Logistik. Die Sicherstellung, bzw. Aufrechterhaltung der Supply-Chains ist in einer wirtschaftsorientierten Branche eine zentrale Komponente, aber auch die Aufrechterhaltung der Daseinsvorsorge sowie der Schutz der Gesundheit der BewohnerInnen ist strategisch in Planungsprozesse zu integrieren. Dem gegenüber ist zu erwähnen, dass der



Klimawandel und Extremereignisse in Bezug auf Logistikprozesse ein zunehmender, langsamer Prozess sind, dessen Auswirkungen in direktem Zusammenhang mit (Eintritts-)Wahrscheinlichkeiten stehen. Unternehmen, die nicht die wirtschaftliche Freiheit besitzen, sich dem Thema Klimawandelanpassung zu widmen, brauchen einfache entscheidungsunterstützende Planungstools und einen Orientierungsrahmen durch die Kommunen oder politische Entscheider. Der Strukturwandel bestimmt unmittelbar den Entscheidungsrahmen kleiner und mittelständiger Unternehmen. Zudem muss das Thema in die Stadt- und Verkehrsplanung sowie der Umweltplanung integriert behandelt werden. Langfristig müssen resiliente Infrastrukturen strategisch geplant werden, um Transport- und Versorgungsvorgänge sicher zu stellen, die Funktionsfähigkeit der Infrastrukturen im Falle von Extremereignisse wiederherzustellen und das Gesamtsystem Stadt mit seinen Einwohner:innen am geringsten zu belasten.

### 5.3.4 Haushaltsbefragungen

In Ergänzung der Untersuchungen des gaiac zum Einfluss von Stadtgrün auf die thermischen Belastungen (Vulnerabilität und Anpassungskapazitäten) auf den Menschen sowie der Stadtstrukturanalyse wurde das Thema Hitze vom RISP in Form einer Haushaltsbefragung zu Hitze und Gesundheit (subjektiv empfundene Vulnerabilität und Anpassungskapazitäten) durchgeführt.

#### Hitzebelastung und Gesundheit in Duisburg

Auf der Ebene von sozialen Folgen des Klimawandels werden öffentlich und wissenschaftlich insbesondere Effekte auf die humane Gesundheit untersucht und diskutiert. In den Fokus rückt dabei das Klimasignal Hitze, da es für einen Großteil von Mortalität und Morbidität im Bereich der verschiedenen Extremwetterereignisse ursächlich ist. Allein im Hitzesommer 2003 starben in Europa ca. 70.000 Menschen, davon ca. allein 7.000 im August in Deutschland, in Folge enormer Hitzebelastungen [14, 111]. Auch in den letzten Jahren gab es mehrfach Hitzetote im vierstelligen Bereich allein in Deutschland. So waren es laut Berechnungen des Robert Koch Instituts 2018 8.300, 2019 6.900 und 2022 4.500 Hitzetote [112]. Auf eine thermische Belastung bedingte Übersterblichkeit folgt zwar eine latente Untersterblichkeit, welche aber deutlich unter der Exzessmortalität liegt [113]. Viele Personen, die hitzebedingt sterben, hätten noch eine Lebenserwartung von einigen Jahren gehabt. Neben direkten Schäden durch Hitze und Sonnenlicht existieren in der Gesellschaft viele Vorerkrankungen (z.B. Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen), die sich unter thermischer Belastung deutlich verschlimmern und das Leiden erhöhen. Als besonders vulnerabel gelten zudem insbesondere Hochbetagte. Weitere Gruppen sind Schwangere, Kleinkinder, Babys und Personen, die sich oft im Außenbereich aufhalten müssen bzw. dort körperlich aktiv sind [114]. Bedenkt man den demografischen Wandel und die damit einhergehende deutliche Vergrößerung der Gruppe der alten Menschen in Deutschland, zeichnet sich eine zusätzliche Herausforderung hinsichtlich Hitzeschutz ab. Verdichtete urbane Räume, wie sie in einigen Duisburger Stadtteilen

vorliegen, und die dort lebende Bevölkerung sind besonders stark von thermischer Belastung betroffen.

### Methodisches Vorgehen

Vor diesem Hintergrund hat das RISP in Abstimmung mit der Stadt Duisburg eine Haushaltbefragung durchgeführt, um Daten und Anhaltspunkte für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen zu ermitteln. Entsprechende Daten sind einerseits auf der Handlungsebene elementar, z.B. für die Erarbeitung eines kommunalen Hitzeaktionsplans. Zugleich sind sie konstitutives Element für das konzipierte EUS für die kommunale Klimaanpassung. Die Leitfragen lauteten, wie die Duisburger:innen die Hitzebelastung persönlich und im stadtstrukturellen Kontext wahrnehmen und wie die Anpassungskapazitäten beschaffen sind. Im Sinne dieser Leitfragen ist ein differenziertes Befragungsdesign entwickelt worden.

Zunächst nach Auswertung des Stands der Forschung eine repräsentative Befragung der Duisburger Haushalte zu dem Thema Hitze und Gesundheit durchgeführt. Das Hauptziel war es, Vulnerabilitäten, Anpassungskapazitäten, Erwartungen und Bereitschaft der Bewohner:innen Duisburgs zu erheben, um ein detailliertes Bild der thermischen Belastungen, subjektiven Wahrnehmungen und Anpassungsmaßnahmen (bereits genutzte und ungenutzte) zu gewinnen. Insgesamt wurden 1.003 deutschsprachige Personen ab 18 Jahren mit Wohnsitz in Duisburg befragt. Die Erhebung wurde methodisch als CATI-Befragung (Computer Assisted Telephone Interview) durchgeführt. Die durchschnittliche Befragungszeit lag bei 20 Minuten.

### Wahrgenommene Hitzebelastung

Die Duisburger:innen wurden nach ihrer allgemein wahrgenommenen Hitzebelastung und nach der Hitzebelastung an sechs verschiedenen Orten (ÖPNV, Duisburger Innenstadt, Arbeitsplatz, Wohnquartier der Befragten, Wohneinheit der Befragten und öffentlichen Grünflächen) des alltäglichen Lebens im Sommer befragt (Abbildung 45). Auf der zugrunde gelegten Skala von 1-10 bedeutet ein Wert von 1 keine Hitzebelastung und ein Wert von 10 eine sehr starke Hitzebelastung. Die generelle Hitzebelastung liegt durchschnittlich bei 6,1. Im ÖPNV wird mit 7,2 Skalenpunkten, gefolgt von der Duisburger Innenstadt mit 6,7 die höchsten Belastungswerte angegeben. Beide Orte werden von den Bewohnern Duisburgs als Hotspots thermischer Belastung wahrgenommen. Die Niedrigste mit 5,0 bzw. 5,1 in der Wohneinheit der Befragten und öffentlichen Grünflächen. Bei einem Blick auf die empfundene thermische Belastung in den sieben Duisburger Stadtbezirken lässt sich der mit Abstand höchste Wert mit 5,8 Hitzebelastungspunkten für Duisburg-Mitte registrieren. Keine gravierenden Unterschiede können hingegen bei der Bewertung der Hitzebelastung in den anderen sechs Stadtbezirken ausgemacht werden. Hier liegen die Werte zwischen 5,0 bis 5,4.

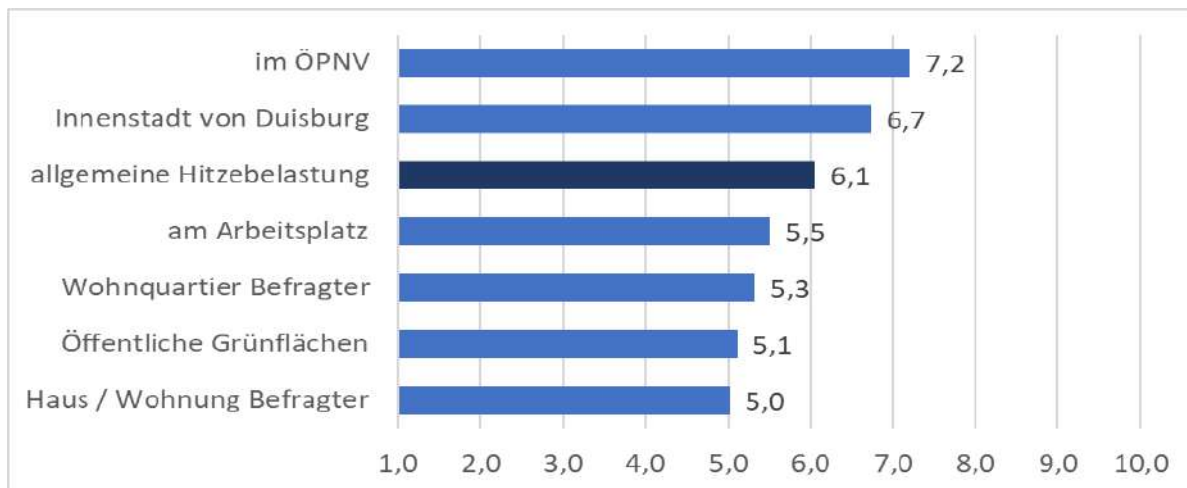


Abbildung 45: Wahrgenommene Hitzebelastung an verschiedenen Orten.

Ebenfalls untersucht wurden gesundheitliche Beschwerden bei Hitze. Die Interviewten wurden dazu befragt, ob sie bei thermischer Belastung oft, manchmal oder nie unter neun aufgelisteten Beschwerden leiden. Erhebliche Auswirkungen von Hitze und Hitzewellen auf das gesundheitliche Wohlbefinden der Duisburger:innen konnten dabei festgestellt werden. Mehr als die Hälfte der Bevölkerung klagt bei Hitze oft oder manchmal über vier verschiedene gesundheitliche Beschwerden (Schlafprobleme, Erschöpfung, Konzentrationsprobleme und Kreislaufprobleme). Vergleichsweise selten leiden die Befragten über Übelkeit, Aggressivität und Schwindel.

Im Zusammenhang mit gesundheitlichen Beschwerden widmete sich die Haushaltsbefragung auch Vorerkrankungen und ihrem Effekt auf die individuell wahrgenommene Hitzebelastung. Besonders in den Fokus gestellt wurden hitzesensible Vorerkrankungen wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Atemwegserkrankungen, Nierenerkrankungen, Stoffwechselstörungen und Adipositas. Personen, die keine Vorerkrankungen haben, geben im Durchschnitt eine um 0,5 Skalenpunkte geringere Hitzebelastung auf der oben vorgestellten 1-10er Skala an. Besonders stark fallen die Unterschiede zwischen keiner und einer Vorerkrankung im Bereich der Herz-Kreislauf-Erkrankungen mit einer Differenz von 0,8 Hitzebelastungspunkten, gefolgt von Atemwegserkrankungen und Adipositas mit 0,7 aus. Noch gravierender sind die Differenzen bei Multimorbidität. Die wahrgenommene Hitzebelastung liegt bei Menschen mit zwei bzw. drei Vorerkrankungen 0,9 bzw. 1,2 Skalenpunkte über Menschen ohne Vorerkrankungen. Mit der Anzahl der Vorerkrankungen steigt signifikant auch die wahrgenommene Hitzebelastung. Multimorbide Personen wurden als besonders vulnerabel gegenüber thermischer Belastung identifiziert.

Ein weiterer Zusammenhang konnte zwischen Art und Lage der Wohneinheit und der wahrgenommenen Hitzebelastung, mithin in stadtstruktureller Perspektive eruiert werden. Klassisch lassen sich Wohneinheiten in die Typen Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus einordnen. In der Kategorie Einfamilienhaus fällt die angegebene Hitzebelastung um einen halben Skalenpunkt geringer aus als im Vergleich zu Mehrfamilienhäusern. Bei Mehrfamilienhäusern ist die

entscheidende Determinante hinsichtlich der Hitzewahrnehmung die vertikale Lage innerhalb des Gebäudes. Unter dem Dach und eine Etage tiefer erfahren die Bewohner:innen eine vergleichsweise starke Hitzebelastung, wohingegen zu Wohnungen mit einem Puffer von zwei oder mehr Etagen zum Dach eine Hitzebelastung angegeben wird, die annähernd der in einem Einfamilienhaus entspricht. Demzufolge gelten Personen, die in Dachgeschosswohnungen leben, als besonders von thermischer Belastung betroffen.

Weitere Faktoren, die in Hinblick auf die Lage der Wohneinheit und der subjektiven Hitzebelastung analysiert wurden, ist der Zugang zu einer privaten oder halböffentlichen Grünfläche, die Erreichbarkeit einer öffentlichen Grünfläche (innerhalb von zehn Minuten Fußweg) und die Erreichbarkeit einer Abkühlungsmöglichkeit (See, Schwimmbad) in maximal 20 Minuten. Bei allen drei Faktoren zeigt sich bei Zugang bzw. Erreichbarkeit eine geringere Hitzebelastung als bei keiner Zugangsmöglichkeit bzw. schwierigem Zugang. Personen, die Zugang zu einer privaten oder halböffentlichen Grünfläche haben, weisen eine um 0,35 Skalenpunkte geringere Hitzebelastung aus als Personen, die lediglich Zugang zu öffentlichen Grünflächen haben. Zugleich ließ sich feststellen, dass 85 % der Duisburger:innen über den Zugang zu einer privaten oder halböffentlichen Grünanlage verfügen. 92 % können eine öffentliche Grünanlage in zehn Minuten Fußweg erreichen, bei einer Abkühlungsmöglichkeit sind dies 75 % der Duisburger:innen.

### Wissen und Informationen

Ein weiterer Themenblock widmete sich zum einem dem Wissen der Bevölkerung über hitzeschützende Maßnahmen und das richtige Verhalten bei Hitze und zum anderen den Informationen rund um das Thema Hitzeschutzmaßnahmen und das richtige Verhalten bei thermischer Belastung. Bei Letzterem lag der Fokus insbesondere auf der Nützlichkeit der Informationen verschiedener Quellen aus dem Bereich Medien, Gesundheit, Dienststellen der Stadt und dem sozialen Umfeld. Außerdem wurde erhoben, welche Quellen besonders in der Verantwortung gesehen werden, um Informationsarbeit zu leisten.

Das eigene Wissen über hitzehemmende Maßnahmen und das richtige Verhalten bei Hitzewellen wurde mit der bekannten 1-10 Skala abgefragt. 1 steht in diesem Fall für kein Wissen und 10 für ein sehr gutes Wissen. Die Duisburger:innen verorten ihr eigenes Wissen durchschnittlich mit einem Wert von sieben relativ gut. Der Anteil derjenigen, die einen Wert von unter fünf angeben, ist mit insgesamt 8 % der Befragten vergleichsweise gering. Fast 50 % hingegen bewerten ihr eigenes Wissen mit einem Wert von acht oder höher als sehr gut. Die Informationsarbeit von Medien, öffentlichen Stellen und Dienstleistern im Gesundheitsbereich über hitzehemmende Maßnahmen und das richtige Verhalten bei Hitzewellen wird mit einem Durchschnittswert von 5,7 auf der Skala von 1-10 mittelmäßig bewertet. Weniger als 10 % empfinden die Informationen von Medien, öffentlichen Stellen und Dienstleistern im Gesundheitsbereich als sehr gut (Werte 9 bis 10), ein ähnlich großer Teil der Stadtbevölkerung bewertet die Informationen als sehr schlecht (Werte 1 bis 2). Werden verschiedene Quellen

ausdifferenziert und danach gefragt, ob sie hilfreiche Informationen über Hitzeschutzmaßnahmen und das richtige Verhalten bei Hitzewellen leisten, schneiden Ärzt:innen und medizinische Fachangestellte am besten ab. 67 % geben an dort nützliche Informationen zu erhalten. Rund 50 % bewerten ebenfalls die Informationen von Zeitungen, Radio, Fernsehsendern und dem Internet als hilfreich. Soziale Medien spielen keine Rolle, da lediglich 23 % der Duisburger:innen angeben in den sozialen Medien wie Facebook, Instagram usw. hilfreiche Informationen zu erhalten. Lediglich 18 % sagen, dass sie von den Dienststellen der Stadt nützliche Informationen bekommen.

Weiterhin wurde erhoben, welche von den genannten Quellen die Bewohner:innen Duisburgs besonders in der Verantwortung sehen, sie über Hitzeschutzmaßnahmen und das richtige Verhalten bei Hitze zu informieren (Abbildung 46). Besonders in der Pflicht sehen die Befragten mit 39 % die Dienststellen der Stadt: eine starke Dysbalance zum Status quo, geben wie erwähnt nur 18 % an von den Dienststellen der Stadt hilfreiche Informationen zu erhalten. Ebenso zuständig werden Fernsehsender, Radio, Ärzt:innen und medizinische Fachangestellte gesehen. Vor allem Letztere liefern gemäß Befragungsergebnis bereits eine gute Informationsarbeit zu Hitzeschutzmaßnahmen und richtigem Verhalten bei thermischer Belastung. Kaum in der Verantwortung werden hingegen soziale Medien, Familie, Bekannte, Pflegedienste sowie Pflegekräfte gesehen.

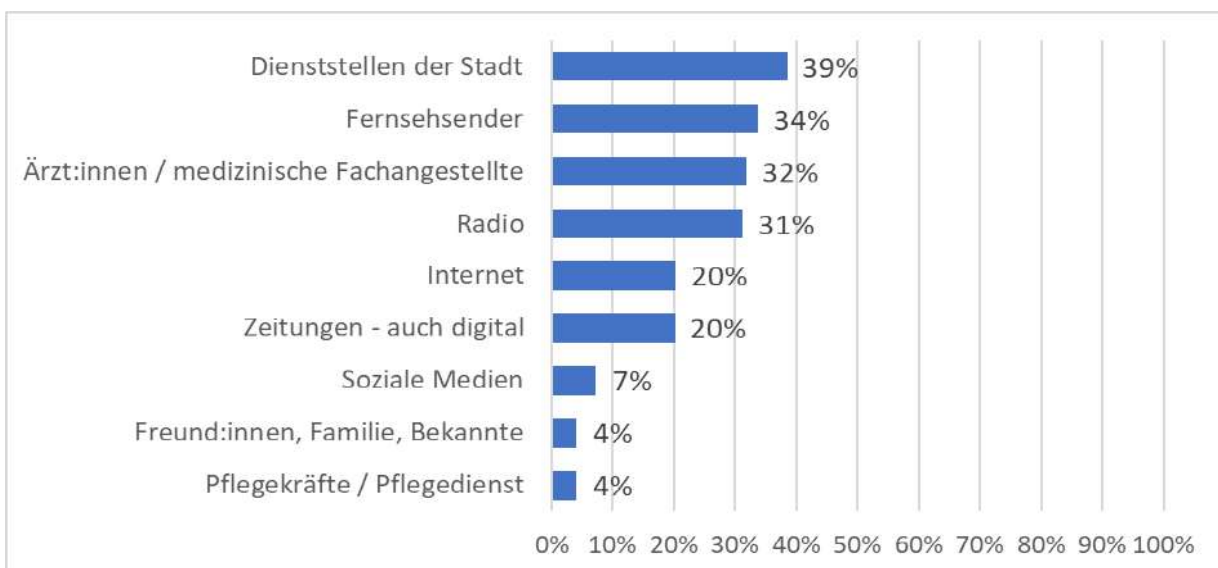


Abbildung 46: Auswertung zur Frage: Wer steht laut den Befragten in der Pflicht, sie über hitzehemmende Maßnahmen und das richtige Verhalten bei thermischer Belastung zu informieren?

### Hitzeschutzmaßnahmen

In der Wissenschaft werden eine ganze Reihe von individuellen Hitzeschutzmaßnahmen in Betracht gezogen, die sich über „profane“ Maßnahmen des Lüftens und ausreichend Wasser trinken bis zu aufwendigeren Hilfsmitteln des Hitzeschutzes wie der Installation einer Klimaanlage oder dem Umzug in eine kühlere Wohngegend ziehen. Auf der Makroebene der Duisburger Haushalte und seiner Bewohner:innen hat die Befragung die Anwendung verschiedener

Hitzeschutzmaßnahmen in der Gegenwart, die Anwendung in der Zukunft und die Anwendung von aufwendigeren Hitzeschutzmaßnahmen im Vergleich zwischen von Eigentümer:innen und von Mieter:innen bewohnten Wohneinheiten erhoben.

Insgesamt wurden 13 der Literatur entnommene Hitzeschutzmaßnahmen abgefragt (Abbildung 47).

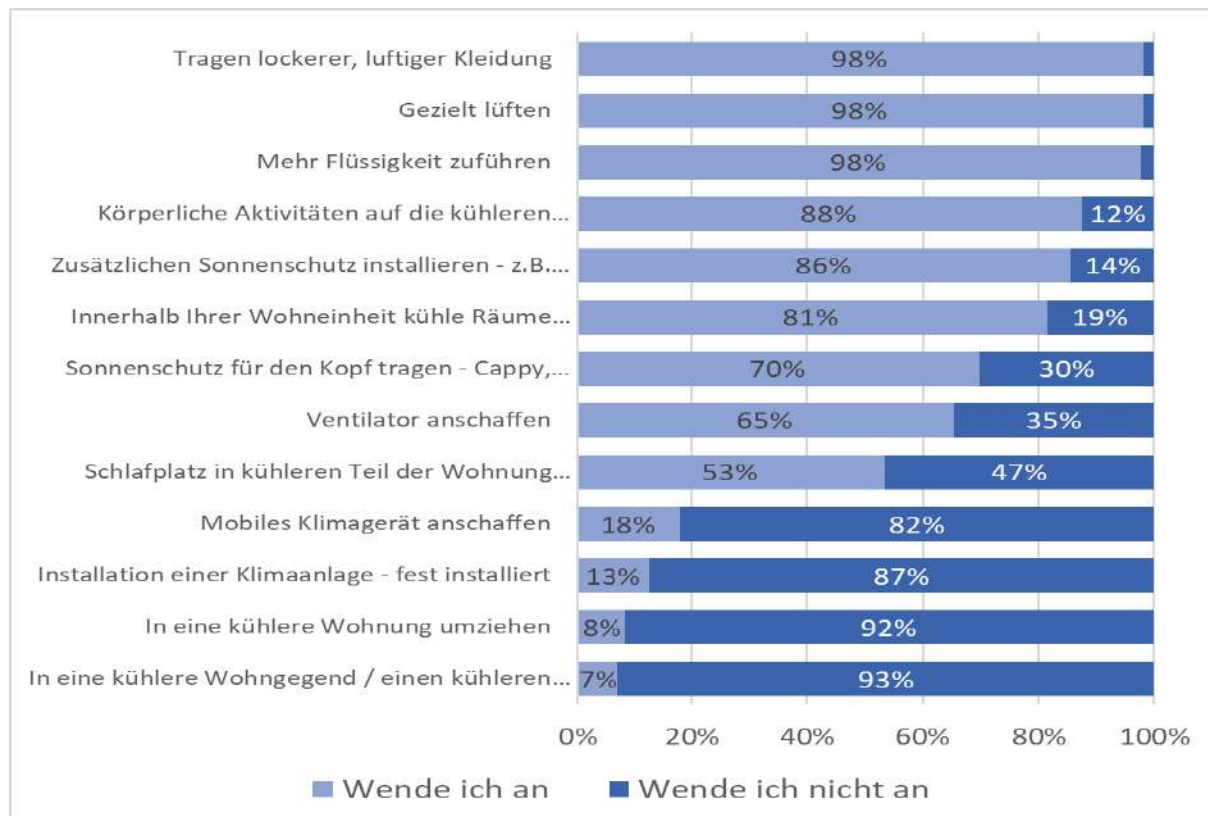


Abbildung 47: Anwendung bzw. Nicht-Anwendung von individuellen Hitzeschutzmaßnahmen.

Die Maßnahmen sind mehrheitlich bekannt und im Durchschnitt wenden die Duisburger:innen fast acht von den 13 Maßnahmen an. Vor allem niedrigschwellige und kostengünstige Maßnahmen werden bereits von fast allen Befragten angewendet. In diese Kategorie fallen das Tragen luftiger Kleidung, gezieltes Lüften, erhöhte Flüssigkeitszufuhr, das Verlegen körperlicher Aktivitäten auf die kühleren Stunden des Tages, die Installation von Sonnenschutz (Rollläden, Markisen, Jalousien usw.), kühlere Räume innerhalb der Wohnung aufsuchen, das Tragen von Sonnenschutz für den Kopf sowie die Anschaffung eines Ventilators. Aufwendigere und kostenintensive Mittel des Hitzeschutzes, wie unter anderem Umzüge in eine kühlere Wohneinheit (angewendet von 8 %) oder Wohngegend (angewendet von 7 %) und die Anschaffung einer Klimaanlage (angewendet von 17 %) werden hingegen von einer deutlichen Mehrheit der Bevölkerung nicht genutzt. Zwei Ursachenbündel scheinen dafür ausschlaggebend zu sein. Einen Einfluss hierauf hat offenbar erstens die finanzielle Ausstattung der Haushalte. So wenden Haushalte mit einem überdurchschnittlichen Haushaltsnettoeinkommen mehr Hitzeschutzmaßnahmen an als Haushalte mit einem unterdurchschnittlichen Haushaltsnettoeinkommen. Bei genauer Untersuchung stellt sich heraus, dass die finanzielle

Ressourcenausstattung insbesondere bei monetär aufwendigen Maßnahmen wie der Installation einer Klimaanlage die determinierende Rolle spielt. Zweitens stellt die (emotionale) Bindung zur Wohneinheit, Nachbarschaft und Stadtteil ein weiteres Ursachenbündel dar. Vor allem bei Maßnahmen, die einhergehen mit einer Veränderung des Lebensumfeldes, wie ein Umzug in eine kühlere Wohneinheit oder Wohngegend, scheint die Bindung zu der bisherigen räumlichen und sozialen Umgebung der Hauptgrund für die Meidung einer einschneidenden hitzehemmenden Maßnahme zu sein. Mieter:innen, die in der Regel über eine geringere finanzielle Ausstattung verfügen als Personen, die in ihrem Eigentum leben, sind eher bereit Maßnahmen umzusetzen, die einhergehen mit einer Veränderung des Lebensumfeldes, als Eigentümer:innen.

Auch wurde bei Nicht-Anwendung einer Maßnahme gefragt, ob die Anwendung in der Zukunft wahrscheinlich oder unwahrscheinlich ist. Hier konnten lediglich die Antworten zu fünf Maßnahmen ausgewertet werden (Anschaffung mobiles Klimagerät, Installation einer festen Klimaanlage, Schlafplatz in kühleren Teil der Wohnung verlegen, Umzug in kühlere Wohneinheit, Umzug in kühlere Wohngegend bzw. Stadtteil). Es liegt keine ausgeprägte Bereitschaft in der Duisburger Bevölkerung vor die genannten fünf Hitzeschutzmaßnahmen in der Zukunft anzuwenden. Fast 50 % erachten es sogar als eher unwahrscheinlich bis sehr unwahrscheinlich, nur eine dieser Maßnahme umzusetzen.

Neben den 13 individuellen Hitzeschutzmaßnahmen wurden fünf aufwendigere Maßnahmen des Schutzes vor thermischer Belastung abgefragt, die wie das Streichen von Fassaden in heller Farbe, das Anpflanzen von Bäumen und Pflanzen sowie die Verwendung von Dachbegrünung, allein die Immobilieneigentümer:innen umsetzen können. Unterschieden wurde in der Befragung und Auswertung zwischen von Eigentümer:innen bewohnten Wohneinheiten und klassischen Mietwohnungen. Der Anteil von bereits umgesetzten aufwendigeren Maßnahmen des Hitzeschutzes fallen in der Wahrnehmung von Mieter:innen im Vergleich zu der von Eigentümer:innen bewohnten Wohneinheiten deutlich geringer aus. Bei circa 50 % der Mietwohnungen wurden bereits zwei Maßnahmen umgesetzt, wohingegen dies bei von Eigentümer\*innen bewohnten Wohneinheiten auf 90 % zutrifft. Dementsprechend existieren bei Mietwohnungen deutlich größere Potenziale hinsichtlich der Anpassung an thermische Belastung. Die Verwendung von Dachbegrünung und die hitzeangepasste Modernisierung der Wohneinheit (z.B. Verwendung hitzeabweisender, nicht hitzespeichernder Baumaterialien) sind zwei Maßnahmen, die bei beiden Untersuchungseinheiten nur von einer Minderheit bereits umgesetzt wurde. Das Anpflanzen von Bäumen und Pflanzen wird demgegenüber von einer Mehrheit angewendet. Bei von Eigentümer:innen bewohnten Wohneinheiten trifft dies zudem noch auf aufwendigere Verschattungseinrichtungen (z.B. Rollläden und Außenjalousien) und das oben erwähnte Streichen der Fassaden zu, während es bei Mietwohnungen eine Maßnahme der Minderheit ist.

#### PKW-Stellplätze & Buddy-Systeme

Neben der Anwendung von Hitzeschutzmaßnahmen wurde auch die Akzeptanz für eine regulative Klimaanpassung erhoben. Im Konkreten geht es um die Bereitschaft, den Wegfall einiger PKW-Parkplätze im Wohnumfeld zugunsten einer Grünfläche mit Baumbepflanzung zu tolerieren. Es handelt sich dabei um eine Maßnahme, die durch Verschattung, Erhöhung des Grünvolumens und Entsiegelung nicht nur einen positiven Effekt auf die thermische Belastung auf der Mikroebene hat, sondern zugleich die Ausmaße des Extremwetterereignis Starkregen abschwächen kann. Gegen den Wegfall von einigen Parkplätzen für eine Grünfläche mit Baumbepflanzung im räumlichen Umfeld der Duisburger:innen sind gut ein Drittel (18 % gar nicht gut; 18 % weniger gut). Den Wegfall hingegen bewertet eine Mehrheit als sehr gut (37 %) bzw. als eher gut (26 %).

Abschließend wurde die Bereitschaft der Bürger:innen abgefragt, sich aktiv an einem sogenannten Buddy-System zu beteiligen (Abbildung 48). In Buddy-Systemen betreuen ehrenamtliche Freiwillige hitzeempfindliche, oft alleinlebende Menschen bei Hitzewellen mit Besuchen und Telefonaten. Der Ursprung geht auf einige Kantone in der Schweiz zurück, die zum Teil seit Jahrzehnten eine Evidenz für eine starke und positive Wirkung solch einer Maßnahme auf den Rückgang von Hitzetoten aufweisen [115]. Entsprechende Systeme spielen eine wichtige Rolle in vielen Hitzeaktionsplänen. Die Bereitschaft wurde mit der 1-10 Skala erhoben. 1 steht für eine sehr geringe Bereitschaft und 10 für eine sehr hohe. Im Durchschnitt kann eine durchschnittliche Bereitschaft von 5,4 festgestellt werden. 11 % der Duisburger:innen geben mit Werten von 9 oder 10 eine sehr hohe Bereitschaft an sich als Freiwilliger oder Freiwillige an einem Buddy-System zu beteiligen. 17 % sind hierzu nicht oder kaum bereit (Werte von 1 und 2).

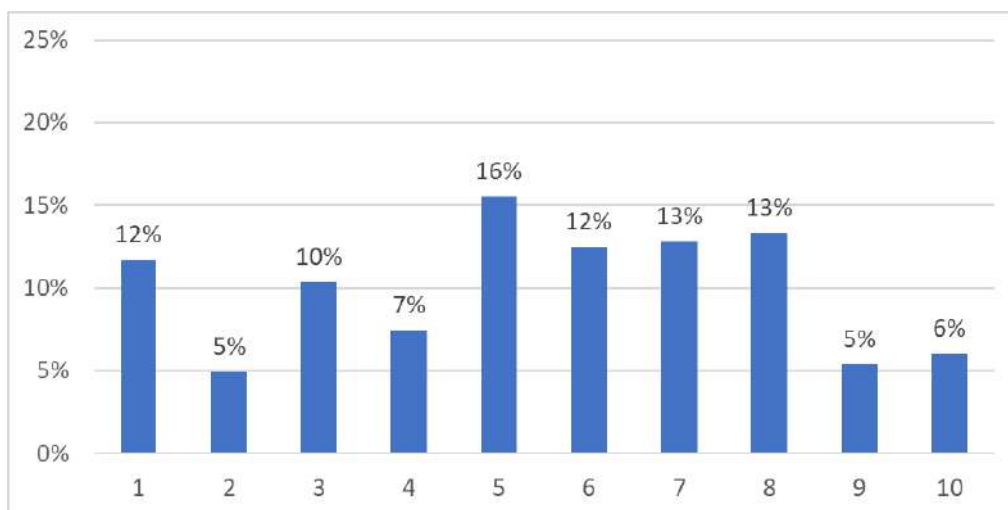


Abbildung 48: Bereitschaft der Duisburger:innen sich als ehrenamtliche Freiwillige an einem Buddy-System zu beteiligen.

### Multivariate Statistik: Regressionsmodell der Hitzebelastung

Neben deskriptiven Verfahren der Datenauswertung wurde auch auf multivariate Verfahren zurückgegriffen. Im Mittelpunkt stand dabei eine Analyse der subjektiven Hitzebelastung und ihrer Prädiktoren mithilfe von mehreren multiplen linearen Regressionen. Anschließend



vorgelegt werden die Ergebnisse des Regressionsmodells mit der höchsten Modellgüte. Die berücksichtigten unabhängigen Variablen erklären mit einem bereinigtem  $R^2$  von 0,31 etwas mehr als 30 % der Varianz der wahrgenommenen Hitzebelastung. Eine ganze Reihe von verwendeten Prädiktoren zeigt signifikante Korrelationen an. Der mit Abstand stärkste Effekt geht von der Anzahl der gesundheitlichen Beschwerden aus. Je öfter Personen oft oder manchmal über hitzebezogene gesundheitliche Beschwerden klagen, desto höher die subjektive Hitzebelastung. Ebenfalls besteht ein positiver Zusammenhang zwischen der thermischen Belastung und der Anzahl der Vorerkrankungen. Je mehr Vorerkrankungen vorliegen, desto höher wird die Hitzebelastung wahrgenommen. Betrachtet man sozioökonomische Kennzahlen wie das formale Bildungsniveau und das Haushaltsnettoeinkommen, besteht eine Korrelation zwischen dem sozioökonomischen Status und der Hitzebelastung. Personen mit einem hohen Bildungsabschluss und einem überdurchschnittlichen Haushaltsnettoeinkommen sind demnach weniger von thermischer Belastung betroffen als Individuen mit einem niedrigen Bildungsniveau und geringen finanziellen Ressourcen. Weitere Korrelationen bestehen zwischen dem Geschlecht und der Hitzebelastung. Männer scheinen hier eine geringfügig stärkere Beeinträchtigung wahrzunehmen. Kontraintuitiv konnte zudem festgestellt werden, dass ein positiver Zusammenhang zwischen der Anzahl der umgesetzten Hitzeschutzmaßnahmen und der subjektiven Hitzebelastung besteht. Ein Ergebnis, das Raum für ambivalente Interpretationen lässt, welche letztendlich mit Daten einer Querschnittsstudie nicht final beantwortet werden können. Keine signifikanten Zusammenhänge bestehen zwischen dem Alter, ob eine Person alleinlebend oder nicht-alleinlebend ist, dem Migrationshintergrund bzw. keinem Migrationshintergrund, dem selbstwahrgenommenen Gesundheitszustand und dem selbsteingeschätzten Wissen über hitzehemmende Maßnahmen und das richtige Verhalten bei Hitze und der Hitzebelastung.

Demzufolge sind - zusammengefasst mit den deskriptiven Ergebnissen - Personen, die oft über hitzebezogene gesundheitliche Beschwerden klagen, Vorerkrankungen haben, einen geringen sozioökonomischen Status aufweisen, oft ÖPNV fahren, in Duisburg-Mitte und in einer Dachgeschosswohnung leben besonders vulnerabel gegenüber Hitze. Über eine gewisse Resilienz verfügen hingegen Menschen mit wenig gesundheitlichen Beschwerden mit Hitzebezug, die ohne Vorerkrankungen sind, einen überdurchschnittlichen sozioökonomischen Status haben, Hauseigentümer:innen oder Mieter:innen einer Wohnung mit zwei Etagen Abstand zum Dach sind und den ÖPNV eher selten nutzen.

#### Vulnerabilität verschiedener Typen durch Hitze (explorative Clusteranalyse)

Auf Basis einer explorativen Clusteranalyse konnten vier verschiedene Hitzetypen der Duisburger Stadtgesellschaft ermittelt werden (Abbildung 49). Bei einer explorativen Clusteranalyse werden verschiedene Bevölkerungstypen identifiziert, die die allgemeine subjektive Hitzebelastung sowie die thermische Belastung an vier Orten (Innenstadt Duisburg, Wohneinheit der Befragte, Wohnquartier der Befragten und öffentliche Grünflächen) gruppenintern

weitestgehend homogen wahrnehmen und sich zu anderen Clustern abgrenzen lassen. Unterschieden wird zwischen den folgenden vier Hitzetypen: der vulnerable multimorbide ältere Teil der Stadtgesellschaft (starke Hitzebelastung), eher jungen hitzesensiblen Duisburger:innen (eher starke Hitzebelastung), die eher robusten Bewohner:innen (eher geringe Hitzebelastung) und die hitzeresiliente Bevölkerungsgruppe (geringe Hitzebelastung).

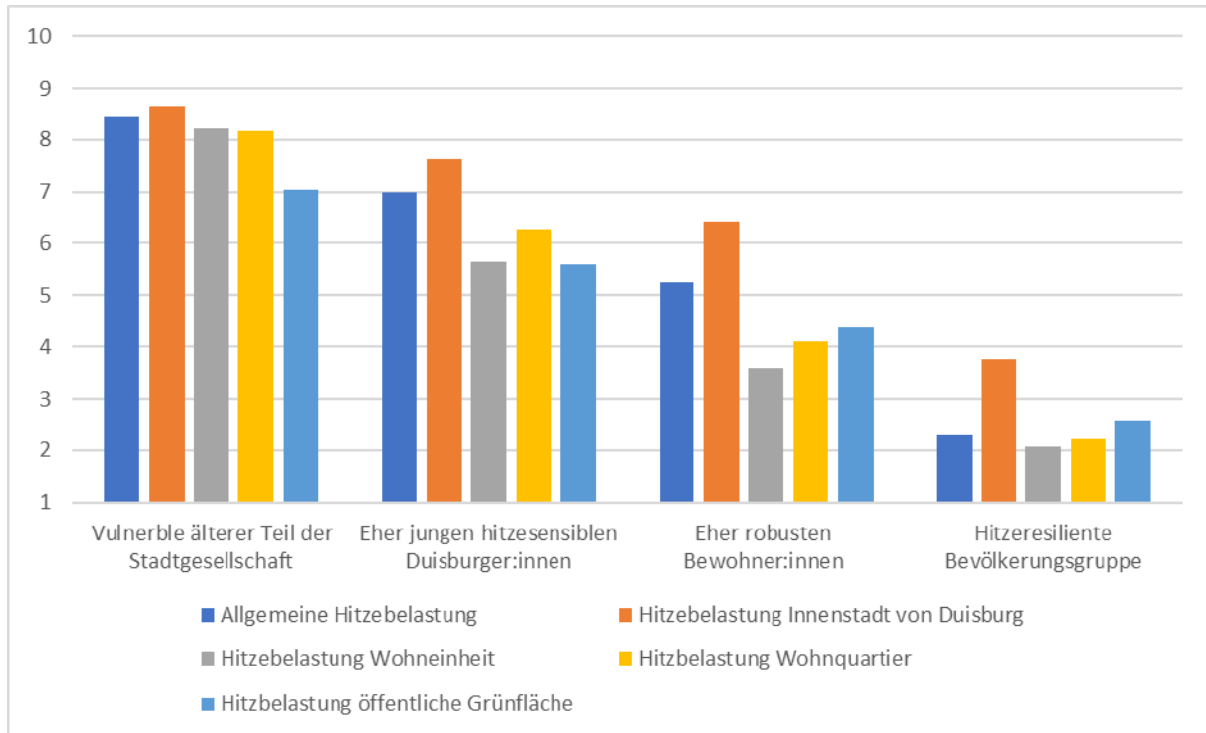


Abbildung 49: Vulnerabilität verschiedener Cluster der Duisburger Stadtgesellschaft.

- (1) Der vulnerable multimorbide ältere Teil der Stadtgesellschaft (starke Hitzebelastung) ist gekennzeichnet durch ein hohes Alter, einen sehr niedrigen sozioökonomischen Status, Multimorbidität, viele hitzebezogene gesundheitliche Beschwerden und in einer hitzesensiblen Wohneinheit lebend.
- (2) Die eher jungen hitzesensiblen Duisburger:innen (eher starke Hitzebelastung) verfügen über das höchste formale Bildungsniveau aller Cluster, gepaart aber mit unterdurchschnittlichen finanziellen Ressourcen. Ebenfalls klagen sie überdurchschnittlich über hitzebezogene gesundheitliche Beschwerden und Vorerkrankungen.
- (3) Im Gegensatz dazu stellen die eher robusten Bewohner:innen Duisburgs (eher geringe Hitzebelastung) eine finanziell starke, männliche Gruppe mit sehr wenig Morbidität und gesundheitlichen Beschwerden dar, bei der zudem Personen mit Migrationshintergrund überproportional auftreten.
- (4) Als besonders stark gegenüber thermischer Belastung gilt die hitzeresiliente Bevölkerungsgruppe (geringe Hitzebelastung). Sie verfügt über einen hohen sozioökonomischen Status und einer Wohneinheit mit der geringsten Hitzebelastung, aber klagt dennoch durchschnittlich über hitzebezogene gesundheitliche Beschwerden.

### 5.3.5 Anwendungspotenzial in der Stadt Duisburg

Das Zusammenspiel von Verwaltung, Politik, und Zivilgesellschaft hat mehrere Facetten, die jeweils ihren Einfluss auf die Entscheidungsfindung und zugrundeliegender Kriterien haben. Die Stadtverwaltung ist nicht ausschließlich eine rein anweisende Ordnungsbehörde mit dem Stadtrat als Leitungsinstanz, sondern auch kooperativer Natur, wenn sie politische Entscheidungen an Einwohner:innen kommuniziert und als Partizipationshost auftritt, um Interessen und Bedürfnisse der Zivilbevölkerung in die Willensbildung einfließen zu lassen. Die Auslegung als Stadtkonzern bringt gleichwohl die Wirtschaftlichkeit von Entscheidungen als höchstes Kriterium mit. Diese zugrundeliegenden Ansichten der kommunalen Selbstverwaltung, die sektorale Aufgabenwahrnehmung, hierarchische Kompetenzverteilung und tradierte Kommunikationsmuster geben den Rahmen für die Anwendung des anvisierten EUS. Von großer Relevanz ist eine Legitimierung der entwickelten Bewertungsmethodik und darin verwendeter Kriterien und Indikatoren. Für die anwendungsreife Entwicklung und den Transfer des EUS braucht es einen Kreis von kompetenten Entscheidenden und Anwender:innen aus dem Stadtkonzern zur Mitvorbereitung, Setzung von Rahmenlinien und Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses wie Klimawandelanpassung als Querschnittsthema von den städtischen Sektoren angegangen werden kann. Neben den zu definierenden Indikatoren und Bewertungsstufen von Vulnerabilitätsmatrizen und Priorisierung von Handlungsräumen, müssen die Fachkompetenzen der Wirkmodellierer:innen ergänzt werden um geeignete Herangehensweisen aus der Transformationslehre und Urban Governance. Das Anwendungspotenzial des EUS ist bestimmt von der Auseinandersetzung zwischen städtischen Stellen, Unternehmen, und Stadtgesellschaft über die Governance- und Rollenstrukturen der Entwicklung Duisburgs.

Das EUS kann hierbei selbst einen Beitrag leisten, denn es bedarf einer Auseinandersetzung mit den modellierten Ergebnissen zu Gefahren, Risiken, und Maßnahmen, um Entscheidungen unterstützen zu können. Das EUS unterstützt die Entscheidungsfindung, übernimmt jedoch nicht den letztlichen Entscheid von Verwaltungsmitarbeitenden und politischen Entscheidenden. Mit dem Entscheidungsunterstützungstool als eine Art Selbstlerntool können sich Verwaltungsabteilungen und Einrichtungen im Stadtkonzern also mit der Klimawandelanpassung auseinandersetzen, um die Thematik angesichts ihrer Facharbeit und jeweiligen Entscheidungskompetenz zu verstehen. In Abbildung 50 ist der übliche Weg kommunaler Entscheidungen aufgezeigt, mit dem Wechselspiel aus Verwaltungseinheiten und den höheren, entscheidungskompetenten Ebenen. Das EUS ist mit fachlicher Tiefe geeignet, um vorbereitende und überarbeitende Tätigkeiten der Verwaltung zu begleiten, sowie die Entscheidungsfähigkeit der folgenden Ebenen zu erhöhen, durch die jeweilige Sensibilisierung der Entscheidenden hinsichtlich der Auswirkungen ihres Handelns mit dem Klimawandel.

Neben dem Engagement in R2K-Klim+ lies die Stadt Duisburg ein vom Bund gefördertes Klimawandelanpassungskonzept (KLIAS) mit Maßnahmenvorschlägen erarbeiten ([SessionNet | Klimawandel-Anpassungskonzept \(KLIAS\) \(krz.de\)](#)). Die Ausarbeitung wurde durch eine

qualifizierte Kenntnisnahme des Stadtrates angenommen, dieser fordert dabei jedoch eine Konkretisierung der Maßnahmen ([Antrag \(krz.de\)](#)). Die Detailtiefe und Interdisziplinarität des EUS zeichnen sich dafür aus, eine solche Weiterarbeit mit KLIAS zu unterstützen.

- Mehrphasig
- Multidimensional
- Zyklisch

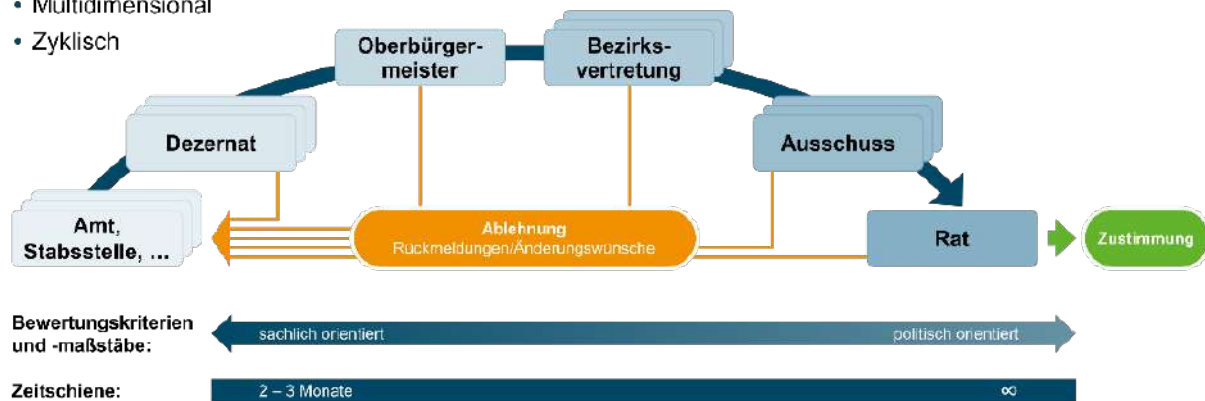


Abbildung 50: Kommunaler Entscheidungsprozess mit bezeichnenden Charakteristika.

## 5.4 Anpassungsmaßnahmen

Die Expositionsmodellierungen ergeben im Verschnitt mit weiteren Daten (vgl. Kapitel 5.7) sogenannte Potenzial- und Defiziträume in der Stadt Duisburg. Zur Verringerung der Vulnerabilitäten in diesen standortspezifischen Räumen können Klimafolgenanpassungsmaßnahmen implementiert werden. Informationen zu potenziellen Maßnahmen als auch alle für den Entscheidenden praxisrelevanten Informationen wurden in einem Maßnahmenkatalog gebündelt.

Die Auswahl geeigneter Maßnahmen mit dem übergeordneten Ziel, diese im EUS zu integrieren, erfolgte anhand der folgenden Arbeitsschritte in Abbildung 51 in bilateralen und gesamt-konsortialen Absprachen. Hierbei waren fortwährende Iterationsprozesse mit Anwender:innen und den technischen Ausarbeitenden des EUS elementar.

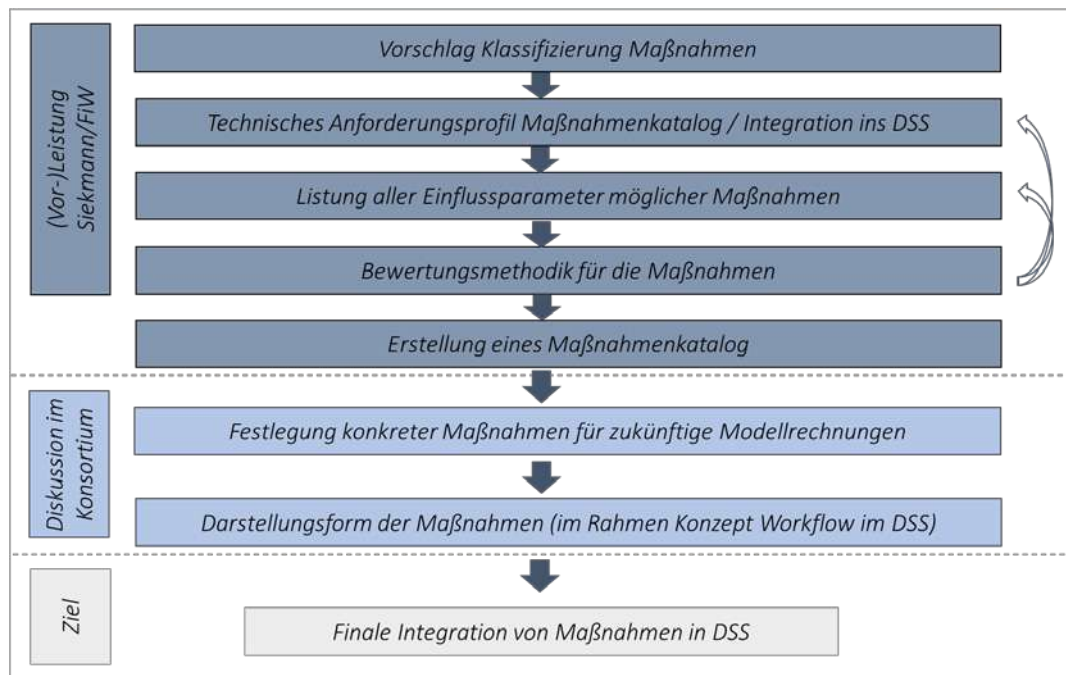


Abbildung 51: Arbeitsschritte zur Auswahl von Maßnahmen.

Die Klassifikation der Maßnahmen erfolgte anhand der Klimasignale, Typen, Kategorien und des räumlichen Bezugs. Das technische Anforderungsprofil als auch die Erarbeitung aller veränderlichen Einflussparameter in den Modellierungen definierten letztlich die in den Modellnetzwerken abbildbaren Maßnahmen. Die parallel erarbeitete Bewertungsmethodik legte die für den Entscheidenden praxisrelevanten Informationen fest. So wurden bei der Konzeptionierung des Maßnahmenkatalogs die Anforderungen aus Wissenschaft und Anwendung berücksichtigt.

Nach Dialogprozessen mit Anwender:innen wurde der Maßnahmenkatalog neben modelltechnisch abbildbaren Maßnahmen um weitere Empfehlungen und Maßnahmen zur kommunalen Klimaanpassung ergänzt. Letzteres wurde federführend durch die ingenieurtechnischen Praxiserfahrungen in kommunalen Anpassungsprojekten der Siekmann GmbH definiert. Erste Grundlage für die Zusammenstellung von geeigneten Maßnahmen zur Klimaanpassung waren zunächst Erfahrungen aus den mit den Kommunen erstellten Hochwasser- und Starkregenkonzepten in Rheinland-Pfalz. Diese zunächst speziell auf die Klimasignale Hochwasser und Starkregen abgestimmten Maßnahmentypen wurden mit Maßnahmen aus durchgeführten Recherchen und Rücksprache mit den Projektpartnern für die übrigen Klimasignale Niedrigwasser, Dürre und Hitze ergänzt. Da es sich beim EUS um ein Tool für die kommunale Ebene handelt, wurden überregionale Maßnahmen, deren Umsetzung die Zuständigkeit zusätzlicher Akteure tangierten, zunächst nicht mit aufgenommen. Neben der von öffentlicher Hand getragenen Maßnahmen wurden auch Maßnahmen der privaten Eigenvorsorge der Bevölkerung auf kommunaler Ebene berücksichtigt. Dies betraf neben den privaten baulichen Maßnahmen, wie Rückschlagklappen oder Rückhaltung von Regenwasser auf dem Grundstück auch das Bauen und die Ablagerungen von Materialien im direkten Risikogebiet. Diese Maßnahmen der

Informations- und Verhaltensvorsorge wurden im Rahmen des Maßnahmenkatalogs mit aufgenommen, die Anzahl summierte sich letztendlich auf 54 Maßnahmen.

Als Dateiformat für die Kommunikation der Maßnahmen und der dazugehörigen praxisrelevanten Informationen wurde eine Excel-Tabelle gewählt. Die Darstellung der Maßnahmeninformationen in Form von Steckbriefen wurde von den kommunalen Anwender:innen aufgrund bestehender Erfahrungen abgelehnt. Die Tabellenform ermöglichte die übersichtlichere Darstellung von Informationen und die Festlegung von Attributen. Zusätzlich können über die Filterfunktionen Maßnahmen gezielt anhand der Attribute gesucht werden. Die Wahl der Attribute erfolgte über die Relevanz für den Entscheidungsprozess einer Kommune und für die klare Zuordnung von Maßnahmen schlussendlich im Entscheidungsunterstützungssystem.

Der Maßnahmenkatalog umfasste folgende Abschnitte (Tabelle 19):

*Tabelle 19: Informationen im Maßnahmenkatalog.*

Abschnitt	Bestandteile
<b>Klassifizierung</b>	Klimasignal, Maßnahmentitel/-typ, Kategorie, räumlicher Bezug
<b>Beschreibung</b>	Allgemeine Informationen, Umsetzungsgrundlage, Umsetzungszeitraum, maßgebliche Akteure, Synergien, Konflikte
<b>Kosten</b>	Investitions- und Unterhaltungskosten (Spanne), beeinflussenden Kostenfaktoren
<b>Nutzen</b>	Output aus der Modellierung

## 5.5 Unsicherheiten von Kostenschätzungen

Die Kosten von Maßnahmen wurden durch Dialogprozesse mit Anwender:innen als zentrales Entscheidungselement für die Maßnahmenimplementierung bestätigt. Um eine Übertragbarkeit von Maßnahmen auf verschiedene Standorte und Zeithorizonte zu gewährleisten, wurde bei der Angabe von Kosten mit Schätzungen gearbeitet. Die Schätzung der Kosten für eine Maßnahme wurde anhand verfügbarer Daten aus der ingenieurbaulichen Praxis sowie weiterführenden Recherchen ermittelt. Hierbei ist festzuhalten, dass in diesem Zusammenhang jegliche Kostenschätzung mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist.

Folgende Faktoren sind u. a. dafür verantwortlich:

- Globale Entwicklungen:  
Lieferengpässe / Materialknappheit infolge politischer oder gesellschaftlicher Ausnahmesituationen (Kriege, Pandemien, Havarien etc.)

- Volkswirtschaftliche Einflussfaktoren:  
Konjunktur, regionales Preisniveau für Baumaterialien und Baugeräte/-maschinen, ausgewähltes Baumaterial, Verfügbarkeit.
- Bauorganisatorische Entscheidungen:  
Form und Zeitpunkt der Ausschreibung, Zeitpunkt der Baudurchführung, Baupausen aufgrund von örtlichen Gegebenheiten (bspw. durch artenschutzrechtliche Vorgaben), Stillstandzeiten, Bau bei laufendem Betrieb.
- Standort der Maßnahme:  
Zugänglichkeit der Baustelle (Bestehendes Wegenetz oder neue Baustraßen), Baugrundverhältnisse, Grundwasserstand, räumliche Verhältnisse, vorbereitende Arbeiten.
- Größe des Projektes:  
Synergien, Zielkonflikte, Skaleneffekte.
- Unklarheiten über zusätzlich benötigte Leistungen:  
z.B. Bodengutachten, Vermesser, Statiker, Kampfmittelsondierung, Altlasten, Fachgutachten, Baubegleitungen (bspw. archäologisch oder ökologisch)

Auf Grundlage dieser Unsicherheiten und beeinflussenden Faktoren in der Kostenschätzung wurde im Maßnahmenkatalog eine Spannweite der zu erwartenden Investitions- und Unterhaltungskosten abgebildet.

## 5.6 Integration von Maßnahmen im EUS

Nach Erstellung des Maßnahmenkataloges war der nächste Arbeitsschritt die Integration von Maßnahmen im Modellnetzwerk mit dem Ziel der finalen Integration von Maßnahmen im EUS.

Über einen fachthemenspezifisch übergreifenden Dialog hat das Konsortium den Maßnahmenkatalog auf modellierbare Maßnahmen geprüft. Die vorausgewählten Maßnahmen wurden weiterführend in drei Maßnahmenbündel gegliedert, die in den Modellen verortet abgebildet werden können. Abbildung 52 zeigt für das Maßnahmenbündel Starkregen und Hochwasser, welche Maßnahmen beispielhaft über veränderbare Einflussparameter in den Modellen abgebildet werden können.

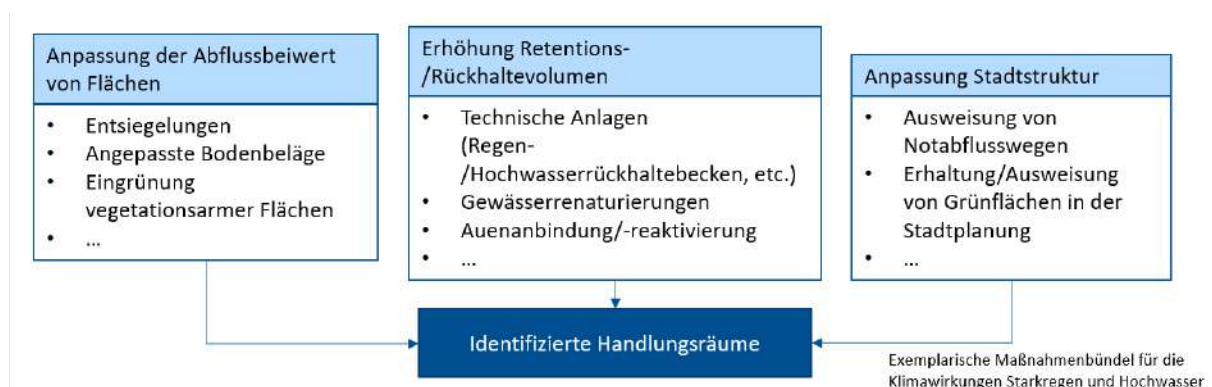


Abbildung 52: Exemplarische Maßnahmenbündel für die Klimesignale Starkregen und Hochwasser.

Für die Integration der Maßnahmen in das EUS wurde ein erster beispielhafter Standort definiert, der Potenzial- und Defizitraum Duisburg-Ruhrort. Der Stadtteil weist eine unterschiedliche Stadtstruktur hinsichtlich der Bebauung und vorkommenden Flächen auf, u. a. Mischgebiete, Blockrand, Reihenhausbebauung, Parkplätze, Garagen, Garagenhof, Öffentliche Gebäude, Gewerbe (Hafenstruktur) und Grünanlagen.

Die Modellierer:innen haben für das jeweils untersuchte Klimasignal konkrete Maßnahmen aus den Maßnahmenbündel ausgewählt und in Duisburg-Ruhrort verortet. Die folgenden Maßnahmen (siehe Abbildung 53) wurden nach weiterer Absprache im Konsortium ausgewählt und modelltechnisch dargestellt.

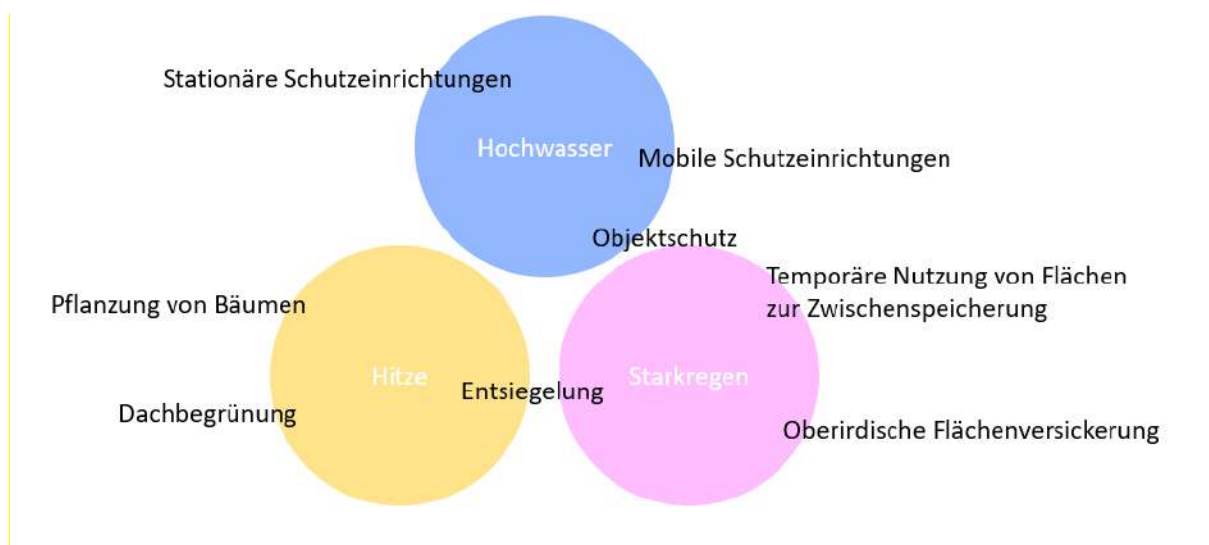


Abbildung 53: Modellierbare Maßnahmen in Duisburg-Ruhrort für Hochwasser, Starkregen und Hitze.

Die technische Einbindung der Ergebnisse der modellierten Maßnahmen im EUS erfolgte anhand der Maßnahmentitel/-typen. Für die nachfolgende Maßnahmenbewertung ist eine standortspezifische Kostenabschätzung notwendig. Hierfür ist der Anteil des Maßnahmentyps innerhalb eines definierten Untersuchungsgebietes zu bestimmen. Grundlage für die Bestimmung des Anteiles ist die jeweilige Geometrie der Maßnahme (Fläche, Volumen, Anzahl, Länge). Diese Geometrie wird dann mit der hinterlegten spezifischen Kostenschätzungen verrechnet. Der Nutzen einer Maßnahme (Veränderungen der Expositionsmodellierung) kann folglich den standortspezifischen Kosten gegenübergestellt werden. Somit wurde die finale Integration der Maßnahmen im EUS exemplarisch für Duisburg-Ruhrort durchgeführt.

## 5.7 Entwicklung eines Bewertungsansatzes

### 5.7.1 Ausgangssituation

Die Bewertungsmethodik zur Darstellung der Gefahren und Risiken durch den Klimawandel, zur Einordnung von Anpassungskapazitäten und –notwendigkeiten sowie von Anpassungsmaßnahmen wurde an den bestehenden Entscheidungs- und Governancestrukturen der Stadt



Duisburg orientiert. Die Organisation der kommunalen Gebietskörperschaften mit ihren (teils historisch gewachsenen) etablierten Kommunikations- und Kompetenzmustern sind hierfür ausschlaggebend.

Es handelt sich hierbei um ein Zusammenspiel der Ausübenden der Gewaltenteilung. Die kommunale Selbstverwaltung besteht aus der Verwaltung als administrativen Teil der Exekutive, welche dabei die Entscheidungen der gewählten Legislative, der Gemeindevertretung, konkretisiert und vollzieht. Die Arbeit der Verwaltung ist geprägt durch hierarchische und sektorale Aufgabenwahrnehmung (in Sachgebieten, Ämtern und Stabsstellen, und Dezernaten) und aktenkundige, schriftliche Kommunikation. Zwar gehen die Entscheidungen in der Stadt Duisburg vom Stadtrat von nebenberuflich tätigen Ratspersonen aus, jedoch prägen die Verwaltungsmitarbeitenden, als Hauptberufliche mit den Geschäften der Kommune befasst, durch ihre Fachkompetenz maßgeblich die kommunale Willensbildung und Entscheidungsfindungsprozesse. Im Zuge von Verwaltungsreformen etablierte sich das Modell eines Stadtkonzerns, mit der Aufgabenwahrnehmung über die Verwaltung hinaus. Kommunalen Eigenbetriebe übernehmen dabei ehemalige Aufgaben der Verwaltung, wie in Duisburg bspw. die Wirtschaftsbetriebe Duisburg – AöR in den Bereichen Grünflächen, Tiefbau, Hochwasserschutz und Stadtentwässerung, sowie die Duisburger Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft mbH in den Bereichen öffentlicher Mobilität, Trinkwasser, und Energieversorgung, oder die Duisburg Business & Information GmbH als städtische Wirtschaftsförderung.

An den gegebenen Bedingungen der Organisation kommunaler Körperschaften orientieren sich bereits Bewertungsmethoden für Querschnittsthemen wie Klimaschutz, Nachhaltigkeit oder Klimaanpassung. So auch Designs von „Prüfverfahren klimarelevanter Beschlussvorlagen“, welche jeweils Vorhaben einer Stadt einer Prüfung unterziehen mit Angabe des Ergebnisses auf der Beschlussvorlage für die Diskussion und Entscheidung in einer Gemeindevertretung. Diese Prüfungen berücksichtigen jedoch nicht die Vielfalt an jeweils relevanten Kriterien anhand einer Klimaregion und der zu erwartenden Veränderung von Klimasignalen, sowie anhand der Vielfalt von Entscheidungen in den Einheiten der kommunalen Selbstverwaltung. Das simple Design mit Checklisten, Entscheidungsfragen (ja nein), und Anregungen für Optimierungen hält den Arbeitsaufwand von Prüfung recht gering, und vielmehr geht es auch um eine Sensibilisierung der Verwaltungsmitarbeitenden für die Schnittmenge ihrer Facharbeit und den Querschnittsthemen durch die Auseinandersetzung über die Prüfverfahren. Diese Schlüsse werden für die Darstellung von Ergebnissen aus R2K-Klim+ relevant, jedoch werden bisherige Prüfverfahren der Detailtiefe des Projekts nicht gerecht. Zwar befassen sich Bewertungsmethoden aus dem Bereich der Umweltgerechtigkeit mit detaillierten, quantifizierten Umweltlasten und -ressourcen, weichen dabei aber von den in R2K-Klim+ betrachteten Klimawirkungen ab und begegnen teils weiterhin dem Bewertungsproblem, für die Entscheidungen in Verwaltung und Politik anerkannte, legitimierte und rechtssichere Bewertungskriterien- und stufen bereitzustellen.

### 5.7.2 Methodisches Vorgehen

Für die Bewertungsmethodik sind die zuvor geschilderten Erkenntnisse aus der Organisation der Stadt Duisburg relevant, aus dem bisherigen Umgang mit dem Thema in Entscheidungspraktiken und Workflows, der bereits existierenden Prüfverfahren, sowie eine Orientierung an der durch das Konsortium gelieferten Modellsimulationen der unterschiedlichen Klimasignale. Weiterhin muss gewährleistet sein, dass die aufeinander aufbauenden Analyseschritte von Gefahr, Risiko und Vulnerabilität, und Potenzialen geeigneter Anpassungsmaßnahmen aufgegriffen werden. Die im Projekt angestrebte Bewertungsmethodik soll die folgenden aufeinander aufbauenden Analyse- und Bewertungsschritte je Klimasignal, bzw. später gemeinsam betrachtet, beinhalten:

- Analyse und Bewertung von Gefahren einzelner Klimasignale,
- Analyse und Bewertung der daraus resultierenden Risiken für die resultierenden vulnerablen Rezeptoren,
- Identifizierung und Bewertung geeigneter Maßnahmen zur Risikoreduktion/Resilienzsteigerung

Für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Analyseschritte wurden anhand der Modellierungskette folgende technische Arbeitsschritte im Konsortium erarbeitet:

1. Definition aller möglichen Bewertungsindikatoren je Klimasignal.
2. Ausarbeitung der Verschneidung der modellierten Exposition mit zusätzlichen Daten je Indikator und Klimasignal (Sensitivität).
3. Räumliche Aggregation der Bewertungsindikatoren je Klimasignal.
4. Methodik zur Vergleichbarkeit aller betrachteten Bewertungsindikatoren je Klimasignal.
5. Klimawirkungsübergreifende Aggregation aller Bewertungsindikatoren.

Abbildung 54 zeigt grafisch die Herangehensweise und Vorgehen für die Umsetzung der technischen Arbeitsschritte für die Bewertungsmethodik. Die Modellierungen der fünf betrachteten Klimasignale erzielen auf Mikroebene die Expositionsergebnisse. Hierbei wird sowohl die gegenwärtige als auch die zukünftig projizierte Exposition anhand von Klimaszenarien bestimmt.

Die Modellierungsergebnisse werden mit zusätzlichen Daten verschnitten, um die Vulnerabilität verschiedener Rezeptoren zu betrachten. Vier Rezeptoren – Mensch, Umwelt, Wirtschaft, Planung und Bau- Infrastruktur – wurden im Dialogprozess mit Praxisanwender:innen definiert. Die Einteilung der Vulnerabilitäten in und die Betitelung der Rezeptoren orientiert sich dabei am Klimaatlas Nordrhein-Westfalen des LANUV NRW (siehe [116]) als Vorbereitung für eine einfache und flächendeckende Übertragbarkeit. Die klimawirkungsspezifische Verschneidung der Expositionsmo- dellierung mit vulnerablen Daten ergibt letztlich die Bewertungsindikatoren.

Anhand der erarbeiteten Vulnerabilitäten lassen sich Defiziträume in der Stadt Duisburg identifizieren. Hier erfolgt nun die erste Bewertung der Klimawirkungen und Rezeptoren anhand einer 5-stufigen Skala in Anlehnung an die Zukunftsinitiative (ZI) Klima.Werk (siehe [116]). Hierdurch wird die Grundlage für eine Übertragbarkeit auf alle 16 Mitgliedsstädte der ZI in der FuE-Phase II geschaffen.

Potenzialräume lassen sich für die Anwender:innen je nach Priorisierung von Klimasignal und Rezeptoren durch die Klassifizierung der Vulnerabilität in den Bewertungsstufen festlegen. Zur Verringerung der Vulnerabilität in diesen Defizit- und Potenzialräumen bieten sich Optionen für Klimaanpassungsmaßnahmen. Diese werden durch Kosten-Nutzen-Analysen gestützt. Dabei entspricht der Nutzen der modellierten Vulnerabilitätsminderung der einzelnen Rezeptoren nach Maßnahmenimplementierung. Die Kosten umfassen Informationen zu Finanzen, Umsetzungszeitraum und -grundlage etc., die sich aus Literaturrecherchen und ingenieurbaulicher Praxistätigkeit des Konsortiums ergeben. Diese Informationen werden in einem Maßnahmenkatalog hinterlegt (siehe Kapitel 5.4). Die Relevanz vorliegender Informationen wurde durch eine Analyse der kommunalen Entscheidungsprozesse sowie in Austauschformaten mit Entscheidungsträger:innen ermittelt.

Die Methodik ermöglicht somit eine Bewertung sowohl der Vulnerabilitäten der verschiedenen Klimasignale als auch der Wirkung von Klimaanpassungsmaßnahmen. Modellierungsergebnisse, Literaturrecherchen und praktische Anwendungsberichte ergeben auf diese Weise eine multikriterielle, integrierte und transdisziplinäre Bewertungsmethodik.

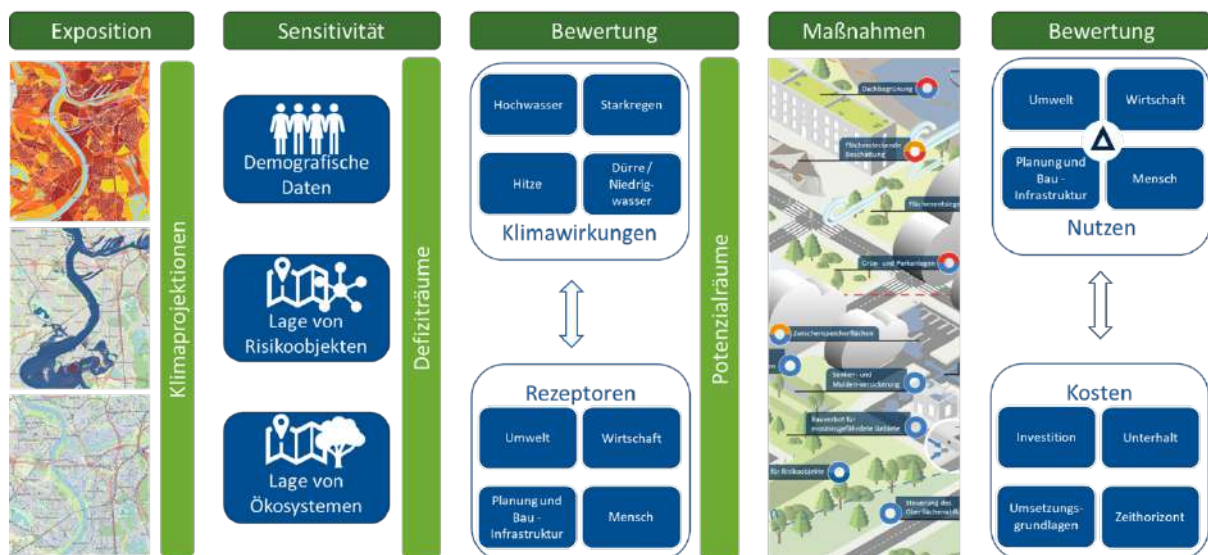


Abbildung 54: Entwicklungsansatz der Bewertungsmethodik.

### 5.7.3 Indikatoren

Die Verschneidung der Expositionsm modellierung mit den Daten zur Sensitivität der Rezeptoren ergibt die Definition der relevanten Bewertungsindikatoren je Klimasignal. Es handelt sich hierbei um eine Darstellung der Wirkungen, die durch die Modelle des Konsortiums ermittelt

werden können. Darüber hinaus existieren mit Sicherheit einerseits weitere Modelle zur Abbildung weiterer Auswirkungen auf weitere Rezeptoren, als auch Wirkzusammenhänge, die nicht oder nur ansatzweise durch Modellierungen bestimmt werden können. Diese sind jedoch nicht Bestandteil dieses Projektes.

Die Indikatoren für die Bewertung der klimatischen Vulnerabilität der Rezeptoren sind in Abbildung 55 den Rezeptoren – Mensch, Planung und Bau – Infrastruktur, Umwelt und Wirtschaft – zugeordnet. Der Indikator erhält als beschreibende Informationen das Klimasignal, dessen Wirkung er beschreibt, sowie die Einheit, in der er angegeben wird.

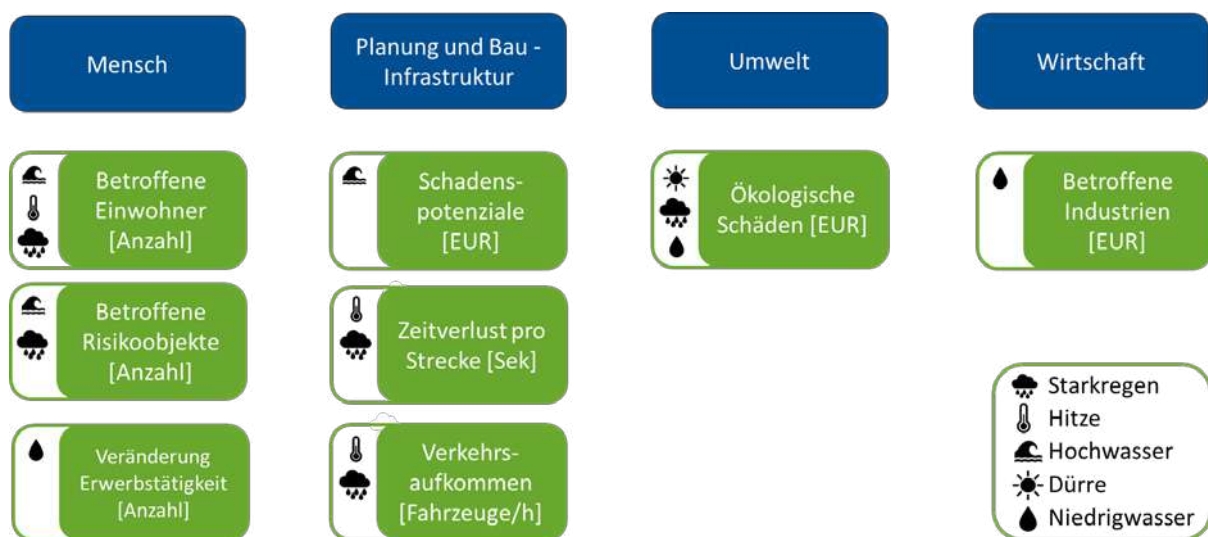


Abbildung 55: Bewertungsindikatoren je Klimasignal und Rezeptor.

Es zeigt sich, dass die sozialen Indikatoren für Starkregen, Hochwasser und Hitze bemessen werden. Die Vulnerabilität der ökonomisch geprägten Indikatoren wird für Niedrig-, Hochwasser, Starkregen und Hitze definiert. Der ökologische Indikator hingegen liefert Ergebnisse in Abhängigkeit von Trockenheit, Starkregen und Hitze. Durch die flexible Verschneidung der Expositionsmodellierung mit vulnerablen Daten können in der FuE-Phase II nach Bedarf und technischen Kapazitäten noch weitere Indikatoren bestimmt werden.

Zusätzliche Bewertungsindikatoren werden bei der anschließenden Kosten-Nutzen-Analyse für die Maßnahmen berücksichtigt. Umsetzungsrelevante Indikatoren, wie u.a. Investitions- und Wartungskosten, Planungszeiträume und weitere Voraussetzungen, ergeben sich aus Literaturrecherchen und Praxiserfahrungen und sind im Maßnahmenkatalog hinterlegt. Hierdurch kommt es zu einer integrierten und sektorübergreifenden Bewertung anhand von Modellierungsergebnissen und Erfahrungsberichten.

## 5.8 Entscheidungsunterstützungssystem

Unter Federführung von geomer wurde ein Prototyp eines EUS konzipiert und entwickelt. Hierbei handelt es sich um ein Softwaresystem, welches die vielfältig gewonnene Information aus transdisziplinären Forschungsprozessen so zusammenstellt, dass diese in einfacher und

verständlicher Form für Entscheidungsträger zugänglich sind. Hierbei werden die Ergebnisse aus den unterschiedlichen thematischen Bereichen zusammengeführt, aufbereitet, analysiert und in flexibler Weise für den Anwender dargestellt. Ziel der Anwendung ist es dabei, die wissenschaftlich erarbeiteten Methoden zur Identifikation und Beurteilung von Defiziträumen hinsichtlich verschiedener Klimawirkungen in ein computergestütztes System zu überführen. Zur Entscheidungsunterstützung werden hierbei verschiedene Indikatoren und Kriterien im Kontext von potenziellen Klimaprojektionen, Ereignisszenarien und Anpassungsmaßnahmen herangezogen.

Im Entwicklungsprozess waren insbesondere folgende Anforderungen zu berücksichtigen: Je nach Wirkmodell werden unterschiedliche räumliche Bezugsebenen und Klimawirkungen betrachtet. Die Anwendung muss daher die Information sinnvoll untergliedern, um Nutzern eine isolierte Sicht auf einzelne Faktoren aber auch einen Überblick über den wissenschaftlichen Gesamtkontext zu ermöglichen. Weiterhin soll das EUS derart aufgebaut sein, dass eine spätere Integration in die bestehende Geodateninfrastruktur und das alltägliche Verwaltungshandeln der Stadt Duisburg möglich ist. Hierbei müssen auch die unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Nutzergruppen im Blick behalten werden. Bei der Konzeption war ebenfalls ein besonderes Augenmerk auf die spätere Übertragbarkeit von einzelnen Elementen des Tools auf andere Kommunen zu richten. Hierbei galt es, spezielle regionale Besonderheiten von allgemeingültigen Verfahren zu trennen und, sofern möglich, bundesweit verfügbare Datensätze einzubinden. Eine besondere Herausforderung bestand darin, die Anforderungen der Kommune sowie späterer potenzieller Anwender mit der technischen und wissenschaftlichen Realisierung in Einklang zu bringen. Zur Konzeption und Entwicklung eines einheitlichen Systems waren daher multiple Fragestellungen zu klären und ein fortlaufender Abstimmungsprozess mit allen Konsortialpartnern erforderlich.

### Architektur und Komponenten

Die Architektur des EUS (Abbildung 56) besteht in einem Aufbau nach dem Client-Server-Modell, wobei der Client als Browseranwendung konzipiert ist. Über das EUS werden Daten und Modelle als Webdienste verfügbar gemacht, die ohne eine zusätzliche Softwareumgebung durch die Nutzer eingesetzt werden können. Die Anwendung besteht dabei im Wesentlichen aus folgenden Komponenten: Dem Back-End-seitigen Datenbankmanagementsystem, den ebenfalls Server-seitigen Schnittstellen zum Abruf von Daten sowie einer clientseitigen Web-Anwendung. Der Entwicklungsprozess erfolgte daher auf drei Ebenen, wobei im Hinblick auf die Wart- und Übertragbarkeit des Systems eine modellspezifische Unterteilung auf allen Ebenen zu berücksichtigen war. Um die Verfügbarkeit des Entscheidungsunterstützungstools bzw. des zugrundeliegenden Back-Ends sicherzustellen, wurde ein Server bei dem externen Cloud-Service Anbieter Hetzner betrieben.

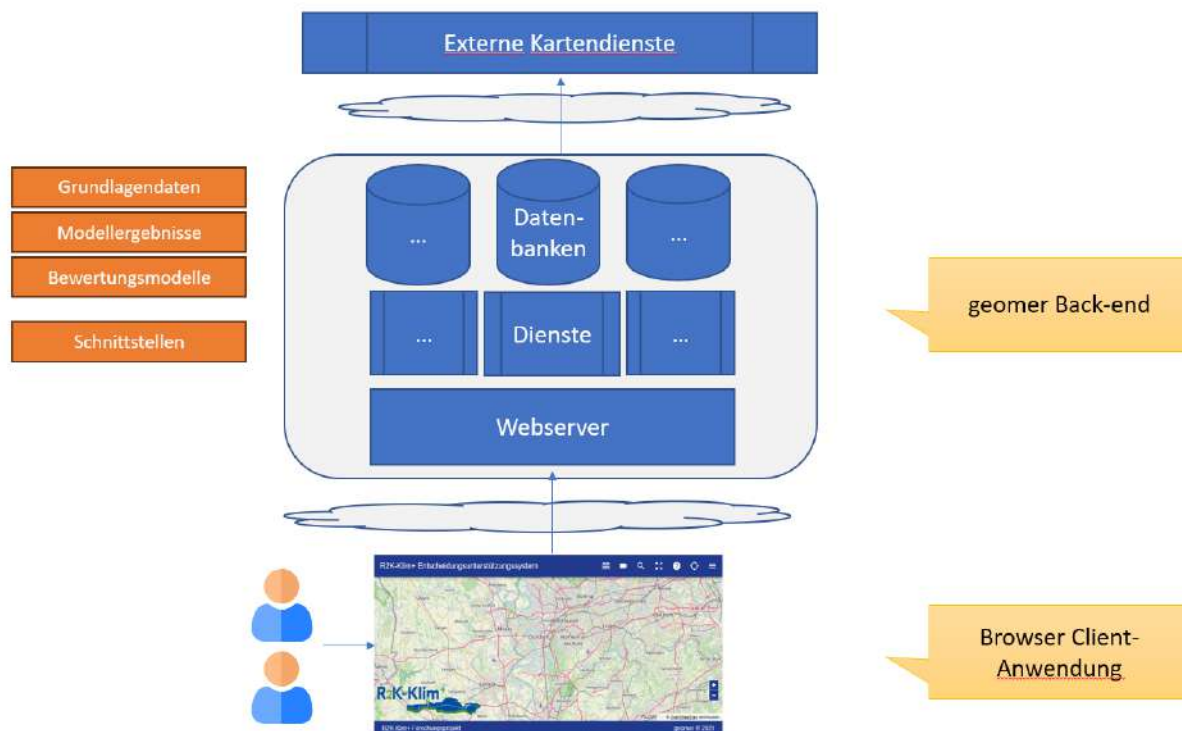


Abbildung 56: Architektur und Komponenten des EUS.

### Architektur und Komponenten – I. Datenverwaltung

Die grundlegende Schicht des EUS besteht in einem Datenbankmanagementsystem und dem damit verbundenen Aufbau des zugrundeliegenden Datenmodells. Zunächst wurde bei der Konzeption ein dezentraler Ansatz angestrebt, bei dem einige Modelldaten in einer separaten Geodateninfrastruktur unter der Verwaltung der Projektpartner verbleiben. Im weiteren Projektverlauf zeigte sich jedoch, dass ein zentralisierter Datenstand im Hinblick auf eine möglichst standardisierte, redundanzfreie und homogene Datenstruktur, sowie auch in Bezug auf die Flexibilität des Entwicklungsprozesses und der Anwendungsperformanz, etliche Vorteile bietet. Folglich wurde die für das EUS relevante Information in einem zentralen System zusammengeführt, d.h. die Verwaltung, Pflege und Integration sämtlicher Daten und Strukturen wird durch geomer vorgenommen. Dies umfasst ggf. auch die Konvertierung, weitergehende Prozessierung und Aufbereitung von Daten. Als zugrundeliegende softwareseitige Komponente wurde PostgreSQL mit PostGIS-Erweiterung ausgewählt. Hierbei handelt es sich um eine weltweit verbreitete, objektrationale Open-Source-Datenbank, über PostGIS wird diese um die Funktionalität zur Verarbeitung räumlicher Daten ergänzt.

Nach Erörterung und Analyse der Erfordernisse in Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern wurden die entsprechenden Datenstrukturen und -typen erstellt. Hierbei galt es zunächst, die Anwendungsfälle für den Prozessablauf zu analysieren und Prozessketten abzuleiten, um diese in eine Modell- und Dateninteraktion umzusetzen. Logisch kann man dabei wie folgt unterteilen: Zum einen wurden Bestandsdaten und Geobasisdaten in das System eingepflegt. Diese umfassen u.a. Gebäudedaten, Daten über Baublöcke und Flächennutzungsdaten,

welche für eine integrierte Bewertung erforderlich sind. Ein zweiter Teil besteht in der Integration von Ergebnisdaten aus den einzelnen Wirkmodellen und Modelketten. Hierbei handelt es sich i. A. um Daten, welche die zugrundeliegende Exposition sämtlicher betrachteter Flächen im Hinblick auf das jeweilige Klimasignal darstellen. Als Beispiel wären hier Hochwassergefahrenkarten oder Hitzekarten zu nennen. Der dritte und wesentliche Bestandteil besteht in der Integration von Bewertungsmodellen und Bewertungsfunktionen. Diese wurden, soweit möglich, bereits auf Datenbankebene implementiert und bilden die Kernfunktionalität des EUS zur Vulnerabilitätsanalyse, mit dem Ziel, für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche ein konfigurierbares Bewertungsmodell zu erstellen. Hierbei werden die Modellergebnisse und strukturellen Gegebenheiten in bewertungsfähige Ergebnisse umgesetzt und miteinander verrechnet. Ein Beispiel ist die Modellierung und Berechnung von monetären Schäden aufgrund von Hochwasserereignissen.

Die datenbankseitige Entwicklungsarbeit umfasste dabei auch das Schaffen von Schnittstellen. Zu diesem Zweck wurden prototypische Prozessierungswerkzeuge entwickelt, um Basisdaten und Modelldaten einzupflegen und aufzubereiten. Hierdurch werden wiederkehrende Prozesse automatisiert oder wesentlich vereinfacht. Beispielhaft zu nennen ist die Verschneidung von Hochwassergefahrenkarten mit Grundlagendaten wie Gebäuden, sodass eine nachfolgende Schadensberechnung erfolgen kann. Als interne Schnittstelle zum Abruf von Daten und Bewertungsmodellen durch Dienste wird auf standardisierte Datenbank-Konzepte wie SQL-Views und SQL-Functions zurückgegriffen. Auf die verwendeten Datensätze, Modelldaten, Prozessierungstools und integrierten Bewertungsfunktionen wird im Zuge der einzelnen Anwendungsmodule detailliert eingegangen.

### Architektur und Komponenten – II. Dienste und Schnittstellen

Aufbauend auf dem Datenbankmanagementsystem und der Datenhaltungsschicht, werden Datenzugriffe über barrierefreie, modulare Web-Schnittstellen abstrahiert. Diese Schnittstellen fungieren dabei als Austausch- und Datenabstraktionsschicht zwischen clientseitigen Anwendungen und dem Datenbanksystem in Form von Web-Diensten (RESTful APIs). Sämtliche Dienste und Datentypen basieren dabei auf Spezifikationen des Open Spatial Consortiums (OGC). Hierbei handelt es sich um eine gemeinnützige Organisation, die interoperable Standards zum Austausch raumbezogener Information festlegt. Softwareseitig wird die Open-Source-Lösung GeoServer zur Realisierung entsprechender Schnittstellen eingesetzt. GeoServer bietet dabei ein Framework, um OGC basierte Dienste wie etwa WMS (Web-Map-Service) und WFS (Web-Feature-Service) zu erstellen, zu konfigurieren und zu hosten.

Insbesondere für die EUS Client-Anwendung erfolgt der Abruf der angezeigten Daten, Analysen und Kartendarstellungen ausschließlich über standardisierte OGC-Schnittstellen. Darüber hinaus ermöglicht dieser Mechanismus auch externen Anwendern und Applikationen einen direkten Zugriff auf verfügbare Daten und Analysen. Dadurch ist sichergestellt, dass ein

Transfer in GIS-Anwendungen dritter – wie etwa der Stadtverwaltung Duisburg - zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen kann.

### Architektur und Komponenten – III. Die Client Anwendung

Ein wichtiger Baustein bestand in der Konzeption und Entwicklung einer Benutzeroberfläche (GUI) zur Steuerung des Entscheidungsprozesses. Diese ist als ein Mapping-Client im Webbrowser konzipiert und bildet die Präsentationsschicht des EUS. Über die Webanwendung werden Ergebnisse dargestellt und eine Auswahl verschiedener Klimawirkungen, Szenarien und Darstellungsformen ermöglicht. Die Anwendung ist frei zugänglich und unter <https://r2k.geomer-maps.de> erreichbar. Softwareseitig basiert der Client auf mehreren gängigen Open Source Bibliotheken: Über OpenLayers werden die Darstellung dynamischer Karteninhalte und Karteninteraktionen realisiert. Die Implementierung der Benutzeroberfläche erfolgt über Vue.js und Vuetify, spezielle Steuerelemente über zusätzliche Bibliotheken wie etwa Apache Echarts zur Anzeige von Diagrammen. In Zusammenarbeit mit der Firma meggsimum veröffentlicht geomer dabei sämtliche Entwicklungen, die im Rahmen eines allgemeinen WebGIS-Clients nutzbar sind, als generische Open-Source-Lösung „Wegue“ auf GitHub (<https://github.com/wegue-oss/wegue>). Somit stehen zahlreiche Features auch neu entwickelten Webanwendungen zur Verfügung.

Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Aspekten aus heterogenen Forschungsbereichen und der damit verbundenen Komplexität wurde beim Aufbau der Anwendung ein modulares Konzept angestrebt. In diesem Sinne wurde eine prinzipielle Unterteilung des Analysetools nach Klimawirkungen in Form eines Baukastenprinzips vorgenommen: Hierbei können Anwender wahlweise benötigte Module zuschalten bzw. ausblenden. Durch diesen Ansatz wird eine detaillierte Sicht auf Ergebnisdaten ermöglicht, ohne die Anwendung mit zu viel Information zu überfrachten. Durch gleichzeitige Aktivierung mehrerer Anwendungsmodulare ist aber auch eine Analyse mehrerer Klimawirkungen im gemeinsamen Kontext möglich.

Die Client-Anwendung unterteilt sich grob in eine Modalauswahlleiste, eine Kartenansicht und eine Sidebar: Eine Auswahl der zu betrachtenden Klimawirkungen erfolgt über die Auswahlleiste oben rechts. Innerhalb der Kartenansicht und Sidebar können wahlweise Inhalte aus den einzelnen Teilbereichen dargestellt werden. Die kartographische Darstellung auf der rechten Seite nimmt dabei als zentraler Aspekt eines Mapping Clients den größten Platz ein. Die Sidebar fungiert einerseits als Kontrollelement zur Auswahl und Steuerung modulspezifischer Funktionen und andererseits als zusätzliches Anzeigeelement für tabellarische und textuelle Inhalte. Um abhängig von der Bildschirmauflösung eine möglichst gute Aufteilung der Darstellung zu erhalten, kann die Sidebar auf Desktop-Rechnern zugunsten der Kartenansicht vergrößert werden. Für besonders schmale Displays, z.B. Tablets oder Smartphones, zeigt die Sidebar ein modales Verhalten und wird zur verbreiterten Kartenansicht automatisch eingeklappt. Neben Interaktionen über die Sidebar sind auch verschiedene Selektionsmechanismen



auf der Karte zur räumliche Detailbetrachtung, wie z.B. die Auswahl von Stadtbezirken oder Freihandauswahl möglich

Ein wichtiges Steuerelement der Web-Anwendung (Abbildung 57) ist hierbei die Kontrolle über sichtbare Karten-Layer. Diese befindet sich innerhalb der Sidebar oben links. Abhängig von der Auswahl des betrachteten Klimasignals, werden modulspezifische Inhalte in Form von Kartenebenen dargestellt. i.A. sind je Klimasignal zwei Layer verfügbar, die zum einen die zugrundeliegende Exposition (z.B. Überflutungstiefen bei Hochwasser) und die daraus resultierenden vulnerablen Bereiche (z.B. monetäre Schäden bei Hochwasser) aufzeigen. Einzelne Layer sind hierbei ausklappbar und ermöglichen einen Zugriff auf die Layer-Legenden. Diese liefern eine generelle Beschreibung von Kartenebenen, etwa um verschiedene Schadensklassen kenntlich zu machen. Die Klassifizierungen, Skalen und Farbschemata der einzelnen Vulnerabilitätsstufen wurden hierbei so ausgewählt, dass modulübergreifend eine möglichst einheitliche und wiedererkennbare Darstellung erreicht wird. Zudem kann mithilfe eines Schiebereglers die Transparenz von Kartenebenen konfiguriert werden, bspw. um eine gleichzeitige Betrachtung verschiedener Klimawirkungen zu erleichtern.



Abbildung 57: Modularer Aufbau der Client-Anwendung.

Weiterhin implementiert wurden u.a. aus anderen GIS-Anwendungen bekannte generische Steuerelemente: innerhalb der Kartenansicht lassen sich über eine Tooltip-Funktionalität detaillierte Informationen zu angezeigten Karteninhalten einblenden. Verschiedene Hintergrundkarten wie OSM, Satelliten- und Luftbilder sind über einen Auswahlknopf am linken oberen Rand des Kartenbereiches frei selektierbar. Im Hinblick auf Anwenderfreundlichkeit bietet die Anwendung eine englische Sprachunterstützung, einen energiefreundlichen „Dunklen Modus“, sowie verschiedene Symbole und Bilder, um die Wiedererkennung modulspezifischer Inhalte zu erleichtern. Der Funktionsumfang wird durch weitere allgemeine Bedienelemente wie etwa eine Ortssuche, eine Videoaufnahmefunktion von Karteninhalten oder Vermessungstools abgerundet.

Prototypisch entwickelt wurden bisher vier spezifische Anwendungsmodule zu den Klimasignalen Hochwasser, Starkregen, Hitze und Niedrigwasser. Auf den technischen Aufbau und Funktionsumfang dieser Module wird in den folgenden Abschnitten detailliert eingegangen.

### Anwendungsmodule – Hochwasser

Das EUS-Anwendungsmodul für Hochwasser umfasst verschiedene Visualisierungs- und Berechnungsoptionen zur Gefährdungsanalyse für Hochwasserereignisse. Der Anwender wählt dazu zunächst ein Szenario aus. Ein Szenario repräsentiert hierbei eine mögliche Kombination aus Ereignisszenario (etwa HQ<sub>100</sub>), einem möglichen Klimaszenario (z.B. Status Quo) sowie optional einer untersuchten Schutzmaßnahme (z.B. Hochwasserschutzwand). Innerhalb des Kartenbereichs werden daraufhin die - bei Eintritt des ausgewählten Ereignisses - auftretende Exposition in Form einer Hochwassergefahrenkarte sowie die daraus resultierenden Vulnerabilität auf Basis einer Schadensberechnung angezeigt. Im Unterschied zur Gefahrenkarte erfolgt bei der Vulnerabilitätsansicht eine farbliche Gewichtung in Höhe des zu erwartenden monetären Schadens. Zur detaillierten Analyse kann der Nutzer einen Auswahlbereich auf der Karte setzen. Dies kann entweder durch Freihandauswahl oder durch Auswahl eines Stadtbezirks von Duisburg geschehen. In der Folge werden dem Anwender anhand von Diagrammen monetäre Schäden an Vermögenswerten aufgezeigt. Die Schäden werden dabei in volkswirtschaftliche Sektoren unterteilt, wie beispielsweise *Privates Wohnvermögen*, *Industrievermögen*, *Handel- und Dienstleistungen* und *Landwirtschaft*. Insbesondere kann hierbei durch Wechsel der zugrundeliegenden Szenarien eine vergleichende Beurteilung von Hochwasserschäden im Hinblick auf verschiedene Maßnahmen und Ereignisse erfolgen.

Für die Schadensermittlung stehen zwei unterschiedliche Modelle in Form eines gebäudebasierten und eines flächenbasierten Ansatzes (Abbildung 58) zur Verfügung. Innerhalb des EUS ist das Schadensmodell frei auswählbar und die Darstellung der Ergebnisse wurde für beide Varianten angeglichen, um ein nahtloses Umschalten und eine einfache Vergleichbarkeit der Schadensmodelle zu gewährleisten. Der Anwender hat somit Zugriff auf alternative Bewertungsmethoden, die ergänzend oder zur Cross-Validierung herangezogen werden können. Über das flächenbasierte Schadensmodell können darüber hinaus Aussagen zu Schädigungen an zusätzlichen Sektoren wie *Straßen*, *Bahn* und *Sportflächen* getroffen werden, die über das gebäudebasierte Modell nicht möglich sind.

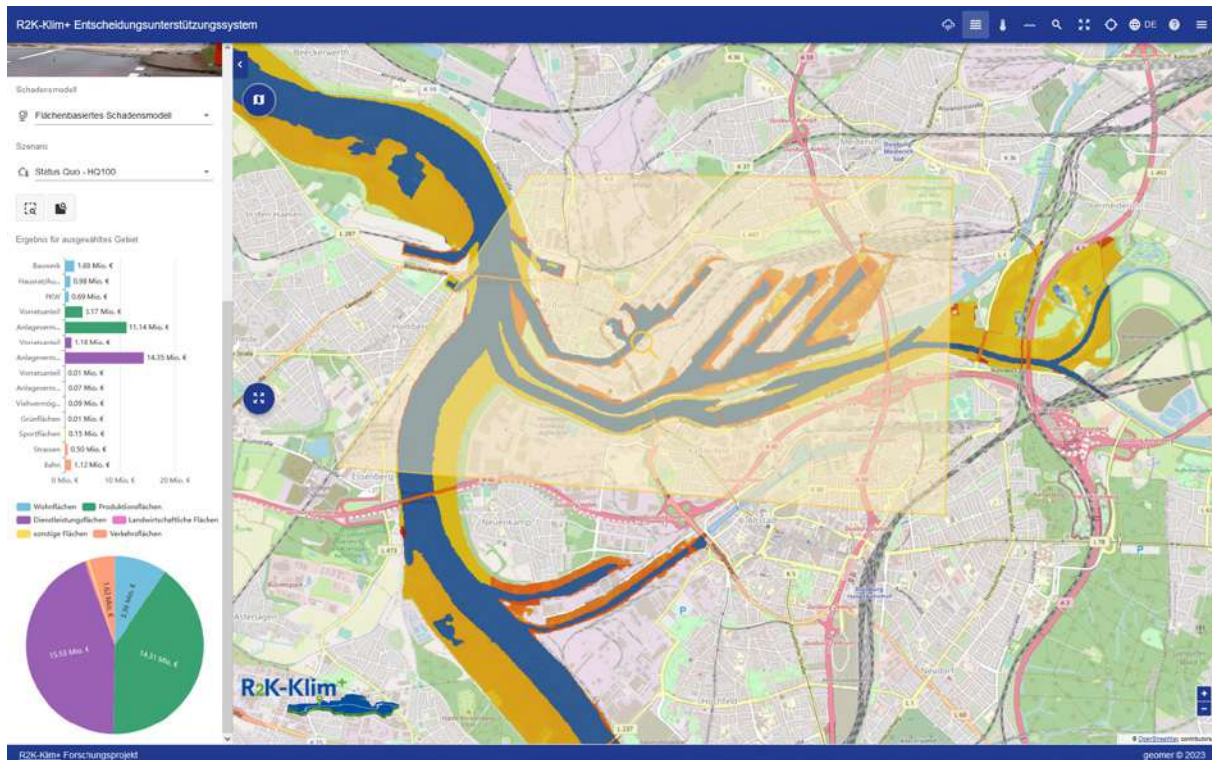


Abbildung 58: Berechneter potenzieller Schaden für ein ausgewähltes Gebiet anhand des flächenbasierten Schadenmodells als Diagramme in der Sidebar (links) sowie die zugehörige berechnete Kartendarstellung (rechts).

### Anwendungsmodulare – Starkregen

Das Starkregen-Modul (Abbildung 59) ist ein Instrument zur Visualisierung des zeitlichen Verlaufs von Starkregenereignissen. Die Darstellung erfolgt hierbei in Form einer animierten Kartenvisualisierung mit automatischem Playback und Zoom-Funktion. Die Visualisierung zeigt sowohl die zeitlich variablen Überflutungstiefen, als auch die jeweilige Strömungsrichtung und zugehörige Fließgeschwindigkeiten. Dadurch wird eine präzise Einschätzung der Gefährdungssituation, auch unter Beurteilung der zum Zeitpunkt X noch befahrbaren Straßen und Einsatzrouten, ermöglicht. Die Visualisierung wurde zunächst mithilfe einer Vorsimulation eines Starkregenereignisses in Duisburg erprobt und anschließend durch das finale Simulationsergebnis eines endbetonten Niederschlags mit 50 mm/h ersetzt - dieses entspricht nach KOSTRA DWD ca. einem 100-jährlichen Starkregenereignis in Duisburg.

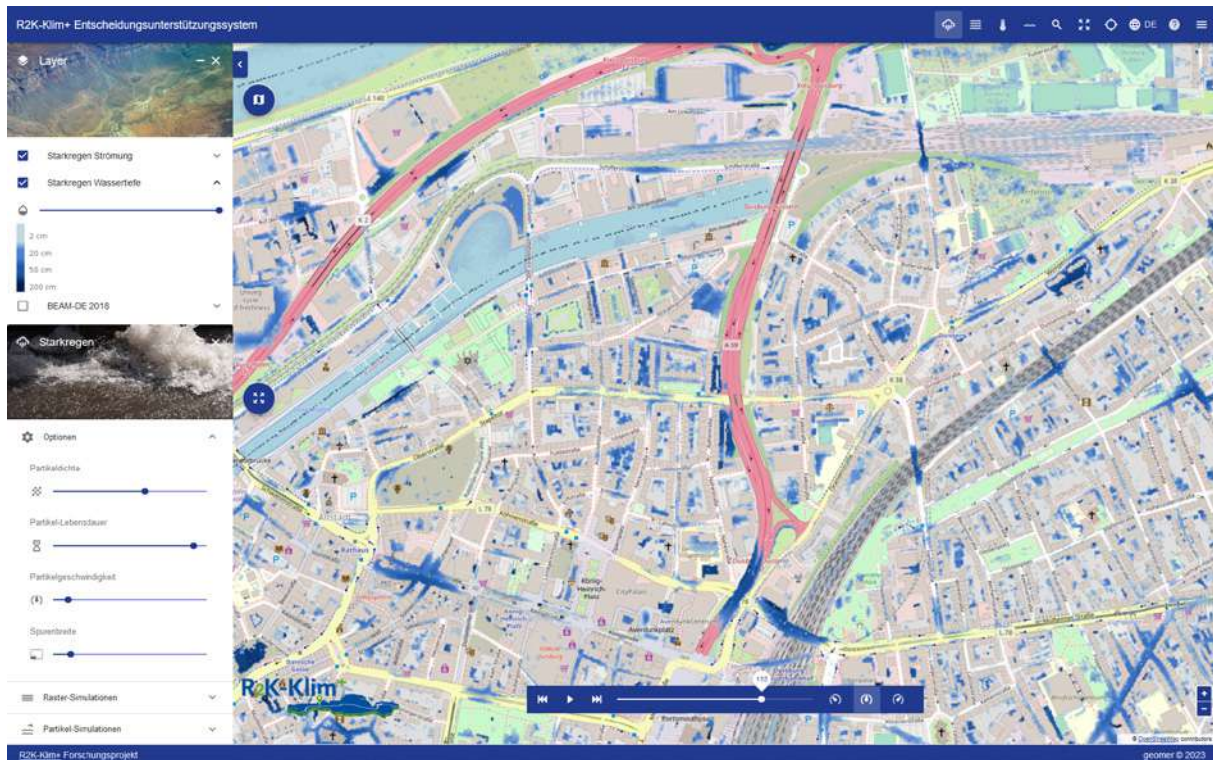


Abbildung 59: Animierte Darstellung eines 100-jährigen Starkregenereignisses in Duisburg.

Von technischer Seite werden die Ergebnisdaten einer mit FloodArea<sup>HPC</sup> erstellten Starkregensimulation mit einem eigens dafür erstellten Toolchain prozessiert und in die Geodateninfrastruktur des EUS eingespielt. Die Web-Visualisierung erfolgt mithilfe der von geomer entwickelten Bibliothek „Olala“ (OpenLayers Animated Layers Architecture). Diese setzt auf der Open-Source-Bibliothek OpenLayers auf, und ermöglicht eine animierte und zeitabhängige Visualisierung von Karten-Layern auf Basis standardisierter WMS-Dienste. An Olala wurden zahlreiche Weiterentwicklungen vorgenommen: Zunächst kann eine Animation der Fließbewegungen, die in der Vorgängerversion nur für statische Gefahrenkarten möglich war, jetzt auch im zeitlichen Verlauf erfolgen. Weiterhin wurden die typischen Funktionen eines Video-Players, wie vor- und zurückspulen, Abspielgeschwindigkeit verändern, pausieren, abspielen, etc. implementiert. Auch einige Abläufe wie der Ladevorgang bei Zoom- und Pan-Interaktionen auf der Karte wurden hinsichtlich der Usability verbessert. Da es sich bei den Ergebnisdaten der Starkregen-Simulationen um sehr große Datenmengen für Web-Maßstäbe handelt (bspw. 150 GB für obige Simulation aus Duisburg) wurden in diesem Zuge auch sämtliche Datenaufbereitungsverfahren und Daten-Caching-Techniken optimiert. So unterstützt Olala jetzt ein asynchrones Buffering und Pre-Loading von Animationsdaten, das zu wesentlich geringeren Ladezeiten und flüssigerem Abspielverhalten führt.

Aufgrund des hohen Speicherplatzbedarfs wurde zunächst von der Bereitstellung weiterer Simulationsergebnisse in Form von Animationen abgesehen. EUS-seitig sind aber sämtliche technischen Voraussetzungen geschaffen, um weitere Starkregensimulationen automatisch zu prozessieren, zu verwalten und zu visualisieren, sodass bei Bedarf weitere Resultate zur Verfügung gestellt werden können.

## Anwendungsmodule – Hitze

Das EUS-Anwendungsmodul für Hitze und Gesundheit (Abbildung 60) wurde in Zusammenarbeit von geomer und dem Forschungsinstitut gaiac konzipiert und entwickelt. Ziel des Anwendungsmoduls ist es hierbei, die Auswirkungen von Hitze auf Mensch und Gesundheit zu untersuchen. Innerhalb des Kartenbereichs werden die auftretende Exposition in Form einer Hitzekarte sowie die daraus resultierenden vulnerablen Bereiche dargestellt. Als Voreinstellung ist hierbei eine Gesamtbetrachtung der sich aus Hitze ergebenden Gefährdung ausgewählt. Anwender können über eine Auswahlbox zwischen den Indikatoren *Einwohner*, *Einwohner über 65 Jahren*, oder *vulnerable Einrichtungen* umschalten. So kann z.B. eine kartographische Darstellung der Räume erfolgen, in denen insbesondere eine ältere Bevölkerungsgruppe von Hitzefolgen betroffen ist.

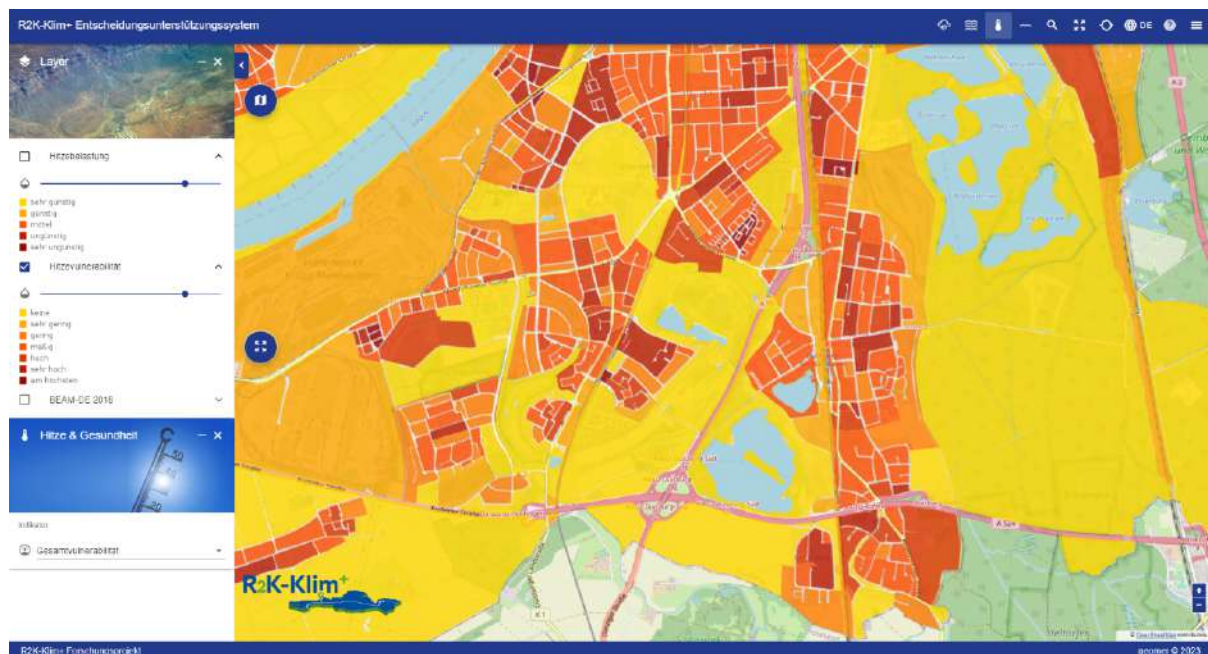


Abbildung 60: Berechnete Kartendarstellung der Hitzedefiziträume (rechts) mit Indikatorauswahl in der Sidebar (links unten). Alternativ ist eine Darstellung der zugrundeliegenden Lasträume als Karten-Layer möglich (links oben).

Das zugrundeliegende Bewertungsverfahren wurde hierbei vom gaiac entwickelt und von geomer vollständig in Form von Web-Diensten in das EUS integriert. Das gaiac leitet hierbei thermische Lasträume aus der fernerkundlichen und stadtstrukturellen Analyse ab. Die daraus resultierende Hitzekarte teilt thermische Lasträume in fünf Stufen ein und wird als Berechnungsgrundlage in das Datenbanksystem des EUS eingespielt. Weiterhin sind datenbankseitig Datensätze über Baublöcke und wichtige Kenngrößen wie Einwohnerzahlen, darunter auch die Anzahl älterer Einwohner hinterlegt. Mithilfe des von geomer eingebrachten fullHAUS-Datensatzes [65] sind zudem Informationen zu Gebäudetypen und damit zu sensitiven Einrichtungen vorhanden. Unter Anwendung des indicatorspezifischen Bewertungsmodells wird hierüber eine Vulnerabilitätsbewertung pro Baublock vorgenommen. Im Ergebnis liegt eine 7-stufige Bewertung der klimatischen Gunst-/Ungunsträume vor. Analog zur Vorgehensweise

bei der Bewertung von Hochwasserereignissen erfolgt dabei ausgehend von einer vorhandenen Exposition (hier vorliegende Hitzekarte) eine vollständig dynamische Echtzeit-Berechnung der Defiziträume inklusive der einzelnen Indikatoren und zugehörigen Kartendarstellung.

### Anwendungsmodule – Niedrigwasser

Das EUS-Anwendungsmodul für Niedrigwasser (Abbildung 61) stellt die klimawandelbedingten ökonomischen und transportbedingten Veränderungen dar und wurde in Zusammenarbeit von geomer und der Prognos AG entwickelt. Der Anwender wählt hierbei zunächst ein Klimaszenario, wie etwa *RCP8.5*, und einen der Indikatoren *importierte Gütermengen*, *Erwerbstätigenzahl* oder *Bruttowertschöpfung* aus. Innerhalb des Kartenbereichs werden daraufhin die ökonomischen Veränderungen hinsichtlich des ausgewählten Szenarios und Indikators dargestellt. Hierbei erfolgt ein Vergleich zum gegenwärtigen Zustand, wobei die Veränderungen farblich entsprechend einer 7-stufigen Skala unterteilt werden. Zusätzlich zeigt eine Diagrammdarstellung innerhalb der Sidebar die ökonomischen Veränderungen, diesmal gruppiert nach Kategorien. Kategorien sind im Falle der *Erwerbstätigenzahl* oder *Bruttowertschöpfung* unterschiedliche *B Branchen* wie z.B. *Landwirtschaft*, *Forstwirtschaft* oder *Bergbau*. Falls der Indikator *importierten Gütermengen* ausgewählt ist, so erfolgt eine Kategorisierung nach *Gütergruppen*, wie z.B. *Nahrungsmittel*, *Kohle* oder *Erze*. Unterschieden wird außerdem zwischen *direkten* und *indirekten Effekten*. *Direkte Effekte* entstehen innerhalb einer Branche, wenn Produktionsgüter nicht verfügbar sind, etwa fehlende Erzlieferungen im Falle der Metallindustrie. Bei *indirekten Effekten* handelt es sich um Auswirkungen auf eine nachgelagerte Branche, bspw. einen Rückgang der Verkäufe von PKWs innerhalb der Handelsbranche, weil von Seiten der direkt betroffenen Metallindustrie Lieferungen ausbleiben. Aus der Kartenansicht ist somit ersichtlich, wie sich potenzielle ökonomische Rückgänge räumlich verteilen, während die Diagrammdarstellung eine Unterteilung nach *B Branchen* und *Gütergruppen* entnommen werden kann.

Über die Benutzeroberfläche können die Ergebnisse weiter gefiltert werden. Mithilfe einer regionalen Einschränkung kann die ökonomische Veränderung nur für einzelnen Regionen, etwa für Duisburg, betrachtet werden. In diesem Falle zeigt die Diagrammdarstellung die Veränderung der Kategorien nur in Bezug auf die ausgewählte Region. Alternativ ist eine Einschränkung auf eine einzelne *B Branche/Gütergruppe* möglich. Die Kartenansicht zeigt dann nur die regionalen Auswirkungen in Bezug auf die ausgewählte Kategorie. Insbesondere werden so die Anforderungen verschiedener Nutzergruppen abgedeckt. Ein regionaler Entscheider wird vorrangiges Interesse an den Zahlen einer bestimmten Region haben, wohingegen Vertreter einzelner Wirtschaftszweige nur die Entwicklungen bestimmter Handelsgüter betrachten können.

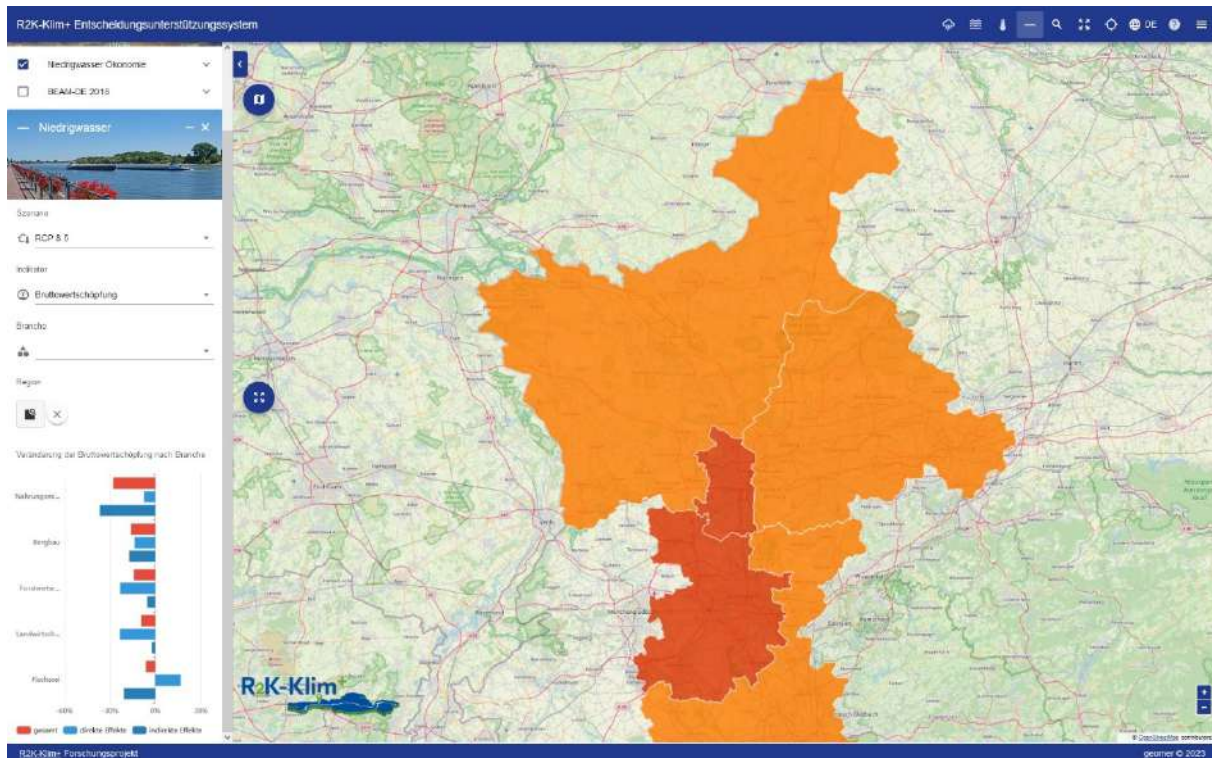


Abbildung 61: Kartendarstellung der regionalen ökonomischen Veränderungen (rechts) mit Auswahl- und Filteroptionen in der Sidebar (links). Die Sidebar zeigt darüber hinaus die ökonomischen Veränderungen nach Branche.

Aufgrund der Komplexität der zugrundeliegenden Modellkette unter Einsatz proprietärer Software war im Falle der ökonomischen Auswirkungen von Niedrigwasser eine Integration des Bewertungsmodells in das EUS nicht möglich. Stattdessen werden hier sämtliche wirtschaftlichen Auswirkungen innerhalb einer externen Modellierung seitens der Prognos AG vorgerechnet. Die daraus resultierenden tabellarischen Daten sind unterteilt nach Klimaszenarien, Kategorien und Regionen und wurden nachfolgend in das Datenbanksystem des EUS importiert. EUS-seitig implementiert sind diesem Falle die zum Betrieb der Benutzeroberfläche erforderlichen Aggregationsstufen und Filter, sowie die Berechnung der Karten- und Diagrammdarstellung mit entsprechender Klassifizierung. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung wird das Niedrigwasser-Modul mit einem von der Prognos AG zur Verfügung gestellten Testdatensatz betrieben. Eine Integration der finalen Ergebnisdaten wird zu Beginn der FuE-Phase II vorgenommen.

## 6 Verwertung der Ergebnisse

Die Methoden und Ergebnisse des Projektes sind Bestandteil eines ganzheitlichen Verwertungsplanes. Dieser umfasst eine Verwertung während der Projektlaufzeit, zum Projektabschluss sowie langfristige Verwertungsziele. Über die gemeinsame Verwertung hinaus verfolgen die Konsortialpartner zudem teilprojektspezifische Verwertungspläne, zu denen sie individuelle Beiträge liefern.

### FiW

Als Projektkoordinator war das FiW bereits während der Projektlaufzeit für die Kommunikation und Präsentation von Methoden und (Zwischen-)Ergebnissen verantwortlich. In diesem Zusammenhang wurden Beiträge u.a. zu den folgenden Veranstaltungen geliefert:

- Präsentation beim Tag der Hydrologie 2021 in Potsdam (Präsenz)
- Präsentation beim digitalen Expertenforum der Zukunftsinitiative Klima.Werk 2021
- Präsentation bei der digitalen Essener Tagung 2022
- Präsentation bei „Built and Lived Environment“ 2022 in Aachen
- Unterstützung der Session „Klimadienste für die kommunale Klimaanpassung, Beispiele aus dem BMBF-Fördervorhaben RegiKlim“ bei der Woche der Klimaanpassung 2022
- Workshop beim Expertenforum der Zukunftsinitiative Klima.Werk in Castrop-Rauxel 2022
- Präsentation bei der Digital Water Conference (DWC) 2022 in Freiburg
- Workshop zu den Themen Niedrigwasser und Logistik beim Fachforum „Zukunftsfähige Logistik“ 2023 in Duisburg
- Vorstellung beim Wissenschaftsforum Mobilität 2023 in Duisburg

Das FiW organisierte die projektinternen Präsenzworkshops. Alle Konsortialpartner:innen nahmen regelmäßig an den Arbeitsgruppen der Begleitforschung teil, stellten dort ihre Methoden und (Zwischen-)Ergebnisse vor und beteiligten sich an den von WIRKsam organisierten Publikationen. Aktuelle Meldungen zum Projektfortschritt wurden regelmäßig auf der Projekthomepage veröffentlicht: [www.r2k-klim.net](http://www.r2k-klim.net) .

Nach Projektabschluss strebt das FiW eine weitere Verbreitung der Ergebnisse aus der FuE-Phase I auf Fachtagungen und in Publikationen an. Gemeinsame Veröffentlichungen mit Projektpartnern sind bereits für die Bereiche hydrologische und hydraulische Modellierung, Niedrigwasser und Logistik sowie Klimafolgenanpassung in Kommunen geplant.

Die Erkenntnisse des Projektes sind regelmäßig Bestandteil von Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten am Institut. Ein wissenschaftlicher Mitarbeiter promoviert aktuell zu einem



Fokusthema des Projektes, den Auswirkungen von Niedrigwasser auf die wasserassoziierten Wirtschaftssektoren am Rhein. Die Mitarbeiter:innen des FiW bringen die Erkenntnisse auch an anderen Stellen in das wissenschaftliche Netzwerk des Institutes sowie die entsprechenden Fachverbände (bspw. DWA) ein. Dies umfasst auch die Integration des Themas in Querschnittsbereiche am Institut wie u.a. Gewässerbewirtschaftung, Extremereignisse, Stadtklima und Capacity Building. Das FiW konnte sein im Themenfeld Klimafolgenanpassung bestehendes Netzwerk erweitern und weitere Projekte mit den in R2K-Klim+ behandelten Fokusthemen akquirieren.

Seinen inhaltlichen Schwerpunkt für zukünftige Projekte im Bereich Klimafolgenanpassung sieht das FiW vor allem in der klimawirkungsübergreifenden Bewertung von Klimafolgen und Anpassungsmaßnahmen. Ein wichtiger Bestandteil dieser Analysen sind wirtschaftliche Gesichtspunkte der Klimafolgenanpassung. Das FiW strebt daher auch zukünftig die Integration ökonomischer Modellierungen in die eigenen Betrachtungen an. Als Transferinstitut stehen zudem praxisrelevante Anwendungen der wissenschaftlichen Erkenntnisse im Zentrum kommender Projekte, z.B. durch die intensive Einbindung von Kommunen in Forschungs- und Projektverbünde.

Die zentrale und direkte Verwertung der Ergebnisse von R2K-Klim+ erfolgt ab September 2023 in der FuE-Phase II des Projektes.

### **gaiac**

#### *Ermittlung stadtstruktureller Kenngrößen und Ableitung von thermischen Lastgebieten inkl. Vulnerabilitätsanalysen*

Die von gaiac angewandte Methodik, über die Analyse von stadtstrukturellen Kenngrößen Themenfelder wie Stadtklima und Biodiversität bearbeiten zu können, wird als kostengünstiges Angebot an Klein- und Mittelstädte verstanden, die sich beispielsweise keine umfangreichen Klimamodellierungen leisten können. Zudem liefert dieser Ansatz kleinräumig konkrete Hinweise auf Defiziträume, die mittels Klimaanpassungsmaßnahmen verbessert werden können. Die von der Stadt Duisburg durchgeführten Klimaanalysen bieten dabei für gaiac die Möglichkeit, die eigene Methodik zu überprüfen und mit den Ergebnissen von Klimamodellen abzugleichen. Dies erhöht die Anwendbarkeit der eigenen Methodik auf andere Städte.

Die Methodik wurde bereits in einem Workshopformat bei der Woche der Klimaanpassung 2022 und beim Expertenforum der Zukunftsinitiative Klima.Werk in Castrop-Rauxel 2022 vorgestellt. Die Resonanz auf die vorgestellte Methodik war sehr positiv. Das gaiac strebt kurz- bis mittelfristig an, stadtstrukturelle Analysen für Klimaanpassungsmaßnahmen als Dienstleistung anzubieten.

#### *Modellierung der Auenvegetation auf der Mikroebene (LandS-Modell)*

Das Konzept der Modellerweiterung zur Auenvegetation wurde während der Projektlaufzeit auf zwei Fachtagungen bzw. Workshops vorgestellt und diskutiert: dem YoMos 2022 (Young

Modellers in Ecology) Workshop und dem AÖW 2023 (Auenökologischer Workshop). Zudem ist die Vorstellung und Diskussion des Modells für die ECEM 2023 (European Conference of Ecological Modelling) geplant.

Die Weiterentwicklung des LandS-Modells erfolgt im Rahmen einer Promotion. Für diese Promotion sind zwei Veröffentlichungen in englischen Fachzeitschriften vorgesehen. Das erste Manuskript u.a. zur Flexibilisierung des LandS-Modells und der Initialisierung verschiedener Landschaften mit ihrer spezifischen Vegetation befindet sich bereits im Einreichungsprozess. Das zweite Manuskript wird sich mit der ökologischen Modellierung der Auenlandschaft in Duisburg befassen und ist für das Jahr 2024 geplant.

### **Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH**

Die aus R2K-Klim+ gewonnenen Erkenntnisse werden durch die Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH auf der firmeneigenen Internetseite veröffentlicht und im Zuge von Fachgesprächen und bei Akquiseterminen kommuniziert. Der Fokus auf die Schnittstelle zwischen Forschung und Praxis liefert dem Planungsbüro einen Wettbewerbsvorteil bei der zukünftigen Akquise von Dienstleistungsprojekten. Die Modellierungen auf der Makroebene und der dadurch gewonnene Ausbau der Expertise in der Wirkmodellierung werden in zukünftigen Aufträgen weiterverwendet. Zudem konnte aufgrund der Berücksichtigung neuer Teildisziplinen in der Maßnahmenentwicklung (z. B. Stadtklimatologie) die Expertise in der ganzheitlichen Planung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen ausgebaut werden. Die IG Siekmann plant mittelfristig die Beteiligung an weiteren Forschungsprojekten auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse.

### **geomer GmbH**

Infolge der Starkregengefahrenmodellierungen gab es einen intensiven Austausch zwischen geomer und den Wirtschaftsbetrieben Duisburg (WBD). Diese werden die bereits gerechneten Starkregenkarten für verschiedene Anwendungsfragestellungen verwenden. Eine Datennutzungsvereinbarung befindet sich bereits in Abstimmung. Über die Projektinhalte hinaus wurden von den WBD zusätzliche Simulationsrechnungen und Postprozessierungen für spezielle Anwendungen beauftragt.

Im Rahmen des Deutschen Kongress für Geographie (kurz DKG) am 20./21./22.09.2023 in Frankfurt am Main wird das Projekt in Form einer Posterpräsentation vorgestellt.

Aufgrund der Reiseeinschränkungen infolge der Corona-Pandemie konnten geplante Teilnahmen an Messen und Tagungen nicht wie geplant durchgeführt werden. Jedoch konnten insbesondere zum Thema Schadenpotenzialberechnung Informationsveranstaltungen für LAWA und IKSR durchgeführt werden. Im Rahmen des 6. Expertenforums der ZI Klima.Werk am 18./19.10.2023 in Duisburg wird der Prototyp des Entscheidungsunterstützungssystem vorgestellt. Das Projekt wurde außerdem innerhalb des geomer-Newsletters präsentiert. Weiterhin

bietet geomer den Konsortialpartnern fachliche Unterstützung bei geplanten Publikationen in verschiedenen wissenschaftlichen Bereichen an.

## **RISP**

Seitens des RISP werden die Ergebnisse auf verschiedenen Ebenen verwertet.

In grundsätzlicher sozial-ökologischer Perspektive bringt hat das RISP im Vorhaben die Schnittstelle zwischen Umweltsystemen und der Gesellschaft, mit einem Schwerpunkt auf die mit der Umsetzung von Maßnahmen betrauten Akteure auf der kommunalen und regionalen Ebene untersucht. Die Ergebnisse sind grundlegend für die in der FuE-Phase II angestrebte Weiterentwicklung im Projekt.

Mit der Haushaltsbefragung und der qualitativen und netzwerkanalytisch fundierten Stakeholderanalyse wurden methodische Kompetenzen ausgebaut, die in den Beratungs- und Forschungsarbeiten des RISP zum Einsatz kommen werden.

Das RISP befindet sich aufbauend auf den Arbeiten zur thermischen Belastung in Kontakt mit regionalen und kommunalen Stakeholder:innen u.a. im Rahmen der Zukunftsinitiative Klima.Werk, die Interesse sowohl an den Ergebnissen als auch an Folgeuntersuchungen mit anderen Schwerpunkten, beispielsweise im Bereich der Kritischen Infrastrukturen bekundet haben.

Im Rahmen der konstituierenden Sitzung der Taskforce zur Erstellung eines Hitzeaktionsplan der Stadt Duisburg am 19. Juni 2023 wurden die Befragungsergebnisse vorgestellt und anschließend in Hinblick auf die Nutzbarmachung bei der Konzeption eines Hitzeaktionsplans diskutiert. Das RISP verfolgt die Perspektive, dass Befragungstool und die Ergebnisanalyse als Dienstleistung für Kommunen anzubieten. Am 18. September 2023 werden das Befragungstool und die Duisburger Ergebnisse auf einer RISP-Veranstaltung im Rahmen der Woche der Klimaanpassung vorgestellt.

Schließlich ergänzen die Erfahrungen im Projekt Arbeiten des RISP, in denen Fragen von Anpassung an den Klimawandel und Ziele des Klimaschutzes an der Schnittstelle zwischen Implementationsakteuren und Bürger:innen durch technologische Innovationen ergänzt werden.

## **Stadt Duisburg**

Zur fortlaufenden Verwertung von Projektoutputs wurden Ergebnisstände der Projektpartner im Stadtkonzern vorgestellt und diskutiert, sowie impulsgebend in städtebaulichen Vorplanungen und Förderkulissen eingebracht, um das Bewusstsein für bereits bestehende Risiken des Klimawandels in Duisburg zu stärken. Im Sinne der im Antrag formulierten wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit wurden Vulnerabilitätsanalysen mit Teilergebnissen des Projekts auf lokaler Ebene erstellt und z.B. bei Ämterworkshops im Rahmen der Städtebauförderung in

Duisburg–Alt-Hamborn und -Marxloh vorgestellt, sowie bei der Inanspruchnahme von KRiS-Fördermitteln und zugehöriger Maßnahmenplanung hinzugezogen.

Die Ergebnisse der Starkregenmodellierung erfuhren eine weitere Verwertung durch die Wirtschaftsbetriebe Duisburg als Unterstützung bei der Objektberatung. Dabei können Immobilieneigentümer:innen in einem Wasser-Risiko-Check im Zusammenhang mit der Starkregengefahrenkarte sehr detaillierte Informationen als Entscheidungsgrundlage zur Gestaltung von Maßnahmen gegen Überflutungen erhalten.

Der regionale Transfer von Knowhow wurde mit der Vorstellung der konzipierten Bewertungsmethodik bei interkommunalen und nationalen Veranstaltungen gefördert. Dazu zählen Workshops bei den Expertenforen der Zukunftsinitiative Klima.Werk 2021, digital und 2022 in Castrop-Rauxel; sowie ein Onlineworkshop bei der Woche der Klimaanpassung 2022. Die Resonanz in den anschließenden Diskussionen reicherten den weiteren Entwicklungsprozess an und legten die Grundsteine für den Transfers von Projektoutputs zu regionalen Akteuren in der FuE-Phase II.

Auch in stadtgesellschaftlichen und unternehmerischen Kreisen wurden Projektergebnisse genutzt, um das Bewusstsein für Anpassungsnotwendigkeiten zu schärfen. So wurde auf dem öffentlich zugänglichen Umweltmarkt der Stadt Duisburg 2022 die AR-Anwendung des FiW präsentiert und den Passierenden vorgestellt. Der Sektor Wirtschaft und Logistik wurde konkret zur Klimaanpassung mit Projektergebnissen beim Fachforum „Zukunftsfähige Logistik“ 2023 angesprochen. Das Fachforum fand auf Eigeninitiative der Stadt Duisburg zum Thema Klimawandel in der Logistik statt, mit abschließender und erneuter Interessensbekundung der Duisburger Hafen AG (duisport) und in Duisburg ansässiger Logistikdienstleister zu Verwertung von Projektergebnissen.

## 7 Fazit und Ausblick

**Klimafolgenanpassung wird im Hinblick auf den fortschreitenden Klimawandel zukünftig ein integraler Bestandteil in kommunalen Planungsprozessen sein (müssen).**

Diese Erkenntnis wurde durch das Forschungsprojekt R2K-Klim+ weiter untermauert. Die Kommunen in Deutschland stehen vor der großen Herausforderung, Klimafolgenanpassung als gesamtgesellschaftliche Aufgabe zu organisieren und zu steuern. Die Auswirkungen des Klimawandels betreffen nicht nur einzelne Sektoren, sondern sämtliche den Menschen umgebende Systeme. Diese Auswirkungen zu begrenzen oder sich alternativ an sie anzupassen, ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.

Kommunen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer charakteristischen Merkmale. Um eine gezielte Klimafolgenanpassung zu betreiben, müssen die oftmals auf globaler oder nationaler Ebene definierten Anforderungen erst einmal auf die kommunale Ebene transferiert werden. Für eine gelungene strategische Ausrichtung ist es von Vorteil, hierbei verschiedene zukünftige Entwicklungspfade, sogenannte Klimaszenarien, zu berücksichtigen.

Ein hoher Fokus liegt auf der Bewertung und Darstellung von Klimawirkungen und Anpassungsmaßnahmen. Hierbei sind ganzheitliche multikriterielle Bewertungsansätze mit ökonomischen, ökologischen und sozialen Indikatoren gegenüber singulären Betrachtungen von Klimasignalen oder Rezeptoren klar im Vorteil. Synergieeffekte können die Akzeptanz und Unterstützung von Stakeholder:innen erhöhen. Zielkonflikte hingegen sind transparent zu kommunizieren und Bestandteil von jeglichen komplexen Wechselwirkungen. Ihre Bewältigung stellt eine der Grundfunktionen demokratischer Prozesse dar. Aus diesem Grund müssen fachliche Informationen auch für fachfremde Personen, den sogenannten Entscheidungsträger:innen, verständlich und nachvollziehbar aufbereitet werden. Im Idealfall sind spätere Anwender:innen von Methoden und Tools bereits am Entwicklungsprozess beteiligt. Darüber hinaus sind Informationen auch an weitere Zielgruppen individuell zu adressieren, mit einer zielgruppen- bzw. adressatenspezifischen Wissenschaftskommunikation.

R2K-Klim+ hat in der FuE-Phase I einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung einer ganzheitlichen kommunalen Klimafolgenanpassung geliefert. Gemeinsam mit der Stadt Duisburg hat das Konsortium charakteristische Anforderungen für eine fachliche Entscheidungsunterstützung in der Duisburger Kommunalverwaltung definiert. Die fachlich interdisziplinären Wirkmodelle der einzelnen Institutionen wurden miteinander kombiniert sowie Input- und Outputdaten aneinander angepasst. Die Modelle wurden so aufgesetzt, dass auch Klimaszenarien und Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden können. Aus den Ergebnissen der Wirkmodelle wurden schließlich Indikatoren abgeleitet, die die Wirkung der betrachteten fünf Klimasignale auf den Menschen, die Infrastruktur, die Umwelt und die Wirtschaft quantifizieren. Mithilfe

dieser Indikatoren wurde eine multikriterielle Bewertungsmethodik entwickelt, die Klimasignale und Anpassungsmaßnahmen im Hinblick auf ihre ökonomische, ökologische und soziale Wirkung evaluieren kann. Als Zwischenprodukt zum Ende der FuE-Phase I hat das Konsortium den Prototyp eines kommunalen Entscheidungsunterstützungssystems für die Stadt Duisburg öffentlich zugänglich gemacht: <https://r2k.geomer-maps.de>

In der FuE-Phase II wird das Konsortium nun auf den Zwischenprodukten und gewonnenen Erkenntnissen aufbauen. Die Konsortialpartner tragen mit ihren teilprojektspezifischen Beiträgen zu folgenden Schwerpunkten bei:

#### 1. Modellierung

Über das etablierte Modellnetzwerk, das gemeinsam von den Institutionen betrieben wird, werden weitere Maßnahmenbündel sowie die neuesten Klimaszenarien des IPCC (SSP-Szenarien) bei der Darstellung von Auswirkungen berücksichtigt.

#### 2. Bewertungsmethodik

Der Entwurf einer ganzheitlichen Bewertungsmethodik mit ökonomischen, ökologischen und sozialen Indikatoren wird weiterentwickelt und plausibilisiert. Die Indikatoren sind auf ihre Vergleichbarkeit und Praxistauglichkeit durch kommunale Anwender:innen zu prüfen.

#### 3. Entscheidungsunterstützungssystem

Die Ergebnisse der beiden ersten Arbeitspakete werden anschließend in das bestehende EUS integriert. Das Konsortium strebt eine Schnittstelle des EUS zur Geodateninfrastruktur der Stadt Duisburg an, um das System in der geschützten Infrastruktur der Verwaltungsprozesse zu implementieren.

#### 4. Risiko- und Wissenschaftskommunikation

Die Arbeiten der FuE-Phase II werden von einer adressatenspezifischen Kommunikationsstrategie begleitet, um den Transfer von Methoden und Ergebnissen an unterschiedliche Stakeholder:innen zu ermöglichen. Für die Anwender:innen des EUS in der Stadt Duisburg wird es eine intensive Anwendungsunterstützung geben.

Das übergreifende Ziel des Projektes bleibt die Verbesserung der strategischen kommunalen Klimafolgenanpassung in der Modellregion sowie der Transfer der gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Kommunen. Insgesamt verfolgt R2K-Klim+ damit ein Management technischer und sozialer Innovationen auf einer Mehrebenen-Skala (Stadt und Region) und löst ganz bewusst die funktionale Spezialisierung politischer Systeme im urbanen Raum (Verwaltung, Politik, Zivilgesellschaft, Unternehmen) auf. Vielmehr werden diese Subsysteme und die dort verorteten Akteur:innen ermutigt und ertüchtigt, in der Klimafolgenanpassung innovative Lösungen in

Betracht zu ziehen und dabei sektorale Grenzen zu überwinden. Dabei wird nicht nur gemeinschaftlich Wissen (intellektuelles Kapital), sondern auch Vertrauen (soziales Kapital) gefördert. Soziales Kapital bildet zusammen mit intellektuellem Kapital (als Folge kooperativ gewonnen Wissens) und politischem Kapital (als Folge der Fähigkeit zum kollektiven Handeln) Ergebnis und Grundlage einer zukunftsfähigen klimaresilienten Stadt- und Regionalentwicklung.

Im Kontext dieser Entwicklung sind Innovationen wie die Bewertungsmethodik oder das EUS aus R2K-Klim+ die Abweichung von eingespielten Routinen, die sich im Wirtschaftssystem als Durchsetzung neuer technischer, organisatorischer und/oder sozialer Problemlösungen in Unternehmen und Markt darstellen. Der Ermöglichung und Initiierung neuer Ansätze, Praktiken und Steuerungsimpulse kommt dabei gerade dann eine tragende Rolle zu, wenn soziale Innovationen im Sinne eines erweiterten Innovationsverständnisses folgende Voraussetzungen reflektieren:

- Veränderte soziale Kontexte und ökonomische sowie soziale Praktiken der Organisation und Generierung von Innovationen (unter anderem Digitalisierung).
- Wissensressourcen, gerade bei Innovationsprozessen außerhalb der „klassischen“ Technologiepolitik sind nicht nur auf institutionelle Akteure beschränkt.
- Entgrenzung der territorialen Kooperationen und kein ausschließlicher Bezug auf regional verortete „endogene Potenziale“.

Diese Innovationen gilt es zu steuern, um entsprechend die im ausgewählten Raum verorteten Akteur:innen zukunfts- und damit auch wettbewerbsfähiger werden zu lassen.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] US Army Corps of Engineers (2021): HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual Version 6.0. US Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center (HEC). 69. Auflage.
- [2] Teng, J. ; Jakeman, A. J. ; Vaze, J. ; Croke, B. ; Dutta, D. ; Kim, S. (2017): Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. In: Environmental Modelling & Software, Heft 90, S. 201–216. DOI:10.1016/j.envsoft.2017.01.006.
- [3] DESTATIS (2022): Statistischer Bericht - Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt (<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Publikationen/Downloads-Schifffahrt/statistischer-bericht-binnenschifffahrt-2080400221095.html?nn=208040>; Abruf 30.06.2023).
- [4] Ademmer, M. ; Jannsen, N. ; Möhle, S. (2020): Extreme weather events and economic activity: The case of low water levels on the Rhine river. In: Kiel Working Paper, No. 2155 ([https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/Saskia\\_Moesle/KWP\\_2155\\_low\\_water\\_econ\\_activity.pdf](https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/Saskia_Moesle/KWP_2155_low_water_econ_activity.pdf); Abruf 19.12.2022).
- [5] WirtschaftsWoche (Hrsg.) (2022): Neuer Rekord-Tiefststand: Rhein-Pegel bei Emmerich sinkt in den Minusbereich (<https://www.wiwo.de/unternehmen/handel/niedrigwasser-neuer-rekord-tiefststand-rhein-pegel-bei-emmerich-sinkt-in-den-minusbereich/28602620.html>; Abruf 30.06.2023).
- [6] BMDV (2019): Aktionsplan „Niedrigwasser Rhein“ für zuverlässigen Transport. H2O statt CO2 – Wir machen den Güterverkehr auf dem Rhein zukunftssicher. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/WS/gemeinsame-erklaerung-acht-punkte-plan-niedrigwasser-rhein.html>; Abruf 30.06.2023).
- [7] Politti, E. ; Egger, G. ; Angermann, K. ; Rivaes, R. ; Blamauer, B. ; Klösch, M. ; Tritthart, M. ; Habersack, H. (2014): Evaluating climate change impacts on Alpine floodplain vegetation. In: Hydrobiologia, 737: 225–243. DOI:10.1007/s10750-013-1801-5.
- [8] Fuchs, E., et al. (2003): Einsatz von ökologischen Modellen in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung – Das integrierte Flussauenmodell INFORM. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- [9] Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2018): Arbeitshilfe kommunales Starkregenisikomanagement.
- [10] BKG (2021): BKG veröffentlicht interaktive Webkarte mit Gefahrenhinweisen zu Starkregen für das Gebiet Nordrhein-Westfalen (NRW). Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) ([https://www.bkg.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BKG/DE/PM\\_2021/211028-Starkregen.html](https://www.bkg.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BKG/DE/PM_2021/211028-Starkregen.html); Abruf 21.07.2023).



- [11] Matzarakis, A. ; Muthers, S. ; Graw, K. (2020): Thermische Belastung von Bewohnern in Städten bei Hitzewellen am Beispiel von Freiburg (Breisgau). In: Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz 63, Heft 8, S. 1004–1012.
- [12] Tong, S. ; Prior, J. ; McGregor, G. ; Shi, X. ; Kinney, P. (2021): Urban heat: an increasing threat to global health. In: BMJ, Heft 375, S. 2467.
- [13] Kemen ; Juliane ; Schäffer-Gemein ; Silvia ; Kistemann ; Thomas (2020): Klimaanpassung und Hitzeaktionspläne. Ein idealtypisches Thema der geografischen Gesundheitsforschung. In: Informationen zur Raumentwicklung, Heft 47, S. 58–69.
- [14] Laaidi, K. ; Zeghnoun, A. ; Dousset, B. ; Bretin, P. ; Vandentorren, S. ; Giraudet, E. ; Beaudeau, P. (2012): The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave. In: Environmental health perspectives 120, Heft 2, S. 254–259.
- [15] 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. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Heft 88, S. 102553. DOI:10.1016/j.trd.2020.102553.
- [16] Wang, T. ; Qu, Z. ; Yang, Z. ; Nichol, T. ; Dimitriu, D. ; Clarke, G. ; Bowden, D. ; Taewoo Lee, P. (2020): Impact analysis of climate change on rail systems for adaptation planning: A UK case. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Heft 83, S. 102324. DOI:10.1016/j.trd.2020.102324.
- [17] Huibregtse, E. ; Morales Napoles, O. ; Hellebrandt, L. ; Paprotny, D. ; Wit, S. de (2016): Climate change in asset management of infrastructure: A riskbased methodology applied to disruption of traffic on road networks due to the flooding of tunnels. In: European Journal of Transport and Infrastructure Research, Vol. 16, no. 1. DOI:10.18757/ejtir.2016.16.1.3116.
- [18] Liu, L. ; Wen, Y. ; Liang, Y. ; Zhang, F. ; Yang, T. (2019): Extreme Weather Impacts on Inland Waterways Transport of Yangtze River. In: Atmosphere 2019, Heft 3, S. 133. DOI:10.3390/atmos10030133.
- [19] Zheng, Y. ; Kim, A. M. (2017): Rethinking business-as-usual: Mackenzie River freight transport in the context of climate change impacts in northern Canada. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Heft 53, S. 276–289. DOI:10.1016/j.trd.2017.04.023.
- [20] Jonkeren, O. E. ; Jourquin, B. ; Rietveld, P. (2011): Modal-split effects of climate change: The effect of low water levels on the competitive position of inland waterway transport in the river Rhine area. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice, 45, Heft 10, S. 1007–1019. DOI:10.1016/j.tra.2009.01.004.

- [21] Suarez, P. ; Anderson, W. ; Mahal, V. ; Lakshmanan, T. (2005): Impacts of flooding and climate change on urban transportation: A systemwide performance assessment of the Boston Metro Area. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10, Heft 3, S. 231–244.
- [22] Korn, M., et al. (2017): RIVA: Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels. In *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen S, Straßenbau*. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH. ISBN: 978-3-95606-312-1.
- [23] Galla, K. K.: *Climate Change Risk Assessment of Road Infrastructure for the Town of EssexTown of Essex*. Windsor, Ontario, University of Windsor, Department of Civil and Environmental Engineering (2021 (<https://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1219&context=major-papers>; Abruf 07.12.2022) – Überprüfungsdatum 2022-12-07.
- [24] Zhu, W. ; Liu, K. ; Wang, M. ; Ward, P. J. ; Koks, E. E. (2021): System vulnerability and risk assessment of railway systems to flooding. DOI:10.5194/nhess-2021-188.
- [25] Villalba Sanchis, I. ; Insa Franco, R. ; Martínez Fernández, P. ; Salvador Zuriaga, P. ; Font Torres, J. B. (2020): Risk of increasing temperature due to climate change on high-speed rail network in Spain. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Heft 82, S. 102312. DOI:10.1016/j.trd.2020.102312.
- [26] Du, Q. ; Kim, A. ; Zheng, Y. (2017): Modeling multimodal freight transportation scenarios in Northern Canada under climate change impacts. In: *Research in Transportation Business & Management*, Heft 23, S. 86–96.
- [27] Beuthe, M. ; Jourquin, B. ; Urbain, N. ; Lingemann, I. ; Ubbels, B. (2014): Climate change impacts on transport on the Rhine and Danube: A multimodal approach. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Heft 27, S. 6–11.
- [28] Markus Deublein, et al. (2021): Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen. In *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau*, Heft B 165. EBP Schweiz; Bundesanstalt für Straßenwesen; Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für Neue Wissenschaft. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG. ISBN: 9783956065835 (<https://e-docs.tib.eu/files/e01fn21/1762350343.pdf>).
- [29] Anne-Farina Lohrengel ; Lennart Meine (2022): Erhöhung der Resilienz der Straßeninfrastruktur gegenüber Klimawandel und Extremwetterereignissen. In: *Straße und Autobahn 05/2022 / Themenheft Nachhaltigkeit*, S. 409–416.
- [30] difu; Deutscher Städtetag (Hrsg.): Orientierungshilfe für die Prüfung klimarelevanter Beschlussvorlagen (PkB) in kommunalen Vertretungskörperschaften.

- [31] Funk ; René (2021): BESCHLUSS-VORLAGE G-21/109 (Öffentlich). Stadt Freiburg im Breisgau ([https://ris.freiburg.de/vorlagen\\_details.php?vid=4633103100110](https://ris.freiburg.de/vorlagen_details.php?vid=4633103100110); Abruf 04.10.2023).
- [32] Göttingen, Ausschuss für Umwelt, Klimaschutz und Mobilität (Hrsg.) (2020): "Gecheckt: Klimaschutz bei jeder Amtshandlung" (Antrag Bündnis90/Die Grünen-Fraktion) (<https://ratsinfo.goettingen.de/bi/vo020.asp?VOLFDNR=21095>; Abruf 04.10.2023).
- [33] Stadt Leipzig, 01.11 Referat Grundsatz und Koordination (Hrsg.) (2021): 1/5 Informationsvorlage Nr. VI-DS-05726-DS-03-Ifo-01: Vorlagenmanagement - Klimawirkung von Vorlagen (<https://ratsinfo.leipzig.de/bi/vo020?VOLFDNR=1017554>; Abruf 04.10.2023).
- [34] Fechner, F. L. (2020): Antrag auf Aufnahme in die Tagesordnung: Bewertung städtischer Maßnahmen anhand ihrer Klimabilanz. FridaysForFuture Bielefeld; Klima- und Umweltbeirat der Stadt Bielefeld (<https://anwendungen.bielefeld.de/bi/getfile.asp?id=691506&type=do>).
- [35] Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen GmbH (2020): Prüfung und Bewertung kommunaler Beschlussvorlagen auf Klimarelevanz: Ergebnis der Fachtagung „Meine Kommune im Klimanotstand – was nun?“ ([https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/\\_downloads/SonstigeDokumente/Klimanotstand/KEAN\\_Handreichung\\_Beschlussv.-Pruefung\\_fin.pdf?m=1608625555&](https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/_downloads/SonstigeDokumente/Klimanotstand/KEAN_Handreichung_Beschlussv.-Pruefung_fin.pdf?m=1608625555&)).
- [36] Osnabrück, Fachbereich Umwelt und Klimaschutz (2019): VO/2019/3973-02 Anstrengungen für kommunale Klimapolitik verstärken – Antrag Fraktionen von CDU, SPD, Bündnis 90/Die Grünen, Die Linke (TOP 4.7) - geänderte Fassung (<https://ris.osnabrueck.de/bi/to020.asp?TOLFDNR=1073383>).
- [37] Stadt Essen (2020): Vorlage 0618/2020/6: Beurteilung von Auswirkungen auf den Klimawandel von Verwaltungsvorlagen ([https://ris.essen.de/sdnetrim/UG-hVM0hpd2NXNFdFcExjZbbG1wl8xlyYeZBv2M0V0r1ZZYHrQR2KpmNgaDHWRJjc/Vorlage\\_0618-2020-6.pdf](https://ris.essen.de/sdnetrim/UG-hVM0hpd2NXNFdFcExjZbbG1wl8xlyYeZBv2M0V0r1ZZYHrQR2KpmNgaDHWRJjc/Vorlage_0618-2020-6.pdf)).
- [38] Stadt Arnsberg | Zukunfts- und Strategiebüro Nachhaltigkeit: Arnsberger Nachhaltigkeitscheck für Beschlussvorlagen ([https://www.arnsberg.de/fileadmin/user\\_upload/Bilder\\_und\\_pdf-Dateien/1.0.2/nachhaltigkeitscheck.pdf](https://www.arnsberg.de/fileadmin/user_upload/Bilder_und_pdf-Dateien/1.0.2/nachhaltigkeitscheck.pdf)).
- [39] Clees, S. (2021): VO/1067/21 Einführung des Klimachecks in Verwaltungsvorlagen: Anlage 1: Schaubild zum Ablauf des Klimachecks in Verwaltungsvorlagen/-entscheidungen. Stadt Wuppertal ([https://ris.wuppertal.de/vo0050.asp?\\_\\_kvonr=24762](https://ris.wuppertal.de/vo0050.asp?__kvonr=24762)).
- [40] Kruse, E., et al. (2017): Überflutungs- und Hitzevorsorge in Hamburger Stadtquartieren: Wissensdokument. In Wissensdokument. HafenCity Universität Hamburg; Hamburg. Hamburg: Tutech Verlag. ISBN: 9783946094159.

- [41] Prenger-Berninghoff, K. ; Neht, A. ; Hein, S.: Klima-Check in der Bauleitplanung: Checkliste Klimaschutz und Klimaanpassung. Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen University ([https://www1.isb.rwth-aachen.de/BEST-KLIMA/download/Klima-Check-Final\\_interaktiv.pdf](https://www1.isb.rwth-aachen.de/BEST-KLIMA/download/Klima-Check-Final_interaktiv.pdf)).
- [42] UBA (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 1: Grundlagen. Umwelt Bundesamt (UBA). Dessau-Roßlau.
- [43] BfG (2023): Geoportal der BfG: Das Open Data Angebot der BfG. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (<https://geoportal.bafg.de/CSWView/od.xhtml>; Abruf 11.01.2021).
- [44] Geodatenzentrum des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (Hrsg.) (2021): CORINE Land Cover 5 ha Daten, Stand 2018 (<https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitalelandschaftsmodelle/corine-landcover-5-ha-stand-2018-clc5-2018.html>; Abruf 11.01.2021).
- [45] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.) (2013): Bodenarten der Oberböden Deutschlands 1:1.000.000 (: [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/Bodenkundliche\\_Karten\\_Datenbanken/Themenkarten/BOART1000OB/boart1000ob\\_node.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/Bodenkundliche_Karten_Datenbanken/Themenkarten/BOART1000OB/boart1000ob_node.html); Abruf 21.01.2021).
- [46] Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2022): Open Data des Deutschen Wetterdienstes (<https://opendata.dwd.de/>; Abruf 01.08.2022).
- [47] BfG (2023): Informationsplattform Undine. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (<https://undine.bafg.de/rhein/rheingebiet.html>; Abruf 27.02.2023).
- [48] BfG (2020): FLYS - Flusshydrologischer Webdienst. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ([https://www.bafg.de/DE/08\\_Ref/M2/03\\_Fliessgewmod/01\\_FLYS/flys\\_node.html](https://www.bafg.de/DE/08_Ref/M2/03_Fliessgewmod/01_FLYS/flys_node.html); Abruf 26.06.2023).
- [49] ICPR: Flood risk evolution: assessment tool and results. International Commission for the Protection of the Rhine (ICPR) (<https://www.iksr.org/en/topics/floods/flood-risk-tool-florian>; Abruf 28.07.2023).
- [50] IKS (2020): Rheinatlas 2020 (<https://geoportal.bafg.de/karten/rheinatlas/>; Abruf 17.11.2022).
- [51] Copernicus (Hrsg.): CLC 2018 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download>; Abruf 21.07.2023).
- [52] Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.) (2022): BEAM-DE Basic European Assets Map (<https://www.wasserblick.net/servlet/is/219256/>; Abruf 24.07.2023).
- [53] CONTARGO (Hrsg.) (2017): Kleinwasser ([https://www.contargo.net/assets/pdf/Kleinwasser\\_Info-2017-DE.pdf](https://www.contargo.net/assets/pdf/Kleinwasser_Info-2017-DE.pdf); Abruf 02.12.2022).

- [54] Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken vom 2007. In: Amtsblatt der Europäischen Union L 288/27, 2007.
- [55] IT.NRW (2023): OpenGeodata.NRW: Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL) NRW. Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) ([https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/wasser/hochwasser/hwrm/](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/wasser/hochwasser/hwrm/); Abruf 17.05.2023).
- [56] ProAqua (2013): Erstellung der Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten für den Rhein: Projektbericht. ProAqua Ingenieurgesellschaft mbH.
- [57] WSV (2023): PEGELONLINE. Stammdaten Duisburg-Ruhrort. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (<https://www.pegelonline.wsv.de/gast/stammdaten?pegelnr=2770010>; Abruf 26.06.2023).
- [58] DHI-WASY GmbH: DHI-WASY Software. HQ-EX 4.0 Programm zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten: Benutzerhandbuch. Berlin, 2015.
- [59] DWA (2012): Merkblatt DWA-M 552: Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. In DWA-Regelwerk. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. 2012. Auflage. Hennef. ISBN: 9783942964258.
- [60] Beirat zum Projekt Duisburg2027 (Hrsg.) (2010): Handlungsfeld Hochwassersicherheit. 2010.
- [61] MUNV (2023): ELWAS-WEB. Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW (MUNV) (<https://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.xhtml#>; Abruf 26.06.2023).
- [62] BtMH: Wasserkraftwerk Raffelberg. Mülheim an der Ruhr. Betriebe der Stadt Mülheim an der Ruhr (BtMH).
- [63] Informationsplattform Undine (2022): Pegel im Rheingebiet: Duisburg-Ruhrort, Rhein. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ([https://undine.bafg.de/rhein/pegel/rhein\\_pegel\\_ruhrort.html](https://undine.bafg.de/rhein/pegel/rhein_pegel_ruhrort.html); Abruf 27.06.2023).
- [64] Rubín, C. ; Nikolowski, J. ; Riedel, K. ; Gerber, S. (2017): Schadenspotenziale in Nutzen-Kosten-Untersuchungen für Hochwasserschutzmaßnahmen: Vergleich des gebäudetypologischen Ansatzes mit dem flächennutzungsbezogenen Ansatz. In: 40. Dresdner Wasserbaukolloquium 2017 „Bemessung im Wasserbau - Klimaanpassung, Untersuchungen, Regeln, Planung, Ausführung“.
- [65] IABG mbH ; geomer GmbH (2020): EMSN-076 Germany BEAM Update: Final Report. European Commission – Joint Research Centre, Directorate Space, Security and Migration, Unit E.1 Disaster Risk Management ([https://emergency.copernicus.eu/mapping/download/181929/EMSN076\\_Final-Report\\_v1\\_20082025.pdf?redirect=list-of-components/EMSN076](https://emergency.copernicus.eu/mapping/download/181929/EMSN076_Final-Report_v1_20082025.pdf?redirect=list-of-components/EMSN076)).

- [66] Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH (Hrsg.) (2023): Baupreisindex (<https://bki.de/baupreisindex.html>).
- [67] DESTATIS (Hrsg.) (2022): Anlagevermögen in den Ländern der Bundesrepublik Deutschland 1991 bis 2020 (Reihe 1 Band 4), Berechnungsstand: August 2022 (<https://www.statistikportal.de/de/vgrdl/ergebnisse-laenderebene/investitionen-anlagevermoegen#alle-ergebnisse>; Abruf 05.12.2022).
- [68] Meyer, V.: *Methoden der Sturmflut-Schadenspotenzialanalyse an der deutschen Nordseeküste*. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle: Dissertation (2005 (ISSN 1860-0387)).
- [69] IT.NRW (2023): OpenGeodata.NRW: Digitales Geländemodell - Gitterweite 1 m. Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) ([https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/hm/dgm1\\_xyz/dgm1\\_xyz/](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/hm/dgm1_xyz/dgm1_xyz/); Abruf 09.08.2023).
- [70] IT.NRW (2023): OpenGeodata.NRW: Digitales Basis-Landschaftsmodell. Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) (<https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/lm/akt/basis-dlm/>; Abruf 09.08.2023).
- [71] Geologischer Dienst NRW (Hrsg.): Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen 1 : 50 000 (BK 50) ([https://www.gd.nrw.de/pr\\_kd\\_bodenkarte-50000.php](https://www.gd.nrw.de/pr_kd_bodenkarte-50000.php); Abruf 28.08.2023).
- [72] Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) (2010): Handbuch Stadtklima – Maßnahmen und Handlungsempfehlungen für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel (Langfassung). Düsseldorf.
- [73] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) (2021): Numerische Bewertung von Biotoptypen für die Eingriffsregelung in NRW. Recklinghausen.
- [74] Roloff, A. (2021): Trockenstress bei Bäumen: Ursachen, Strategien, Praxis. Wiebelsheim: Quelle & Meyer Verlag GmbH & Co. ISBN: 978-3-494-01858-4.
- [75] Regionalverband Ruhr (RVR) (2022): Klimaanalyse Stadt Duisburg. Essen.
- [76] Korn, M., et al. (2017): Anhang zu RIVA: Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels. In Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen S, Straßenbau. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH. ISBN: 978-3-95606-312-1.
- [77] Herrmann, S. R.: *Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen*. Stuttgart, Inst. für Straßen- und Verkehrswesen. (Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 39) (2008).
- [78] DIN e.V. (2014). DIN 18040-3:2014-12 Barrierefreies Bauen - Planungsgrundlagen - Teil 3: Öffentlicher Verkehrs- und Freiraum.

- [79] ADAC (2021): Wasserschaden am Auto: Das sind die Folgen (<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/unfall-schaden-panne/schaden/wasserschaden-auto/>; Abruf 06.02.2023).
- [80] Shand, T. D., et al. (2011): Australian Rainfall and Runoff Project 10: Appropriate Safety Criteria for Vehicles. Engineers Australia. ISBN: 978-0-85825-948-5.
- [81] Jaroszweski, D. ; Chapman, L. ; Petts, J. (2010): Assessing the potential impact of climate change on transportation: the need for an interdisciplinary approach. In: Journal of Transport Geography, Volume 18, Issue 2. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2009.07.005.
- [82] Markolf, S. A. ; Hoehne, C. ; Fraser, A. ; Chester, M. V. ; Underwood, B. S. (2019): Transportation resilience to climate change and extreme weather events – Beyond risk and robustness. In: Transport Policy, Heft 74, S. 174–186. DOI:10.1016/j.transpol.2018.11.003.
- [83] BMUV (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) ([https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf); Abruf 06.02.2023).
- [84] Transportation Research Board (2008): Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation. (Transportation Research Board Special Report 290). Washington, D.C.
- [85] Umwelt Bundesamt (2016): Erläuterungen zu den Klimawirkungsketten.
- [86] UBA (2023): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umwelt Bundesamt (UBA) (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#indikatoren-der-lufttemperatur-heisse-tage-und-tropennachte>; Abruf 28.07.2023).
- [87] Narocki, C. (2021): Heatwaves as an occupational hazard: The impact of heat and heatwaves on workers' health, safety and wellbeing and on social inequalities. In Report / European Trade Union Institute. Brussels, Belgium: European Trade Union Institute. ISBN: 978-2-87452-614-5.
- [88] Pieper, R. (2019): Arbeitsstättenverordnung: Basiskommentar zur ArbStättV. In Basiskommentar. 4. Auflage. Frankfurt am Main: Bund-Verlag. ISBN: 978-3-7663-6876-8.
- [89] UNECE (2020): Climate change impacts and adaptation for transport networks and nodes. In United Nations publication. Geneva, New York: United Nations. ISBN: 978-92-1-117237-9.
- [90] Schubert, M., et al. (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030: Kurzbeschreibung der Güterverkehrsmatrizen (<http://daten.clearingstelle-verkehr.de/276/3/Datensatzbeschreibung%20G%C3%BCterverkehr.pdf>; Abruf 11.07.2023).

- [91] Seiler, C. ; Wohlrabe, K. ; Wojciechowski, P. (2014): Konjunkturtest im Fokus: Lagerbestand und Reichweite der Aufträge in der Industrie - ein Vergleich. In: ifo Schnelldienst, 21/2014 - 67. Jahrgang ([https://www.ifo.de/DocDL/ifosd\\_2014\\_21\\_4.pdf](https://www.ifo.de/DocDL/ifosd_2014_21_4.pdf); Abruf 31.07.2023).
- [92] DWD: Wetter- und Klimalexikon: Klima. Deutscher Wetterdienst (DWD) (<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html;jsessionid=B6132BF11F1249CED27319124989B245.live11053?lv2=101334&lv3=101462>; Abruf 30.05.2023).
- [93] DWD: Wetter- und Klimalexikon: Klimaprojektionen. Deutscher Wetterdienst (DWD) (<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=606792>; Abruf 27.06.2023).
- [94] Benestad, R. ; Buonomo, E. ; Guitierrez, J. M. ; Haensler, A. ; Hennemuth, B. ; Illy, T. ; Jacob, D. ; Keup-Thiel, E. ; Katragkou, E. ; Kotlarski, S. ; Nikulin, G. ; Otto, J. ; Rechid, D. ; Remke, T. ; Sieck, K. ; Sobolowski, S. ; Szabó, P. ; Szépszó, G. ; Teichmann, C. ; Vautard, R. ; Weber, T. ; Zsebeházi, G. (2021): Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use. In: EURO-CORDEX Guidelines, Version1.1 - 2021.02.
- [95] Kreienkamp, F. ; Huebener, H. ; Linke, C. ; Spekat, A. (2012): Good practice for the usage of climate model simulation results - a discussion paper. In: Environmental Systems Research 1, Heft 1, S. 9.
- [96] Moss, R. H. ; Edmonds, J. A. ; Hibbard, K. A. ; Manning, M. R. ; Rose, S. K. ; van Vuuren, D. P. ; Carter, T. R. ; Emori, S. ; Kainuma, M. ; Kram, T. ; Meehl, G. A. ; Mitchell, J. F. B. ; Nakicenovic, N. ; Riahi, K. ; Smith, S. J. ; Stouffer, R. J. ; Thomson, A. M. ; Weyant, J. P. ; Wilbanks, T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. In: Nature 463, Heft 7282, S. 747–756.
- [97] Chen, D., et al. (2021): Framing, Context, and Methods. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S. L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M. I.; Huang, M.; Leitzell, K.; Lonnoy, E.; Matthews, J. B. R.; Maycock, T. K.; Waterfield, T.; Yelekci, O.; Yu, R.; Zhou, B. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI:10.1017/9781009157896.003.
- [98] Nakicenovic, N., et al. (2000): IPCC special report on emissions scenarios. Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 92-9169-113-5.
- [99] O'Neill, B. C. ; Kriegler, E. ; Riahi, K. ; Ebi, K. L. ; Hallegatte, S. ; Carter, T. R. ; Mathur, R. ; van Vuuren, D. P. (2014): A new scenario framework for climate change research:



- the concept of shared socioeconomic pathways. In: *Climatic Change* 122, Heft 3, S. 387–400. DOI:10.1007/s10584-013-0905-2.
- [100] Schwalm, C. R. ; Glendon, S. ; Duffy, P. B. (2020): RCP8.5 tracks cumulative CO<sub>2</sub> emissions. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117, Heft 33, S. 19656–19657. DOI:10.1073/pnas.2007117117.
- [101] O'Neill, B. C. ; Tebaldi, C. ; van Vuuren, D. P. ; Eyring, V. ; Friedlingstein, P. ; Hurtt, G. ; Knutti, R. ; Kriegler, E. ; Lamarque, J.-F. ; Lowe, J. ; Meehl, G. A. ; Moss, R. ; Riahi, K. ; Sanderson, B. M. (2016): The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. In: *Geoscientific Model Development* 9, Heft 9, S. 3461–3482. DOI:10.5194/gmd-9-3461-2016.
- [102] Brasseur, G. ; Jacob, D. ; Schuck-Zöller, S. (2017): *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin: Springer Spektrum. ISBN: 978-3-662-50397-3.
- [103] Meinshausen, M. ; Nicholls, Z. R. J. ; Lewis, J. ; Gidden, M. J. ; Vogel, E. ; Freund, M. ; Beyerle, U. ; Gessner, C. ; Nauels, A. ; Bauer, N. ; Canadell, J. G. ; Daniel, J. S. ; John, A. ; Krummel, P. B. ; Luderer, G. ; Meinshausen, N. ; Montzka, S. A. ; Rayner, P. J. ; Reimann, S. ; Smith, S. J. ; van den Berg, M. ; Velders, G. J. M. ; Vollmer, M. K. ; Wang, R. H. J. (2020): The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. In: *Geoscientific Model Development* 13, Heft 8, S. 3571–3605. DOI:10.5194/gmd-13-3571-2020.
- [104] NUKLEUS (2022): Useful local climate information for Germany. Data Access. Nutz- bare lokale Klimainformationen für Deutschland (NUKLEUS) (<https://ch1187.gitlab-pages.dkrz.de/Information/Data.html>; Abruf 30.06.2023).
- [105] Nilson, E. ; Astor, B. ; Fischer, H. ; Fleischer, C. ; Hauer, G. ; Helms, M. ; Hillebrand, G. ; Labadz, M. ; Mannfeld, M. ; Riedel, A. ; Schulz, D. ; Bergmann, L. ; Kikillus, A. ; Patzwahl, R. ; Rasquin, C. ; Schröder, M. ; Seiffert, R. ; Stachel, H. ; Wachler, B. ; Winkel, N. ; Höpp, S. ; Razafimaharo, C. ; Rauthe, M. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNNE2020.2020.07.
- [106] BfG: Projektionen des Abflusses an großen Flüssen. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ([https://www.das-basisdienst.de/DAS-Basisdienst/DE/produkte/wasserstrassen/zukunft/bfg\\_abfluss\\_node.html](https://www.das-basisdienst.de/DAS-Basisdienst/DE/produkte/wasserstrassen/zukunft/bfg_abfluss_node.html); Abruf 03.07.2023).
- [107] Nilson, E. (2021): Vier Probleme bei der Umsetzung von „Klimawissen“ in die Praxis – Überlegungen zum Aufbau von Klimaprojektionsdiensten aus der Perspektive einer

- gewässerkundlichen Bundeseinrichtung. In: promet, Heft 104, S. 62–69.  
DOI:10.5676/DWD\_PUB/PROMET\_104\_09.
- [108] Dalelane, C. (2021): Die DWD-Referenz-Ensembles und die DWD-Kern-Ensembles. In: promet, Heft 104, S. 27–29. DOI:10.5676/DWD\_PUB/PROMET\_104\_04.
- [109] Haller, M. ; Krähenmann, S. ; Walter, A. (2021): Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Bias-Adjustierung und Regionalisierung mit Beobachtungsdaten. In: promet, Heft 104, S. 19–26. DOI:10.5676/DWD\_PUB/PROMET\_104\_03.
- [110] Nilson, E.: Anwendungsorientierte Verwendung von Klimaszenarien. Kontext: Fließgewässer. Gastvortrag R2K-Klim+ Workshop. Duisburg, 08.05.2023.
- [111] ander Heiden, M. ; Muthers, S. ; Niemann, H. ; Buchholz, U. ; Grabenhenrich, L. ; Matzarakis, A. (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. In: Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz 62, Heft 5, S. 571–579.
- [112] Robert Koch Institut (2022): Epidemiologisches Bulletin. Hitzebedingte Mortalität in Deutschland 2022 ([https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Archiv/2022/Ausgaben/42\\_22.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Archiv/2022/Ausgaben/42_22.pdf?__blob=publicationFile)).
- [113] Becker, C. ; Herrmann, A. ; Haefeli, W. E. ; Rapp, K. ; Lindemann, U. (2019): Neue Wege zur Prävention gesundheitlicher Risiken und der Übersterblichkeit von älteren Menschen bei extremer Hitze. In: Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz 62, Heft 5, S. 565–570.
- [114] Bund/Länder-Ad-hoc Arbeitsgruppe GAK (2017): Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Bonn.
- [115] Neue Zürcher Zeitung (2017): Der <<Buddy>> hilft bei der Hitze (<https://www.nzz.ch/panorama/hitzewelle-in-der-schweiz-der-buddy-hilft-bei-der-hitze-id.1301960>).
- [116] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW: Klimaatlas NRW (<https://www.klimaatlas.nrw.de/>).



## Projektpartner



Foto © FiW e.V.



Strategisches Entscheidungsunterstützungstool zur Anpassung an den Klimawandel auf regionaler und kommunaler Ebene im Rheineinzugsgebiet