

Klimaanalyse

Stadt Duisburg

Essen, August 2022



Klimaanalyse

Stadt Duisburg

Im Auftrag von:

Stadt Duisburg

Dezernat für Stadtentwicklung und Umwelt

Friedrich-Wilhelm-Straße 96

47051 Duisburg

Erstellt durch:

Regionalverband Ruhr

Referat Klima und Umweltschutz

Team Klimaanpassung

Kronprinzenstraße 6

45128 Essen

Verfasst von:

Dipl.-Geogr. Astrid Snowdon

INHALT

| | | |
|-------|---|----|
| 0 | ZUSAMMENFASSUNG | 10 |
| 1 | EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG | 15 |
| 2 | CHARAKTERISIERUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES..... | 18 |
| 2.1 | Naturräumliche und großklimatische Einordnung | 19 |
| 2.2 | Relief und Oberflächenrauigkeit | 21 |
| 2.3 | Flächennutzung | 25 |
| 2.4 | Regionale Klimatopkarte | 29 |
| 2.4.1 | Beschreibung der Klimatope | 29 |
| 2.4.2 | Gliederung der Stadt Duisburg anhand der Regionalen Klimatopkarte | 30 |
| 3 | FLÄCHENHAFT AUSPRÄGUNG AUSGEWÄHLTER KLIMAELEMENTE..... | 33 |
| 3.1 | Bodennahe Lufttemperatur und nächtliche Abkühlungsrate | 34 |
| 3.2 | Physiologische Äquivalenttemperatur (PET) | 41 |
| 3.3 | Gesamtbewertung der Wärmebelastung..... | 46 |
| 3.4 | Autochthones Windfeld..... | 52 |
| 3.5 | Kaltluftproduktionsrate | 56 |
| 3.6 | Kaltluftvolumenstrom | 59 |
| 3.7 | Luftaustauschrate..... | 62 |
| 4 | KARTE DER KLIMAÖKOLOGISCHEN FUNKTIONEN..... | 64 |
| 4.1 | Darstellungsebenen der Karte der klimaökologischen Funktionen | 64 |
| 4.1.1 | Bebaute Bereiche (FITNAH-Nutzungsklassen)..... | 64 |
| 4.1.2 | Kaltluft | 64 |
| 4.1.3 | Belüftung | 66 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.2 | Gliederung der Stadt Duisburg anhand der Karte der klimaökologischen Funktionen | 66 |
| 5 | KLIMAANALYSEKARTE | 73 |
| 5.1 | Darstellungsebenen der Klimaanalysekarte | 74 |
| 5.1.1 | Klimatope | 74 |
| 5.1.2 | Spezifische Klimaeigenschaften..... | 82 |
| 5.1.3 | Luftaustausch | 84 |
| 5.1.4 | Lufthygiene..... | 85 |
| 5.2 | Gliederung der Stadt Duisburg anhand der Klimaanalysekarte | 86 |
| 6 | DIE STADT DUISBURG IM ZEICHEN DES GLOBALEN KLIMAWANDELS..... | 95 |
| 6.1 | Globaler Klimawandel | 95 |
| 6.2 | Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Region Ruhr | 101 |
| 6.3 | Zukünftige Entwicklung klimatischer Kenntage in Duisburg..... | 115 |
| 6.4 | Darstellung derzeitiger und zukünftiger Wärmeinselbereiche | 127 |
| 7 | BETROFFENHEITSANALYSE | 129 |
| 7.1 | Methodik zur Abgrenzung der Problemgebiete | 129 |
| 7.2 | Lokalisierung und Bewertung der Problemgebiete | 136 |
| 8 | PLANUNGSHINWEISE | 140 |
| 8.1 | Planungshinweiskarte..... | 140 |
| 8.1.1 | Darstellungsebenen der Planungshinweiskarte | 140 |
| 8.1.2 | Gliederung der Stadt Duisburg anhand der Planungshinweiskarte..... | 156 |
| 9 | ANHANG | 160 |
| 10 | LITERATUR..... | 165 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Abb. 2-1: Stadtbezirke von Duisburg | 18 |
| Abb. 2-2: Naturräumliche Gliederung des Ruhrgebiets (Lüftner 1996)..... | 20 |
| Abb. 2-3: Klimabezirke im Ruhrgebiet (Lüftner 1996) | 20 |
| Abb. 3-1: Prinzip des Flurwindes | 52 |
| Abb. 4-1: Flächenanteile der Klimatope und Verkehrsstrassen im Stadtgebiet von Duisburg. 86 | |
| Abb. 6-1: Beobachtete globale mittlere kombinierte Land-Ozean-Oberflächentemperaturanomalie von 1850-2012 (verändert nach IPCC 2013a)..... | 95 |
| Abb. 6-2: Räumliche Verteilung der beobachteten Veränderung der Erdoberflächentemperatur von 1901-2012 (IPCC 2013a)..... | 96 |
| Abb. 6-3: Atmosphärische Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄) und Distickstoffmonoxid (N ₂ O) (verändert nach IPCC 2014) | 97 |
| Abb. 6-4: Multimodell-simulierte Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur von 1950 bis 2100 (verändert nach IPCC 2013a)..... | 99 |
| Abb. 6-5: Globale Verteilung der Veränderung der mittleren Erdoberflächentemperatur (a) und des mittleren Niederschlags (b), basierend auf Multimodell-Mittel-Projektionen für 2081-2100 gegenüber 1986-2005 für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 (IPCC 2013a)..... | 100 |
| Abb. 6-6: Jahresmitteltemperaturen (°C) von 1901 bis 2020 an der DWD-Station in Essen-Bredeney (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Jahresmittel der Stationsmessungen der Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021) | 103 |
| Abb. 6-7: Vieljährige Monatsmittel der Lufttemperatur (°C)an der DWD-Station Essen-Bredeney (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Monatsmittel der Stationsmessungen der Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021) | 103 |
| Abb. 6-8: Jährliche Anzahl an Sommertagen ($t_{\max} \geq 25$ °C) von 1935 bis 2020 an der DWD-Station Essen-Bredeney (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Tägliche Stationsmessungen des Maximums der Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021)..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| Abb. 6-9: Jährliche Anzahl an Heißen Tagen ($t_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) von 1935 bis 2020 an der DWD-Station Essen-Bredeney (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Tägliche Stationsmessungen des Maximums der Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021)..... | 104 |
| Abb. 6-10: Jährliche Anzahl der Frosttage ($t_{\min} < 0 \text{ °C}$) von 1935 bis 2020 an der DWD-Station Essen-Bredeney (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Tägliche Stationsmessungen des Minimums der Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021)..... | 105 |
| Abb. 6-11: Jahressummen der Niederschlagshöhe (mm) von 1900 bis 2020 an der DWD-Station Essen-Bredeney (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Jahressumme der Stationsmessungen der Niederschlagshöhe in mm für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021)..... | 105 |
| Abb. 6-12: Entwicklung und Verteilung des vieljährigen Mittels der Lufttemperatur in der Metropole Ruhr in den beiden Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 (Datenquelle: DWD, Climate Data Center)..... | 108 |
| Abb. 6-13: Entwicklung und Verteilung des mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen in der Metropole Ruhr in den beiden Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 (Datenquelle: DWD, Climate Data Center)..... | 109 |
| Abb. 6-14: Entwicklung und Verteilung des mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen in der Metropole Ruhr in den beiden Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 (Datenquelle: DWD, Climate Data Center)..... | 110 |
| Abb. 6-15: Entwicklung und Verteilung des mittleren jährlichen Anzahl an Frosttagen in der Metropole Ruhr in den beiden Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 (Datenquelle: DWD, Climate Data Center)..... | 111 |
| Abb. 6-16: Entwicklung und Verteilung des vieljährigen Mittels der Niederschlagshöhe in der Metropole Ruhr in den beiden Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 (Datenquelle: DWD, Climate Data Center)..... | 112 |
| Abb. 6-17: Differenz der Jahresmitteltemperaturen (in K) in der Metropole Ruhr zwischen den Klimanormalperioden 1971-2000 und 2021-2050 basierend auf Ensemble-Rechnungen für die Szenarien RCP 4.5 und 8.5 (Eigene Darstellung auf Basis von EURO-Cordex-Projekt (Datengrundlage), DWD (Datenbearbeitung), LANUV NRW (Datenvermittler))..... | 113 |

Abb. 6-18: Differenz der mittleren Niederschlagssummen (in %) in der Metropole Ruhr zwischen den Klimanormalperioden 1971-2000 und 2021-2050 basierend auf Ensemble-Rechnungen für die Szenarien RCP 4.5 und 8.5 (Eigene Darstellung auf Basis von EURO-Cordex-Projekt (Datengrundlage), DWD (Datenbearbeitung), LANUV NRW (Datenvermittler)) 114

Abb. 6-19: Darstellung der Lufttemperaturen im Stadtgebiet von Duisburg um 4:00 Uhr für eine windschwache Strahlungswetterlage (FITNAH-3D-Modellierung und RCP2.6-Szenario). ..118

Abb. 6-20: Darstellung der Lufttemperaturen im Stadtgebiet von Duisburg um 4:00 Uhr für eine windschwache Strahlungswetterlage (FITNAH-3D-Modellierung und RCP8.5-Szenario). ..118

Abb. 6-21: Anzahl an Heißen Tagen im Stadtgebiet von Duisburg für die Szenarien RCP 2.6 und 8.5. 121

Abb. 6-22: Anzahl an Tropennächten im Stadtgebiet von Duisburg für die Szenarien RCP 2.6 und 8.5. 123

Abb. 6-23: Hitzebelastung in Duisburg (ermittelt aus den Heißen Tagen und Tropennächten für die Szenarien RCP 2.6 und 8.5). 126

Abb. 6-24: Darstellung gegenwärtiger (2020) und zukünftiger (2100) Wärmeinselbereiche im Stadtgebiet von Duisburg. 128

Kartenverzeichnis

Karte 2.1: Darstellung des Reliefs im Stadtgebiet von Duisburg.22

Karte 2.2: Darstellung der Oberflächenrauigkeit im Stadtgebiet von Duisburg.24

Karte 2.3: Flächennutzungskartierung im Stadtgebiet von Duisburg (Stand: 2019).28

Karte 2.4: Regionale Klimatopkarte des Ruhrgebietes (2012)31

Karte 3.1: Bodennahe Lufttemperatur (2 m ü. Grund) im Stadtgebiet von Duisburg um 14 Uhr
.....38

Karte 3.2: Bodennahe Lufttemperatur (2 m ü. Grund) im Stadtgebiet von Duisburg um 4 Uhr
.....39

Karte 3.3: Nächtliche Abkühlungsrate (20 – 4 Uhr) der Lufttemperatur im Stadtgebiet von
Duisburg.....40

Karte 3.4: Physiologische Äquivalenttemperatur (PET) im Stadtgebiet von Duisburg.45

Karte 3.5: Bewertung der Wärmebelastung im Stadtgebiet von Duisburg.....51

Karte 3.6: Autochthones Windfeld (2 m ü. Grund) im Stadtgebiet von Duisburg um 4 Uhr....55

Karte 3.7: Kaltluftproduktionsrate im Stadtgebiet von Duisburg um 4 Uhr.....58

Karte 3.8: Kaltluftvolumenstrom im Stadtgebiet von Duisburg um 4 Uhr61

Karte 3.9: Luftaustauschrate um 4 Uhr im Stadtgebiet von Duisburg bei allochthoner
Wetterlage.....63

Karte 4.1: Karte der klimaökologischen Funktionen im Stadtgebiet von Duisburg.....72

Karte 4.2: Klimaanalysekarte der Stadt Duisburg94

Karte 7.1: Einwohnerdichte auf Baublockebene für die Wärmeinseln im Stadtgebiet von
Duisburg..... 132

Karte 7.2: Prozentualer Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre auf Baublockebene für die
Wärmeinseln im Stadtgebiet von Duisburg. 135

Karte 7.3: Problemgebiete der Hitzebelastung im Stadtgebiet von Duisburg. 138

Karte 7.4: Problemgebiete der Hitzebelastung im Stadtgebiet von Duisburg. 139

Karte 8.1: Planungshinweiskarte der Stadt Duisburg159

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 2-1: Ausgewählte Klimaindikatoren für den Zeitraum 1991-2020 (LANUV NRW 2022) | 20 |
| Tabelle 2-2: Anteile der Nutzungsarten an der Gesamtfläche des Stadtgebietes von Duisburg sowie deren Flächengröße (Stand: 31.12.2020; IT.NRW 2022)..... | 25 |
| Tabelle 3-1: Einteilung der PET-Klassen, verändert nach Matzarakis und Mayer (1996) und Held und Krüger (2011)..... | 43 |
| Tabelle 3-2: PET-Klassen, verändert nach Matzarakis und Mayer (1996) und Held und Krüger (2011)..... | 48 |
| Tabelle 3-3: Temperatur-Klasse, geändert nach LANUV 2021 | 48 |
| Tabelle 3-4: Gesamtbewertung der Wärmebelastung, die sich aus der der nächtlichen Temperatur und dem PET-Wert ergibt..... | 48 |

Verzeichnis Anhang

| | |
|---|-----|
| Tabelle A 1: Fläche, Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte in den Stadtbezirken (Stadt Duisburg 2022a)..... | 160 |
| Tabelle A 2: Charakteristika der 14 FITNAH-Nutzungsklassen (GEO-NET 2021)..... | 161 |
| Karte A 1: Einwohnerdichte auf Baublockebene im Stadtgebiet von Duisburg..... | 163 |
| Karte A 2: Prozentualer Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre auf Baublockebene im Stadtgebiet von Duisburg. | 164 |

0 Zusammenfassung

Die vorliegende Klimaanalyse stellt eine Aktualisierung und Ergänzung des aus dem Jahre 2010 stammenden Gutachtens dar. Ziel der Untersuchung ist die Analyse und Bewertung der klimatischen Situation innerhalb des Stadtgebietes von Duisburg sowie die Ausweisung von Planungshinweisen, die vor dem Hintergrund der prognostizierten klimatischen Veränderungen im Laufe des 21. Jahrhunderts eine klimawandelgerechte Stadtentwicklung gewährleisten sollen.

Die gesamtstädtische Analyse von 2010 basierte auf einem aufwändigen Messprogramm, wobei aus stationären Messungen (punktuell) und Messfahrten und -kampagnen (linienhaft) anhand von Analogieschlüssen nur grobe flächendeckende Aussagen getroffen werden konnten. Die vorliegende Untersuchung hingegen bezieht sich u.a. auf die Ergebnisse einer für die gesamte Metropolregion durchgeführten Modellierung mit Hilfe des Simulationsmodells FITNAH-3D. Dieses Verfahren liefert, im Gegensatz zu lokal begrenzten Messungen, räumlich hochauflösende und flächendeckende Ergebnisse zu einer Vielzahl klimatischer Parameter.

Die Stadt Duisburg liegt naturräumlich betrachtet im Bereich der Großeinheit „Niederrheinisches Tiefland“ und weist entsprechend ein nur gering ausgeprägtes Relief auf. Lediglich am östlichen Stadtrand tritt im Bereich des Duisburger Stadtwalds eine höhere Reliefenergie auf, ebenso im Bereich der (künstlich aufgeschütteten) Halden im Stadtgebiet. Somit ist dem Relief eine untergeordnete Rolle bezüglich der Ausprägung der klimatischen Situation des Stadtgebietes zuzusprechen. Hingegen wird das Stadtklima von Duisburg überwiegend durch unterschiedliche Flächennutzungsstrukturen bestimmt. Die Bedeutung beider Einflussgrößen spiegelt sich in dem von FITNAH-3D für eine sommerliche autochthone Strahlungswetterlage simulierten nächtlichen bodennahen Temperaturfeld wider, welches eine Stadt-Umland-Differenz von 6,9 K (Wärmeineleffekt) aufweist. Dabei treten die höchsten Temperaturen in den Gewerbe- bzw. Industriegebieten sowie im Stadtzentrum, den diversen Nebenzentren und in stark verdichteten Wohn- und Mischgebieten auf, während die niedrigsten Temperaturen im Stadtgebiet über landwirtschaftlich genutzten Flächen vor allem entlang des Rheins zu finden sind.

Das für eine sommerliche Strahlungswetterlage zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens simulierte bodennahe Windfeld weist Strömungsgeschwindigkeiten bis lediglich maximal 1,3 m/s auf. Die höchsten Windgeschwindigkeiten wurden dabei hauptsächlich in den Hanglagen des Duisburger Stadtwalds sowie in den Hangbereichen der Halden simuliert. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Belüftung während einer sommerlichen Strahlungswetterlage in Duisburg stark eingeschränkt ist und reliefinduzierte Kaltluftabflüsse in den Hintergrund treten. Hinzu kommt, dass keine Anbindung der großen, kaltluftproduzierenden Flächen im südlichen Stadtgebiet sowie entlang des Rheins an das stark verdichtete Stadtzentrum sowie die Zentren

der Stadtbezirke Hamborn, Homberg und Rheinhausen gegeben ist. In diesen Bereichen wird bei Betrachtung der modellierten Kaltluftvolumenströme die Bedeutung innerstädtischer Grünflächen und besonders deren Vernetzung für die Belüftungsverhältnisse im urbanen Raum deutlich. Insgesamt ist für das Duisburger Stadtgebiet festzustellen, dass in weiten Teilen des Zentrums sowie in den dicht bebauten Zentren der o.g. Stadtbezirke keine ausreichende nächtliche Kaltluftversorgung während sommerlicher Hochdruckwetterlagen vorhanden ist. In diesen Bereichen kommt dem kleinräumigen, lokalen Grünflächenanteil innerhalb der Bebauungsstrukturen sowie den großen Grünvernetzungsstrukturen eine besondere Bedeutung zum Schutz vor negativen stadtklimatischen Ausprägungen zu.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der FITNAH-Modellierung, der Flächennutzung, der Topographie und aktueller Luftbilder erfolgte die Erstellung einer Klimaanalysekarte für Duisburg nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 (VDI 2015). Die Klimaanalysekarte beinhaltet mit den Klimatopen, den spezifischen Klimaeigenschaften, den Informationen zu lufthygienischen Verhältnissen sowie dem Luftaustausch vier Darstellungsebenen.

Die Klimatope sind grundsätzlich sehr heterogen im Stadtgebiet von Duisburg verteilt. Das Freilandklima nimmt einen Flächenanteil von knapp 19 % an der gesamten Stadtfläche ein, wobei sich diese überwiegend entlang des Rheins sowie im Süden des Stadtgebietes konzentrieren, während im Zentrum und nördlich der Ruhr sowie östlich des Rheins kaum Freilandklimatope auftreten. Waldklimatope nehmen im Stadtgebiet hingegen lediglich knapp 10 % der Gesamtfläche ein und konzentrieren sich überwiegend auf den östlichen Stadtrandbereich südlich der Ruhr (Duisburger Stadtwald, Huckinger Mark/Grindsmark) und den Baerler Busch im Nordosten der Stadt. Die Freiland- und Waldklimatope weisen nur vereinzelt hohe Kaltluftproduktionsraten und/oder Kaltluftvolumenströme auf und stellen somit auch nur vereinzelt potenziell bedeutsame klimatische Ausgleichsräume dar. Zu nennen sind hier wiederum der Duisburger Stadtwald und die Halden. Der positive Einfluss der Kaltluftabflüsse aus den Waldgebieten auf die Duisburger Bebauung ist jedoch nur vereinzelt in den Siedlungen westlich des Duisburger Stadtwalds und im Bereich der Regattabahn festzustellen. Die Kaltluftmassen der Halden hingegen fließen zum Großteil in Richtung des Rheins ab, so dass sie nicht zur Entlastung in den Wärmeinselbereichen beitragen können. Die Bedeutung der Kaltluftdynamiken im Stadtgebiet, insbesondere die Relevanz für die Siedlungsbereiche, wird in Kapitel 4 erläutert.

Das „Klima der innerstädtischen Grünflächen“ weist ebenfalls wie das Freilandklima mit knapp 19 % den größten Flächenanteil aller Klimatoptypen am Stadtgebiet auf. Insbesondere in den Stadtbezirken nördlich der Ruhr tritt ein erhöhter Anteil dieses Klimatoptyps mit einer verhältnismäßig gleichmäßigen Verteilung innerhalb der Bebauung auf. Lediglich innerhalb

der großen Gewerbe- und Industriegebiete und der dicht bebauten Stadtteilzentren ist dieser Klimatotyp unterrepräsentiert. Positiv hingegen anzumerken ist, dass die Grünflächen vielfach Vernetzungsstrukturen erkennen lassen, denen eine besondere stadtklimatische Bedeutung zugesprochen werden kann.

Im Stadtgebiet von Duisburg treten die als Wärmeinselbereiche wirksamen Stadt- und Innenstadtklimatope (3,1% und 8,2 %) mit einem vergleichbaren Anteil an der bebauten Fläche wie die Vorstadt- und Stadtrandklimatope (1,9 % und 8,5 %) auf. Während Letztere mit verhältnismäßig günstigen bio- und immissionsklimatischen Bedingungen charakterisiert werden können, stellen die Bereiche der Stadt- und Innenstadtklimatope aus bioklimatischer Sicht stärker belastete Räume dar, welche eine höhere Versiegelung und einen geringeren Grünflächenanteil aufweisen. Insbesondere in den Stadtbezirken Hamborn, Homberg, Rheinhausen und dem Stadtkern sind große zusammenhängende Areale vorhanden, welche teils zusätzlich an großflächige Gewerbe- und Industrieklimatope anschließen und in weiten Teilen einen Mangel an Grünflächen aufweisen. Dadurch ergibt sich ein sehr großer, mehr oder weniger zusammenhängender klimatischer Belastungsraum insbesondere im Zentrum des Duisburger Stadtgebietes.

In Kapitel 6 wird ein Überblick über den wissenschaftlichen Stand zum Klimawandel, dessen Folgen und Auswirkungen sowie die projizierten globalen Klimaveränderungen für das 21. Jahrhundert gegeben. Dass der Klimawandel auch in der Metropolregion Ruhr bereits stattfindet, wird anhand von Auswertungen der teils 120 Jahre umfassenden Datenreihe der DWD-Station Essen-Bredeney deutlich. Anschließend wird anhand der zeitlichen Entwicklung und räumlichen Verteilung klimatischer Kenntage, also der Häufigkeit des Auftretens von thermischen Extremereignissen wie heißen Tagen oder Nächten, die thermische Belastungssituation in unterschiedlichen Bereichen des Stadtgebietes aufgezeigt. Die Aussagen bezüglich der Verteilung und Entwicklung klimatischer Kenntage (Heiße Tage und Tropennächte) für das Stadtgebiet von Duisburg beziehen sich dabei auf die beiden Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 und wurden für die zwei Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 ermittelt.

Die zu erwartenden Klimaveränderungen können negative Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen haben, von denen besonders kranke und ältere Menschen sowie Kleinkinder stärker betroffen sein können. Im Rahmen einer Betroffenheitsanalyse auf Baublockebene wurden Bereiche identifiziert, die aufgrund der klimatischen Situation, der Bevölkerungsdichte und der Altersstruktur eine besondere Sensibilität aufweisen. Dabei ist in den Bereichen der Stadt- und Innenstadtklimatope aufgrund der zumeist hochversiegelten Bebauung von einer generellen Hitzebelastung auszugehen. Mit zunehmender Bevölkerungsdichte erhöht sich die potenzielle Anfälligkeit eines Wohngebietes. Es wird deutlich, dass sich, aufgrund der stark verdichteten Bebauungsstrukturen und der damit verbundenen hohen Bevölkerungsdichte in

allen Stadtbezirken zahlreiche Bereiche identifizieren lassen, die eine sehr hohe Anfälligkeit gegenüber Hitzebelastungen aufweisen. Dabei bildet insbesondere das Stadtzentrum mit den angrenzenden Wohnblöcken einen großen, zusammenhängenden Bereich mit überwiegend sehr hoher Anfälligkeit gegenüber Hitzebelastungen. Aber auch in den Stadtbezirken Rheinhausen, Meiderich/Beeck und Hamborn treten großflächige Bereiche mit der höchsten Anfälligkeitsklasse auf.

Baublöcke, die sowohl eine sehr hohe Anfälligkeit aufgrund der Bevölkerungsdichte als auch einen überdurchschnittlich hohen Anteil an über 65-jähriger Wohnbevölkerung aufweisen, treten dabei insbesondere in Aldenrade, Meiderich, Wanheimerort sowie Duisern vermehrt auf. Auffällig ist weiterhin, dass im Stadtgebiet von Duisburg eine Vielzahl sensibler Einrichtungen in den Problemgebieten der Hitzebelastung angesiedelt sind. So konnten insgesamt 14 Krankenhäuser oder krankenhaushähnliche Einrichtungen, 119 Senioren- und Pflegeheime bzw. Wohneinrichtungen sowie 235 Kindergärten bzw. -tagesstätten im Stadtgebiet von Duisburg identifiziert werden, die in diesen stadtklimatischen Ungunsträumen verortet sind.

Abschließend wurden auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse für das Stadtgebiet von Duisburg Planungsempfehlungen aus rein stadtklimatologischer Sicht abgeleitet (siehe Kapitel 8). Demnach ist ein großer Teil der Siedlungsbereiche im Stadtgebiet von Duisburg dem „Lastraum der überwiegend locker und offen bebauten Wohngebiete“ zuzuordnen. Insbesondere in den Stadtbezirken Süd, Rheinhausen, Homberg/Ruhrort/Baerl sind die Wohngebiete zu einem Großteil diesem Lastraum zuzuordnen. Aber auch in den Stadtteilen Walsum und im östlichen Hamborn treten locker und offen bebaute Siedlungsstrukturen verhältnismäßig häufig auf.

Um die günstigen klimatischen Eigenschaften vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels langfristig zu sichern, sollten die offenen und begrünten Bebauungsstrukturen erhalten bleiben und insbesondere im Bereich von Belüftungsbahnen und/oder Grünnetzungen kleinräumige Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen durchgeführt und gefördert werden. In den Stadtteilen Bergheim, Rumeln-Kaldenhausen, Baerl, Aldenrade, Overbruch, Serm und Mündelheim konnten dennoch Bereiche ausgewiesen werden, bei denen aus rein stadtklimatologischer Sicht eine maßvolle Nachverdichtung, die punktuelle Schließung von Baulücken oder die Ausweisung kleiner Neubaugebiete unter Beachtung der vorherrschenden lockeren Bebauungsstruktur und entsprechend hohem Grünflächenanteil vertretbar ist. Um einerseits eine weitere Verschärfung der Situation in den stärker verdichteten Bereichen zu vermeiden und andererseits die positiven klimatischen Verhältnisse innerhalb der aufgelockerten Wohngebiete zu wahren, sollte in weiten Teilen des restlichen Stadtgebietes keine weitere Verdichtung erfolgen. Zum Erhalt der Luftaustauschfunktionen

und zum Schutz relevanter klimatischer Ausgleichsflächen ist zudem u.a. an den Siedlungsrändern westlich von Rahm, in Kaldenhausen, Asterlagen, Hochheide und Baerl das Festschreiben einer klimatischen Baugrenze zu empfehlen. Zudem sollte eine klimatische Baugrenze entlang der südlichen Grenze von Rahm, um Mündelheim und nördlich von Serm sowie in Teilen von Friemersheim und Rumeln-Kaldenhausen angestrebt werden.

In den klimatischen Lasträumen der „überwiegend dicht bebauten Wohn- und Mischbebauung“, der „hochverdichteten Innenstadt“ sowie der Gewerbe- und Industrieflächen treten die negativen Ausprägungen des Stadtklimas am deutlichsten hervor. Daher ist insbesondere in Übergangsbereichen von Grün-, Frei- und Waldflächen zu stark verdichteten Siedlungsstrukturen die Förderung des Luftaustausches zu forcieren. In hochverdichteten Bereichen, die keine direkte Anbindung an größere klimatische Ausgleichsflächen aufweisen und wo eine entsprechende Grünvernetzung aufgrund der Bestandsstrukturen nicht realisierbar ist, wie in Teilen des Duisburger Stadtzentrums sowie den Nebenzentren in Hamborn, Homberg und Rheinhausen, müssen verstärkt kleinräumige Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen zur Verbesserung der mikroklimatischen Verhältnisse ergriffen werden. Insbesondere die Schaffung verdunstungsaktiver Flächen und schattenspendender Strukturen kann für eine lokale Abmilderung thermischer Belastungen sorgen. Bei fehlenden Entsiegelungs- und Rückbaumöglichkeiten können als Alternative Dach- und Fassadenbegrünungen zur Steigerung des Grünflächenanteils in diesen Bereichen umgesetzt werden. Zudem kann in hochversiegelten Straßenräumen durch den Erhalt und die Anpflanzung von Bäumen in Folge von Verschattungs- und Verdunstungseffekten eine lokale Klimaverbesserung erzielt werden. Besonders entlang des Rheins und der Ruhr, wo großflächige Kaltluftsammlgebiete entstehen können und eine Vielzahl an Emittenten angesiedelt sind, sind Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen zu fördern.

Die klimatischen Ausgleichsräume des Freilandes, der innerstädtischen Grün- und Parkanlagen sowie der Waldgebiete fungieren vielerorts als wichtige thermische Pufferzonen zwischen den Siedlungsbereichen, als lokale Kalt- und Frischluftproduzenten, als Belüftungsbahn und/oder als Filter für Luftschadstoffe und Lärm. Daher sollten sie grundsätzlich gesichert und von weiterer Bebauung freigehalten werden. Von entscheidender Bedeutung für die Relevanz dieser Ausgleichsflächen ist die Vernetzung mit den klimatischen Lasträumen. Dafür sind der Erhalt bestehender Belüftungsbahnen sowie die Schaffung von Vernetzungsstrukturen erforderlich.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse eines städtischen Siedlungsraums zeichnen sich durch erhebliche Modifikationen gegenüber dem unbebauten Umland aus, man spricht von der Ausprägung eines „Stadtklimas“. Insbesondere erhöhte Temperaturen, geringere Luftfeuchtigkeit, eine eingeschränkte Belüftungssituation und eine stärkere Luftverschmutzung können im städtischen Lebensraum zu Einbußen bei der Umweltqualität führen, was gesundheitliche Beeinträchtigungen der Bewohner zur Folge haben kann. Die Ursachen der klimatischen Defizite einer Stadt liegen u.a. in einem hohen Versiegelungsgrad, einem geringen Grünflächenanteil, den thermischen Eigenschaften der urbanen Oberflächen und dreidimensionalen Baukörper sowie den erhöhten Emissionen an Luftschadstoffen begründet. Die Bebauungs- und Grünflächenstruktur einer Stadt nimmt somit eine zentrale Funktion bezüglich der lokalen klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse ein (Kuttler 2009). Insbesondere mit Blick auf die prognostizierten klimatischen Veränderungen für das Ruhrgebiet, die sich bedingt durch den globalen Klimawandel im Laufe des 21. Jahrhunderts einstellen und zu einer Verschärfung des thermischen Stadt-Umland-Verhältnisses führen werden, kommt der Stadt- und Umweltplanung eine entscheidende Bedeutung zum Schutze der Stadtbevölkerung durch eine nachhaltige Anpassung der Städte an den Klimawandel zu (Kuttler 2010).

Die Belange der Umweltmeteorologie wurden daher rechtlich im Baugesetzbuch verankert. Gemäß § 1 (5) sollen „Bauleitpläne eine nachhaltige städtebauliche Entwicklung, die die sozialen, wirtschaftlichen und umweltschützenden Anforderungen auch in Verantwortung gegenüber künftigen Generationen miteinander in Einklang bringt, und eine dem Wohl der Allgemeinheit dienende sozialgerechte Bodennutzung gewährleisten. Sie sollen dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie **den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern ...**“. § 1(6) Ziffer 7. a) besagt hierbei, dass insbesondere „... die Belange des Umweltschutzes, einschließlich des Naturschutzes und der Landschaftspflege, insbesondere die Auswirkungen auf Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, **Luft, Klima** und das Wirkungsgefüge zwischen ihnen sowie die Landschaft und die biologische Vielfalt,...“ zu berücksichtigen sind (BauGB 2021).

Um den Anforderungen einer klimawandelgerechten Stadtentwicklung zu entsprechen, sind genaue Kenntnisse der aktuellen und zukünftig zu erwartenden lokalklimatischen Verhältnisse unabdingbar. Gesamtstädtische Klimauntersuchungen gewinnen daher für eine qualifizierte Flächennutzungs- und Bebauungsplanung in städtischen Agglomerationsräumen zunehmend an Bedeutung.

Die vorliegende Klimaanalyse für die Stadt Duisburg stellt eine Aktualisierung und Ergänzung des stadtklimatologischen Gutachtens aus dem Jahr 2010 dar. Aufgrund einer Vielzahl an Veränderungen des Stadtbildes durch Bautätigkeiten und Flächenumnutzungen der vergangenen Jahre war eine Überarbeitung bzw. Neuauflage der Klimaanalyse auf Basis aktueller Datengrundlagen und neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen erforderlich, damit die Ergebnisse als Grundlage für die zukünftige Stadt-, Umwelt- und Bauleitplanung angewendet werden können.

Die gesamtstädtische Analyse von 2010 basierte auf einem aufwändigen Messprogramm, wobei aus stationären Messungen (punktuell) und Messfahrten (linienhaft) anhand von Analogieschlüssen nur grobe flächendeckende Aussagen mit geringer Detailschärfe getroffen werden konnten. Daher wurden zusätzlich detailliertere Aussagen zur klimatischen Situation in Teilen von Duisburg anhand einer mobilen Messkampagne sowie einer mikroskaligen Simulationsrechnung gewonnen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die Ergebnisse einer für die gesamte Metropolregion Ruhr durchgeführten Klimamodellierung mit Hilfe des Simulationsmodells FITNAH-3D aus dem Jahre 2020 genutzt. Dieses Verfahren liefert, im Gegensatz zu den lokal begrenzten Messungen, umfassende, räumlich hochauflösende und vor allem flächendeckende Ergebnisse zu einer Vielzahl relevanter klimatischer Parameter. Die mesoskalige FITNAH-Modellierung ist zwar vorrangig auf die Ebene der Regional- und Flächennutzungsplanung ausgerichtet, ermöglicht aufgrund der hohen Auflösung von 25 m x 25 m aber auch vielfältige Hinweise für die Bebauungsplanung auf kommunaler Ebene. Bei einer kleinräumigen Betrachtung auf Baublockebene können in Abhängigkeit von der Fragestellung jedoch weitergehende Untersuchungen (z.B. Messungen oder mikroskalige Simulationen) erforderlich sein, um die klimatischen Auswirkungen baulicher Flächennutzungsänderungen von Einzelflächen detailliert bewerten zu können.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Analyse und Bewertung der klimatischen Situation des Duisburger Stadtgebietes sowie die Ausweisung von Planungshinweisen. Zu diesem Zweck wird im ersten Schritt eine Beschreibung der wichtigsten Klimafaktoren und Klimaelemente (Ergebnisse der FITNAH-Modellierung) im Untersuchungsgebiet vorgenommen. Im weiteren Verlauf werden die Wirkung und Relevanz von Grün- und Freiflächen in einer „Karte der klimaökologischen Funktionen“ aufgezeigt. Des Weiteren werden die bereits beobachteten und künftig zu erwartenden Auswirkungen des globalen Klimawandels auf das Stadtgebiet von Duisburg beschrieben sowie eine Betroffenheitsanalyse des Stadtgebietes durchgeführt. Im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen die Erstellung einer Klimaanalysekarte sowie die Ausweisung von Planungshinweisen aus stadtklimatologischer Perspektive.

Die Klimaanalysekarte gliedert das Stadtgebiet in Klimatope, die durch ähnliche mikroklimatische Ausprägungen gekennzeichnet sind. Dynamische Faktoren werden in Form von spezifischen Klimaeigenschaften dargestellt und beschrieben. Die Klimaanalysekarte wird zur Ableitung des Planungs- und Handlungsbedarfs mit dem Ziel, bestehende Belastungspotentiale zu senken bzw. abzubauen sowie die Lebens- und Wohnqualität zu sichern und zu schützen, genutzt. Die Planungshinweise werden für die gesamtstädtische Siedlungsstruktur dargestellt. Sowohl die Erstellung der Klimaanalyse- sowie der Planungshinweiskarte erfolgte nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 (VDI 1997/2003; VDI 2015).

Durch die vorliegende Arbeit wird der Stadtverwaltung ein umfangreiches Hilfsmittel an die Hand gegeben, durch dessen Umsetzung der Maßnahmenempfehlungen zur Klimaanpassung eine nachhaltige und klimawandelgerechte Stadtentwicklung in Duisburg gesichert werden kann.

2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

Die Stadt Duisburg liegt am Rand des westlichen Ruhrgebiets. Dabei grenzt der Westen des Stadtgebietes an die Städte Moers und Rheinberg, der Norden an die Stadt Dinslaken, der Osten an die Städte Oberhausen und Mülheim und der Süden an die außerhalb der Metropole Ruhr liegenden Städte Ratingen, Düsseldorf, Meerbusch und Krefeld.

Das Stadtgebiet umfasst eine Fläche von 232,8 km² bei einer Maximalausdehnung von 14,2 km in Ost-West-Richtung und von 25,1 km in Nord-Süd-Richtung (Stadt Duisburg 2022).

Bei einer Einwohnerzahl von 499.439 und einer Fläche von 232,8 km² beträgt die Bevölkerungsdichte von Duisburg 2.146,7 Einw./km² (Stand: 31.12.2021, Stadt Duisburg 2022a) und liegt damit etwas über der Einwohnerdichte der ebenfalls dem Gemeindetyp „Große Großstadt“ zugeordneten Stadt Dortmund (2.053,6 Einw./km²), aber unter der Einwohnerdichte der großen Großstadt Essen (2.768,9 Einw./km²). Die durchschnittliche Einwohnerdichte der im Ruhrgebiet liegenden kreisfreien Städte beträgt 2.071 Einw./km² (Stand 31.12.2019; Wikipedia 2022a). Damit liegt die Stadt Duisburg hinsichtlich der Einwohnerdichte etwas über dem Durchschnitt.

Bedingt durch unterschiedliche Bebauungsstrukturen zeigt die Bevölkerungsdichte in Duisburg eine stark heterogene Verteilung über die sieben Stadtbezirke (siehe Abb. 2-1), die das Stadtgebiet unterteilen.



Abb. 2-1: Stadtbezirke von Duisburg.

Während die Stadtbezirke Duisburg-Mitte (3.094 Einw./km²), Hamborn (3.639 Einw./km²), Meiderich/Beeck (2.407 Einw./km²) und Walsum (2.383 Einw./km²) dicht besiedelt sind, besitzen die Bezirke Rheinhausen (2.020 Einw./km²), Duisburg-Süd (1.460 Einw./km²) und Homberg/Ruhrort/Baerl (1.112 Einw./km²) eine deutlich geringere Bevölkerungsdichte (Stand: Stadt Duisburg 2022a).

Die unterschiedliche Bebauungsdichte bzw. die Flächennutzung hat neben weiteren Faktoren, wie dem Relief oder der Oberflächenrauigkeit, einen großen Einfluss auf die lokalklimatischen Ausprägungen einer Stadt. Daher werden im Folgenden zunächst die charakteristischen Merkmale dieser Klimafaktoren im Stadtgebiet von Duisburg beschrieben. Zudem erfolgt eine Einordnung der klimatischen Verhältnisse anhand der regionalen Klimatopkarte des Regionalverband Ruhr. Diese ermöglicht eine erste Abgrenzung von Räumen mit ähnlichen mikroklimatischen Eigenschaften (Klimatope). Zu Beginn steht jedoch eine naturräumliche und großklimatische Einordnung des Untersuchungsgebietes.

2.1 Naturräumliche und großklimatische Einordnung

Das Stadtgebiet von Duisburg liegt naturräumlich betrachtet im Bereich der Großeinheit „Niederrheinisches Tiefland“ und lässt sich hier in die naturräumliche Untereinheit Mittlere Niederrheinebene (Ordnungszahl 575) mit den beiden Untereinheiten Düsseldorf-Duisburger Rheinaue (575,2) und Rechtsrheinische Niederterrassenebene (575,3) einordnen.

Makroklimatisch wird die Stadt Duisburg dem Klimabereich „Nordwest-Deutschland“ zugeordnet, welcher sich von der Nordseeküste bis zu den Südseiten von Eifel und Westerwald sowie zur Ostseite des Sauerlandes erstreckt (vgl. Abb. 2-3). Durch die Lage im Westwindgürtel und die relative Nähe zum Atlantik ist das Klima in diesem Teil Deutschlands maritim beeinflusst, was sich im Allgemeinen durch kühle Sommer und milde Winter äußert. Gelegentlich setzt sich jedoch auch ein kontinentalklimatischer Einfluss mit längeren Hochdruckphasen durch. Dann kann es im Sommer zu höheren Temperaturen und trockenem sommerlichem Wetter bei schwachen östlichen bis südöstlichen Winden kommen. Im Winter sind kontinental geprägte Wetterlagen hingegen häufig mit anhaltenden Kälteperioden verbunden. Grundsätzlich dominieren im nordwestdeutschen Klimabereich jedoch südwestliche Windrichtungen, welche die vorherrschenden Luftdruckverhältnisse mit einem Hoch über Süd- und Mitteleuropa und einem Tief über dem Europäischen Nordmeer widerspiegeln. Regionalklimatisch liegt das Duisburger Stadtgebiet im Klimabezirk „Niederrheinisches Tiefland“ (MURL 1989). Lediglich im südöstlichen Bereich von Duisburg dominieren östliche bis südliche Windrichtungen, die auf einer Beeinflussung der

Charakterisierung des Untersuchungsgebiets

Windströmungen durch die Leit- und Umlenkeffekte der Höhenzüge des Bergischen Landes beruhen (s. RVR 2010).

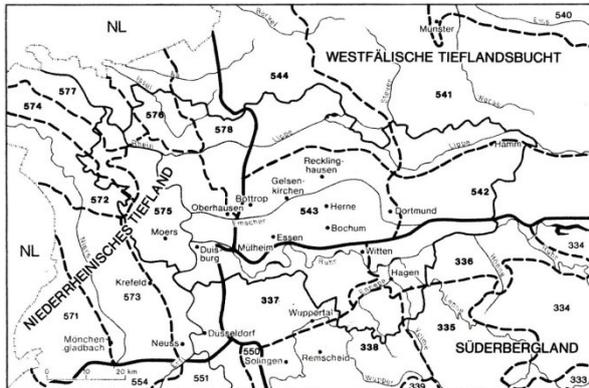


Abb. 2-2: Naturräumliche Gliederung des Ruhrgebiets (Lüftner 1996)



Abb. 2-3: Klimabezirke im Ruhrgebiet (Lüftner 1996)

Eine Zusammenstellung ausgewählter Klimadaten für Duisburg enthält Tabelle 2-1. Die dargestellten Werte zeigen die mittleren klimatischen Bedingungen im Zeitraum 1991-2020. Durch den prognostizierten Klimawandel werden sich die Klimaverhältnisse im Laufe des 21. Jahrhunderts verändern (vgl. Kapitel 6). Zudem können die groß- und regionalklimatischen Charakteristika der Klimabezirke auf der lokalen Ebene in erheblichem Maße durch natürliche Faktoren (z.B. Relief) sowie anthropogene Einflüsse (z.B. Flächennutzung, Versiegelungsgrad, Emission von Luftschadstoffen, etc.) überprägt werden.

Tabelle 2-1: Ausgewählte Klimaindikatoren für den Zeitraum 1991-2020 (LANUV NRW 2022)

| Klimaindikator | Wert |
|--|-----------|
| Mittleres Tagesmittel der Lufttemperatur (°C) im Jahr | 10 - 11 |
| Mittleres Tagesmittel der Lufttemperatur (°C) im Frühling | 10 - 11 |
| Mittleres Tagesmittel der Lufttemperatur (°C) im Sommer | 18 - 19 |
| Mittleres Tagesmittel der Lufttemperatur (°C) im Herbst | 11 - 12 |
| Mittleres Tagesmittel der Lufttemperatur (°C) im Winter | 3 - 4 |
| Mittlere Anzahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) pro Jahr | 40 - 45 |
| Mittlere Anzahl der heißen Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) pro Jahr | 10 - 15 |
| Mittlere Anzahl der Frosttage ($T_{\min} < 0 \text{ °C}$) pro Jahr | 40 - 50 |
| Mittlere Anzahl der Eistage ($T_{\max} < 0 \text{ °C}$) pro Jahr | 5 - 7 |
| Mittlere Niederschlagshöhe im Jahr (mm) | 760 - 790 |

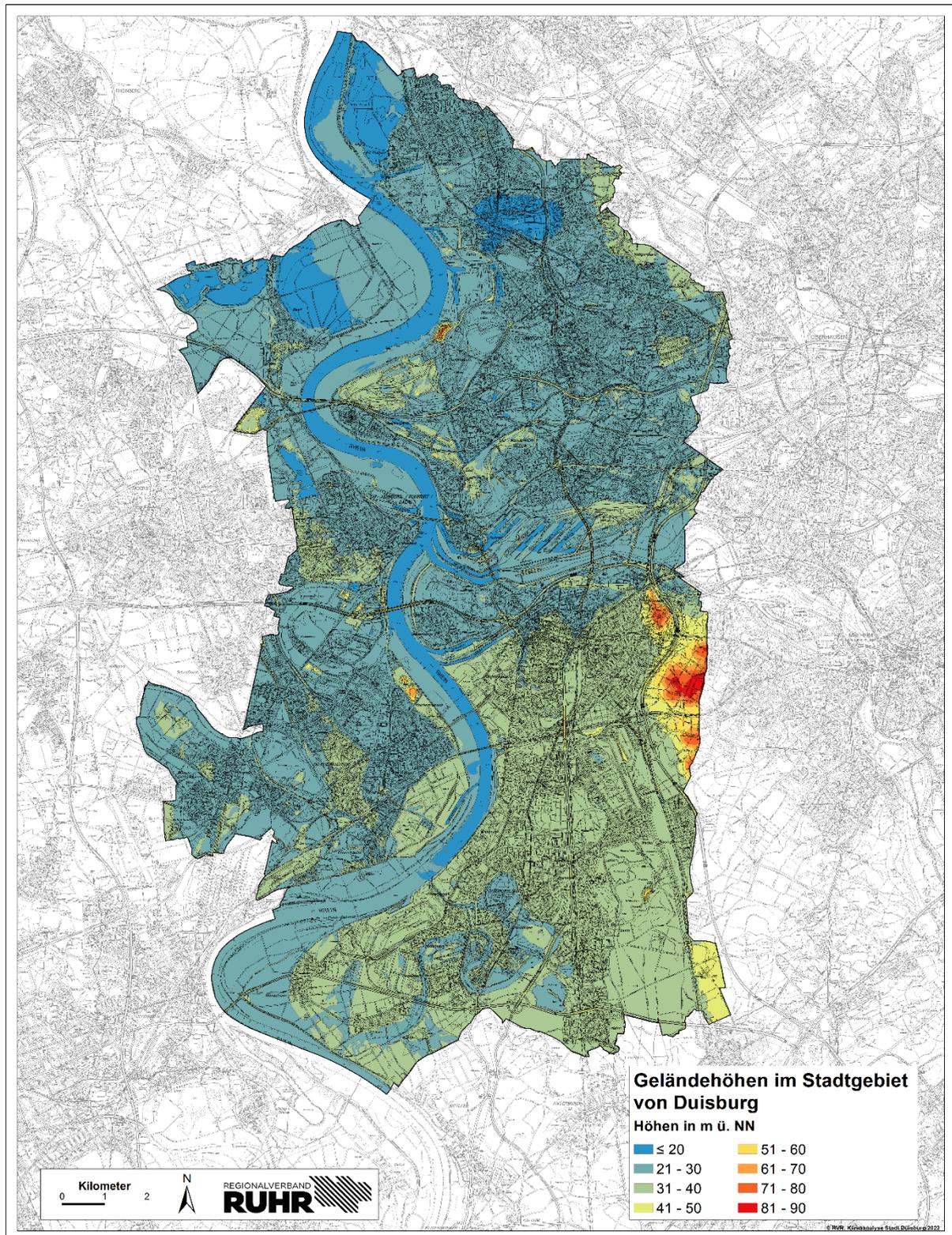
2.2 Relief und Oberflächenrauigkeit

Eine ausgeprägte Reliefstruktur kann einen großen Einfluss auf die Belüftung einer Stadt ausüben, sei es in Form einer Tallage mit dadurch bedingter Ablenkung der Hauptwindrichtung oder in Form einer insgesamt schlechten Belüftungssituation im Falle einer Kessellage. Daneben spielt das Relief für die Entstehung von Kaltluftabflüssen eine große Rolle. Kalte Luftmassen fließen bei geeigneten Wetterlagen hangabwärts, dem stärksten Gefälle folgend und sammeln sich in Senken und Tälern an. Dringt die kalte Luft infolge ausreichenden Gefälles bis in Siedlungsgebiete vor, kann sie dort zur Abkühlung überhitzter Bereiche beitragen.

Die Reliefsituation in Duisburg ist überwiegend homogen, d.h. ein ausgeprägtes Relief existiert nicht. Dementsprechend sind die Einflüsse des Reliefs auf die stadtklimatische Ausprägung von Duisburg als gering einzustufen. Dies bestätigen auch die im Rahmen der Klimaanalyse von 2010 durchgeführten Rauchexperimente im Duisburger Stadtwald sowie der Duisburger Seenplatte, den beiden höchsten Erhebungen im Stadtgebiet (s. RVR 2010).

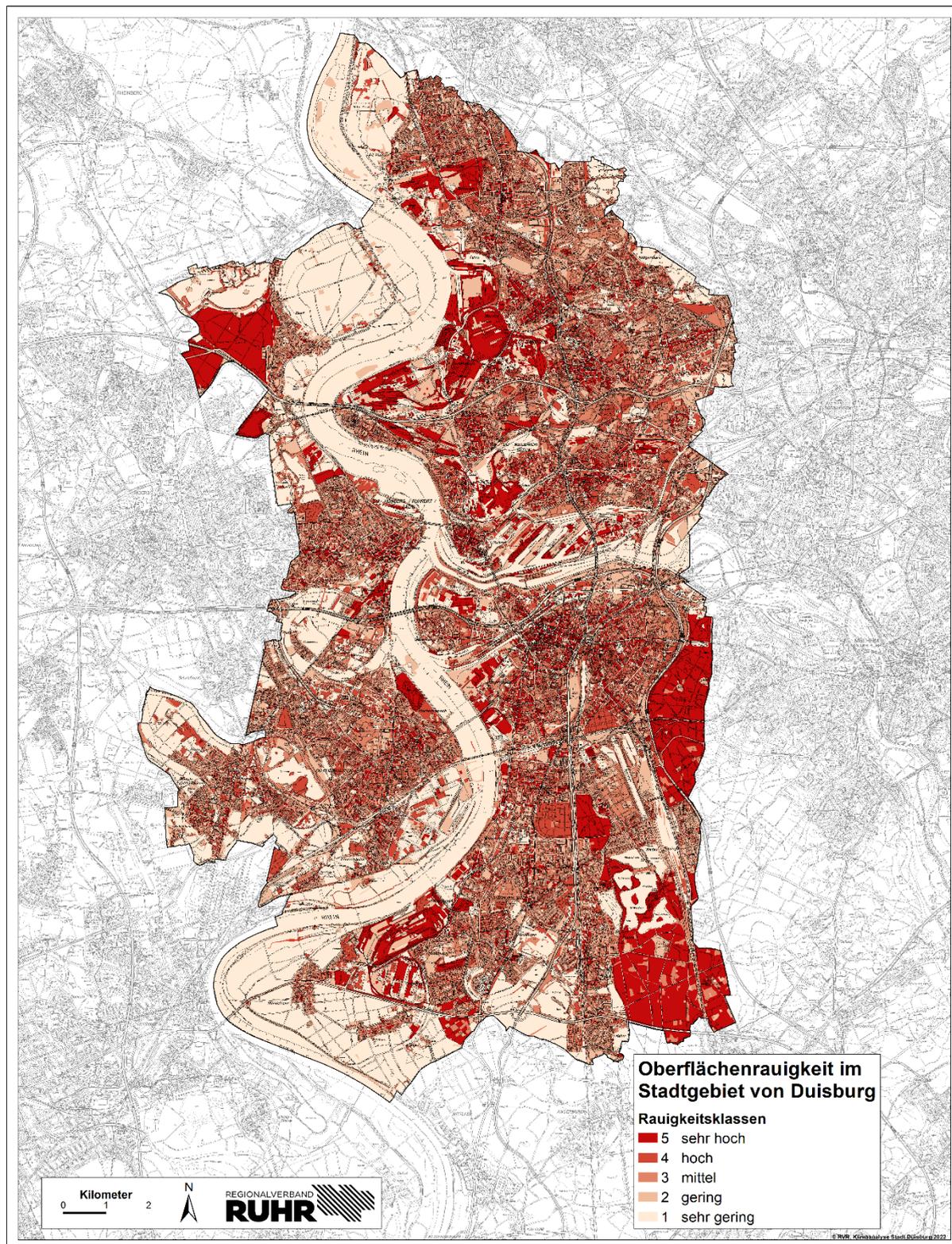
Das Stadtklima in Duisburg wird demnach weniger durch das Relief als vielmehr durch die Flächennutzung geprägt.

Hinsichtlich der Reliefausprägung kann das Stadtgebiet von Duisburg in drei Teilgebiete untergliedert werden. Auf einer Länge von 37,5 km fließt der Rhein durch das gesamte Stadtgebiet und teilt dieses in einen östlichen und einen westlichen Bereich. Während die Flächen im Niederungsbereich des Rheins durch geringe Geländehöhen bis max. 20 m ü.NN (niedrigster Punkt mit 14,87 m ü. NN in der Kurfürstenstraße in Duisburg-Walsum) gekennzeichnet sind, steigt das Relief östlich des Rheins und südlich der Ruhr bis auf Höhen von 82,53 m. ü. NN (Haus Hartenfels) auf. Im übrigen Stadtgebiet liegen die Höhen in der Regel zwischen 20 und 30 m ü. NN (Stadt Duisburg 2022).



Karte 2.1: Darstellung des Reliefs im Stadtgebiet von Duisburg.

Neben dem Relief nimmt auch die Oberflächenrauigkeit, welche aus der Flächennutzung abgeleitet werden kann, eine bedeutende Rolle für die Belüftungssituation eines Standortes ein. Die in Karte 2.2 dargestellten Ergebnisse der Rauigkeitsklassen im Duisburger Stadtgebiet zeigen sehr geringe Oberflächenrauigkeiten im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Flächen insbesondere im südlichen und nördlichen Umfeld des Rheins. Höhere Rauigkeitswerte ergeben sich infolge der Bebauung in den Siedlungs- und Gewerbe- bzw. Industriegebieten. Zudem zeichnen sich auch Wälder durch eine erhöhte Oberflächenrauigkeit aus. Erhöhte Werte bedingen in der Regel eine Verringerung der Windgeschwindigkeit gegenüber dem unbebauten und unbewaldeten Umland und können somit negative Auswirkungen auf die Durchlüftung zur Folge haben. Insgesamt zeichnet sich das Stadtgebiet von Duisburg in weiten Teilen durch eine relativ geringe Reliefenergie und dadurch wenig stark ausgeprägte geomorphologische Strukturen aus. Die Oberflächenrauigkeit zeigt eine stark heterogene Ausprägung im Stadtgebiet mit erhöhter Rauigkeit im Bereich der Waldgebiete (v.a. Baerler Busch, Duisburger Stadtwald und Grindsmark) sowie in den großen Gewerbe-/ Industriegebieten in Duisburg Hamborn (Marxloh und Bruckhausen).



Karte 2.2: Darstellung der Oberflächenrauigkeit im Stadtgebiet von Duisburg.

2.3 Flächennutzung

Da den Wechselwirkungen zwischen einer Oberfläche und der atmosphärischen Grenzschicht die beherrschende Rolle bei der Ausprägung von lokalklimatischen Verhältnissen zukommt, nimmt die Flächennutzung eine entscheidende stadtklimatische Bedeutung ein (Baumüller et al. 1999).

Tabelle 2-2 zeigt die prozentualen Anteile der Nutzungsarten an der Gesamtfläche des Stadtgebietes von Duisburg sowie deren Flächengrößen (Stand 31.12.2020). Dabei wird deutlich, dass 44,8 % des Stadtgebietes durch bebaute Flächen oder Verkehrsflächen überprägt sind. Während landwirtschaftliche Flächen einen Anteil von lediglich 16,4 % an der Gesamtfläche ausmachen, weisen Wald (11,4 %), Erholungs- (10,3 %) und Wasserflächen (8,5 %) höhere Flächenanteile auf (IT.NRW 2019).

Beim Vergleich der Flächenanteile von Duisburg mit den Flächenanteilen in Gemeinden gleichen Typs (Durchschnittswerte) wird deutlich, dass die bebaute Fläche in Duisburg 2,7 % höher und die landwirtschaftlich genutzte Fläche 1,4 % niedriger liegt. Waldflächen sind in Duisburg mit 3,5 % weniger Fläche als in Gemeinden gleichen Typs anzutreffen, während 4,1 % mehr Wasserflächen in Duisburg vorhanden sind (IT.NRW 2020).

Tabelle 2-2: Anteile der Nutzungsarten an der Gesamtfläche des Stadtgebietes von Duisburg sowie deren Flächengröße (Stand: 31.12.2020; IT.NRW 2022)

| Nutzungsart | Fläche in ha | Anteil in % |
|----------------------------|---------------------|--------------------|
| Bebaute Fläche | 7.318 | 31,4 |
| Erholungsfläche | 2.396 | 10,3 |
| Verkehrsfläche | 3.122 | 13,4 |
| Landwirtschaftliche Fläche | 3.816 | 16,4 |
| Waldfläche | 2.650 | 11,4 |
| Wasserfläche | 1.984 | 8,5 |
| Sonstige Flächen | 1.993 | 8,6 |
| insgesamt | 23.280 | 100 |

Karte 2.3 zeigt die räumliche Verteilung unterschiedlicher Flächennutzungskategorien im Stadtgebiet von Duisburg basierend auf der Flächennutzungskartierung (FNK) des Regionalverband Ruhr. Die FNK wird auf Grundlage automatisierter Liegenschaftskarten (ALK) als geometrische Basis unter Berücksichtigung aktueller Luftbildbefliegungen, Planungsdaten, Karten und Schrägluftbildern erstellt und regelmäßig aktualisiert. Dabei umfasst die Flächennutzungskartierung insgesamt 151 unterschiedliche Nutzungsarten. In

Karte 2.3 werden diese für das Stadtgebiet von Duisburg in 8 Flächennutzungskategorien gegliedert und für den Fortführungsstand 2019 dargestellt.

Duisburg ist aufgrund seiner günstigen Flusslage an Rhein und Ruhr und der Nähe zu den Kohlelagerstätten auf der Basis der Eisen und Stahl erzeugenden Industrie ein bedeutender Industriestandort. Aus diesem Grund ist Duisburg städtebaulich stark durch Industrieanlagen des 19. Jahrhunderts geprägt. Zum Teil werden diese heute noch genutzt, zum Teil wurden sie aber auch in Parkanlagen eingebunden oder werden - wie im Innenhafen - durch Unternehmen und Kulturbetriebe genutzt.

Neben der Eisen- und Stahlindustrie prägt auch der Hafen, der als größter Binnenhafen weltweit gilt, mit seinem Zentrum im Stadtteil Ruhrort die Wirtschaft der Stadt.

In Duisburg existieren zudem zahlreiche Naherholungsgebiete, allein 2.650 Hektar des Stadtgebietes sind Waldflächen. Der Baerler Busch, der Driesenbusch und vor allem der Duisburger Stadtwald zählen zu den größten Wäldern in Duisburg. Der Duisburger Stadtwald ist sogar der drittgrößte Stadtwald in ganz Deutschland.

Darüber hinaus gibt es in Duisburg knapp ein Dutzend Parkanlagen. Zu den bekanntesten Parks zählen der Stadtpark in Meiderich und der Biegerpark in Huckingen sowie der Revierpark Mattlerbusch im Norden der Stadt mit der Niederrhein-Therme als Kernstück.

Auf einem ehemaligen Industriegelände in Hochfeld befindet sich der Rheinpark, der auf einer Fläche von 60 ha die Elemente Wohnen, Arbeiten und Freizeit miteinander verbindet. Weitere Freizeitflächen bieten die Rheinauen in Walsum, Friemersheim und Mündelheim.

Duisburg verfügt zudem über zwei botanische Gärten in den Stadtteilen Kaiserberg und Duissern.

In Duisburg-Meiderich befindet sich darüber hinaus der 200 ha große Landschaftspark Duisburg-Nord auf dem Gelände eines ehemaligen Hüttenwerks. Dieser bietet zahlreiche Freizeitmöglichkeiten und wird als Veranstaltungsort genutzt. Zudem ist die Fläche der natürlichen Sukzession überlassen worden, so dass das Gelände mittlerweile mehr als 300 Pflanzenarten beherbergt. Der Landschaftspark wird jedes Jahr von mehr als 700.000 Besucher genutzt.

In unmittelbarer Nähe zum Sportpark Duisburg und zum Duisburger Stadtwald befindet sich im Süden der Stadt die Sechs-Seen-Platte mit einer Wasserfläche von insgesamt 150 Hektar. Mit den umliegenden Parkanlagen hat das gesamte Naherholungsgebiet eine Fläche von 283 Hektar. Der angrenzende Sportpark Duisburg ist insgesamt etwa 200 Hektar groß und zählt damit zu den größten Sport- und Erholungsgebieten Deutschlands.

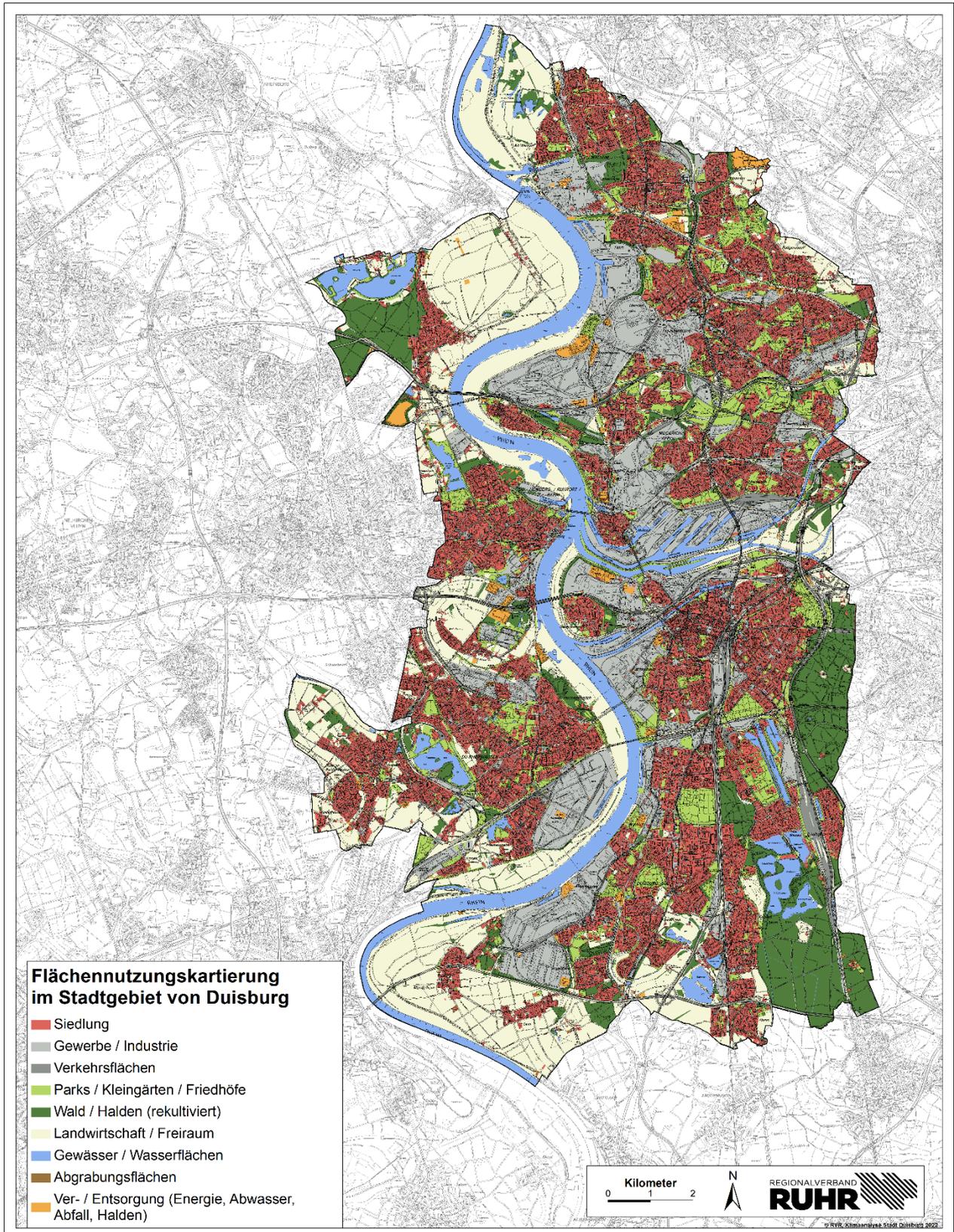
Im linksrheinischen Rheinhausen befindet sich ein weiteres Stillgewässer, der Toeppersee.

Der Duisburger Hafen „duisport“ besitzt einen Seehafen-Status, da mit flussgängigen Seeschiffen im Linienverkehr Häfen in Europa, Afrika und im vorderen Orient bedient werden. Der Mittelpunkt des Hafens liegt im Bereich der Ruhrmündung, wo jährlich über 20.000 Schiffe anlaufen. Kernstück sind dabei die öffentlichen Hafenanlagen mit einer Ausdehnung von 740 ha. Hinzu kommt noch das Logport Logistic Center Duisburg mit 265 Hektar Fläche. Zahlreiche Unternehmen verfügen darüber hinaus über private Hafenanlagen, so dass der Gesamtumschlag bei über 110 Millionen Tonnen liegt.

Zudem existieren in Duisburg mehrere Autobahnen, wozu die A 3, die A 40 und die A2 zählen. Weitere Autobahnen sind die A 42, die Nord-Süd verlaufende Stadtautobahn A 59, die westlich gelegene A 57 und die A 524 als südliche Anbindung an das Kreuz Breitscheid. Mit der B 288 verfügt die Stadt zudem über eine Bundesstraße.

Die räumliche Aufteilung der unterschiedlichen Flächennutzungstypen im Stadtgebiet weist grundsätzlich eine heterogene Verteilung der Frei- und Siedlungsflächen auf. Während im Norden und Süden im Umfeld des Rheins größere, unbebaute Flächen vorkommen, ebenso wie im südöstlichen Stadtgebiet, sind weite Bereiche der Stadtfläche zum Teil dicht bebaut. Die Gewerbe- und Industrieflächen nehmen einen erheblichen Flächenanteil entlang der Fließgewässer ein und gehen zum Teil in dicht bebaute Siedlungsbereiche über.

Dennoch existiert eine Vielzahl an größeren und kleineren unbebauten Arealen und Grünflächen, die in vielen Bereichen die Bebauung auflockern.



Karte 2.3: Flächennutzungskartierung im Stadtgebiet von Duisburg (Stand: 2019).

2.4 Regionale Klimatopkarte

Im Rahmen der Erstellung des Fachbeitrags „Klimaanpassung“ zum Regionalplan Ruhr im Jahr 2013 wurde durch den Regionalverband Ruhr eine regionale Klimatopkarte für die gesamte Metropole Ruhr erstellt. Klimatope beschreiben Gebiete, die aufgrund identischer Flächennutzung ähnliche mikroklimatische Ausprägungen aufweisen. Als Grundlage für die Klimatopkarte diente daher u.a. die Flächennutzungskartierung.

Die Regionale Klimatopkarte wurde auf die Ebene der Regionalplanung ausgerichtet und verschafft daher an dieser Stelle lediglich einen ersten Überblick über die Verteilung der Klimatope im Stadtgebiet. Eine detaillierte Ausweisung und Auswertung der räumlichen Verteilung der Klimatope in Duisburg erfolgt anhand der Klimaanalysekarte in Kapitel 5.

Im Folgenden werden die einzelnen Klimatope kurz beschrieben und eine regionale Einordnung der Stadt Duisburg anhand der Klimatopkarte für die Metropole Ruhr gegeben.

2.4.1 Beschreibung der Klimatope

Freilandklima

Das Freilandklima entwickelt sich über landwirtschaftlich genutzten Flächen. Es zeichnet sich durch gute Austauschverhältnisse und stark ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur mit deutlich niedrigeren nächtlichen Lufttemperaturen aus. Dadurch stellen diese Fläche potenzielle Ausgleichsräume dar, die bei entsprechenden Wetterlagen eine klimatisch entlastende Funktion für die Siedlungsräume einnehmen können.

Waldklima

Das Waldklima ist durch eine Verlagerung der Strahlungsumsätze auf das Kronendachniveau und einer daraus folgenden Dämpfung aller Klimaelemente im Stammraum (Bestandsklima) gekennzeichnet. Aufgrund ihrer Filterfunktion stellen Wälder bedeutende Frischluftentstehungs-gebiete dar.

Parkklima

Größere innerstädtische Frei- und Grünflächen (z.B. öffentliche Parks, Friedhöfe, etc.) können (ähnlich wie das Freiland) aufgrund der im Vergleich zur umliegenden Bebauung geringeren Temperaturen eine ausgleichende Funktion innehaben. Die Reichweite dieser klimameliorierenden Wirkung auf die angrenzenden Siedlungsflächen ist dabei von der Flächengröße der Grünfläche sowie der Beschaffenheit der Randbebauung abhängig.

Gewässerlima

Das Gewässerlima ist aufgrund der thermischen und hygri-schen Eigenschaften von Wasserkörpern durch einen gedämpften Tagesgang der Lufttemperatur gekennzeichnet.

Diese positive klimatische Wirkung bleibt bei kleineren innerstädtischen Wasserflächen jedoch zumeist auf die unmittelbare Umgebung begrenzt.

Klima der bebauten Flächen

Das Stadtklima wird mit zunehmender Bebauungsdichte und Versiegelung bei abnehmender Vegetationsdurchdringung in die **Klimatope Stadtrand, Stadt und Innenstadt** unterteilt. Vom Stadtrand in Richtung Innenstadt erfolgen eine Zunahme der Temperatur, eine Veränderung der relativen Feuchte und ein zunehmender Einfluss auf das Windfeld. Die positive Wirkung der Vegetation nimmt immer weiter ab.

Gewerbe- und Industrieklima

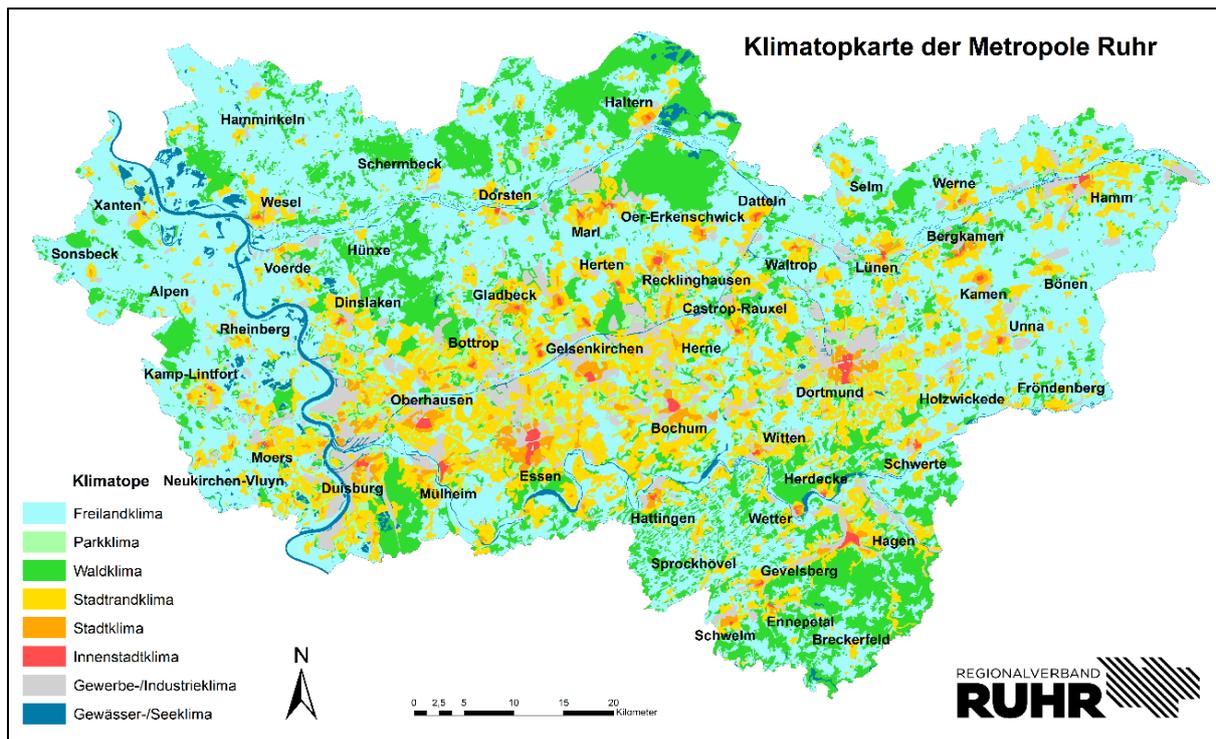
Gewerbe- und vor allem Industrieflächen sind aufgrund der Abwärmeproduktion, des meist hohen Versiegelungsgrades und der dichten Bebauung durch Überwärmung gekennzeichnet. Je nach Baukörper kann das Windfeld stark beeinflusst werden. Negative Auswirkungen auf das Umfeld ergeben sich ebenfalls durch Lärm- und Schadstoffemissionen.

2.4.2 Gliederung der Stadt Duisburg anhand der Regionalen

Klimatopkarte

In den Darstellungen der räumlichen Verteilung der Klimatope werden diese scharf voneinander abgegrenzt. In Wirklichkeit sind die Übergänge zwischen den Klimatopen fließend und nicht statisch. Die Klimatope stellen erste Hinweise auf die klimatischen Eigenschaften der einzelnen Flächen dar. Dabei bezieht sich die Ausweisung auf die Bedingungen, die sich bei austauscharmen Strahlungswetterlagen einstellen, da hier die mikroklimatischen Unterschiede zwischen unterschiedlichen Flächennutzungen am stärksten hervortreten.

Karte 2-4 zeigt die räumliche Verteilung der unterschiedlichen Klimatope im Ruhrgebiet auf.



Karte 2.4: Regionale Klimatopkarte des Ruhrgebietes (2012)

Es wird deutlich, dass die Außenbereiche der Metropolregion Ruhr (Kreis Wesel, Kreis Unna, Ennepe-Ruhr-Kreis und die nördlichen Bereiche des Kreises Recklinghausen) durch weitläufige und zusammenhängende Freiland- bzw. Waldklimatope geprägt sind, während der Kernbereich des Ruhrgebietes, aufgrund der starken Überbauung, durch die städtischen Klimatope (Stadtrand-, Stadt- und Innenstadtklima) sowie das Gewerbe-/Industrieklima gekennzeichnet ist. Zwar kann sich auch in kleineren Kommunen mit ländlichem Umfeld ein Stadtklima entwickeln, die räumliche Ausdehnung ist allerdings in den Großstädten (z.B. Oberhausen, Essen, Bochum, Dortmund) wesentlich ausgeprägter. Insbesondere aufgrund der fließenden Übergänge der Bebauungsfläche über die Stadtgrenzen hinweg und der zum Teil fehlenden Ausgleichsräume kann es von Duisburg bis Dortmund bei sommerlichen Strahlungswetterlagen zu signifikanten klimatischen Unterschieden zwischen den Innenstädten und dem unbebauten Umland kommen.

Die Stadt Duisburg ist regional dem westlichen Ruhrgebiet zuzuordnen. Großflächige Gewerbe- und Industriegebiete prägen weite Teile des Stadtgebietes, insbesondere entlang von Rhein und Ruhr. Südlich der Ruhr gehen die dicht bebauten Gewerbe-/Industriegebiete in die hoch versiegelte Innenstadtbauung des Stadtbezirks Mitte über. Auch in den übrigen Stadtbereichen existieren großflächige Wärmeinseln, die sich durch einen hohen Versiegelungsgrad mit wenig Grün auszeichnen, dabei ist insbesondere der Stadtbezirk

Hamborn hervorzuheben. Dennoch ist das Stadtgebiet in vielen Bereichen durch große Grünverbundsysteme aufgelockert, so dass unterschiedliche Mikroklimata das Stadtklima prägen.

3 Flächenhafte Ausprägung ausgewählter Klimatelemente

Die Verteilung lokalklimatisch relevanter Größen (z.B. Wind, Temperatur, etc.) kann mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variabilität der meteorologischen Parameter sind Messungen allerdings immer nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume zumeist nicht möglich. Daher nehmen kleinräumige Simulationsmodelle für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen eine immer größere Bedeutung ein. Mesoskalige Modelle können physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen Messungen schließen, weitere meteorologische Größen berechnen sowie Wind- und Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln und darstellen (RVR 2013).

Für den Fachbeitrag „Klimaanpassung“ zum Regionalplan Ruhr wurden die klimatischen Verhältnisse bereits im Jahr 2012 flächendeckend für die gesamte Metropole Ruhr mit Hilfe des Simulationsmodells FITNAH-3D berechnet. Aufgrund zwischenzeitlich veränderter baulicher Strukturen und Flächennutzungsänderungen in vielen Bereichen der Metropole Ruhr wurde die Modellierung im Jahr 2020 auf Basis aktueller Datengrundlagen erneut durchgeführt und dabei hinsichtlich der räumlichen Auflösung verbessert. Darüber hinaus wurden im Rahmen der neuen Modellrechnung zusätzliche Parameter berechnet sowie die Darstellung des Klimawandels anhand von thermischen Kerntagen (siehe Kapitel 6) ergänzt.

Die Modellierung der meteorologischen Parameter erfolgte dabei in einem Raster mit einer Zellengröße von 25 m x 25 m. Wie jedes numerische Modell benötigt FITNAH-3D Eingangsdaten, die die Charakteristika der Landschaft und Flächennutzung im Untersuchungsgebiet beschreiben. Dabei müssen die Informationen für jede Rasterzelle vorliegen bzw. definiert werden. Die für die Simulation notwendigen orographischen Eingangsparameter wurden auf Grundlage eines digitalen Geländehöhenmodells mit einer Auflösung von 1 m (DGM1) abgeleitet. Zur Aufbereitung der Landnutzungsstrukturen für die Modellrechnung wurde die Flächennutzungskartierung des RVR verwendet, die für das Stadtgebiet von Duisburg den Stand 2019 aufwies. Als zusätzliche Information zur Beschreibung der Strukturhöhe wurde zudem ein digitales Oberflächenmodell (DOM) herangezogen. (GEO-NET 2021)

Da bei einer Auflösung von 25 m x 25 m Einzelgebäude nicht explizit aufgelöst werden können, sind diese entsprechend parametrisiert über die Definition von Flächennutzungsklassen in die Modellierung eingegangen und werden je Rasterzelle über eine mittlere Rauigkeit und Hindernishöhe beschrieben. Während die Flächennutzungskartierung (FNK) des RVR über 150 verschiedene Nutzungsklassen unterscheidet, werden in FITNAH lediglich 14 Klassen verwendet, deren Charakteristika in Tabelle A2 im Anhang aufgeführt werden. Aus der

Verknüpfung der unterschiedlichen Eingangsparameter und der Einteilung in die 14 FITNAH-Klassen ist eine Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden. Anschließend wurde diese mittels umfangreichem Abgleich auf Basis von Luftbildern stichprobenartig kontrolliert und bei Bedarf manuell korrigiert. (GEO-NET 2021)

Die Simulation erfolgte für eine autochthone Wetterlage. Hierbei handelte es sich um eine austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlage mit wolkenlosem Himmel, hohen solaren Einstrahlungswerten und einem nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind. Unter diesen Bedingungen können sich lokalklimatische Besonderheiten unterschiedlicher Nutzungsstrukturen besonders stark ausprägen. Häufig geht dies mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung sowie lufthygienischen Belastungen in Siedlungsräumen einher. Unter diesen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Flurwindströmungen aus innerstädtischen Grün- und Brachflächen sowie dem unbebauten Umland zum Abbau einer Wärmebelastung in den Siedlungsbereichen beitragen. Die meteorologischen Eingangsdaten der Simulation stellen insofern eine besondere Situation dar, die jedoch jeden Sommer mehrfach auftritt und zudem keine absolute Extremsituation beschreibt. Konkret wurde die Situation des 21. Juni, also des Sonnenhöchststandes, bei wolkenlosem Himmel angenommen. Die Starttemperatur wurde zum Startzeitpunkt der Modellierung um 21 Uhr auf 21 °C in 2 m Höhe festgelegt. Des Weiteren wurde eine Bodenfeuchte von 60 % angenommen, so dass der Vegetation Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht. (GEO-NET 2021)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der FITNAH-Modellierung aus dem Jahr 2020 zu verschiedenen meteorologischen Parametern für das Stadtgebiet von Duisburg dargestellt und erläutert.

3.1 Bodennahe Lufttemperatur und nächtliche Abkühlungsrate

Der Tagesgang der bodennahen Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt. Die in Städten gegenüber dem unbebauten Umland modifizierten Temperaturverhältnisse lassen sich dabei im Wesentlichen auf die erhöhte Wärmekapazität und -leitfähigkeit der urbanen Böden und Oberflächen sowie die durch die Geometrie der städtischen Baukörper vergrößerte strahlungsabsorbierende Oberfläche zurückführen. Zudem bedingt die höhere Konzentration von Gasen und Aerosolen der Stadtluft eine Veränderung der Strahlungsbilanz zugunsten eines langwelligen Strahlungsgewinns (lokaler Treibhauseffekt). Des Weiteren leisten eine herabgesetzte Verdunstung infolge der geringeren Grünflächenanteile und der direkten Einleitung des Niederschlagswassers in die Kanalisation, die Wirkung der Stadt als Strömungshindernis und damit verbundener Beeinträchtigung der

Durchlüftung und des Luftaustausches mit dem Umland sowie die erhöhte anthropogen bedingte Wärmeproduktion einen Beitrag zur Überwärmung bzw. geringeren nächtlichen Abkühlung der Siedlungsbereiche. Die nächtliche Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland kann dabei mehr als 8 Kelvin (K) betragen, wobei das Ausmaß von der Größe der Stadt und der Dichte der Bebauung abhängig ist.

Auch die Luftvolumina über grüngerprägten Flächen weisen untereinander keinen einheitlichen Temperaturzustand auf. Die Abkühlungsrate von natürlichen Oberflächen wird insbesondere von ihren thermischen Bodeneigenschaften (u.a. Wärmeleitfähigkeit und -kapazität) sowie von der Oberflächenbedeckung (Bewuchs, Laubstreu usw.) bestimmt. Das Relief, die Lage im Mosaik der Nutzungen sowie die dynamischen Luftaustauschprozesse üben einen weiteren Einfluss aus.

Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte Tagesgang der Lufttemperatur im Wald beruht auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Größere Waldgebiete stellen wichtige Frischluftproduktionsgebiete dar. Während tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ niedrige Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit im Stammraum vorherrschen, treten nachts vergleichsweise milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können daher auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen.

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch und/oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung und Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen.

In Karte 3-1 ist die mit FITNAH-3D simulierte Verteilung der bodennahen Lufttemperatur in 2 Meter über Grund für eine sommerliche austauscharme Strahlungswetterlage zum Zeitpunkt 14 Uhr dargestellt. Die mittlere Lufttemperatur liegt bei 31,1 °C. Das Temperaturminimum beträgt 19,3 °C und das Maximum der simulierten Temperaturen liegt bei 35,4 °C. Damit wird eine Temperaturdifferenz im Stadtgebiet von bis zu 16,1 K erreicht. Die höchsten Temperaturen (stellenweise über 35°C) sind in den großen Gewerbe- und Industriegebieten vor allem in Marxloh, Bruckhausen, Hamborn, Angerhausen, Ungelsheim und Bliersheim ermittelt worden, was auf die großflächige Ausdehnung der hoch versiegelten Bereiche mit nur geringen Grünflächenanteilen zurückzuführen ist.

Weite Teile des Stadtgebietes von Duisburg sind mit ca. 33 - 35 °C ebenfalls durch sehr hohe Lufttemperaturen während der Tagstunden gekennzeichnet. Dabei konnten fast im gesamten Stadtgebiet Temperaturen ermittelt werden, die nur knapp unterhalb der Temperaturen in den Gewerbe- und Industriegebieten liegen.

Die landwirtschaftlichen Flächen außerhalb des Siedlungsraums zeigen hingegen eine nur unwesentlich günstigere Situation mit Lufttemperaturen zwischen 29°C und 33°C an. Dass die Temperaturen zwischen dicht bebauten Innenstadtbereichen und unversiegeltem Freiland sich zur Mittags- bzw. frühen Nachmittagszeit kaum unterscheiden, wird durch zahlreiche Untersuchungen für alle Monate des Jahres belegt. Insbesondere im Juli kann es sogar zu einer Umkehr der Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Land kommen. Diese Situation tritt insbesondere während starker Einstrahlung auf und ist mit dem Schattenwurf der Gebäude in den Siedlungsräumen, die Verlagerung der maßgeblichen Strahlungsreferenzflächen auf das Niveau der Gebäudedächer und die Ableitung der Wärme in die Baumaterialien zu erklären (KUTTLER 2009).

Mit Temperaturen von 27 - 29 °C sind innerhalb der Wälder deutlich günstigere Bedingungen während der Tagstunden festzustellen. Grund für die geringere Aufheizung ist die Abschirmung des Kronendachs vor der Sonnenstrahlung sowie die Verdunstungskühlung durch die Vegetation.

Die Wasserflächen stellen sich am Tage aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität (Maß für diejenige Energie, die benötigt wird, um 1kg eines Stoffes um 1K zu erwärmen) als die kühlest Bereiche mit Temperaturen um 20 °C dar. Die leicht kühlende Wirkung ist noch in Teilen der Niederungsbereiche des Rheins mit Temperaturen zwischen 29 °C und 31°C nachzuweisen. Für die innerhalb des Siedlungsraums vorhandenen Wasserflächen kann nur ein geringer Einfluss auf angrenzende Siedlungsräume nachgewiesen werden (maximal 150 m weit in die Bebauung hinein, siehe Großenbaumer See). Überwiegend handelt es sich jedoch um lokal begrenzte Effekte.

Karte 3-2 zeigt die mit FITNAH-3D simulierte flächenhafte Verteilung der bodennahen Lufttemperatur in 2 Metern über Grund für eine sommerliche austauscharme Strahlungswetterlage zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens. Die mittlere Temperatur im Stadtgebiet von Duisburg liegt bei 17,3 °C. Dabei umfasst das sich nächtlich einstellende Temperaturfeld Werte zwischen 14,4°C und 21,3 °C und weist somit eine Stadt-Umland-Differenz von 6,9 K auf.

Bei Betrachtung der Karte der bodennahen Lufttemperatur fällt auf, dass die höchsten Temperaturen im Stadtgebiet im Bereich der großen Gewerbe- und Industriegebiete entlang von Rhein und Ruhr auftreten, die bereits während der Tagstunden als die am wärmsten ermittelten Bereiche identifiziert wurden (s.o.). In den Nachtstunden sinken die Temperaturen hier während der simulierten Wetterlage nicht unter 20 °C, so dass die Bedingungen einer Tropennacht voraussichtlich erfüllt sind (Anmerkung: Voraussetzung für die Ausweisung einer Tropennacht ist, dass während aller Nachtstunden die Lufttemperatur nicht unter 20 °C sinkt).

Sowohl die flächenhaft große Ausdehnung als auch der hohe Versiegelungsgrad und der geringe Grünflächenanteil sind ausschlaggebend dafür, dass sich die Flächen nachts nur sehr langsam abkühlen. Zusätzlich wird in einigen Bereichen durch Produktionsprozesse Wärme freigesetzt, woraus eine zusätzliche Erwärmung der Luftmassen resultiert.

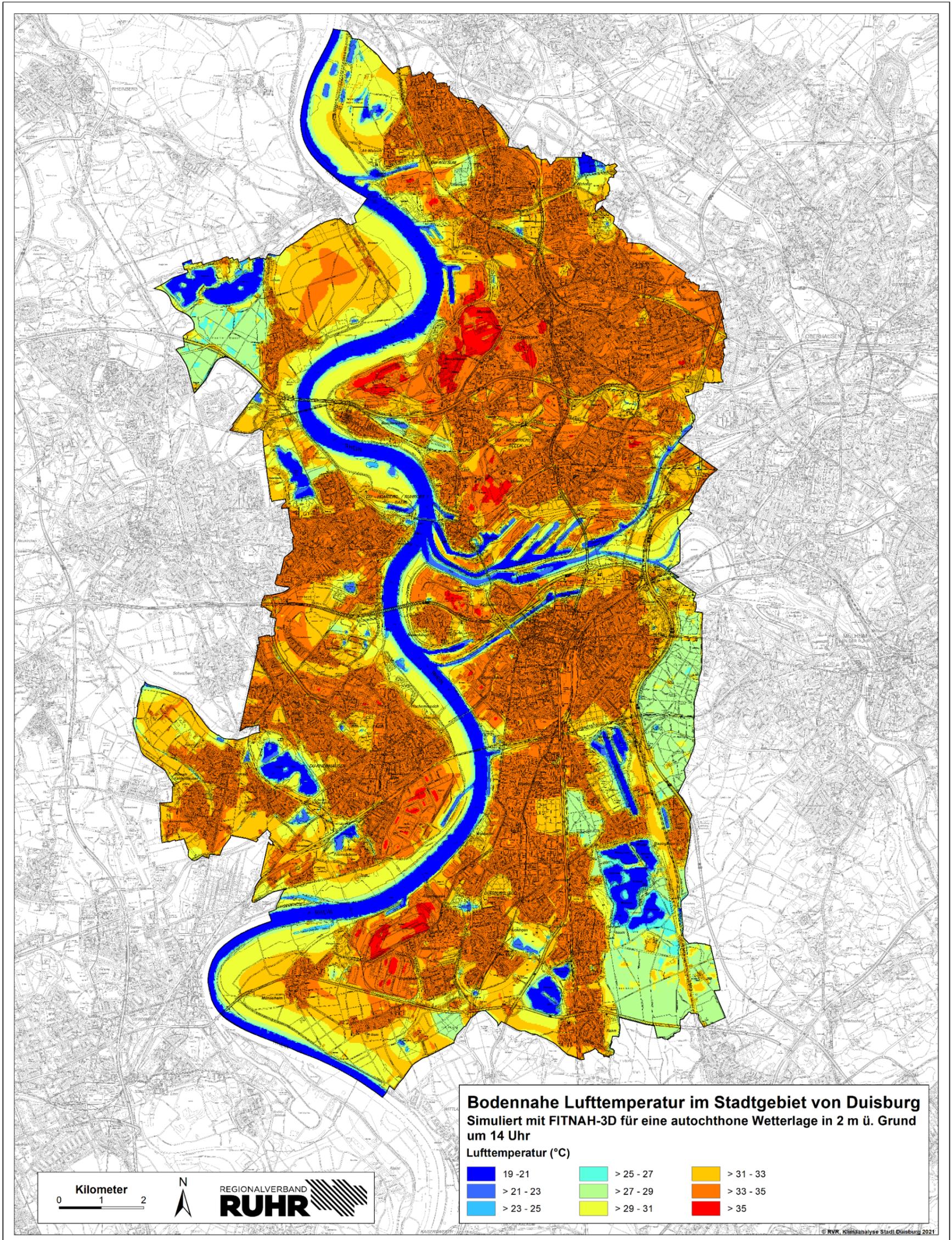
Innerhalb kleinerer Gewerbeflächen liegen die Lufttemperaturen ebenfalls zum Teil über 20°C oder nur leicht darunter, während die Werte in den übrigen Siedlungsräumen und verdichteten Wohngebieten zwischen 19°C bis 20°C betragen. Weite Teile der zumeist aufgelockerten Stadtrandbebauung weisen mit ca. 17°C bis 19°C ein etwas geringeres Temperaturniveau auf, was auf den vergleichsweise geringen Überbauungsgrad, einen höheren Grünflächenanteil sowie der räumlichen Nähe zum unbebauten Umland zurückzuführen ist. Die niedrigsten Temperaturen sind über den landwirtschaftlich genutzten Arealen vor allen entlang des Rheins zu verzeichnen, was in ihrer starken langwelligen Ausstrahlung nach Sonnenuntergang begründet liegt.

In den Waldgebieten sind vergleichsweise hohe Temperaturen von 17°C – 18°C zu verzeichnen. Hier dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit auch ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur im Stammraum.

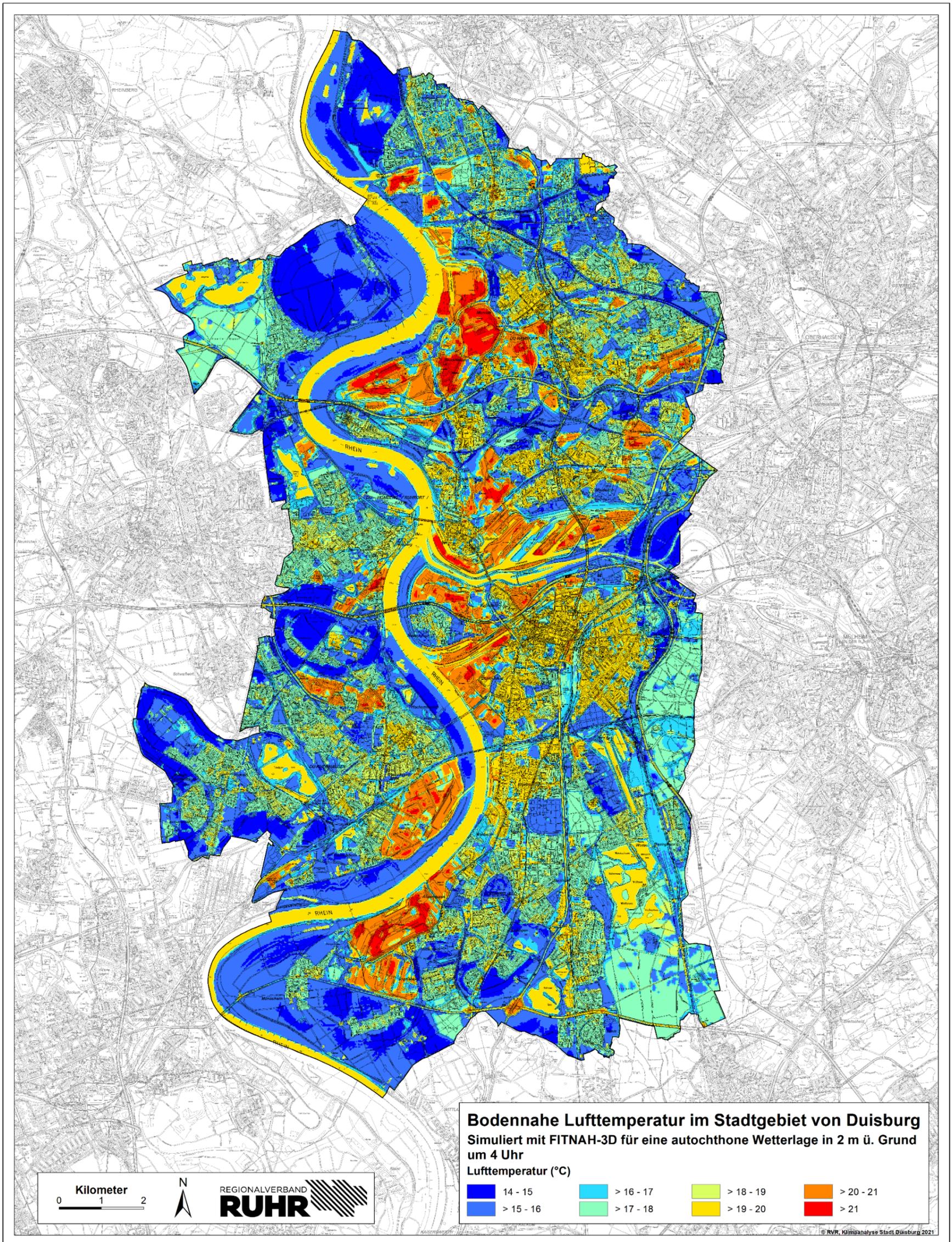
Verglichen mit den größeren Freiräumen der Rheinniederungen weisen die innerstädtischen Grünflächen, abhängig von ihrer Größe und Form, zum Teil etwas höhere Werte auf, welche zumeist zwischen 15 °C und 17 °C liegen. Hier wird deutlich, dass vor allem die kleineren Flächen in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind und daher die geringen Temperaturen des Umlandes nicht mehr erreicht werden. Dazu zählen unter anderem kleinere Grün- und Freiflächen innerhalb des Stadtzentrums (z.B. Park am Wilhelm-Lehmbruck-Museum). Die Temperaturen der innerstädtischen Wasserflächen liegen aufgrund der hohen Wärmekapazität bei 19°C bis 20°C.

Die oben beschriebenen Zusammenhänge werden zudem in der nächtlichen Abkühlungsrate deutlich. Den Rückgang der bodennahen Lufttemperatur von 20 Uhr abends bis 4 Uhr morgens zeigt Karte 3-3. Während die Lufttemperatur im Bereich der großen Gewerbe- und Industriegebiete nur um maximal 3 K zurückgeht, ist die Abkühlungsrate über den landwirtschaftlich genutzten Flächen mit bis zu 7 K am höchsten. Die Abkühlung der Waldflächen kann dagegen weniger als 3 K betragen, was auf den gedämpften Tagesgang der Lufttemperatur im Stammraum zurückzuführen ist.

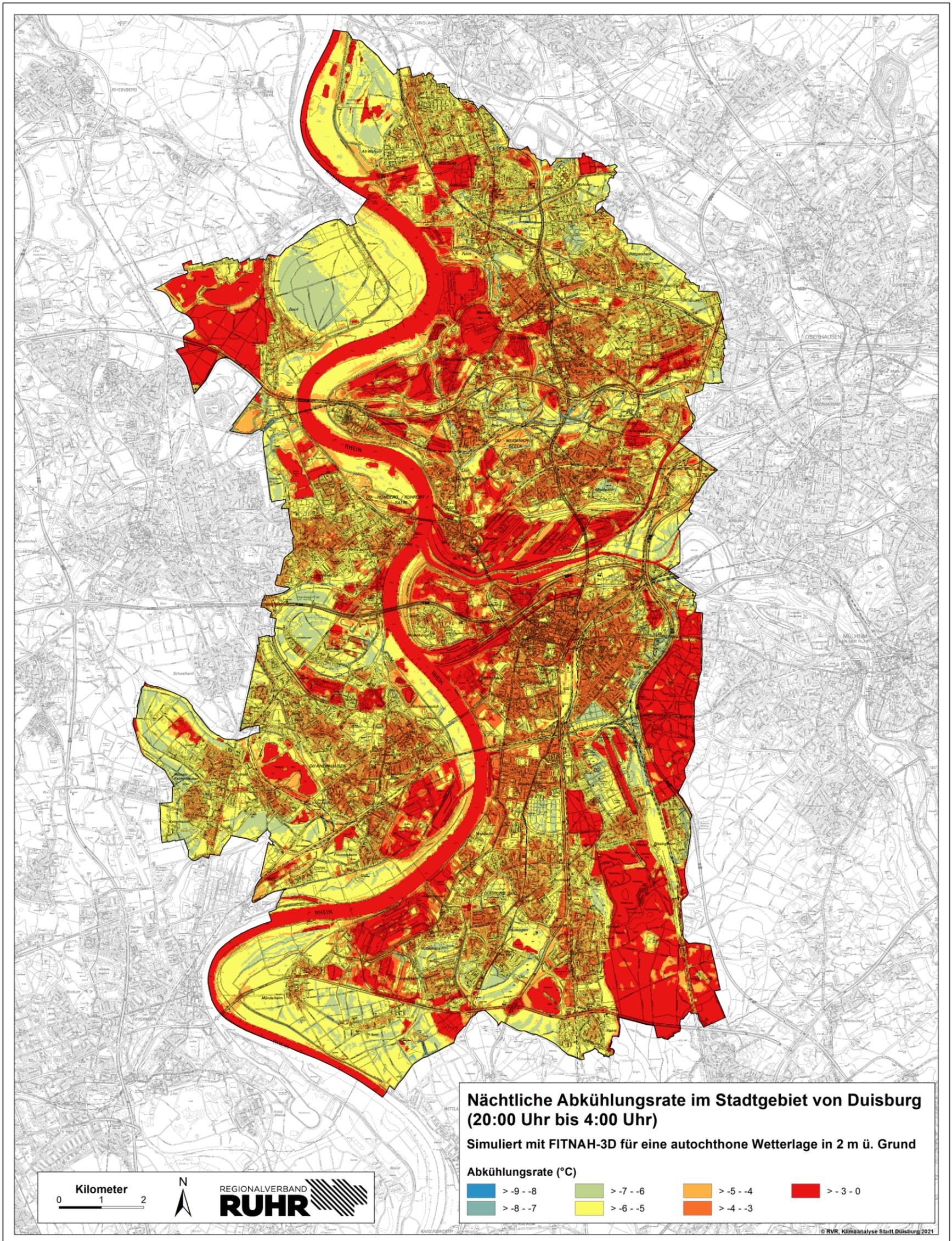
Karte 3.1: Bodennahe Lufttemperatur (2 m ü. Grund) im Stadtgebiet von Duisburg um 14 Uhr



Karte 3.2: Bodennahe Lufttemperatur (2 m ü. Grund) im Stadtgebiet von Duisburg um 4 Uhr



Karte 3.3: Nächtliche Abkühlungsrate (20 – 4 Uhr) der Lufttemperatur im Stadtgebiet von Duisburg



3.2 Physiologische Äquivalenttemperatur (PET)

Biometeorologische Indizes, wie die Physiologisch Äquivalente Temperatur, stellen eine sehr relevante Größe zur Beurteilung der thermischen Belastung eines Menschen dar und sollten in Planungsprozessen zur Bewertung von Klimaanpassungsmaßnahmen eine entscheidende Berücksichtigung finden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass diese Indizes insbesondere bei Betrachtung von sommerlichem Hitzestress entscheidend von den Strahlungsbedingungen abhängig sind und dadurch eine sehr hohe räumliche Variabilität innerhalb der Siedlungsstrukturen aufweisen, die maßgeblich vom Schattenwurf der Gebäude und Bäume beeinflusst wird. Diese kleinräumige Variabilität kann mit einem mesoskaligen Modell wie FITNAH-3D, welches die Gebäude und Vegetation nicht explizit aufgelöst, sondern parametrisiert berücksichtigt, nicht dargestellt werden. Die Darstellung der Modellierung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur mit FITNAH-3D kann daher lediglich eine erste Einordnung liefern, wie sich unterschiedliche Stadt- bzw. Flächennutzungsstrukturen grundsätzlich auf das thermische Empfinden eines Menschen auswirken.

Das physiologische Wärmeempfinden des Menschen wird nicht nur von der Lufttemperatur, sondern von weiteren Faktoren bestimmt. Dazu zählen neben der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit auch die jeweiligen Einstrahlungsbedingungen (Sonneneinstrahlung, Schattenwurf und langwellige Wärmeabstrahlung von Gebäuden). Somit ist die Lufttemperatur nicht immer als maßgeblicher Faktor für das Wärmeempfinden zu betrachten. Je nach Situation und Tageszeit können auch die Strahlungs- und Windverhältnisse dominierend sein (Matzarakis 2013).

Aus diesem Grund ist eine kombinierte Bewertung aller relevanten Faktoren notwendig. Da hier alle den Wärmehaushalt des Menschen direkt beeinflussenden Klimaelemente eine Rolle spielen, spricht man vom thermischen Wirkungskomplex.

Unter Berücksichtigung entsprechender Bekleidung und meteorologischer Größen kann der Wärmehaushalt berechnet werden und durch den Vergleich mit Kenngrößen zur Behaglichkeit eine Beurteilung vorgenommen werden. Die auf diese Weise bestimmten PET-Werte können einem thermischen Empfinden und einer Belastungsstufe zugeordnet werden (s. Tabelle 3). Damit ist die Physiologische Äquivalenttemperatur (PET) als biometeorologischer Index geeignet, den aktuellen meteorologischen Atmosphärenzustand in thermischer Hinsicht für den Menschen bewertbar zu machen.

So kann beispielsweise das Anhalten der Überwärmung in der Nacht bei geringer Windgeschwindigkeit dazu führen, dass der Schlaf nachteilig beeinflusst wird. Aber auch am Tage kann die Überwärmung vor allem in Kombination mit höherer Luftfeuchtigkeit und intensiver Sonneneinstrahlung zu einer hohen Belastungssituation führen.

Zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit wurde der PET aus dem Energiebilanzmodell des menschlichen Körpers (Münchener Energiebilanz-Modell für Individuen, MEMI) abgeleitet. PET ist definiert als die Lufttemperatur, bei der in einer typischen Innenraumsituation die Energiebilanz des menschlichen Körpers, mit denselben Werten der Kern- und Hauttemperatur wie bei den Bedingungen im Freiraum, ausgeglichen ist (VDI 1989).

Die dem Modell zugrunde gelegte Gleichung lautet:

$$M + W + R_n + Q_H + Q_L + Q_{Sw} + Q_{Re} = 0 \text{ (W)}$$

M: Metabolische Rate = Gesamtenergieumsatz des Menschen
W: Energieumsatz infolge mechanischer Leistung
R_n: Strahlungsbilanz
Q_H: Fluss fühlbarer Wärme
Q_L: Fluss latenter Wärme durch Wasserdampfdiffusion
Q_{Sw}: Fluss latenter Wärme durch Verdunstung von Schweiß
Q_{Re}: Energieumsatz infolge von Erwärmung und Wasserdampfsättigung der Atemluft

Die Standardperson (Klima-Michel) für den die PET-Berechnung aufgestellt wurde, erfüllt dabei folgende Voraussetzungen:

Geschlecht: männlich
Alter: 35 Jahre
Gewicht: 75 kg
Größe: 1,75 m
Körperoberfläche: 1,9 m²
metabolische Rate: 80 W (leichte Tätigkeit, sitzend)
Kleidungsfaktor: 0,9 clo

Die Adaption für den Innenraum erfolgt unter den folgenden meteorologischen Annahmen:

Windgeschwindigkeit: 0,1 m/s
Wasserdampfdruck: 12 hPa
Annahme, dass die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} der Lufttemperatur T_a entspricht (T_{mrt} = T_a)

Für einen ruhig sitzenden Menschen mit üblicher Innenraumbekleidung stellt sich üblicherweise bei einer PET von etwa 20 °C eine optimale Behaglichkeit ein (Held und Krüger 2011).

Tabelle 3-1 verdeutlicht die sechs PET-Klassen in aufsteigender Reihenfolge von Kältestress über Behaglichkeit bis zu den Stufen des Hitzestresses.

Tabelle 3-1: Einteilung der PET-Klassen, verändert nach Matzarakis und Mayer (1996) und Held und Krüger (2011)

| PET-Intervall (°C) | Klasse | Thermisches Empfinden | Grad des physiologischen Stress‘ |
|--------------------|--------|------------------------|----------------------------------|
| 0 - 18 | 1 | Leicht kühl und kälter | Kältestress |
| > 18 - 23 | 2 | Behaglich | Kein thermischer Stress |
| > 23 - 29 | 3 | Leicht warm | Leichter Hitzestress |
| > 29 - 35 | 4 | Warm | Moderater Hitzestress |
| > 35 - 41 | 5 | Heiß | Starker Hitzestress |
| > 41 | 6 | Sehr heiß | Extremer Hitzestress |

Die PET ist auch Bestandteil der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (Verein Deutscher Ingenieure) (VDI 1998).

Die thermische Belastung am Tage wird anhand des PET-Wertes in Karte 3.4 für das Stadtgebiet von Duisburg dargestellt.

Die Abbildung verdeutlicht, dass die Unterschiede zwischen stark verdichteten innerstädtischen Quartieren und lockerer bebauten Siedlungsräumen nicht stark ausgeprägt sind. Während in den am dichtesten bebauten Bereichen das thermische Empfinden als „sehr heiß“ bewertet wird und somit ein extremer Hitzestress auftritt, ist in den lockerer bebauten Siedlungsflächen das thermische Empfinden mit „heiß“ definiert, was einem starken Hitzestress entspricht. Auffällig ist ebenfalls, dass im Außenbereich, in dem ein höherer Anteil großflächiger landwirtschaftlich genutzter Flächen charakteristisch ist, ebenfalls ein extremer Hitzestress auftritt. Die starke thermische Belastung der Freiräume ist hier mit der fehlenden Beschattung durch höhere Vegetationsbestände zu erklären.

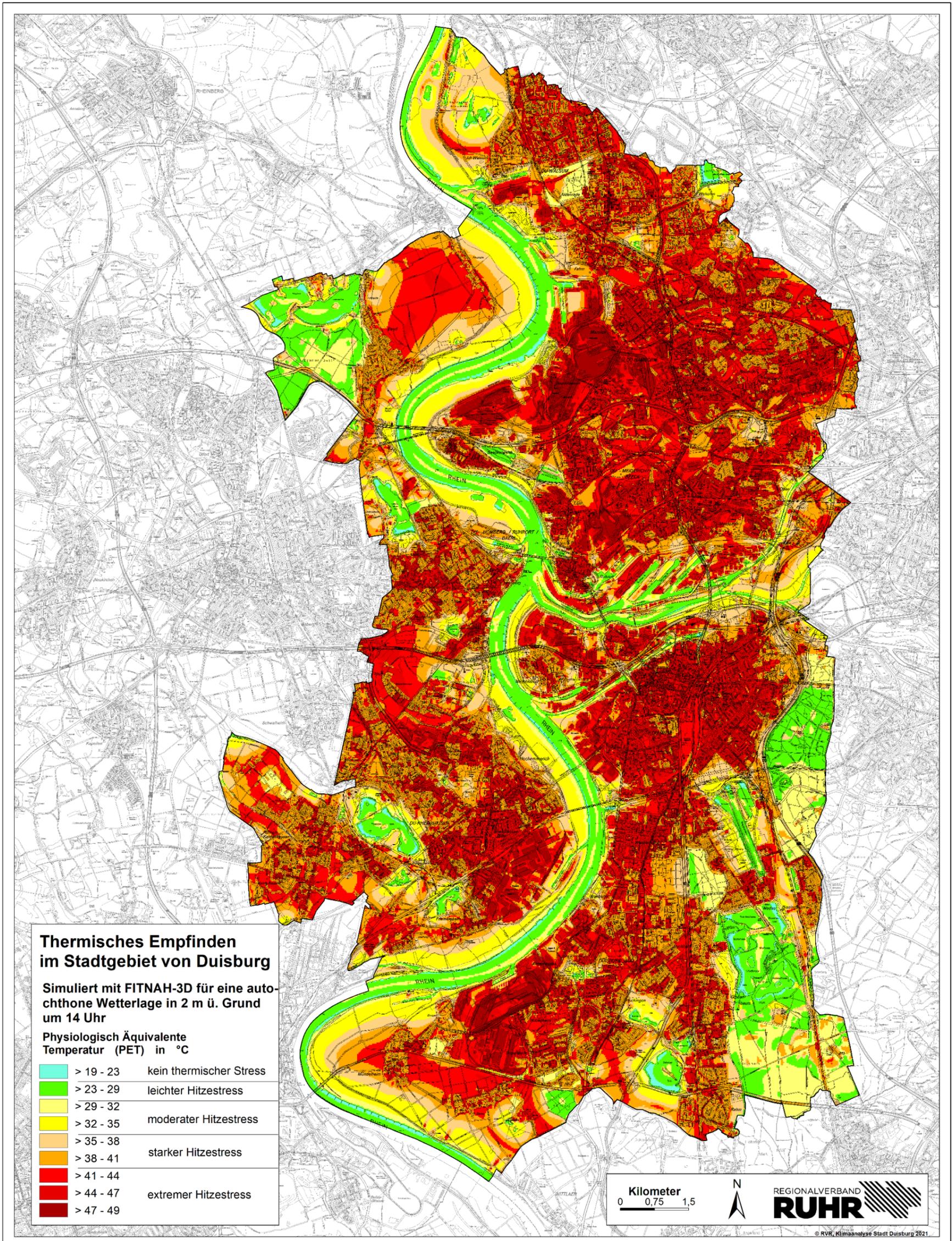
Eine deutliche Reduktion der thermischen Belastung innerhalb der verdichteten Siedlungsräume tritt durch das Vorhandensein von verdunstungsaktiven Flächen auf. Dies wird an zahlreichen Wasserflächen - wie Rhein, Ruhr und die Sechs-Seen-Platte - deutlich. Die Reichweite des Gewässereinflusses beträgt dabei bis zu 450 m am Rhein und bis zu ca. 250 m an den Stillgewässern (z.B. Sechs-Seen-Platte) und führt dazu, dass der Grad des

physiologischen Stresses im Nahbereich der Wasserflächen um mindestens eine Stufe abgesenkt wird.

Bei der Bewertung des Freiraums zeigt sich für die Waldflächen im Vergleich zu den Acker- und Wiesenflächen eine relativ geringe Wärmebelastung, die als leichter bis moderater Hitzestress definiert wird. Somit ist das thermische Empfinden in den Waldflächen als leicht warm bis warm zu bezeichnen. Bei Betrachtung der Simulationsergebnisse fällt ebenfalls auf, dass die kühlende Wirkung der Waldflächen das thermische Empfinden überwiegend lokal beeinflusst und keinen Einfluss auf das thermische Empfinden in den angrenzenden Siedlungen ausübt.

Insgesamt wird deutlich, dass tagsüber die thermische Belastung am stärksten durch größere Wald- und Wasserflächen reduziert wird. Im Gegensatz zu weiteren Vegetationsformen weisen Waldflächen die höchste Verdunstungsaktivität auf. Die Verbesserung der human-biometeorologischen Situation kann in der Stadt aber ebenso durch Wasserflächen erreicht werden. Hierbei sorgen geringe Windgeschwindigkeiten für den Transport des Wassers in die nähere Umgebung, so dass eine Kühlungswirkung über die Wasserfläche hinaus entsteht (KUTTLER, W. et al. 2012).

Karte 3.4: Physiologische Äquivalenttemperatur (PET) im Stadtgebiet von Duisburg.



3.3 Gesamtbewertung der Wärmebelastung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Wärmebelastung während der Nachtstunden anhand der nächtlichen Lufttemperaturen (Kapitel 3.1) sowie die Hitzebelastung während der Tagstunden mittels Darstellung der physiologischen Äquivalenttemperatur (PET; Kapitel 3.2) für das Stadtgebiet räumlich dargestellt und erläutert.

Beim Vergleich der Ergebnisse für die Tag- und die Nachtsituation fällt auf, dass innerhalb des Stadtgebietes Bereiche existieren, die entweder nur während einer Tageshälfte oder ganztägig hohe bzw. moderate oder niedrige bioklimatische Belastungssituationen aufweisen. Die Wärmebelastung kann in Abhängigkeit von der Flächennutzung und dem Einfluss ihrer Umgebung also entweder am Tage bzw. in der Nacht oder während des gesamten Tagesverlaufs auftreten. Um die bioklimatischen Bedingungen im Stadtgebiet für einen gesamten Tagesverlauf im Mittel beurteilen zu können, reichen die Darstellungen in den vorangegangenen Kapiteln daher nicht aus.

Aus diesem Grund wurde im nächsten Schritt eine Gesamtbetrachtung der Wärmebelastung, die sich aus den gemittelten Ergebnissen für die Tag- und Nachtstunden ergibt, vorgenommen. Ziel war dabei, eine qualitative Einordnung der Wärmebelastung für einen gesamten Tagesverlauf vorzunehmen und räumlich darzustellen.

Um die simulierten FITNAH-Ergebnisse für die Physiologische Äquivalenttemperatur und die nächtlichen Temperaturen qualitativ einzuordnen, wurden im Falle der PET-Werte die Klassifizierung nach Matzarakis und Meyer (1996) sowie nach Held und Krüger (2011) und im Falle der nächtlichen Lufttemperaturen die Methodik der Klimaanalyse für NRW (LANUV 2021) herangezogen.

Die Ergebnisse der qualitativen Einordnung sind den

Tabelle 3-2 und 3-3 zu entnehmen. Zur besseren Vergleichbarkeit der bioklimatischen Wärmebelastung während der Tag- und Nachtstunden wurde jeweils eine Spalte „PET-Klasse“ und „Temperatur-Klasse“ ergänzt. Im letzten Schritt wurden beide Bewertungsklassen gemittelt, woraus sich insgesamt acht neue Wärmebelastungs-Klassen ergeben (s. Tabelle 3-4).

Tabelle 3-2: PET-Klassen, verändert nach Matzarakis und Mayer (1996) und Held und Krüger (2011)

| PET (°C) | Qualitative Einordnung PET | PET-Klasse |
|----------|----------------------------|------------|
| < = 23* | Kein Hitzestress | 0 |
| >23 - 29 | Leichter Hitzestress | 1 |
| >29 - 35 | Moderater Hitzestress | 2 |
| >35 - 41 | Starker Hitzestress | 3 |
| >41 | Extremer Hitzestress | 4 |

*Werte unterhalb von 18°C traten für den Betrachtungszeitraum der Simulation im Ruhrgebiet nicht auf, so dass im Vergleich zu Tabelle 3 (Kapitel 3.2) eine Klasse entfällt; die Klasseneinteilung wurde zur besseren Vergleichbarkeit mit der nächtlichen Temperatur entsprechend angepasst.

Tabelle 3-3: Temperatur-Klasse, geändert nach LANUV 2021

| Temperatur (°C) | Qualitative Einordnung Temperatur | Temperatur-Klasse |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------|
| ≤ 17 | Keine nächtl. Überwärmung | 0 |
| >17 - 18,5 | Schwache nächtl. Überwärmung | 1 |
| >18,5 - <20 | Mäßige nächtl. Überwärmung | 2 |
| ≥20* | Starke nächtl. Überwärmung | 3 |

*nächtliche Temperaturen über 21,5 °C konnten anhand der FITNAH-Modellierung für das Untersuchungsgebiet der Metropole Ruhr nicht ermittelt werden, so dass keine zusätzliche Temperatur-Klasse „4“ ausgewiesen werden konnte

Tabelle 3-4: Gesamtbewertung der Wärmebelastung, die sich aus der der nächtlichen Temperatur und dem PET-Wert ergibt.

| Wärmebelastungs-Klasse | Qualitative Einordnung gesamt (Tag und Nacht gemittelt) |
|------------------------|--|
| 0 | Keine Wärmebelastung |
| 0,5 | Sehr leichte Wärmebelastung |
| 1 | Leichte Wärmebelastung |
| 1,5 | Leichte bis mäßige Hitzestress |
| 2 | Mäßige Wärmebelastung |

Flächenhafte Ausprägung ausgewählter Klimatelemente

| | |
|-----|-----------------------------------|
| 2,5 | Mäßige bis starke Wärmebelastung |
| 3 | Starke Wärmebelastung |
| 3,5 | Starke bis extreme Wärmebelastung |

Bei der Betrachtung der Bewertungskarte für die Wärmebelastung (Karte 3.5) fallen zahlreiche Flächen auf, die während sommerlicher Hochdruckphasen sowohl während der Tag- als auch während der Nachtstunden eine starke bis extreme Wärmebelastung aufweisen. Hierbei handelt es sich um die großen Gewerbe- und Industrieflächen, die in Duisburg weite Teile des Stadtgebietes einnehmen und vor allem in der Nähe von Rhein und Ruhr konzentriert vorhanden sind. Auch die dicht bebauten Siedlungsbereiche weisen eine ganztägig starke Wärmebelastung auf. Dabei befinden sich vor allem südlich der Ruhr im Bereich des Stadtzentrums sowie in den östlich des Bahnhofs gelegenen Siedlungsräumen die größten zusammenhängenden Flächen mit einer starken Wärmebelastung. Auch in Hamborn, Meiderich/Beek und Rheinhausen existieren zahlreiche dicht bebaute Gebiete mit einer starken Wärmebelastung, die nur teilweise durch Bereiche mit einer mäßigen Wärmebelastung unterbrochen werden. Vor allem in Duisburg-Mitte gehen die stark überwärmten Innenstadtbereiche zum Teil direkt in die Gewerbe- und Industrieflächen über und verstärken und vergrößern somit die innerstädtische Wärmeinsel.

In den kleineren und den locker bebauten Siedlungsbereichen (z.B. in Homberg/Ruhrort/Baerl) hingegen sind die Belastungen eher als mäßig einzustufen, so dass der Übergang in die angrenzenden Freilandflächen – zumindest stellenweise - fließend ist. Dies liegt daran, dass auch im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Flächen vor allem während der Tagstunden starke Wärmebelastungen auftreten können, was insgesamt in einer ungünstigen Bewertung der Wärmebelastung resultiert. Positiv beeinflusst werden die Freiflächen entlang des Rheins, dessen Wasserfläche am Tage zu einer Abkühlung beiträgt, die noch in einer Entfernung von bis zu 1000 m wirksam ist und zum Abbau von Belastungen führen kann (Beispiel Mündelheim).

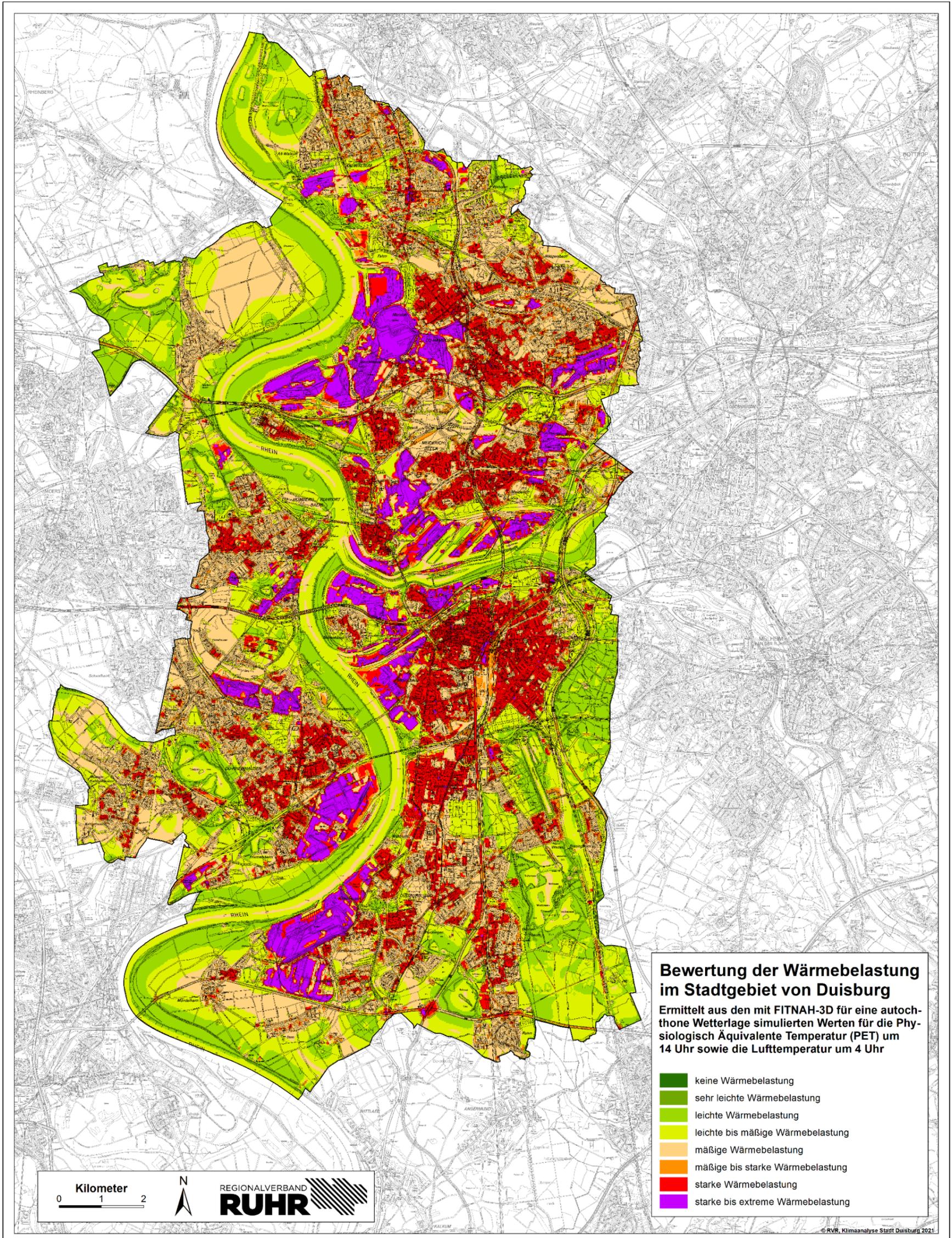
Hingegen sind die größeren Waldgebiete meist durch eine nur leichte (in einzelnen kleineren Abschnitten sogar durch eine nur sehr leichte) Wärmebelastung gekennzeichnet. Trotz dieser geringen Belastungssituation in den Waldgebieten ist kaum eine Abmilderung der Wärmebelastung im direkt angrenzenden, bebauten Umfeld festzustellen. Dies bedeutet, dass die Wälder keine anhand der Auswertung nachweisbare Fernwirkung – zumindest bei Betrachtung der gemittelten Werte für die Tag- und die Nachtsituation – aufweisen.

Ferner sind auch die Wasserflächen durch insgesamt deutlich geringere Wärmebelastungen charakterisiert. Im Vergleich zu den Wäldern ist hier der kühlende Einfluss am Tage jedoch bis in die angrenzenden Freiräume nachweisbar (siehe oben). In den direkt an den Wasserkörper angrenzenden Siedlungen ist dieser Einfluss hingegen nicht nachweisbar. Im Gegenteil kann hier am Beispiel von Alt-Homburg nachgewiesen werden, dass ein abrupter Übergang von Bereichen mit einer leichten bis mäßigen Wärmebelastung (Wasserkörper des Rheins) in die direkt angrenzenden Siedlungsgebiete und Gewerbeflächen mit einer starken bzw. starken bis extremen Wärmebelastung erfolgt. Stellenweise beeinflusst sogar die starke Überwärmung von Gewerbeflächen, wie am Beispiel des Gewerbegebietes in Essenberg ersichtlich wird, die Belastungssituation auf dem Wasserkörper des Rheins. Aufgrund der starken Überwärmung des Gewerbegebietes erfolgt hier eine Verschlechterung der Wärmebelastung um eine halbe Klasse (von leicht bis mäßig hin zu mäßig).

Günstigere Bedingungen können hingegen in größeren innerstädtischen Park- und Grünanlagen mit einem leichten bis mäßigen bzw. leichten Hitzestress (z.B. Grün- und Freiflächen im Bereich des Landschaftsparks Duisburg-Nord, Sechs-Seen-Platte, Regattabahn und Sportpark Duisburg sowie Rheinaue Walsum) nachgewiesen werden. Aber auch kleine Grünflächen innerhalb der dichtesten Bebauung können – zumindest lokal begrenzt – deutlich reduzierte Wärmebelastungen aufweisen (z.B. Grünanlage an der Bungertstraße/Stadtwerke oder Park am Wilhelm-Lehmbruck-Museum). Da sich die günstigeren mikroklimatischen Verhältnisse auf die Fläche selbst beschränken und keine Fernwirkung nachweisbar ist, werden diese Bereiche als „Klimaoasen“ bezeichnet.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass das Stadtgebiet von Duisburg durch zahlreiche, z.T. sehr große zusammenhängende Flächen mit einer starken Wärmebelastung während sommerlicher Strahlungswetterlagen gekennzeichnet ist und den Freiland-, Wald- und Grünflächen eine wichtige Bedeutung als Ausgleichsflächen zugesprochen werden kann. Auch der Rhein, der das gesamte Stadtgebiet in Nord-Süd-Richtung quert, trägt noch weit in die angrenzenden Freiflächen zu einer Verbesserung der bioklimatischen Verhältnisse bei.

Karte 3.5: Bewertung der Wärmebelastung im Stadtgebiet von Duisburg.



3.4 Autochthones Windfeld

Während allochthoner, also austauschstarker, Wetterlagen zeichnet sich das städtische Windfeld im Allgemeinen insbesondere aufgrund des erhöhten aerodynamischen Widerstands der Bebauung gegenüber dem flachen Umland durch eine im Mittel geringere Windgeschwindigkeit sowie eine höhere Anzahl an Schwachwindstunden und Windstillen (Calmen) aus. Allerdings können bedingt durch thermische Turbulenzen oder infolge einer Kanalisierung in Straßenschluchten (Düseneffekt) und Umlenkungseffekten an Gebäudekanten lokal erhöhte Windgeschwindigkeiten und Böigkeit auftreten (Hupfer u. Kuttler 2006).

Bei sommerlicher autochthoner Strahlungswetterlage und somit nur sehr schwachem übergeordnetem Windfeld kann die in Kapitel 3.1 beschriebene bodennahe Lufttemperaturverteilung bzw. können die dadurch bedingten horizontalen und vertikalen Luftdruckunterschiede lokale thermische Windsysteme auslösen. Die wichtigsten nächtlichen Luftströmungen dieser Art sind zum einen die gravitationsbedingten Berg- und Hangabwinde, zum anderen die als direkte Ausgleichsströmungen vom hohen zum tiefen Luftdruck aufzufassenden Flurwinde.

Bereits ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen Oberflächen abwärts gerichtete Strömungen ein. Da hangnahe Luftmassen durch die nächtliche Ausstrahlung der Oberflächen stärker abkühlen als die freie Luft in gleicher Höhe und somit eine höhere Dichte aufweisen, fließt die kühlere bodennahe Luft hangabwärts. Die Ausprägung dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt (Mosimann et al. 1999).

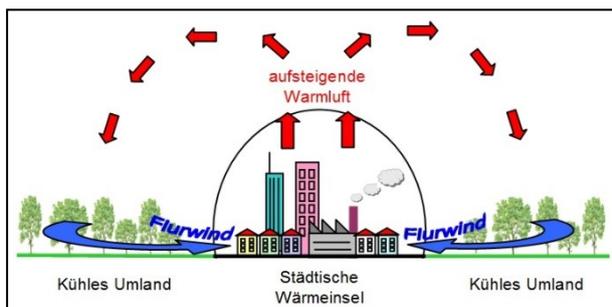


Abb. 3-1: Prinzip des Flurwindes

Neben diesen durch das Relief beeinflussten Strömungen bilden sich in ebenen Lagen unter günstigen Bedingungen sogenannte Flurwinde aus. Flurwinde entstehen, wenn sich infolge der Überwärmung von überbauten oder versiegelten Gebieten – und dem damit verbundenen konvektiven Aufstieg der betroffenen Luftmassen – gegenüber dem Umland ein lokales thermisches Tief im städtischen Bereich entwickelt. Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (vgl. Abb. 3-1). Flurwinde sind oftmals nur schwach ausgeprägt, lediglich wenige Meter mächtig und dringen im Idealfall radial in die Stadt ein (Hupfer u. Kuttler 2006).

Hangab- und Flurwinden kommt eine besondere stadtplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshinder-

nisse. Aus diesem Grund sind die Durchlüftung der Stadtkörper und der Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauscharmen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Karte 3-6 zeigt das bodennahe (2 m ü. Grund) autochthone Windfeld im Stadtgebiet von Duisburg für eine sommerliche Strahlungswetterlage zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens. Die Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des Stadtgebietes reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von knapp 1,3 m/s, was aus der unterschiedlichen Reliefenergie des Untersuchungsgebietes sowie einer heterogenen Verteilung von Frei- und Siedlungsflächen resultiert. Windgeschwindigkeiten von mehr als 1,0 m/s treten nur sehr vereinzelt im Osten der Regattabahn auf.

Aufgrund der insgesamt geringen Reliefenergie im Stadtgebiet von Duisburg sind auftretende Kaltluftabflüsse für die Belüftung der Siedlungsbereiche überwiegend von untergeordneter Bedeutung. Erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten konnten lediglich im östlichen Stadtrandbereich simuliert werden, wo aus hochgelegenen Kuppenlagen innerhalb des Duisburger Stadtwalds Kaltluftmassen in westliche und nordöstliche Richtungen über das Gelände der Universität Duisburg-Essen bis zur Lotharstraße bzw. bis nach Mülheim abfließen können.

Im Rahmen einer Messkampagne des RVR (RVR 2010) konnte im Gegensatz zur Simulation gezeigt werden, dass die Kaltluft im Bereich der tief eingeschnittenen A3 zum Erliegen kommt und nicht bis in die Bebauung vordringen kann. Dies liegt darin begründet, dass die tief liegende Autobahn zunächst mit Kaltluft gefüllt werden muss, bis diese die Autobahnböschung überwinden kann. Beim Vergleich der Untersuchungen ist zu berücksichtigen, dass die Bedingungen (Witterungsbedingungen, Kaltluftbildungspotenzial) in beiden Fällen (Modellierung und Messung) nicht gänzlich vergleichbar waren. Hinzu kommt, dass die Untersuchungen zur Kaltluftdynamik zu unterschiedlichen Tageszeitpunkten stattgefunden haben. So wurde im Rahmen der Messkampagne zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt gemessen, als der Autobahneinschnitt vermutlich noch nicht mit Kaltluft gefüllt war, während sich die Simulation auf die nächtliche Zeit 4:00 Uhr bezieht. Zu diesem Zeitpunkt ist die Zufuhr von Kaltluft aus den Waldgebieten trotz des Hindernisses durch die Autobahn wesentlich wahrscheinlicher. Gleichzeitig wird aber deutlich, dass die Simulationsergebnisse keine Aussage zu früheren oder späteren Zeitpunkten ermöglichen. Im Falle der aus den östlichen

Waldgebieten abfließenden Kaltluftmassen ist daher davon auszugehen, dass Siedlungsbereiche erst relativ spät in der Nacht von der Kaltluftzufuhr profitieren und sich deren Wirksamkeit dadurch relativiert.

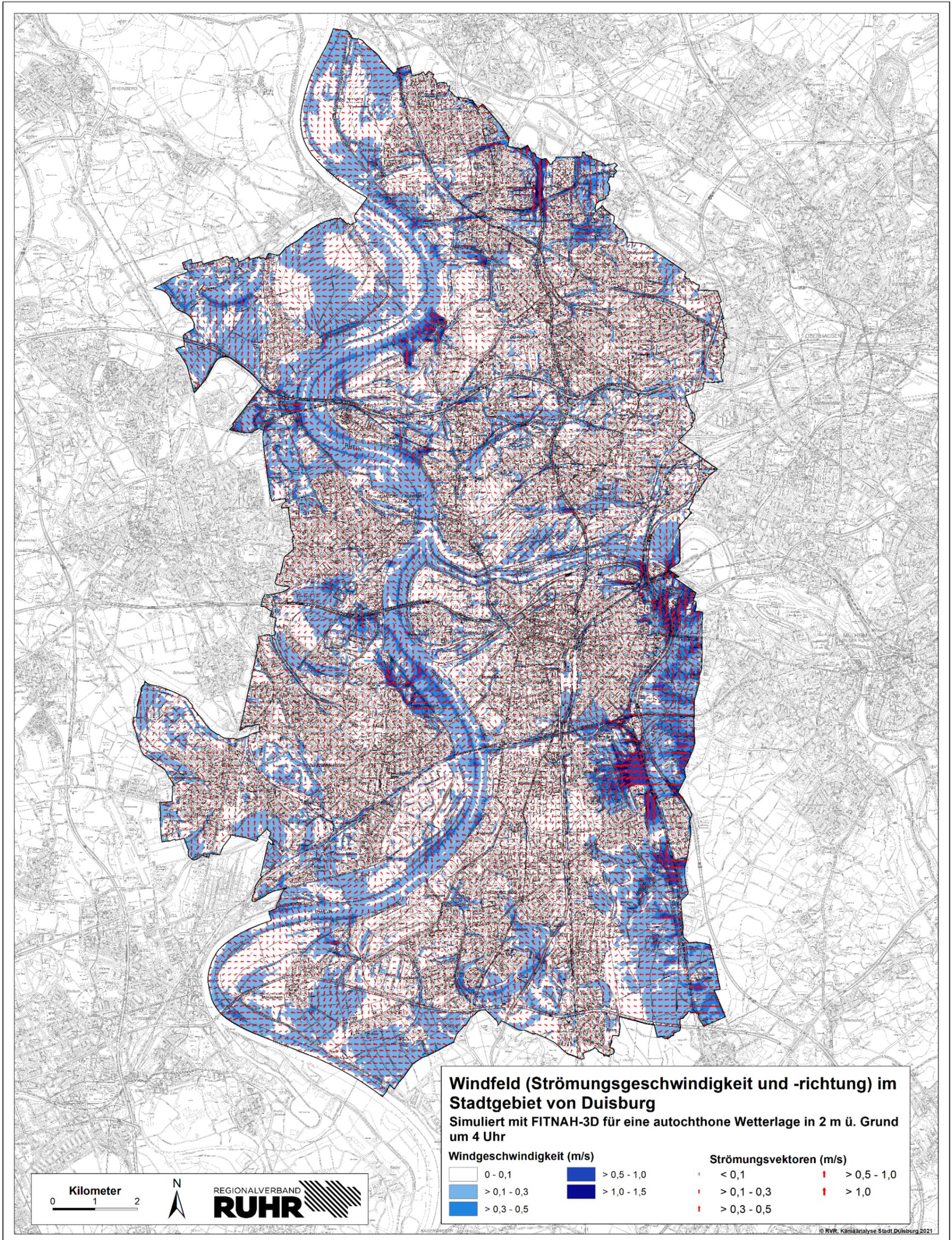
In den unbebauten bzw. schwach besiedelten Bereichen der Stadt Duisburg treten stärkere Strömungsgeschwindigkeiten bis maximal 1,0 m/s auf (z.B. in Baerl sowie im Süden des Stadtgebietes). Insbesondere in erhöhten Lagen – wie z.B. am Alsumer Berg und in den Kuppenlagen in Hochemmerich, treten reliefbedingte Kaltluftabflüsse vor allem in westliche und östliche Richtungen auf.

In weiten Teilen der Siedlungsräume, die sich durch geringe Reliefunterschiede auszeichnen, lassen sich Strömungsgeschwindigkeiten unter 0,1 m/s feststellen. Der Rhein in Duisburg fungiert bei entsprechenden übergeordneten Windrichtungen als Luftleitbahn. Es zeigt sich aber gleichzeitig, dass bei autochthonen Wetterlagen nächtliche Kaltluftmassen aus dem unbebauten Umland in Richtung des Rheins fließen, in der Mitte des Gewässers aufeinandertreffen und von dort in nördliche oder südliche Richtungen weiterfließen.

In größeren Grünzügen sind die Strömungsgeschwindigkeiten insgesamt sehr niedrig, mit vereinzelt über 0,5 m/s dennoch gegenüber den Siedlungsflächen leicht erhöht. Hierbei sind vor allem die Grünflächen zwischen Mühlenkampstraße und Düppelstraße in Meiderich/Beeck, die entlang der Alten Emscher verlaufen, die Freilandflächen des Umschlagbahnhofs Duisburg-Ruhrort/Hafen sowie die angrenzenden Grün- und Parkanlagen und der Freizeitpark Mattlerbusch zu nennen. Der östliche Bereich des Freizeitparks Mattlerbusch liegt leicht erhöht, so dass reliefbedingte Kaltluftabflüsse in westliche Richtungen erfolgen können. Da das Relief nur schwach ausgeprägt ist und es sich um allgemein geringe Fließgeschwindigkeiten handelt, ist die Reichweite der Kaltluft in die angrenzende Bebauung hinein jedoch sehr gering, was anhand der zusätzlichen Windgeschwindigkeitsreduktion und der Richtungsänderungen der fließenden Luftmassen innerhalb der Bebauung ersichtlich wird.

Aufgrund der größtenteils nur sehr geringen Windgeschwindigkeiten in der Duisburger Innenstadt und weiten Teilen der übrigen Bebauung von unter 0,1 m/s kommt den Luftaustauschbereichen eine besondere stadtplanerische Bedeutung zu, da sie Kaltluftentstehungsgebiete und Belastungsbereiche miteinander verbinden. Als geeignete Oberflächenstrukturen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe sowie Gleisareale und breite Straßenräume.

Karte 3.6: Autochthones Windfeld (2 m ü. Grund) im Stadtgebiet von Duisburg um 4 Uhr



3.5 Kaltluftproduktionsrate

Neben der Geschwindigkeit und der Mächtigkeit von Kaltluftmassen stellt die Kaltluftproduktivität einer Fläche eine wichtige Größe dar. Die Kaltluftproduktionsrate beschreibt die Menge der sich innerhalb einer Stunde pro Quadratmeter relativ zu ihrer Umgebung abkühlenden Luft über einer Fläche. Einige landnutzungstypische Charakteristika der Kaltluftentstehung wurden bereits in den vorangestellten Kapiteln erläutert. Im Allgemeinen hängt die Rate der Kaltluftentstehung über einer Freifläche von meteorologischen Größen (v.a. der Einstrahlung), dem Relief (Exposition, Geländeneigung) sowie von der Lage des betreffenden Kaltluftentstehungsgebietes im thermisch differenzierten Mosaik angrenzender Flächen ab. Entscheidend sind allerdings die Eigenschaften des Untergrunds, wie etwa die thermischen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und –kapazität), die Farbe der Oberfläche, die Dichte des Bodensubstrates, der Luft- und Wassergehalt, das Porenvolumen sowie die Bodenbedeckung (Vegetation) (Hupfer u. Kuttler 2006).

Die Bestimmung der Kaltluftproduktionsrate kann mit Ungenauigkeiten behaftet sein, was sowohl für die modellhafte Berechnung als auch für Geländemessungen gilt. Für die Modellierung größerer Untersuchungsgebiete liegen i.d.R. nicht alle relevanten, zum Teil sehr heterogenen Variablen vor oder können aus den Eingangsdaten in hinreichender Differenziertheit parametrisiert werden. Daher ist bei der Angabe von Kaltluftproduktionsraten mit entsprechenden Unsicherheiten zu rechnen (VDI 2003).

Die Ergebnisse der FITNAH-Analyse umfassen für das Stadtgebiet von Duisburg ein Wertespektrum von 0 bis $> 35 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. Der Beitrag innerstädtischer Grünanlagen und –vernetzungsstrukturen zum nächtlichen Kaltfluthaushalt im Stadtgebiet wird in Karte 3-7 vielerorts ersichtlich. Dabei fällt auf, dass die Kaltluftproduktionsraten der Grün- und Waldflächen in Hanglage tendenziell höher ausfallen, was auf das stark ausgeprägte Relief in diesen Bereichen zurückzuführen ist (z.B. im Bereich der Halden und im Duisburger Stadtwald).

Bei aufgelockerter und durchgrünter Bauweise kann auch den bebauten Bereichen in Duisburg eine geringe Kaltluftproduktion zugesprochen werden, die zumeist in einem Wertebereich zwischen 5 und $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ liegt. Bei einem sehr hohen Grünflächenanteil und einer gleichzeitigen Hanglage können vereinzelt auch höhere Kaltluftproduktionsraten innerhalb der Siedlungsbereiche festgestellt werden. Dies ist beispielsweise in Teilbereichen der Bebauung von Duissern (Kaiserberg) der Fall.

Ebenfalls hohe Werte sind in den Hangbereichen einzelner Halden (z.B. der Alsumer Berg und die Halden in Hochemmerich und in Hochheide) zu verzeichnen.

Über einigen innerstädtischen Grünzügen (z.B. Grünzug südlich der A 42 und Grünflächen in Meiderich im Umfeld des Umschlagbahnhofs Duisburg-Ruhrort/Hafen) werden Kaltluftproduktionsraten von 10 bis über 20 m³/m²/h erreicht.

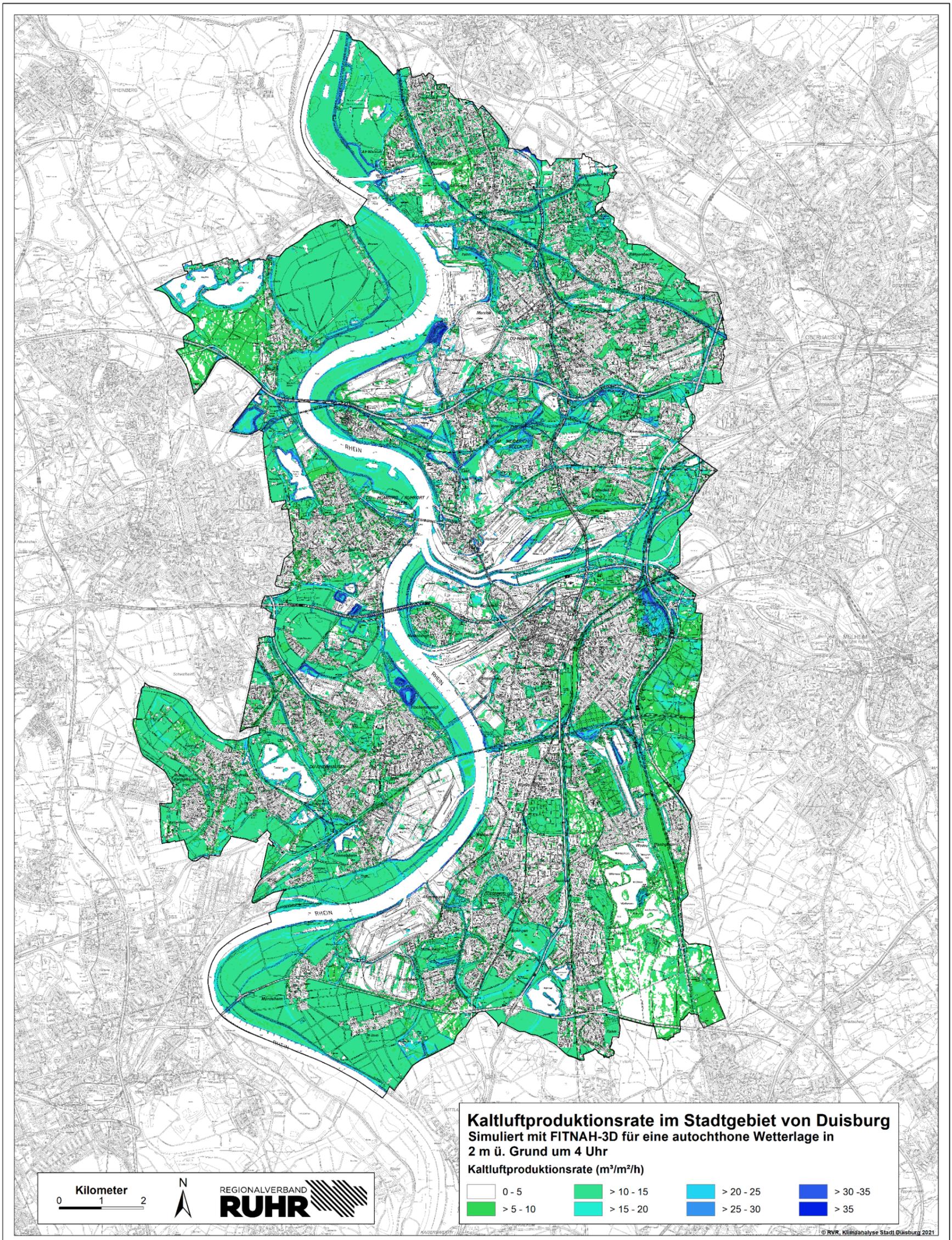
Über landwirtschaftlichen Flächen und Frei- bzw. Brachflächen können 10 bis 15 m³/m²/h an Kaltluft produziert werden.

Wasserflächen sorgen aufgrund ihrer thermischen Trägheit zwar tagsüber für vergleichsweise kühlere Umgebungstemperaturen, dienen nachts allerdings nicht als Kaltluftproduzenten. Im Gegenteil: Wasserkörper können aufgrund ihrer höheren Wärmekapazität auf das thermische Verhalten überströmender Kaltluft einwirken und zu einer Erwärmung beitragen (Hupfer u. Kuttler 2006). Dies zeigt sich sehr eindrucksvoll an Rhein und Ruhr und begünstigt den im nachfolgendem Kapitel beschriebenen Effekt des Flurwindsystems.

Auch die stark verdichteten Siedlungsbereiche im Zentrum sowie den Nebenzentren des Duisburger Stadtgebietes und die ebenfalls hoch versiegelten Gewerbe- und Industriebereiche verfügen über keine nennenswerte Kaltluftproduktivität. In diesen Bereichen treten Grün- und Parkanlagen, aber auch industrielle Brachflächen besonders hervor. Während beispielsweise in weiten Teilen der Innenstadtbebauung vernachlässigbare Werte kleiner 5 m³/m²/h modelliert wurden, weist die Grünfläche am Wilhelm-Lehmbruck-Museum Kaltluftproduktionsraten bis knapp 13 m³/m²/h auf und dient somit als lokaler Kaltluftproduzent innerhalb der hochverdichteten Innenstadt.

Die Höhe der Kaltluftproduktionsrate allein ist jedoch nicht ausreichend, um das Kaltluftgeschehen und insbesondere dessen Relevanz für bestehende Siedlungsstrukturen sowie im Rahmen von Planverfahren einer neuen Bebauung abzuschätzen oder zu bewerten. Daher wird im folgenden Kapitel mit dem Kaltluftvolumenstrom eine weitere relevante Größe des Kaltluftthaushalts dargestellt und erläutert

Karte 3.7: Kaltluftproduktionsrate im Stadtgebiet von Duisburg um 4 Uhr



3.6 Kaltluftvolumenstrom

Die potenzielle Ausgleichsleistung einer Grün- bzw. Freifläche bezüglich der Wärme- und Schadstoffbelastungen in Siedlungsbereichen ist nicht allein von der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung (autochthones Windfeld) abhängig, sondern wird zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht) mitbestimmt. Daher wird zur Bewertung der Grün- und Freiflächen auch der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Unter diesem Begriff versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Luftleitbahn fließt. Der Volumenstrom ist damit ein Maß für den Zustrom von Kaltluft und bestimmt, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Größenordnung des Durchlüftungspotenzials.

Karte 3-8 zeigt die flächenhafte Verteilung des Kaltluftvolumenstroms im Stadtgebiet von Duisburg um 4 Uhr morgens. Die Klassifizierung des Volumenstroms orientiert sich dabei am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Untersuchungsgebietes. Analog zur Strömungsgeschwindigkeit treten die höchsten Werte in den Hangbereichen des Duisburger Stadtwalds auf. Dabei sind Werte bis knapp $30 \text{ m}^2/\text{m/s}$ vor allem östlich der Regattabahn nachzuweisen.

Darüber hinaus treten relativ hohe Werte im Bereich der Freiflächen entlang des Rheins, im Baerler Busch, in den südlichen Freilandbereichen sowie im Umfeld der AS Duisburg-Walsum der A 59 auf. Hervorzuheben sind diesbezüglich auch die Bahntrassen (z.B. von Freimersheim über Rheinhausen-Mitte bis zum Duisburger Stadtwald, die Bahntrasse im Umfeld des Hauptbahnhofs sowie im weiteren nördlichen Verlauf und die Bahntrassen in Meiderich).

Anhand der Strömungsvektoren im Bereich des Duisburger Stadtwalds wird zudem die Reliefabhängigkeit der bodennah abfließenden Kaltluftmassen deutlich. Es zeigt sich, dass die lokal gebildeten Kaltluftmassen aus dem Waldgebiet reliefbedingt in Richtung Regattabahn bzw. die Siedlung von Neudorf und ein großer Anteil auch in Richtung Norden bzw. Nordosten abfließen. Anhand der Strömungsrichtung wird weiterhin deutlich, dass eine Anbindung der Kaltluftströme an die hochverdichtete Innenstadt nicht gegeben ist und die Kaltluftmassen maximal bis zum Sternbuschweg nachgewiesen werden können.

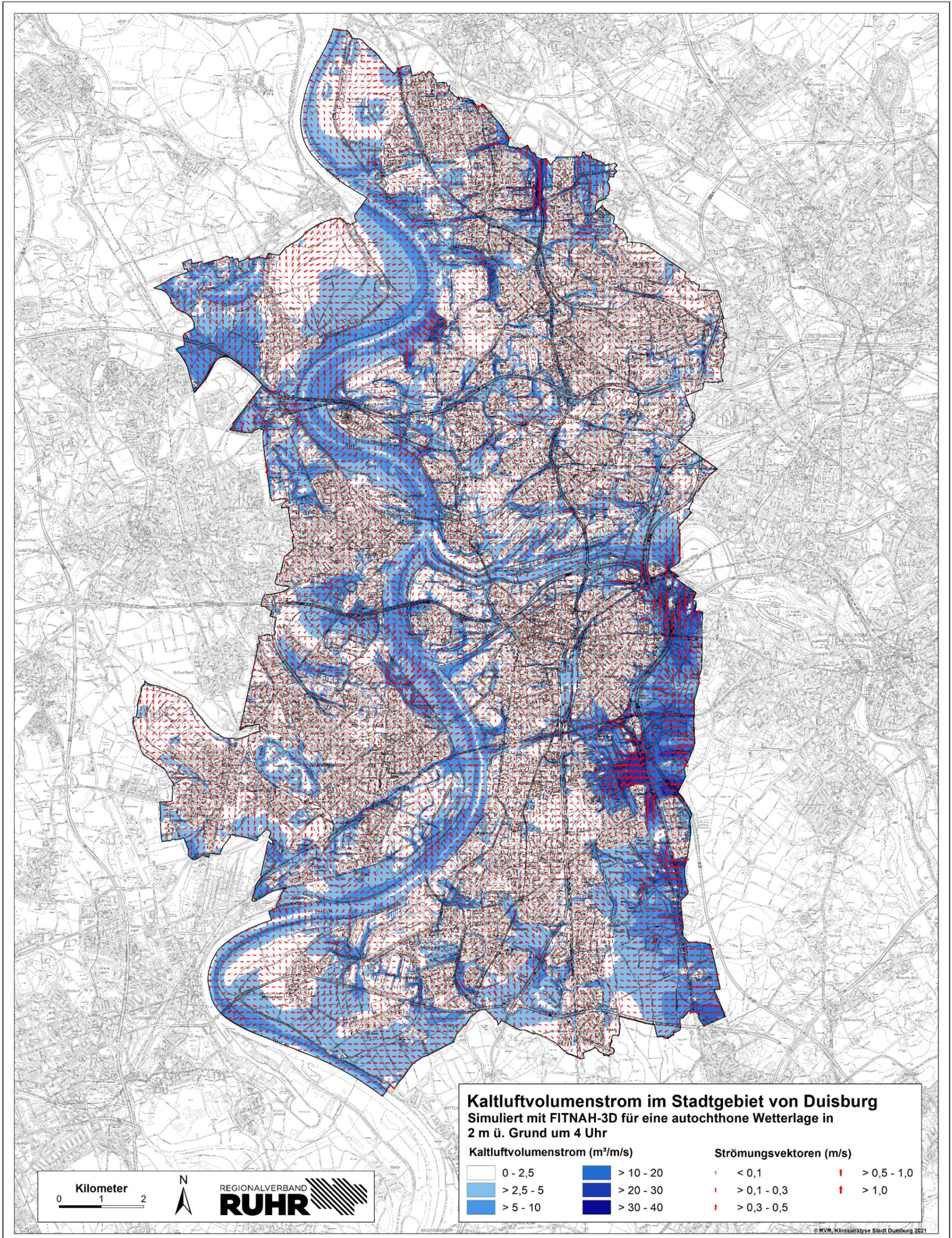
Im Bereich des großen Wasserkörpers des Rheins, der das Stadtgebiet von Süden nach Norden durchfließt, wird hingegen anhand der Strömungsvektoren die Entstehung von Flurwinden deutlich. Aufgrund der relativ hohen nächtlichen Wassertemperaturen steigen über dem Rhein in den Nachtstunden warme Luftmassen auf, wodurch Luftdruckgegensätze zum unbebauten, kühleren Niederungsbereich bzw. den angrenzenden Frei- und Grünflächen

entstehen. Dementsprechend fließen die kühleren Luftmassen aus dem Umfeld des Wasserkörpers in Richtung Rhein und treffen dort zusammen. Dieses Phänomen des Flurwinds kann fast auf der gesamten Fließlänge des Rheins in Duisburg beobachtet werden und wird zusätzlich durch das Relief unterstützt.

In vielen Bereichen des Stadtgebietes wird die Bedeutung innerstädtischer Grünflächen und insbesondere deren Vernetzung für die Belüftungsverhältnisse im urbanen Raum deutlich. Aufgrund der geringeren Größe der kaltluftproduzierenden Flächen sowie der geringeren Reliefenergie werden über den Grünflächen(vernetzungen) im Zentrum und Norden des Stadtgebietes allerdings geringere maximale Werte des Kaltluftvolumenstroms im Bereich von meist unter $10 \text{ m}^3/\text{m/s}$ oder weniger erreicht.

Für weite Teile der Siedlungsstrukturen von Duisburg wurden lediglich geringe Kaltluftvolumenströme von kleiner $5 \text{ m}^3/\text{m/s}$ simuliert. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebaute Gebiete hängt wesentlich von der Siedlungsgröße, der Bebauungsdichte, der Gebäudeausrichtung, der anthropogenen Wärmefreisetzung (die zu einer Erwärmung der eindringenden kühlen Luftmassen führt) sowie von der Menge und Geschwindigkeit der einströmenden Kaltluft ab. Letzteres ist wiederum von der Größe der kaltluftproduzierenden Flächen, der Kaltluftproduktivität dieser Flächen sowie der Reliefausprägung abhängig. Grundsätzlich gilt, dass vergleichsweise aufgelockerte Bebauungsstrukturen mit direkter Anbindung an größere Frei- bzw. Waldflächen und vernetzten innerstädtischen Grünflächen, in austauscharmen Strahlungsnächten eine bessere Versorgung mit Kaltluft erfahren können, während hochverdichtete Strukturen mit geringem Grünflächenanteil und fehlender Vernetzung mit dem unbebauten Umland eine fehlende Kaltluftversorgung und damit stärkere nächtliche Überwärmungen aufweisen. Die Eindringtiefe der verschiedenen Kaltluftdynamiken in die Siedlungsbereiche im Duisburger Stadtgebiet wird in Kapitel 4 anhand der Karte der klimaökologischen Funktionen noch näher beschrieben.

Karte 3.8: Kaltluftvolumenstrom im Stadtgebiet von Duisburg um 4 Uhr



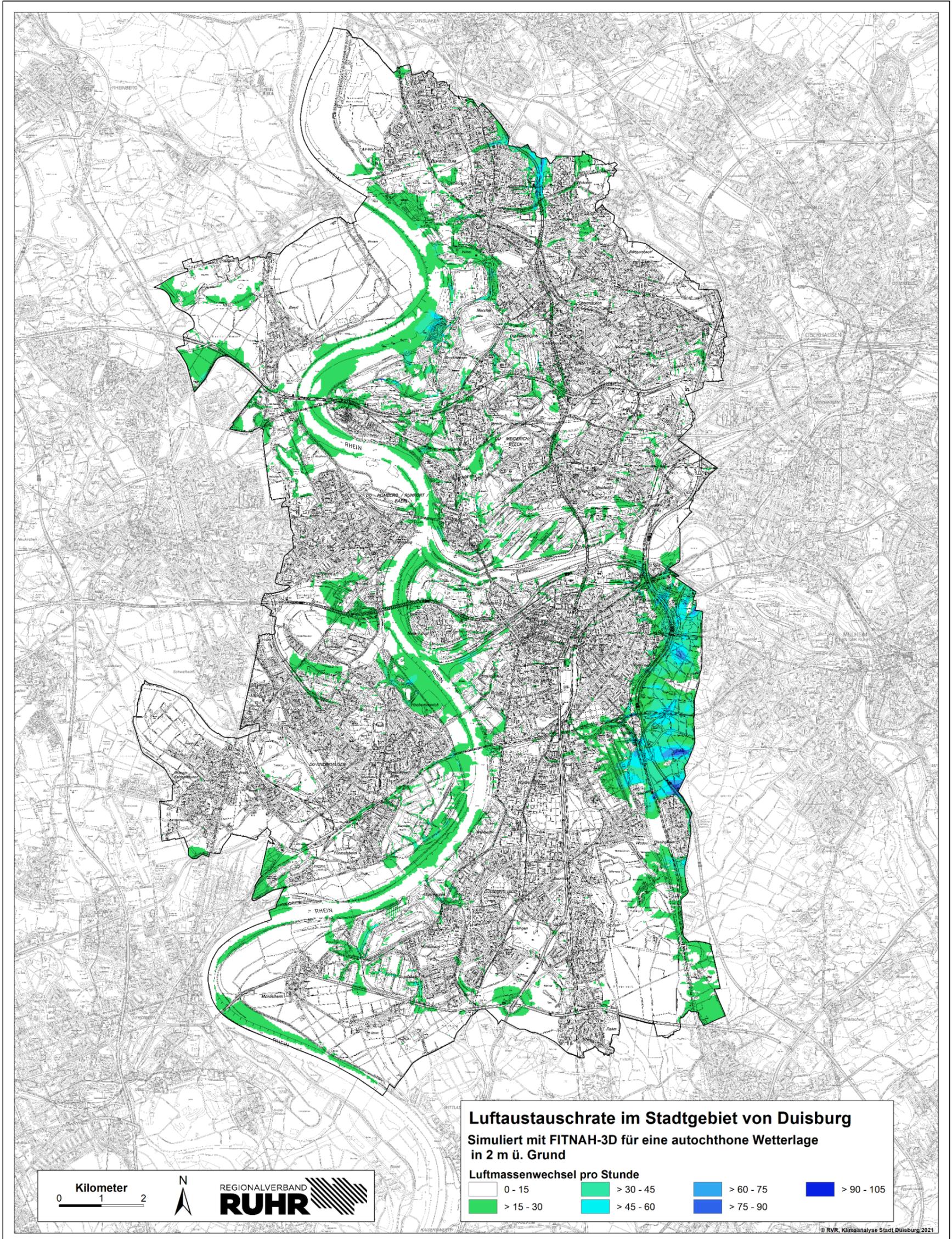
3.7 Luftaustauschrate

Die Luftaustauschrate ist eine Kennzahl für die Häufigkeit der vollständigen Erneuerung eines Luftvolumens an einem Standort. In urbanen Bereichen ist diese von Bedeutung, da ein Zusammenhang zwischen der Luftaustauschrate und der lufthygienischen Situation sowie der thermischen Belastung besteht. Sie wird abgeleitet aus der berechneten, dreidimensionalen Struktur und der zeitlichen Entwicklung des Windfeldes. Die Luftaustauschrate gibt an, wie oft pro (Nacht-) Stunde das bodennahe Luftvolumen (bis 30 m Höhe) in jeder Rasterzelle ausgetauscht wird.

Das Wertespektrum der Luftaustauschrate im Stadtgebiet von Duisburg reicht von 0 bis knapp 90-mal. Werte von über 90 werden allerdings ausschließlich in einigen sehr kleinen Bereichen des Duisburger Stadtwalds modelliert.

Zudem wird deutlich, dass weite Bereiche der Wohn- und Gewerbegebiete im Stadtgebiet von Duisburg aufgrund der abbremsenden Wirkung der Oberflächenstrukturen überwiegend geringe Werte der Luftaustauschrate von unter 15-mal pro Stunde aufweisen. Entlang des Rheins und in einzelnen innerstädtischen Grünflächen ist die Luftaustauschrate etwas höher, liegt aber mit maximal 22-mal pro Stunde immer noch auf relativ niedrigem Niveau.

Karte 3.9: Luftaustauschrate um 4 Uhr im Stadtgebiet von Duisburg bei allochthoner Wetterlage



4 Karte der klimaökologischen Funktionen

Neben der Klimaanalysekarte (siehe Kapitel 5), die eine klimatische Einordnung aller Nutzungsstrukturen darstellt, liefert die Karte der klimaökologischen Funktionen eine weitere wichtige Grundlage für die Flächenbewertung. Im Unterschied zur Klimaanalysekarte liegt der Schwerpunkt der Darstellung in der Einstufung der klimaökologischen Funktionen der unbebauten Freiräume. Diese Einstufung basiert auf den in Kapitel 3 vorgestellten Ergebnissen der FITNAH-Modellierung. Im Folgenden werden zunächst die Darstellungsebenen der klimaökologischen Funktionen erläutert, bevor eine Gliederung des Duisburger Stadtgebietes erfolgt.

4.1. Darstellungsebenen der Karte der klimaökologischen Funktionen

Die Karte der klimaökologischen Funktionen (siehe Karte 4-1) umfasst drei Darstellungsebenen. Zunächst werden die bebauten Bereiche anhand der FITNAH-Nutzungsklassen dargestellt. Des Weiteren werden die Freiräume insgesamt hinsichtlich ihres potenziellen Kaltluftliefervermögens bewertet, Bereiche mit einer hohen Kaltluftproduktionsrate gesondert ausgewiesen und die Eindringtiefe der Kaltluft in die Bebauung beschrieben. Zudem erfolgt eine Darstellung der Luftaustauschbeziehungen im Stadtgebiet von Duisburg, differenziert in Frischluftzufuhrbereiche sowie reliefbedingte Kaltluftabflüsse und nutzungsbedingte Ausgleichsströmungen (Flurwinde).

4.1.1 Bebaute Bereiche (FITNAH-Nutzungsklassen)

In der Karte der klimaökologischen Funktionen werden die Siedlungsbereiche unter Berücksichtigung der Nutzungsklassen ausgewiesen, die der FITNAH-Modellierung zu Grunde lag. Dargestellt werden daher lediglich die Bereiche, die in die FITNAH-Nutzungsklassen Block- und Blockrandbebauung, Industrie- und Gewerbeflächen, Zeilen- und Hochhausbebauung sowie Einzel- und Reihenhausbebauung eingestuft wurden.

4.1.2 Kaltluft

Die Grundlage zur Einstufung der Grün- und Freiflächen hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens bilden die modellierten Ergebnisse zum Kaltluftvolumenstrom (vgl. Kapitel 3.6). Zur Bewertung des Kaltluftvolumenstroms wurde mangels geeigneter absoluter Schwellen- oder Grenzwerten eine z-Transformation entsprechend der VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 durchgeführt. Dadurch wird eine Bewertung erreicht, die auf dem Gebietsmittelwert der gesamten Metropole Ruhr basiert. Um eine differenziertere Beurteilung zu ermöglichen, wird entgegen der in der Richtlinie vorgegebenen Vorgehensweise die 0,5-fache

Standardabweichung zur Klasseneinteilung herangezogen. Dementsprechend sind positive Abweichungen vom Mittelwert der Metropole Ruhr mit einer hohen Mächtigkeit und negative entsprechend mit einer geringen bis mittleren Mächtigkeit bewertet.

Damit wird gewährleistet, dass eine Vergleichbarkeit von Flächen über die Ebene der stadtweiten Betrachtung hinaus möglich ist und eine einheitliche Bewertung klimaökologisch relevanter Flächen in der gesamten Metropole Ruhr vorgenommen werden kann.

Anhand des Kaltluftvolumenstroms (KVS) lässt sich zudem der Einfluss von Kaltluftmassen, die in Siedlungsräume vordringen, darstellen. In diesen Bereichen, welche durch die Punktsignatur „Kaltlufteinwirkbereich“ gesondert hervorgehoben sind, ergibt sich durch die Zufuhr von kühleren Luftmassen und der damit einhergehenden klimaökologischen Ausgleichsleistung eine Aufwertung der bioklimatischen Belastungssituation für diese Lasträume. Als Kaltlufteinwirkbereich wurden dabei Bereiche definiert, wo der nächtliche Kaltluftvolumenstrom während einer sommerlichen Strahlungswetterlage innerhalb der bebauten FITNAH-Nutzungsklassen größer ist als der mittlere KVS der Siedlungsgebiete im gesamten RVR-Gebiet, welcher bei $2,37 \text{ m}^3/\text{m/s}$ liegt, und/oder die Windgeschwindigkeit innerhalb der Siedlungsbereiche über $0,1 \text{ m/s}$ beträgt. Zusätzlich werden auch Straßen und Gleisanlagen, auf die die angeführten Kriterien hinsichtlich des KVS zutreffen, als Kaltlufteinwirkbereiche dargestellt, um eventuelle Leitfunktionen dieser Verkehrsinfrastrukturen erkennen zu können.

Des Weiteren ermöglicht die Darstellung von Flächen mit einer Kaltluftproduktionsrate (KPR) von mindestens $17,16 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ eine Lokalisierung potenziell besonders klimarelevanter Ausgleichsräume. Aus diesem Grund sind Flächen mit einer hohen Kaltluftproduktionsrate durch eine Schraffur ebenfalls gesondert hervorgehoben. Der Wert von $17,16 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ entspricht dabei der Summe aus dem Mittelwert der Kaltluftproduktionsrate aller Grün-, Freiland- und Waldflächen im RVR-Gebiet und der 0,5-fachen Standardabweichung der KPR dieser Flächen, bezogen auf die mit FITNAH simulierten Kaltluftproduktionsraten zum Zeitpunkt 4 Uhr nachts.

4.1.3 Belüftung

Die Luftaustauschbeziehungen im Stadtgebiet von Duisburg, differenziert in Frischluftzufuhrbereiche sowie Flurwind- und Kaltluftdynamiken, werden in Form von Pfeilsignaturen dargestellt. Bezüglich der Flurwinde und Kaltluftabflüsse erfolgt generell eine bewertende Einteilung anhand der Strömungsgeschwindigkeit in sehr gering (0,3 – 0,5 m/s), gering (0,5 – 1,0 m/s) und mittel – hoch (> 1,0 m/s). Strömungsgeschwindigkeiten unterhalb von 0,3 m/s werden als unbedeutend eingestuft und daher nicht dargestellt.

4.2 Gliederung der Stadt Duisburg anhand der Karte der klimaökologischen Funktionen

Zur Beurteilung der klimaökologischen Ausgleichsfunktion der Freiland- und Waldbereiche sowie der innerstädtischen Grünflächen wurden der Kaltluftvolumenstrom, die Kaltluftproduktionsrate, die Flur- und Kaltluftdynamik (Strömungsrichtung und -geschwindigkeit) sowie der Kaltlufteinwirkungsbereich (Eindringtiefe der Kaltluftmassen in die angrenzende Bebauung) unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.1.2 und 4.1.3 aufgeführten Kriterien herangezogen. Zusätzlich wird die Belüftungssituation während allochthoner Wetterlagen durch Bereiche der Frischluftzufuhr sowie die Bereiche potenzieller Luftleitbahnen dargestellt. Folgende Erkenntnisse und Bewertungen resultieren aus der Karte der klimaökologischen Funktionen:

- Die landwirtschaftlich geprägten Freiflächen entlang des Rheins im Süden und Norden des Stadtgebietes besitzen z.T. eine geringe, in weiten Teilen aber eine mittlere Bedeutung im Hinblick auf den Kaltluftvolumenstrom. Aufgrund der dort vorherrschenden geringen Reliefenergie kann die Kaltluft jedoch kaum in Richtung der Lasträume fließen, so dass die Zufuhr kühlerer Luftmassen aus dem Umland in die Bebauung hinein nur vereinzelt festzustellen ist. Hingegen fließen reliefbedingt Kaltluftmassen zum Rhein ab, da dieser tiefer liegt als das angrenzende Umland. Besonders deutlich wird dieser Effekt im Bereich der Haldenkörper (z.B. Alsumer Berg und die Halden in Hochemmerich). Ein weiteres, bereits in Kapitel 3 beschriebenes Phänomen begünstigt die Zufuhr kühlerer Luftmassen in Richtung des Rheins: der Flurwindeneffekt. Dieser ist an unterschiedlich temperierte Luftmassen gebunden und führt zur Zufuhr kühlerer Luftmassen aus dem unbebauten Umland in Richtung des nächtlich wärmeren Rheins. In der Gewässermitte treffen schließlich die Luftmassen aus den beidseitig des Rheins stammenden Freilandflächen zusammen. In der Regel handelt es sich hierbei um sehr schwache Luftströmungen mit Fließgeschwindigkeiten

unter 0,3 m/s, die in der Karte der klimaökologischen Funktionen jedoch nicht dargestellt werden.

- aus den höchst gelegenen Geländebereichen des Stadtgebietes, die sich im Bereich des Duisburger Stadtwaldes befinden und sich von Bissingheim in nördliche Richtungen bis nach Duissern erstrecken, treten vermehrt Kaltluftabflüsse auf. Dabei fließen die lokal gebildeten Kaltluftmassen dem Relief folgend in unterschiedliche Richtung ab. Ein Teil der Kaltluft fließt in westliche Richtungen bis in die angrenzenden Siedlungsgebiete von Nord-Neudorf ab (teilweise bis zur Gneisenaustraße), wird dort aber aufgrund der Bebauung stark abgebremst und kann somit nur begrenzt zur Kaltluftversorgung des Siedlungsraums beitragen. Zudem müssen die Kaltluftmassen zunächst die tief eingeschnittene Autobahn A 3 überwinden, was jedoch erst möglich ist, sobald der Autobahneinschnitt mit Kaltluft aufgefüllt ist. Vermutlich trifft dies im späteren Verlauf der Nacht ein.
- Auch vom Kaiserberg in Duissern fließen Kaltluftmassen reliefbedingt hangabwärts. Jedoch gelangen die Kaltluftmassen nur zu einem geringen Anteil in die westlich anschließende Bebauung und können somit kaum zur Entlastung beitragen. Überwiegend fließt die Kaltluft in nordöstliche Richtungen ab, wo sie über unbebautes Areal zum Großteil über die Stadtgrenze hinaus bis nach Mülheim weiterfließt. Ein Teil der Kaltluftmassen jedoch wird im Bereich der Meidericher Straße zwischen Straßenverkehrsamt und Hauptfeuerwehr entsprechend dem Verlauf der Bahntrasse in westliche Richtungen abgelenkt und gelangt schließlich in westliche Richtungen weiter bis zum Betriebshof, wo sie ihre Wirkung als Kaltluftlieferant entfalten können.
- Östlich der Regattabahn weisen die Grün- und Brachflächen extrem hohe Kaltluftvolumenströme auf, was sich auch in dem Auftreten der höchsten Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluftmassen ($> 1,0$ m/s) im gesamten Stadtgebiet ausdrückt. Die lokal produzierten Kaltluftmassen fließen in Richtung der westlich angrenzenden Bebauung ab, wo sie bis zum Dicksbach, einschließlich der Sana-Kliniken Duisburg und der Sonnenschule, eine gute Kaltluftversorgung bewirken. Auch die Siedlungen südlich des Kiefernwegs profitieren bis etwa zur Wedauer Straße von der Kaltluftzufuhr, ebenso wie die Siedlung östlich der Bissingheimer Straße bis zur Duisburger Stadtgrenze. Dabei wird der Siedlungsraum von Bissingheim fast vollständig von Kaltluft durchströmt, wobei die Kaltluftmassen einerseits aus den nördlich gelegenen Waldgebieten abfließen und im Bereich der Wedauer Brücke in südliche bis teilweise südöstliche Richtungen umgelenkt werden, andererseits entstammen sie aus den Freilandflächen südlich des Siedlungsbereichs. Von dort

strömen die Kaltluftmassen zunächst in westliche Richtungen, werden dann aber z.T. in nördliche Richtungen umgelenkt. Somit werden die Siedlungen von Wedau und Bissingheim während sommerlicher Strahlungstage überwiegend gut mit Kaltluft versorgt. Bei allochthoner Wetterlage fungieren der Freilandbereich zwischen Wedau und Bissingheim sowie die Wasserfläche der Regattabahn zudem als Luftleitbahnen und sorgen somit für die Zufuhr von frischeren Luftmassen. Über die Frei- und Wasserflächen der Sechs-Seen-Platte kann zusätzlich bei entsprechenden Windrichtungen Frischluft in die beiden Siedlungen transportiert werden und zu einer Milderung der Belastungssituation bezüglich Hitze und Lufthygiene beitragen.

- Die östlich gelegenen Bereiche der Siedlungen von Großenbaum und Rahm werden durch abfließende Kaltluft aus den im östlichen Stadtrandbereich auftretenden und in Richtung Westen abfließenden Kaltluftmassen kaum tangiert, da die Fließgeschwindigkeit der Kaltluftmassen in Richtung Siedlungsbereich abgeschwächt wird und der Kaltluftvolumenstrom überwiegend stark abnimmt. Insbesondere außerhalb des östlichen Siedlungsrandes von Großenbaum wird dies deutlich ersichtlich. Lediglich entlang der Saarer Straße tritt der Kaltluftvolumenstrom mit einer mittleren Mächtigkeit auf, so dass über den Straßenzug eine Versorgung der angrenzenden Siedlungsbereiche mit Kaltluft gegeben ist. Dem Freilandbereich ist trotz der geringen Fähigkeit, die angrenzenden Siedlungen während sommerlicher Hitzeperioden mit der Zufuhr von Kaltluftmassen zu versorgen, eine hohe Bedeutung als Ausgleichsraum zuzusprechen. So können auch bei allochthonen Wetterlagen kühlere und frischere Luftmassen aus dem Umland in die Bebauung hineingeleitet werden.
- Reliefbedingte Kaltluftabflüsse während sommerlicher Strahlungswetterlagen sind zudem von den Halden des benachbarten Dinslaken modelliert worden. Ein Teil der dort produzierten Kaltluftmassen bewegt sich entsprechend der Hangneigung bis ins benachbarte Duisburg und fließt dort in südlichen Richtungen entlang der A 59 zwischen Walsum und Wehofen bzw. entlang der Freiflächen zwischen Goerdeler Straße und Zillestraße in Richtung Driesenbusch ab. In beiden Bereichen konnte der Kaltluftvolumenstrom mit einer extrem hohen Mächtigkeit modelliert werden. Die Kaltluft dringt dabei bis zu den Straßen „Eichenhorst“, Hoevelerstraße und Holtener Straße vor und erfasst somit auch die Gewerbeansiedlung im südlichen Anschluss an die Dinslakener Haldenkörper.
- Ebenfalls zwischen Hüttenwerk und Siedlungsgebiet von Hamborn konnte eine hohe Kaltluftproduktionsrate mit einer sehr hohen Mächtigkeit des Kaltluftvolumenstroms modelliert werden. Die Kaltluftmassen fließen in diesem Bereich zum Teil in östliche Richtungen ab, wo sie mit sehr schwachen Strömungen noch bis in die Siedlungen von

Fahrn (bis zur Oderstraße) nachweisbar sind. Gleichzeitig befindet sich nördlich der Siedlung entlang des Mühlenbachs ebenfalls eine große Grünfläche als Fortführung der die Autobahn A 59 begleitenden Grünzüge mit zum Teil hoher Kaltluftproduktivität, so dass die Siedlung insgesamt relativ gut mit Kaltluft versorgt wird.

- Die landwirtschaftlichen Freiflächen im Süden und Westen des Stadtbezirks Süd weisen vereinzelt hohe Kaltluftproduktionsraten sowie in weiten Teilen als mittel klassifizierte Mächtigkeiten des Kaltluftvolumenstroms auf. Anhand der Strömungsvektoren ist allerdings zu erkennen, dass die Siedlungsbereiche des Stadtbezirks Süd nur teilweise von dieser Kaltluftdynamik profitieren, da ein Abfließen der Kaltluftmassen in Richtung Südwesten über die Stadtgrenze nach Krefeld hinweg bzw. in Richtung Rhein erfolgt. Hohe Kaltluftproduktionsraten in Verbindung mit hohen bis sehr hohen Mächtigkeiten des Kaltluftvolumenstroms sind zudem am Angerbach zwischen der Düsseldorfer Landstraße und der Straße „Am Neuen Angerbach“ simuliert worden. Hier fließt die Kaltluft in nordwestliche Richtungen ab, dringt jedoch auch hier kaum in die angrenzenden Siedlungen ein.
- Die Modellergebnisse zeigen, dass einige Bereiche des Stadtgebietes während sommerlicher Strahlungswetterlagen eine deutliche Unterversorgung nächtlicher Kaltluftzuflüsse aufweisen. Bezogen auf die lokalen klimaökologischen Verhältnisse ist dies jedoch differenziert zu bewerten. Während eine lockere, stark durchgrünte Bebauungsstruktur mit kleineren Ein- bis Mehrfamilienhäusern und teils großen zusammenhängenden Gartenflächen und die Nähe zu Parks- und Grünanlagen, wie etwa die Siedlungsgebiete Overbruch, Vierlinden, Baerl und Rumeln zu insgesamt noch günstigen bioklimatischen Verhältnissen führt, was sich unter anderem in einer geringeren Ausprägung der Wärmeinselintensität widerspiegelt (vgl. Karte 3-2), führen die fehlenden Kaltluftzuflüsse in Kombination mit erhöhten Versiegelungsgraden und dem daraus resultierenden Fehlen verdunstungsaktiver Grünflächen sowie teils erhöhter Emissionen von Luftschadstoffen, Stäuben und Abwärme im Bereich der stärker verdichteten Bebauungsstrukturen, insbesondere in den Bereichen des Innenstadtklimas sowie einigen großen Gewerbe- und Industriegebieten zu einer insgesamt stärkeren klimatischen Belastung und einer erhöhten Wärmeinselintensität.
- Innerhalb einzelner großer Industrie- und Gewerbeflächen existieren jedoch z.T. großflächige Frei- und Grünflächen (hervorzuheben sind hier vor allem das Werksgelände der thyssenkrupp Steel Europe AG, das Hüttenwerk in Hochfeld, das Gewerbegebiet in Bliersheim, die Gewerbe- und Industriegebiete in Ungelsheim, Hüttenheim und Angerhausen). Anhand des ermittelten Kaltlufteinwirkungsbereichs wird die klimaökologische Relevanz der unversiegelten und begrüneten Flächen innerhalb der

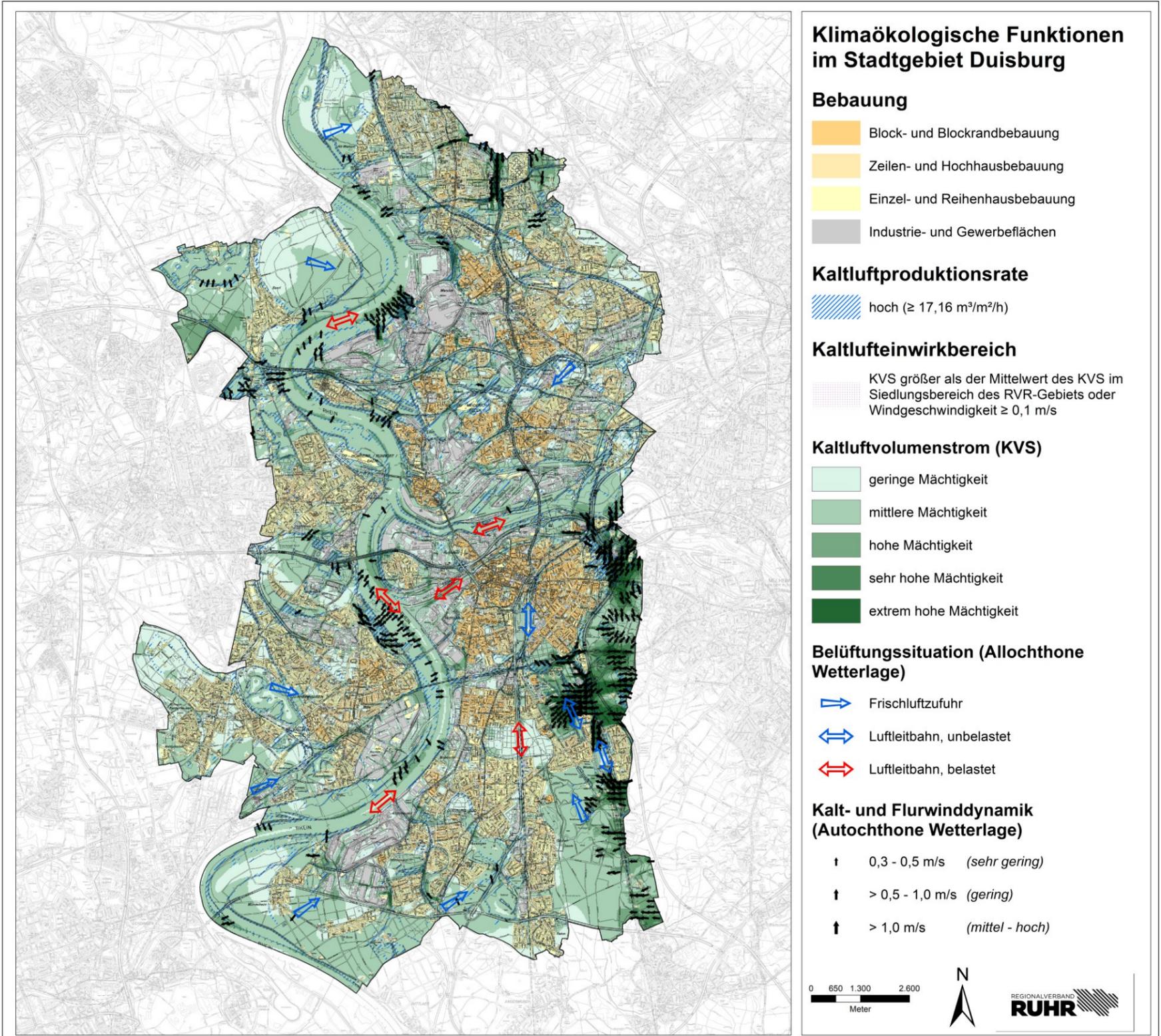
großflächigen Lasträume ersichtlich, wodurch extreme Überwärmungen reduziert und die Belastungssituation zumindest lokal gemindert wird.

- Positiv hervorzuheben sind zudem die zahlreichen Grünzüge, die durch das Stadtgebiet verlaufen und ein Verschmelzen von klimatischen Lasträumen verhindern. So ist beispielsweise auch der Grünzug in Meiderich/Beeck, der sich vom Rhein über zahlreiche Grün- und Freiflächen südlich der A 42 – einschließlich der Flächen des Landschaftsparks Duisburg-Nord – bis zum Autobahnkreuz Oberhausen-West erstreckt, zu nennen. Vielfach konnte die Modellierung zeigen, dass auf diesen Flächen eine hohe Kaltluftproduktivität besteht, jedoch treten aufgrund der geringen Hangneigungen reliefbedingte Kaltluftabflüsse weitestgehend in den Hintergrund. Ebenfalls entlang der Ruhr konnten stellenweise hohe Kaltluftproduktionsraten modelliert werden, dennoch ist auch hier die Zufuhr der Kaltluft in die angrenzende Bebauung reliefbedingt gering ausgeprägt. Bei allochthoner Wetterlage können hingegen sowohl die Ruhr als auch der Außen- und der Innenhafen eine Luftleitfunktion übernehmen. Dabei sind die transportierten Luftmassen – wie auch auf dem Rhein – aufgrund der hohen Luftschadstoffemissionen des Schiffverkehrs stark mit Luftschadstoffen belastet.
- Gleiches gilt für die A 59, die zwischen Wanheimerort und Wedau bei entsprechenden Wetterlagen belastete Luftmassen transportiert. Im Vergleich zu den Fließgewässern sind als Quellen der Luftschadstoffe in erster Linie der Kfz- und Lkw-Verkehr auf der Autobahn zu nennen.
- Die Bahntrasse in Duisburg-Mitte erfüllt ebenfalls eine Luftleitfunktion, wobei die Qualität der Luftleitbahn aufgrund weitgehend fehlender Emittenten günstiger einzustufen ist. Aufgrund des weitläufigen Geländes erstreckt sich die Luftleitbahn über eine ausgedehnte Fläche und verläuft von der AS Duisburg-Hochfeld bis etwa zur Oranienstraße. Weitere unbelastete Luftleitbahnen befinden sich im Bereich der Regattabahn und südöstlich davon zwischen Wedau und Bissingheim im Bereich des Bahngeländes.
- Bei einem übergeordneten Windfeld mit Anströmung aus südwestlicher Richtung bzw. südlicher bis östlicher Richtung können ferner Siedlungsbereiche mit Frischluft versorgt, die sich nordöstlich bzw. nordwestlich von großen Freiflächen befinden. Diese Bereiche sind mit der Signatur „Frischluftezufuhr“ gekennzeichnet und umfassen beispielsweise die Siedlung von Wedau nördlich der Sechs-Seen-Platte, die Siedlungen nördlich des Großenbaumer Sees, das Gewerbegebiet zwischen

Bahntrasse und Keniastraße, die Industrieflächen von Ungelsheim und die bebauten Flächen entlang der Bahntrasse in Friemersheim/Rheinhausen-Mitte.

Insgesamt ist somit für das Duisburger Stadtgebiet festzuhalten, dass in fast allen Stadtbezirken dicht bebaute Siedlungsgebiete existieren, die trotz teils direkter Nähe zu großen kaltluftproduzierenden Flächen keine ausreichende nächtliche Kaltluftversorgung während sommerlicher Hochdruckwetterlagen erfahren. Insbesondere in diesen Bereichen kommt dem kleinräumigen lokalen Grünflächenanteil innerhalb der Bebauungsstrukturen eine besondere Bedeutung zum Schutz vor negativen stadtklimatischen Ausprägungen zu. Daher lässt sich bereits hieraus für die Bereiche ohne ausreichende Kaltluftzufuhr und gleichzeitig hoher Bebauungsdichten und Versiegelungsraten eine Notwendigkeit zur Umsetzung kleinräumiger Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen ableiten.

Karte 4.1: Karte der klimaökologischen Funktionen im Stadtgebiet von Duisburg.



5 Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte stellt eine flächenhafte Bewertung der klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse im Stadtgebiet von Duisburg dar. Im Vergleich zur klassischen Darstellung der räumlichen Verteilung einzelner Klimaelemente in Klimaatlantent werden in der Klimaanalysekarte komplexe Struktur-, Beziehungs- und Funktionszusammenhänge vereinigt und kartographisch dargestellt.

Unter Berücksichtigung der aktuellen Flächennutzungskartierung des Regionalverband Ruhr, der Topographie des Untersuchungsgebietes, der in Kapitel 3 vorgestellten FITNAH-Modellierung, aktueller Luftbilder sowie weiterer vorliegender Untersuchungen zum Stadt- und Regionalklima erfolgte die Erstellung der Klimaanalysekarte nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 (VDI 2015).

Die Klimaanalysekarte beinhaltet mit den Klimatopen, den spezifischen Klimaeigenschaften und den Informationen zu lufthygienischen Verhältnissen sowie dem Luftaustausch vier Darstellungsebenen, die im Kapitel 4.1 näher erläutert werden.

Zur Ausweisung der Klimatope wurde ein vom Regionalverband Ruhr entwickeltes teilautomatisiertes Verfahren angewendet, welches gegenüber der herkömmlichen manuellen Abgrenzung der Klimatope eine deutlich feinere Auflösung aufweist. Aufgrund des angewendeten Verfahrens und der unterschiedlichen Betrachtungs- bzw. Maßstabsebenen unterscheiden sich die Klimatopeinteilung der Klimaanalysekarte und die Ausweisung in der Regionalen Klimatopkarte (vgl. Kapitel 2.4). Während die Regionale Klimatopkarte einer regionalen Einordnung und groben Übersicht der Klimatopverteilung im Stadtgebiet dient, weist die Klimaanalysekarte eine detaillierte Einteilung auf.

Im Gegensatz zu lufthygienischen Parametern existieren für klimatische Kenngrößen keine rechtsverbindlichen Grenz- oder Richtwerte. Daher soll anhand der Klimaanalysekarte eine stadtklimatologische Bewertung formuliert werden, die als Grundlage für die Ausweisung von Planungshinweisen (siehe Kapitel 8) zur Erhaltung und Förderung günstiger klimatischer Verhältnisse auf der Ebene des gesamten Stadtgebietes sowie für einzelne Stadtbezirke dient. Nachfolgend werden zunächst die unterschiedlichen Darstellungsebenen sowie deren einzelne, in der Klimaanalysekarte abgebildete Elemente erläutert und anschließend die Gliederung des Stadtgebietes anhand der Klimaanalysekarte beschrieben.

5.1 Darstellungsebenen der Klimaanalysekarte

Die **erste Darstellungsebene** beinhaltet die flächenhafte klimatische Differenzierung des Stadtgebietes von Duisburg anhand von Klimatopen. Klimatope bezeichnen räumliche Einheiten, die aufgrund vergleichbarer Eigenschaften bezüglich der Flächennutzung, der Bebauungsdichte, dem Versiegelungsgrad, der Rauigkeit und des Vegetationsbestands ähnliche mikroklimatische Bedingungen aufweisen. Hinsichtlich der Abgrenzung der Klimatope ist anzumerken, dass sich klimatische Prozesse nicht linienscharf an Bauungs- und Nutzungsgrenzen anpassen, sondern fließende Übergänge zu benachbarten Flächen aufweisen. Daher dürfen die Abgrenzungen der Klimatope innerhalb der Klimaanalysekarte nicht als flächenscharfe Grenzziehungen aufgefasst werden.

In einer **zweiten Darstellungsebene** werden die spezifischen Klimaeigenschaften ausgewiesen, welche Modifikationen der Klimatopeigenschaften beschreiben. Diese können beispielsweise durch lokale Reliefstrukturen hervorgerufen werden und entweder zusätzliche Funktionen oder eine besonders starke Ausprägung bzw. Bedeutung bestimmter Klimatopeigenschaften darstellen.

Die **dritte Darstellungsebene** liefert Informationen zu den Luftaustauschverhältnissen im Stadtgebiet und zeigt das Auftreten von Bereichen der Frischluftzufuhr, der Kaltluftabflüsse und Flurwinde.

Die lufthygienischen Verhältnisse werden anhand der Ausweisung von Straßen mit erhöhtem Verkehrsaufkommen sowie industriellen und gewerblichen Emittenten von Luftschadstoffen in einer **vierten Darstellungsebene** beschrieben.

5.1.1 Klimatope

Im Folgenden werden die typischen Charakteristika der unterschiedlichen in der Klimaanalysekarte in Anlehnung an die VDI 3787 Blatt 1 (VDI 2015) ausgewiesenen Klimatope im Einzelnen näher erläutert:

Gewässerklima

Wasserkörper zeichnen sich aufgrund ihrer hohen Wärmekapazität und der damit verbundenen thermischen Trägheit durch ausgeglichene klimatische Verhältnisse mit gedämpftem Tagesgang der Lufttemperatur und einer erhöhten Luftfeuchtigkeit infolge der gesteigerten Verdunstung aus. Dadurch werden Wasserflächen am Tage als relativ kühl und nachts als relativ warm empfunden. Die tagsüber kühlende Wirkung bleibt insbesondere bei kleineren Gewässern zumeist auf den Wasserkörper sowie die unmittelbare Umgebung beschränkt. Ein zusätzlich positiver Effekt für die klimatische Situation wird durch die geringe Rauigkeit von Gewässerflächen bewirkt, wodurch Austausch- und Ventilationsverhältnisse

begünstigt werden und linienhafte Gewässerstrukturen die Funktion als Luftleitbahn einnehmen können.

| Gewässerklima | |
|---|--|
| klimatische Gunstfaktoren | klimatische Ungunstfaktoren |
| <ul style="list-style-type: none"> ☺ geringe Oberflächenrauigkeit ☺ geringe Rauigkeit begünstigt die Belüftungsfunktion ☺ reduzierte Erwärmung am Tage bei gleichzeitig erhöhter Verdunstung ☺ geringe thermische und bioklimatische Belastung im Uferbereich | <ul style="list-style-type: none"> ☹ hohe Wärmekapazität der Wasserkörper bedingt eine nur geringe nächtliche Abkühlung ☹ nächtliche Kaltluftmassen können beim Überströmen von Wasserflächen erwärmt werden ☹ die bioklimatisch günstige Situation ist auf den Ufersaum beschränkt |

Freilandklima

Dieser Klimatoptyp stellt sich über landwirtschaftlichen Nutzflächen, Wiesen sowie Weiden und Brachflächen (Versiegelungsgrad < 10 %) ein und zeichnet sich durch ungestörte Tagesgänge von Lufttemperatur und -feuchte aus. Zudem sind in diesen Bereichen meist keine Emittenten angesiedelt, weshalb es sich um bedeutsame Frischluftgebiete handeln kann. Des Weiteren ist diesen Flächen bei geeigneten Wetterlagen aus klimatischer Sicht ein hoher Stellenwert als Kaltluftproduktionsgebiete zuzuschreiben. Da die Freilandflächen darüber hinaus eine rauigkeitsarme Struktur aufweisen, können die kühleren und unbelasteten Luftmassen bei geeigneten Windrichtungen oder Reliefausprägungen in die aus bio- und immissionsklimatischer Sicht stärker belasteten Gebiete transportiert werden und eine hohe Ausgleichswirkung einnehmen. Die Kaltluftproduktivität einer Freifläche hängt dabei entscheidend von den Eigenschaften des Untergrunds, wie etwa den thermischen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und -kapazität), der Farbe der Oberfläche, der Dichte des Bodensubstrats, dem Luft- und Wassergehalt, dem Porenvolumen sowie der Bodenbedeckung (Vegetation) ab.

| Freilandklima | |
|--|------------------------------------|
| klimatische Gunstfaktoren | klimatische Ungunstfaktoren |
| <ul style="list-style-type: none"> ☺ geringe Schwüle- und Wärmebelastung und hoher bioklimatischer Stellenwert als Erholungsraum ☺ geringe Veränderungen des Windfeldes ☺ wertvolle Frischluft Räume ☺ i.d.R. keine Emissionen ☺ hohe Kaltluftproduktion (starke Abkühlung in den Nachtstunden) ☺ klimaökologische Ausgleichsräume für angrenzende Bebauungsstrukturen | |

Waldklima

Typische Ausprägungen des Waldklimas sind stark gedämpfte Tagesgänge der Lufttemperatur und –feuchte. Man spricht hier von einem Bestandsklima, welches sich infolge der verminderten Ein- und Ausstrahlung im Stammraum einstellt. Die Hauptumsatzfläche für energetische Prozesse ist in Waldbeständen im oberen Kronenraum anzutreffen, wo sich bei wind-schwachen Strahlungswetterlagen auch Kaltluftmassen bilden können, die bei ausreichender Reliefneigung eine hohe Relevanz für angrenzende Lasträume haben. Bei zumeist geringen oder fehlenden Emissionen sind Waldflächen darüber hinaus Frischluftentstehungsgebiete, die jedoch aufgrund der hohen Rauigkeit im Gegensatz zu den unbewaldeten Freiflächen keine Luftleitfunktion innehaben. Daher zeichnen sie sich auch durch niedrige Windgeschwindigkeiten im Stammraum aus. Grundsätzlich stellen Waldflächen aufgrund der sehr geringen thermischen und bioklimatischen Belastungen wertvolle Regenerations- und Erholungsräume dar. Hervorzuheben ist weiterhin die Filterkapazität der Waldflächen gegenüber atmosphärischen Luftschadstoffen.

| Waldklima | |
|--|--|
| klimatische Gunstfaktoren | klimatische Ungunstfaktoren |
| <ul style="list-style-type: none">☺ ausgeglichenes Stammraumklima aufgrund des gedämpften Tagesgangs der Lufttemperaturen bei allgemein kühleren Temperaturen☺ sehr geringe thermische und bioklimatische Belastung☺ Luftruhe im Stammraum wirkt Kälte- und Winddiskomfort entgegen☺ keine Emissionen☺ Frischluftentstehungsgebiete☺ Kaltluftentstehung im oberen Kronenraum☺ Filterfunktion für gas- und staubförmige Luftschadstoffe☺ wertvolle Regenerations- und Erholungsräume | <ul style="list-style-type: none">☹ aufgrund hoher Oberflächenrauigkeit keine Luftleitfunktion; Barrierewirkung für Luftmassentransporte möglich☹ Kaltluftabfluss nur bei ausreichend hoher Reliefneigung möglich |

Klima innerstädtischer Grünflächen

Größere innerstädtische Parks, Friedhöfe und Kleingartenanlagen sind aufgrund der aufgelockerten Vegetationsstrukturen mit Rasenflächen (Versiegelungsgrad < 20 %) durch stärker ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur und –feuchte gegenüber der umliegenden Bebauung gekennzeichnet. Sowohl tagsüber als auch in der Nacht treten die Park- und Grünanlagen als Kälteinseln hervor und können somit als Kaltluftproduktionsflächen fungieren. Die klimameliorierende Wirkung ist zwar zumeist auf die Flächen selbst begrenzt („Oaseneffekt“), kann in Abhängigkeit von der Größe, der Struktur, der Reliefsituation sowie

von der Vernetzung mit der angrenzenden Bebauung aber auch eine Fernwirkung ausüben. Die Kaltluftproduktion innerstädtischer Grünflächen kann daher der Entstehung großflächiger Wärmeinseln entgegenwirken. Diese Wirkung ist bereits bei kleineren Grünflächen nachzuweisen, insbesondere wenn diese innerhalb des Stadtgebietes vernetzt sind.

| Klima innerstädtischer Grünflächen | |
|---|---|
| klimatische Gunstfaktoren | klimatische Ungunstfaktoren |
| <ul style="list-style-type: none">☺ gedämpfter Tagesgang der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit☺ lokale Abkühlungseffekte durch Schattenzonen und erhöhte Verdunstungsraten☺ geringe thermische und bioklimatische Belastung☺ größere parkartige Grünflächen erweisen sich als innerstädtische Kaltluftproduzenten☺ keine Emissionen☺ Filterfunktion für gas- und staubförmige Luftschadstoffe☺ wertvolle Regenerations- und Erholungsräume | <ul style="list-style-type: none">☹ das günstige Bioklima begrenzt sich häufig auf die Fläche selbst (bei kleinen Flächen, „Oaseneffekt“)☹ oftmals geringe Fernwirkung (≤ 200 m) |

Vorstadtklima

Das Vorstadtklima bildet den Übergangsbereich zwischen den Klimaten der bebauten Flächen und den Klimaten des Freilandes. Charakteristisch für Flächen, die dem Vorstadtklima zugeordnet werden, sind in erster Linie eine Bebauungsstruktur mit Einzel- und Doppelhäusern von geringer Bauhöhe (ein- bis dreigeschossig) sowie ein geringer Versiegelungsgrad (i.d.R. 20-30 %) bzw. eine hohe Durchgrünung mit Wiesen, Baum- und Strauchvegetation. Dieser Klimatotyp ist charakteristisch für Vorstadtsiedlungen, Gartenstädte und Ortsränder, die im unmittelbaren Einflussbereich des Freilandes stehen und dadurch günstige bioklimatische Verhältnisse aufweisen. Das Klima in den Vorstadtsiedlungen zeichnet sich durch eine leichte Dämpfung der Klimaelemente Temperatur, Feuchte, Wind und Strahlung aus. Die Windgeschwindigkeit ist dabei niedriger als im Freiland, aber höher als in der Innenstadt.

| Vorstadtklima | |
|--|--|
| klimatische Gunstfaktoren | klimatische Ungunstfaktoren |
| <ul style="list-style-type: none"> ☺ die Nähe zu klimatischen Ausgleichsflächen begünstigt die Zufuhr kühlerer und frischerer Luftmassen ☺ eine starke Abkühlung in der Nacht wirkt der Ausbildung „heißer Nächte“ entgegen, so dass ein optimales Wohn- und Schlafklima resultiert ☺ hohe Variabilität der Mikroklimata durch das Nebeneinander unterschiedlich stark verdichteter Wohngebiete (Einfamilienhäuser, lockere Reihenhausbauung, offene Bauungsstrukturen) sowie Park- und Grünflächen | <ul style="list-style-type: none"> ☹ Mulden und Senken können lokal zur Erhöhung des bioklimatischen Belastungspotentials beitragen ☹ Wärmebelastungen am Tage können durch fehlende Verschattungsstrukturen erhöht sein ☹ eingeschränkte vertikale Austauschverhältnisse während windschwacher Strahlungswetterlagen können bedingt durch lokale bodennahe Emittenten das Immissionsrisiko erhöhen |

Stadtrandklima

Das Stadtrandklima unterscheidet sich vom Vorstadtklima durch eine etwas dichtere Bebauung und einen geringeren Grünflächenanteil. Dennoch ist die Bebauungsstruktur, die von Einzelhäusern über Wohnblocks bis hin zu Blockbebauung reicht, dabei aber durch niedrige Bauhöhen (im Allgemeinen dreigeschossig, vereinzelt jedoch bis zu fünfgeschossig möglich) und noch relativ geringe Versiegelungsgrade (30-50 %) gekennzeichnet ist, als aufgelockert und durchgrünt zu bezeichnen. Durch die relative Nähe zu klimatischen Ausgleichsräumen ist eine Frisch- und Kaltluftzufuhr weitgehend auch während gradientschwacher Wetterlagen gewährleistet. Hieraus resultieren eine nur schwache Ausprägung von Wärmeinseln und ein zumeist ausreichender Luftaustausch infolge nur geringer Windfeldveränderungen, was in der Regel gute bioklimatische Bedingungen in diesen Stadtbezirken gewährleistet. Vereinzelt können allerdings Straßenschluchten vorhanden sein, in denen bei erhöhtem Verkehrsaufkommen (z.B. entlang von Ein- und Ausfallstraßen) und gleichzeitig geschlossenem Kronendach der Straßenbäume erhöhte Immissionen auftreten können.

| Stadtrandklima | |
|---|--|
| klimatische Gunstfaktoren | klimatische Ungunstfaktoren |
| <ul style="list-style-type: none"> ☺ die relative Nähe zu klimatischen Ausgleichsflächen begünstigt die Zufuhr kühlerer und frischerer Luftmassen ☺ gutes Wohn- und Schlafklima durch eine ausreichende nächtliche Abkühlung im Sommer ☺ lokale und regionale Grünzonen sind häufig noch fußläufig erreichbar ☺ hohe Variabilität der Mikroklimata durch das Nebeneinander unterschiedlich stark verdichteter Wohngebiete (Einfamilienhäuser, lockere | <ul style="list-style-type: none"> ☹ Mulden und Senken können lokal zur Erhöhung des bioklimatischen Belastungspotentials beitragen ☹ Wärmebelastungen am Tage können durch fehlende Verschattungsstrukturen erhöht sein ☹ eingeschränkte vertikale Austauschverhältnisse während windschwacher Strahlungswetterlagen können bedingt durch lokale bodennahe Emittenten das Immissionsrisiko erhöhen ☹ punktuell erhöhte Immissionen in Straßenschluchten möglich |

| | |
|---|--|
| Reihenhausbebauung, offene Bauungsstrukturen) und Grünflächen | |
|---|--|

Stadtklima

Kennzeichnend für das Stadtklima ist eine überwiegend dichte, geschlossene Zeilen- und Blockbebauung mit meist hohen Baukörpern (i.d.R. bis fünfgeschossig, vereinzelt auch höher) und engen Straßen mit vermehrt schluchtartigem Charakter. Während austauscharmer Strahlungs-nächte kommt es bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad (50-70 %), die hohen Oberflächenrauigkeiten und geringen Grünflächenanteile zu einer Zunahme der Überwärmung. Die dichte städtische Bebauung verursacht somit ausgeprägte Wärmeinseln mit eingeschränkten Austauschbedingungen, die z.T. mit ungünstigen bioklimatischen Verhältnissen und hoher Luftbelastung verbunden sind. Durch die Ausbildung von Wärmeinseln in den Nachtstunden wird ein konvektiver Durchmischungsraum aufrechterhalten, so dass seltener Bodeninversionen auftreten als in den Freilandbereichen und den lockerer bebauten Siedlungsflächen. Neben den Verkehrsemissionen spielt der Hausbrand in den Wintermonaten eine entscheidende Rolle für die lufthygienische Situation.

| Stadtklima | |
|--|---|
| klimatische Gunstfaktoren | klimatische Ungunstfaktoren |
| <ul style="list-style-type: none"> ☺ Kältestress und Winddiskomfort werden durch die Bauungsstrukturen reduziert ☺ während Inversionswetterlagen trägt der Wärmeinseleffekt zu einer Aufrechterhaltung eines bodennahen Durchmischungsraumes bei, wodurch bodennahe Luftschadstoffe verdünnt werden ☺ großkronige Bäume senken die Wärmebelastung innerhalb der Wohngebiete | <ul style="list-style-type: none"> ☹ eingeschränkte Austauschverhältnisse sowie Wärmestau durch direkte Sonneneinstrahlung in engen Straßenzügen ☹ erhöhtes Schwülepotential in engen austauscharmen Straßenschluchten ☹ fehlende Verschattungsstrukturen durch verdunstungsaktive Baumkronen fördern die Hitze- und Wärmebelastung ☹ erhöhtes Immissionspotential im Einflussbereich bodennaher Schadstoffemittenten (v.a. Kfz-Verkehr) infolge eingeschränkter horizontaler Austauschverhältnisse ☹ lang anhaltende nächtliche Überwärmungsphasen können sich im Sommer negativ auf das Innenraumklima auswirken |

Innenstadtklima

Kennzeichnend für das Innenstadtklimatop sind ein sehr hoher Versiegelungsgrad (> 70 %) sowie ein geringer Grünflächenanteil, der lediglich durch Einzelbäume im Straßenraum sowie kleine Rasenflächen, z.T. mit Strauchvegetation als Straßenbegleitgrün, charakterisiert ist. Die Bauungsstruktur weist vorwiegend mehrgeschossige Baublöcke mit Verwaltungs-,

Geschäfts- und Wohngebäuden auf, die sich zumeist als geschlossene Blockbebauung mit vereinzelt auftretenden Hochhäusern darstellt. Das Innenstadtklima weist dadurch die stärksten Veränderungen im Stadtgebiet auf. Hierzu zählen vor allem ein sehr stark ausgeprägter Wärmeinseleffekt, bedingt durch die Wärmespeicherfähigkeit der städtischen Oberflächen, und starke Windfeldveränderungen, die sich in einer straßenparallelen Be- und Entlüftungssituationen widerspiegeln. Am Tage kann in den Bereichen der Innenstadt ein erhöhtes Belastungspotential durch Hitzestress und Schwüle entstehen, welches durch eingeschränkte Austauschverhältnisse und geringe Verdunstungskühlung aufgrund fehlender Vegetation hervorgerufen wird. Hitze und Schwübelastungen im Sommer, erhöhte Luftschadstoff- und Lärmbelastungen durch den Kfz-Verkehr sowie Winddiskomfort durch Böigkeit und Windturbulenzen im Bereich von Straßenschluchten und offenen Plätzen führen zu einer hohen bioklimatischen Belastung.

| Innenstadtklima | |
|---|---|
| klimate Günstfaktoren | klimate Ungünstfaktoren |
| <ul style="list-style-type: none"> ☺ durch geringe Abkühlung in den Abendstunden wird die Aufenthaltsdauer im Stadtzentrum verlängert, wodurch die Attraktivität der Innenstadt als kulturelles Zentrum erhöht wird ☺ nächtlich anhaltende thermische Turbulenz vergrößert den bodennahen Durchmischungsraum (Schadstoffverdünnung) ☺ geringer Anteil stagnierender Luftaustauschsituationen | <ul style="list-style-type: none"> ☹ tagsüber erhöhtes Belastungspotential durch Hitzestress und Schwüle möglich ☹ fehlende Verschattungsstrukturen durch verdunstungsaktive Baumkronen fördern die Hitze- und Wärmebelastung ☹ Winddiskomfort durch erhöhte Böigkeit und Turbulenzen im Bereich von Straßenschluchten und offenen Plätzen ☹ Ein- und Ausfallstraßen erweisen sich als belastete Luftleitbahnen ☹ eingeschränkte Austauschverhältnisse sowie Wärmestau durch direkte Sonneneinstrahlung in engen Straßenzügen ☹ erhöhtes Immissionspotential im Einflussbereich bodennaher Schadstoffemittenten (v.a. Kfz-Verkehr) infolge eingeschränkter horizontaler Austauschverhältnisse ☹ lang anhaltende nächtliche Überwärmungsphasen können sich im Sommer negativ auf das Innenraumklima auswirken |

Gewerbeklima

In diesem Klimatotyp prägen Gewerbegebiete mit den dazugehörigen Produktions-, Lager- und Umschlagstätten, die sich durch einen hohen Versiegelungsgrad und geringen Grünflächenanteil auszeichnen, das Mikroklima. Die Emissionsstruktur, deren Hauptquellen Feuerungsanlagen sowie produktionsbedingte Anlagen und der Schwerlastverkehr darstellen kön-

nen, ist stark abhängig von der Art der gewerblichen Nutzung. In Kombination kann dies verstärkt zu immissionsklimatischen und bioklimatischen Belastungssituationen führen.

| Gewerbeklima | |
|---|---|
| klimatische Gunstfaktoren | klimatische Ungunstfaktoren |
| <ul style="list-style-type: none"> ☺ nächtlich anhaltende thermische Turbulenz vergrößert den bodennahen Durchmischungsraum (Schadstoffverdünnung) ☺ relativ günstige bodennahe Austauschverhältnisse | <ul style="list-style-type: none"> ☹ lufthygienischer Lastraum, lokale Schadstoffemissionen ☹ langanhaltende nächtliche Wärmebelastungen ☹ tagsüber erhöhtes Belastungspotential durch Hitzestress und Schwüle möglich ☹ fehlende Verschattungsstrukturen durch verdunstungsaktive Baumkronen fördern die Hitze- und Wärmebelastung |

Industrieklima

Das Klima in Industriegebieten wird durch einen sehr hohen Versiegelungsgrad, einen sehr geringen Grünflächenanteil und eine erhöhte Freisetzung von industrieller Abwärme sowie gas- und partikelförmiger Spurenstoffe geprägt. Die lufthygienische Belastung steht ebenfalls in starker Abhängigkeit zur Art der industriellen Nutzung und somit zur Emissionsstruktur. Industrie- und Kraftwerksschornsteine, Produktionsanlagen und der Schwerlastverkehr können die Hauptemissionsquellen darstellen und in Kombination mit einer starken Überwärmung im Sommer zu immissionsklimatischen und bioklimatischen Belastungssituationen beitragen.

| Industrieklima | |
|---|--|
| klimatische Gunstfaktoren | klimatische Ungunstfaktoren |
| <ul style="list-style-type: none"> ☺ nächtlich anhaltende thermische Turbulenz vergrößert den bodennahen Durchmischungsraum (Schadstoffverdünnung) ☺ relativ günstige bodennahe Austauschverhältnisse | <ul style="list-style-type: none"> ☹ lufthygienischer Lastraum, lokale Schadstoffemissionen, häufig auch mit Fernwirkung ☹ langanhaltende nächtliche Wärmebelastungen ☹ tagsüber erhöhtes Belastungspotential durch Hitzestress und Schwüle möglich ☹ fehlende Verschattungsstrukturen durch verdunstungsaktive Baumkronen fördern die Hitze- und Wärmebelastung |

5.1.2 Spezifische Klimaeigenschaften

Die Eigenschaften der Klimatope werden in einigen Bereichen durch natürliche und anthropogene Faktoren modifiziert. Hier spricht man von spezifischen Klimaeigenschaften, die beispielsweise aufgrund der lokalen Reliefsituation innerhalb eines Klimatops oder auch klimatopübergreifend örtliche Klimaveränderungen darstellen. Diese spezifischen Eigenschaften werden in der Klimaanalysekarte als flächenhafte Schraffuren und Punktsignaturen ausgewiesen. Klimatische Funktionen, die zwar schon im Zusammenhang mit der Klimatopbeschreibung erwähnt wurden, innerhalb einiger Klimatope jedoch besonders stark ausgeprägt sind, werden als Piktogramme dargestellt. Die Ausprägung der spezifischen Klimaeigenschaften ist zumeist eng an bestimmte Wetterlagen gekoppelt, wobei die windschwachen Strahlungswetterlagen im Vordergrund stehen. Im Folgenden werden die Charakteristika der spezifischen Klimaeigenschaften beschrieben.

Kaltluftsammlgebiet

Eine hohe Kaltluftproduktion, fehlende Kaltluftdynamik oder Stausituationen an Strömungshindernissen (z.B. große Gebäudekomplexe, Dämme und Waldriegel) sowie bestimmte Reliefformen (z.B. Mulden und Senken) können zur Akkumulation lokal gebildeter Kaltluft führen. Diese Gebiete weisen während der Nacht niedrigere Temperaturen, eine erhöhte Inversionshäufigkeit und verstärkte Nebelbildung auf. Zudem können bodennahe Emissionen, wie etwa durch den Verkehr, bei entsprechender Wetterlage zur Anreicherung von Luftschadstoffen in diesen Bereichen führen.

Warme Kuppennonen

Warme Kuppennonen zeichnen sich dadurch aus, dass sie lange Zeit aus den nächtlichen Bodeninversionen der tieferen Lagen herausragen. Durch das hangabwärts gerichtete Abfließen kalter Luftmassen bleiben die Kuppennonen relativ warm. Sie erreichen eine den dichten Bebauungsstrukturen analoge Überwärmung durch eine natürliche Temperaturzunahme mit der Höhe während nächtlicher Inversionswetterlagen. Darüber hinaus ist den Kuppennonen ein hoher Durchlüftungsgrad zuzusprechen.

Bahnanlagen

Größere Bahn- bzw. Gleisanlagen weisen einen sehr ausgeprägten Tagesgang der Lufttemperatur auf, da sich die Oberflächen bei hoher Sonneneinstrahlung tagsüber sehr stark erwärmen und nachts eine starke Abkühlung erfahren. Da die Trassen in der Regel eine geringe Oberflächenrauigkeit aufweisen, verfügen diese Bereiche über einen guten Luftaustausch und können bei entsprechender Vernetzung als Luftleitbahn dienen, um kühlere, unbelastete Luftmassen von Freilandbereichen bzw. Grün- und Waldflächen in belastete Sied-

lungsbereiche zu transportieren. Teilweise können Bahntrassen sogar eine Relevanz zur Belüftung von Stadtzentren haben.

Bodennebel

Aufgrund eines hohen Wasserangebotes und bedingt durch die topographische Lage besteht eine erhöhte Nebelhäufigkeit. Betroffen sind überwiegend Tallagen, Freiflächen in der Nähe von Wasserkörpern und große Freilandbereiche, die eine gute Grundwasserversorgung aufweisen.

Kaltluftbarriere

Größere Bauwerke, Barrieren (wie z.B. Dämme von Bahn- und Autobahntrassen), aber auch Wälder können einen hangabwärts gerichteten Kaltluftabfluss behindern oder gar zum Erliegen bringen. Dies kann zur Bildung eines Kaltluftammelgebietes (s.o.) führen

Filterfunktion des Waldes

Größere Waldflächen haben die Eigenschaft, einerseits durch trockene Deposition im Stammraum und am Blatt- bzw. Nadelwerk, andererseits durch nasse Deposition im Erdbereich und Wurzelraum des Waldes eine Filterfunktion auf Luftschadstoffe auszuüben. Während nächtlicher Strahlungswetterlagen wird diese Filterleistung erhöht, wenn die Luftmassen am Blattwerk abkühlen, in den Stammraum absinken und durch wärmere Luft aus größerer Höhe ersetzt werden, wodurch ein kontinuierlicher Luftdurchsatz gewährleistet wird.

Bioklimatischer Belastungsraum

Bioklimatische Belastungsräume weisen bedingt durch einen hohen Versiegelungsgrad eine starke Erwärmung am Tage und infolge eingeschränkter Auskühlung eine ausgeprägte nächtliche Wärmeinsel auf. Dies kann in den Sommermonaten Hitze- und Schwülebelastungen hervorrufen, wodurch eine starke bioklimatische Belastung für den Menschen entsteht. Zusätzlich wird bei windschwachen Wetterlagen eine Situationsverschlechterung durch lokal emittierte Schadstoffe hervorgerufen. Starke bioklimatische Belastungen in Verbindung mit einer starken Luftverschmutzung durch Feinstäube und Stickoxide treten im Umfeld hochfrequentierter Straßen auf, insbesondere, wenn diese aufgrund der Bebauungsstruktur einen schluchtartigen Charakter haben und somit eingeschränkte Belüftungsverhältnisse vorherrschen.

Windfeldveränderungen

Das Windfeld in der Stadt wird durch Kanalisierung im Straßenraum oder durch Düsen- und Kanteneffekte stark modifiziert. Beim Auftreten unterschiedlicher Bauformen sowie stark unterschiedlicher Höhen der Gebäude in Verbindung mit einem Nebeneinander von bebauten und unbebauten Flächen tritt eine starke Turbulenz des Windfeldes auf. Dadurch erhöht sich

die Zugigkeit und Böigkeit im Straßenraum, was eine stark reduzierte Aufenthaltsqualität im Freien zur Folge haben kann (Winddiskomfort). Starke Windfeldveränderungen sind daher häufig in Stadtzentren vorzufinden, können jedoch auch im Bereich großflächiger Hochhausbebauung an Stadträndern oder im Umfeld von großen Industriebauten und Halden auftreten.

Vertikalaustausch

Durch den anthropogenen Wärmeineffekt werden die Luftmassen in zentralen Stadtbereichen labilisiert. Daraus resultieren eine nächtliche Vergrößerung des Durchmischungsraumes und eine starke thermische Konvektion am Tag. Die Bodeninversionshäufigkeit wird im Vergleich zu den Freilandgebieten stark herabgesetzt.

5.1.3 Luftaustausch

Einen hohen Stellenwert in der Stadtklimatologie besitzt der Luftaustausch zwischen klimatischen Last- und Entlastungsräumen einer Stadt. Für die Belüftungssituation relevant sind neben den Luftleitbahnen und der Frischluftzufuhr insbesondere Bereiche, die während sommerlicher Strahlungsnächte durch Kaltluftabflüsse und Flurwinde einer Reduzierung der städtischen Überwärmung zuträglich sind. Diese Elemente des Luftaustausches werden in der Klimafunktionskarte durch unterschiedliche Pfeilsignaturen dargestellt und im Folgenden näher erläutert.

Frischluftzufuhr

Bei entsprechenden Windrichtungen können frische Luftmassen aus den Freilandarealen in die Lasträume der Städte transportiert werden und dort durch die Vermischung mit belasteten Luftmassen bzw. einem Luftmassenaustausch zu einer Verbesserung der Luftqualität beitragen. Die Eindringtiefe der zugeführten Frischluft ist unter anderem von der Oberflächenrauigkeit (Bebauungs- und Vegetationsstruktur), dem Relief und der Windgeschwindigkeit abhängig. Eine Vernetzung der Frischluftentstehungsgebiete im Umland mit rauigkeitsarmen, innerstädtischen Grünflächen kann die Fernwirkung in die belasteten Stadtzentren begünstigen.

Kaltluft- und Flurwinddynamik

Der Kaltluftabfluss ist ein thermisches und reliefbedingtes, während der Nacht einsetzendes Windsystem (Hangabwind). Bereits ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen, rauigkeitsarmen Oberflächen bodennahe, abwärts gerichtete Strömungen lokaler Kaltluftmassen ein. Die Ausprägung dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch einen schwachen Gradientwind oder die Geländeneigung sowie die Kaltluftproduktivität der Flächen bestimmt. Flurwinde sind nicht reliefbedingt,

sondern entstehen durch Temperatur- und Luftdruckunterschiede zwischen den nächtlich überwärmten Siedlungsbereichen und dem kühleren Umland. Kaltluftabflüsse und Flurwinde können insbesondere während sommerlicher Strahlungsächte zur Abkühlung überwärmter Siedlungsbereiche beitragen und somit den Wärmeinseleffekt reduzieren.

5.1.4 Lufthygiene

Die lufthygienischen Verhältnisse werden anhand der Ausweisung von Straßen mit erhöhtem Verkehrsaufkommen (linienhafte Punktsignaturen) sowie industriellen und gewerblichen Emittenten von Luftschadstoffen und Abwärme (Piktogramme) beschrieben.

Hauptverkehrsstraßen

Straßenzüge mit erhöhtem Verkehrsaufkommen stellen lineare Emissionsbänder für Luftschadstoffe (wie Stickoxide, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Feinstäube) mit zusätzlich erhöhten Lärmemissionen dar. Eine hohe Verkehrsbelastung wird für alle Straßen mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen (DTV) von mehr 20.000 Kfz ausgewiesen. Bei geradlinigem, breitem Verlauf und geringer Rauigkeit können Straßen eine Funktion als belastete Luftleitbahn einnehmen.

Abwärmeemissionen

Hohe Emissionen industrieller Abwärme aus der Schwerindustrie und dem produzierenden Gewerbe können zur Verstärkung der urbanen Überwärmung beitragen und sind zumeist auch mit Emissionen von Luftschadstoffen verbunden.

Emittent mit lokaler und regionaler Bedeutung

Bei den Emittenten mit lokaler und regionaler Bedeutung handelt es sich um genehmigungspflichtige Anlagen mit NO₂-Emissionen ab 10 t/Jahr und PM₁₀-Emissionen ab 1 t/Jahr. Durch niedrige und hohe Emissionsquellen können sowohl lokale Immissionsbelastungen als auch Auswirkungen auf entfernte Gebiete entstehen

5.2 Gliederung der Stadt Duisburg anhand der Klimaanalysekarte

Karte 4.2 zeigt die Klimaanalysekarte für das Stadtgebiet von Duisburg und Abb. 4-1 die unterschiedlichen Flächenanteile der Klimatope sowie der Verkehrsstrassen. Die Klimatope weisen grundsätzlich eine sehr heterogene Verteilung im Stadtgebiet auf.

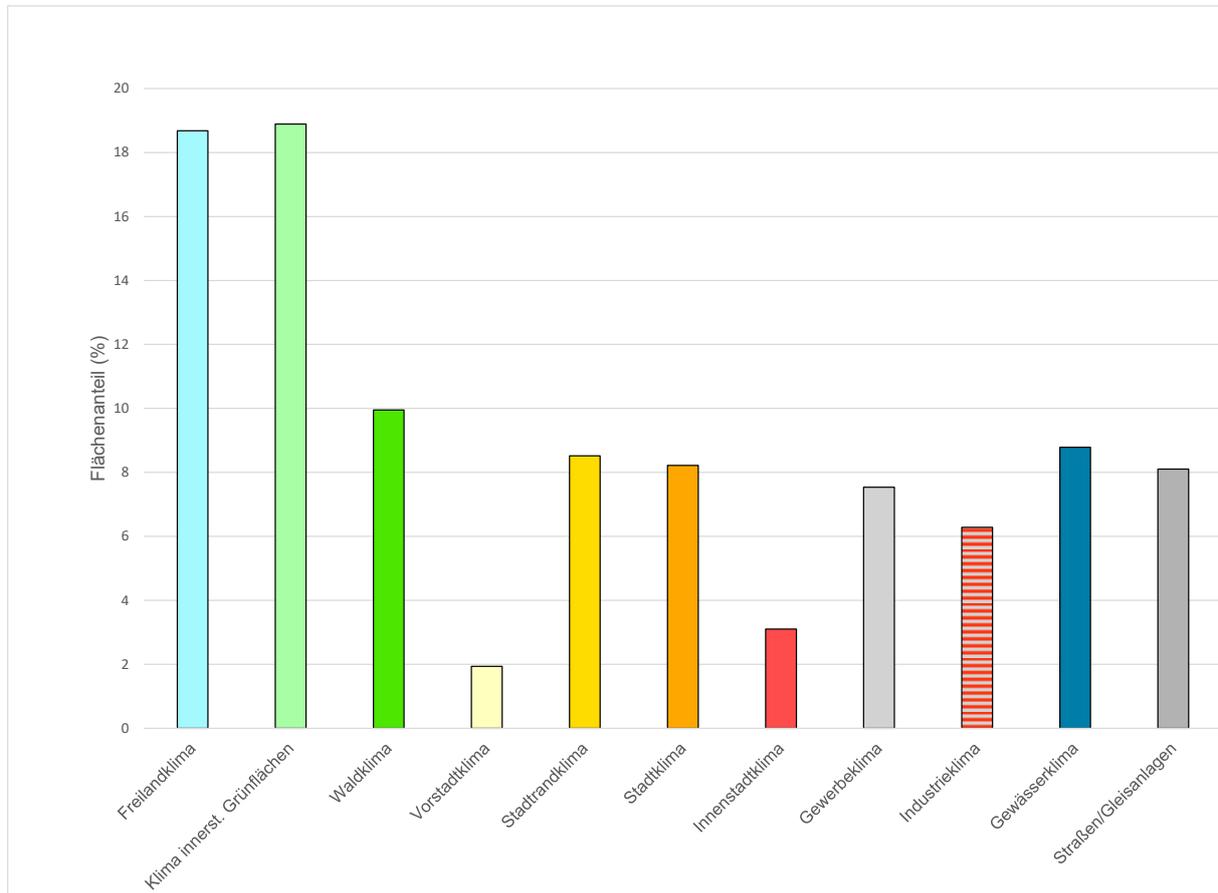


Abb. 4-1: Flächenanteile der Klimatope und Verkehrsstrassen im Stadtgebiet von Duisburg.

Die Abbildung verdeutlicht, dass sowohl die Freilandklimatope als auch die Klimatope der innerstädtischen Grünflächen mit einem Flächenanteil von jeweils knapp 19 % an der gesamten Stadtfläche deutlich höhere Anteile als die restlichen Klimatope in Duisburg einnehmen. Freilandklimatope, zu denen im Wesentlichen landwirtschaftlich genutzte Flächen zählen, sind aus stadtklimatologischer Sicht von besonderer Relevanz, da sie während sommerlicher, austauscharmer Strahlungsnächte wertvolle Produzenten von Kaltluftmassen sind und somit wichtige klimatische Ausgleichsflächen für überwärmte Siedlungsbereiche darstellen können. Dabei ist in erster Linie die Lage bzw. Verteilung dieser Flächen im Stadtgebiet sowie deren Vernetzung mit den klimatisch stärker belasteten Klimatoptypen von entscheidender Bedeutung, wobei insbesondere das Relief eine wichtige Rolle spielt. Im Stadtgebiet von Duisburg sind Freilandklimatope vor allem entlang des Rheins angesiedelt, wobei der Rhein in der Regel etwas tiefer als die Umgebung liegt. Dadurch fließt ein Teil der

entstehenden Kaltluft in Richtung des Gewässerkörpers ab, was zusätzlich durch die Entstehung von lokal auftretenden Flurwinden begünstigt wird. Somit steht ein Teil der gebildeten Kaltluftmassen nicht für die Kühlung der Lasträume zur Verfügung.

Ausgedehnte Freilandklimatope befinden sich zudem im Bereich des Naturschutzgebietes Rheinaue Walsum im Norden der Stadt, östlich von Baerl bis zum Rhein, im Norden von Rheinhausen (Winkelhausen und Asterlagen), in Rumeln-Kaldenhausen und Friemersheim sowie im Umfeld von Mündelheim und Serm im Stadtbezirk Süd. Von der Zufuhr kühlerer Luftmassen während sommerlicher Strahlungs Nächte profitieren vor allem einige Kleinstsiedlungen, die z.T. fast vollständig mit Kaltluft durchströmt werden (v.a. Binsheim, Teile von Baerl und Winkelhausen, die Randbereiche von Rumeln-Kaldenhausen, Serm und Mündelheim). Vielfach werden die Kaltluftmassen jedoch aufgrund einer dichten Randbebauung an einem tiefen Vordringen in die Siedlungen hinein gehindert. Deutlich wird dies beispielsweise östlich und südlich von Mündelheim, wo die Kaltluft entlang der Bebauung zunächst in südliche und dann westliche Richtungen abgelenkt wird.

Da die Anbindung der großflächigeren Lasträume an Freilandbereiche vielfach fehlt und Letztere somit kaum zu einer Verbesserung der klimatischen und lufthygienischen Situation in den innerstädtischen Lasträumen beitragen können, nehmen innerstädtische Grünflächen eine umso wichtigere klimatische Ausgleichsfunktion in Duisburg ein. Neben öffentlichen Parkflächen, Friedhöfen, Kleingarten- und Sportanlagen zählen auch größere zusammenhängende Grünstrukturen innerhalb der Bebauung zu den hier relevanten Flächen. Insgesamt sind in Duisburg, wie bereits beschrieben, knapp 19% der Stadtfläche als innerstädtische Ausgleichsräume relevant. Dadurch ist in vielen innerstädtischen Bereichen eine gute Erreichbarkeit klimatisch ausgleichender Flächen gewährleistet.

Bei Betrachtung der innerstädtischen Grünflächen fällt auf, dass insbesondere in den Stadtbezirken Meiderich/Beeck, Süd und Rheinhausen ein erhöhter Anteil dieses Klimatotyps auftritt und die vorhandenen Flächen vielerorts Vernetzungsstrukturen aufweisen. Dadurch ergeben sich zusätzlich große zusammenhängende Bereiche, die dem Klima innerstädtischer Grünflächen entsprechen. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die Grünflächen in Duisburg-Meiderich/Beeck zu nennen, die ausgehend von den Grünanlagen im Umfeld des Universitätsgebäudes einerseits in nördliche Richtungen entlang der Alten Emscher weiter verlaufen, sich andererseits nach Nordosten über die Grünflächen bis zu den Emscherwiesen und dem Zechenwäldchen fortsetzen, von dem sie sich bis zum Landschaftspark Duisburg-Nord und darüber hinaus bis zu den Grünflächen des Lehrbauernhofs erstrecken. Trotz der eingeschränkten reliefbedingten Zufuhr von Frischluftmassen in die angrenzende Bebauung ist diesen Flächen eine sehr hohe Bedeutung als Ausgleichsräume zuzusprechen. So wird der

Entstehung großflächiger Wärmeinseln durch die Fähigkeit der Flächen, Frischluft und Kaltluft zu produzieren, entgegengewirkt.

In den Stadtbezirken Hamborn und Walsum hingegen sind neben einzelnen größeren Grünanlagen und Wäldern insbesondere private Hausgärten und Grünflächen zu nennen, die für die Bewohner als klimaökologische Ausgleichsräume mit lokaler Relevanz eine hohe Bedeutung besitzen.

Aufgrund des geringen Vorkommens an Freilandklimatopen in den beiden zuvor genannten Stadtbezirken kann den innerstädtischen Grünflächen und deren Vernetzung also eine besondere stadtklimatische Bedeutung zugesprochen werden. Neben einer von der Zugänglichkeit und Ausstattung der Grünfläche abhängigen Naherholungsfunktion stellen diese Flächen lokale Kalt- und Frischluftproduzenten dar und sorgen während sommerlicher Strahlungsnächte für eine thermische Entlastung der überwärmten Siedlungsbereiche.

Bei kleinen innerstädtischen Grünflächen, die sich eher im privaten Wohnbereich befinden, ist die klimameliorierende Wirkung jedoch sehr lokal begrenzt und eine Fernwirkung ist weitgehend ausgeschlossen. Die positiven Klimaeigenschaften beschränken sich somit in der Regel auf die Flächen selbst („Oaseneffekt“).

Im Süden der Stadt existieren hingegen weitere größere Grünflächen, wie z.B. mehrere Friedhöfe und der Sportpark Duisburg. Reliefinduzierte Kaltluftabflüsse finden jedoch nur vereinzelt statt und beschränken sich weitgehend auf die westlich des Duisburger Stadtwalds befindlichen Flächen. So fließen dem Gefälle entsprechend aus den hoch gelegenen Waldgebieten des Duisburger Stadtwalds während sommerlicher Strahlungsnächte Kaltluftmassen in Richtung Regattabahn ab, um im weiteren Verlauf in abgeschwächter Form bis zu den westlich anschließenden Siedlungsbereichen zu gelangen, und diese mit kühleren und frischeren Luftmassen zu versorgen.

Zu den größeren Parkanlagen, die als Erholungsgebiete eine hohe Bedeutung für die Bevölkerung besitzen und gleichzeitig lokalklimatisch für die angrenzenden Siedlungsgebiete eine wichtige Funktion übernehmen, gehören der Waldfriedhof, der Alte Friedhof, der Duisburger Zoo, der Erholungspark Biegerhof, der Sportpark Süd (Hüttenheim), der Stadtpark in Meiderich, der Landschaftspark Duisburg-Nord und der Revierpark Mattlerbusch.

Während weite Bereiche des Stadtgebietes durch zahlreiche, z.T. großflächige Grün- und Freiflächen gegliedert ist, besteht ein Mangel an innerstädtischen Grünflächen in einigen Bereichen im Stadtbezirk Mitte (z.B. zwischen Landfermannstraße und Friedrich-Wilhelm-Straße), in Teilen des Bezirks Hamborn sowie in Alt-Homborn und Ruhrort. Ferner sind die großflächigen Gewerbe- und Industriegebiete vielfach mit Frei- und Grünflächen unterversorgt (z.B. das Gewerbegebiet in Bliersheim, die Industriegebiete in Marxloh und Bruckhausen, die Hüttenwerke in Hochfeld und Angerhausen).

Für einen Großteil des Stadtgebietes von Duisburg ist, wie für den gesamten westlichen Teil der Bundesrepublik Deutschland, aufgrund der vorherrschenden Großwetterlagen die Hauptwindrichtung Südwest charakteristisch. Lediglich im südöstlichen Bereich von Duisburg dominieren östliche bis südliche Richtungen, die auf einer Beeinflussung der Windströmungen durch die Leit- und Umlenkeffekte der Höhenzüge des Bergischen Landes beruhen (s. RVR 2010). Im gesamten Stadtgebiet treten während Schwachwindsituationen (autochthone Wetterlagen) hingegen vermehrt nordöstliche Windrichtungen auf. Bei einem übergeordneten Windfeld mit Anströmung aus südwestlicher Richtung bzw. südlicher bis östlicher Richtung (gilt für den südöstlichen Bereich des Stadtgebiets) werden vor allem Siedlungsbereiche mit Frischluft versorgt, die nordöstlich bzw. nordwestlich von großen Freiflächen liegen (z.B. die Siedlung von Wedau nördlich der Sechs-Seen-Platte, die Siedlungen nördlich des Großenbaumer Sees, das Gewerbegebiet zwischen Bahntrasse und Keniastraße, die Industrieflächen von Ungelsheim und die bebauten Flächen entlang der Bahntrasse in Friemersheim/Rheinhausen-Mitte).

Neben den Frischluftzufuhrbereichen, die bei allochthonen Wetterlagen wirksam sind, existieren in Duisburg mehrere Luftleitbahnen, über die aufgrund ihrer geringen Oberflächenrauigkeit Luftmassen in die Ballungsbereiche der Stadt transportiert und dort zu einer Reduzierung der thermischen Belastung beitragen können. Als Luftleitbahnen in Duisburg fungieren beispielsweise die Gleisanlagen und die A 59 in Duisburg-Mitte, die von Buchholz im Süden bis zur Anschlussstelle Duisburg-Hochfeld der A 59 parallel verlaufen und bedingt durch erhöhte Luftschadstoffbedingungen der Autobahn als belastete Luftleitbahn(en) wirksam ist (sind). Im weiteren Verlauf der Bahntrasse nach Norden bis zum Duisburger Zentrum (Landfermannstraße) verläuft die Bahntrasse in größerem Abstand zur A 59 und kann dort insbesondere der an die Luftleitbahn anschließenden Randbebauung Frischluft liefern. Als weitere Luftleitbahnen, die neben kühleren auch frischere und unbelastete Luftmassen transportieren, sind die Regattabahn und die Brachflächen in Bissingheim im westlichen Anschluss an die dort verlaufende Bahntrasse zu nennen. Wasserflächen sind als Luftleitbahnen besonders wirksam. Somit sind auch der Rhein, der Außenhafen und die Ruhr bzw. der Hafenskanal als Luftleitbahnen relevant. Bedingt durch erhöhte Luftschadstoffemissionen des Schiffverkehrs werden jedoch vermehrt belastete, wenn auch kühlere Luftmassen, in die angrenzende Bebauung transportiert.

Zu den Ausgleichsräumen in Duisburg zählen neben den bereits beschriebenen Freilandflächen und innerstädtischen Grünflächen auch die Wälder im Stadtgebiet. Insgesamt nehmen die Waldklimatope in Duisburg mit fast 10 % den drittgrößten Flächenanteil ein. Zu den weitläufigen Waldgebieten in Duisburg zählen der Duisburger Stadtwald (drittgrößter Stadtwald in Deutschland!), die Huckinger Mark und die Grindsmark sowie das Waldgebiet

des Baerler Buschs. Diese Waldgebiete nehmen aufgrund ihrer Größe und Lage eine (über-)regionale Funktion als Freizeit- und Erholungsgebiete ein und dienen auch als kühle klimatische Zufluchtsorte an heißen Tagen. Zudem ist diesen Waldarealen aus regionalklimatischer Sicht eine wichtige Filterfunktion für Luftschadstoffe und somit auch als Frischluftlieferanten zuzuschreiben. Kleinere, in die Bebauung eingestreute Waldgebiete befinden sich vor allem im Stadtbezirk Meiderich/Beeck, in Rheinhausen und in Walsum. Bezüglich ihrer klimaökologischen Relevanz ist jedoch nicht nur die Größe der Flächen, sondern auch ihre Lage relevant. Insbesondere Waldbereichen im direkten Umfeld größerer Emittenten von Luftschadstoffen (z.B. Gewerbe-/Industriegebiete oder Hauptverkehrsstraßen) und/oder im (fußläufigen) Einzugsbereich der Wohnbebauung kommt aus lufthygienischer sowie bioklimatischer Sicht eine besondere Bedeutung zu, da diese Wälder einerseits eine Filterfunktion gegenüber Luftschadstoffen ausüben und andererseits aufgrund der reduzierten Lufttemperaturen an heißen Sommertagen als wichtige Regenerations- und Erholungsräume für die Bevölkerung dienen. Hervorzuheben sind hierbei zum Beispiel die südlich der A 42 befindlichen Waldflächen in Beeckerwerth, welche zumindest teilweise einen Puffer zwischen den industriellen Lasträumen, der Autobahn und den angrenzenden Wohngebieten bilden und somit einerseits zur Filterung von Luftschadstoffen beitragen, aber gleichzeitig auch den städtischen Hitzestress mindern. Ebenso zu nennen ist der Driesenbusch in Walsum (Aldenrade), der als Puffer zwischen Wohnbereich und Industrie-/Gewerbeflächen wirksam ist und gleichzeitig bedingt durch seine Größe zur Filterung der Luftschadstoffe beiträgt.

Die Gewässer-/Seenklimatope nehmen mit ca. 8,8 % einen relativ hohen Flächenanteil im Stadtgebiet ein und beinhalten im Wesentlichen die Wasserflächen von Rhein und Ruhr sowie die Hafenbecken und die Seen im Duisburger Süden (Sechs-Seen-Platte, Rahmer See, Großenbaumer See, Remberger See), in Rheinhausen (Toepper See, Kruppsee) und in Baerl (Lohheider See und Baggersee). Die klimatische Wirkung von Gewässern hängt sehr stark mit der jeweiligen Größe und der Lage im Stadtgebiet zusammen. Bei einer isolierten Lage sowie bei einer geringen Größe sind die positiven klimatischen Effekte der Wasserflächen zumeist lediglich auf die unmittelbare Umgebung beschränkt. Die o.g. Seen nehmen jedoch überwiegend großflächige Bereiche ein und tragen tagsüber zur Abkühlung umliegender Siedlungsgebiete bei, wobei deren Wirksamkeit stellenweise bis maximal 150 m in die Bebauung hinein nachweisbar ist und sich durch eine Abkühlung von ca. 2°C (um 4:00 Uhr) bemerkbar macht. Aufgrund der hohen Wärmekapazität der Wasserflächen kühlen diese jedoch während der Nachtstunden kaum ab und weisen somit Temperaturen auf, die ebenfalls in weiten Teilen der Innenstadtbebauung charakteristisch sind. Die linearen Strukturen von Fließgewässern können wiederum eine regionalklimatisch relevante Funktion als rauigkeitsarme Luftleitbahn während windschwacher Strahlungstage einnehmen. Hier sind insbesondere der Rhein, die Ruhr und die Hafenbereiche sowie die Regattabahn zu nennen.

Zusammen nehmen die Klimatope der klimatischen Ausgleichsräume (Freiland- und Waldklima und Klima innerstädtischer Grünflächen sowie Gewässerlima) 56,3 % des Stadtgebietes von Duisburg ein. Während über 8 % der Gesamtfläche Duisburgs durch Straßen- und Gleisanlagen nahezu vollversiegelt sind, entfallen 35,6 % auf die unterschiedlich stark versiegelten und bebauten Klimatope (Vorstadt-, Stadtrand-, Stadt-, Innenstadt-, Gewerbe- und Industrieklima).

Das Vorstadtklima nimmt dabei mit 1,9 % an der gesamten Stadtfläche den geringsten Anteil an der Fläche der bebauten Klimatope ein. Zu finden ist dieser Klimatoptyp in erster Linie im Außenbereich bzw. in den Randbereichen der Bebauung, die in unbebaute Flächen übergehen. Hierzu zählen v.a. einige Einzelhöfe oder Splittersiedlungen, wie sie z.B. in Homberg/Ruhrort/Baerl (Binsheim) vorkommen. Aber auch die innerhalb der dichteren Bebauung werden die als Schrebergärten genutzten Areale diesem Klimatoptyp zugeordnet und befinden sich meist im Übergangsbereich von der Bebauung in die angrenzenden Grünflächen. Dabei ist es durchaus möglich, dass die Vorstadtklimatope direkt an die hoch verdichtete Innenstadtbebauung angrenzen (z.B. in der Dennewitzstraße in Meiderich). Insgesamt ist dem Klimatoptyp des Vorstadtklimas innerhalb der dichten Bebauung von Duisburg jedoch eine eher untergeordnete Rolle zuzusprechen.

Hingegen umfasst das Stadtrandklimatop den größten Anteil (8,5 %) an den bebauten Klimatopen im Stadtgebiet (ohne Gewerbe- und Industriegebiete). Insbesondere in den Außenbezirken sind weite Teile der Wohn- und Mischbebauung dem Stadtrandklima, welches grundsätzlich mit noch verhältnismäßig günstigen bio- und immissionsklimatischen Bedingungen charakterisiert werden kann, zuzuordnen, aber auch in Teilen des Stadtbezirks Mitte ist dieser Klimatoptyp vereinzelt ausgewiesen worden (z.B. im Dellviertel und im Duisern am Kaiserberg). Hohe Anteil dieses Klimatoptyps finden sich zudem in den Stadtbezirken westlich der Ruhr sowie in den Stadtbezirken Süd, Walsum und Hamborn.

Aus bioklimatischer Sicht stärker belastete Räume stellen hingegen die Stadtklimatope dar, welche unter anderem durch eine stärker verdichtete Bebauung mit entsprechend erhöhter Versiegelung und geringerem Grünflächenanteil charakterisiert sind. Die Stadtklimatope nehmen in Duisburg etwa 8,2 % des gesamten Stadtgebietes ein. Neben einer Vielzahl dieser Flächen verteilt über alle Stadtteile sind große Konzentrationen von Stadtklimatopen insbesondere im Stadtbezirk Mitte (Duisern, Neudorf), in Unter- und Mittel-Meiderich und in Rheinhausen-Mitte verortet.

Die Innenstadtklimatope nehmen zwar mit 3,1 % einen relativ geringen Anteil an der gesamtstädtischen Fläche ein. Allerdings umfassen sie im Zentrum von Duisburg ein größeres Areal, welches sich beidseitig des Hauptbahnhofs erstreckt. Während entlang der Königstraße ausschließlich Innenstadtklimatope ausgewiesen wurden, erfolgt etwa südlich der Friedrich-

Wilhelm-Straße bzw. nördlich der Köhnenstraße eine Durchmischung von Stadtklimatopen mit einer gleichzeitigen Zunahme an innerstädtischen Grünflächen.

Jedoch schließen westlich der Innenstadt Klimatope weitere Flächen der bioklimatisch ebenfalls als ungünstig zu bewertenden Gewerbe- bzw. Industrieklimatope an. Die starke Überbauung und die dadurch erhöhte Oberflächenrauigkeit können neben den nächtlichen Überwärmungen auch starke Modifikationen des Windfeldes im Innenstadtbereich bedeuten. Dies kann einerseits durch eine erhöhte Turbulenz und Böigkeit sowie Kanalisierungseffekte im Straßenraum zu Winddiskomfort führen, andererseits kann durch eine insgesamt eingeschränkte Durchlüftungssituation eine Schadstoffakkumulation erfolgen. Daher kann der vorgenannte Bereich als bioklimatischer Belastungsraum gekennzeichnet werden. Dies trifft zudem auf die angrenzenden Gewerbe- und Industriegebiete entlang des Auenhafens sowie entlang der Ruhr zu.

Neben dem beschriebenen Bereich im Zentrum von Duisburg wurden weitere, flächenmäßig ähnlich große Bereiche im Stadtbezirk Homberg (v.a. Alt-Homberg), Meiderich, Ruhrort und vor allem Hamborn als Innenstadtklimatope eingestuft. Dabei ergibt sich vor allem in Hamborn aufgrund der an die Innenstadtklimatope angrenzenden, ebenfalls bioklimatisch ungünstigen Bereiche der Stadtklimatope und der Industrie- und Gewerbeflächen, eine großflächige Ausdehnung der Wärmeinsel.

Die Gewerbe- und Industrieklimatope nehmen zusammen insgesamt einen Flächenanteil von 13,8 % am Stadtgebiet ein. Sowohl in den Gewerbe- und Industriegebieten als auch im Bereich der Stadt- und Innenstadtklimatope können der hohe Versiegelungsgrad und der Mangel an verdunstungsaktiven Grün- und Wasserflächen während austauscharmer Wetterlagen im Sommer zu Schwüle- und Hitzebelastungen der Bevölkerung sowie zu teils hohen nächtlichen Überwärmungen (städtische Wärmeinseleffekte) führen.

Hinsichtlich der Industrieklimatope sowie der Emittenten mit lokaler und regionaler Bedeutung lässt sich eine Konzentration auf die ausgedehnten Flächen entlang der Ruhr bzw. entlang des Rheins feststellen. Weitere Standorte von ebenfalls großflächigen Gewerbeansiedlungen sind beispielsweise im Stadtbezirk Hamborn (im Umfeld des Konrad-Adenauer-Rings und der Theodor-Heuss-Straße) und im Stadtbezirk Rheinhausen (nördlich der Moerser Straße) vorzufinden.

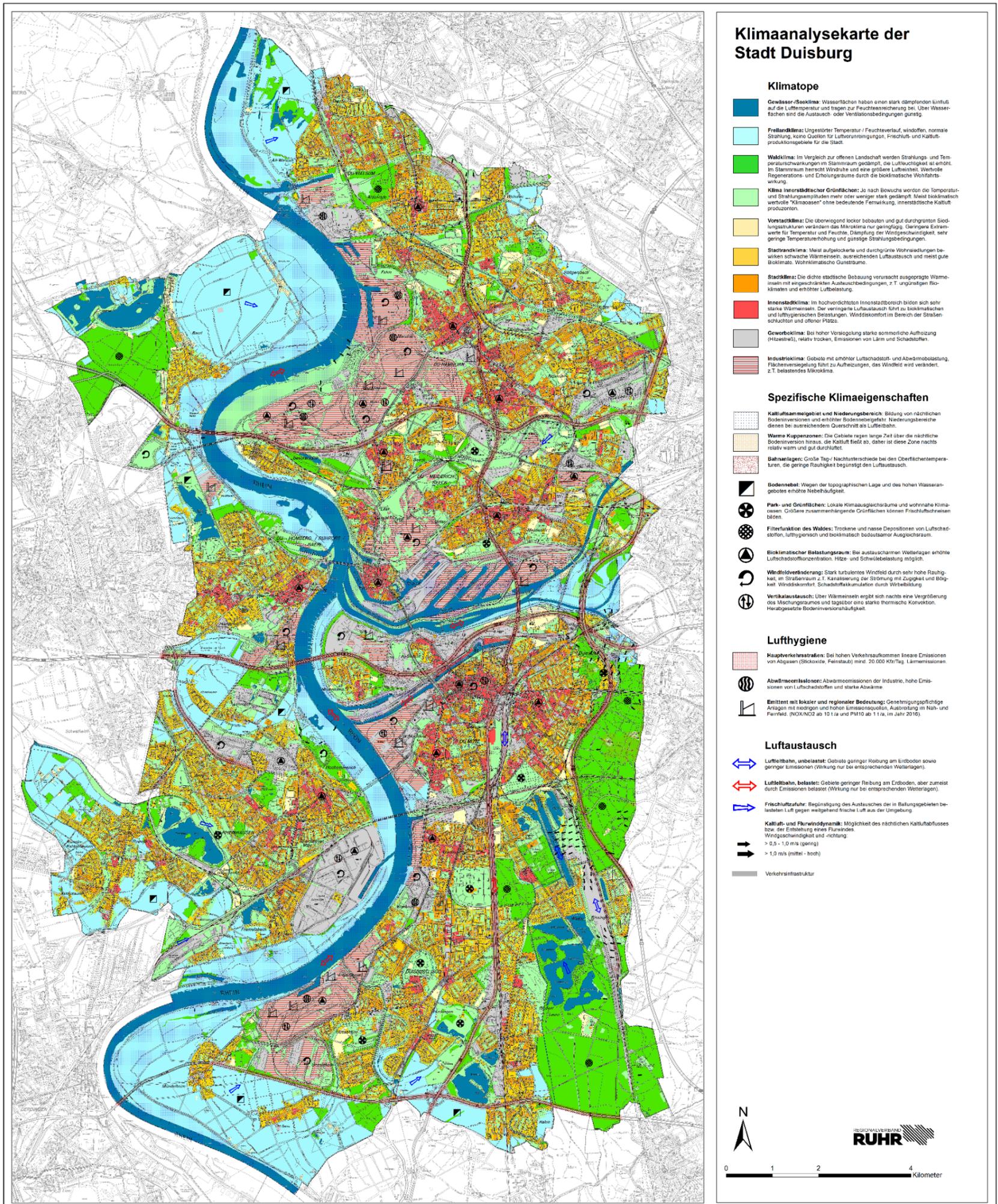
Als Kaltluftsammlgebiet bzw. Niederungsbereiche wurden in Duisburg der Rhein und seine flussnahen Auenbereiche sowie die Ruhr mit dem Hafensreal ausgewiesen. Dies bedeutet, dass lokal gebildete Kaltluftmassen von diesen Flächen ohne fehlenden übergeordneten Strömungsantrieb nicht bzw. kaum abfließen und sich Kaltluftzuflüsse von angrenzenden Freiland- und Grünflächen in diesen Bereichen sammeln. Infolge der Kaltluftansammlung kann es zur Bildung einer bodennahen Inversionsschicht kommen, welche durch starke

Einschränkungen des vertikalen Luftaustauschs charakterisiert sind. Im Bereich von Freiland- und Grünflächen bedeutet dies eine vermehrte Bildung von Bodennebel. Die Inversionsbildung kann eine bodennahe Anreicherung lokal emittierter Luftschadstoffe zur Folge haben, was aus immissionsklimatischer Sicht als ungünstig zu bewerten ist. Dies ist aufgrund des erhöhten Vorhandenseins von Emittenten insbesondere für die Rhein- und Ruhrniederung von Relevanz.

Die sogenannten warmen Kuppenzonen zeichnen sich dadurch aus, dass sie lange Zeit aus den nächtlichen Bodeninversionen herausragen. Insbesondere bei einer Freiland- oder Grünflächennutzung und in eingeschränktem Maße auch bei einer Waldnutzung kann von diesen Kuppenzonen ein zumeist radialer nächtlicher Kaltluftabfluss erfolgen, wodurch die Kuppenzonen vergleichsweise relativ warm bleiben. Insbesondere für angrenzende überwärmte Stadtgebiete können warme Kuppenzonen als nächtliche Kaltluftlieferanten daher klimatisch relevante geomorphologische Strukturen darstellen. Als warme Kuppenzonen konnten im Stadtgebiet von Duisburg lediglich der Kaiserberg in Duisern und die Kuppen im Duisburger Stadtwald ausgewiesen werden.

Neben dem genannten Bereich der warmen Kuppenzone, für die auch die FITNAH-Modellierung einen Kaltluftabfluss simuliert hat, sind im Stadtgebiet weitere von Haldenkörpern ausgehende Kaltluftmassentransporte zu verzeichnen. So wurden sowohl vom Alsumer Berg in Marxloh als auch den Halden in Hochemmerich Kaltluftabflüsse modelliert. Die von den Halden abfließenden Kaltluftmassen fließen zum Teil in Richtung des Rheins ab, können aber auch zu einer leichten Entlastung der umliegenden hochversiegelten Bereiche beitragen, was insbesondere östlich des Alsumer Bergs im Bereich der Industriegebiete zwischen Kläranlage und Matenastraße ersichtlich wird.

Karte 4.2: Klimaanalysekarte der Stadt Duisburg



6 Die Stadt Duisburg im Zeichen des globalen Klimawandels

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen des globalen Klimawandels auf das Stadtgebiet von Duisburg erläutert. Zu diesem Zweck wird zunächst eine kurze Übersicht der beobachteten und der für die Zukunft projizierten globalen Klimaänderungen gegeben. Des Weiteren werden Untersuchungen und Modellergebnisse zu den Ausprägungen des weltweiten Klimawandels auf der regionalen Ebene in der Metropole Ruhr aufgezeigt. Anschließend zeigen die zukünftige Entwicklung klimatischer Kennwerte sowie die Darstellung derzeitiger und zukünftiger Wärmeinselbereiche von Duisburg, welche lokalen Auswirkungen der globale Klimawandel im Stadtgebiet hat.

6.1 Globaler Klimawandel

In der Erdgeschichte hat es bereits mehrfach erhebliche Klimaschwankungen gegeben, die auf natürliche Ursachen zurückzuführen sind. Hierzu zählen sowohl extraterrestrische Ursachen, wie Variationen der Sonnenaktivität und der Gezeitenkräfte sowie Meteoreinschläge, als auch terrestrische Ursachen, wie Kontinentalverschiebungen und Vulkanausbrüche, die für einen Wechsel zwischen den Warmklimaten und den Eiszeitaltern in der Geschichte unseres Planeten sorgten (Schönwiese 2003). Es gilt heute allerdings als erwiesen, dass die Klimaänderungen seit Mitte des 18. Jahrhunderts, welche sich u.a. in einem Anstieg der global gemittelten Oberflächentemperatur (vgl. Abb. 6-1) darstellt, hauptsächlich durch den Menschen hervorgerufen werden (IPCC 2013a).

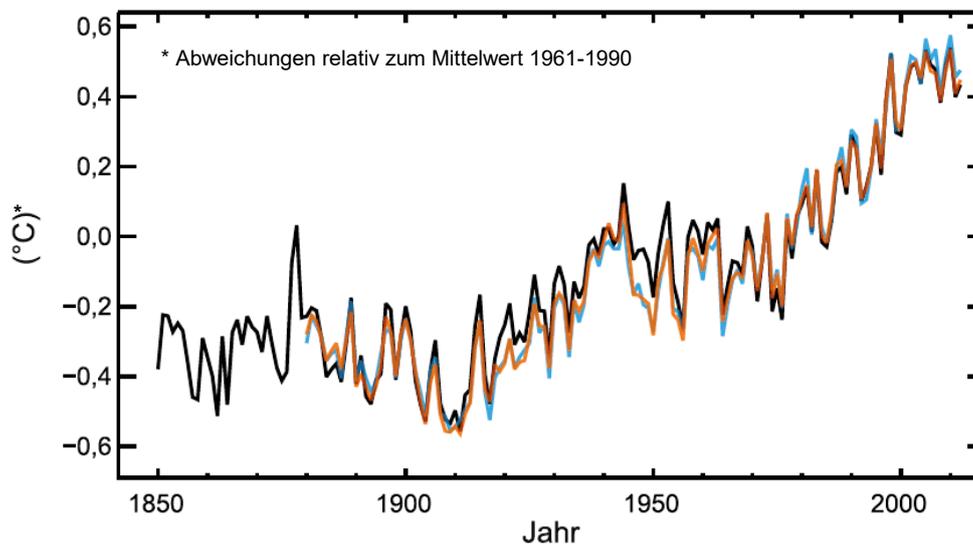


Abb. 6-1: Beobachtete globale mittlere kombinierte Land-Ozean-Oberflächentemperaturanomalie von 1850-2012 (verändert nach IPCC 2013a)

Im Zeitraum 1880-2012 ist die global gemittelte Land-Ozean-Oberflächentemperatur im linearen Trend um 0,85 °C angestiegen. Der Temperaturanstieg der Erdoberfläche weist dabei in Abhängigkeit der geographischen Lage, der Topographie sowie der Landnutzung regionale Unterschiede auf, wie Abb. 6-2 zeigt (IPCC 2013a).

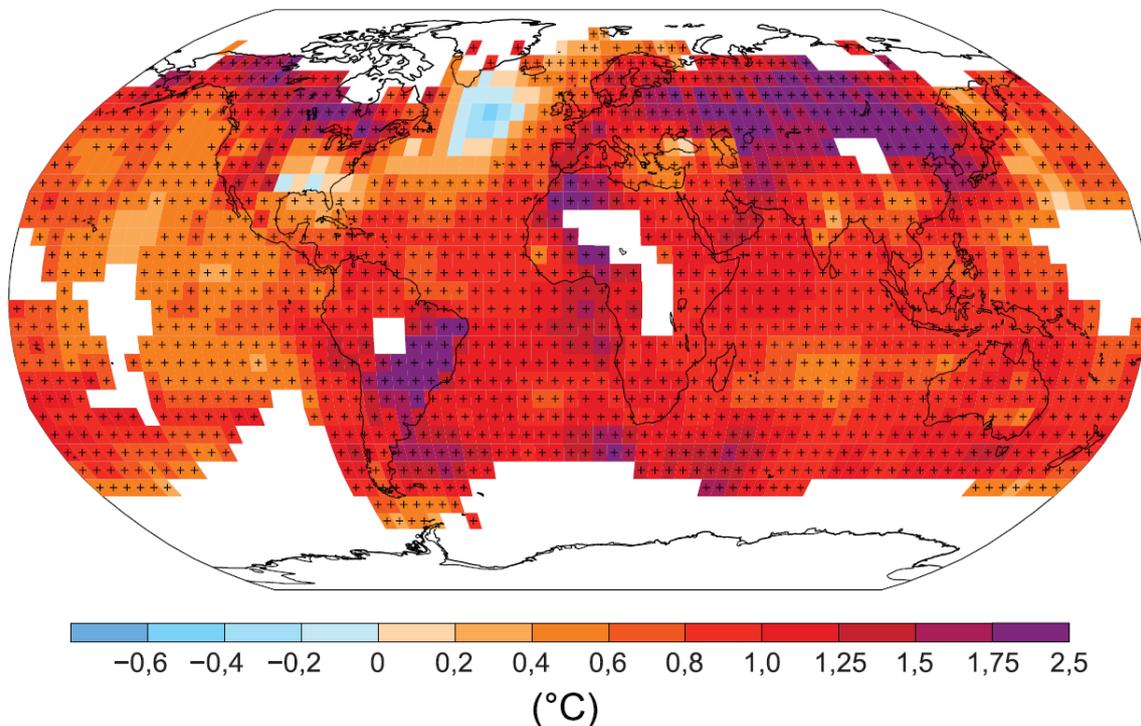


Abb. 6-2: Räumliche Verteilung der beobachteten Veränderung der Erdoberflächentemperatur von 1901-2012 (IPCC 2013a)

Auf den ersten Blick scheint der mittlere globale Temperaturanstieg allein nicht besonders Besorgnis erregend, jedoch wirkt sich dieser in vielfältiger Weise auf die verschiedenen Subsysteme der Erde und deren Wechselwirkungen aus. Beispielsweise konnten in den letzten Jahrzehnten ein Anstieg der Wassertemperatur des oberen Ozeans (0-700 m) sowie regionale Veränderungen der Salzgehalte des Meerwassers beobachtet werden. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Gletscherschmelze hat nahezu weltweit in den letzten Jahrzehnten zugenommen. Während die mittlere jährliche Ausdehnung des arktischen Meereises und die Ausdehnung der Schneebedeckung in der Nordhemisphäre abgenommen haben, steigen die Temperaturen der Permafrostböden in den meisten Regionen an. Der Temperaturanstieg des Ozeans sowie die Gletscherschmelze bedingen einen Anstieg des Meeresspiegels mit einer in den letzten Jahrzehnten zunehmenden Geschwindigkeit (IPCC 2013a).

Zudem äußert sich der globale Klimawandel nicht nur in einer Zunahme des mittleren globalen Temperaturniveaus, sondern auch durch Veränderungen im Auftreten von Extremwetterereignissen. So wird seit etwa 1950 beobachtet, dass die Anzahl warmer Tage und Nächte weltweit zugenommen hat, die Häufigkeit von Hitzewellen in Teilen Europas,

Asiens und Australiens angestiegen ist und auch die Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen insbesondere in Nordamerika und Europa zugenommen hat (IPCC 2013).

Als Hauptursache für diese beobachteten Klimaveränderungen gelten die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen (THG) durch die Verbrennung fossiler Energieträger, Landnutzungsänderungen (z. B. Waldrodungen) sowie der Ackerbau und die Viehzucht. Die THG-Emissionen sind infolge des weltweiten Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums seit der vorindustriellen Zeit stark angestiegen, was heute zu den höchsten Konzentrationen in der Atmosphäre seit mindestens 800.000 Jahren führte. Abb. 6-3 zeigt die Entwicklung der atmosphärischen Konzentrationen der drei Treibhausgase Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffmonoxid bzw. Lachgas (N_2O) zwischen 1850 und 2012 (IPCC 2014).

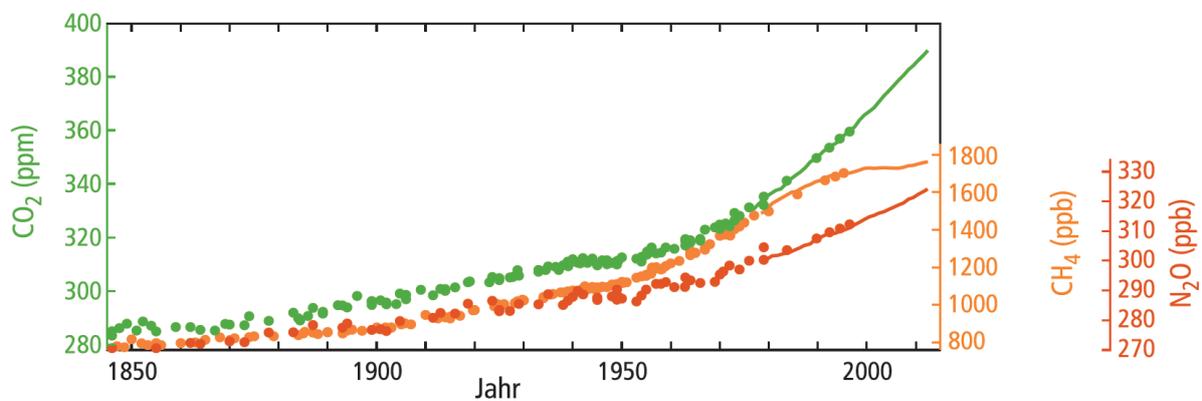


Abb. 6-3: Atmosphärische Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffmonoxid (N_2O) (verändert nach IPCC 2014)

Dabei haben sich schätzungsweise nur 40 % der seit 1750 anthropogen emittierten CO_2 -Emissionen in der Atmosphäre angereichert, während das restliche CO_2 der Atmosphäre durch die Aufnahme von Pflanzen, Böden und der Ozeane wieder entzogen wurde. Letztere haben allein 30 % des anthropogenen CO_2 aus der Atmosphäre gebunden, was eine Absenkung des pH-Wertes und somit eine einsetzende Versauerung der Ozeane mit weitreichenden Folgen für deren Ökosysteme verursacht hat. So sind bereits Veränderungen in den Populationsgrößen, Verbreitungsgebieten und jahreszeitlichen Aktivitäten vieler mariner Arten zu beobachten, die auf den Klimawandel zurückzuführen sind. Dies trifft zudem auch auf zahlreiche Süßwasserarten und Landlebewesen zu. Aber auch erste direkte Folgen des Klimawandels für den Menschen sind bereits spürbar. Beispielsweise wird in einigen Regionen bereits die Qualität und Verfügbarkeit von Wasserressourcen beeinträchtigt und auch negative Auswirkungen auf Ernteerträge können dem Klimawandel zugeordnet werden, um nur einige wenige Folgen an dieser Stelle zu benennen (IPCC 2013a; IPCC 2014).

Um das zukünftige Ausmaß des globalen Klimawandels abschätzen und gezielte Mitigations- und Adaptationsmaßnahmen entwickeln zu können, lässt der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) die zukünftige Klimaentwicklung mit einer Vielzahl von Klimamodellen unterschiedlicher Komplexität von mehreren unabhängigen Forschungsgruppen simulieren, deren Ergebnisse zu Multimodell- bzw. Ensembleergebnissen, den Repräsentativen Konzentrationspfaden (Representative Concentration Pathways - RCPs), zusammengefasst werden, um den wahrscheinlichsten Wertebereich zu erreichen. Dabei werden vier RCP-Szenarien verwendet, die von unterschiedlichen Änderungen des Strahlungsantriebes (in W/m^2) zum Ende des 21. Jahrhunderts ausgehen. Diese beschreiben unterschiedliche Pfade der THG-Emissionen und atmosphärischen THG-Konzentrationen, wodurch unterschiedliche Entwicklungen des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums, der Energie- und Landnutzung, sowie der Einführung neuer Technologien und der Bedeutung der Klimapolitik repräsentiert werden. Alle vier RCPs gehen dabei von einer gegenüber der heutigen Situation höheren atmosphärischen CO_2 -Konzentration im Jahre 2100 aus, allerdings in unterschiedlichem Maße. Während das RCP2.6 ein konsequentes Minderungsszenario darstellt und davon ausgeht, dass die atmosphärische CO_2 -Konzentration ihren Höhepunkt im Jahr 2050 (443 ppm) erreicht und 2100 (421 ppm) nur leicht über den heutigen Werten liegen wird, beschreibt das Szenario RCP8.5 global weiterhin stark ansteigende Emissionen, die 2100 in einer sehr hohen CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre von 936 ppm resultieren. RCP4.5 und RCP6.0 liegen in ihren Annahmen zwischen diesen beiden Extremen (IPCC 2013a; IPCC 2014; Meinshausen et al. 2011).

Laut der Klimaprojektionen führen die zu erwartenden anhaltenden Emissionen von Treibhausgasen zu einer weiteren globalen Erwärmung. Abb. 6-4 zeigt die simulierten Änderungen der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur von 1950 bis 2100 bezogen auf den Referenzzeitraum 1986 bis 2005 für die unterschiedlichen Szenarien. Es wird projiziert, dass in Abhängigkeit vom Emissionsszenario die mittlere globale Erdoberflächentemperatur gegen Ende des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich um $0,3\text{ °C}$ bis $1,7\text{ °C}$ (RCP2.6), $1,1\text{ °C}$ bis $2,6\text{ °C}$ (RCP4.5), $1,4\text{ °C}$ bis $3,1\text{ °C}$ (RCP6.0) bzw. $2,6\text{ °C}$ bis $4,8\text{ °C}$ ansteigen wird (IPCC 2013a; IPCC 2013b).

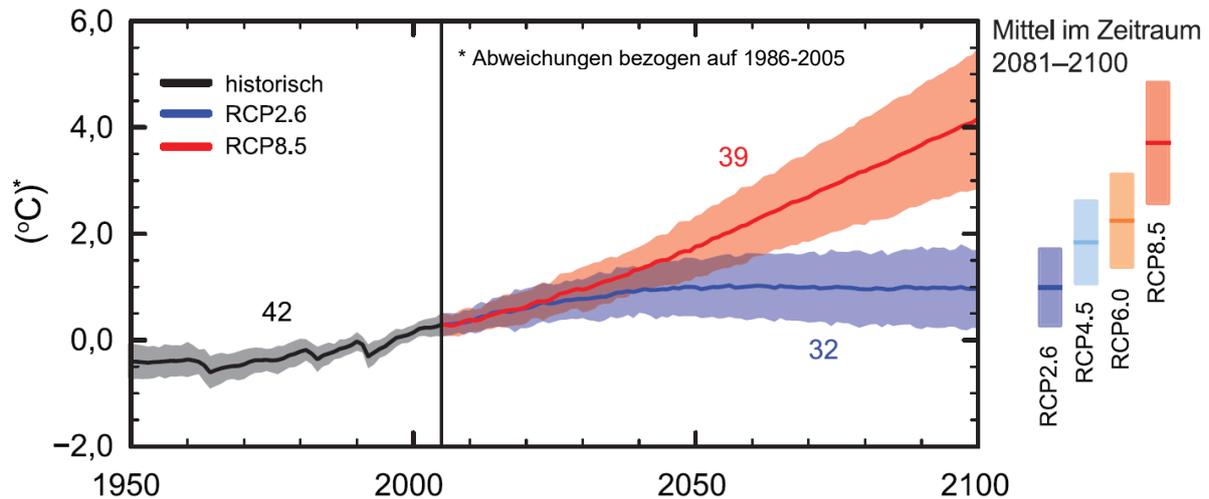


Abb. 6-4: Multimodell-simulierte Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur von 1950 bis 2100 (verändert nach IPCC 2013a)

Entsprechend den beobachteten Temperaturentwicklungen der Vergangenheit weisen auch die projizierten globalen Erwärmungstrends für das 21. Jahrhundert deutliche regionale Unterschiede auf (vgl. Abb. 6-5). Dabei wird sich das Gebiet der Arktis am stärksten erwärmen und die Erwärmung insgesamt über den Kontinenten im Vergleich zu den Ozeanen höhere Werte einnehmen. Folglich werden sich über den meisten Landregionen warme Temperaturextreme und Hitzewellen mehren und an Intensität gewinnen, kalte Extreme hingegen an Auftrittshäufigkeit verlieren. Die global steigenden Temperaturen im Laufe des 21. Jahrhunderts sorgen zudem für regionale Änderungen im globalen Wasserkreislauf. Während die mittleren Jahresniederschläge in den hohen Breiten und in Äquatornähe über dem Pazifik deutliche Anstiege aufweisen, werden die Niederschläge in den Subtropen und vielen bereits heute trockenen Regionen der mittleren Breiten abnehmen. Auch bezüglich der Niederschläge ist davon auszugehen, dass sich Extremereignisse häufen und an Intensität gewinnen werden. Darüber hinaus wird ein weiterer Anstieg der Wassertemperatur des oberen Ozeans von 0,6 °C (RCP2.6) bis 2,0°C (RCP8.5) zum Ende dieses Jahrhunderts projiziert sowie ein anhaltender Rückgang der flächenhaften Schneebedeckung in der Nordhemisphäre (7 % unter RCP2.6 bzw. 25 % unter RCP8.5), des arktischen Meereises (43 % unter RCP2.6 bzw. 94 % unter RCP8.5 für den Monat September) und der weltweiten Gletschervolumen (15 bis 45 % unter RCP2.6 bzw. 25 bis 85% unter RCP8.5). Infolgedessen wird der mittlere globale Meeresspiegel weiterhin ansteigen und zwar schneller als bisher. Für den Zeitraum 2081-2100 wurde bezogen auf 1986-2005 ein Anstieg des Meeresspiegels zwischen 0,26 bis 0,55 m (RCP2.6) bzw. 0,45 bis 0,98 m (RCP8.5) simuliert (IPCC 2013a).

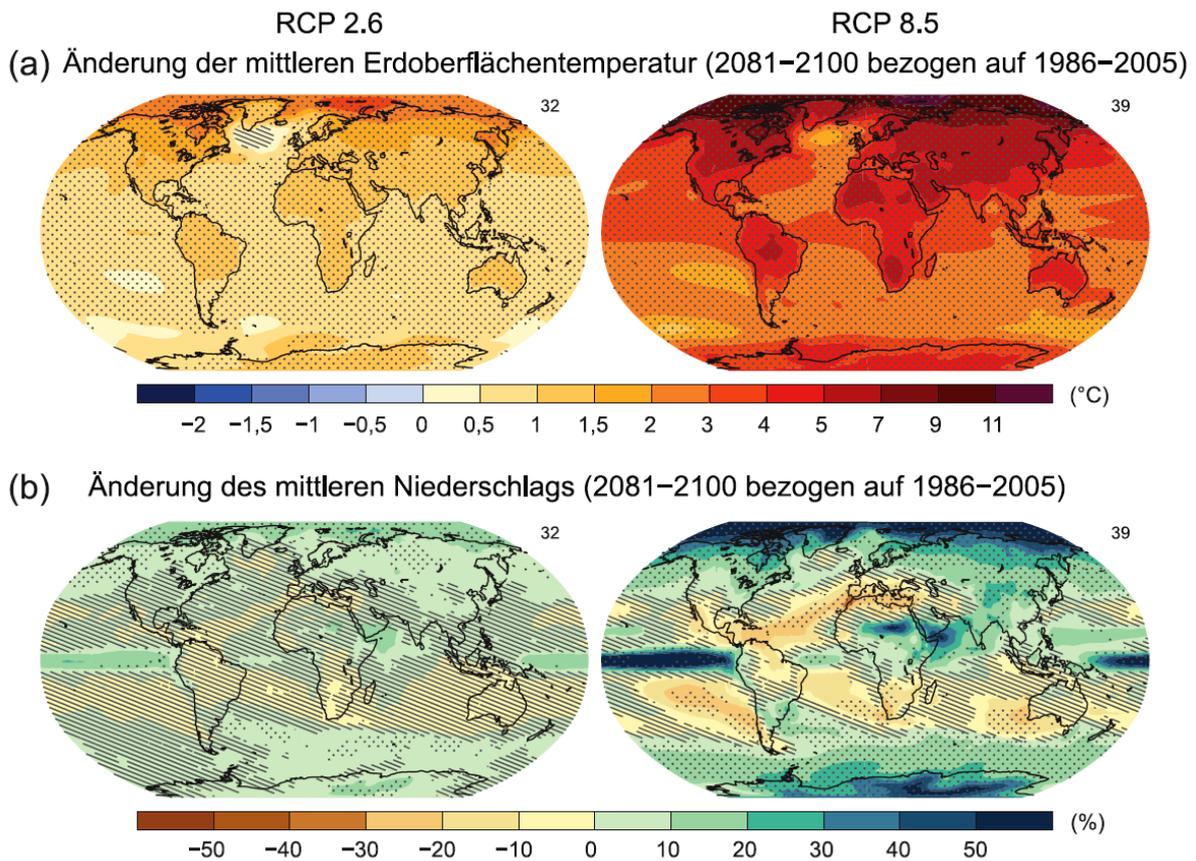


Abb. 6-5: Globale Verteilung der Veränderung der mittleren Erdoberflächentemperatur (a) und des mittleren Niederschlags (b), basierend auf Multimodell-Mittel-Projektionen für 2081-2100 gegenüber 1986-2005 für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 (IPCC 2013a)

Die beschriebenen projizierten Klimaveränderungen im Laufe des 21. Jahrhunderts und deren Auswirkungen auf die verschiedenen Subsysteme unseres Planeten werden die bereits geschilderten Folgen auf Mensch und Natur weiter verschärfen. So werden durch den Klimawandel immer mehr biologische Arten vom Aussterben bedroht sein. Viele Pflanzenarten können ihre geographischen Verbreitungsgebiete nicht schnell genug verlagern. Meeresbewohner sind einer fortschreitenden Ozeanversauerung, geringeren Sauerstoffgehalten und höheren Wassertemperaturen ausgesetzt, was u.a. zu Veränderungen des Fischfangpotenzials führt. Auch auf Ernteerträge von Kulturpflanzen (z.B. Weizen, Mais, Reis) wirkt sich der Klimawandel in vielen Regionen negativ aus. Zudem führt eine Verringerung der Wasserressourcen in immer mehr Bereichen zu einem verstärkten Wettbewerb um dieses Gut. Insgesamt werden die Folgen des Klimawandels vor dem Hintergrund eines steigenden Nahrungsmittelbedarfs infolge des weiteren Wachstums der Weltbevölkerung die globale Ernährungssituation verschärfen. Die Ressourcenknappheit und auch der Anstieg des Meeresspiegels, wodurch einige Küstenregionen, Inseln und tiefliegenden Gebiete bedroht werden, können in klimawandelbedingten Migrationsbewegungen ganzer Bevölkerungsgruppen resultieren (IPCC 2014).

Selbst bei einem sofortigen weltweiten Stopp der anthropogenen THG-Emissionen würden sich viele der vorgenannten Aspekte des Klimawandels (z.B. Ozeanerwärmung und Meeresspiegelanstieg) aufgrund der Trägheit des Gesamtsystems wahrscheinlich noch über die kommenden Jahrhunderte hinweg auswirken (IPCC 2013a). Daher gilt es, sich auf die Ausprägungen und Folgen des Klimawandels einzustellen und Anpassungsstrategien zu entwickeln, die die räumliche Variabilität der projizierten Klimaänderungen berücksichtigt. Hierzu sind zunächst jedoch Kenntnisse der regionalen Ausprägung und Auswirkungen des Klimawandels erforderlich.

6.2 Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Region Ruhr

Dass der Klimawandel auch in der Metropolregion Ruhr bereits stattfindet, lässt sich am besten anhand von Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verdeutlichen. Über das sog. Climate Data Center (CDC) stellt der DWD seine umfangreichen und vielfältigen Klimadaten im Internet zum entgeltfreien Download und zur freien Weiterverwendung bereit. Hierzu zählen u.a. Zeitreihen gemessener Parameter der zahlreichen DWD-Stationen sowie weiterer, daraus abgeleiteter Parameter für die Stationsstandorte und auf Basis der Messdaten in die Fläche interpolierte Rasterfelder für ganz Deutschland, die in einem Geoinformationssystem weiterverarbeitet werden können.

Der Deutsche Wetterdienst betreibt am Standort der Niederlassung Essen an der Wallneyer Straße eine Wetterstation, deren Datenreihen teilweise bis in das späte 19. Jahrhundert zurückreichen. Zwar wurde die Station in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch Vorgängerorganisationen des DWD mehrfach verlegt, allerdings befand sie sich immer in der Nähe des heutigen Standortes. Die Station liegt in einem ländlich geprägten Umfeld und ist somit unbeeinflusst von den stadtklimatischen Bedingungen der zunehmenden Verstädterung Essens im Laufe des 20. Jahrhunderts. Die ausgewerteten Datenreihen umfassen den Zeitraum von 1900 (Niederschlag) bzw. 1901 (Temperatur) und im Falle der klimatologischen Kenntage (Sommertage, Heiße Tage und Frosttage) von 1935 bis in das Jahr 2020. Lediglich vereinzelt sind dabei Datenausfälle in den Jahren des 1. und 2. Weltkrieges zu verzeichnen. Mit Hilfe der langjährigen Datenreihen der Station Essen-Bredeney sowie der im weiteren Verlauf dargestellten, interpolierten Rasterfelder ist es daher möglich, eine Aussage zum Trend der bereits vollzogenen Klimaentwicklung in der Region zu treffen.

In Abb. 6-6 sind die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur von 1901 bis 2020 der DWD-Station Essen-Bredeney dargestellt. Dabei beträgt die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur für den gesamten Zeitraum von 1901 bis 2020 im Essener Süden 9,75 C°. Die geringste Jahresmitteltemperatur wurde mit 8,15 C° im Jahr 1956 verzeichnet, während das Jahr 2020 mit 11,84 C° den höchsten Wert aufweist. Besonders auffällig ist, dass die 12 wärmsten Jahre

(siehe rotgefärbte Balken) dieser 120-jährigen Zeitreihe alle erst nach 1988 aufgetreten sind. Nicht nur an der linearen Regressionsgeraden, sondern auch anhand der vieljährigen Mittelwerte der Lufttemperatur für unterschiedliche 30-jährige Zeiträume (Klimanormalperioden) wird der Anstieg der Jahresmitteltemperaturen in den vergangenen 120 Jahren am Standort Essen-Bredeney deutlich. Während die vieljährige Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum von 1961 bis 1990 noch $9,56\text{ C}^\circ$ betrug, nahm sie in der direkt anschließenden Klimanormalperiode von 1991 bis 2020 bereits einen um fast 1 K erhöhten Wert von $10,54\text{ C}^\circ$ ein. Im Vergleich zu den ersten 30 Jahren des 20. Jahrhunderts ($9,37\text{ C}^\circ$) ergibt sich für den Zeitraum 1991 bis 2020 sogar eine Erhöhung um 1,17 K.

In Abb. 6-7 wird anhand der vieljährigen Monatsmittel der Lufttemperatur deutlich, dass für den Zeitraum von 1991 bis 2020 im Vergleich zu den betrachteten vorherigen 30-jährigen Perioden sowie im Vergleich zum Mittel der gesamten Zeitreihe für alle Monate des Jahres eine Temperaturerhöhung festzustellen ist. Dabei treten die größten Differenzen zwischen der Klimanormalperiode von 1991 bis 2020 und dem Mittel des Gesamtzeitraums im April (+1,5 K), Juli und August (jeweils +1,1 K) auf, während die geringsten mittleren Temperaturerhöhungen in den Monaten September, Oktober und Dezember (jeweils +0,5 K) festzustellen sind.

Neben einer Erhöhung der Jahresmitteltemperaturen und der vieljährigen Monatsmitteltemperaturen konnte anhand der langjährigen Datenreihen des DWD für die Station Essen-Bredeney auch eine deutliche Zunahme der Häufigkeit von Sommertagen (Tages-Maximum der Lufttemperatur $\geq 25\text{ }^\circ\text{C}$) und Heißen Tagen (Tages-Maximum der Lufttemperatur $\geq 30\text{ }^\circ\text{C}$) nachgewiesen werden (siehe Abb. 6-8 und 6-9). Während die jährliche Anzahl an Sommertagen im Zeitraum von 1961 bis 1990 im Mittel noch 21,7 betrug, stieg dieser Wert in der darauffolgenden Klimanormalperiode (1991-2020) auf im Mittel 32,2 Tage an, was einer Erhöhung von knapp 50 % entspricht. Hinsichtlich der Heißen Tage ist von im Mittel 3,0 (1961-1990) auf 6,7 (1991-2020) sogar mehr als eine Verdoppelung zu konstatieren. Zudem ist in Abb. 6-10 ein deutlicher Rückgang der jährlichen Anzahl der Frosttage (Tages-Minimum der Lufttemperatur $< 0\text{ }^\circ\text{C}$) zu beobachten. Traten im Zeitraum von 1961 bis 1990 im Mittel noch 53,7 Forsttage auf, so waren es zwischen 1991 und 2020 im Durchschnitt nur 45,2 Forsttage, was einer Reduzierung um 15,8 % entspricht.

Bezüglich der Jahressummen der Niederschlagshöhe (siehe Abb. 6-11) lässt sich kein signifikanter Trend innerhalb der Zeitreihe von 1900 bis 2020 am Standort im Essener Süden erkennen. Der mittlere jährliche Niederschlag für den gesamten Zeitraum beträgt 913,2 mm,

wobei die natürlichen Schwankungen einen Wertebereich zwischen 573,0 mm (1959) und 1.252,2 mm (1998) einnehmen.

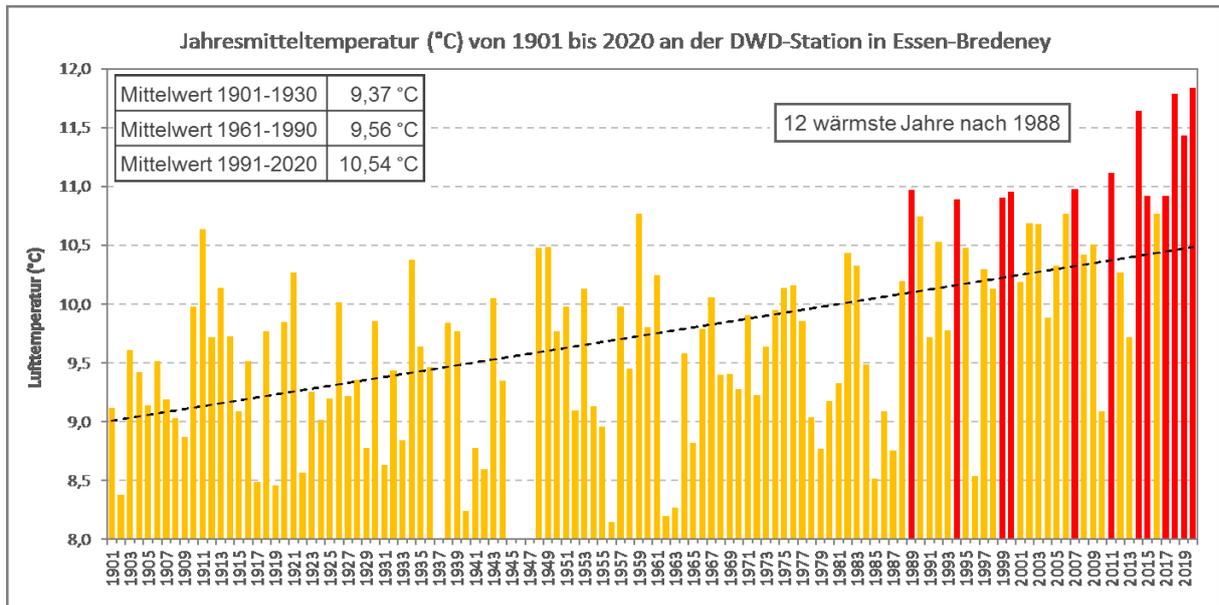


Abb. 6-6: Jahresmitteltemperaturen (°C) von 1901 bis 2020 an der DWD-Station in Essen-Bredene (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Jahresmittel der Stationsmessungen der Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021)

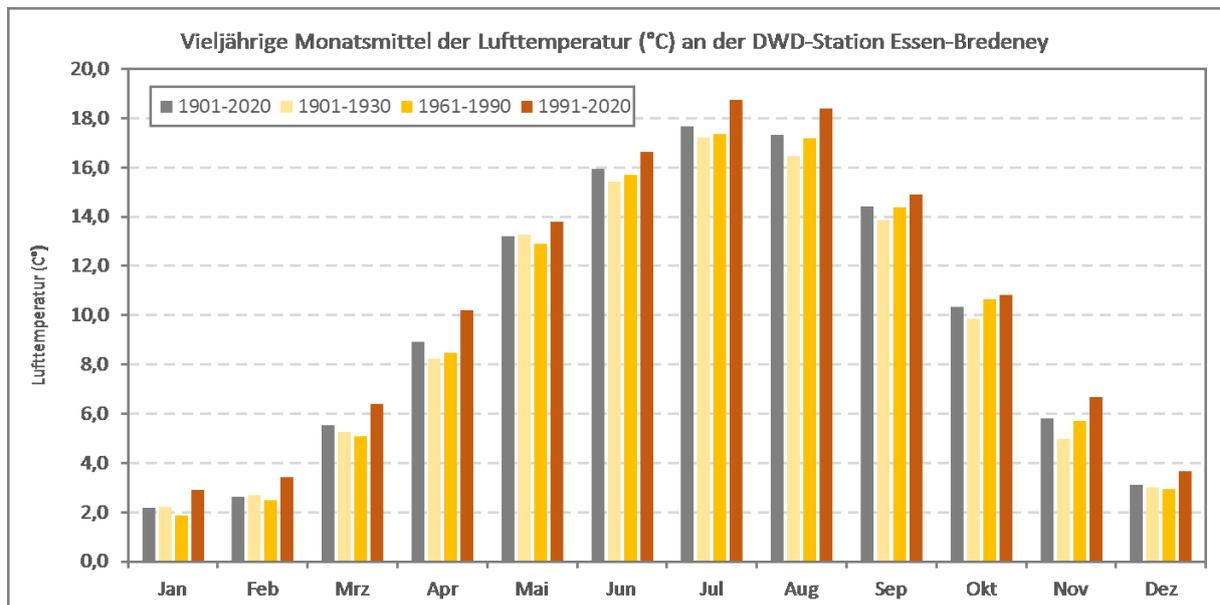


Abb. 6-7: Vieljährige Monatsmittel der Lufttemperatur (°C) an der DWD-Station Essen-Bredene (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Monatsmittel der Stationsmessungen der Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021)

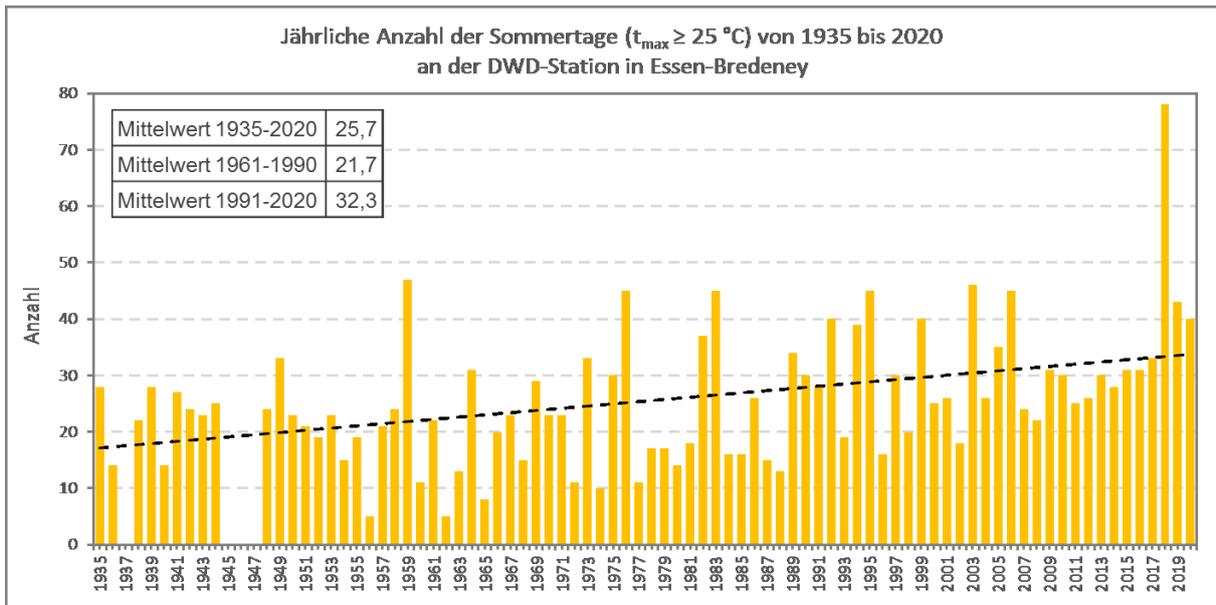


Abb. 6-8: Jährliche Anzahl an Sommertagen ($t_{max} \geq 25 \text{ °C}$) von 1935 bis 2020 an der DWD-Station Essen-Bredene (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Tägliche Stationsmessungen des Maximums der Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021)

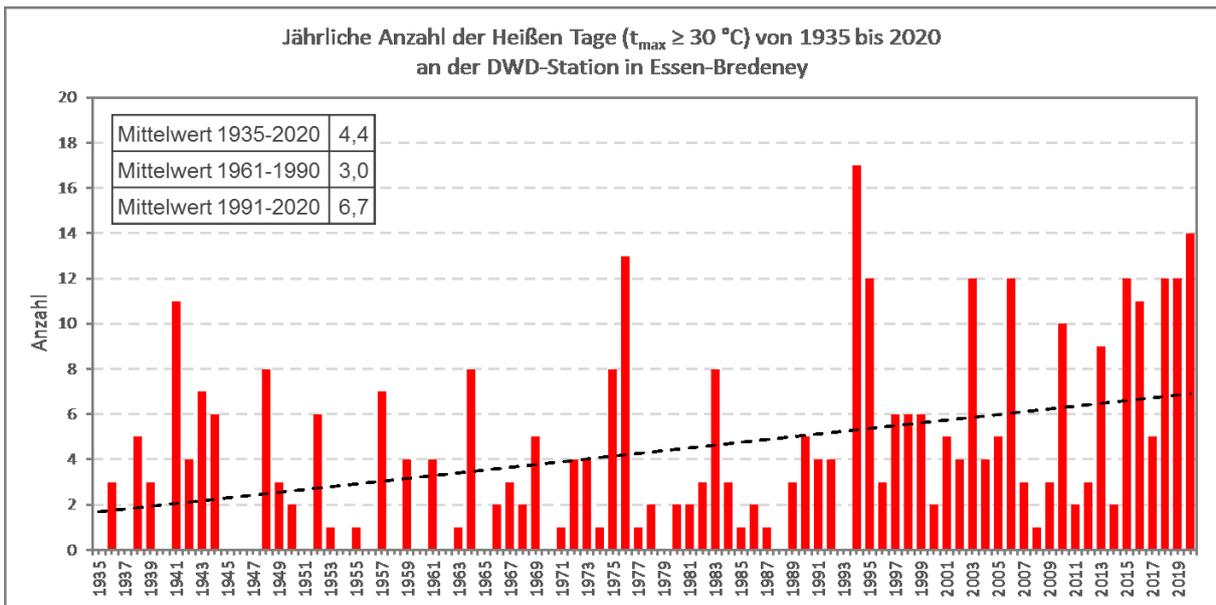


Abb. 6-9: Jährliche Anzahl an Heißen Tagen ($t_{max} \geq 30 \text{ °C}$) von 1935 bis 2020 an der DWD-Station Essen-Bredene (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Tägliche Stationsmessungen des Maximums der Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021)

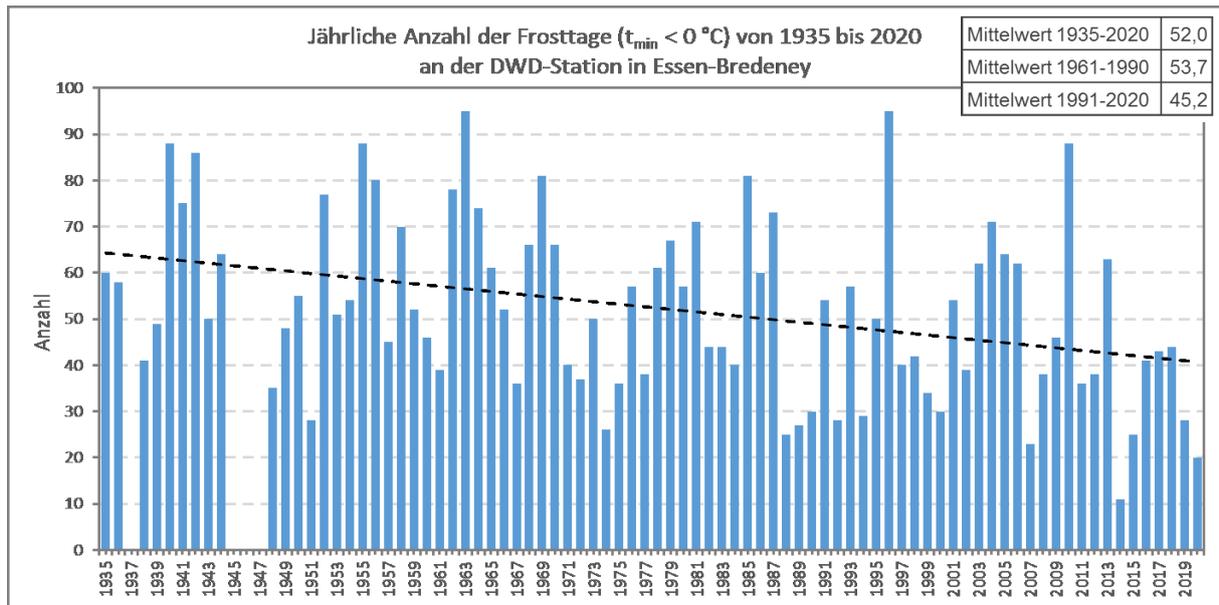


Abb. 6-10: *Jährliche Anzahl der Frosttage ($t_{\min} < 0 \text{ °C}$) von 1935 bis 2020 an der DWD-Station Essen-Bredene (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Tägliche Stationsmessungen des Minimums der Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021)*

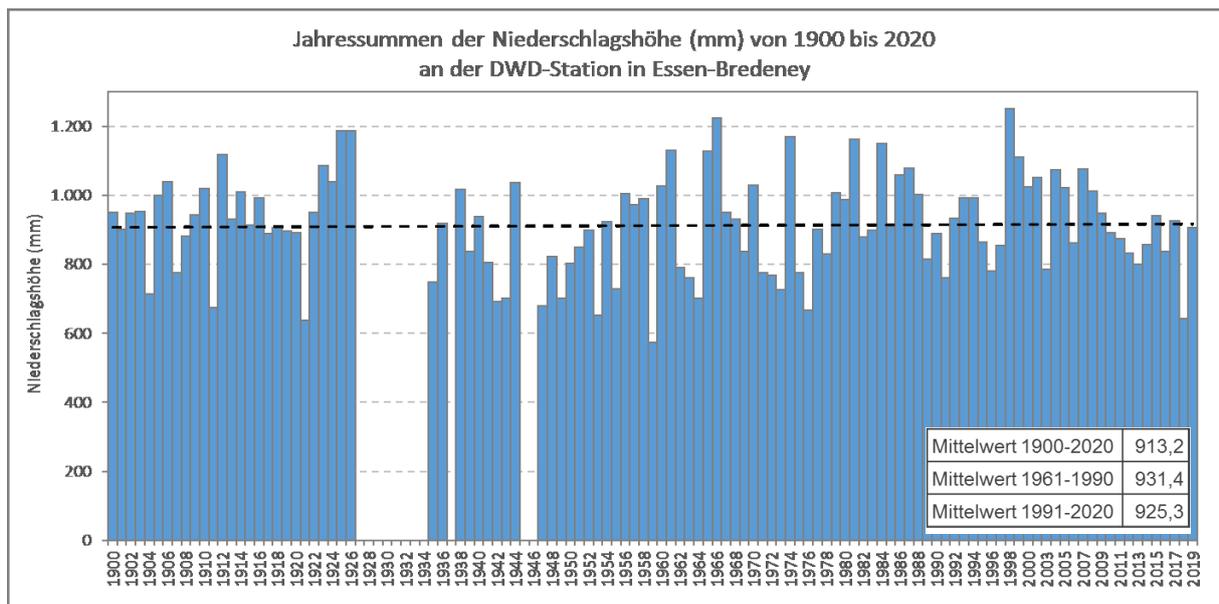


Abb. 6-11: *Jahressummen der Niederschlagshöhe (mm) von 1900 bis 2020 an der DWD-Station Essen-Bredene (Datenquelle: DWD Climate Data Center (CDC): Jahressumme der Stationsmessungen der Niederschlagshöhe in mm für Deutschland, Version v19.3, abgerufen am 31.05.2021)*

Wie bereits erwähnt, stellt der Deutsche Wetterdienst über das Climate Data Center im Internet neben den Stationsdaten auch eine Vielzahl an Rasterdaten zur Verfügung, die in einem Geoinformationssystem weiterverarbeitet werden können. Die Raster werden aus Daten der DWD-Stationen sowie qualitativ gleichgestellten Partnernetzstationen des DWD in Deutschland erzeugt. Dabei wird der Einfluss der Höhenlage in Form einer Höhenregression berücksichtigt und für die Interpolation das Inverse Distance Weight-Verfahren angewandt. Das dabei eingesetzte digitale Höhenmodell definiert die räumliche Auflösung der erzeugten Rasterdaten von 1 km x 1 km.

Die Rasterdaten haben den Vorteil, dass sie flächendeckende Informationen über die räumliche Verteilung verschiedener Klimaparameter und deren Entwicklung in den vergangenen Jahrzehnten liefern können, während die Messdaten einer Station lediglich die klimatischen Verhältnisse an dem jeweiligen Standort repräsentieren. Hinsichtlich der Interpretation ist allerdings zu beachten, dass bei der Erstellung der interpolierten Raster aus den Stationsdaten neben der Höhenlage keine weiteren klima- und witterungsbeeinflussenden Faktoren, wie beispielsweise die Flächennutzung, berücksichtigt wurden. Somit können lokalklimatisch relevante Prozesse, wie zum Beispiel städtische Wärmeinsel-Effekte oder Kaltluftdynamiken, hierbei nicht abgebildet werden. Da die meisten Stationen des DWD im ländlichen Raum verortet sind, werden die klimatischen Verhältnisse innerhalb der Siedlungsbereiche von Städten bei der Interpolation nicht hinreichend wiedergegeben, was es insbesondere im zentralen Ballungsgebiet der Metropole Ruhr zu beachten gilt.

In Abb. 6-12 ist die räumliche Verteilung des vieljährigen Mittels der Lufttemperatur in der Metropole Ruhr sowie deren Entwicklung zwischen den beiden Klimareferenzperioden 1961-1990 und 1991-2020 dargestellt. Grundsätzlich ist für die gesamte Metropole Ruhr eine deutliche Temperaturzunahme zu erkennen. Für beide 30-jährige Zeiträume ergeben sich dabei die niedrigsten durchschnittlichen Jahresmitteltemperaturen im Süden des Ennepe-Ruhr-Kreis insbesondere in Breckerfeld sowie im Süden der Stadt Hagen und die höchsten Werte in der Rheinschiene mit jeweils einem Maximum in Duisburg. Dabei sind allerdings leichte Unterschiede in der Intensität der Erwärmung zu beobachten. Während das geringste vieljährige Mittel der Lufttemperatur in Breckerfeld im Zeitraum 1961-1990 bei 7,8 C° lag, erhöhte sich dieser Wert für den Zeitraum 1991-2020 um 0,8 K auf 8,6 C°. Der höchste Wert innerhalb der Metropole Ruhr betrug 1961-1990 in Duisburg 10,8 C° und in der Referenzperiode 1991-2020 11,4 C°, was einem Anstieg von 0,6 K entspricht.

Die Entwicklung und Verteilung der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen in der Metropole Ruhr zeigt Abb. 6-13 auf. Grundsätzlich zeigen sich ähnliche Verteilungsmuster und Entwicklungstendenz wie beim vieljährigen Mittel der Lufttemperatur. Bei insgesamt erhöhter Anzahl der Sommertage im Zeitraum 1991-2020 in der ganzen Metropole Ruhr, ergeben sich

wiederum die geringsten Werte mit 16 (1961-1990) bzw. 25 (1991-2020) Sommertagen in Breckerfeld und die höchsten Werte mit 36 bzw. 45 Sommertagen in Duisburg. Dabei fällt auf das für beide Bereiche der absolute Anstieg der Sommertage zwischen den beiden Referenzperioden 9 Tage beträgt. In weiten Teilen der nördlichen Metropolregion, unter anderem in den Städten Gelsenkirchen, Bottrop, Herne sowie dem Kreis Recklinghausen und Kreis Wesel, ist die Anzahl der Sommertage von 28 auf 41 Tage angestiegen, was eine Erhöhung um 13 Sommertage bedeutet. Bezüglich der Heißen Tagen (siehe Abb. 6-14) ist ebenfalls eine Erhöhung der mittleren jährlichen Anzahl in der gesamten Metropole Ruhr zwischen den betrachteten Klimanormalperioden zu verzeichnen.

Hinsichtlich der Verteilung und Entwicklung der Frosttage (siehe Abb. 6-15) ergibt sich ein sehr differenziertes Bild in der Metropole Ruhr. Einerseits sind für einige Bereiche, wie in Ennepetal und Breckerfeld sowie in Selm und Bergkamen, eine deutliche Reduzierung der mittleren Anzahl an Frosttagen zwischen den beiden Referenzperioden zu beobachten, andererseits sind Bereiche u.a. am Niederrhein oder in Dortmund zu identifizieren, wo die Werte zwischen den beiden Zeiträumen auf einem vergleichbaren Niveau sind.

In Abb. 6-16 werden die vieljährigen Mittel der Niederschlagshöhen in der Metropole Ruhr für die beiden 30-jährigen Referenzperioden dargestellt. Wie bereits bei den Daten der Wetterstation Essen-Bredeney beobachtet werden konnten, ist hinsichtlich der Niederschlagshöhe auch in der Metropole Ruhr keine große Veränderung zwischen den betrachteten Klimanormalperioden festzustellen. Während das Wertespektrum im Zeitraum 1961-1990 Jahresniederschlagssummen zwischen 694 und 1.360 mm aufweist, lagen die Werte im vieljährigen Mittel für die Referenzperiode 1991-2020 zwischen 726 und 1.316 mm. Zudem sind auch hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Niederschlagssummen im vieljährigen Mittel der beiden Klimanormalperioden kaum Unterschiede zu erkennen. Insgesamt werden für beide Zeiträume die höchsten Werte mit über 1.000 mm im Übergang zum Bergischen Land im Ennepe-Ruhr-Kreis und dem Süden von Hagen erreicht, während die geringsten Jahresniederschlagssummen im vieljährigen Mittel mit Werten unter 800 mm einerseits am Niederrhein in Duisburg und dem Kreis Wesel sowie andererseits in einem Bereich vom Dortmunder Norden in Richtung Osten bis nach Hamm zu verzeichnen sind.

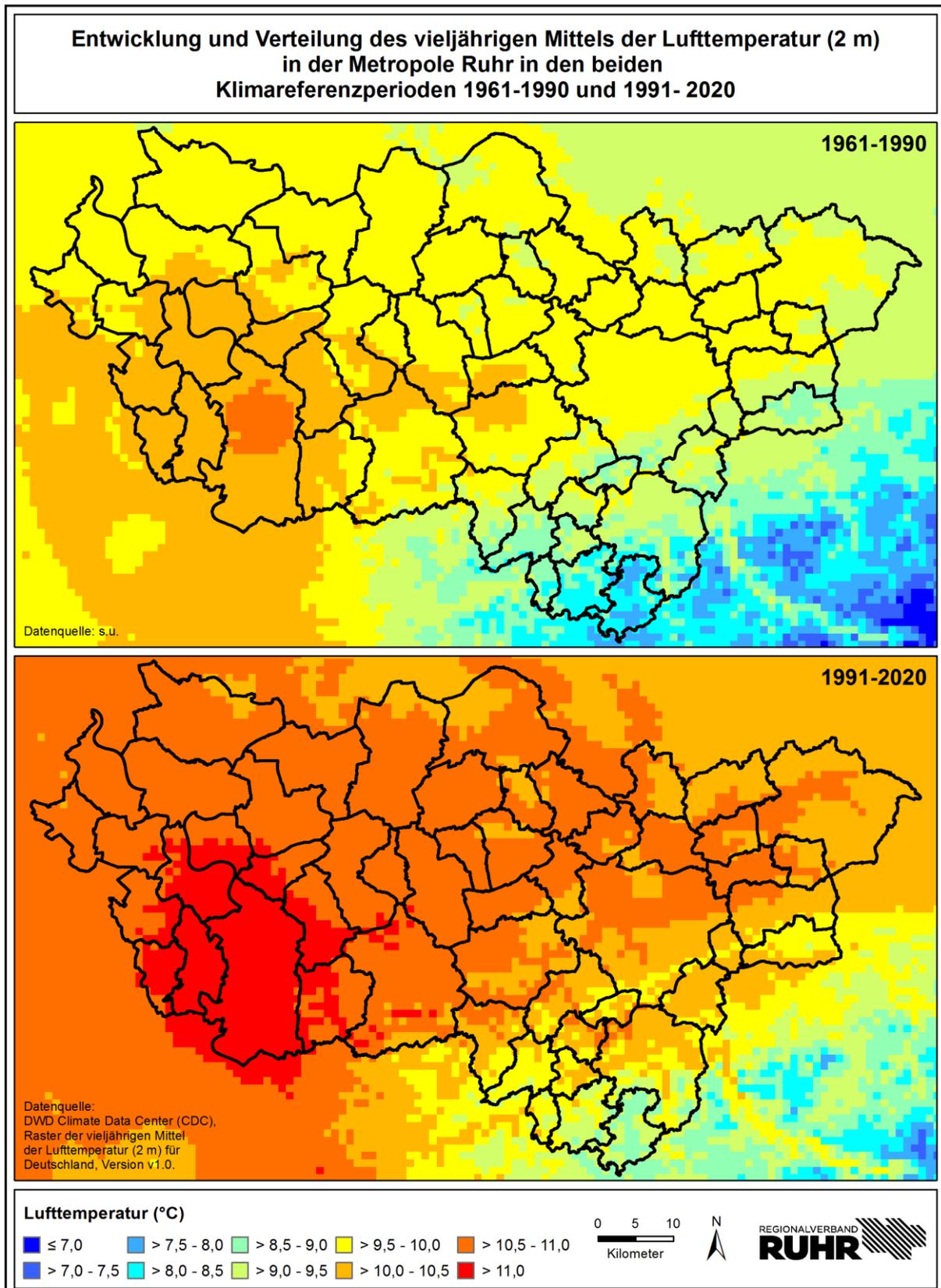


Abb. 6-12: Entwicklung und Verteilung des vieljährigen Mittels der Lufttemperatur in der Metropole Ruhr in den beiden Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 (Datenquelle: DWD, Climate Data Center)

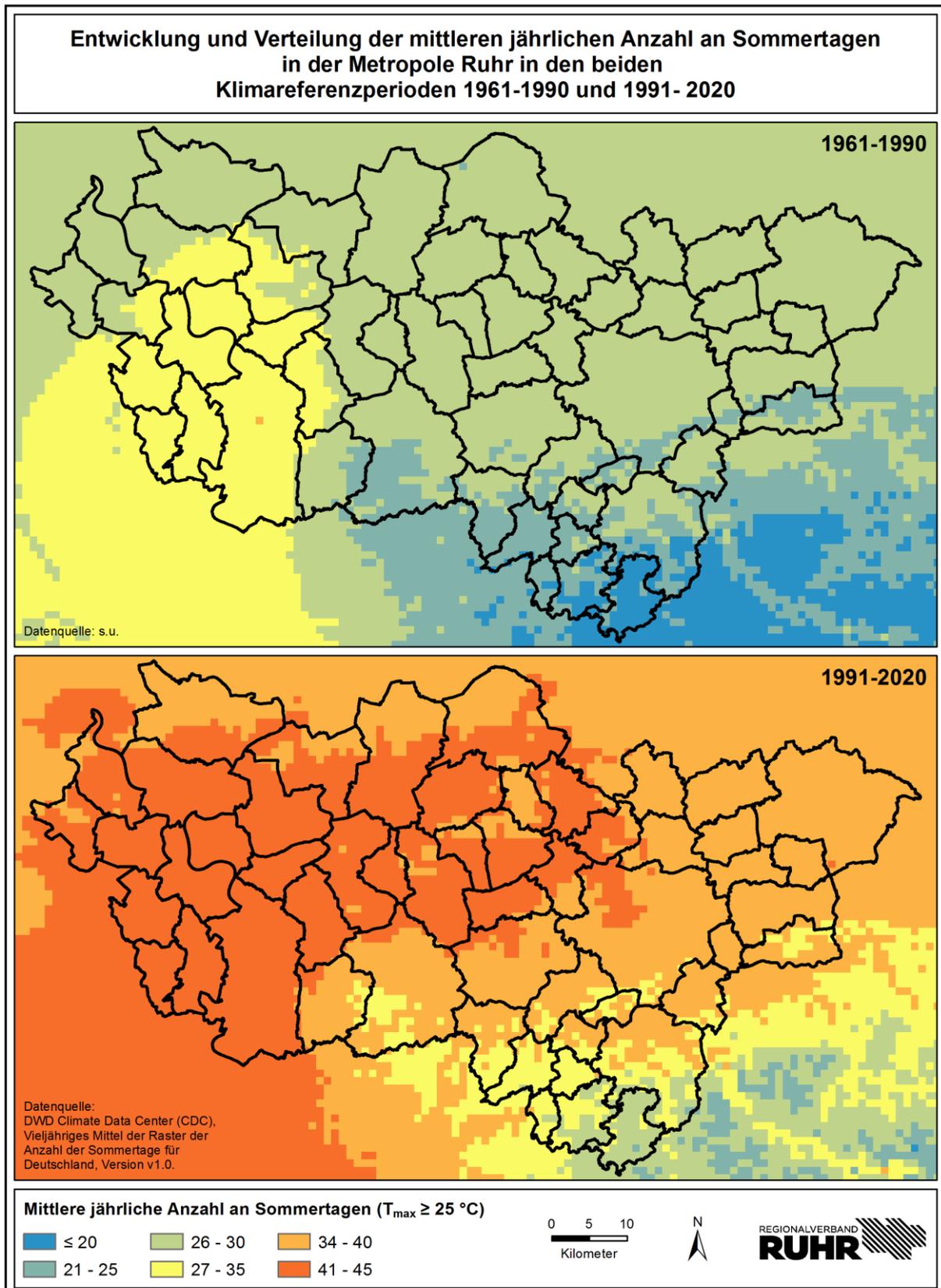


Abb. 6-13: Entwicklung und Verteilung des mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen in der Metropole Ruhr in den beiden Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 (Datenquelle: DWD, Climate Data Center)

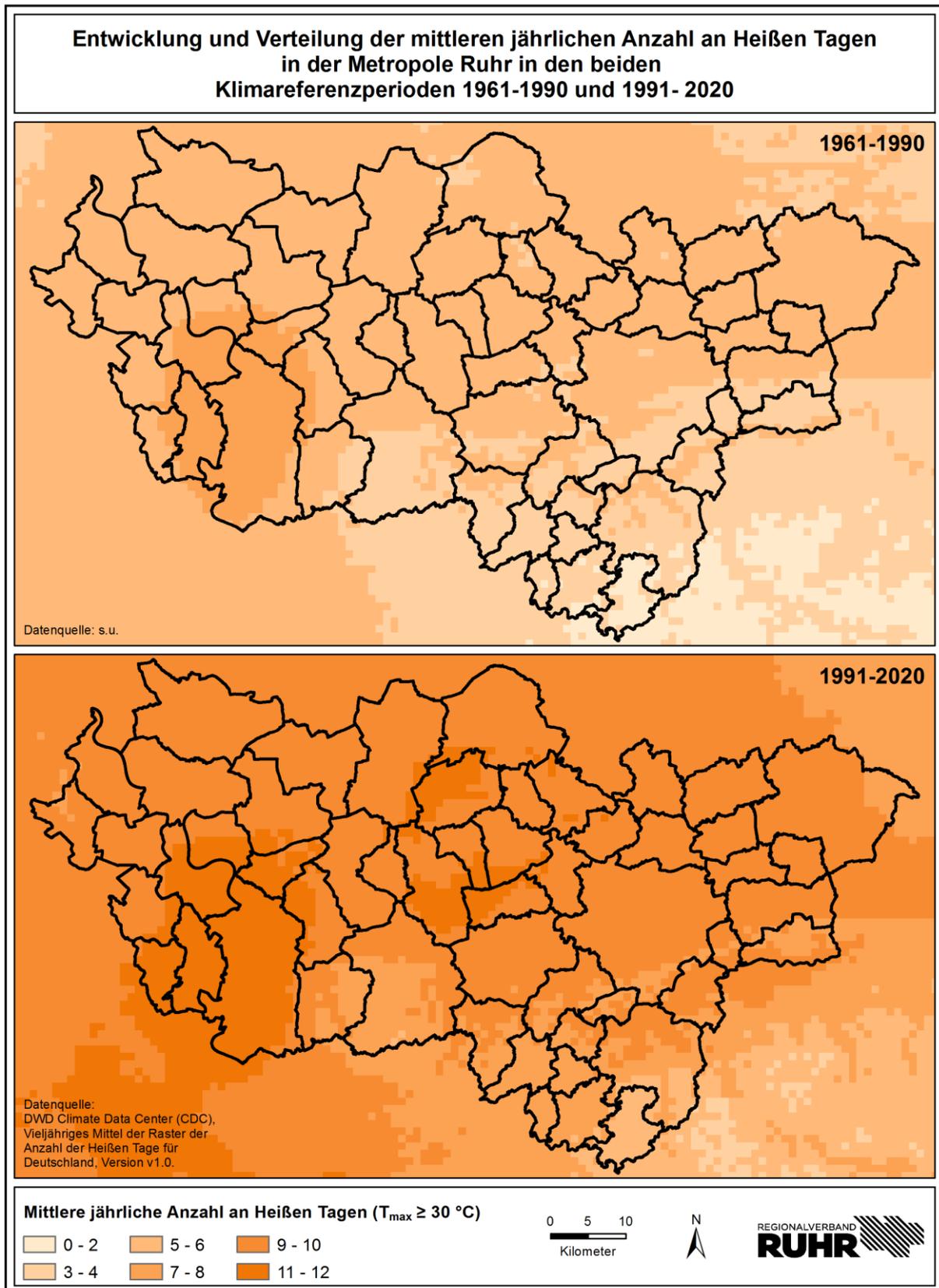


Abb. 6-14: Entwicklung und Verteilung des mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen in der Metropole Ruhr in den beiden Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 (Datenquelle: DWD, Climate Data Center)

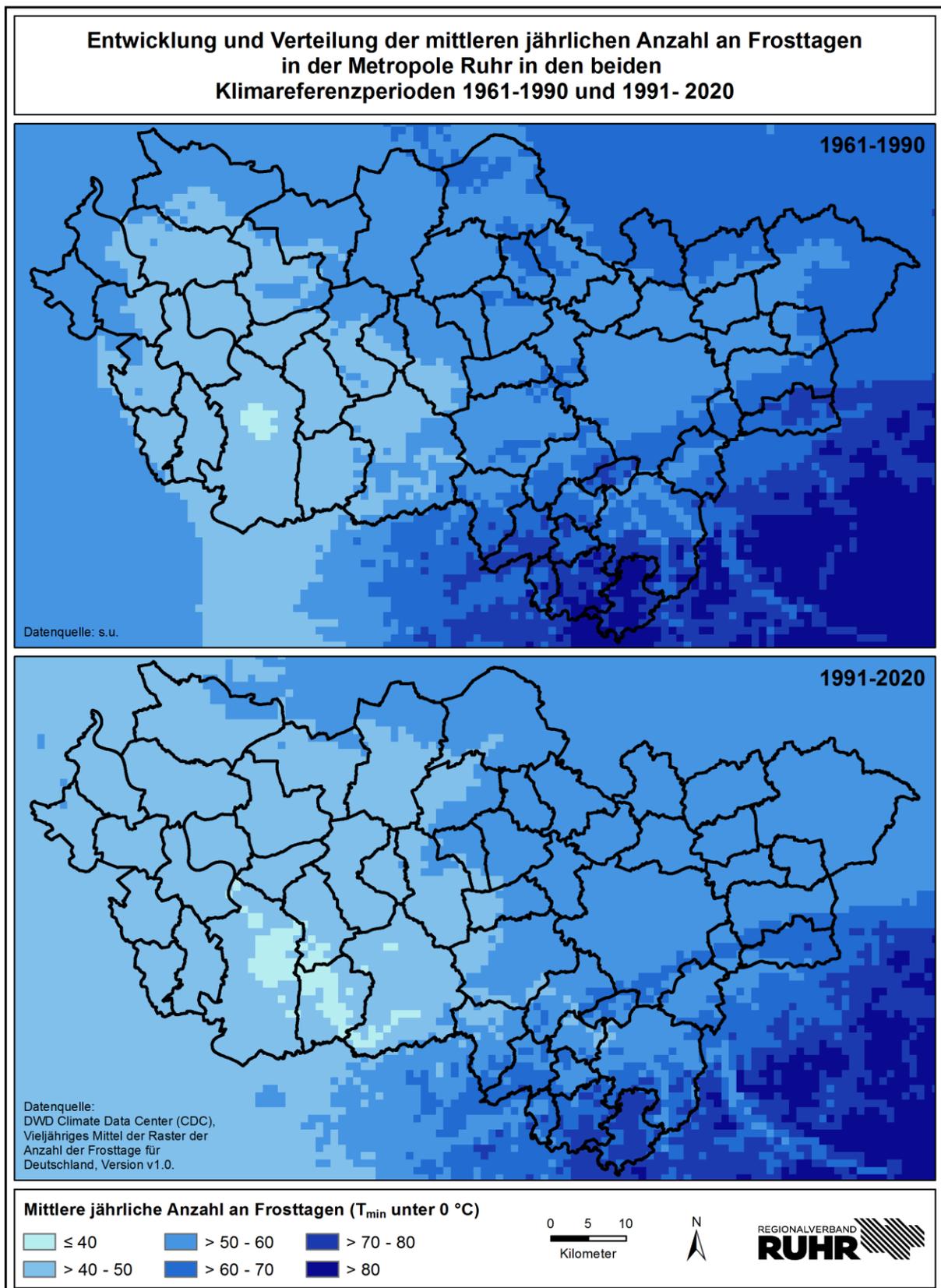


Abb. 6-15: Entwicklung und Verteilung des mittleren jährlichen Anzahl an Frosttagen in der Metropole Ruhr in den beiden Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 (Datenquelle: DWD, Climate Data Center)

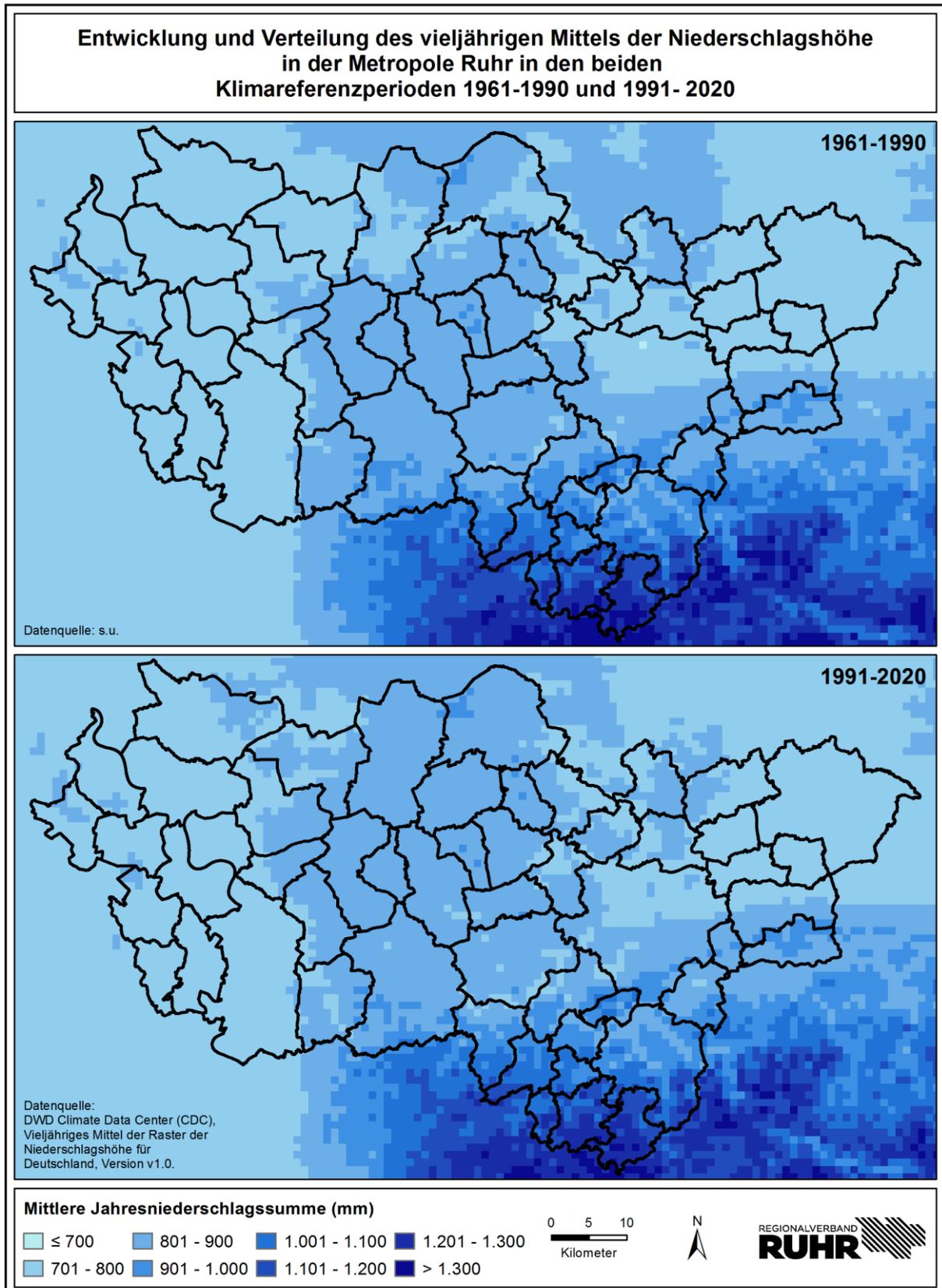


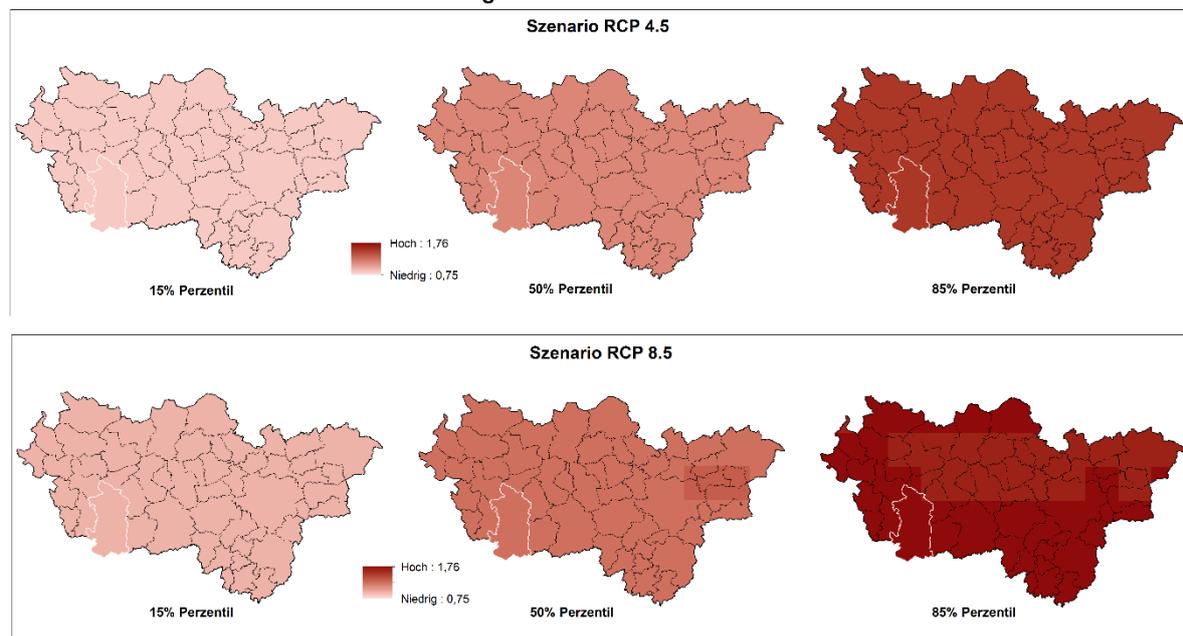
Abb. 6-16: Entwicklung und Verteilung des vieljährigen Mittels der Niederschlagshöhe in der Metropole Ruhr in den beiden Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 (Datenquelle: DWD, Climate Data Center)

Die Stadt Duisburg im Zeichen des globalen Klimawandels

Um eine differenzierte Abschätzung über die zukünftige klimatische Entwicklung und deren Auswirkungen auf regionaler Ebene zu erhalten, sind die von den globalen Klimamodellen getroffenen Aussagen, welche auf einer räumlichen Auflösung von 100-200 km basieren, zu verfeinern. Dabei werden die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bearbeiteten Darstellungen des EURO-Cordex-Projektes mit einer Rasterzellenauflösung von 12,5 km x 12,5 km betrachtet.

In Abb. 6-17 und Abb. 6-18 werden die flächenhaften Ausprägungen des Klimawandels im Ruhrgebiet auf die Jahresmitteltemperaturen und –niederschlagssummen anhand eines Vergleichs der Bezugszeiträume 1971-2000 und 2021-2050 für die Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 dargestellt. Im Vergleich der beiden Szenarien werden Unterschiede in der Ausprägung der zu erwartenden Erwärmung deutlich. Beide Szenarien simulieren jedoch einen Anstieg der Jahresmitteltemperatur in der Metropole Ruhr bis Mitte des Jahrhunderts um 0,7 bis 1,8 K gegenüber dem Zeitraum 1971-2000. Bezüglich der Jahresniederschlagssummen zeigen beide Szenarien einen Anstieg um bis zu 14,5 Prozent.

Differenz der Jahresmitteltemperaturen (K) in der Metropole Ruhr zwischen den Klimaperioden 1971-2000 und 2021-2050 basierend auf Ensemble-Rechnungen für die Szenarien RCP 4.5 und 8.5

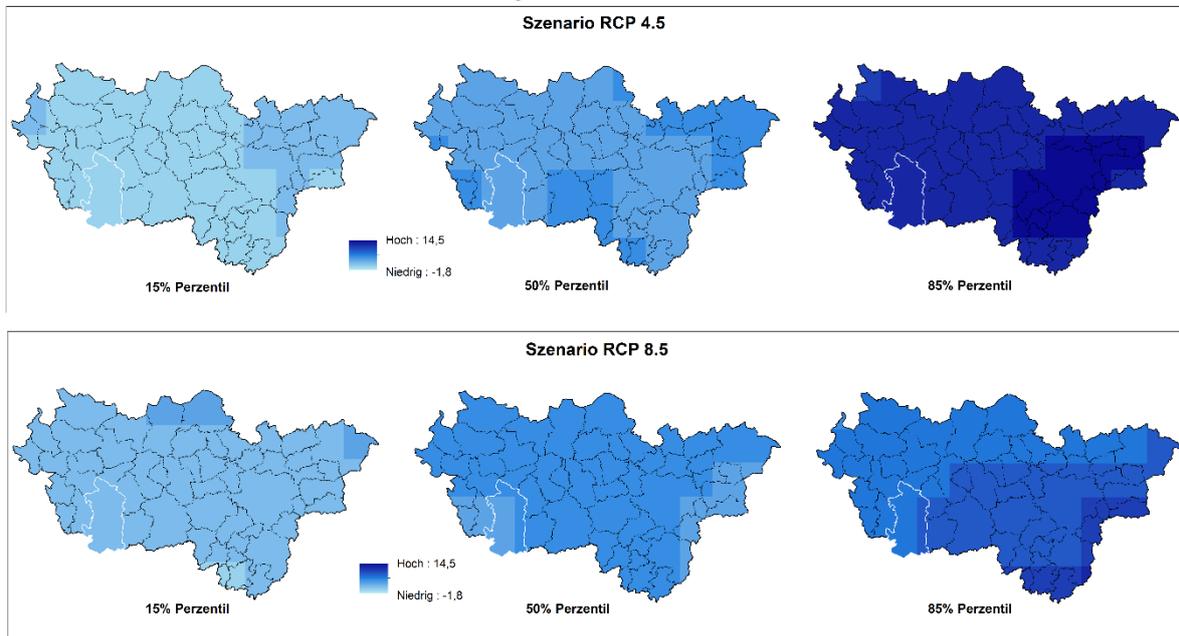


Datenquelle: EURO-Cordex-Projekt (Datengrundlage), DWD (Datenbearbeitung) LANUV (Datenvermittler)
Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz © Land NRW, Recklinghausen, <http://www.lanuv.nrw.de>

Abb. 6-17: Differenz der Jahresmitteltemperaturen (in K) in der Metropole Ruhr zwischen den Klimanormalperioden 1971-2000 und 2021-2050 basierend auf Ensemble-Rechnungen für die

Szenarien RCP 4.5 und 8.5 (Eigene Darstellung auf Basis von EURO-Cordex-Projekt (Datengrundlage), DWD (Datenbearbeitung), LANUV NRW (Datenvermittler))

Differenz der mittleren Niederschlagssumme (%) in der Metropole Ruhr zwischen den Klimaperioden 1971-2000 und 2021-2050 basierend auf Ensemble-Rechnungen für die Szenarien RCP 4.5 und 8.5



Datenquelle: EURO-Cordex-Projekt (Datengrundlage), DWD (Datenbearbeitung) LANUV (Datenvermittler)
Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz © Land NRW, Recklinghausen, <http://www.lanuv.nrw.de>

Abb. 6-18: Differenz der mittleren Niederschlagssummen (in %) in der Metropole Ruhr zwischen den Klimanormalperioden 1971-2000 und 2021-2050 basierend auf Ensemble-Rechnungen für die Szenarien RCP 4.5 und 8.5 (Eigene Darstellung auf Basis von EURO-Cordex-Projekt (Datengrundlage), DWD (Datenbearbeitung), LANUV NRW (Datenvermittler))

Neben einem Anstieg der mittleren Verhältnisse von Lufttemperatur und Niederschlag kann auch für das Ruhrgebiet davon ausgegangen werden, dass sich die Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen in Zukunft verändern werden. Hierzu zählen unter anderem häufigere Sommergewitter mit Starkregen sowie ein vermehrtes Auftreten von Hitzeperioden. Beispielsweise wird sich die Anzahl von Sommertagen ($T_{\max} > 25\text{ °C}$) und heißen Tagen ($T_{\max} > 30\text{ °C}$) nahezu verdoppeln. Letzteres liegt darin begründet, dass sich das Spektrum der Großwetterlagen in Mitteleuropa im Zuge des Klimawandels verändern wird. Die Häufigkeit von Hochdruckwetterlagen mit austauscharmen Witterungsverhältnissen wird in ganz Mitteleuropa zunehmen. Da sich die gegenüber dem unbebauten Umland negativen klimatischen Verhältnisse in Städten während dieser austauscharmen Wetterlagen am stärksten ausprägen, ist davon auszugehen, dass der Klimawandel zu einer Verschärfung der stadtklimatischen Verhältnisse im Ruhrgebiet führen wird. Dies wird sich beispielsweise in einer häufigeren, länger andauernden und intensiveren Ausprägung städtischer Wärmeinseln darstellen (Kuttler 2010).

Vor diesem Hintergrund wird in den folgenden Kapiteln 6.3 und 6.4 eine Abschätzung zur zukünftigen Entwicklung klimatischer Kenntage sowie der Wärmeinselbereiche im Stadtgebiet von Duisburg gegeben.

6.3 Zukünftige Entwicklung klimatischer Kenntage in Duisburg

Anhand der zeitlichen Entwicklung und räumlichen Verteilung klimatischer Kenntage, also der Häufigkeit des Auftretens von thermischen Extremereignissen wie besonders heißen Tagen oder Nächten, lässt sich die thermische Belastungssituation in unterschiedlich dicht bebauten Bereichen einer Stadt aufzeigen.

Zur Ermittlung der zeitlichen Entwicklung und räumlichen Verteilung klimatischer Parameter im Stadtgebiet von Duisburg wurde für die Modellierung der meteorologischen Grundlagendaten zum Klimawandel für zwei Zeitschnitte das Methoden-Paket „ENVELOPE“ angewendet.

„...Das Paket koppelt das mesoskalige Stadtklimamodell FITNAH-3D mit den aktuellsten Ergebnissen regionaler Klimamodell-Ensemble Rechnungen und erlaubt auf diese Weise die numerische Simulation stadtklimatisch relevanter Parameter. Entsprechend des Projektansatzes werden sich die Modellanalysen auf den thermischen Wirkungskomplex beziehen und räumlich differenzierte Informationen zur zukünftigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit ausgewählter klimatologischer Kenntage bereitstellen.

Aus dem Vergleich mit den Daten für die aktuelle Klimanormalperiode 1961-1990, kann das zu erwartende Ausmaß des Stadtklimawandels im Gebiet des RVR räumlich hochaufgelöst analysiert werden. Die Modellrechnungen liefern Ergebnisse in einer einheitlichen horizontalen Auflösung für den gesamten Untersuchungsraum. Obwohl die Ergebnisse der Regionalen Klimamodelle auf einem, verglichen mit dem globalen Maßstab, sehr feinen Rechengitter vorliegen, werden für die Abschätzung von Klimafolgen in der Regel noch detailliertere Aussagen benötigt. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund notwendig, dass regionale Klimamodelle mit einer sehr guten räumlichen Auflösung von gegenwärtig bis zu 12,5 km dennoch nicht in der Lage sind, die relevanten lokalen Handlungsfelder wie fein strukturierte Wälder, unterschiedliche landwirtschaftliche Kulturen oder Städte aufzulösen und in den Klimaprojektionen ausreichend zu berücksichtigen.

Diese Aufgabe können mesoskalige und an den entsprechenden Raum angepasste Simulationsmodelle übernehmen. Sie sind aufgrund ihrer höheren räumlichen Auflösung in der

Lage, die Vielfalt und Heterogenität der naturräumlichen Gliederung einer Landschaft auf die Verteilung der meteorologischen Größen zu erfassen...

...Mesoskalige dreidimensionale Simulationen werden dabei nicht parallel zu einem regionalen Klimamodell ausgeführt, vielmehr erfolgt die Übertragung der regionalen Ergebnisse auf die lokale Ebene durch ein statistisch-dynamisches Verfahren.

Dabei werden die größerskaligen Ergebnisse statistisch ausgewertet und mit den Ergebnissen einer Vielzahl mesoskaliger Simulationen verknüpft. Es werden keine lokalen Klimaszenarienrechnungen für die nächsten Dekaden durchgeführt, sondern die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle „intelligent“ auf kleinere Raumeinheiten interpoliert, wobei eine Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten einer Landschaft mit unterschiedlicher Landnutzung und Relief erfolgt...“ (GEO-NET 2021).

In den Abb. 6-19 bis 6-22 sind die Lufttemperaturen für eine windschwache Strahlungswetterlage, die heißen Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) und die Tropennächte ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$ zwischen 19:00 und 7:00 Uhr MEZ) für das Stadtgebiet von Duisburg anhand der oben beschriebenen Methodik dargestellt.

Die Aussagen bezüglich der Lufttemperaturen während einer windschwachen Strahlungswetterlage und der klimatischen Kenntage (Heiße Tage und Tropennächte) für das Stadtgebiet von Duisburg beziehen sich dabei auf die beiden Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 und wurden für zwei Szenarien ermittelt. Das Szenario RCP2.6 entspricht dabei einem Szenario mit deutlichen Anstrengungen beim Klimaschutz, wozu auch Anstrengungen im Bereich „negativer“ Emissionen gehören, während das Szenario RCP8.5 einem „Weiter-so-wie-bisher“-Szenario entspricht (weitere Erläuterungen siehe oben).

Für die Lufttemperaturen werden zusätzlich zu den beiden Klimanormalperioden der Envelope-Berechnung die Ergebnisse der aktuellen FITNAH-Modellierung (Geodatenbestand 2020) dargestellt.

Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Lufttemperaturen in den Abb. 6-19 und Abb. 6-20 wird deutlich, dass die Lufttemperaturen der Gegenwart (Bezugsjahr 2020) für die modellierte Wetterlage noch relativ moderat sind und höhere Belastungssituationen nur in den dicht bebauten Innenstadtbereichen sowie in den Gewerbe- und Industriegebieten auftreten. So wurden während der windschwachen Strahlungsnacht insbesondere für die großen Industrie- und Gewerbegebiete entlang des Rheins und der Ruhr Temperaturen über 20 °C simuliert, was – sofern die Überwärmung die ganze Nacht anhält und nicht unter 20 °C sinkt – auf die

Ausbildung von Tropennächten hindeutet. Eine leichte Verschärfung der Situation ist beim RCP-Szenario 2.6 für den Zeitraum 2021-2050 anhand der Temperaturzunahme in nahezu allen Bereichen ca. 1 bis unter 1,5 K festzustellen, während im gleichen Zeitraum bei Annahme des „worst-case-Szenario“ (RCP-Szenario 8.5) die Temperaturen in einigen ländlichen Bereichen noch etwas stärker ansteigen. Für die ferne Zukunft ergeben sich für das RCP-Szenario 2.6 keine wesentlichen Veränderungen gegenüber der nahen Zukunft, wohingegen für das RCP-Szenario 8.5 eine weitere Zunahme der Temperaturen von zusätzlichen 2 bis knapp unter 3 K für den Zeitraum 2071-2100 simuliert wurde.

Die niedrigsten nächtlichen Temperaturen während der sommerlichen Strahlungswetterlage werden in allen Simulationen für die Freilandbereiche ermittelt. Während für das Jahr 2020 eine mittlere Lufttemperatur von ca. 15°C für den unbebauten Freiraum simuliert wurde und somit sehr günstige nächtliche Temperaturverhältnisse vorliegen, wurden für das RCP-Szenario 8.5 für die ferne Zukunft (2071-2100) Lufttemperaturen von knapp 19 °C für den Freiraum ermittelt. Die Temperaturen in den innerstädtischen Grünflächen liegen mit Werten von ca. 18,7 °C bis 19,5 °C zum Teil noch etwas höher, und in den Waldgebieten wurden Werte von bis zu 21,3 °C simuliert. Sollte das „Worst-case“- Szenario eintreten, muss davon ausgegangen werden, dass heiße Tage und Hitzewellen vermehrt auftreten und sich über längere Zeiträume erstrecken werden. Die Wirksamkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen wird unter diesen Bedingungen erheblich reduziert.

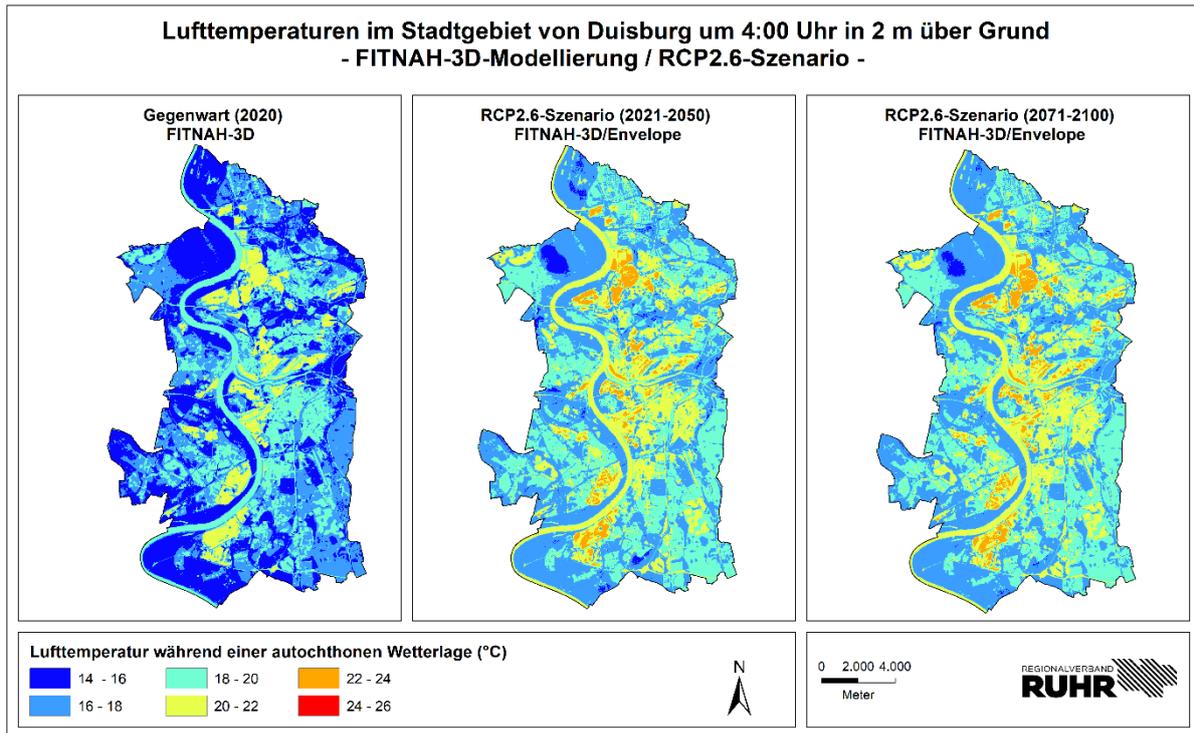


Abb. 6-19: Darstellung der Lufttemperaturen im Stadtgebiet von Duisburg um 4:00 Uhr für eine windschwache Strahlungswetterlage (FITNAH-3D-Modellierung und RCP2.6-Szenario).

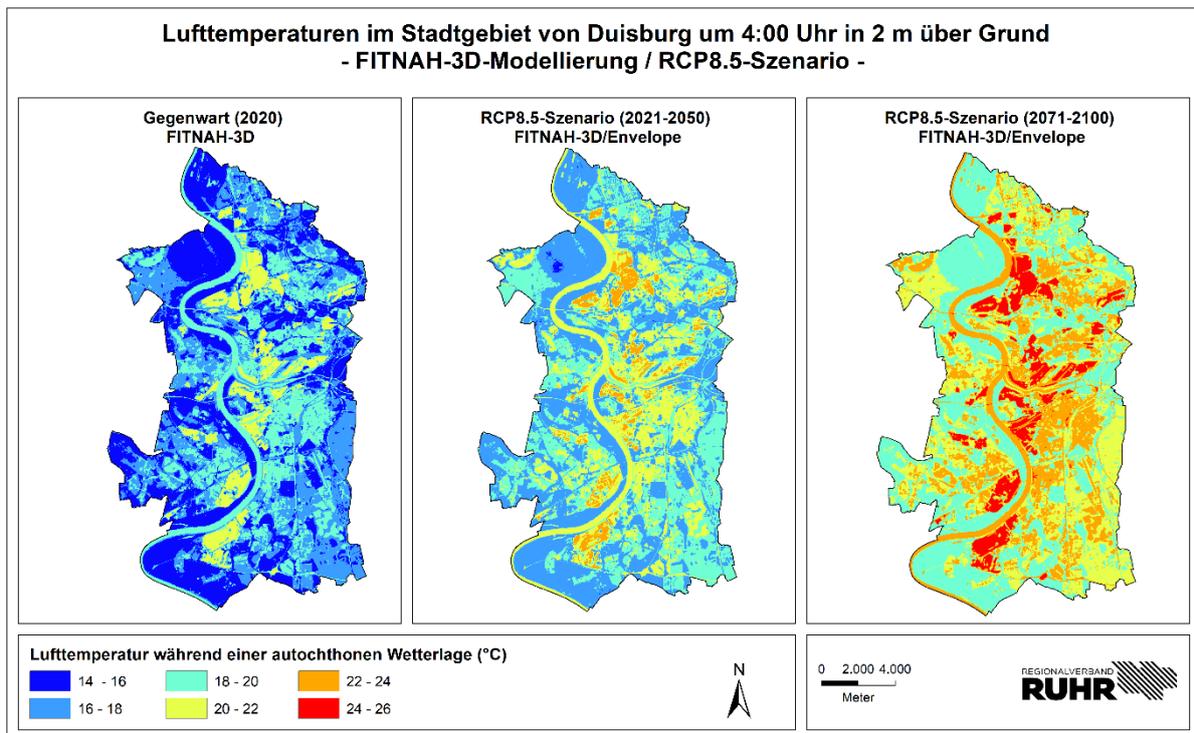


Abb. 6-20: Darstellung der Lufttemperaturen im Stadtgebiet von Duisburg um 4:00 Uhr für eine windschwache Strahlungswetterlage (FITNAH-3D-Modellierung und RCP8.5-Szenario).

Die Abb. 6-21 bis Abb. 6-23 zeigen auf Basis der oben beschriebenen Methodik, welche Veränderungen hinsichtlich der heißen Tage und der Tropennächte in der nahen Zukunft eintreten werden (Mittelwerte des Zeitraums 2021-2050) und welche in der fernen Zukunft (Mittelwert des Zeitraums 2071-2100) voraussichtlich zu erwarten sind.

Verdeutlicht wird zusätzlich die Entwicklung der Hitzebelastung anhand der Anzahl der heißen Tage ($T_{\max} > 30 \text{ °C}$) und Tropennächte ($T_{\min} > 20 \text{ °C}$), mit dem Ziel, die Hitzebelastung während des gesamten Verlauf eines Tages (24 Stunden) beurteilen zu können.

In Abb. 6-21 ist die Anzahl der heißen Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) für zwei Bezugsräume in jeweils zwei Szenarien (RCP 2.6 und RCP 8.5) dargestellt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse für das Szenario RCP 2.6 wird sehr deutlich, dass nur geringe Unterschiede zwischen den Bezugszeiträumen 2021-2050 und 2071-2100 zu erwarten sind. So ist beispielsweise davon auszugehen, dass sich die mittlere Anzahl der heißen Tage für die Gewerbe/ Industriegebiete von ca. 28-31 Tagen in der Bezugsperiode 2021-2050 auf 29-32 heiße Tage im Zeitraum 2071-2100 erhöhen wird. Auch für die übrigen bebauten Flächen gilt jeweils eine Erhöhung der Anzahl an heißen Tagen pro Jahr um ca. einen Tag. Im Vergleich zu einer früheren Untersuchung zur Entwicklung der Kenntage in Zukunft kann anhand der hier beschriebenen Untersuchung nicht nachgewiesen werden, dass die Lasträume der Innenstadtbereiche sowohl in der Gegenwart und Zukunft, aufgrund der insgesamt dichten, hohen Bebauung und dadurch bedingter Verschattungseffekte, tagsüber eine geringere thermische Belastung aufweisen als die teils weniger dicht bebauten Bereiche der z.T. an die Innenstädte angrenzenden Stadtklimatope. Im Gegenteil wird im Rahmen der aktuellen Untersuchung ein Unterschied zwischen den dicht bebauten Klimatopen der Innenstadt zugunsten der etwas lockerer bebauten Stadtklimatope ersichtlich. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass kleinräumige Variationen der Bebauungs- und Begrünungssituationen bereits zu deutlichen Unterschieden der Temperaturverhältnisse innerhalb eines Gebietes führen können. Aufgrund der Rastergröße von 25 x 25 m und der damit einhergehenden Parametrisierung von Einzelgebäuden können diese detaillierten Unterschiede jedoch nicht immer aufgelöst werden. Bei einer kleinräumigen Interpretation der Ergebnisse sind diese Erkenntnisse daher zu berücksichtigen.

Während in den als Innenstadtklimatopen ausgewiesenen Bereichen zwischen 25 und 26 heiße Tage pro Jahr wahrscheinlich sind, ist in den Stadtklimatopen mit einer Anzahl an heißen Tagen von 15 bis 26 für den Bezugszeitraum 2021-2050 zu rechnen. In den lockerer bebauten Bereichen der Stadt, wozu die Stadtrand- und Vorstadtklimatope zählen, ist die Anzahl an heißen Tagen weiter reduziert und beträgt in den von Freiland beeinflussten Siedlungsflächen

lediglich 12 – 16 Tage. Für die Freilandflächen konnten zwischen 13 und 15 heiße Tage modelliert werden. Die geringste Anzahl an heißen Tagen ist mit 4 Tagen im Bereich der Gewässerflächen nachzuweisen. Es zeigt sich, dass trotz erheblicher Anstrengungen beim Klimaschutz auch in der fernen Zukunft noch mit einer Zunahme an Belastungssituationen zu rechnen ist, diese jedoch relativ moderat ist.

Bei Betrachtung des RCP-Szenario 8.5 im Vergleich zum RCP-Szenario 2.6 wird dagegen deutlich, dass die zukünftige Entwicklung bis zum Jahr 2100 bei RCP 8.5 wesentlich dramatischer verläuft als für RCP 2.6. Während für den Bezugszeitraum 2021-2050 die Anzahl der heißen Tage in etwa den Ergebnissen für die ferne Zukunft (2071-2100) aus dem Szenario RCP 2.6 entspricht und im Vergleich dazu nur leicht darunterliegt, zeigt sich für die ferne Zukunft des Szenario RCP 8.5 eine erhebliche Zunahme der heißen Tage. Mit bis zu 54 Tagen im Jahr ist die höchste Anzahl an heißen Tagen in den Gewerbe-/ Industriegebieten zu erwarten. Besonders kritisch ist die Situation dann in großflächig versiegelten Flächen einzustufen, wie sie entlang des Rheins und der Ruhr vielfach zu finden sind. In kleineren Gewerbegebieten ist die Anzahl an heißen Tagen mit bis zu 52 Tagen ähnlich hoch. Auch in der Innenstadt ist mit bis zu 53 heißen Tagen im Jahr zu rechnen. In lockerer bebauten Bereichen nimmt die Belastungssituation zwar ab, jedoch sind zukünftig nach diesem Szenario selbst im Freilandbereich bis zu 32 heiße Tage im Jahr zu erwarten. Die geringste Anzahl an heißen Tagen weisen die Gewässerflächen mit zehn Tagen und die Wälder mit maximal 28 Tagen auf. Somit kann festgehalten werden, dass in der fernen Zukunft mit etwa einer Verdoppelung der Anzahl an heißen Tagen gegenüber dem Zeitraum 2021-2050 zu rechnen

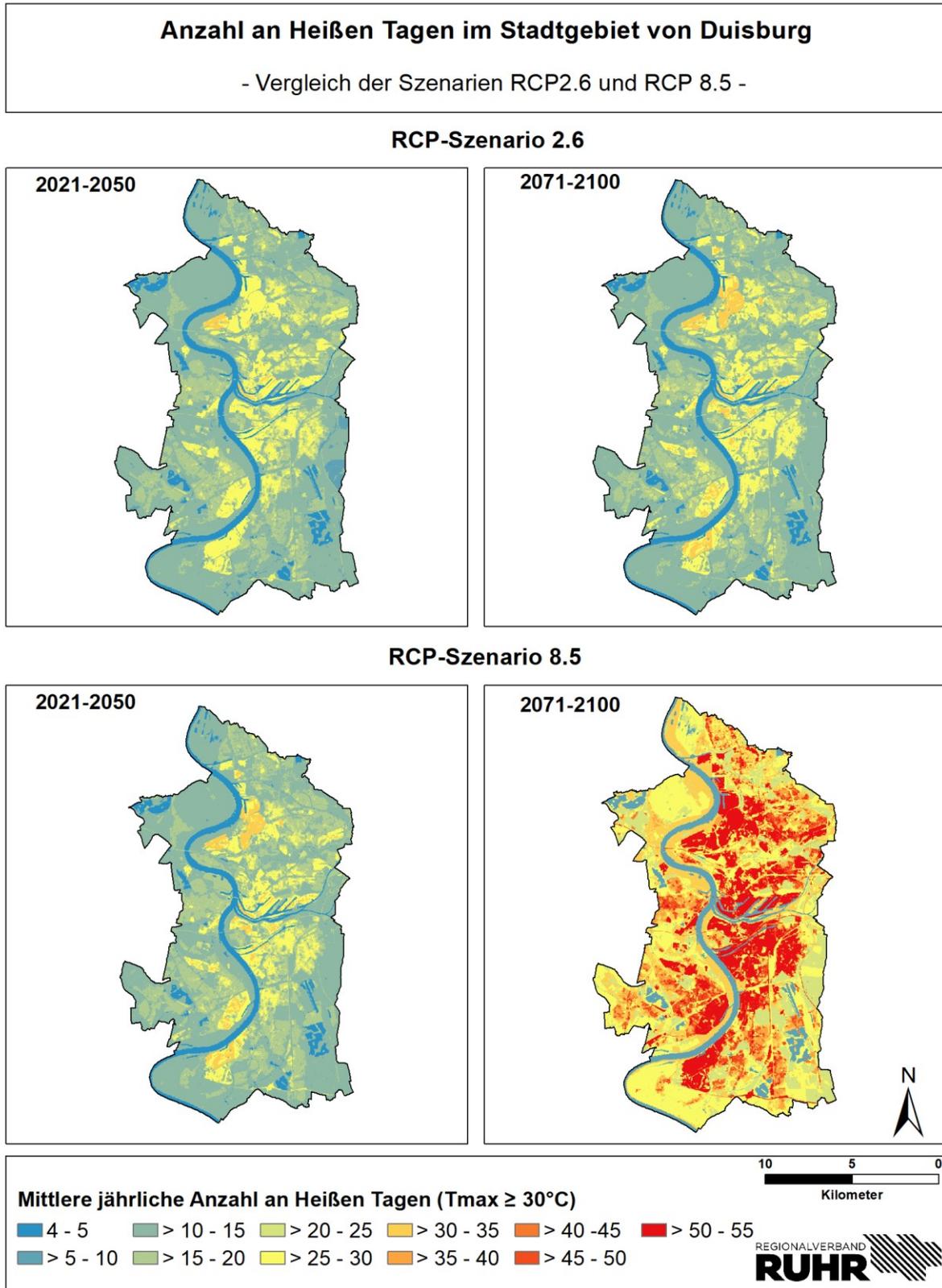


Abb. 6-21: Anzahl an Heißen Tagen im Stadtgebiet von Duisburg für die Szenarien RCP 2.6 und 8.5.

Die Entwicklung der Tropennächte für die o.g. Szenarien und Zeiträume ist in Abb. 6-22 dargestellt. Aufgrund der sehr hohen Versiegelungsraten, der thermischen Eigenschaften der anthropogenen Oberflächen, der verminderten Belüftung und der oft fehlenden Anbindung an die kaltluftproduzierenden Flächen des unbebauten Umlandes weisen die Gewerbeflächen und dicht bebauten Innenstadtbereiche an Tagen mit hoher solarer Einstrahlung eine verzögerte und verminderte nächtliche Abkühlung auf. Daher treten Tropennächte, also Nächte, in denen die Lufttemperatur zwischen 19:00 und 7:00 Uhr Mitteleuropäischer Zeit nicht unter 20 °C sinkt, in den Gewerbegebieten und dicht bebauten Innenstädten relativ häufig auf. Bezüglich der Anzahl von Tropennächten ist in diesen Gebieten zudem künftig von einem sehr starken Anstieg auszugehen. Während beispielsweise in der Bezugsperiode 2021-2050 des Szenario 2.6 in den Gewerbegebieten lediglich 5 Tage pro Jahr als Tropennacht ermittelt werden können, werden die nächtlichen Lufttemperaturen in der fernen Zukunft des Szenario 8.5 (Zeitraum 2071-2100) an bis zu 19 Tagen pro Jahr mindestens 20 °C betragen. In den dicht bebauten Innenstadtbereichen ist in der fernen Zukunft mit einer vergleichbar hohen Anzahl an Tropennächten zu rechnen (18 Tropentage). Selbst im Freiland ist in der fernen Zukunft mit bis zu acht Tropennächten zu rechnen, wogegen in der nahen Zukunft (2021-2050) von drei bis vier Tagen auszugehen ist.

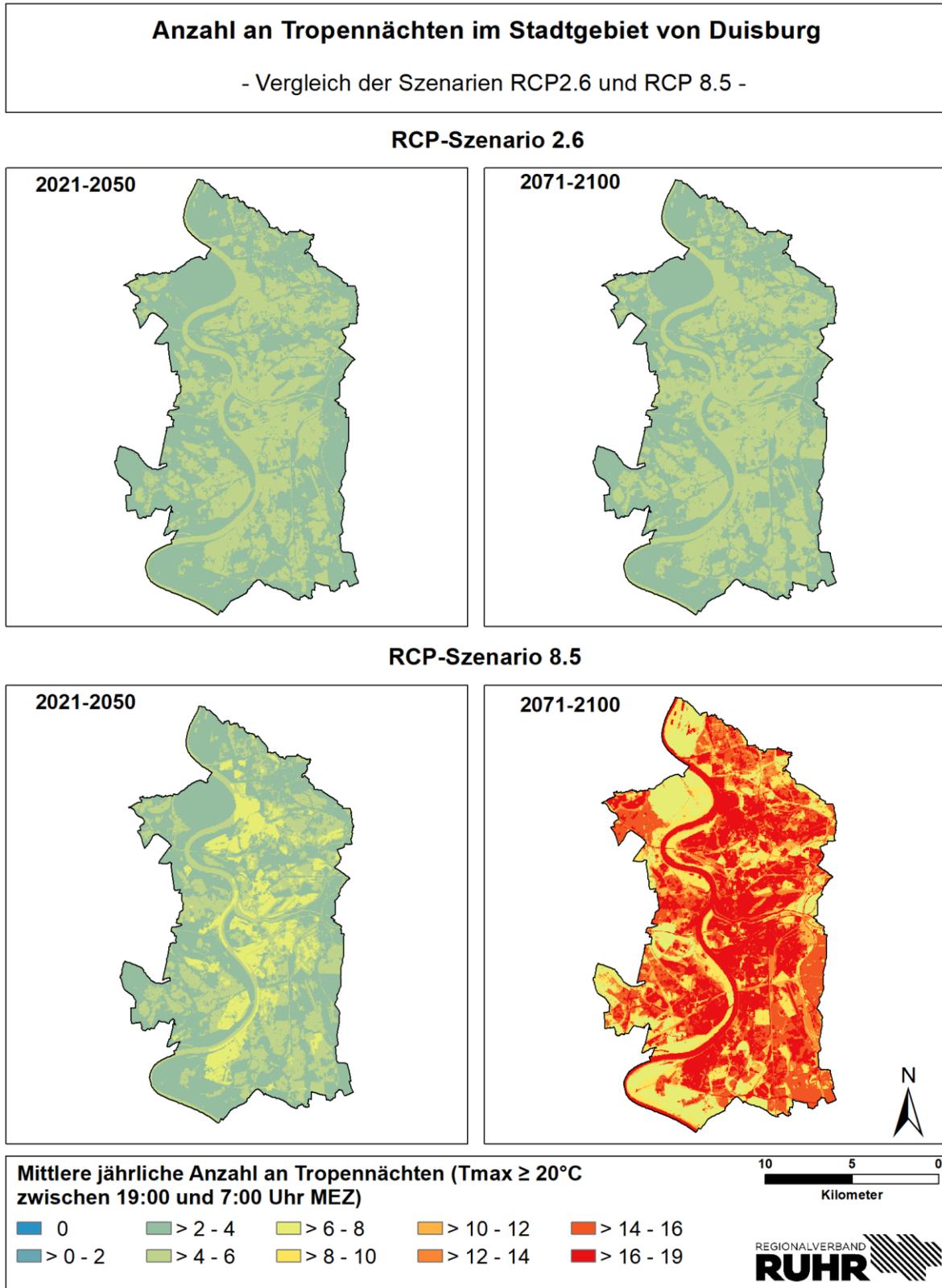


Abb. 6-22: Anzahl an Tropennächten im Stadtgebiet von Duisburg für die Szenarien RCP 2.6 und 8.5.

Um eine mittlere Hitzebelastung innerhalb des Stadtgebietes von Duisburg unter Berücksichtigung der Tag- und Nachtsituation (heiße Tage und Tropennächte) bestimmen zu können, wurden die Eingangsgrößen für die Tropennächte und die heißen Tage in einem nächsten Arbeitsschritt gewichtet normalisiert. Dabei wurde der Wertebereich beider Szenarien und beider Betrachtungszeiträume in die Berechnung einbezogen. Dies hat den Vorteil, dass beide Szenarien miteinander vergleichbar sind. Jedoch fällt anhand dieses Vorgehens die Bewertung der beiden Betrachtungszeiträume für das RCP-Szenario 2.6 sehr moderat aus, da die Anzahl an Tropennächten und heißen Tagen des RCP 8.5 in der fernen Zukunft die maximal mögliche Belastungssituation bestimmt.

In der Bewertung wurden die Nacht- als auch die Tagessituation als gleichwertig bedeutend betrachtet, indem die Eingangsgrößen für die Tropennächte und die heißen Tage gemittelt wurden. Das Ergebnis ist der Abb. 6-23 zu entnehmen.

Beim Vergleich der Szenarien wird deutlich, dass in beiden Bezugszeiträumen des Szenario 2.6 überwiegend moderate bis erhöhte Hitzebelastungen auftreten, deren räumliche Verteilungen sich nicht wesentlich unterscheiden. Dabei wird erneut deutlich, dass sich bei Umsetzung umfangreicher Klimaschutzmaßnahmen die Situation in Zukunft kaum verschärfen wird. Wie oben beschrieben, fällt zudem die Hitzebelastung beim Szenario 2.6 nicht sehr hoch aus, da es sich bei der Darstellung um eine mit dem Szenario 8.5 vergleichende Bewertung handelt. Würde sich die Normalisierung der Eingangsgrößen für die heißen Tage und Tropennächte nur auf das RCP-Szenario 2.6 beziehen, wäre eine deutlichere Differenzierung der verschiedenen Nutzungsarten anhand einer größeren Anzahl an Bewertungsklassen ersichtlich.

Die Analyse zeigt darüber hinaus, dass in der nahen Zukunft beim RCP-Szenario 8.5 bereits zahlreiche Gewerbe- und Industriegebiete sowie die dicht bebauten Innenstadtbereiche eine hohe Hitzebelastung während sommerlicher Strahlungswetterlagen aufweisen. In der fernen Zukunft sind beim RCP-Szenario 8.5 schließlich keine Bereiche mehr mit einer moderaten Hitzebelastung zu erwarten. So sind nach diesem Szenario extrem hohe Belastungen in den Gewerbe- /Industriegebieten sowie in den Innenstadtbereichen wahrscheinlich. Aber auch in den Waldgebieten ist immer mit einer hohen bis sehr hohen Hitzebelastung zu rechnen, da diese sich in den Nachtstunden nur wenig abkühlen. Nur die Freiland-, Grünland und Wasserflächen fallen in die Bewertungskategorie „hohe Hitzebelastung“.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass selbst erhebliche Anstrengungen beim Klimaschutz eine Verschlechterung der klimatischen Situation in der Stadt nicht aufhalten können und dass im

Die Stadt Duisburg im Zeichen des globalen Klimawandels

Falle eines Szenario „weiter-so-wie-bisher“ (RCP-Szenario 8.5) von einer extremen Belastung in weiten Bereichen der Stadt in Zukunft auszugehen ist. Anpassungsmaßnahmen an die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels sind daher unumgänglich, um zukünftig noch lebenswerte Bedingungen in den Städten zu ermöglichen. Ohne konsequenten Klimaschutz nimmt der Anpassungsbedarf schließlich noch weiter zu. Im ungünstigsten Fall – bei Nichteinhaltung des 2°C-Ziels - sind jedoch kaum mehr wirksame Anpassungen möglich.

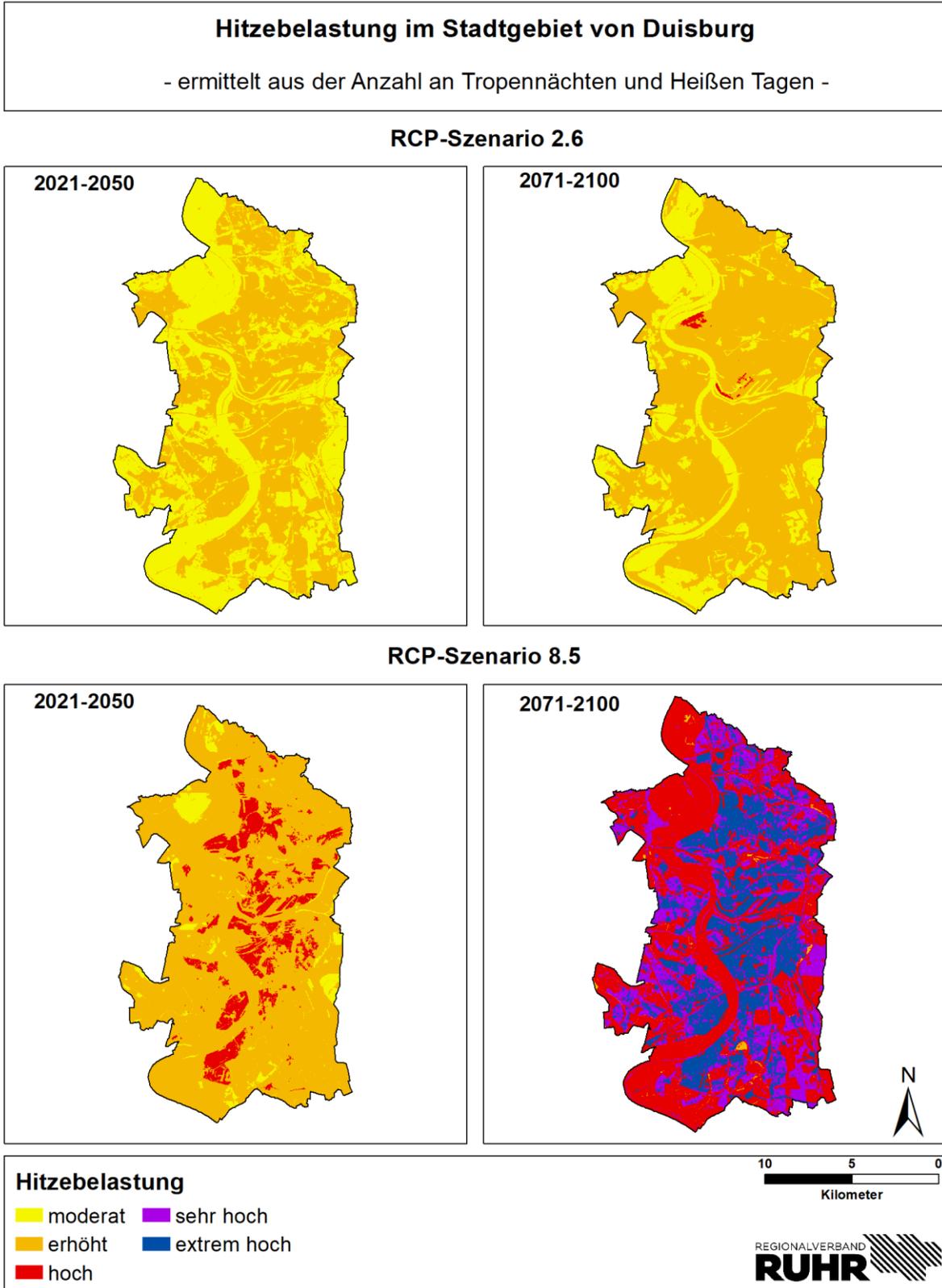


Abb. 6-23: Hitzebelastung in Duisburg (ermittelt aus den Heißen Tagen und Tropennächten für die Szenarien RCP 2.6 und 8.5).

6.4 Darstellung derzeitiger und zukünftiger Wärmeinselbereiche

Anhand der FITNAH-Modellierung (s. Kapitel 3), der Klimaanalysekarte (s. Kapitel 5) und der klimaökologischen Funktionen (s. Kapitel 4) wurde die Ist-Situation der klimatischen Verhältnisse in Duisburg dargestellt. Dabei wurde u.a. festgestellt, dass die städtische Überwärmung und damit die potenzielle Hitzebelastung in den dicht bebauten Stadtquartieren am größten ist. Diese Gebiete sind im Wesentlichen räumlich identisch mit den Innenstadt- und den Stadtklimatopen. Zudem konnte anhand der mittleren Häufigkeit hitzebedingter klimatologischer Kenntage (s. Kapitel 6.3) aufgezeigt werden, dass in Zukunft auch Bereiche, die heute aus klimatischer Sicht als noch moderat bis günstig einzustufen sind, häufiger Hitzebelastungen ausgesetzt sein werden. Neben den Innenstadtbereichen und den Stadtklimatopen treten daher in Zukunft während sommerlicher Strahlungsnächte auch die Stadtrandklimatope als thermisch stark belastete Bereiche auf. Diese Einschätzung basiert zudem auf der Tatsache, dass die mittleren Temperaturdifferenzen zwischen den heutigen Wärmeinselbereichen (Innenstadt-/Stadt-klimatopen) und den Stadtrandklimatopen sich auf maximal 2 K belaufen, der zukünftig zu erwartenden mittlere Temperaturanstieg aber über 2 K betragen wird. Diese Herangehensweise zur Ausweisung von gegenwärtigen und zukünftigen Problemgebieten haben bereits Kuttler et al. (2013) im Rahmen des Projektes *dynaklim* für die Stadt Oberhausen gewählt.

Abb. 6-24 zeigt die gegenwärtigen (2020) und zukünftigen (2100) Wärmeinselbereiche im Stadtgebiet von Duisburg. Dabei wurden für die gegenwärtige Situation die Innenstadtklimatope mit einer sehr hohen Intensität und die Stadtklimatope mit einer hohen Intensität als Wärmeinseln ausgewiesen. In Zukunft nehmen sowohl die Innenstadt- als auch die Stadtklimatope eine sehr hohe und die Stadtrandklimatope eine hohe Wärmeinselintensität ein. Demnach erweitern sich die Wärmeinselbereiche von derzeit etwa 11,3 % des Stadtgebietes zukünftig auf eine Fläche von über 45,1 km² und umfassen dann fast 19,8 % des Stadtgebietes.

Bei dieser Betrachtung und Ausweisung der Wärmeinselbereiche wurde der Fokus lediglich auf Gebiete der Wohn- und Mischbebauung begrenzt. Die Gewerbe- und Industriegebiete weisen zwar ebenfalls hohe (Gegenwart) bis sehr hohe (Zukunft) Überwärmungen auf, werden in dieser Darstellung allerdings nicht berücksichtigt. Die dargestellten Bereiche der Wärmeinseln werden als Problemgebiete hinsichtlich der thermischen Belastung der Wohnbevölkerung angesehen. Der vorrangige Handlungsbedarf sollte dahingehend ausgerichtet sein, diese Wärmeinselbereiche klimatisch aufzuwerten. Dabei sollten insbesondere Bereiche, in denen ein hoher Anteil der potenziell gegenüber Hitzebelastungen

sensiblen Bevölkerungsgruppen (v.a. Senioren, Kranke und Kleinkinder) anzutreffen ist, im Fokus der Anpassungsbemühungen stehen. Daher werden im folgenden Kapitel 7 die Ergebnisse einer Betroffenheitsanalyse zur Identifizierung der besonders betroffenen Bereiche im Stadtgebiet dargestellt.

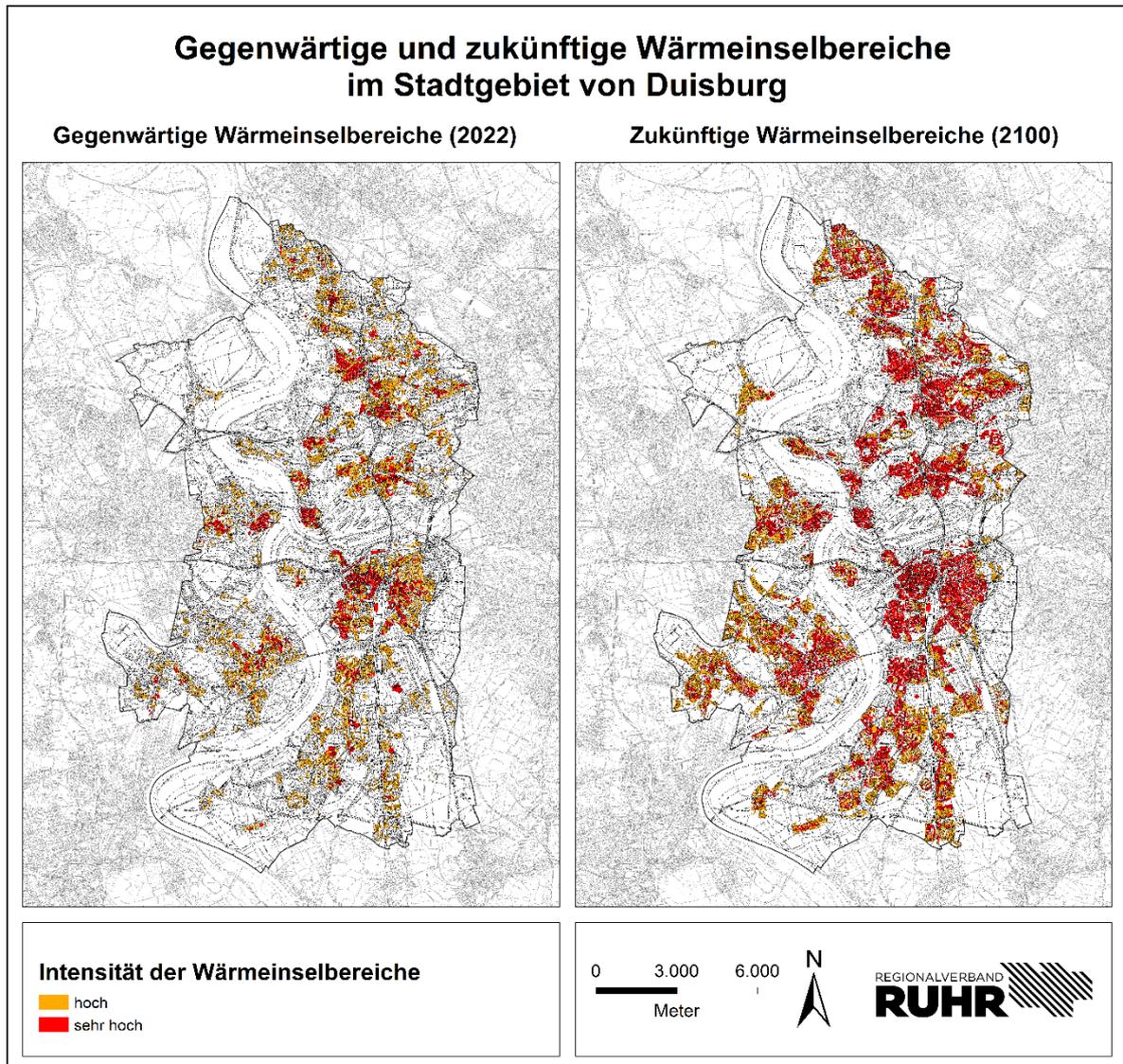


Abb. 6-24: Darstellung gegenwärtiger (2020) und zukünftiger (2100) Wärmeinselbereiche im Stadtgebiet von Duisburg.

7 Betroffenheitsanalyse

Die in Kapitel 6 beschriebenen zu erwartenden Klimaänderungen im Laufe des 21. Jahrhunderts, insbesondere der Anstieg der Häufigkeit und Intensität der extremen Wetterereignisse (z.B. Hitzewellen), können sich negativ auf die Gesundheit des Menschen auswirken. Aber nicht nur hohe Temperaturen, sondern auch eine Zunahme der Luftverschmutzung und der Luftallergene, ein Anstieg des bodennahen Ozons während Hitzeperioden sowie die Zunahme der UV-Strahlung durch eine Abnahme des stratosphärischen Ozons können klimawandelbedingte Gesundheitsrisiken darstellen. Das Ausmaß extremer Wetterereignisse wurde dabei bereits in der Vergangenheit deutlich, so hat der Hitzesommer 2003 europaweit etwa 55.000 zusätzliche hitzebedingte Sterbefälle (ca. 7.000 davon in Deutschland) verursacht. Neben einer Steigerung der Mortalitätsrate wirken sich derartige klimatische Belastungen ebenfalls nachteilig auf die Morbidität, die Leistungsfähigkeit und das allgemeine Wohlbefinden des Menschen aus. Insbesondere Personen mit Atemwegs- und Herz-Kreislaufvorerkrankungen, ältere Menschen und Kleinkinder sind betroffen. Zwar ist das Ausmaß der gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels schwer abzuschätzen, jedoch ist grundsätzlich bei zukünftig häufiger auftretenden und intensiveren klimatischen Belastungen auch mit einer Zunahme der negativen gesundheitlichen Auswirkungen zu rechnen. Daher gilt es, durch eine gezielte Anpassungsstrategie im Rahmen einer nachhaltigen Stadtplanung gesunde Wohn-, Arbeits- und Aufenthaltsbedingungen zu schaffen bzw. sicherzustellen, um die klimawandelbedingten Gesundheitsrisiken für die städtische Bevölkerung zu minimieren (Jendritzky 2007).

Um entsprechende Anpassungsmaßnahmen gezielt zu entwickeln, sollen im Rahmen einer Betroffenheitsanalyse Gebiete bzw. Bereiche (im Folgenden als „Problemgebiete“ bezeichnet) innerhalb des Stadtgebietes von Duisburg identifiziert werden, die eine besondere Sensitivität gegenüber den Folgen des Klimawandels aufweisen.

7.1 Methodik zur Abgrenzung der Problemgebiete

In der Fachliteratur bestehen bereits vielfältige Ansätze zur Bewertung der Betroffenheit einer städtischen Bevölkerung in unterschiedlichen Quartieren gegenüber den Folgen des Klimawandels. Häufig wird dabei die Altersstruktur der Bevölkerung als alleiniger Indikator für das Maß der Verwundbarkeit gegenüber Hitzebelastung herangezogen. Aktuelle sozialwissenschaftliche Studien zum Klimawandel zeigen, dass die subjektive Wahrnehmung der Hitzebelastung von vielfältigen gesellschaftlichen Einflüssen geprägt wird und von der individuellen Lebenssituation eines jeden Menschen abhängig ist (Großmann et al. 2012).

Für diese vielfältigen sozialen Parameter ist die Datenbasis oftmals nicht vorhanden oder unzureichend, um eine flächendeckende, stadtweite Bewertung durchzuführen. Auch im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ist dies aufgrund der zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht möglich.

Daher erfolgt die Betroffenheitsanalyse nach dem im Rahmen des „Handbuch Stadtklima“ (MUNLV 2010) entwickelten Ansatzes. Hierbei wird die Betroffenheit gegenüber Hitzebelastungen anhand der Bevölkerungsdichte und der Altersstruktur bezogen auf den Anteil der über 65-jährigen Wohnbevölkerung betrachtet. Die zugrunde gelegte Datenbasis wurde auf Ebene der Baublöcke von der Stadt Duisburg zur Verfügung gestellt und bezieht sich auf den Zeitpunkt 31.10.2021.

Die Bewertung erfolgte anschließend mittels Verschneidung der Bevölkerungsdaten mit den Bereichen der städtischen Wärmeinseln, also den Innenstadt- und Stadtklimatopen. Zusätzlich zur Bewertung der Anfälligkeit gegenüber Hitzebelastung auf Basis der Bevölkerungsdichte und Altersstruktur werden sensible Einrichtungen (Seniorenheime bzw. -wohnanlagen, Kindertagesstätten bzw. -gärten, und Krankenhäuser) in den Problemgebieten verortet.

Bereiche der städtischen Wärmeinsel

Die städtischen Wärmeinselbereiche sind für die Gesundheit der Menschen bedeutsam, da in diesen Bereichen eines Stadtgebietes nachteilige gesundheitliche Effekte durch die erhöhte Exposition gegenüber thermischen Extrembedingungen verstärkt auftreten können. Diese Gebiete können daher grundsätzlich als anfällig gegenüber Hitzebelastungen charakterisiert werden (Jendritzky 2007; MUNLV 2010).

Die Daten der Bevölkerungsdichte und der Altersstruktur werden daher mit den gegenwärtigen Wärmeinseln (hier: die Innenstadt- und Stadtklimatope) verschnitten. Die räumliche Ausbreitung der Wärmeinselbereiche im Stadtgebiet von Duisburg kann der Abbildung 6-24 entnommen werden.

Bevölkerungsdichte

Ein wichtiger Indikator zur Beurteilung der Betroffenheit gegenüber Hitzebelastungen in unterschiedlichen Stadtquartieren ist die Bevölkerungsdichte. Denn je größer die Einwohnerdichte ist, desto mehr Menschen sind potenziell einer Hitzebelastung ausgesetzt. Hierzu wurden die Bevölkerungsdaten auf Grundlage von Baublöcken im Stadtgebiet herangezogen. Dies hat den Nachteil, dass Bereiche mit reiner Dienstleistungsfunktion und somit ohne Wohnbevölkerung trotz potenziell hoher Hitzebelastung bei diesem Bewertungsverfahren nicht als Problemgebiete berücksichtigt werden. Innenstadtbereiche, die

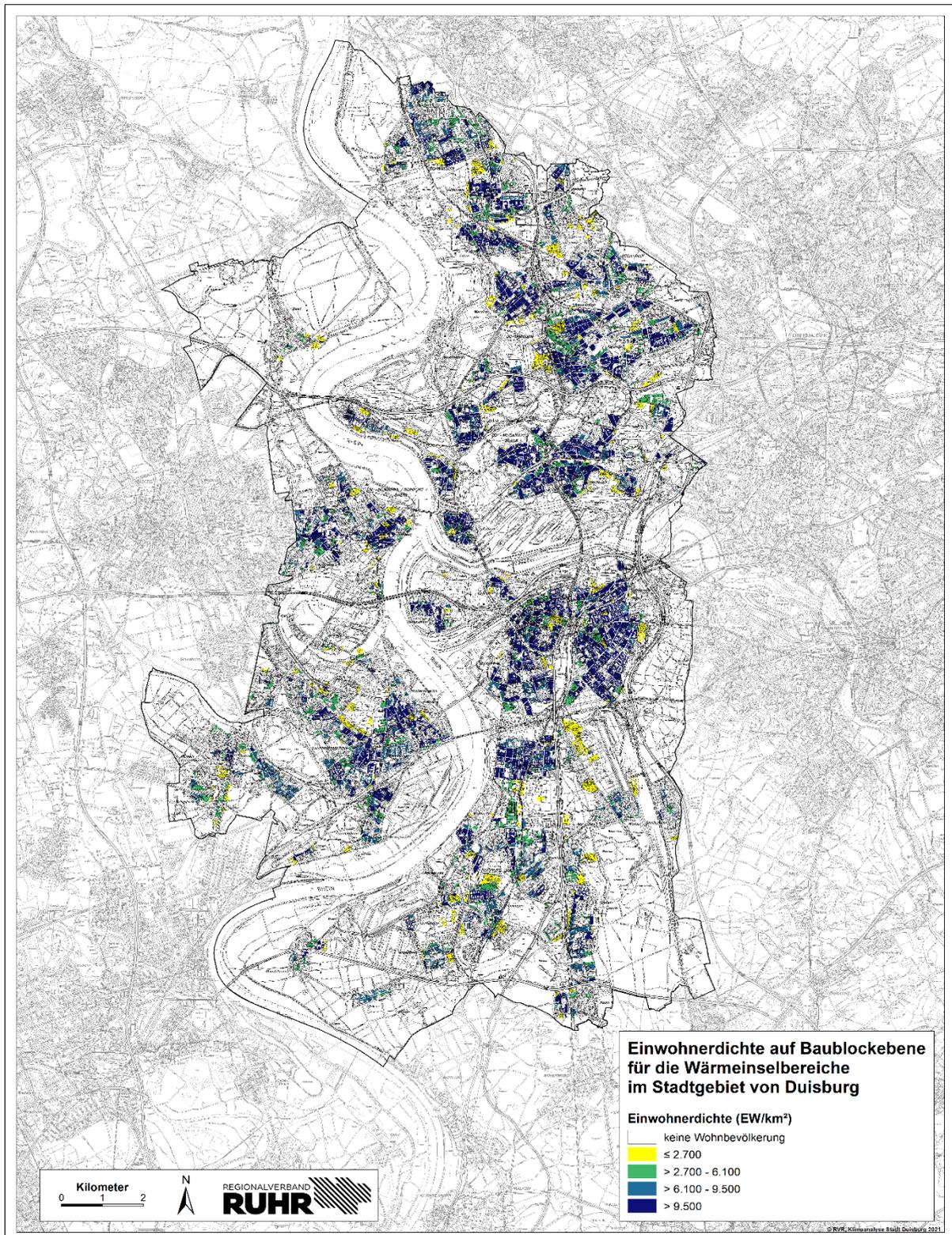
eine Mischnutzung aus Dienstleistung und Wohnen und somit einen relativ geringen Anteil an Wohnbevölkerung aufweisen, können dadurch als Problemgebiete mit geringerer Anfälligkeitsstufe bewertet werden.

Grundsätzlich ist hierbei zu bedenken, dass bei einem temporären Aufenthalt in Innenstädten oder Nebenzentren tagsüber einer Hitzebelastung durch den Wechsel des Standortes und die bewusste Vermeidung von stark sonnenexponierten Plätzen aktiv entgegengewirkt werden kann. Wogegen die Bevölkerung in ihren Wohnquartieren insbesondere nachts einer Hitzebelastung durch mangelnde Abkühlung nicht ausweichen kann.

Karte A 1 (siehe Anhang) zeigt die Bevölkerungsdichte in Einwohner pro km² (Einw./km²) für das gesamte Stadtgebiet von Duisburg. Um eine regionale Vergleichbarkeit und einheitliche Bewertungsmaßstäbe zu gewährleisten, wurden die Werte zur Klasseneinteilung aus der Analyse des „Handbuch Stadtklima“ übernommen. Diese beruhen auf der Auswertung der Bevölkerungszahlen auf Ebene der Wohnquartiere des gesamten Ruhrgebiets (Quelle: infas GEOdaten, Stand 2007). Bezogen ausschließlich auf die Gebiete der Stadt- und Innenstadtklimatope im gesamten Ruhrgebiet ergibt sich eine mittlere Bevölkerungsdichte von rund 2.700 Einw./km². Die weiteren Klassenobergrenzen (6.100 bzw. 9.500 Einw./km²) ergeben sich aus der Addition der mittleren Bevölkerungsdichte mit der einfachen bzw. doppelten Standardabweichung. Bei Flächen ohne eine farbliche Darstellung handelt es sich um statistisch ausgewiesene Baublöcke ohne jegliche Wohnbevölkerung. Dies können Wald-, Landwirtschafts- und innerstädtische Grünflächen, aber auch bebaute Bereiche mit rein industrieller, gewerblicher oder öffentlicher Nutzung sein.

Karte 7.1 zeigt die Einwohnerdichte auf Baublockebene ausschließlich für die Bereiche der Stadt- und Innenstadtklimatope (bzw. die Wärmeinselbereiche) im Stadtgebiet von Duisburg. Erwartungsgemäß weist die Einwohnerdichte in diesen zumeist stark baulich überprägten Bereichen zum Großteil mit über über 9.500 Einw./km² sehr hohe Werte auf. Insbesondere in den Stadtbezirken Mitte, Meiderich/Beeck, Hamborn und Rheinhausen sind zahlreiche, teils zusammenhängende Baublöcke der höchsten ausgewiesenen Kategorie vorzufinden. Lediglich vereinzelte, kleinere Baublöcke der Stadt- und Innenstadtklimatope von Duisburg verzeichnen geringe Einwohnerdichten unterhalb von 2.700 Einw./km². Hierbei handelt es sich überwiegend um Baublöcke mit vorwiegend öffentlicher Nutzung und somit nur geringem Anteil an Wohnnutzung.

Karte 7.1: Einwohnerdichte auf Baublockebene für die Wärmeinselbereiche im Stadtgebiet von Duisburg.



Altersstruktur

Für die Anfälligkeit eines Gebietes gegenüber einer klimatischen Belastung des Menschen spielen neben dem Hitzepotential und der Bevölkerungsdichte auch soziodemographische Faktoren wie die Altersstruktur der Bevölkerung eine Rolle. Ältere Menschen zeigen eine schlechtere Anpassung an extreme Hitze mit gesundheitlichen Folgen, die von Abgeschlagenheit bis hin zu Hitzschlag und Herzversagen reichen können. Gebiete mit einem hohen Anteil älterer Menschen können daher als anfälliger gegenüber Hitzestress charakterisiert werden. Aus diesem Grund wurde im „Handbuch Stadtklima“ (MUNLV 2010) analog zur Bevölkerungsdichte auch der Bevölkerungsanteil der über 65-Jährigen für die Wohnquartiere im gesamten Ruhrgebiet ermittelt. Im Ruhrgebiets-Mittel sind rund 20 % der Einwohner in den Gebieten der Stadt- und der Innenstadtklimatope über 65 Jahre alt (Standardabweichung 3 %).

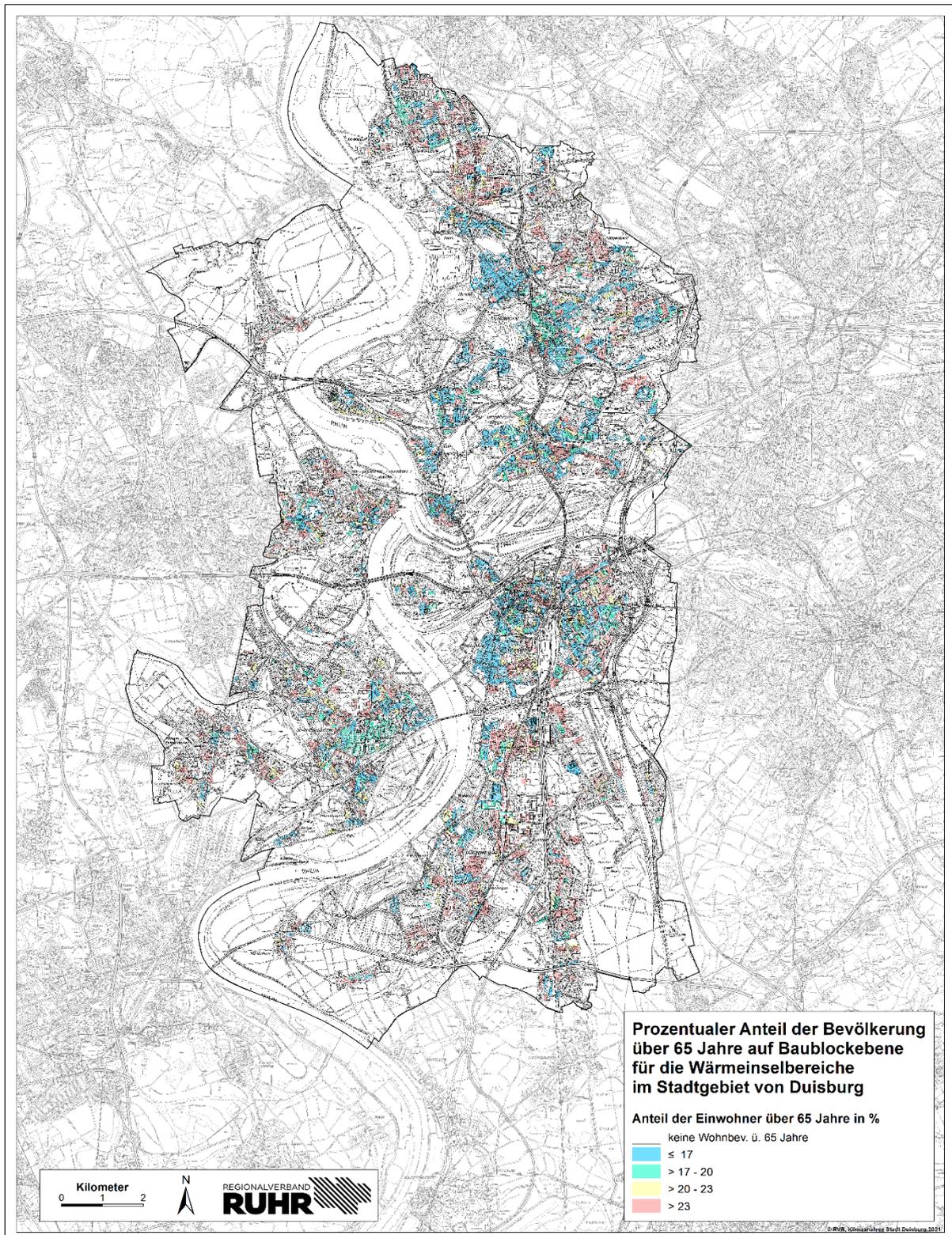
Karte A2 (siehe Anhang) zeigt die prozentualen Anteile der Bevölkerung über 65 Jahre auf Baublockebene für das gesamte Stadtgebiet von Duisburg. Analog zu Karte A1 handelt es sich bei Flächen ohne eine farbliche Darstellung um statistisch ausgewiesene Baublöcke ohne jegliche Wohnbevölkerung (z.B. Wald-, Landwirtschafts- und innerstädtische Grünflächen; bebaute Bereiche mit rein industrieller, gewerblicher oder öffentlicher Nutzung) bzw. ohne Einwohner über 65 Jahre. Die Klasseneinteilung ergibt sich aus der Addition und Subtraktion der Standardabweichung (3 %) vom Mittelwert (20 %) bezogen auf das gesamte Ruhrgebiet. Somit werden Flächen bzw. Baublöcke mit Anteilen der über 65-Jährigen an der Wohnbevölkerung von unter 17 % und 17-20 % als unterdurchschnittlich und von 20-23 % und über 23 % als überdurchschnittlich gewertet.

Bezogen auf die Gesamtbevölkerung der Stadt Duisburg liegt der Anteil der über 65-jährigen Einwohner bei 20,6 und liegt somit etwas unter dem Landes-Mittel (21,4%).

Karte 7.2 zeigt die prozentualen Anteile der Einwohner über 65 Jahre auf Baublockebene ausschließlich für die Stadt- und Innenstadtklimatope (bzw. Wärmeinselbereiche) im Stadtgebiet von Duisburg. Es wird deutlich, dass in diesen Bereichen Baublöcke mit einem überdurchschnittlichen Anteil (> 20 %) an Wohnbevölkerung über 65 Jahre in allen Stadtbezirken vorkommen. Dabei konzentrieren sich diese Gebiete vor allem auf die Stadtteile Aldenrade (Stadtbezirk Walsum), Mittel-Meiderich, Röttgersbach (Stadtbezirk Hamborn) und Wanheimerort (Stadtbezirk Mitte), während in Marxloh (Stadtbezirk Hamborn), Hochfeld (Stadtbezirk Mitte) und Rheinhausen-Mitte der Anteil an älterer Wohnbevölkerung mit unter 17% bzw. maximal 20 % (Rheinhausen-Mitte) geringer ausfällt.

Zu bedenken ist, dass aufgrund der zukünftigen demographischen Entwicklung der Anteil der über 65-Jährigen in Duisburg voraussichtlich um ca. 18,7 % bis zum Jahr 2040 (gegenüber 2018) ansteigen wird, obwohl im gleichen Zeitraum ein Bevölkerungsrückgang von ca. 4,8 % prognostiziert wird (IT.NRW 2020).

Karte 7.2: Prozentualer Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre auf Baublockebene für die Wärmeinselbereiche im Stadtgebiet von Duisburg.



7.2 Lokalisierung und Bewertung der Problemgebiete

Aus der Verschneidung der Bereiche städtischer Wärmeinseln (bzw. Stadt- und Innenstadtklimatope) mit den Daten der Bevölkerungsdichte und des prozentualen Anteils der über 65-Jährigen lassen sich Problemgebiete mit einer abgestuften Anfälligkeit gegenüber einer klimatischen Belastung des Menschen abgrenzen und bewerten.

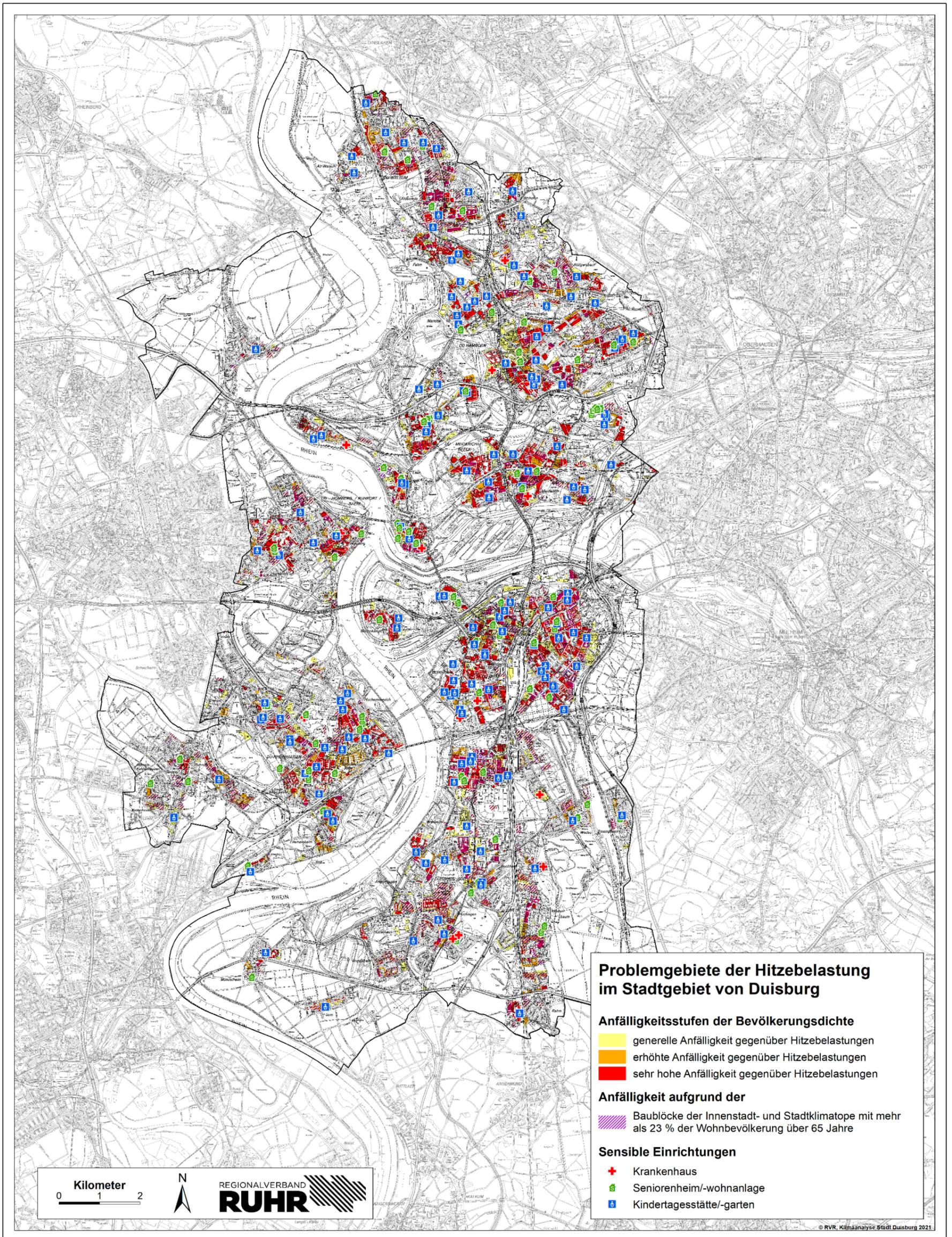
Grundsätzlich ist in den Stadt- und Innenstadtbereichen aufgrund der zumeist hochversiegelten Bebauungsstruktur von einer generellen Hitzebelastung der Wohnbevölkerung auszugehen. Mit zunehmender Bevölkerungsdichte erhöht sich die potenzielle Anfälligkeit eines Wohngebietes. Auf Basis der Bevölkerungsdichte werden drei Stufen der Anfälligkeit gegenüber Hitzebelastungen unterschieden. Während Baublöcken mit einer Einwohnerdichte unterhalb von 6.100 Einw./km² eine generelle Anfälligkeit zugeordnet wird, weisen Bereiche mit einer Bevölkerungsdichte von 6.100 bis 9.500 Einw./km² eine erhöhte Anfälligkeit auf. Bei mehr als 9.500 Einw./km² kann von einer sehr hohen Anfälligkeit ausgegangen werden. Überlagert werden diese drei Klassen von Bereichen mit einem überdurchschnittlichen Bevölkerungsanteil (mehr als 23 %) der über 65-Jährigen. Diesen Quartieren wird unabhängig von der Gesamtbevölkerungsdichte eine besondere Anfälligkeit gegenüber Hitzebelastungen zugesprochen, da sie ein hohes Hitzepotential zusammen mit einem hohen Anteil der älteren Bevölkerungsgruppe aufweisen.

Zusätzlich zur Bewertung der Anfälligkeit auf Baublockebene anhand der Indikatoren Bevölkerungsdichte und Anteil der über 65-jährigen Wohnbevölkerung werden Seniorenheime bzw. -wohnanlagen, Kindertagestätten bzw. -gärten und Krankenhäuser in den potenziell hitzebelasteten Innenstadt- und Stadtklimatopen verortet. In diesen sogenannten (hitze-)sensiblen Einrichtungen hält sich dauerhaft oder temporär konzentriert an einem Standort eine größere Anzahl an Personen auf, die den besonders gegenüber thermischen Belastungen anfälligen Bevölkerungsgruppen der Senioren, Kranken und Kleinkindern zuzuordnen sind.

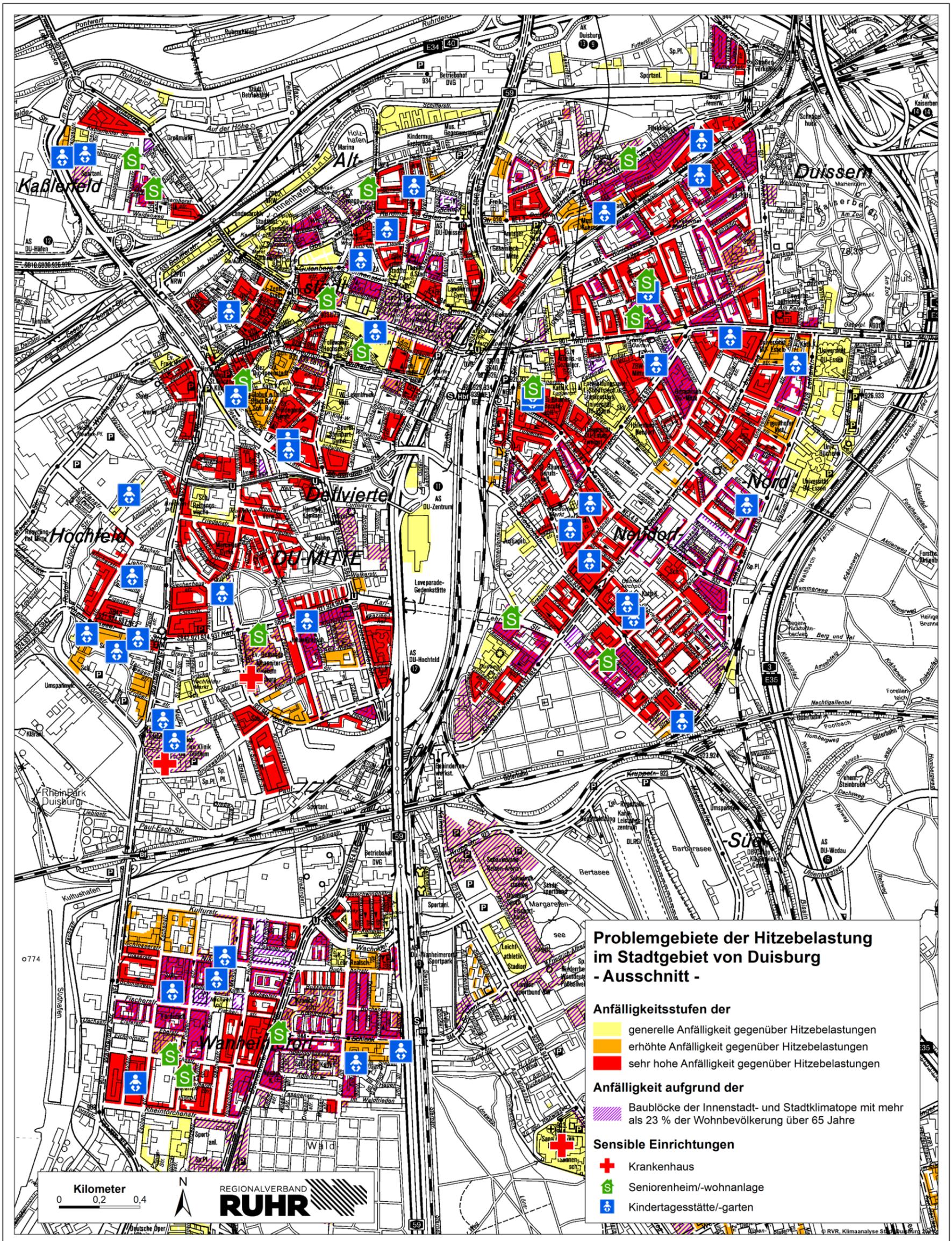
Der Karte 7-3 ist das Auftreten der Problemgebiete mit Hitzebelastung im Stadtgebiet von Duisburg zu entnehmen. Die Problemgebiete befinden sich entsprechend der räumlichen Verteilung der Innenstadt- und Stadtklimatope verteilt über das gesamte Stadtgebiet. Baublöcke, die sowohl eine sehr hohe Anfälligkeit aufgrund der Bevölkerungsdichte als auch einen überdurchschnittlich hohen Anteil an über 65-jähriger Wohnbevölkerung aufweisen, treten vereinzelt in allen Stadtbezirken auf (Beispiel: Wanheimerort und Duisern im Stadtbezirk Mitte, Mittel-Meiderich, Aldenrade im Stadtbezirk Walsum und Alt-Homberg. Bezogen auf die Flächengröße und den Zusammenhang von Problemgebieten ist für Duisburg

festzuhalten, dass es sich weniger um großflächige und zusammenhängende Flächen handelt, sondern diese vielfach von günstigeren Bereichen unterbrochen werden. Auffällig ist jedoch, dass insgesamt zahlreiche sensible Einrichtungen in den Problemgebieten der Hitzebelastung – insbesondere Kindertagesstätten bzw. Kindergärten und Seniorenheime bzw. -wohnanlagen - angesiedelt sind. So konnten insgesamt 14 Krankenhäuser oder krankenhaushähnliche Einrichtungen, 119 Senioren- und Pflegeheime bzw. Wohneinrichtungen sowie 235 Kindergärten bzw. -tagesstätten im Stadtgebiet von Duisburg identifiziert werden, die in diesen stadtklimatischen Ungunsträumen verortet sind.

Insbesondere in diesen Bereichen sollten vordringlich Maßnahmen zur Reduzierung der sommerlichen Hitzebelastung fokussiert werden.



Karte 7.3: Problemgebiete der Hitzebelastung im Stadtgebiet von Duisburg.



Karte 7.4: Problemgebiete der Hitzebelastung im Stadtgebiet von Duisburg.

8 Planungshinweise

Auf Basis der Klimaanalysekarte, der Topographie, der Flächennutzung, aktueller Luftbilder sowie den Erkenntnissen aus der FITNAH-Simulation werden im Folgenden für das Stadtgebiet von Duisburg Planungsempfehlungen aus stadtklimatologischer Sicht abgeleitet. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass lediglich die Umweltaspekte Klima und Lufthygiene zur Ausweisung der Planungshinweise herangezogen wurden. Eine Abwägung mit weiteren ökologischen Belangen oder der Raumentwicklung dienenden Vorgaben ist nicht erfolgt und daher bei allen Vorhaben zu prüfen.

Insbesondere mit Blick auf die prognostizierten klimatischen Veränderungen, die sich bedingt durch den globalen Klimawandel im Laufe des 21. Jahrhunderts in der Region einstellen und zu einer Verschärfung der thermischen Stadt-Umland-Verhältnisse führen werden, soll durch die Beachtung und Umsetzung der Maßnahmenempfehlungen eine klimawandelgerechte Stadtentwicklung in Duisburg gesichert werden. Die ausgewiesenen Planungsempfehlungen sind dabei als Rahmenvorgaben anzusehen, die der Bauleitplanung als Orientierung für eine nachhaltige Anpassung der Stadt an den Klimawandel dienen sollen. Das Ziel ist der Erhalt klimatisch positiver Raumstrukturen sowie die Aufwertung der aus klimaökologischer Sicht belasteten Siedlungsbereiche zum Wohle der städtischen Bevölkerung.

Zu diesem Zweck wird im Folgenden die gesamtstädtische Planungshinweiskarte dargestellt und beschrieben. Die Erstellung der Planungshinweiskarte und die Ausweisung der Maßnahmenempfehlungen basieren auf den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 (VDI 1997/2003).

8.1 Planungshinweiskarte

Die Planungshinweiskarte (siehe Karte 8.1) beinhaltet mit den Ausgleichs- und Lasträumen, den raumspezifischen Hinweisen, den lokalen Hinweisen sowie den Informationen zum Luftaustausch vier Darstellungsebenen, die im Folgenden zunächst näher erläutert werden.

8.1.1 Darstellungsebenen der Planungshinweiskarte

Die **erste Darstellungsebene** beinhaltet die flächenhafte Differenzierung des Stadtgebietes von Duisburg anhand von klimatischen Ausgleichs- und Lasträumen. Diese werden auf Basis der Klimatope abgeleitet und stellen räumliche Einheiten mit vergleichbaren Eigenschaften bezüglich der Flächennutzung, der Bebauungsdichte, des Versiegelungsgrads, der Rauigkeit und des Vegetationsbestands dar. Somit können für diese Bereiche flächenhaft gültige Planungsempfehlungen ausgesprochen werden, für die anhand der weiteren Darstellungsebenen lokale Konkretisierungen erfolgen können.

In der **zweiten Darstellungsebene** werden raumspezifische Hinweise ausgewiesen. Hierzu zählen linienhafte Strukturen der Hauptverkehrsstraßen und Bahnanlagen sowie flächenhafte Hinweise für die Bereiche der Kaltluftsammlgebiete und zur Vernetzung von Grünflächen.

Die **dritte Darstellungsebene** liefert lokale (Planungs-)Hinweise. Neben der Identifizierung von Bereichen, die sich aus klimatischer Sicht für eine weitere maßvolle Verdichtung oder Neubebauung eignen, werden Gebiete lokalisiert, in denen auf eine weitere Verdichtung verzichtet werden sollte. Zudem werden u.a. an bestimmten Siedlungsändern Empfehlungen zur Festsetzung von Bebauungsgrenzen ausgesprochen, die dem Schutze bzw. Erhalt der klimaökologischen Funktionen der angrenzenden Grün- und Freiflächen dienen sollen.

Die Planungsempfehlungen bezüglich der Luftaustauschverhältnisse im Stadtgebiet werden in einer **vierten Darstellungsebene** beschrieben. Neben Luftleitbahnen und Bereichen der Frischluftzufuhr werden die nächtlichen Kaltluftabflüsse dargestellt und Flächen aufgezeigt, bei denen der Luftaustausch gefördert oder erhalten bleiben sollte.

8.1.1.1 Ausgleichs- und Lasträume

Im Stadtgebiet von Duisburg nehmen diverse Flächen eine lokale Ausgleichsfunktion zu klimatischen bzw. lufthygienischen Belastungen ein. Die Ausgleichsräume können in die vier Flächentypen Gewässer, Freiland, Wald sowie Park- und Grünanlagen eingeteilt werden. Neben den Ausgleichsräumen wird das Stadtgebiet durch Lasträume geprägt. Hierbei kann in Abhängigkeit vom Versiegelungsgrad, der Bebauungsdichte und der Höhe der Gebäude zwischen unterschiedlich stark ausgeprägten Lasträumen unterschieden werden. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Arten der Ausgleichs- und Lasträume charakterisiert, indem ihre Wirkungen auf das Stadtklima beschrieben sowie raum- und nutzungsbezogene Planungsempfehlungen aufgezeigt werden.

Bioklimatischer Ausgleichsraum Gewässer

Gewässer zeichnen sich durch ausgeglichene klimatische Verhältnisse mit gedämpftem Tagesgang der Lufttemperatur und einer erhöhten Luftfeuchtigkeit aus. Die tagsüber kühlende Wirkung bleibt insbesondere bei kleineren Gewässern zumeist auf den Wasserkörper sowie die unmittelbare Umgebung beschränkt. Die geringe Rauigkeit von Gewässerflächen begünstigt die Austausch- und Ventilationsverhältnisse, wodurch linienhafte Gewässerstrukturen eine Funktion als Luftleitbahn einnehmen können.

Daher ist bei Gewässern eine Sicherung bzw. Förderung der Belüftungsfunktion für angrenzende Bebauungsstrukturen anzustreben. Zu diesem Zweck sollten die Uferbereiche sowie die Übergangszonen zwischen Gewässern und Siedlungskörpern von riegelförmiger Bebauung und Bepflanzung freigehalten werden. Gewässer und angrenzende Grünflächen

stellen zudem wertvolle Zonen für die Naherholung dar und sollten als solche erhalten und gestaltet werden.

Regional bedeutsamer Ausgleichsraum Freiland

Die zumeist geringen Emissionen im Freiland werden großflächig verteilt und die Windgeschwindigkeiten durch geringe Bodenrauigkeiten erhöht. Durch die nächtliche Produktion von Kaltluftmassen können Kaltluftabflüsse begünstigt sowie bodennahe Flurwindssysteme bei einem starken Temperatur- bzw. Druckgefälle zur überwärmten Innenstadt angetrieben werden. Die ausgleichenden Funktionen können sich jedoch erst bei einer ausreichend großen Freilandfläche, einer geringen Emittentenzahl und im Falle von Kaltluftabflüssen durch eine ausreichende Reliefdynamik einstellen. Besonders günstige Durchlüftungsverhältnisse ergeben sich für Freilandbereiche in Kuppen- oder Hanglagen. In ebener Lage werden dagegen nächtlich produzierte Kaltluftmassen nur schlecht transportiert und Muldenlagen stellen sich als Kaltluftammelgebiete dar. Die Ansammlung von Kaltluftmassen ist mit der Gefahr der Schadstoffanreicherung verbunden und führt zudem dazu, dass die Kaltluftmassen keine Wirkung in der Umgebung erzielen können.

In Muldenlagen und Niederungsbereichen sollte daher auf die Ansiedlung von Emittenten (insbesondere mit geringer Emissionshöhe) verzichtet werden. Die stadtnahen Freiflächen sind grundsätzlich als Ausgleichsräume zu sichern und von Bebauung freizuhalten. Zudem ist eine Grünflächenvernetzung in die Siedlungsbereiche hinein anzustreben und von einer riegelförmigen Bebauungsstruktur an den Siedlungsrändern abzusehen. An Hängen, die als Kaltluftabflussbahnen fungieren, sind hangparallele Zeilenbebauungen sowie dichte Bepflanzungen mit Riegelwirkung zu vermeiden. Neben der Größe einer Freifläche wirken sich auch die Art der Nutzung und die thermischen Eigenschaften des Bodens sowie der bodenbedeckenden Vegetation auf die Wirksamkeit von kalt- und frischluftproduzierenden Flächen aus. So produzieren beispielsweise gut wasserversorgte Feld- und Wiesenflächen mehr Kaltluft als Waldgebiete. Durch die Art der Nutzung und Vegetationswahl können diese Ausgleichsräume daher aus klimatischer Sicht aufgewertet werden.

Lokal bedeutsamer Ausgleichsraum Park- und Grünanlagen

Park- und Grünanlagen stellen grundsätzlich bioklimatisch wertvolle innerstädtische Ausgleichsräume dar. Dabei ist die Reichweite der klimatischen Ausgleichswirkung von ihrer Flächengröße, ihrer Ausgestaltung, ihrer Anbindung an die Bebauung sowie der Reliefsituation abhängig. Während eine dichte Randbebauung auch bei großen Grünflächen eine Fernwirkung unterbinden kann, kann die Wirkung kleinerer Flächen in Kuppenlage aufgrund reliefbedingter Kaltluftabflüsse über die Fläche selbst hinausreichen. Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein ausreichend breiter, rauigkeitsarmer Belüftungsbahnen, entlang derer die

kühleren Luftmassen abfließen können. Eine besondere Funktion kommt den Grünzügen als Trennungselement zwischen Wohngebieten und emittierenden Industrie- und Gewerbegebieten oder stark befahrenen Straßen zu. Hier erfüllen sie einerseits eine Abstandsfunktion, andererseits bewirken sie eine Verdünnung und Filterung von Luftschadstoffen. Darüber hinaus fördern Grünzüge durch die Entstehung kleinräumiger Luftaustauschprozesse eine Unterbrechung von Wärmeinseln. Bei einer engen Vernetzung und einer stadträumlich sinnvollen Anordnung tragen daher auch kleinere Grünflächen zur Abmilderung des Wärmeinseleffekts bei. Zudem zeigen kleine, isoliert liegende Grünflächen, wie z.B. begrünte Innenhöfe, zwar keine über die Fläche hinausreichende Wirkung, stellen aber als „Klimaoasen“ gerade in den dicht bebauten Innenstädten wichtige lokale Freizeit- und Erholungsräume für die Bevölkerung dar.

Innerstädtische Park- und Grünanlagen sollten daher von Bebauung oder Versiegelung freigehalten werden. Vorhandene Vegetationsstrukturen sollten erhalten, ausgebaut und miteinander vernetzt werden. Bei der Gestaltung von Park- und Grünanlagen ist den zukünftigen klimatischen Bedingungen bereits heute Rechnung zu tragen. Zunehmende Sommerhitze und damit verbundene längere Trockenperioden erfordern eine gezielte Auswahl von geeigneten Pflanzen. Zudem sollte ein vermehrter Einsatz bodenbedeckender Vegetation erfolgen, um ein Austrocknen der Stadtböden im Sommer zu vermeiden, da dies bei Starkregenereignissen mit einer verminderten Versickerung und somit erhöhtem Überschwemmungsrisiko einhergeht. Um die positiven klimatischen Effekte der Park- und Grünanlagen zu erhalten, kann künftig während sommerlicher Trockenperioden auch eine vermehrte Bewässerung der urbanen Vegetation erforderlich werden. Zu diesem Zwecke sind Anlagen zur Sammlung des Niederschlagswassers der umliegenden Bebauung ratsam. Grundsätzlich ist bei Park- und Grünanlagen durch eine vielgestaltige Vegetationsstruktur die Schaffung differenzierter Mikroklimata zu erzielen. Die Vernetzung mit den direkt angrenzenden Siedlungsräumen ist insbesondere bei größeren Parks anzustreben, während kleinere Grünflächen zu den Rändern geschlossen werden sollten, um eine lokale „Oasenfunktion“ herzustellen.

Bioklimatischer Ausgleichsraum Wald

Waldflächen innerhalb eines Stadtgebietes sind grundsätzlich als klimatisch wertvolle Ausgleichsräume einzustufen. Die positiven klimatischen Eigenschaften liegen insbesondere in der Fähigkeit, durch Schadstoffadsorption und -diffusion die Luftqualität zu verbessern. Dort, wo hoch belastete Areale an sensible Wohnbereiche aneinandergrenzen, können Wälder eine bedeutsame Puffer- oder Trennfunktion der unterschiedlichen Nutzungsansprüche erfüllen. Zudem stellen Wälder aufgrund der gedämpften Strahlungs-, Temperatur- und Windverhältnisse während sommerlicher Hitzeperioden wichtige Regenerationsräume zur

Naherholung für die städtische Bevölkerung dar. Vorhandene Waldflächen sollten daher erhalten und nach Möglichkeit ausgeweitet werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass vorhandene Ventilations- und Kaltluftabflussbahnen zu erhalten und von dichter und hoher Bepflanzung freizuhalten sind, da der Wald die Oberflächenrauigkeit erhöht und somit den Luftaustausch einschränkt.

Ferner sind auch die Wälder dem Klimawandel anzupassen. Ein erhöhtes Temperaturniveau, ausgedehnte Trockenphasen, längere Vegetationsperioden, Veränderungen im Wasserhaushalt, häufigere Starkregen- und Sturmereignisse sowie die Ausbreitung neuer Baumkrankheiten stellen nur einige klimawandelbedingte Herausforderungen für das Ökosystem Wald dar. Reine Nadelwälder sind durch den Klimawandel besonders bedroht, während artenreiche Wälder anpassungsfähiger und stabiler gegenüber den Klimaveränderungen sind. Daher gilt es, baumartenreiche Mischwälder zu etablieren, in denen heimische Laubbaumarten (z.B. Buche, Traubeneiche) vertreten sind und mit fremdländischen Baumarten durchmischt werden, die an die künftigen Klimabedingungen angepasst und nicht krankheitsanfällig sind sowie idealerweise zu einer Verbesserung der Bodeneigenschaften beitragen (MKULNV 2012).

Lastraum der überwiegend locker und offen bebauten Wohngebiete

Die Flächen, die dem „Lastraum der überwiegend locker und offen bebauten Wohngebiete“ zugeordnet sind, entsprechen in ihrer Ausdehnung den Flächen der Vorstadt- und Stadtrandklimatope in der Klimaanalysekarte. Kennzeichnend für diese Flächen ist die aufgelockerte und offene Bauweise mit einer hohen Durchgrünung. Dadurch ist in diesen Bereichen von einer nur geringen bis mäßigen Änderung der Klimaelemente auszugehen, weshalb die lufthygienischen und bioklimatischen Verhältnisse grundsätzlich positiv zu bewerten sind.

Um die günstige klimatische Situation in diesem Lastraum zu sichern, sollten die Bebauungsstrukturen in weiten Teilen erhalten bleiben und nicht weiter verdichtet werden. Dies gilt insbesondere für locker bebaute Wohngebiete, die an höher versiegelte Bereiche der weiteren Lasträume angrenzen. Damit eine Ausdehnung der überwärmten Bereiche im Zuge des Klimawandels zukünftig vermieden werden kann, sollte die Grünausstattung erhalten und aufgewertet werden. Zudem sollte die Sicherung und Anlage von Grünflächen zur Verbesserung bzw. zum Erhalt der Belüftungssituation sowie eine Vernetzung der Grün- und Freiflächen mit den stärker belasteten Räumen angestrebt werden. Punktuell sind Entsiegelungs- bzw. Rückbaumaßnahmen an (überdimensionierten) Erschließungs- und Stellplatzflächen ratsam. Zur nachhaltigen Sicherung der insgesamt positiven lufthygienischen

Verhältnisse in diesem Lastraum ist eine Reduzierung der Emissionen durch Hausbrand und den Verkehr, v.a. entlang der Einfallstraßen, anzustreben.

Lastraum der überwiegend dicht bebauten Wohn- und Mischgebiete

Der Lastraum der überwiegend dicht bebauten Wohn- und Mischgebiete entspricht hinsichtlich seiner räumlichen Ausdehnung dem Klimatotyp Stadtklima in der Klimaanalysekarte. Neben der bioklimatischen Belastung in diesem Bereich herrscht ebenfalls ein höheres lufthygienisches Belastungspotential.

Im Vergleich zur hochverdichteten Innenstadt ist die Bebauung in diesen Bereichen zwar etwas weniger stark verdichtet, führt aber dennoch zu einer deutlichen Veränderung der mikroklimatischen Verhältnisse gegenüber dem unbebauten Umland. Hierzu zählen insbesondere eine erhöhte thermische und zugleich bioklimatische Belastung sowie eingeschränkte Luftaustauschbedingungen. Besonders problematische Verhältnisse entstehen dort, wo bodennahe Emittenten (v.a. Kfz-Verkehr) zu einer Schadstoffanreicherung führen.

Als Maßnahme zur Verbesserung der klimatischen und lufthygienischen Situation in den überwiegend dicht bebauten Wohn- und Mischgebieten sollten generell Park- und Grünflächen erhalten, neu geschaffen und miteinander vernetzt werden, um die negativen mikroklimatischen Verhältnisse abzumildern bzw. zu verbessern. Zudem sind die Vermeidung von weiteren Verdichtungsmaßnahmen sowie die Auflockerung der vorhandenen Bebauungsstrukturen zu nennen. Dies kann in Form von Entsiegelungs- und Rückbaumaßnahmen sowie durch Begrünungsmaßnahmen erfolgen. Beispielsweise durch die Entkernung und Begrünung von hochversiegelten Innenhöfen, wo bei ausreichender Größe zur Verbesserung des Mikroklimas locker stehende Baumbestände angelegt werden können. Dach- und Fassadenbegrünungen sind weitere Möglichkeiten, um in den Hinterhofbereichen eine Verbesserung der stadtklimatischen Bedingungen zu erzielen. Zusätzlich sind Begrünungsmaßnahmen mit dem Schwerpunkt der Anpflanzung höherer Vegetation und großkroniger Bäume umzusetzen. Eine Ausnahme bilden Straßenzüge mit schluchtartigem Charakter und hohem Aufkommen bodennaher Emittenten, da ein geschlossenes Kronendach in diesen Bereichen den Luftaustausch einschränken und somit zur Schadstoffanreicherung führen kann.

Die Begrenzung des Versiegelungsgrades sowie die Festsetzung von Bepflanzungsmaßnahmen ist in den rechtlichen Grundlagen der Gestaltungssatzung nach § 9 (1) BauO NRW und dem § 9 (1) BauGB geregelt. Weitere wichtige Umsetzungsinstrumente sind Förderprogramme zur Blockinnenhofbegrünung und Wohnumfeldverbesserung. Über

Baumschutzsatzungen sowie die Überprüfung bauordnungsrechtlicher Nebenbestimmungen sind Möglichkeiten gegeben, Maßnahmen umzusetzen und schützenswerte Elemente zu erhalten. Geschwindigkeitsbeschränkungen (Einrichtung von Tempo 30-Zonen), die Ausweisung von Wohnstraßen sowie die Reduzierung von Kfz-Stellplätzen bieten Möglichkeiten, verkehrsbedingte Emissionen erheblich zu reduzieren.

Lastraum der hochverdichteten Innenstadt

Der Lastraum der hochverdichteten Innenstadt ist durch eine dichte Bebauungsstruktur mit z.T. hohen Gebäuden, einen hohen Versiegelungsgrad und einen sehr geringen Grünflächenanteil geprägt. Ein weiteres charakteristisches Merkmal ist die Ausbildung von Straßenschluchten, d.h. die Gebäudehöhe übertrifft deutlich die Straßenbreite. Typisch ist auch ein hohes Verkehrsaufkommen. Diese Eigenschaften zusammen bewirken die stärkste Ausprägung des Stadtklimas, was sich durch erhöhte Lufttemperaturen insbesondere in den Sommermonaten bemerkbar macht. Verschlechterte Belüftungsverhältnisse sowie hohe lufthygienische Belastungen sind ebenso die Folge der starken anthropogenen Überformung. Besonders nachteilig in klimatischer und lufthygienischer Hinsicht wirkt sich die geringe Anzahl an Grünanlagen aus. Daher ist es wichtig, dort kleinräumige Grünareale zu schaffen, um auf eine Milderung des Stadtklimas hinzuwirken.

Begrünungsmaßnahmen können in der Planung und Baugenehmigung über eine Gestaltungssatzung nach Pflanzgeboten gemäß § 9 (1) 25 a und 25 b BauGB in Verbindung mit § 178 BauGB umgesetzt werden. Zur Begrenzung der Neuversiegelung und zum Erhalt von Freiflächen sind Festsetzungen im Bebauungsplan zur Gestaltung u.a. von Stellplätzen nach § 9 (1) BauGB und § 9 (1) BauO NRW heranzuziehen. Die Begrenzung der Stellplatzzahl ist nach § 9 (1) Nr. 4 BauGB in Verbindung mit § 12 (6) BauNVO festzusetzen.

Insbesondere Rückbaumaßnahmen (z.B. innerstädtischer Gewerbeflächen) sind als Chance zur Integration von mehr Grün in die hochverdichtete Bebauung zu ergreifen. Nach Möglichkeit ist eine erneute Versiegelung zu vermeiden und an Stelle dessen Park- und Grünanlagen anzulegen. Bei unumgänglicher Neubebauung ist auf einen möglichst geringen Versiegelungsgrad und umfangreiche Begrünungsmaßnahmen hinzuwirken. Dies können die Anpflanzung großkroniger Laubbäume im Straßenraum, die Grüngestaltung eines Innenhofes sowie die Begrünung von Tiefgaragen, Dächern und Fassaden sein. Dachbegrünungen sind vor allem dort effektiv, wo niedrige Flachdächer klimatisch auf umstehende, höhere Gebäude wirken können (etwa in bebauten Innenhöfen). Bei ausreichender Größe der angelegten Dachbegrünung kann so der Wärme- und Feuchtehaushalt spürbar verbessert werden. Des Weiteren kann einer Überwärmung im Innenstadtbereich auch durch die Wahl geeigneter Baumaterialien und die Farbgestaltung von Hausfassaden und -dächern, die Integration von

Verschattungselementen sowie einer optimierten Gebäudeausrichtung entgegengewirkt werden.

Zur Verbesserung des Mikroklimas hochversiegelter Aufenthaltsbereiche im Außenraum (z.B. Fußgängerzone und öffentliche Plätze) sollten Schattenelemente installiert, großkronige Bäume angepflanzt sowie offene, bewegte Wasserelemente (z.B. Springbrunnen) geschaffen werden.

Lastraum der Gewerbe- und Industrieflächen

Diese Gebiete sind zumeist durch einen sehr hohen Versiegelungsgrad, einen entsprechend geringen Grünflächenanteil sowie (in Abhängigkeit von der Art der angesiedelten Unternehmen) erhöhte Emissionen von Lärm und Luftschadstoffen gekennzeichnet. Zu den stadtklimatischen Auswirkungen der Industrie- und Gewerbeflächen zählen demnach eine hohe thermische, bioklimatische und lufthygienische Belastung sowie eine eingeschränkte Belüftungssituation.

Zu den Entwicklungszielen für die Industrie- und Gewerbeflächen zählen neben der Reduzierung nachteiliger Wirkungen auf die umliegenden Gebiete die Optimierung der lufthygienischen Situation sowie die Vermeidung großflächiger Wärmeinseln. Weiterhin ist die Entwicklung von akzeptablen Aufenthaltsqualitäten im Gewerbeumfeld tagsüber anzustreben.

Maßnahmen, die zu einer Verbesserung der Situation in den Lasträumen der Gewerbe- und Industriegebiete führen, bestehen in erster Linie in der Entsiegelung und dem Erhalt sowie der Erweiterung von Grün- und Brachflächen. Eine weitere sinnvolle Maßnahme ist die Begrünung von Fassaden und Dächern. Die hoch verdichteten Bauflächen sowie Lager- und Freiflächen sollten durch die Anlegung breiter Pflanzstreifen gegliedert werden. Darüber hinaus bieten sich Stellplatzanlagen und das Umfeld von Verwaltungsgebäuden für Begrünungsmaßnahmen an. Um den Kern der Gewerbebezonen herum sollte ein bepflanzter Freiraum als Puffer (Immissionsschutzpflanzung) zu angrenzenden (Wohn-)Flächen eingerichtet werden.

Bei Neuplanungen von Gewerbe- und Industriegebieten ist darauf zu achten, in den jeweiligen Planungsstufen die Belange von Klima und Lufthygiene zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für die Rahmenplanung, das Bebauungsplanverfahren, die Vorhaben- und Erschließungsplanung sowie das Baugenehmigungsverfahren.

Klimawirksame Maßnahmen lassen sich im Bebauungsplan für neue, aber auch für bereits bestehende und zu erweiternde Standorte durchführen. So ist im Rahmen der Eingriffsregelung - soweit möglich - darauf zu achten, zumindest einen Teil der Kompensationsmaßnahmen auf dem Gelände selbst durchzuführen, nicht nur um eine

Einbindung in das Landschaftsbild zu erwirken, sondern auch um zu einer Verbesserung der klimatischen und lufthygienischen Bedingungen vor Ort beizutragen. Mit Hilfe geeigneter Festsetzungen ist eine Begrenzung der Flächeninanspruchnahme sowie eine ausreichende Grünausstattung vorzugeben. Weiterhin ist durch eine geeignete Baukörperanordnung und die Einschränkung bestimmter Bauhöhen eine optimale Durchlüftung zu gewährleisten.

8.1.1.2 Raumspezifische Hinweise

Raumspezifische Hinweise beziehen sich auf Planungsempfehlungen, die sich nicht in Last- oder Ausgleichsräume einordnen lassen, aber von hoher klimatischer und lufthygienischer Relevanz sind.

Grünvernetzung

Durch zusätzliche Begrünungsmaßnahmen können bereits existierende Wald-, Frei- und Grünflächen miteinander vernetzt werden, was zur Verbesserung der bioklimatischen und lufthygienischen Situation beiträgt. Darüber hinaus werden so wichtige Pufferräume geschaffen und stadtklimatische Belastungen abgemildert.

Unter Grünvernetzung sind der Erhalt und Ausbau vorhandener Grün- und Freiflächen sowie die Einbeziehung von Grünflächen im hausnahen Bereich und von Straßengrün in umfangreiche Begrünungsmaßnahmen zu verstehen. Auch Dach- und Fassadenbegrünungen können in diesem Zusammenhang einen wichtigen Beitrag leisten. Bei allen Bebauungsmaßnahmen in diesen Bereichen sollte in Zukunft sorgfältig abgewogen werden, inwieweit sie erforderlich und klimatisch verträglich sind.

Innerhalb der ausgewiesenen Bereiche zur Grünvernetzung sind zum Teil Gewerbegebiete angesiedelt, die durch intensive Dach- und Fassadenbegrünungen sowie die Begrünung von Lagerflächen und Parkplätzen eingebunden werden sollten.

Hauptverkehrsstraßen

Breite Straßenbänder erweisen sich sowohl tagsüber als auch in der Nacht durch eine starke Überwärmung als klimatisch belastet. Aufgrund ihrer geringen Oberflächenrauigkeit können sie die Funktion von Belüftungsschneisen erfüllen, die jedoch hohe Emissions- und Immissionsbelastungen aufweisen und darüber hinaus hohe Lärmbelastungen im Straßenraum und der angrenzenden Umgebung.

Dabei wurden alle Straßenabschnitte mit mindestens 20.000 Kfz/Tag (DTV-Werte) als Hauptverkehrsstraßen definiert. Wo Lärmschutzwände existieren, konzentrieren sich die

Schadstoffe weitgehend auf den Straßenquerschnitt und nehmen im angrenzenden Raum rasch ab. Bei freier Lage allerdings können die Emissionen bis zu mehrere hundert Meter in die Umgebung eindringen. Zusätzlich führen hohe Lärmemissionen zu starken Umweltbelastungen in den angrenzenden Bereichen. Wesentliches Planungsziel sollte daher sein, Lärm- und Schadstoffbelastungen langfristig abzubauen. Neben Maßnahmen zur Verkehrsreduzierung sollten aktive und passive Lärmschutzmaßnahmen sowie Grünpuffer und Abstandszonen zu angrenzender Wohnbebauung eingerichtet werden.

Bahnanlagen

Ähnlich wie Straßen können auch Bahntrassen als Belüftungsbahnen wirksam sein. Obwohl sich die Luftmassen tagsüber über den Bahnanlagen stark erwärmen, kühlen sie nachts auch wieder rasch ab. Da es sich um Bereiche mit geringen Emissionen handelt, zählen Bahnanlagen zu den Entlastungsräumen in einem Stadtgebiet.

Frische und kühlere Luftmassen aus den Ausgleichsräumen können über diese rauigkeitsarmen Flächen bis in die Randbereiche des Stadtzentrums gelangen und dort die bioklimatische Situation begünstigen. Erhöhte Bahndämme sowie dichte Bepflanzung entlang der Trassen können im Bereich von Freiflächen lokale Kaltluftabflüsse an Hängen behindern. Das Ziel sollte den Schutz und Erhalt der Belüftungs- und Kaltluftbahnen darstellen.

Kaltluftsammlgebiete

In Niederungsbereichen und durch die Barrierewirkung von Dämmen (etwa von Straßen oder Gleisanlagen) können Kaltluftbewegungen zum Erliegen kommen, wodurch Kaltluftsammlgebiete entstehen. In diesen Bereichen können nächtliche Bodeninversionen gekoppelt mit einer erhöhten Nebelbildung auftreten. Die hierdurch eingeschränkten Belüftungsverhältnisse können zu einer verstärkten Anreicherung von Luftschadstoffen führen, wenn entsprechende bodennahe Emittenten vorhanden sind. In diesen Bereichen sollte möglichst keine Bebauung erfolgen bzw. die vorhandene Bebauung keine weitere Verdichtung erfahren. Insbesondere eine Ansiedlung von bodennahen Emittenten sollte vermieden werden oder – falls unvermeidbar – ist darauf zu achten, dass die Emissionen in größerer Höhe freigesetzt werden. Zudem sollten auch Maßnahmen zur Reduzierung der Verkehrsemissionen in diesen Bereichen angestrebt werden. Um eine Verbesserung der lufthygienischen Situation in Kaltluftsammlgebieten mit angesiedelten Emittenten zu erzielen, sollten Belüftungsbahnen geöffnet werden.

8.1.1.3 Lokale Hinweise

Zusätzlich zu den allgemeinen Empfehlungen für die Ausgleichs- und Lasträume liefern die lokalen Hinweise konkrete Planungsempfehlungen für bestimmte Bereiche. Sie gelten teilweise flächenscharf oder schließen deren unmittelbares Umfeld ein. Die Hinweise „Weitere Bebauung möglich“, „Keine weitere Verdichtung“, „Begrünung Gewerbe und Industrie“ sowie „Begrünung im Wohnbereich“ beziehen sich dagegen auf größere Areale der Quartiersebene.

Die Hinweise haben immer auch einen exemplarischen Charakter. Empfehlungen, die für eine bestimmte Fläche gegeben werden, können und sollen daher auch auf Bereiche mit vergleichbaren Voraussetzungen übertragen werden.

Weitere Bebauung möglich

Bereiche, in denen eine weitere Bebauung keine zusätzlichen oder nur vertretbare nachteilige Auswirkungen auf die Ausprägung der klimatischen Bedingungen hätte, sind in der Planungshinweiskarte durch das Symbol „Weitere Bebauung möglich“ hervorgehoben. Bei der Bebauung oder Schließung einzelner Baulücken in diesen Gebieten ist zu berücksichtigen, dass die vorhandene Bebauungsstruktur umliegender Wohngebiete weitgehend aufgegriffen und eine zu hohe Verdichtung vermieden werden sollte. Bei einer Bebauung am Siedlungsrand ist durch die Gebäudeausrichtung (keine Riegelbebauung zum Umland) die Belüftungssituation zu erhalten.

Keine weitere Verdichtung

Bereiche, die aufgrund weiterer Bautätigkeiten und Nachverdichtungen nachteilige klimatische Veränderungen erfahren würden, sind durch das Symbol „Keine weitere Verdichtung“ in der Planungshinweiskarte gekennzeichnet.

Diese Empfehlung wird vor allem für hochverdichtete Innenstadtbereiche, aber auch für locker bebaute Wohngebiete, die daran angrenzen, ausgesprochen. Bautätigkeiten im Bereich dieser Flächen würden eine Verschlechterung der klimatischen Situation im Umfeld bewirken und so zu einer Intensivierung und Ausdehnung überwärmter Gebiete führen.

Teilweise wird auch für Quartiere, die aufgrund ihrer aufgelockerten Bebauungsstruktur und ihres hohen bis sehr hohen Grünflächenanteils eine wichtige Funktion als Regenerationsraum einnehmen, empfohlen, eine weitere Verdichtung zu vermeiden. Aufgrund ihrer Vernetzungsfunktion zwischen angrenzenden Frei- und Grünflächen kann diesen Bereichen eine besonders hohe klimatische Bedeutung beigemessen werden und eine weitere Verdichtung könnte die Regenerations- und Ausgleichsfunktion dieser Flächen einschränken.

Klimatische Baugrenzen

Um klimatisch wertvolle Räume zu schützen und eine Zersiedelung des Stadtgebietes zu verhindern, wurde an besonders wichtigen Stellen das Liniensymbol „Klimatische Baugrenzen“ gesetzt. Das Ziel ist, eine über die Begrenzung hinausgehende Bebauung zu vermeiden, um die klimatischen Ausgleichsfunktionen der angrenzenden Grün- und Freiflächen zu erhalten. Insbesondere Kalt- und Frischluftproduktionsflächen, Belüftungsbahnen und Grünflächenvernetzungen sollen durch Baugrenzen nicht weiter eingeschränkt werden.

Anstreben klimatischer Baugrenzen

Im Gegensatz zu klimatischen Baugrenzen, die eine Vermeidung der Bautätigkeit jenseits der Grenze empfehlen, ist durch das Symbol „Anstreben klimatischer Baugrenzen“ eine möglichst weitgehende Zurückhaltung bei Bautätigkeiten über die Grenzen hinaus anzustreben. Einzelne Gebäude können durchaus die Grenze überschreiten, größere zusammenhängende Baugebiete sollten jedoch nicht in den Außenraum vordringen.

Begrünung im Wohnbereich

Neben größeren Parks und Grünanlagen können auch kleinere begrünte Flächen in bebauten Gebieten eine bioklimatische Entlastung der Bevölkerung begünstigen. Gegenüber den größeren Flächen beschränken sich bei diesen kleinen Grünflächen die klimatischen Auswirkungen in der Regel auf die Flächen selbst (Oaseneffekt). Eine positive Wirkung wird also vor allem erzielt, wenn die Flächen als Aufenthaltsraum aufgesucht werden und die Bevölkerung somit während klimatisch belastender Wetterlagen von den kleinräumigen bioklimatischen und lufthygienischen Vorteilen profitieren kann.

Zu den Begrünungsmaßnahmen in Wohnbereichen zählen u.a. die Bepflanzung und Begrünung von Fußgängerzonen, öffentlichen Plätzen, Straßenräumen und größeren Innenhöfen. Für die Bevölkerung werden durch diese Maßnahmen wichtige Klimaoasen zur Regeneration geschaffen. Neben Entsiegelungsmaßnahmen und der Anpflanzung schattenspendender großkroniger Bäume können auch Fassaden- und Dachbegrünungen eine verminderte Erwärmung in den Sommermonaten erwirken.

Die Begrünung im Wohnbereich wurde als Planungsempfehlung in erster Linie in Bereichen mit ungünstigen bioklimatischen und lufthygienischen Bedingungen ausgesprochen. Diese Bereiche zeichnen sich in der Regel durch ein hohes Versiegelungsgrad und einen geringen Grünflächenanteil aus.

Begrünung Gewerbe und Industrie

In den Gewerbe- und Industriegebiete mit dem Symbol „Begrünung Gewerbe und Industrie“ sollte nach Möglichkeit durch gezielte Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen eine klimatische Aufwertung angestrebt werden. So können Begrünungsmaßnahmen im Bereich großer Abstands-, Lager- oder Reserveflächen innerhalb der gewerblich und industriell genutzten Areale die mikroklimatischen Bedingungen verbessern. Dabei sollte in erster Linie die Anpflanzung von Gehölzen, großkroniger Bäume (z.B. auf Parkplätzen) und die Installation von Dachbegrünung forciert werden.

Hinweise zur Begrünung von Gewerbe- und Industriegebieten sind in nahezu allen größeren Gewerbe- und Industriegebieten in der Karte der Planungshinweise zu finden. Hier sind ausreichend große Frei- bzw. Dachflächen vorhanden, durch deren Begrünung eine Verbesserung der lokalklimatischen Bedingungen erzielt werden kann.

Begrünung im Straßenraum

Zusätzlich zu den lufthygienischen Belastungen und den Lärmemissionen durch den Kfz-Verkehr sind auch die bioklimatischen Verhältnisse aufgrund hoher Temperaturen und ungehinderter solarer Einstrahlung innerhalb einzelner Straßenräume oft sehr ungünstig. Durch eine Begrünung dieser Straßenzüge mit Bäumen und Sträuchern kann durch den Schattenwurf der Vegetation sowie die Verdunstung und Transpiration der Pflanzen eine Aufheizung der zumeist hochversiegelten Flächen vermindert werden.

Die Begrünung im Straßenraum sollte in erster Linie durch den Erhalt vorhandener großkroniger Laubbäume oder durch deren Anpflanzung erreicht werden. Gekennzeichnet sind diejenigen Straßen, in denen aus stadtklimatologischer Sicht ein besonderer Bedarf an Straßenbäumen gesehen wird. Dies schließt nicht aus, dass auch die Anpflanzungen von Bäumen in weiteren Straßenzügen klimatisch günstige Auswirkungen haben und zu begrüßen sind.

In Straßen mit schluchtartigem Charakter und hohem Verkehrsaufkommen ist eine zu dichte Anpflanzung großkroniger Bäume, die ein geschlossenes Kronendach über dem Straßenraum ausprägen, zu vermeiden. Hierdurch können die vertikalen Austauschverhältnisse eingeschränkt werden, was eine Akkumulation von Luftschadstoffen zur Folge haben kann. In solchen Straßenzügen wird daher empfohlen, möglichst kleinkronige Bäume mit ausreichendem Abstand anzupflanzen. Auf die Anlage von Alleen sollte insbesondere bei starken bodennahen Emissionen verzichtet werden. Derartige Einschränkungen zur Begrünung mit Bäumen gelten natürlich nur dort, wo sich unterhalb der Baumkrone signifikante Emissionsquellen befinden. Wenig befahrene Straßenabschnitte, öffentliche Plätze und

Fußgängerzonen können durch eine Begrünung mit großkronigen Bäumen lokalklimatisch aufgewertet werden.

Bei der Auswahl von geeigneten Baumarten für die Begrünung im innerstädtischen Raum - dies gilt für eine Begrünung von Straßenzügen ebenso wie bei Parkbäumen - sind aus stadtklimatischer Sicht zwei Dinge zu beachten: Zum einen emittieren verschiedene Baumarten unterschiedlich große Mengen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon führen. Diese Bäume können so zu einer Erhöhung der Ozonbelastung beitragen und sind nicht zur Stadtbegrünung geeignet. Zum anderen müssen sich Stadtbäume auf veränderte, durch den Klimawandel verursachte Bedingungen einstellen. Insbesondere die zunehmende Sommerhitze in den Städten und damit verbundene sommerliche Trockenperioden fordern eine gezielte Auswahl von geeigneten Stadtbäumen für die Zukunft. Eine Liste geeigneter Straßenbäume mit fachlichen Empfehlungen wird vom Arbeitskreis Stadtbäume der Grünflächenamtsleiterkonferenz (GALK) herausgegeben und fortlaufend aktualisiert.

Immissionsschutzpflanzungen

In Bereichen mit bodennahen Emissionen können Immissionsschutzpflanzungen eine deutliche Verringerung der Immissionsbelastung bewirken. Um eine möglichst effektive Wirkung zu erzielen, sollte eine dichte und tiefe Gehölzanzpflanzung angelegt werden. Besonders geeignet sind solche Anpflanzungen dort, wo Wohnbebauung unmittelbar an Gewerbe- oder Industriegebiete sowie an stark befahrene Straßen angrenzt.

Park- und Grünanlagen

Größere Park- und Grünanlagen sind in der Lage, das Bioklima positiv zu beeinflussen. Sie können ein eigenständiges Mikroklima ausbilden und sind – je nach ihrer Ausstattung und der Umgebungsstruktur – fähig, einen positiven Einfluss auf die Umgebung zu erzielen. Darüber hinaus sind sie aufgrund weitgehend fehlender Emittenten in der Regel Frisch- und Reinluftgebiete und können bei geeigneter Ausstattung eine Filterfunktion für Luftschadstoffe ausüben. Zudem werden sie zur Naherholung von der städtischen Bevölkerung genutzt. Um möglichst differenzierte Mikroklimata zu erhalten, sollte eine abwechslungsreiche Pflanzstruktur mit Bäumen, Sträuchern und Wiesen angestrebt werden.

Waldflächen

Die positive Wirkung von Waldflächen wurde bereits unter dem Stichwort „Ausgleichsräume“ (s. oben) angesprochen. Größere zusammenhängende Wälder, insbesondere im Nahbereich von Emittenten, weisen neben einem günstigen Lokalklima auch eine Filterwirkung für Luftschadstoffe auf. Besonders effektiv ist die Filterwirkung bei Stäuben, aber auch gasförmige

Luftbeimengungen können verdünnt und gebunden werden. Gerade in einem Ballungsraum wie dem Ruhrgebiet mit zahlreichen Emittenten spielen Waldflächen damit als Pufferräume eine wesentliche Rolle. Die vorhandenen Strukturen sollten daher erhalten bleiben und ausgebaut werden.

8.1.1.4 Luftaustausch

Der Luftaustausch trägt wesentlich zur Qualität des Mikroklimas bei. Überwärmte und mit Schadstoffen angereicherte Luftmassen können aus dem Stadtgebiet abgeführt und durch kühlere, immissionsärmere Luft aus dem Umland ersetzt werden. Neben Bereichen der Frischluftzufuhr und der Kaltluftabflüsse, deren Bahnen möglichst von weiterer Bebauung freigehalten werden sollten, werden in der Planungshinweiskarte Bereiche benannt, in denen Maßnahmen zur Förderung des Luftaustauschs ergriffen werden sollten, um die klimatische Situation in den angrenzenden Siedlungsbereichen zu erhalten bzw. zu verbessern.

Luftleitbahn

Besonders gut geeignet als Luftleitbahnen sind Flächen, die eine Mindestbreite von 50 m aufweisen, möglichst hindernisarm sind und eine ausreichend geradlinige Ausrichtung besitzen. Nur dann sind sie in der Lage, Luftmassen über längere Entfernungen ohne stärkere Verwirbelungen und Strömungswiderstände zu transportieren. Bei entsprechend geringer Oberflächenrauigkeit bzw. geringem Strömungswiderstand und geeigneter Ausrichtung können Luftleitbahnen zu einer wirkungsvollen Stadtbelüftung beitragen.

Zum Erhalt bzw. zur Aufwertung dieser Belüftungsbahnen sollten dort keine weiteren bodennahen Emittenten angesiedelt bzw. vorhandene Emissionen reduziert werden. Zudem ist im Bereich der Luftleitbahnen von einer weiteren Bautätigkeit abzusehen. Zur Unterstützung der Belüpfungsfunktion wird die Anlage rauigkeitsarmer Grünzonen im Umfeld der Belüftungsbahnen empfohlen. Zudem sollten Vernetzungsstrukturen in angrenzende klimatisch belastete Räume geschaffen und die Ränder der Luftleitbahnen in diesen Übergangsbereichen geöffnet werden.

Frischluftzufuhr

Große Freilandbereiche und Waldflächen sind für die Frischluftproduktion von großer Bedeutung. Bei geeigneten Windrichtungen können frische Luftmassen aus diesen Bereichen in die belasteten Stadtgebiete geführt werden und dort durch die Vermischung mit belasteten Luftmassen bzw. einen Luftmassenaustausch zu einer Verbesserung der Luftqualität beitragen.

Die Übergangsbereiche dieser Freiland- und Waldareale in die Bebauung sollten eine aufgelockerte, durchgrünte Bebauungsstruktur mit einheitlich geringen Gebäudehöhen

aufweisen, um ein weites Vordringen der Frischluftmassen in die belasteten Stadtbereiche hinein zu ermöglichen. Zudem sollten die potentiellen Frischluftschneisen unbedingt von weiterer Bebauung, insbesondere von der Ansiedlung von Emittenten, freigehalten werden.

Kaltluftabfluss

Kaltluftabflüsse können während sommerlicher Strahlungsnächte zur Abkühlung überwärmter Siedlungsbereiche beitragen und somit den Wärmeinseleffekt reduzieren. Die grundsätzlich dem Relief folgenden Abflussbahnen sind von Bebauung, Dammlagen und dichter Bepflanzung freizuhalten. Bei unvermeidbaren Bauvorhaben sollten offene und aufgelockerte Strukturen angestrebt und hangparallele Riegelbebauungen unbedingt vermieden werden. Auf eine Ansiedlung von Emittenten im Bereich der Kaltluftabflussbahnen sollte ebenfalls verzichtet werden. Um die positiven klimatischen Effekte der kalten Luftmassen zu nutzen, sollten die Belüftungsbahnen mit den Siedlungsbereichen vernetzt werden.

Luftaustausch fördern und erhalten

Durch kleinräumige Verflechtungen größerer Frei- und Grünflächen mit angrenzenden lockeren bzw. durchgrüntem Bauungsstrukturen können Kaltluftabflüsse und schwächere Ausgleichsströmungen in die Siedlungsgebiete eindringen, wodurch ein guter Luftaustausch und eine nächtliche Abkühlung der überwärmten Stadtbereiche gewährleistet werden kann. Abfallende Geländesituationen können die Frisch- und Kaltluftzufuhr in die angrenzenden Siedlungen begünstigen.

Um einen Luftaustausch zwischen den Flächen wirksam zu fördern, sollten die Frei- und Grünflächen an ihren Rändern offen gestaltet werden. Weiterhin können die Wirkungen durch Grünverbände zwischen Parkanlagen und umliegender Bebauung in Form von Straßenbäumen, begrüntem Hausgärten oder zu den Grünflächen hin geöffneten Innenhöfen verstärkt werden. Eine riegelförmige und dichte Bebauung im Übergangsbereich zu den Grün- und Freiflächen ist zu vermeiden.

8.1.2 Gliederung der Stadt Duisburg anhand der Planungshinweiskarte

Ein großer Teil der Siedlungsbereiche im Stadtgebiet von Duisburg ist dem „Lastraum der überwiegend locker und offen bebauten Wohngebiete“ zuzuordnen. Insbesondere in den Stadtbezirken Süd, Rheinhausen, Homberg/Ruhrort/Baerl sind die Wohngebiete zu einem Großteil diesem Lastraum zuzuordnen. Aber auch in den Stadtteilen Walsum und im östlichen Hamborn treten locker und offen bebaute Siedlungsstrukturen verhältnismäßig häufig auf.

Die Siedlungsbereiche im Zentrum des Duisburger Stadtgebietes sind hingegen überwiegend den klimatisch stärker belasteten Planräumen „Lastraum der überwiegend dicht bebauten Wohn- und Mischgebiete“ sowie „Lastraum der hochverdichteten Innenstadt“ zugehörig. Hohe Anteile dieser Lastraumtypen finden sich ebenfalls in den Stadtbezirken Hamborn, Homberg und Rheinhausen. Zudem weisen die westlich und nördlich an den Stadtkern angrenzenden Stadtteile einen sehr hohen Anteil des „Lastraums der Gewerbe- und Industrieflächen“ auf. Dieser findet sich ebenfalls in allen anderen Stadtbezirken und nimmt meist sehr große Flächen entlang des Rheins und der Ruhr ein.

Die bioklimatischen Verhältnisse in den Bereichen des „Lastraums der überwiegend locker und offen bebauten Wohngebiete“ sind grundsätzlich als positiv zu bewerten. Um die günstigen klimatischen Eigenschaften vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels langfristig zu sichern, sollten die offenen und begrünten Bebauungsstrukturen erhalten bleiben und insbesondere im Bereich von Belüftungsbahnen und/oder Grünvernetzungen kleinräumige Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen durchgeführt und gefördert werden.

In den Stadtteilen Bergheim, Rumeln-Kaldenhausen, Baerl, Aldenrade, Overbruch, Serm und Mündelheim konnten dennoch Bereiche ausgewiesen werden, bei denen aus rein stadtklimatologischer Sicht eine maßvolle Nachverdichtung, die punktuelle Schließung von Baulücken oder die Ausweisung kleiner Neubaugebiete unter Beachtung der vorherrschenden lockeren Bebauungsstruktur und entsprechend hohem Grünflächenanteil vertretbar ist. Um einerseits eine weitere Verschärfung der Situation in den stärker verdichteten Bereichen zu vermeiden und andererseits die positiven klimatischen Verhältnisse innerhalb der aufgelockerten Wohngebiete zu wahren, sollte in weiten Teilen des restlichen Stadtgebietes keine weitere Verdichtung erfolgen. Insbesondere bei Bauvorhaben an den Siedlungsrändern ist zum Erhalt der Austauschfunktionen zwischen den Last- und Ausgleichsräumen eine Riegelbebauung zu vermeiden. Zum Erhalt dieser Austauschfunktionen und zum Schutz relevanter klimatischer Ausgleichsflächen ist zudem u.a. an den Siedlungsrändern westlich von Rahm, in Kaldenhausen, Asterlagen, Hochheide und Baerl das Festschreiben einer klimatischen Baugrenze zu empfehlen. Zudem sollten klimatische Baugrenzen entlang der

südlichen Grenze von Rahm, um Mündelheim und nördlich von Serm sowie in Teilen von Friemersheim und Rumeln-Kaldenhausen angestrebt werden.

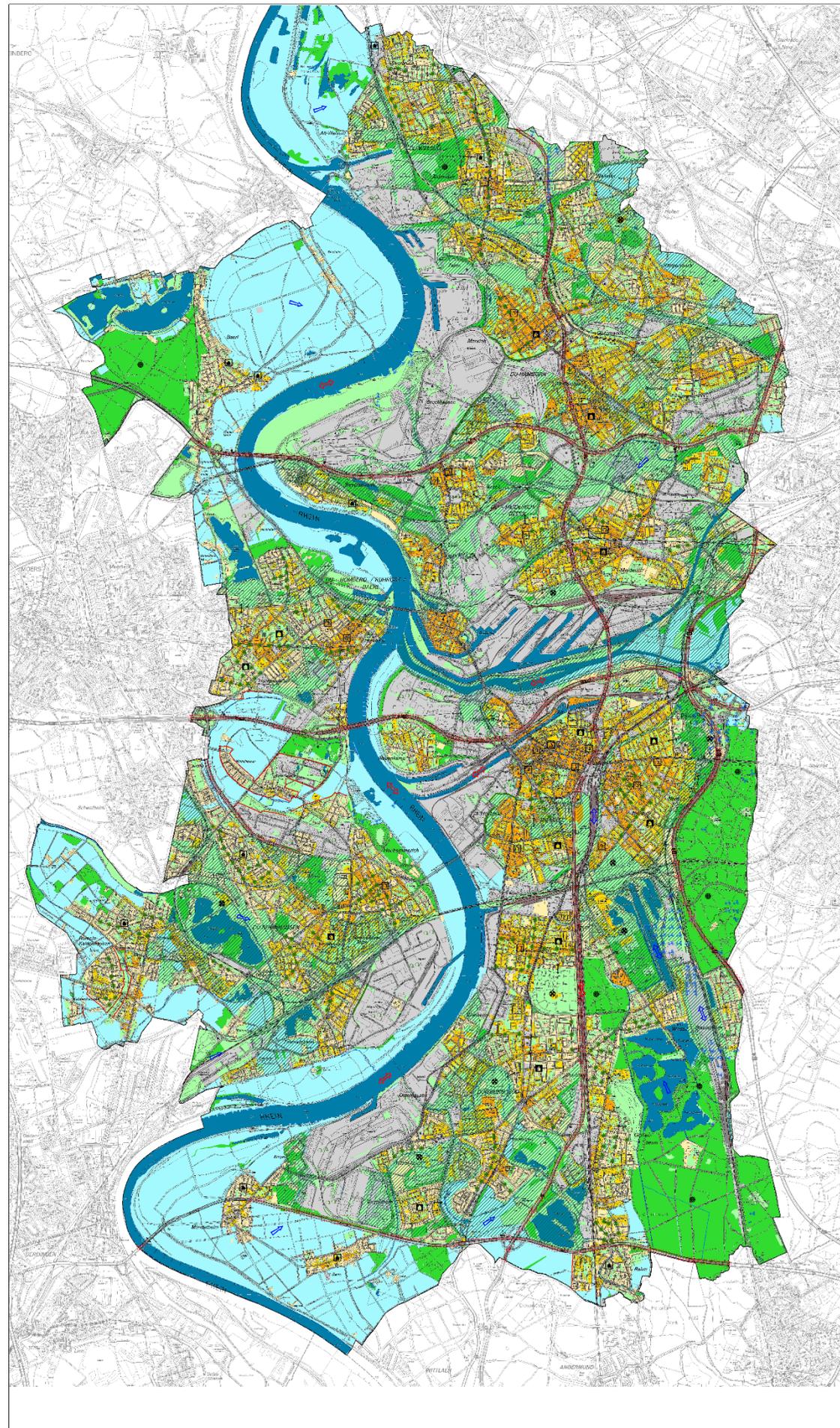
Die klimatischen Ausgleichsräume des Freilandes, der innerstädtischen Grün- und Parkanlagen sowie der Waldgebiete fungieren vielerorts als wichtige thermische Pufferzonen zwischen den Siedlungsbereichen, als lokale Kalt- und Frischluftproduzenten, als Belüftungsbahn und/oder als Filter für Luftschadstoffe und Lärm, weshalb sie grundsätzlich gesichert und von weiterer Bebauung freigehalten werden sollten. Von entscheidender Bedeutung für die Relevanz dieser Ausgleichsflächen ist die Vernetzung mit den klimatischen Lasträumen. Hierzu sind der Erhalt bestehender Belüftungsbahnen sowie die Schaffung neuer Schneisen durch eine Auflockerung und Beseitigung von Strömungshindernissen erforderlich. Darüber hinaus sollte auch in den Bereichen, die als Grünvernetzung gekennzeichnet sind, keine weiteren Bebauung erfolgen, sondern eine weitere Stärkung der Vernetzungsfunktionen einerseits der Grünflächen untereinander sowie andererseits der Grünflächen mit den angrenzenden Siedlungsbereichen angestrebt werden.

In den klimatischen Lasträumen der „überwiegend dicht bebauten Wohn- und Mischbebauung“, der „hochverdichteten Innenstadt“ sowie der Gewerbe- und Industrieflächen treten die negativen Ausprägungen des Stadtklimas am deutlichsten hervor. Daher ist insbesondere in Übergangsbereichen von Grün-, Frei- und Waldflächen zu stark verdichteten Siedlungsstrukturen die Förderung des Luftaustausches zu forcieren. In hochverdichteten Bereichen, die keine direkte Anbindung an größere klimatische Ausgleichsflächen aufweisen und wo eine entsprechende Grünvernetzung aufgrund der Bestandsstrukturen nicht realisierbar ist, wie in Teilen des Duisburger Stadtzentrums sowie den Nebenzentren in Hamborn, Homberg und Rheinhausen, müssen verstärkt kleinräumige Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen zur Verbesserung der mikroklimatischen Verhältnisse ergriffen werden. Insbesondere die Schaffung verdunstungsaktiver Flächen und schattenspendender Strukturen kann für lokale Abmilderung thermischer Belastungen sorgen. Bei fehlenden Entsiegelungs- und Rückbaumöglichkeiten können als Alternative Dach- und Fassadenbegrünungen zur Steigerung des Grünflächenanteils in diesen Bereichen umgesetzt werden. Zudem kann in hochversiegelten Straßenräumen durch den Erhalt und die Anpflanzung von Bäumen in Folge von Verschattungs- und Verdunstungseffekten eine lokale Klimaverbesserung erzielt werden. Hierbei ist zwingend darauf zu achten, dass sich in Straßenschluchten und bei hohem Verkehrsaufkommen keine geschlossenen Kronendächer entwickeln, die zu eingeschränkten Austauschverhältnissen und einer Schadstoffanreicherung führen können.

Reliefbedingte Kaltluftmassentransporte treten im Stadtgebiet von Duisburg nur vereinzelt auf und betreffen überwiegend die Kaltluftabflüsse von den Halden sowie aus den bewaldeten Hanglagen des Duisburger Stadtwalds. Diese kühlen Luftmassen können während autochthoner Strahlungsächte teilweise in angrenzende Lasträume vordringen und dort eine leichte Abmilderung der Wärmeinseleffekte bedingen, weshalb die Bereiche der Kaltluftabflussbahnen von weiterer Bebauung und dichter, riegelförmiger Bepflanzung freizuhalten sind.

Insbesondere im Niederungsbereich von Rhein und Ruhr können sich bei fehlendem Strömungsantrieb Kaltluftammelgebiete bilden. Hier besteht die Gefahr der Schadstoffakkumulation, weshalb in diesen Bereichen die Ansiedlung bodennaher Emittenten reduziert werden sollte.

In Duisburg existieren großflächige Wärmeinselbereiche der Industrie- und Gewerbeansiedlungen entlang der Fließgewässer von Rhein und Ruhr. Im Zusammenhang mit den teilweise räumlich anschließenden Siedlungen der hochverdichteten Innenstadt, wie sie in Duisburg-Mitte vorhanden ist, entstehen somit sehr große Bereiche, die während sommerlicher Hochdruckwetterlagen eine starke Hitzebelastung aufweisen können. Gleichzeitig weisen zahlreiche Siedlungsgebiete innerhalb der Stadt einen raschen Übergang in zum Teil sehr stark durchgrünte Wohnsiedlungen und größere Grünanlagen und Waldgebiete auf. Aus stadtklimatischer Sicht ist die Nähe zu den zahlreichen aufgelockerten, begrünten Bereichen als sehr positiv zu beurteilen, da somit in vielen Bereichen der Stadt die Ausbildung sehr großer, überwärmter Bereiche weitgehend verhindert wird. Aus diesem Grund sollte in Zukunft darauf geachtet werden, die insgesamt aufgelockerte Bauweise möglichst zu erhalten. Auch die Zufuhr von Frischluft aus den umliegenden Freilandbereichen sollte zur Aufrechterhaltung eines günstigen Stadtklimas weiterhin ermöglicht werden. Daher sollte darauf geachtet werden, Luftleitbahnen zu erhalten bzw. hinsichtlich ihrer Luftqualität zu verbessern und Frischluftzufuhrbereiche nicht zu bebauen. Vorhandene Grünvernetzungsstrukturen, wie sie beispielsweise im Stadtgebiet Meiderich/Beeck vorkommen, sind zu erhalten und weiter auszubauen.



Planungshinweiskarte der Stadt Duisburg

Ausgleichsräume

- Bioklimatischer Ausgleichsraum Gewässer:** Die Sicherung der Belüftungsfunktion ist anzustreben. Uferbereiche freihalten, in der Übergangszone zum Gewässer keine Bebauung zulassen. Wertvolle Zonen für die Naherholung erhalten.
- Regional bedeutsamer Ausgleichsraum Freiland:** Die stadtnahen Freiflächen sollten als Ausgleichsräume gesichert und aufgewertet werden. Daher von Bebauung freihalten, keine Emissionen, Ausbau von Grünzügen und Naherholungsgebiete anstreben.
- Lokal bedeutsamer Ausgleichsraum Park- u. Grünanlagen:** Bioklimatisch wertvoller innerstädtischer Ausgleichsraum. Freihalten von Bebauung oder Verengung. Vorhandene Vegetationsstrukturen erhalten und ausbauen. Eine Vernetzung der Grünflächen ist anzustreben. Förderung des Luftaustausches. Erhalt und Aufbau weitläufiger Gehölzstrukturen. Schaffung differenzierter Mikroklima. Die Vernetzung mit den direkt anschließenden Siedlungsräumen herstellen. Bei kleineren Anlagen (kl. 1 ha) Ränder schließen, größere Parks zu den Rändern hin öffnen.
- Bioklimatischer Ausgleichsraum Wald:** Die vorhandenen Waldflächen im Stadtgebiet sind bioklimatisch wertvoll, sie unterstützen die Luftregeneration und die Ausfaltung von Schadstoffen. Vorhandene Waldflächen erhalten, vergrößern und ausbauen. Frischluft- und Kaltluftbahnen sind jedoch von Waldflächen freizuhalten.

Lasträume

- Lastraum der überwiegend locker und offen bebauten Wohngebiete:** Bebauungsstrukturen und Begrünung sind bioklimatisch positiv zu bewerten. Günstige Bebauungsstrukturen erhalten. Reduktion der Verkehrs- und Hausbrandemissionen. Kleinräumige Entlastungsmaßnahmen vorsehen. Erhaltung und Aufbau von weiteren Gebäudestrukturen.
- Lastraum der überwiegend dicht bebauten Wohn- und Mischgebiete:** Klimatisch mäßig belastete Gebiete, weitere Verdichtung vermeiden, bioklimatische Entlastung durch aufgelockerte Bauweise, keine massigen Gebäudekomplexe. Durchdringungsgrad erhalten und vergrößern, z.B. durch Baum- und Innenhofbegrünung, Begrünungen im Straßenraum und auf Privatgelände. Weitere Möglichkeiten bestehen durch Dach- und Fassadenbegrünung und Blockinnenhofentkernung -entseglung, Reduktion der Emissionen, besonders des Kfz-Verkehrs.
- Lastraum der hochverdichteten Innenstadt:** Extremes Stadtklima kann zu Austauschproblemen mit hohen Schadstoffkonzentrationen und belastendem Bioklima führen. Reduktion der Schadstoffemissionen, besonders des Kfz-Verkehrs. Belüftungsschneisen erhalten und an den Rändern öffnen, Straßenräume, Innenhöfe begrünen, Erhalt und Ausbau der Grün- und Freiflächen, keine weitere Verdichtung zulassen. Entseglung sowie Dach- und Fassadenbegrünung anstreben. Förderung des Luftaustausches.
- Lastraum der Gewerbe- und Industrieflächen:** Diese Gebiete sind durch starke Emissionen, Lärm und Staubbelastungen charakterisiert. Freihalten von Belüftungsbahnen. Entseglung und Begrünung von Freiflächen, großräumiger Lager-, bzw. Parkplätze, Immissionschutzpflanzungen, insb. im Übergangsbereich zu angrenzender Wohnnutzung. Aufbau von Gehölz- und Baumreihen an Straßen und Grundstücksgrenzen. Emissionen und Verkehr reduzieren.

Raumspezifische Hinweise

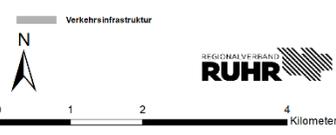
- Grünvernetzung:** Vernetzung vorhandener Wald- und Freiflächen durch Grünzüge anstreben. Ausgestaltung als parkartige Flächen zur Unterstützung von Luftregeneration, Filterfunktion und als Pufferwirkung. Keine weitere Bebauung, keine zusätzlichen Emissionen. Ausbau zu parkartigen Freiflächen mit Wäldern, Gehölz- und Wiesenflächen. Luftleitbahnen beachten. Hausgärten und Innenhöfe mit einbeziehen, für vorhandene Gebäude Dach- und Fassadenbegrünung anstreben.
- Hauptverkehrsstraßen:** Hohe Lärm- und Schadstoffemissionen. Grundrufer und Abstandsreihen errichten, aktive und passive Lärmschutzmaßnahmen vorsehen.
- Bahnanlagen:** Große Tag- / Nachtlüftungsrisiko bei den Oberflächentemperaturen, die geringe Rauigkeit begünstigt den Luftaustausch.
- Kaltluftammelgebiete:** Möglichst keine Bebauung, Bebauung nicht weiter verdichten. Keine Emittenten ansiedeln. Belüftungsbahnen offen halten. Erhöhte Nebelgefährdung.

Lokale Hinweise

- Weitere Bebauung möglich:** Maßvolle Verdichtung auf diesen Flächen bei Beachtung der vorhandenen Bebauungsstrukturen möglich. Ausbau der vorhandenen Wohnbebauung durch Schließung einzelner Baukörper.
- Keine weitere Verdichtung:** Keine zusätzliche Verdichtung oder Verengung durch Bebauung innerhalb dieser Siedlungsblöcke auf Grund der lufthygienischen und klimatischen Belastung.
- Klimatische Baugrenze:** Zum Schutz von klimatisch wertvollen Räumen und als Hinweis gegen eine Zersiedelung des Stadtgebietes sollte an diesen Stellen eine über die Baugrenzung hinausgehende Bebauung vermieden werden. Somit kann der großflächige Erhalt positiver Zonen gewährleistet werden.
- Anstreben klimatischer Baugrenzen:** Anstreben einer möglichst weitgehenden Zurückhaltung bei Baufälligkeiten über die Grenzen hinaus. Einzelne Gebäude können durchaus die Grenze überschreiten, größere zusammenhängende Gebäude sollten jedoch nicht in den Außenraum vorragen.
- Begrünung im Wohnbereich:** Zur Verringerung des Versiegelungsgrades und Verbesserung des Bioklimas umfangreiche Begrünungsmaßnahmen vorsehen. Soweit öffentliche Räume (Parks, Straßen etc.) ist auch private Grundstücke einbeziehen. Dach- und Fassadenbegrünung und Innenhofbegrünung vorsehen. Vorhandene Innenhofbegrünungen erhalten, geeignete Innenhöfe eventuell nach Entkernung begrünen.
- Begrünung Gewerbe und Industrie:** Zur Verbesserung der klimatischen und lufthygienischen Situation kleinräumige Begrünung vornehmen, Erhöhung des Vegetationsanteils durch Bepflanzung von Parkplätzen, Reserve-, Lager- und Abstandsflächen, Dach- und Fassadenbegrünung. Erhaltung und Erweiterung vorhandener Pflanzungen.
- Begrünung im Straßenraum:** Erhalt und Anpflanzung großkröniger Laubbäume zur Klimaverbesserung. In Straßenschluchten oder bei hohem Verkehrsaufkommen keine geschlossenen Kleinreihen.
- Immissionschutzpflanzungen:** Vorhandene Strukturen ausweiten und verdichten. Weitere Anlage umfangreicher Immissionschutzpflanzungen notwendig.
- Park- und Grünanlagen:** Flächen erhalten und ausbauen. Abwechslungsreiche Pflanzstrukturen (Bäume, Sträucher, Wiesenflächen) anstreben.
- Waldflächen:** Bioklimatisch besonders wertvoll. Vorhandene Strukturen erhalten und ausbauen.

Luftaustausch und Kaltluftabfluss

- Luftleitbahn:** Von Bebauung und Emissionen freihalten, zu den Rändern hin öffnen. Keine Strömungshemmnisse schaffen, Reduktion bzw. Vermeidung bodennaher Emissionen.
- Luftleitbahn, belastet:** Siehe "Luftleitbahn, unbelastet". Allerdings sind in diesen Bereichen Belastungen der transportierten Luftmassen durch (an-)grenzende Emittenten (z.B. Verkehr, Gewerbe, Industrie) möglich. Daher Maßnahmen zur Reduzierung der bodennahen Emissionen ergreifen.
- Frischluftzufuhr:** Ventilationsbahnen möglichst von Bebauung freihalten. Frischluftzufuhr aus dem Umland.
- Nächtlicher Kaltluftabfluss:** Möglichkeit des nächtlichen Kaltluftabflusses. Abfluchtung der Kaltluft der Täler und Senken.
- Luftaustausch fördern und erhalten:** Kleinräumige Luftaustauschprozesse durch Öffnen von Gebäuden- und Vegetationsrändern unterstützen.



Karte 8.1: Planungshinweiskarte der Stadt Duisburg

9 Anhang

Tabelle A 1: Fläche, Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte in den Stadtbezirken (Stadt Duisburg 2022a)

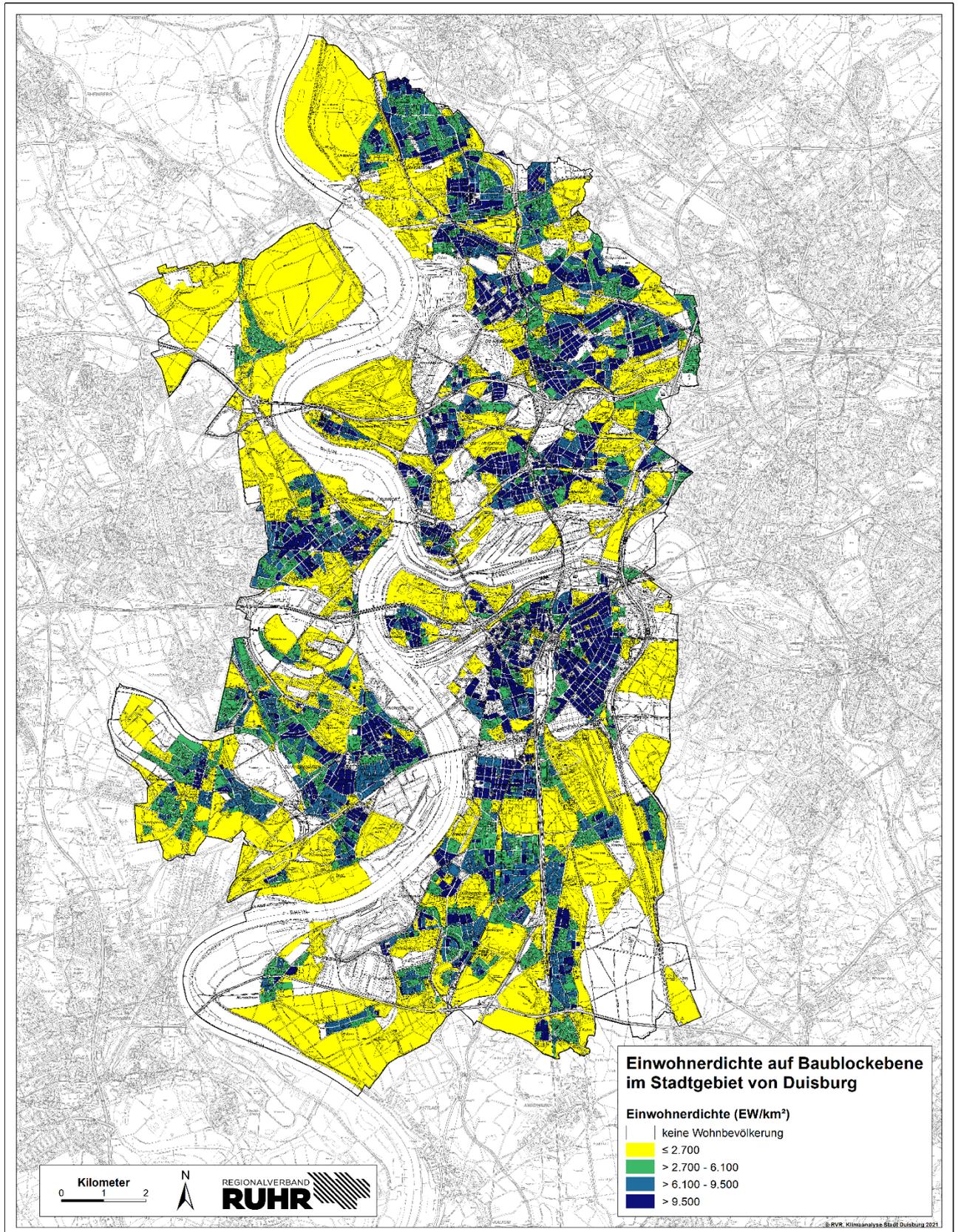
| Stadtbezirk | Fläche in km ² | Einwohner | Einwohner/km ² |
|-----------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|
| Walsum | 21,15 | 50.395 | 2.383 |
| Hamborn | 20,86 | 75.907 | 3.639 |
| Meiderich/Beeck | 30,19 | 72.648 | 2.407 |
| Homborg-Ruhrort-Baerl | 36,87 | 41.018 | 1.112 |
| Duisburg-Mitte | 35,10 | 108.584 | 3.094 |
| Rheinhausen | 38,69 | 78.164 | 2.020 |
| Duisburg-Süd | 49,80 | 72.723 | 1.460 |
| Duisburg | 232,66 | 499.439 | 2.147 |

Tabelle A 2: Charakteristika der 14 FITNAH-Nutzungsklassen (GEO-NET 2021)

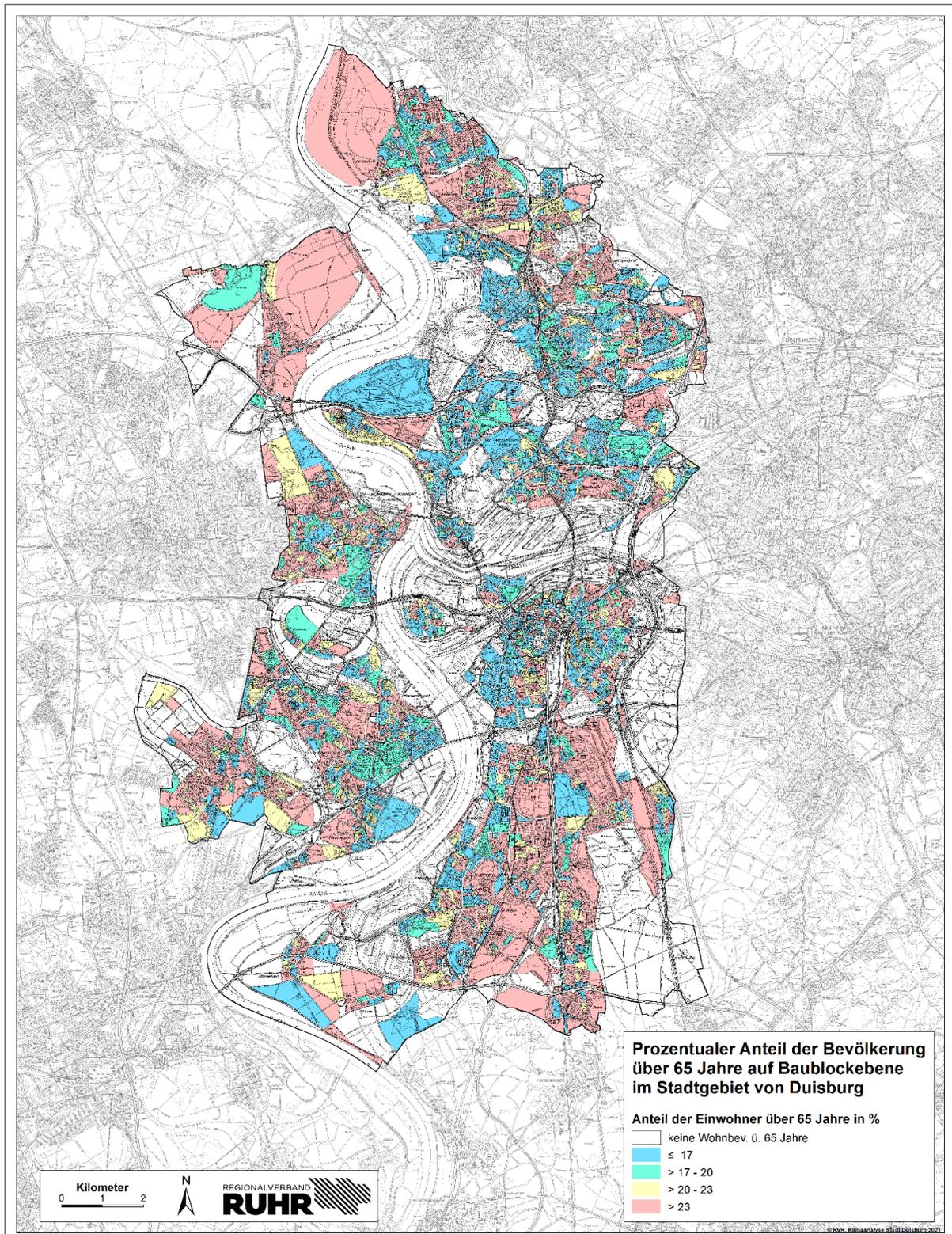
| Klasse | Flächentyp | Beschreibung | Mittlerer Versiegelungsgrad (%) | Mittlere Strukturhöhe (m) |
|--------|--------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------|
| 1 | Zentrumsbebauung | Kerngebietsnutzung, welche durch einen sehr hohen Bebauungs- und Versiegelungsgrad gekennzeichnet ist. | 95 | 25,0 |
| 2 | Block- und Blockrandbebauung | Vergleichsweise dicht bebaute und häufig auch stark versiegelte Siedlungsfläche. Baustrukturell ist sie meist durch geschlossene Blockinnenhöfe geprägt. Sie umfasst sowohl Vorkriegs- als auch Nachkriegsbauten. | 78 | 15,0 |
| 3 | Industrie- und Gewerbeflächen | Sie weist einen ähnlich hohen Versiegelungsgrad wie die Zentrumsbebauung auf, gleichzeitig ist der versiegelte Flächenanteil oft größer als der mit Gebäuden bestandene. | 87 | 10,0 |
| 4 | Zeilen- und Hochhausbebauung | Zu diesem Flächentyp zählen sowohl freistehende Punkthochhäuser als auch halboffene Blockrandbebauung und Zeilenbebauung. Gemeinsames Merkmal ist ein relativ hoher Grünflächenanteil, welcher sich durch die zwischen den Gebäudekörpern befindlichen Abstandsflächen ergibt. | 55 | 15,0 |
| 5 | Einzel- und Reihenhausbebauung | Dieser Typ weist unter den Siedlungsräumen den geringsten Überbauungsgrad auf. Der Übergang zwischen dicht ausgeprägter Reihenhausbebauung und einer Zeilenbebauung ist fließend. | 41 | 5,0 |
| 6 | Straßenraum | Ebenerdig versiegelte Fläche des Straßenraums. | 95 | 0,0 |
| 7 | Gleisfläche | Schienenverkehrsfläche mit geringer Strukturhöhe. | 25 | 0,5 |

| | | | | |
|----|-----------------------------|---|----|------|
| 8 | Baulich geprägte Grünfläche | Unter diesem Flächentyp sind vegetationsgeprägte Flächen zusammengefasst, welche zugleich auch einen gewissen Anteil an versiegelter Fläche (Zuwegungen)/oder Bebauung aufweisen. Dazu zählen z.B. Kleingartenanlagen und Gartenbauflächen, sowie Spiel- und Sportplätze. Es überwiegt aber letztlich die Eigenschaft der Grünfläche. | 25 | 5,0 |
| 9 | Freiland | Beinhaltet vor allem landwirtschaftlich genutzte Wiesen und Weiden sowie ackerbaulich genutzte Flächen, aber auch die zum Teil großen Tagebauflächen in NRW. Innerstädtisch handelt es sich zumeist um Rasenflächen mit geringem Gehölzanteil. | 5 | 1,0 |
| 10 | Gehölz | Diese Nutzungskategorie umfasst sowohl innerstädtische Parkareale und Gehölzflächen als auch Obstbauflächen, Baumschulen und Straßenbegleitgrün. | 5 | 2,0 |
| 11 | Laubwald | Waldflächen sowie waldartige Bestände im Siedlungsbereich | 5 | 12,5 |
| 12 | Nadelwald | Waldflächen sowie waldartige Bestände im Siedlungsbereich | 5 | 12,5 |
| 13 | Mischwald | Waldflächen sowie waldartige Bestände im Siedlungsbereich | 5 | 12,5 |
| 14 | Wasserfläche | Still- und Fließgewässer | 0 | 0,0 |

Karte A 1: Einwohnerdichte auf Baublockebene im Stadtgebiet von Duisburg.



Karte A 2: Prozentualer Anteil der Bevölkerung über 65 Jahre auf Baublockebene im Stadtgebiet von Duisburg.



10 Literatur

- BAUMÜLLER, J.; HELBIG, A.; KERSCHGENS, M.J. (HRSG.) (1999):** Stadtklima und Luftreinhalte. 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin & Heidelberg, 467 S.
- BAUGB (2021):** Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 10. September 2021 (BGBl. I S. 4147) geändert worden ist
- BAUNVO (2013):** Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Januar 1990 (BGBl. I S. 132), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 11. Juni 2013 (BGBl. 1548) geändert worden ist
- CICHOLAS, U.; STRÖCKER, K. (2015):** Vorausberechnung der Bevölkerung in den kreisfreien Städten und Kreisen Nordrhein-Westfalens 2014 bis 2040/2060. In: IT.NRW (Hrsg.): Statistische Analysen und Studien Nordrhein Westfalen. Band 84. Düsseldorf. 44 S.
- DWD (2021/22):** Monatlicher Klimastatus Deutschland für die Monate März 2021 bis Februar 2022. Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Offenbach. (www.dwd.de/klimastatus)
- FRÖHLICH, D. U. MATZARAKIS, A. (2018):** RayMan Pro – A tool for Applied Climatology, Modelling of Mean Radiant Temperature and Thermal Indices. RayMan manual version 0.1, 75 S.
- GEO-NET (2021):** Methodik der aktuellen FITNAH-Klimamodellierung im Regionalverband Ruhr. - GEO-NET Umweltconsulting GmbH. unveröffentlichter Abschlussbericht. Hannover. 21 S.
- GROBMAN, K.; FRANK, U.; KRÜGER, M.; SCHLICK, U.; SCHWARZ, N. U. STARK, K. (2012):** Soziale Dimension von Hitzebelastung in Großstädten. disP – The Planning Review, 48:4, S. 56-68.
- HELD, F.; KRÜGER, T. (2011):** Stadtstrukturabhängige Ausweisung sensibler Siedlungsräume bei thermischen Belastungen als Grundlage für die künftige Stadtentwicklung – Darstellung sensibler Gebiete bei thermischen Belastungen – Anpassungsempfehlungen, REGKLAM-Ergebnisbericht.
- HELLMANN, S. (2021): HALDEN.Ruhr:** <https://www.halden.ruhr/halde-grosses-holz.html>
(Zugriff: 10.03.2021)
- HÖPPE, P. (1999):** The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. In: International Journal of Biometeorology volume 43, S. 71–75
- HUPFER, P. U. KUTTLER W. (HRSG.) (2006):** Witterung und Klima – Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 12. überarbeitete Auflage, B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 554 S.
- IPCC (2013A):** Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Großbritannien und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch IPCC-

Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern 2014.

IPCC (2013B): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC (2014): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn 2015

IT.NRW (2022): Kommunalprofil Duisburg, krfr. Stadt. – Landesbetrieb für Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf. 25 S.

JENDRITZKY, G. (2007): Folgen des Klimawandels auf die Gesundheit. In: Endlicher, W.; Gerstengarbe, F.W. (Hrsg.): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, S. 108-118. Potsdam: PIK 2007.

KUTTLER, W. (2009): Klimatologie. Ferdinand Schöningh, Paderborn, 260 S.

KUTTLER, W. (2010): Das Ruhrgebiet im Klimawandel - Bestandsaufnahme und Prognose. = Essener Unikate - Berichte aus der Forschung und Lehre, 38, Beiträge zur „Ruhr 2010“, S. 40-51

KUTTLER, W. et al. (2012): Prognose- und Diagnoseverfahren zur Verbesserung des Stadtklimas – Stadtklimatische Untersuchungen in Oberhausen und Simulation verschiedener Minderungsstrategien zur Reduktion der thermischen Belastung im Hinblick auf den Klimawandel. Dynaklim-Publikation, No.25

KUTTLER, W.; DÜTEMEYER, D.; BARLAG, A.-B. (2013): Handlungsleitfaden – Steuerungswerkzeug zur städtebaulichen Anpassung an thermische Belastungen im Klimawandel, dynaklim-Publikation No. 34, Essen.

LÜFTNER, H. (1996): Das Regionalklima im Ruhrgebiet - Entwicklung, Analyse und Darstellungsmöglichkeiten des Klimas in einem urban-industriellen Verdichtungsraum. Europäische Hochschulschriften 42, Ökologie, Umwelt und Landespflge; Bd. 19. Peter Lang. Frankfurt am Main. 276 S.

LANUV NRW (2022): Klimaatlas Nordrhein-Westfalen. Webdatenbank. – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen. (<http://www.klimaatlas.nrw.de/karte-klimaatlas> (Zugriff: 17.03.2022))

MATZARAKIS A, MAYER H (1996): Another kind of environmental stress: thermal stress. WHO Newsletter 18, S. 7–10

MATZARAKIS, A. (2013): Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. In: Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft, S. 115-118.

MEINSHAUSEN, M.; SMITH, S. J.; CALVIN, K.; DANIEL, J.S.; KAINUMA, M. L. T.; LAMARQUR, J.-F.; MATSUMOTO, K.; MONTZKA, S. A.; RAPER, S. C. B.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; VELDEERS G. J. M.; VAN VUUREN, D.P. P. (2011): The RCP greenhouse gas concentrations and their extension from 1765 to 2300. In: Climatic Change (2011) 109:213-241

- MOSIMANN, TH.; TRUTE, P.; FREY, TH. (1999):** Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- MKULNV (HRSG.) (2012):** Wald im Klimawandel – Auswirkungen des Klimawandels auf Wälder und Forstwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf, 52 S.
- MUNLV (HRSG.) (2010):** Handbuch Stadtklima – Maßnahmen und Handlungsempfehlungen für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel (Langfassung). Düsseldorf, 268 S.
- MURL (HRSG.) (1989):** Klima-Atlas von Nordrhein-Westfalen. – Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
- RVR (2010):** Klimaanalyse Stadt Duisburg. Essen.
- RVR (2013):** Fachbeitrag zum Regionalplan der Metropole Ruhr – „Klimaanpassung“. - Regionalverband Ruhr. unveröffentlichter Bericht. Essen. 129 S.
- SCHÖNWIESE, CH.-D. (2003):** Klimatologie. 2. neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co. KG, Stuttgart.
- STADT DUISBURG (2022):** Duisburg geographisch: <https://www.duisburg.de/wohnenleben/geografisch/lage.php> (Zugriff: 16.03.2022)
- STADT DUISBURG (2022A):** Bevölkerungsdaten auf Baublockebene und auf Ebene der Stadtbezirke. (E-Mails vom 25.03.2022 und vom 21.07.2022)
- VDI (1989):** Richtlinie VDI 3787, Blatt 2: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- VDI (2003):** Richtlinie VDI 3787 Blatt 5 Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI (2008):** VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie – Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI (2015):** VDI-Richtlinie 3787 Bl. 1: Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Düsseldorf. 54 S.
- WEMER, G.; KRESS, R.; MAI, H.; ROTH, D.; SCHULZ, V. (1979):** Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung. In: Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.) (1979): Raumordnung. Bonn, Heft 32, 116 S.
- WIKIPEDIA (2022A):** Einwohnerdichte im Ruhrgebiet: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ruhrgebiet> (Zugriff: 16.03.2022)