



# Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen

LANUV-Fachbericht 86



---

# **Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen**

## **LANUV-Fachbericht 86**

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen  
Recklinghausen 2018

---

## IMPRESSUM

Herausgeber Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen (LANUV)  
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen  
Telefon 02361 305-0  
Telefax 02361 305-3215  
E-Mail: [poststelle@lanuv.nrw.de](mailto:poststelle@lanuv.nrw.de)

Dieser Fachbericht basiert auf dem Abschlussbericht einer Studie, die im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) in Abstimmung mit dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) erstellt wurde.

Bearbeitung GEO-NET Umweltconsulting GmbH  
Große Pfahlstraße 5a  
30161 Hannover

Planungsgruppe Umwelt GbR  
Stiftstraße 12  
30451 Hannover

Projektbetreuung /  
Redaktion Antje Kruse, Dr. Nicole Müller, Niklas Raffalski (LANUV)

Karten Land NRW (2018), Datenlizenz Deutschland - Namensnennung - Version 2.0  
([www.govdata.de/dl-de/by-2-0](http://www.govdata.de/dl-de/by-2-0))

Titelbild fotolia / Prod.Numérik

ISSN 1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachbericht

Informationsdienste Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter  
• [www.lanuv.nrw.de](http://www.lanuv.nrw.de)  
Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im  
• WDR-Videotext

Bereitschaftsdienst Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV  
(24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

# Vorwort

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

der vom Menschen verursachte Klimawandel stellt unsere Gesellschaft vor große Herausforderungen: Das bei der Pariser Klimakonferenz formulierte Ziel, die globale Erwärmung bis zum Jahr 2100 auf unter 2 Grad Celsius zu beschränken, erfordert ein entschlossenes und sofortiges Handeln.

Trotz aller Bemühungen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen müssen wir uns aber auch auf die bereits eingetretenen und die nicht mehr zu verhindernden Veränderungen des Klimas einstellen. Auch in NRW ist der Klimawandel messbar. So sind die Temperaturen seit Beginn der Aufzeichnungen 1881 um 1,5 Grad Celsius angestiegen. Dies ist im Vergleich zu natürlichen Klimavariationen eine dramatisch schnelle Entwicklung. Klimaprojektionen gehen für die Zukunft davon aus, dass die Temperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts um weitere 1,5 bis 4,3 Grad Celsius ansteigen werden. Sommerliche Hitzeperioden werden dabei länger und stärker ausfallen sowie häufiger auftreten.

Insbesondere in einem so dicht besiedelten Bundesland wie Nordrhein-Westfalen ist angesichts steigender Temperaturen der Schutz der Bevölkerung vor übermäßiger Hitzebelastung ein wichtiger Aspekt. Diese Belastung kann vor allem in stark verdichteten innerstädtischen Quartieren zu gesundheitlichen Problemen führen. Hier gilt es als eine Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel beispielsweise, den Luftaustausch und die Versorgung von belasteten, dicht bebauten Siedlungsbereichen mit kühleren Luftmassen zu fördern.

Um hierfür benötigte Datengrundlagen und Informationen bereitzustellen, hat das LANUV mit der Klimaanalyse NRW nun erstmals die klimatische Situation für das gesamte Landesgebiet untersucht und bewertet. Dabei wurden besonders von Hitze belastete Siedlungsbereiche identifiziert, aber auch kaltluftproduzierende Ausgleichsflächen. Das Ergebnis zeigt, dass bereits heute mehr als fünf Millionen Menschen in NRW von besonders großen Hitzebelastungen betroffen sind. Durch den Klimawandel wird sich diese Zahl in Zukunft voraussichtlich deutlich erhöhen, so dass bereits zur Mitte des Jahrhunderts mit neun Millionen Menschen etwa die Hälfte der Landesbevölkerung hiervon betroffen wäre.

Ich bedanke mich bei allen, die an der Erstellung der Klimaanalyse NRW beteiligt waren und mit ihrem Fachwissen die Erarbeitung der vorliegenden Studie unterstützt haben. Allen Leserinnen und Lesern wünsche ich eine informative Lektüre.

Ihr



Dr. Thomas Delschen  
Präsident des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen



# Inhaltsverzeichnis

|         |                                                                         |    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.      | Einleitung und Hintergrund .....                                        | 14 |
| 2.      | Datengrundlagen .....                                                   | 18 |
| 2.1     | Topographie .....                                                       | 18 |
| 2.2     | Nutzungsstruktur .....                                                  | 19 |
| 3.      | Grundlageninformationen .....                                           | 23 |
| 3.1     | Mikroklima .....                                                        | 23 |
| 3.1.1   | Lufttemperatur .....                                                    | 23 |
| 3.1.2   | Thermischer Index – Physiologische Äquivalente Temperatur (PET).....    | 25 |
| 3.1.3   | Wind .....                                                              | 27 |
| 3.2     | Klimamodell FITNAH .....                                                | 29 |
| 3.2.1   | Grundgleichungen des mesoskaligen Modells FITNAH .....                  | 29 |
| 3.2.2   | Parametrisierungen der Eingangsvariablen .....                          | 30 |
| 3.2.3   | Großräumige meteorologische Rahmenbedingungen.....                      | 32 |
| 3.3     | Klimawandel .....                                                       | 33 |
| 4.      | Methodik und Vorgehensweise .....                                       | 38 |
| 4.1     | Klimatopausweisung .....                                                | 38 |
| 4.2     | Klimamodellsimulation - Einbeziehung weiterer Fachinformationen.....    | 42 |
| 4.3     | Vertiefende Analyse.....                                                | 44 |
| 4.3.1   | Klimaanalyse Nachtsituation.....                                        | 47 |
| 4.3.2   | Klimaanalyse Tagsituation .....                                         | 48 |
| 4.3.3   | Klimaanalyse Gesamtbetrachtung .....                                    | 49 |
| 4.4     | Klimawandel-Vorsorgebereiche .....                                      | 56 |
| 4.5     | Anzahl betroffener Menschen .....                                       | 57 |
| 5.      | Ergebnisse der Klimatopausweisung .....                                 | 58 |
| 6.      | Ergebnisse der Klimamodellsimulation .....                              | 60 |
| 6.1     | Nachtsituation.....                                                     | 60 |
| 6.1.1   | Nächtliches Lufttemperaturfeld .....                                    | 60 |
| 6.1.2   | Autochthones Windfeld (Kaltluftströmungsfeld).....                      | 63 |
| 6.1.3   | Kaltluftvolumenstrom .....                                              | 64 |
| 6.2     | Tagsituation: Thermische Belastung (PET).....                           | 66 |
| 7.      | Ergebnisse der Klimaanalyse .....                                       | 69 |
| 7.1     | Klimaanalyse Nachtsituation.....                                        | 70 |
| 7.2     | Klimaanalyse Tagsituation .....                                         | 76 |
| 7.3     | Klimaanalyse Gesamtbetrachtung und Ableitung von Planungshinweisen..... | 79 |
| 8.      | Ausblick und Anwendungsmöglichkeiten .....                              | 86 |
| 8.1     | Handlungsansätze auf regionaler Ebene .....                             | 86 |
| 8.2     | Handlungsansätze auf kommunaler Ebene .....                             | 91 |
| 9.      | Literatur .....                                                         | 93 |
| Glossar | .....                                                                   | 96 |

## Abbildungsverzeichnis

|               |                                                                                                                                    |    |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1:  | Geländehöhe im Bundesland NRW.....                                                                                                 | 18 |
| Abbildung 2:  | Nutzungsstruktur im Bundesland NRW .....                                                                                           | 22 |
| Abbildung 3:  | Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur<br>Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen/Klimatoptypen ..... | 24 |
| Abbildung 4:  | Prinzipskizze Flurwind.....                                                                                                        | 27 |
| Abbildung 5:  | Prinzipskizze rasterbasierte Kaltluftvolumenstromdichte .....                                                                      | 28 |
| Abbildung 6:  | Unterschiedliche Rasterweiten bei einem digitalen<br>Geländehöhenmodell .....                                                      | 30 |
| Abbildung 7:  | Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit .....                                                                | 31 |
| Abbildung 8:  | Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbbarkeit einer Rasterzelle .....                                                         | 32 |
| Abbildung 9:  | Einfluss der prognostizierten Zunahmen von Mitteltemperatur und<br>Streuung auf die Häufigkeit von Extremereignissen .....         | 36 |
| Abbildung 10: | Ablauf-Schema zur automatisierten Ausweisung der Klimatope in<br>NRW .....                                                         | 40 |
| Abbildung 11: | Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen (Vektor-) und<br>Rasterinformation.....                                                 | 44 |
| Abbildung 12: | Bewertungskategorien der z-Transformation.....                                                                                     | 46 |
| Abbildung 13: | Ablaufschema zur Bewertung der bioklimatischen Bedeutung des<br>Freiraums in der Nacht.....                                        | 53 |
| Abbildung 14: | Ablaufschema zur Bewertung zur bioklimatischen Bedeutung des<br>Freiraums am Tag.....                                              | 55 |
| Abbildung 15: | Klimatopkarte .....                                                                                                                | 59 |
| Abbildung 16: | Nächtliches Lufttemperaturfeld.....                                                                                                | 61 |
| Abbildung 17: | Nächtliches Windfeld.....                                                                                                          | 64 |
| Abbildung 18: | Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom .....                                                                                             | 65 |
| Abbildung 19: | Lufttemperatur (Tagsituation) .....                                                                                                | 67 |
| Abbildung 20: | Thermische Belastung (PET) (Tagsituation).....                                                                                     | 68 |
| Abbildung 21: | Klimaanalysekarte Nachtsituation (4 Uhr) .....                                                                                     | 71 |
| Abbildung 22: | Detailausschnitt Klimaanalysekarte Nachtsituation (4 Uhr).....                                                                     | 72 |
| Abbildung 23: | Klimaanalysekarte Tagsituation (15 Uhr).....                                                                                       | 77 |
| Abbildung 24: | Detailausschnitt Klimaanalysekarte Tagsituation (15 Uhr).....                                                                      | 78 |
| Abbildung 25: | Klimaanalysekarte Gesamtbetrachtung.....                                                                                           | 79 |
| Abbildung 26: | Detailausschnitt Klimaanalysekarte Gesamtbetrachtung .....                                                                         | 83 |

## Tabellenverzeichnis

|             |                                                                                                                                                            |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1:  | Thermische Belastung der Bevölkerung in NRW.....                                                                                                           | 12 |
| Tabelle 2:  | Eingangsdaten Flächennutzung .....                                                                                                                         | 20 |
| Tabelle 3:  | Nutzungskategorien der Klimamodellierung .....                                                                                                             | 20 |
| Tabelle 4:  | Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET<br>während der Tagesstunden.....                                                                 | 26 |
| Tabelle 5:  | RCP-Szenarien nach 5. Sachstandbericht des IPCC (2013) .....                                                                                               | 34 |
| Tabelle 6:  | Ergebnisse der Klimaprojektionen für NRW als Änderung für den<br>Zeitraum 2021-2050 bezogen auf 1971-2000.....                                             | 35 |
| Tabelle 7:  | Primäre Zuordnung der Objektarten (ATKIS Basis-DLM) zu den<br>Klimatotypen .....                                                                           | 40 |
| Tabelle 8:  | Spezifizierung der Klimatopzuweisung anhand des überbauten<br>Flächenanteils ( $VS_{Bau}$ ) sowie der Gesamtversiegelung .....                             | 42 |
| Tabelle 9:  | Bewertung der nächtlichen Überwärmung im Siedlungsraum .....                                                                                               | 47 |
| Tabelle 10: | Bewertung des Kaltluftvolumenstroms .....                                                                                                                  | 48 |
| Tabelle 11: | Bewertung der thermischen Belastung anhand der PET .....                                                                                                   | 49 |
| Tabelle 12: | Klassenbasierte Bewertung der thermischen Situation in<br>Siedlungsräumen in der Gesamtbetrachtung .....                                                   | 50 |
| Tabelle 13: | Verknüpfung der Bewertung der thermischen Belastung von Tag- und<br>Nachtsituation in der Gesamtbetrachtung bei Wohn- und<br>Gewerbeflächen.....           | 51 |
| Tabelle 14: | Klassenbasierte Bewertung der thermischen Ausgleichfunktion von<br>Flächen des Freiraums in der Gesamtbetrachtung.....                                     | 52 |
| Tabelle 15: | Matrix zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation<br>bei Flächen des Freiraums in der Gesamtbetrachtung .....                               | 52 |
| Tabelle 16: | Erläuterungen zur Bewertung der bioklimatischen Bedeutung des<br>Freiraums in der Nacht.....                                                               | 53 |
| Tabelle 17: | Erläuterungen zur Bewertung der bioklimatischen Bedeutung des<br>Freiraums am Tag.....                                                                     | 55 |
| Tabelle 18: | Flächenanteile der einzelnen Klimatotypen an der Gesamtfläche<br>Nordrhein-Westfalens .....                                                                | 58 |
| Tabelle 19: | Flächenanteile der Bewertungsklassen des Siedlungsraums in der<br>Nacht (Wärmeinseleffekt) sowie Anzahl der betroffenen Einwohner .....                    | 73 |
| Tabelle 20: | Flächenanteile der Bewertungsklassen des Freiraums in der Nacht<br>(Kaltluftvolumenstrom) .....                                                            | 75 |
| Tabelle 21: | Flächenanteile der Bewertungsklassen des Siedlungs- und Freiraums<br>am Tage (thermischen Belastung) sowie Anzahl der betroffenen<br>Einwohner .....       | 76 |
| Tabelle 22: | Flächenanteile der Bewertungsklassen des Siedlungsraums in der<br>Gesamtbetrachtung (thermische Situation) sowie Anzahl der<br>betroffenen Einwohner ..... | 80 |

|             |                                                                                                                   |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 23: | Planungshinweise für die Bewertungsklassen des Siedlungsraums in der Gesamtbetrachtung .....                      | 81 |
| Tabelle 24: | Flächenanteile der Bewertungsklassen des Freiraums (thermische Ausgleichsfunktion) in der Gesamtbetrachtung ..... | 84 |
| Tabelle 25: | Planungshinweise für die Bewertungsklassen des Freiraums in der Gesamtbetrachtung.....                            | 85 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                   |                                                                                           |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| °C                | Grad Celsius                                                                              |
| ATKIS             | Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem                               |
| Basis-DLM         | Digitales Basis-Landschaftsmodell                                                         |
| BEB               | offene Bebauung (Basis-DLM Objektattribut)                                                |
| bzw.              | beziehungsweise                                                                           |
| d. h.             | das heißt                                                                                 |
| DWD               | Deutscher Wetterdienst                                                                    |
| EEA               | Europäische Umweltagentur (engl.: European Environment Agency)                            |
| engl.             | englisch                                                                                  |
| ha                | Hektar                                                                                    |
| hPa               | Hektopascal                                                                               |
| K                 | Kelvin                                                                                    |
| km                | Kilometer                                                                                 |
| km <sup>2</sup>   | Quadratkilometer                                                                          |
| LANUV             | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW                                     |
| LoD               | Level of Detail                                                                           |
| m                 | Meter                                                                                     |
| m <sup>2</sup>    | Quadratmeter                                                                              |
| m/s               | Meter pro Sekunde                                                                         |
| m <sup>3</sup> /s | Kubikmeter pro Sekunde                                                                    |
| NHN               | Normalhöhennull                                                                           |
| NRW               | Nordrhein-Westfalen                                                                       |
| PET               | physiologisch äquivalente Temperatur;<br>(englisch: Physiological Equivalent Temperature) |
| RCP               | Repräsentative Konzentrationspfade (engl.: Representative<br>Concentration Pathways)      |
| ROG               | Raumordnungsgesetz                                                                        |
| RVR               | Regionalverband Ruhr                                                                      |
| s.                | siehe                                                                                     |
| SRTM              | Shuttle Radar Topography Mission                                                          |
| THG               | Treibhausgas(e)                                                                           |
| u. a.             | unter anderem                                                                             |
| usw.              | und so weiter                                                                             |
| UVPG              | Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung                                             |
| VDI               | Verein Deutscher Ingenieure                                                               |
| vgl.              | vergleiche                                                                                |
| VS <sub>Bau</sub> | überbauter Flächenanteil                                                                  |
| VS <sub>Ges</sub> | Gesamtversiegelungsgrad                                                                   |
| z. B.             | zum Beispiel                                                                              |

## Zusammenfassung

Besonders hohe Temperaturen können sich negativ auf das Wohlbefinden oder die Gesundheit von Menschen auswirken. Unter Hitzebelastungen leiden vor allem die Gesundheit und die Lebensqualität sensibler Bevölkerungsgruppen wie Menschen mit Vorerkrankungen, einer geringeren Fitness, ältere Menschen oder Kleinkinder. Mögliche Folgen sind Kreislaufprobleme, Herzrhythmusstörungen, Kopfschmerzen oder Erschöpfung und damit verbunden eine geringere Leistungsfähigkeit in Schule und Beruf.

Vor allem in dicht bebauten innerstädtischen Quartieren können sich bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen sogenannte „Wärmeinseln“ (vgl. Glossar) bilden. Durch einen verringerten Luftaustausch, Wärmespeicherung von Gebäuden und Straßen sowie die Abstrahlung von Wärme durch Industrie und Verkehr kann hier die Temperatur um bis zu zehn Kelvin höher liegen als im Umland. Die Hitzebelastung in der Nacht ist dabei besonders bedeutsam. Einerseits ist der städtische Wärmeinseleffekt in der Nacht am stärksten ausgeprägt, vor allem bei geringer Bewölkung und Windstille. Andererseits wirken sich ungünstige klimatische Bedingungen besonders negativ auf den Schlaf und die nächtliche Erholung aus. Da Menschen in der Nacht an ihren Wohnort gebunden sind, können sie auch nicht in günstigere Bereiche ausweichen.

Positiv beeinflusst wird das Klima in Siedlungsbereichen durch Grün- und Freiflächen, die als Ausgleichsflächen für überwärmte Bereiche dienen können. Wiesen, Parkareale, Kleingärten und Friedhöfe, aber auch Acker- und Waldflächen kühlen sich in der Nacht zum Teil deutlich stärker ab als bebaute Bereiche. Vor allem über diesen Freiflächen bilden sich nachts Schichten kühlerer Luft. Sofern die Bebauung und die Geländestrukturen es ermöglichen, kann diese Kaltluft Wärmebelastungen in den Siedlungsbereichen verringern. Als Kaltluftleitbahnen werden dabei Freiflächen bezeichnet, die den Luftaustausch fördern und über die kühlere Luftmassen von Ausgleichsflächen in überwärmte städtische Bereiche gelangen können.

Der Klimawandel und der damit zu erwartende weitere Anstieg der Temperaturen sorgen dafür, dass die Bedeutung der Hitzebelastung in NRW zukünftig weiter zunehmen wird. Die Klimaprojektionen gehen davon aus, dass die durchschnittlichen Jahrestemperaturen in NRW bis zur Mitte dieses Jahrhunderts zwischen 0,7 und 1,7 Grad Celsius (°C) ansteigen werden. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird, abhängig von der erreichten Treibhausgasreduktion, ein Temperaturanstieg von etwa 1,5 bis 4,3 °C erwartet. Es wird mehr heiße Tage pro Jahr geben und sommerliche Hitzeperioden werden stärker ausfallen und länger andauern. Ausgleichs- und Vorsorgemaßnahmen zur Minderung der Hitzebelastung der Bevölkerung sind daher ein zentraler Baustein zur Anpassung an den Klimawandel in NRW. Die vorliegende Studie „Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen“ des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) liefert nun erstmals flächendeckende Daten und Erkenntnisse zur Hitzebelastung in NRW.

## Modellierung der klimatischen Situation in NRW

Für die gesamte Landesfläche Nordrhein-Westfalens wird eine Modellierung der klimatischen Situation durchgeführt, um die komplexen klimatischen Prozesse und Zusammenhänge genauer zu untersuchen. Das verwendete mesoskalige Klimamodell FITNAH simuliert dabei die Entwicklung verschiedener klimatischer Parameter wie Wind und Temperatur über einen Tagesgang in einem Raster von 100 mal 100 Metern. Für alle Flächen im Land wird dieselbe Ausgangssituation als Startbedingung der Modellierung angenommen: Eine Lufttemperatur von 20 °C um 21 Uhr, ein wolkenloser Himmel und keine überregionalen Windströmungen. Dies stellt eine für NRW typische sommerliche Strahlungswetterlage dar, bei der übermäßige Hitzebelastungen möglich sind.

Aus den Ergebnissen der Modellierung werden die klimaökologischen Funktionen aller Flächen im Land abgeleitet und sowohl für die Nachtsituation (4 Uhr) als auch für den Tag (15 Uhr) ausgewertet. Dabei sind für die gesamte die Landesfläche grundsätzlich drei Raumkategorien relevant, die hinsichtlich ihrer Bedeutung bewertet werden:

- Thermisch belastete Siedlungsräume
- Kaltluft produzierende Ausgleichsräume
- Kaltluftleitbahnen, die Belastungs- und Ausgleichsräume miteinander verbinden

Durch die separate Darstellung von Klimawandel-Vorsorgebereichen werden außerdem zusätzlich die Gebiete identifiziert, bei denen der Klimawandel bis zur Mitte des Jahrhunderts voraussichtlich zu einer Veränderung der Bewertung (besonders hohe Belastung) führen wird.

Bei der Analyse der klimatischen Situation in der Nacht wird deutlich, dass insbesondere Innenstädte und Stadtteilzentren in stark verdichteten Ballungsräumen wie dem Ruhrgebiet und an der Rheinschiene nur sehr wenig von Luftaustauschprozessen profitieren und von starker Überwärmung in der Nacht betroffen sind. Für Siedlungsbereiche, für die in der Modellierung auch um 4 Uhr morgens noch eine Lufttemperatur von mehr als 20 °C ermittelt wird, wird von einer starken Hitzebelastung ausgegangen. Das betrifft derzeit etwa 5 Prozent (%) der gesamten Siedlungsfläche in NRW. Die Modellergebnisse zeigen aber auch das Potenzial der Ausgleichsflächen im Land. Im Freiraum haben Grünflächen im Umfang von etwa 11.500 Quadratkilometer (km<sup>2</sup>) eine hohe oder sehr hohe Bedeutung für die Kaltluftlieferung (etwa ein Drittel der gesamten Landesfläche). In einer warmen Sommernacht werden etwa 60 % des Siedlungsraumes in NRW zumindest mit geringen Mengen an Kaltluft versorgt. Abhängig von den Bebauungsstrukturen kann diese bis zu 700 Meter (m) in die Siedlungsräume hineinwirken.

Die thermische Belastung am Tage wird an Hand des PET-Wertes (physiologisch äquivalente Temperatur; englisch: Physiological Equivalent Temperature), dargestellt, der das thermische Empfinden bei wechselnden Umgebungsbedingungen beschreibt. Bei der Darstellung der Ergebnisse wird zwischen Freiräumen und Siedlungsräumen sowie dem Grad der Hitzebelastung unterschieden. Tagsüber sind dabei die Unterschiede zwischen stark verdichteten innerstädtischen Quartieren und dünner besiedelten Randlagen deutlich

geringer als in der Nacht. In den innerstädtischen Siedlungsbereichen kann sich eine dichte Bebauung am Tag durch eine größere Verschattung auch positiv auswirken. Im Außenbereich weisen vor allem Siedlungsflächen in der Nähe zu großen landwirtschaftlichen Flächen oder Industrie- und Gewerbeflächen eine starke oder extreme Belastung auf. Insgesamt sind unter den Rahmenbedingungen der Modellierung 12 % der Siedlungsflächen in NRW als extrem belastet zu bewerten ( $PET > 41\text{ °C}$ ); daneben ergibt sich für weite Landesteile eine starke Belastung ( $PET\ 35 - 41\text{ °C}$ , ca. 75 % aller Siedlungsflächen). Die Bewertung des Freiraums zeigt für Waldflächen eine relativ geringe Wärmebelastung, im Gegensatz dazu können unbeschattete Freiflächen am Tag stärker thermisch belastet sein.

Für die abschließende zusammenfassende Gesamtbetrachtung der Hitzebelastung in NRW wird die Tag- und Nachtsituation kombiniert bewertet. Dabei zeigt sich, dass in NRW bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen bereits heute auf Flächen im Umfang von etwa 1.300 km<sup>2</sup> die thermische Situation aufgrund von Hitzebelastungen als *ungünstig* oder *sehr ungünstig* einzuschätzen ist. Das entspricht etwa 23 % der gesamten Siedlungsfläche. Durch eine Berücksichtigung der gemeindespezifischen Zahlen zur Bevölkerungsdichte auf diesen Flächen kann daraus abgeleitet werden, dass bei sommerlichen Temperaturen etwa 5,3 Millionen Menschen in Nordrhein-Westfalen von besonders großen Hitzebelastungen betroffen sind (Tabelle 1).

**Tabelle 1:** Thermische Belastung der Bevölkerung in NRW

| Qualitative Bewertung der thermischen Situation                     | Fläche in km <sup>2</sup> | Anteil an der Siedlungsfläche NRWs in % | Anzahl betroffener Einwohner (Werte gerundet) |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| sehr günstig                                                        | 410                       | 7,2                                     | 1.000.000                                     |
| günstig                                                             | 1.534                     | 26,9                                    | 4.100.000                                     |
| weniger günstig                                                     | 2.433                     | 42,6                                    | 7.500.000                                     |
| ungünstig                                                           | 1.278                     | 22,4                                    | 5.000.000                                     |
| sehr ungünstig                                                      | 66                        | 1,2                                     | 300.000                                       |
| <i>Klimawandel-Vorsorgebereich (2050 zusätzlich ungünstig)</i>      | 1.085                     | 19,0                                    | 3.700.000                                     |
| <i>Klimawandel-Vorsorgebereich (2050 zusätzlich sehr ungünstig)</i> | 500                       | 8,7                                     | 2.100.000                                     |

Durch den Klimawandel könnte sich unter der Annahme einer Temperaturerhöhung von 1 °C bis zur Mitte dieses Jahrhunderts die Anzahl der Menschen in NRW, die in Bereichen mit *ungünstigen* oder *sehr ungünstigen* thermischen Bedingungen leben, um weitere rund 3,7 Millionen auf dann 9 Millionen erhöhen. Innerhalb dieser Gruppe würde die Zahl derer, die von den stärksten Belastungen betroffen sind, um etwa 2,1 Millionen auf dann insgesamt rund 2,4 Millionen Menschen ansteigen.

Besonders kritisch ist die thermische Situation in den dicht bebauten Innenstadtbereichen der Großstädte. Tendenziell verbessert sie sich mit zunehmender Entfernung zu den großen urbanen Ballungsgebieten, jedoch sind auch im ländlichen Raum häufig noch *weniger günstige* Wohnbereiche zu finden. *Günstige* oder *sehr günstige* thermische Verhältnisse sind fast ausschließlich auf die dünn besiedelten Landesteile beschränkt.

### **Maßnahmen gegen Hitzebelastung**

Aus den Ergebnissen werden Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation abgeleitet. Den verschiedenen Flächenkategorien sind Planungshinweise zugeordnet, die zum Beispiel Auskunft über die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen geben oder klimatisch begründete Anforderungen formulieren.

Die Verdunstung von Wasser durch Pflanzen verbraucht Wärmeenergie und kann so zur Abkühlung der Luft beitragen. Mögliche Maßnahmen, um übermäßige Wärmebelastungen in Siedlungsbereichen zu vermindern, beinhalten daher häufig eine Erhöhung des Grünanteils. Dazu zählen zum Beispiel Fassaden- und Dachbegrünungen sowie der Erhalt oder die Neuanlage kleiner Parks oder großflächiger Grünanlagen. Auch offene Wasserflächen haben einen positiven Effekt auf überwärmte Siedlungsbereiche. Gleichzeitig bieten sie, ebenso wie Grünflächen, die Möglichkeit zur Naherholung oder einer attraktiven Wohnumfeldgestaltung. Bäume im Straßenraum können die Hitzebelastung auch durch Verschattung verringern und zur Verbesserung der Luftqualität beitragen. Auch städtebauliche Maßnahmen wie die optimierte Ausrichtung von Gebäuden, die Verwendung heller Oberflächenmaterialien oder bauliche Maßnahmen zur Verschattung sind mögliche Ausgleichsmaßnahmen. Darüber hinaus können technische Warnsysteme helfen, auf ein erhöhtes Risiko während sommerlicher Hitzeperioden aufmerksam zu machen.

Damit Ausgleichsräume und Kaltluftleitbahnen zu einer Verbesserung der thermischen Situation beitragen können, muss ein Luftaustausch beziehungsweise ein Transport kühlerer Luft in angrenzende Belastungsräume möglich sein. Kaltluftleitbahnen und kaltluftproduzierende Flächen müssen daher planerisch gesichert oder wiederhergestellt werden, damit sie eine klimaökologische Ausgleichsfunktion für hitzebelastete Siedlungsbereiche erfüllen können. Dies betrifft vor allem den Schutz vor Versiegelung, Bebauung und Luftverschmutzungen. Insbesondere größere Kaltluftleitbahnen oder besonders große Belastungen erfordern zum Teil auch überörtliche Ansätze, die über die kommunale Ebene hinausgehen. Hier ist neben der Stadtplanung auch die Regionalplanung gefordert, klimaökologisch bedeutsame Flächen vor Bebauung und Versiegelung zu schützen.

## 1. Einleitung und Hintergrund

Nordrhein-Westfalen ist mit knapp 18 Millionen Einwohnern das bevölkerungsreichste und am dichtesten besiedelte Bundesland Deutschlands. Über acht Millionen Menschen leben in Städten mit mehr als 100.000 Einwohnern, wobei eine außergewöhnlich hohe Konzentration von dicht besiedelten, urbanen Ballungsräumen an Rhein und Ruhr zu finden ist. Im Gegensatz zu anderen Regionen dieser Erde sind die Städte in NRW historisch dabei nicht mit dem Ziel entstanden, ihre Bewohner möglichst gut vor thermischen Belastungen wie starker Überwärmung zu schützen. Die bestehenden Siedlungsstrukturen sowie die zu erwartenden Folgen des voranschreitenden Klimawandels führen jedoch zu einer stetig zunehmenden Bedeutung thermischer bzw. bioklimatischer Belastungen der Bevölkerung (vgl. Glossar).

Für Nordrhein-Westfalen lagen hierzu bislang jedoch kaum landesweit verfügbare Daten vor. Vor diesem Hintergrund hat das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) die klimaökologische Situation für die gesamte Landesfläche untersucht, um der kommunalen und regionalen Planung und Politik eine einheitliche, räumlich hochauflösende Datenbasis als Entscheidungs- und Abwägungsgrundlage für Maßnahmen und Handlungsoptionen zur Verfügung zu stellen. Zentrale Aufgabe der Klimaanalyse NRW ist die flächendeckende Untersuchung der klimatischen Situation im Land sowie die Identifikation und Bewertung von Belastungs- und Ausgleichsräumen. Die Methodik und die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im vorliegenden Fachbericht beschrieben.

Der Hitzebelastung der Bevölkerung wird hierzulande bislang noch vergleichsweise wenig Beachtung geschenkt. Erst in den letzten Jahren sind u. a. vor dem Hintergrund des anthropogen verursachten Klimawandels die thermische Belastung der Bevölkerung und die damit verbundenen Auswirkungen vermehrt in den Fokus gerückt. Beispiele hierfür sind Klimaanalysen für einzelne Städte, Untersuchungen zu städtischen Wärmeinseln oder Auswertungen von Mortalitätsraten, die während sommerlicher Hitzeperioden deutlich ansteigen.

Wird die Wärmeregulation des menschlichen Körpers durch Hitze verstärkt beansprucht, führt dies dazu, dass die Umgebung als belastend empfunden wird. Neben weiteren Faktoren wie der UV-Strahlung oder Luftschadstoffen ist die thermische Situation daher entscheidend für das Bioklima (vgl. Glossar), also den Einfluss der Atmosphäre auf den menschlichen Organismus (DWD Website Bioklima). Besonders hohe Temperaturen wirken sich negativ auf das Wohlbefinden und die Gesundheit von Menschen aus. Übermäßige Hitzebelastung beeinträchtigt insbesondere sensible Bevölkerungsgruppen und sorgt für eine erhebliche Verminderung der Lebensqualität. Menschen mit Vorerkrankungen oder einer geringeren Fitness, ältere Menschen oder Kleinkinder haben häufig Probleme mit hohen Temperaturen. Mögliche gesundheitliche Folgen sind vielfältig und reichen von Kreislaufproblemen über Kopfschmerzen oder Erschöpfung bis hin zu Herzrhythmusstörungen. Damit verbunden ist häufig eine geringere Leistungsfähigkeit in Schule und Beruf.

Die thermische Belastung (Hitze, aber auch Kälte) ist dabei im Wesentlichen geprägt durch meteorologische Größen wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Sonnenstrahlung. Diese Parameter werden wiederum auch von unserer Umgebung beeinflusst. Vor allem in dicht bebauten innerstädtischen Siedlungsräumen großer Städte und in Ballungsräumen können sich bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen so genannte „Wärmeinseln“ bilden. Durch einen verringerten Luftaustausch (vgl. Glossar), Wärmespeicherung von Gebäuden und Straßen sowie die Freisetzung von Wärme durch Industrie und Verkehr können hier Temperaturunterschiede zum Umland von bis zu 10 °C auftreten. Gerade im dicht besiedelten Bundesland Nordrhein-Westfalen ist es daher wichtig, einer übermäßigen thermischen Belastung der Bevölkerung entgegen zu wirken. Der Belastungssituation in den Nachtstunden kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Einerseits ist der städtische Wärmeinseleffekt in der Nacht am stärksten ausgeprägt, vor allem bei nur geringer Bewölkung und Windstille. Andererseits wirken sich ungünstige klimatische Bedingungen besonders negativ auf den Schlaf und die nächtliche Erholung aus. Auch sind Menschen in der Nacht an ihren Wohnstandort gebunden und können kaum in thermisch günstigere Bereiche ausweichen.

Die Klimaanalyse NRW hat neben der umfassenden modell-gestützten Bestandsaufnahme der klimatischen Situation im Land zum Ziel, die unterschiedlichen Teilflächen des Bundeslandes nach ihren klimatischen Funktionszusammenhängen, d. h. ihrer Wirkungen auf benachbarte und anders strukturierte Räume, abzugrenzen und die klimaökologisch wichtigen Raumstrukturen und Funktionen herauszuarbeiten. Im Vordergrund der Untersuchung stehen austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen (vgl. Glossar), die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung (vgl. Glossar) in den Siedlungsräumen sowie lufthygienischen Belastungen einhergehen. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen (vgl. Glossar) aus dem Umland und siedlungsnahen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen. Wiesen, Parkareale, Kleingärten und Friedhofsanlagen, Ackerflächen oder auch Waldflächen kühlen sich in der Nacht zum Teil deutlich stärker ab als bebaute Bereiche, insbesondere über diesen Flächen des Freiraums bilden sich nachts Schichten kühlerer Luft. Sofern die Bebauung und die Geländestrukturen es ermöglichen, kann diese Kaltluft bestehende Wärmebelastungen in den Siedlungsbereichen verringern.

Im Fokus der Klimaanalyse NRW steht die Hitzebelastung der Bevölkerung und somit ein anthropozentrischer Blick auf das Schutzgut Klima. Zentrale Leitgedanken sind die Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung klimaökologisch bedeutsamer Oberflächenstrukturen. Die vorliegende Studie konzentriert sich dabei auf die Aspekte der thermischen Belastung (im Siedlungsraum) und Kaltluftversorgung (als Ausgleichsfunktion des Freiraums). Dabei werden landesweite Klimaanalysekarten für die Nachtsituation (4 Uhr morgens), die Tagsituation (15 Uhr) und für eine beide Zeitpunkte zusammenfassende Gesamtbetrachtung erstellt. Das für die bioklimatische Belastung der Bevölkerung ebenfalls bedeutsame Thema der Luftreinhaltung und Frischluftzufuhr wird an dieser Stelle nicht thematisiert.

Das im Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) definierte Schutzgut Klima/Luft stellt einen wichtigen Belang im Rahmen der Abwägungsprozesse der räumlichen

Planung auf den verschiedenen Planungsebenen dar. Eine Ergänzung findet dieses auch durch die Schutzgüter Boden und Fläche. Der Schutz und Erhalt vorhandener klimaökologischer Funktionen sowie ggf. die Sanierung bestehender Belastungen sind somit sowohl auf Ebene der Raumordnung (Landes- und Regionalplanung) als auch im Zuge der Bauleitplanung (Flächennutzungsplanung, Bebauungsplanung) zu berücksichtigen. Wichtige Aspekte sind in diesem Zusammenhang gleichermaßen klimaökologisch relevante Prozesse wie auch landschaftsökologische Standortfunktionen. Die sachgerechte Berücksichtigung klimaökologischer Fragestellungen im Rahmen der Abwägung zwischen den im Raum konkurrierenden Nutzungsansprüchen und Belangen ist – auch vor dem Hintergrund der erforderlichen Anpassung an die Folgen des anthropogenen Klimawandels – unter der Prämisse der u. a. in § 1 Abs. 2 ROG sowie § 1 Abs. 5 BauGB verankerten nachhaltigen Raumentwicklung als dringend erforderlich anzusehen.

Als Grundlage einer sachgerechten Berücksichtigung klimatischer Belange auf den verschiedenen Planungsebenen ist vor dem Hintergrund der widerstreitenden Nutzungsansprüche und der stetig zunehmenden rechtlichen Anforderungen an planerische Zielformulierungen und Darstellungen eine möglichst detaillierte Kenntnis der innerhalb des jeweiligen Planungsraumes ablaufenden klimatischen Prozesse sowie der vorhandenen Belastungs- und Ausgleichsräume unabdingbar. Das Vorliegen flächenbezogener klimatischer Fachinformationen stellt damit die zentrale Grundlage für eine fach- und sachgerechte Beurteilung des Schutzgutes Klima/Luft im Zuge von Planungsverfahren dar. So lassen sich beispielsweise erst aus der wissenschaftlich gesicherten Kenntnis des in den verschiedenen Teilen eines Planungsraumes vorherrschenden (Lokal-)Klimas und der klimatischen Funktionszusammenhänge durchsetzungskräftige Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zu Erhalt und Verbesserung von Klima und Luft ableiten.

Gleichwohl fehlen derartige flächendeckende Aussagen über den Status-Quo klimatischer Funktionen und Prozesse gerade auf der überörtlichen Maßstabsebene bisher weitgehend, sodass eine angemessene Gewichtung und Berücksichtigung im Zuge der einzelnen planungsbezogenen Abwägungsprozesse häufig nicht möglich ist. Im Anschluss erfolgt zumeist lediglich eine kursorische, wenig konkrete Betrachtung. Dieser Missstand ist u. a. auf das Fehlen einer klimatischen Fachplanung (im Unterschied zu anderen raumrelevanten Belangen) im deutschen Planungssystem zurückzuführen.

Ein wichtiges Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es daher auch, erstmalig eine überörtliche und überregionale, landesweit einheitliche Datengrundlage zur Bewertung klimaökologischer Fragestellungen im Rahmen von Planungsprozessen zu erarbeiten. Sämtliche Ergebnisse und Karten der Klimaanalyse werden daher auch im Fachinformationssystem Klimaanpassung zur Verfügung gestellt ([www.klimaanpassung.nrw.de](http://www.klimaanpassung.nrw.de)).

Im vorliegenden Fachbericht werden zunächst die verwendete Datenbasis (Kapitel 2) und anschließend wesentliche klimatische Zusammenhänge und Grundlage erläutert (Kapitel 3), bevor in Kapitel 4 die Methodik der Klimaanalyse NRW beschrieben wird. Nachdem in Kapitel 5 und Kapitel 6 die Ergebnisse der Klimatopausweisung und der Klimamodellsimulation dargestellt werden, werden die zentralen Ergebnisse der

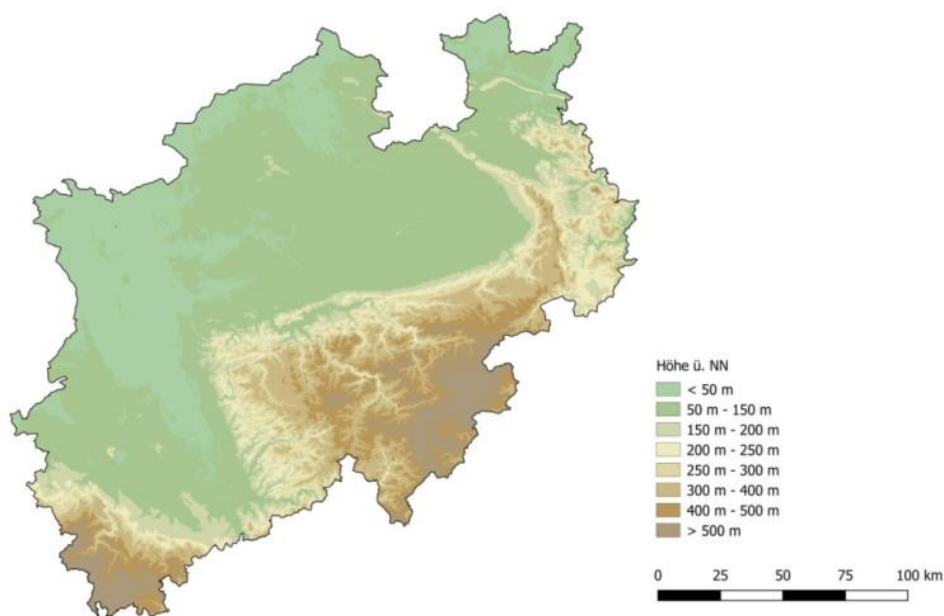
Klimaanalyse präsentiert (Kapitel 7). Abschließend werden in Kapitel 8 die Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse und konkrete Maßnahmen insbesondere für die Stadt- und Regionalplanung diskutiert.

## 2. Datengrundlagen

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf das (Mikro-)Klima sind die vorherrschende Flächennutzung und die Topographie. Die Oberflächengestalt, die Höhe der jeweiligen Nutzungsstrukturen sowie deren Versiegelungsgrad beeinflussen das Strömungs- und Temperaturfeld entscheidend. Diese Elemente finden als Eingangsdaten sowohl für die GIS-basierte automatische Ableitung der Klimatopkarte (vgl. Kapitel 4.1) als auch für die Klimamodellsimulationen (Kapitel 4.2) Verwendung, die die Grundlage für die landesweiten Klimaanalysekarten (Nachtsituation, Tagsituation, Gesamtbetrachtung; vgl. Kapitel 4.3) darstellen. Für die Modellsimulationen sind darüber hinaus die meteorologischen Ausgangsbedingungen relevant (Kapitel 3.2.3). Die genannten Aspekte werden in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert.

### 2.1 Topographie

Das Bundesland Nordrhein-Westfalen weist aufgrund seiner heterogenen landschaftlichen Gliederung ein komplexes Relief auf (Abbildung 1). Die für die Klimaanalyse notwendigen orographischen (reliefbezogenen) Eingangsparameter werden auf Grundlage eines digitalen Geländehöhenmodells des Landes mit einer Auflösung von 1 m abgeleitet (DGM1, Goebasis.NRW). Für das außerhalb des Landesgebietes liegende Umland wird das Geländemodell durch SRTM<sup>1</sup>-Höhendaten ergänzt (USGS 2004). Darauf basierend wird das für die Modellrechnung erforderliche zusammenhängende Raster mit einer Auflösung von 100 m erzeugt.



**Abbildung 1: Geländehöhe im Bundesland NRW (Datengrundlage: Geobasis NRW)**

<sup>1</sup> Shuttle Radar Topography Mission der NASA aus dem Jahr 2000.

Nordrhein-Westfalen geht im Norden in die norddeutsche Tiefebene über und hat im Süden und Osten Anteile an Mittelgebirgsregionen. Die Landesfläche wird etwa zur Hälfte von der westfälischen Bucht und dem niederrheinischen Tiefland eingenommen. Der tiefste natürliche Punkt liegt nur wenige Meter über Normalhöhennull (NHN), wobei in den Tagebaugebieten im rheinischen Braunkohlerevier gleichwohl Tiefen von bis zu ca. 270 m unterhalb NHN erreicht werden. Im Süden und im Osten bilden Eifel, Bergisches Land, Sauerland, Rothaargebirge und Weserbergland die Höhenlagen. Im Grenzbereich zu Hessen werden Höhen von über 800 m über NHN erreicht.

## **2.2 Nutzungsstruktur**

Die möglichst exakte Abbildung der Nutzungsstruktur ist für die Klimamodellierung von zentraler Bedeutung: Nutzungsbedingte Veränderung des örtlichen Windfeldes und des Wärmehaushaltes sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Ausbildung eines gegenüber dem Umland veränderten Stadtklimas (vgl. Kapitel 3.1).

Zahlreiche der vielen stadtklimatologisch relevanten Parameter lassen sich daher über die Strukturhöhe, die Bebauungsdichte und den Grad der Oberflächenversiegelung einer Fläche abschätzen. Die Ausprägung dieser Einflussgrößen ist nutzungsabhängig und nimmt bei gleichen Nutzungstypen ähnliche Werte an. Somit ermöglicht die Analyse der Nutzungen im Untersuchungsgebiet eine Abgrenzung von Gebieten ähnlicher stadtstruktureller Ausstattung und der damit einhergehenden stadtklimatischen Charakteristika (vgl. Kapitel 4.1). Zur Aufbereitung der Nutzungsstrukturen kann im Rahmen der Klimaanalyse auf verschiedene Daten zurückgegriffen werden, wobei die wesentliche Grundlageninformation das ATKIS-Basis-DLM darstellt. In den Freilandbereichen wird diese um die Informationen aus der landesweiten Biotoptypenkartierung ergänzt. Da die Flächendaten aus dem Basis-DLM des ATKIS keine Aussage zu den weiteren klimatisch relevanten Einflussfaktoren Bebauungsdichte und Versiegelungsgrad treffen, wird diese mit dem Gebäudebestand und dem Versiegelungsgrad verschnitten. Die Gebäudedaten entstammen dem „3D-Gebäudemodell (LoD1)“ für Nordrhein-Westfalen (Geobasis NRW). Die verwendete Detaillierungsstufe LoD1 (Level of Detail 1) ist auch als Klötzchen- oder Blockmodell bekannt: Die Gebäude werden ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Dachform durch einfache Grundrissblöcke mit mittlerer Gebäudehöhe repräsentiert. Der Datensatz beinhaltet circa neun Millionen Gebäudepolygone. Eine Übersicht über die genutzten Daten und ihre Anwendung gibt Tabelle 2.

**Tabelle 2:** Eingangsdaten Flächennutzung

| Name                                                                                      | Verwendung                                                        | Quelle              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>ATKIS-Basis-DLM</b>                                                                    | Basisdatensatz (Geometrie, Nutzung)                               | Geobasis NRW (2016) |
| <b>Biotoptypenkartierung</b>                                                              | Verfeinerung der Nutzungsinformation in den Grün- und Freiflächen | LANUV (2016)        |
| <b>3D-Gebäudemodell (LoD 1)</b>                                                           | Modifikation Bebauungsdichte                                      | Geobasis NRW (2016) |
| <b>Versiegelungsgrad (FTSP degree of soil sealing)</b>                                    | Modifikation Gesamtversiegelung                                   | EEA (2012)          |
| <b>Modelleingangsdaten der Klimasimulation RVR (Grundlage: Flächennutzungskartierung)</b> | Verfeinerung der Nutzungsinformation für das Gebiet des RVR       | RVR (2012)          |
| <b>CORINE</b>                                                                             | Landnutzung außerhalb der Landesfläche                            | EEA (2003)          |

Für die Zuordnung der FITNAH-Nutzungskategorien (vgl. Tabelle 3) wird der Anteil an überbauter Fläche je ATKIS-Objekt berechnet. Der Gesamtversiegelungsgrad  $VS_{Ges}$  (ebenerdige Versiegelung + Bebauung  $VS_{Bau}$ ) wird auf Grundlage des frei verfügbaren Rasterdatensatzes „EEA Fast Track Service Precursor on Land Monitoring – Degree of soil sealing“ der europäischen Umweltagentur (engl. European Environment Agency (EEA)) in 20 m-Auflösung abgeleitet (EEA 2012). Je Rasterzelle wird darin der Grad der Gesamtversiegelung in Prozent ausgewiesen. Für die Einstufung in die Nutzungskategorien wird der mittlere Versiegelungsgrad innerhalb der ATKIS-Objekte ermittelt.

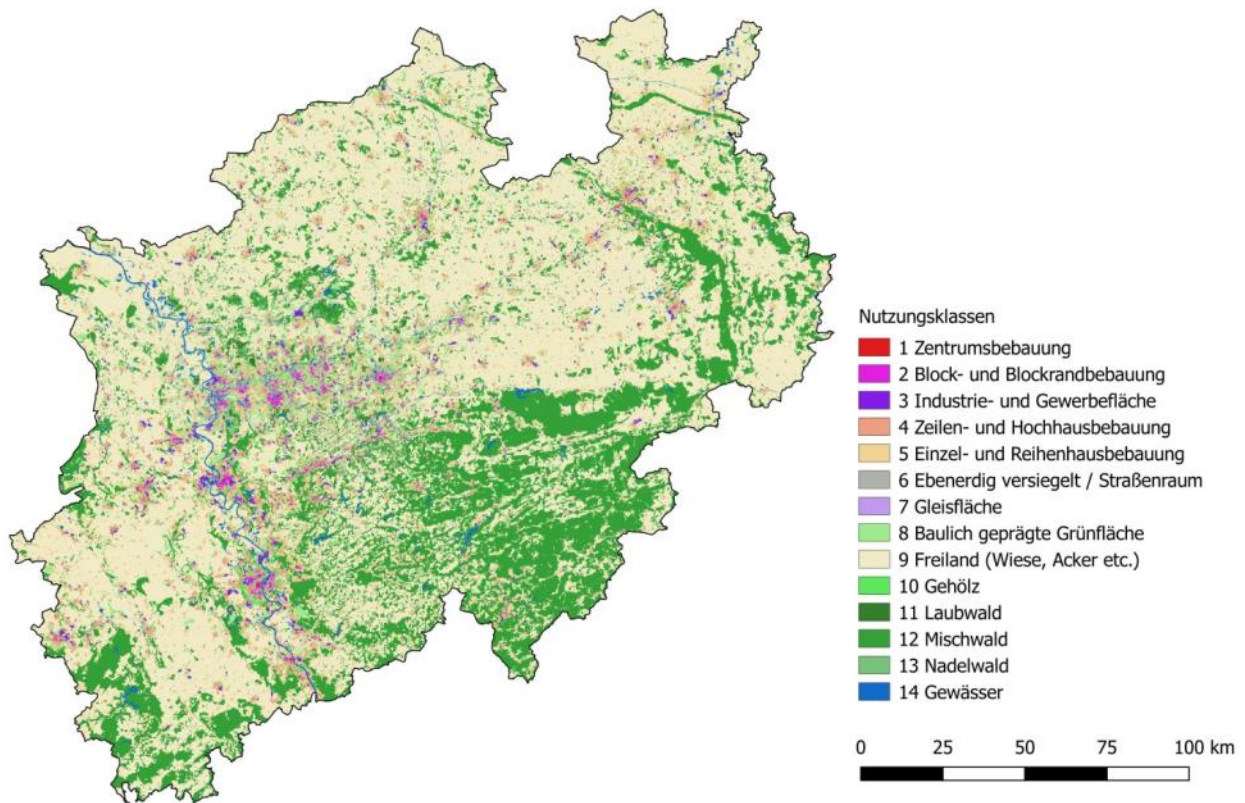
**Tabelle 3:** Nutzungskategorien der Klimamodellierung

| 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                      |

| Klasse | Flächentyp                     | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Mittlerer Versiegelungsgrad (%) | Mittlere Strukturhöhe (m) |
|--------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 3      | Industrie- und Gewerbefläche   | 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 als 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 meist 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     | Wald                           | Waldflächen sowie waldartige Bestände im Siedlungsbereich.                                                                                                                                                                                                                                                                             | 5                               | 12,5                      |
| 12     | Wasserfläche                   | Still- und Fließgewässer.                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0                               | 0                         |

Darüber hinaus werden für das Gebiet des Regionalverbands Ruhr (RVR) die Modelleingangsdaten der Klimasimulation mit dem Modell FITNAH herangezogen (GEONET 2013). Basierend auf der Flächennutzungskartierung ist die daraus abgeleitete Nutzungsklassifizierung in einem 50 m Raster gut geeignet, die Flächeninformationen des Basis-DLM zu ergänzen.

Für die Areale außerhalb des Landes, für die keine detaillierten Nutzungsdaten vorliegen, werden Corine-Landnutzungsinformationen zur Vervollständigung der Geodatenbasis verwendet (EEA 2003). Auf dieser Grundlage werden 14 Nutzungsklassen definiert, die eine unter klimatisch-lufthygienischen Gesichtspunkten sinnvolle Differenzierung der Oberflächenstruktur erlauben (vgl. Tabelle 3 und Abbildung 2). Da auf Maßstabsebene einer mesoskaligen Klimamodellierung keine Einzelgebäude aufgelöst werden, kommen für die Einordnung der Strukturhöhe nutzungsklassifizierte vorliegende Literaturdaten (u. a. MOSIMANN et al. 1999) zum Einsatz, die auf empirisch gewonnenen Untersuchungsergebnissen aus mehreren deutschen Städten beruhen.



**Abbildung 2:** Nutzungsstruktur im Bundesland NRW (Datengrundlage: Geobasis NRW)

Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen liegt somit eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung vor. Die Modellrechnungen verwenden rasterhafte Repräsentationen von Eingangsvariablen. Für die Bereitstellung der Modelleingangsdaten muss die Flächengeometrie daher auf Rasterzellen jeweils einheitlicher Nutzungsstruktur – hier mit einer Maschenweite von 100 m – übertragen werden (vgl. Kapitel 4.2).

### **3. Grundlageninformationen**

Bevor in Kapitel 4 die Methodik der Klimaanalyse NRW detailliert beschrieben wird, werden in diesem Kapitel zunächst wesentliche Grundlagen des klimatischen Prozessgeschehens näher erläutert. Dabei werden die Wirkung der Nutzungsstrukturen und ihren Eigenschaften auf das Mikroklima bzw. die Entstehung von städtischen Wärmeinseln beleuchtet und die Entstehung von Flurwinden und Kaltluftströmungen beschrieben (Kapitel 3.1). Anschließend werden in Kapitel 3.2 die technischen Grundlagen des verwendeten Klimamodells FITNAH dargestellt sowie die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels in NRW aufgezeigt (Kapitel 3.3).

#### **3.1 Mikroklima**

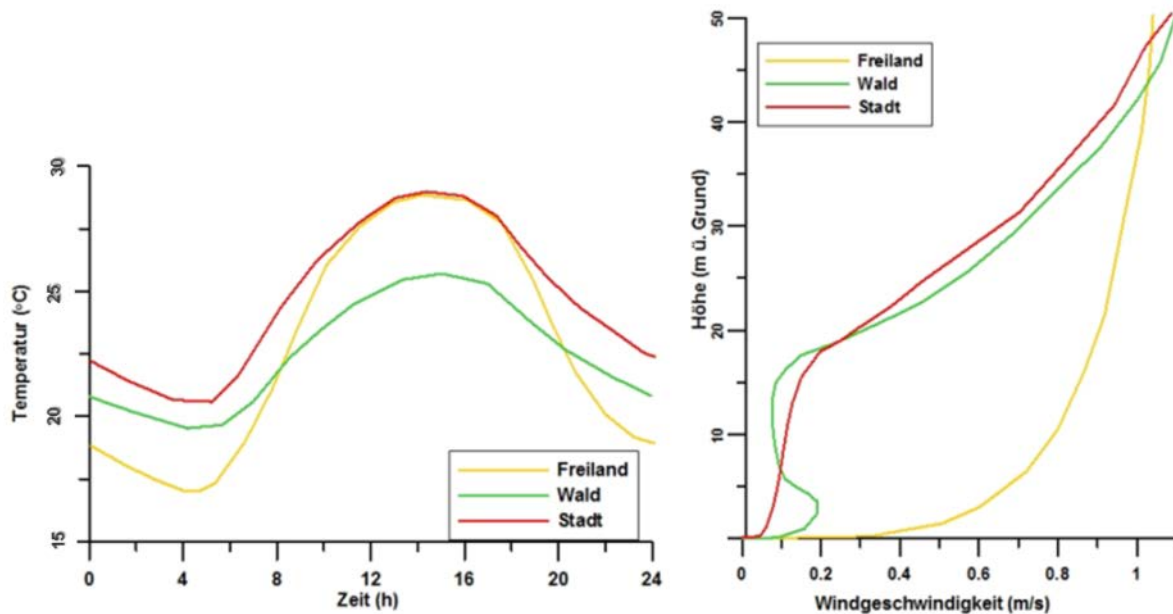
Das Mikroklima beschreibt die klimatischen Verhältnisse in einem räumlich begrenzten Umfeld (typischerweise bezeichnet die Mikroskala dabei den Bereich von unter 2 km horizontaler Ausdehnung und der bodennahen Schicht im vertikalen Bereich). Wesentliches Einflusskriterium auf das Mikroklima ist die Oberflächenbeschaffenheit (z. B. Bewuchs und Bebauung). Die Wirkungen von unterschiedlichen Flächennutzungen auf die Lufttemperatur sowie die Windverhältnisse werden in den nachfolgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

##### **3.1.1 Lufttemperatur**

Im Allgemeinen ist der Tagesgang der Lufttemperatur direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher in der Regel ein Maximum am Nachmittag sowie einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Die Temperatur erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ihren Tiefpunkt. Das Ausmaß der Abkühlung kann dabei – je nach den meteorologischen Verhältnissen, der Lage des Standorts und den landnutzungsabhängigen, physikalischen Boden- und Oberflächeneigenschaften – große Unterschiede aufweisen, sodass sich bereits auf kleinem Raum ein differenziertes Temperaturfeld mit großen Temperaturabweichungen einstellen kann. Die Eigenschaften unterschiedlicher Nutzungsstrukturen, wie der Anteil an Grün- und Freiflächen, der Versiegelungs- und Bebauungsgrad, die Strukturhöhe (der Bebauung oder der Vegetationselemente) oder die Eigenschaften der (Bau-)Materialien wirken sich auf die thermische Ausprägung und Eigenschaften der Flächen aus.

Betrachtet man nun den Tagesgang der Lufttemperatur für verschiedene Flächennutzungsstrukturen während einer autochthonen Wetterlage, so zeigen sich für die Maximaltemperaturen nachmittags nur geringe Unterschiede. Die Minimumtemperaturen treten zwar auch in allen Nutzungsstrukturen zu einem vergleichbaren Zeitpunkt auf, zeigen jedoch eine große Spanne (Abbildung 3). Die geringsten Temperaturen werden über niedrig bewachsenen Grünflächen (z. B. Wiesen) gemessen. Da nachts nur ein geringer Bodenwärmestrom und bei wolkenlosem Himmel keine Gegenstrahlung auftreten, findet hier eine starke Abkühlung statt. Doch auch die Luftvolumina über Grünflächen und Freiland

weisen untereinander keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate von natürlichen Oberflächen wird insbesondere von ihren thermischen Bodeneigenschaften (u. a. ihrer Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie von eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen (Bewuchs, Laubstreu usw.) bestimmt. Das Relief (Exposition, Geländeneigung) und die Lage im Mosaik der Nutzungen und ihrer dynamischen Luftaustauschprozesse üben einen weiteren Einfluss aus.



**Abbildung 3:** Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen/Klimatotypen

Eine Sonderstellung innerhalb des Freiraums nehmen zudem Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im Wald beruht zu einem großen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Größere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, durch die sauerstoffreiche, staubfreie und wenig belastete Luft bereitgestellt wird. Stadtnahe Wälder können daher in begrenztem Maße auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen, da tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ niedrige Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit im Stammraum vorherrschen. Nachts treten hingegen im Vergleich zu nicht mit Gehölz bestandenen Grünflächen, eher milde Temperaturen auf und die Kaltluftproduktion ist eher gering.

Bei Wasserflächen sorgt die hohe spezifische Wärmekapazität des Wassers, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge für eine deutlich verringerte Tagestemperaturamplitude, insbesondere über größeren Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung sind, wirken größere Gewässer auf bebaute Flächen tagsüber klimatisch ausgleichend, während sie nachts die Abkühlung eher verringern.

Siedlungsflächen weisen für die untersuchte Situation die geringste nächtliche Abkühlung auf. Daher spricht man auch von der Ausbildung einer „städtischen Wärmeinsel“ im Vergleich zum Umland. Das Ausmaß der Überwärmung hängt dabei von der Siedlungsgröße (auch Bevölkerungszahl) und der Bebauungsdichte ab. Doch auch im Siedlungsgebiet ist die Überwärmung unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Ursachen der städtischen Überwärmung lassen sich in erster Linie auf folgende Faktoren zurückführen:

- die erhöhte Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der versiegelten Böden und Oberflächen,
- die durch die Geometrie der städtischen Baukörper vergrößerte strahlungsabsorbierende Oberfläche,
- die herabgesetzte Verdunstung durch den hohen Versiegelungsgrad und die direkte Einleitung des Niederschlagswassers in die Kanalisation oder den Vorfluter,
- die über die vermehrte Emission von Gasen und Aerosolen zugunsten eines langwelligen Strahlungsgewinns veränderte Strahlungsbilanz (lokaler Treibhauseffekt),
- die Wirkung der Stadt als Strömungshindernis mit hoher aerodynamischen Rauigkeit (vgl. Glossar) und die damit verbundene Behinderung der Durchlüftung und des Luftaustausches mit dem Umland sowie
- die erhöhte anthropogen bedingte Wärmeproduktion, z. B. durch Verkehr oder Industrie.

Auf Basis der unterschiedlichen Eigenschaften und thermischen Auswirkungen der Flächennutzungsstrukturen können klimatische Bereiche mit einheitlichen Gegebenheiten abgeleitet werden. Diese werden als Klimatope bezeichnet und in Kapitel 4.1 näher beschreiben.

### **3.1.2 Thermischer Index – Physiologische Äquivalente Temperatur (PET)**

Die Temperatur ist allerdings nicht der einzige Einflussfaktor für das thermische Empfinden des Menschen. Die meteorologischen Größen Luftfeuchte, Wind (vgl. Kapitel 3.1.3) und insbesondere die Strahlungsexposition spielen eine entscheidende Rolle für das thermische Wohlbefinden und bilden zusammen den thermischen Wirkungskomplex ab. Darüber hinaus hat die Aktivität des Menschen selbst Einfluss auf das thermische Empfinden. Zur Bewertung des thermischen Empfindens des Menschen in einer Zusammenschau aller Einflussparameter werden Indizes (Kenngrößen) verwendet, die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren und zusätzlich den Wärmehaushalt bzw. das Aktivitätslevel des Menschen (inkl. Annahmen zu Alter und Geschlecht) mitberücksichtigen.

In der Klimaanalyse NRW wird für die Beschreibung und Bewertung der Tagsituation der Index PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur; englisch: Pysiological Equivalent Temperature) verwendet. Die PET ist als Äquivalenttemperatur bezogen auf eine Referenzumgebung definiert. Die Referenzumgebung wird durch Innenraumbedingungen beschrieben, wobei die Strahlungstemperatur (vgl. Glossar) der Lufttemperatur entspricht,

keine Windströmung auftritt (max. 0,1 m/s) und die Luftfeuchte (beschrieben durch den Dampfdruck vgl. Glossar) mit 12 hPa definiert wird. Darüber hinaus wird als Referenz angenommen, dass der Wärmehaushalt des Menschen inklusive der Körperkern- und Hauttemperatur (bei geringer körperlicher Tätigkeit, z. B. Büroarbeit) entsprechend der angenommenen Umgebungsbedingungen gleich ist (vgl. HÖPPE 1999 und HÖPPE, MAYER 1987). Dadurch kann man die PET in etwa so lesen und interpretieren: Um die empfundene thermischen Bedingungen von 39 °C PET, die beispielsweise auf einem asphaltierten, unbeschatteten Platz in der Innenstadt bei nur geringer Luftströmung aufgetreten sind, in einem Innenraum (unbelüftet, nicht direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt, entsprechend Referenzbedingungen) nachzustellen, müsste man ihn auf 39 °C Lufttemperatur aufheizen.

Wie auch die übrigen human-biometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (KUTTLER 1999). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der bekannten Einheit „°C“ auch von Laien besser nachvollzogen werden zu können, allerdings besteht auch immer die Gefahr einer Gleichsetzung mit der Lufttemperatur. Dennoch wird die PET in der Fachwelt als einer der Standard-Indizes zur Beschreibung der thermischen Behaglichkeit verwendet. So sind die vorliegenden Ergebnisse auch mit denen anderer aktueller Studien vergleichbar.

Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifiziert (Tabelle 4, VDI 2004). Diese Bewertungsskala wird in der vorliegenden Studie für die Bewertung der Modellergebnisse und der Klimaanalyse in der Tagsituation herangezogen.

**Tabelle 4:** Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach MATZARAKIS UND MAYER 1996)

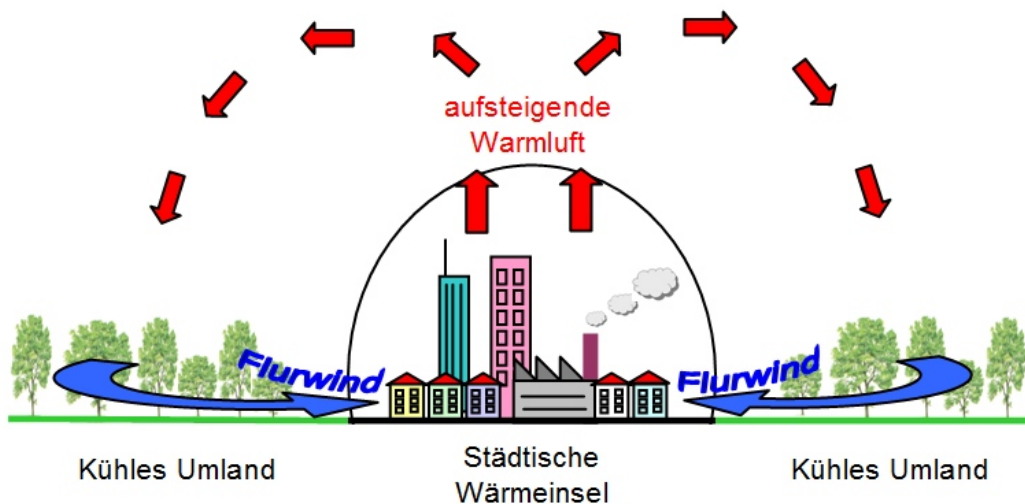
| PET  | Thermisches Empfinden | Physiologische Belastungsstufe |
|------|-----------------------|--------------------------------|
| 4°C  | sehr kalt             | extreme Kältebelastung         |
| 8°C  | kalt                  | starke Kältebelastung          |
| 13°C | kühl                  | mäßige Kältebelastung          |
| 18°C | leicht kühl           | schwache Kältebelastung        |
| 23°C | behaglich             | keine Wärmebelastung           |
| 29°C | leicht warm           | schwache Wärmebelastung        |
| 35°C | warm                  | mäßige Wärmebelastung          |
| 41°C | heiß                  | starke Wärmebelastung          |
|      | sehr heiß             | extreme Wärmebelastung         |

### 3.1.3 Wind

Die differenzierte bodennahe Lufttemperaturverteilung bedingt horizontale und vertikale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale, thermisch angetriebene Windsysteme sind. Die wichtigsten nächtlichen Luftströmungen dieser Art sind zum einen gravitationsbedingte Berg- und Hangabwinde, zum anderen Flurwinde, die als direkte Ausgleichsströmungen vom hohen zum tiefen Luftdruck aufzufassen sind.

Ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen Oberflächen hangabwärts gerichtete Strömungen ein, da die hangnahe Luft durch nächtliche Ausstrahlung stärker abkühlt als die freie Luft in gleicher Höhe. Aufgrund ihrer höheren Dichte fließt die kühlere Bodenluft 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). Hangabwinde erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa 3 m/s, ihre Mächtigkeit liegt zumeist unterhalb von 10 m (HERGERT 1991).

Neben diesen durch das Relief beeinflussten Strömungen bilden sich in ebenen Lagen unter günstigen Bedingungen sogenannte Flurwinde (Abbildung 4) aus. Sie sind radial auf einen überwärmten Raum ausgerichtet und an hindernisarme Leitbahnen gebunden. 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 aufbaut. Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (KIESE et al. 1992). Die Flurwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungsphänomene, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Ihre Geschwindigkeit liegt meist deutlich unterhalb von 2 m/s.

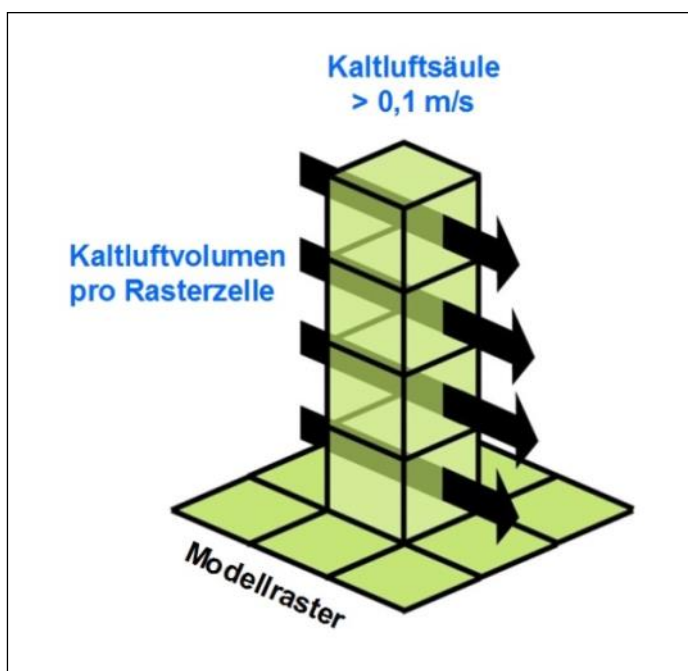


**Abbildung 4:** Prinzipskizze Flurwind

Den lokalen thermischen Windsystemen kommt eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen größerer Siedlungsräume zu. Da die potenzielle

Ausgleichsleistung einer Fläche des Freiraums nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit (d. h. durch die Höhe der Kaltluftschicht) mitbestimmt wird, wird zur Bewertung des Freiraums ein weiterer Klimaparameter herangezogen: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom.

Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe/Mächtigkeit) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit  $\text{m}^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. Da die Modellergebnisse der Klimaanalyse NRW nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der einheitlichen Rasterweite (hier 100 m), ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstromdichte aufzufassen. Diesen Wert kann man sich leicht veranschaulichen, indem man sich ein 100 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht bis hinab auf die Erdoberfläche reicht (Abbildung 5). Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man die rasterbasierte Volumenstromdichte.



**Abbildung 5:** Prinzipskizze rasterbasierte Kaltluftvolumenstromdichte

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab.

Gebäude, Mauern oder Straßendämme wirken als Strömungshindernisse und können luvseitig markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Leebereich zu einer bodennahen Geschwindigkeitsreduktion, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann. Diese kleinräumigen, linienhaften Strukturen werden im Modell aufgrund der verwendeten Auflösung von 100 m x 100 m jedoch lediglich durch Beeinflussung der rasterzellen-spezifischen Porosität und damit indirekt erfasst. Die tatsächliche Eindringtiefe von Kaltluft (vgl. Glossar) in bebautes Gebiet hängt insgesamt wesentlich von der Siedlungsgröße, der Bebauungsdichte, der anthropogenen Wärmefreisetzung sowie der Menge der einströmenden Kaltluft ab.

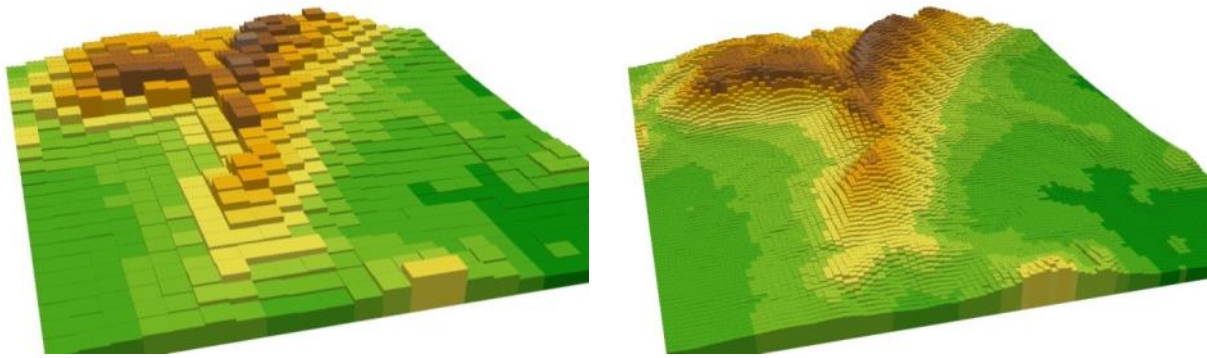
## **3.2 Klimamodell FITNAH**

Die vorliegende Klimaanalyse verwendet das mesoskalige Klimamodell FITNAH, mit dessen Hilfe die relevanten meteorologischen Variablen numerisch berechnet und in einem entsprechend zu definierenden Raster repräsentativ dargestellt werden. Die Grundlagen dieses Modells sowie eine detaillierte Beschreibung von FITNAH ist der entsprechenden Fachliteratur zu entnehmen (GROß 1993). Nachfolgend werden lediglich die wichtigsten Rahmenbedingungen erläutert. Die Aufbereitung der Modelleingangsdaten ist Kapitel 4.2 zu entnehmen.

### **3.2.1 Grundgleichungen des mesoskaligen Modells FITNAH**

Für jede meteorologische Variable des Klimamodells ist eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Alle mesoskaligen Modelle und damit auch FITNAH basieren daher, wie Wettervorhersage- und Klimamodelle auch, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (Navier-Stokes Bewegungsgleichung), der Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik).

Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom mesoskaligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst (vgl. Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Unterschiedliche Rasterweiten bei einem digitalen Geländehöhenmodell (links: 500 m x 500 m; rechts: 100 m x 100 m)

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an die Rechenzeit und an die benötigten Eingangsdaten. Hier ist ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit erforderlich. In der Klimaanalyse NRW beträgt die für die Modellierung mit FITNAH verwendete räumliche Maschenweite 100 m x 100 m.

Die vertikale Gitterweite ist indes nicht äquidistant, d. h. die jeweilige vertikale Ausdehnung von sich überlagernden Rasterzellen ist variabel. So sind hier die Rechenflächen in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Parameter möglichst realitätsnah zu erfassen. Die untersten Rechenflächen liegen in Höhen von 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80 und 100 m über Grund. Nach oben hin wird der Abstand zunehmend größer, wobei die Modellobergrenze in einer Höhe von 3000 m über Grund liegt. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich unter der gegebenen Fragestellung auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m über Grund als Aufenthaltsbereich des Menschen).

### 3.2.2 Parametrisierungen der Eingangsvariablen

Das mesoskalige Modell FITNAH berechnet alle meteorologischen Variablen als repräsentative Werte für das entsprechende Raster. Mit der Rasterweite wird somit auch die Dimension der räumlich noch auflösbaren Strukturen festgelegt. Typische Rasterweiten sind 25 m x 25 m bis 1.000 m x 1.000 m. Sie decken damit in etwa den Maßstabsbereich von 1:20.000 bis 1:100.000 ab und entsprechen somit den Planungsebenen der Flächennutzungsplanung bzw. der Regionalplanung. Sind vorhandene Strukturen von ihrer räumlichen Ausprägung her kleiner als die Rasterweite, ist das Modell nicht in der Lage diese zu berechnen (beispielsweise können einzelne Wolken in globalen Klimamodellen nicht berechnet werden). Ist nun aber bekannt, dass solche vom Modell nicht erfassbaren Strukturen relevante Auswirkungen auf die lokalklimatischen Größen haben, die berechnet werden sollen, so müssen derartige Strukturen gleichwohl in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit ist dabei die Darstellung der summarischen Effekte der nicht aufgelösten Strukturen durch die vom Modell berechneten Variablen (Parametrisierung).

Die beiden wichtigsten derart fein aufgelösten Strukturen, welche bei stadtklimatischen Fragestellungen berücksichtigt werden müssen, sind einzelne Gebäude und der Baumbestand. Diese sind in ihrer räumlichen Ausdehnung so klein, dass sie üblicherweise – und insbesondere bei einer landesweiten Untersuchung – durch das gewählte Rechengitter nicht erfasst werden können und somit parametrisiert werden müssen. In bebauten Bereichen wirken einzelne Gebäude als Strömungshindernis und verzögern diese. Lokal kann es zwar durch Düseneffekte auch zu einer Beschleunigung des Windes kommen, in der summarischen Betrachtung über eine Gebäudebeinhaltende Rasterzelle überwiegt indes die Verlangsamung der Strömung. Gleichzeitig wird durch die Vielzahl der unterschiedlichen Strömungshindernisse die Turbulenz verstärkt. Darüber hinaus wird auch die Temperaturverteilung in starkem Maße modifiziert, da die in die bodennahe Atmosphäre ragenden Baukörper bis zur mittleren Bauhöhe in einem Wärmeaustausch mit der Umgebung stehen. Die Temperatur wird durch die gebäudespezifischen Parameter wie Gebäudehöhe, Überbauungsgrad oder anthropogen Abwärme bestimmt und damit das Temperaturfeld der bodennahen Atmosphäre bis in die mittlere Höhe der Bebauung modifiziert (Grundlagen und Beschreibung: GROß 1989).

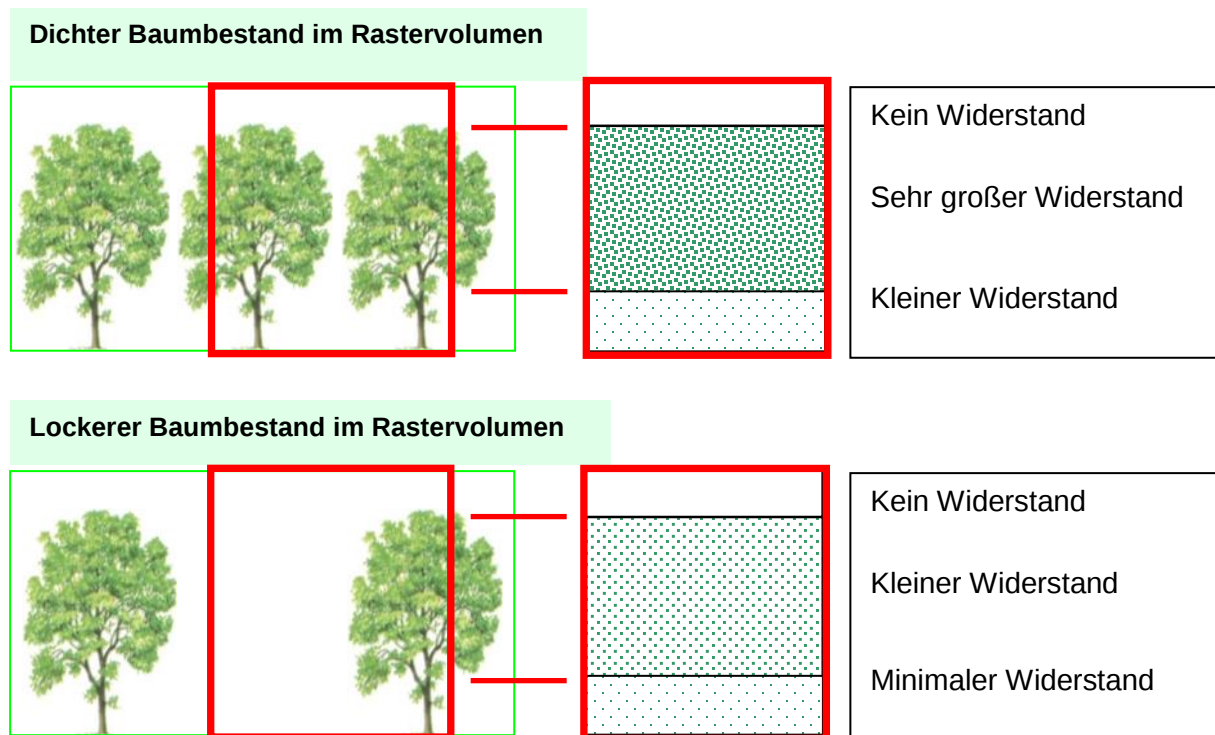
Diese Effekte können in Ermangelung einer detaillierten Erfassung jedes einzelnen Gebäudes über einen Porositätsansatz berücksichtigt werden. Einzelne Gebäude füllen nur einen Anteil des Volumens aus, welches durch das horizontale Raster und die Anordnung der Rechenflächen in der Vertikalen aufgespannt wird. Dieses Verhältnis bestimmt dann die Porosität einer jeden Rasterzelle (Abbildung 7). Das Rastervolumen kann folglich nur noch zu einem durch die Porosität definierten Anteil durchströmt werden, wobei die Porosität innerhalb des Raster-Körpers als gleichmäßig verteilt angenommen wird. Eine Strömung ist nur noch in den offenen Poren möglich, was für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit eine deutliche Verlangsamung aufgrund von Stauwirkungen und Reibung bedeutet.



**Abbildung 7:** Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit

Ein vorhandener Baumbestand kann über die Baumhöhe, die Bestandsdichte und die Baumart charakterisiert werden. Auch diese Bestandsstrukturen sind in der Regel so klein, dass sie nicht vom Raster des Modells aufgelöst werden können und damit parametrisiert

werden müssen. Eine solche Parametrisierung muss in der Lage sein, die Windberuhigung im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im oberen Kronenraum und die nächtliche Abkühlung bzw. die mittägliche Erwärmung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit Beobachtungen zu erfassen (Abbildung 8). Beim Modell FITNAH werden zusätzliche Terme in das Gleichungssystem eingeführt, die zum einen über einen Widerstandsterm die Modifizierung des Windfeldes gewährleistet und zum anderen den Strahlungshaushalt im Bereich eines Baumbestandes modifiziert (Grundlagen und Beschreibung: GROß 1993).



**Abbildung 8:** Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle

Die beschriebenen Parametrisierungen sind geeignet, die aus Beobachtungen bekannten, charakteristische Veränderungen der verschiedenen meteorologischen Variablen im Bereich von Städten und Wäldern mit FITNAH zu berechnen.

### 3.2.3 Großräumige meteorologische Rahmenbedingungen

Für die numerische Simulation mit dem Klimamodell FITNAH wird eine typische sommerliche, autochthone Wetterlage (vgl. Glossar) zugrunde gelegt. Charakterisiert wird eine autochthone sommerliche Wetterlage durch einen wolkenlosen Himmel sowie eine nur sehr schwache überlagernde (überregionale) Windströmung. Daher werden folgende großräumige (synoptische) Rahmenbedingungen für die Durchführung der numerischen Simulationen festgelegt:

- Starttemperatur von 20 °C in 2 m Höhe zum Zeitpunkt 21 Uhr,
- Bedeckungsgrad 0/8 (d. h. wolkenloser Himmel),

- keine überlagernde makroskalige Strömung (d. h. keine Beeinflussung durch Gradientwind bzw. großräumige Luftströmungen zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten),
- relative Feuchte der Luftmasse von 50 %.

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bei einer austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Bei gleichzeitiger hoher Ein- und Ausstrahlung in den Siedlungsflächen können sich lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungsräume ausbilden. Diese Wettersituation stellt damit ein „Worst-Case“-Szenario dar. Sie wird als Grundlage ausgewählt, da sich die lokalklimatischen Unterschiede bei einer solchen Wetterlage besonders gut bzw. stark ausbilden. Es ist zudem eine Situation, bei welcher typischerweise mit thermischen Belastungen für die Bevölkerung gerechnet werden muss. Es wird erwartet, dass solche Wetterlagen durch den Klimawandel an Häufigkeit zunehmen werden.

### **3.3 Klimawandel**

Der vom Menschen verursachte Klimawandel lässt sich in Nordrhein-Westfalen bereits heute deutlich nachweisen. So liegt beispielsweise die jährliche Durchschnittstemperatur der aktuellen Klimamodernalperiode 1981-2010 (9,6 °C) um 1,2 K (Kelvin)<sup>2</sup> höher als im Zeitraum 1881-1910 (8,4 °C). Der bereits eingetretene Temperaturanstieg und die Entwicklung weiterer Klimaparameter werden im Klimafolgenmonitoring NRW ([www.kfm.nrw.de](http://www.kfm.nrw.de)) jährlich dokumentiert und sind mit ihren Auswirkungen auf verschiedene Umweltbereiche im LANUV-Fachbericht 74 „Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen“ (LANUV 2016) ausführlich beschrieben.

Die der Klimaanalyse NRW zugrundeliegende Modellrechnung des Modells FITNAH setzt auf den gegenwärtigen Klima- und Landnutzungsverhältnissen in NRW auf. Ausgangspunkt der Berechnungen mit dem Klimamodell FITNAH ist eine für NRW typische sommerliche Wetterlage mit einer Lufttemperatur von 20 °C um 21 Uhr (Kapitel 3.2.3). Die Effekte des anthropogenen, also vom Menschen verursachten Klimawandels sind dabei noch nicht berücksichtigt. Alle aus den Ergebnissen abgeleiteten Funktionen und Belastungen sowie ihre fachgutachterliche Bewertung beziehen sich somit auf den Ist-Zustand und haben unter heutigen Klimabedingungen Gültigkeit.

Darüber hinaus wurde im Rahmen der Klimaanalyse NRW jedoch auch ein Ansatz entwickelt, um die zukünftig voraussichtlich steigenden Temperaturen bei der Beurteilung der thermischen Belastung der Bevölkerung zu berücksichtigen und damit die Auswirkungen des Klimawandels abzuschätzen. Durch die Ausweisung von sogenannten „Klimawandel-Vorsorgebereichen“ (Kapitel 4.4) werden erste Hinweise gegeben, in welchen Gebieten (zusätzlich zu den bereits unter den heutigen Bedingungen belasteten Flächen) zukünftig mit einer besonders starken thermischen Belastung gerechnet werden muss. Die diesem Ansatz zugrunde gelegten Klimaprojektionen werden im Folgenden näher erläutert.

---

<sup>2</sup> absolute Temperaturskala, gebräuchlich bei der Angabe von Temperaturdifferenzen 1 K entspricht 1 °C

Die Grundlage zur Berücksichtigung des Klimawandels im Rahmen der Klimaanalyse NRW stellen regionalisierte Klimaprojektionen für Nordrhein-Westfalen dar. Diese basieren auf der Auswertung des „EURO-CORDEX“-Projekts (<http://www.euro-cordex.net/index.php.en>) zum Stand Juli 2016 durch den Deutschen Wetterdienst (DWD). Für NRW liegen Klimaprojektionsdaten vor, die auf einem Modellensemble aus 13 Kombinationen globaler und regionaler Klimamodelle basieren, in einer Auflösung von ca. 12,5 km x 12,5 km. Diese stehen für zwei der vier RCP-Klimaszenarien zur Verfügung, die seit dem 5. IPCC-Sachstandsbericht gebräuchlich sind (vgl. Tabelle 5).

**Tabelle 5:** RCP-Szenarien nach 5. Sachstandsbericht des IPCC (2013), Daten aus VAN VUUREN et al. (2011) (Szenarien mit verfügbarem Modell-Ensemble sind in fett dargestellt)

| Szenario      | Treibhausgas (THG)-Regime                                                                       | Strahlungsantrieb          | Szenarien-Beschreibung                                                                                                |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RCP2.6        | 475 ppm THG-Konzentration zum Emissionsmaximum im Jahr 2020, anschließend stetiger Rückgang     | 2,6 W/m <sup>2</sup>       | Klimaschutzszenario mit ambitionierter THG-Reduktion                                                                  |
| <b>RCP4.5</b> | <b>630 ppm THG-Konzentration zum Emissionsmaximum im Jahr 2100</b>                              | <b>4,5 W/m<sup>2</sup></b> | <b>Stabilisierungsszenario mit moderatem Strahlungsantrieb</b>                                                        |
| RCP6.0        | 800 ppm THG-Konzentration im Jahr 2100, Emissionsmaximum auch 2100 noch nicht erreicht          | 6,0 W/m <sup>2</sup>       | Stabilisierungsszenario mit hohem Strahlungsantrieb                                                                   |
| <b>RCP8.5</b> | <b>1.313 ppm THG-Konzentration im Jahr 2100, Emissionsmaximum auch 2100 noch nicht erreicht</b> | <b>8,5 W/m<sup>2</sup></b> | <b>business-as-usual-Szenario, hohe THG-Emissionen mit auf fossilen Energieträgern beruhendem Wirtschaftswachstum</b> |

Aufgrund der Datenverfügbarkeit werden bei der Klimaanalyse NRW die Szenarien „RCP8.5“ und „RCP4.5“ für NRW herangezogen. Das Szenario RCP8.5 unterstellt eine weitere starke Zunahme von THG-Emissionen („business-as-usual-Szenario“), das Szenario „RCP4.5“, bildet demgegenüber eine moderatere Entwicklung z. B. infolge einer verstärkten Nutzung von Technologien zur Beschränkung von THG-Emissionen ab.

Im Folgenden wird der Fokus der Auswertung der möglichen Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels in NRW auf den für diese Studie besonders relevanten Parameter Lufttemperatur gelegt. Dabei wird die mittlere Jahres- sowie Sommertemperatur sowie – stellvertretend für eine typische sommerliche Wetterlage, für welche mit thermischen Belastungen gerechnet werden muss – der Temperaturkenntag „Heißer Tag“ (gekennzeichnet durch das Erreichen bzw. Überschreiten von 30 °C als maximaler Tagestemperatur) beschrieben. Zudem wird die Auswertung auf den Zeitraum 2021-2050 (Nahe Zukunft) ausgerichtet, da dieser Zeitraum für aktuelle Planungsprozesse eine erhöhte

Relevanz aufweist. Obwohl für langfristige Planungen (wie z. B. die Ausweisung von neuen Siedlungsgebieten) auch die Projektionen für die Ferne Zukunft (2071-2100) von Bedeutung sind, werden diese, unter anderem aufgrund deutlich stärker voneinander abweichender Modellergebnisse, nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Klimaprojektionen für NRW für die mittlere Jahrestemperatur, die Sommertemperatur sowie die Heißen Tage sind in Tabelle 6 dargestellt. Es handelt sich um eine Mittelwertauswertung für die Fläche Nordrhein-Westfalens. Eine räumliche Differenzierung der Landesfläche wurde ebenfalls untersucht, aber nicht weiter berücksichtigt oder dargestellt, da sich keine relevanten räumlichen Unterschiede für die Temperaturzunahme in NRW ergeben. Es wird jeweils die voraussichtliche Änderung für den Zeitraum 2021-2050 bezogen auf den Referenzzeitraum 1971-2000 aufgezeigt. Darüber hinaus erfolgt die Ergebnisdarstellung nicht für einzelne Modell-Kombinationen, sondern, wie in Bezug auf den Klimawandel üblich, als Auswertung von Perzentilen. Durch die ausgewählten Perzentile (Lagemaß der Statistik; vgl. Glossar) wird eine gewisse Spanne von 70 % aller Ergebnisse abgebildet (zwischen dem 15 %-Perzentil und dem 85 %-Perzentil), darüber hinaus wird mit dem 50 %-Perzentil der Median der Modellergebnisse dargestellt.

**Tabelle 6:** Ergebnisse der Klimaprojektionen für NRW als Änderung für den Zeitraum 2021-2050 bezogen auf 1971-2000.

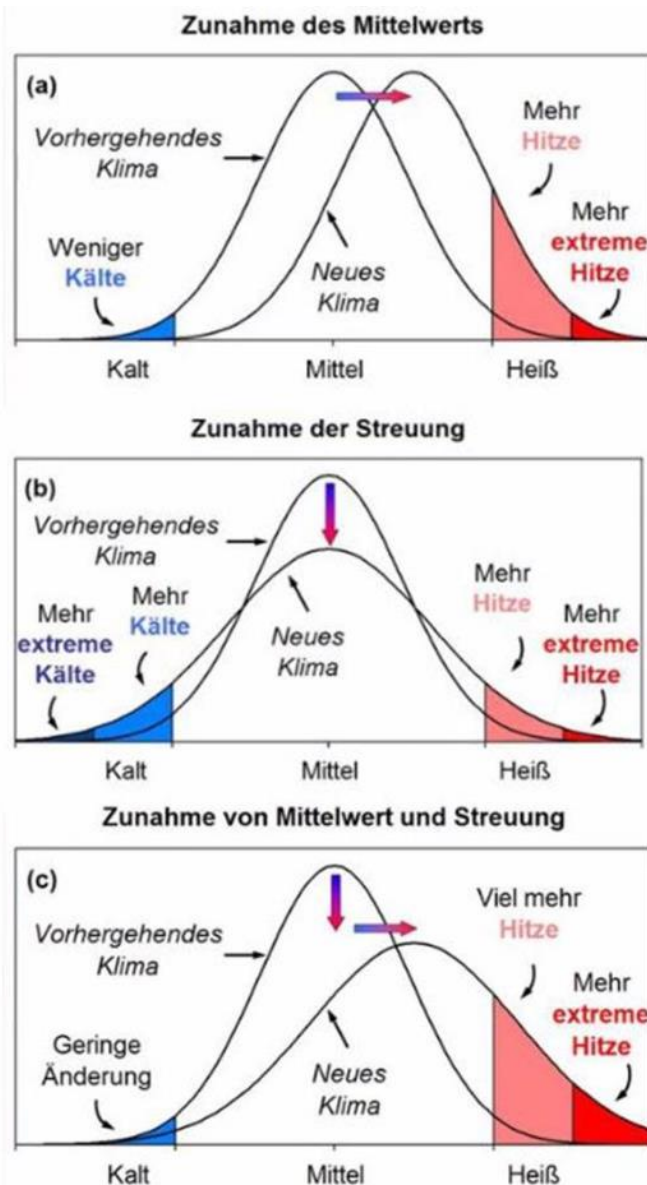
|          |           | Jahr            | Sommer | Heiße Tage      |
|----------|-----------|-----------------|--------|-----------------|
| Szenario | Perzentil | Temperatur in K |        | Anzahl in Tagen |
| RCP4.5   | 15.       | 0,7             | 0,7    | 1               |
|          | 50.       | 1,1             | 1,1    | 4               |
|          | 85.       | 1,5             | 1,4    | 8               |
| RCP8.5   | 15.       | 0,8             | 0,8    | 1               |
|          | 50.       | 1,2             | 1,1    | 4               |
|          | 85.       | 1,7             | 1,7    | 8               |

Demnach ist für NRW bis zum Zeitraum 2021-2050 ein Anstieg der Lufttemperatur zu erwarten. Dies zeigt sich über alle Modell-Kombinationen hinweg. Sowohl für die mittlere Jahres- als auch für die Sommertemperatur ist ein Anstieg um bis zu 1,7 K gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 möglich. Die Temperaturzunahme wirkt sich wiederum auf das Auftreten der Heißen Tage aus, die eine Zunahme von bis zu 8 Tagen bis 2021-2050 verglichen mit dem Referenzzeitraum 1971-2000 zeigen. Für die Ferne Zukunft (Zeitraum 2071-2100) gehen die Klimaprojektionen für NRW sogar von einem Anstieg der Temperatur zwischen 1,5 und 4,3 K aus.

In der Gesamtschau lässt sich trotz der naturgemäß noch bestehenden Unsicherheiten und Unterschiede der Modell-Berechnungen ein eindeutiger Trend zu einer weiteren Temperaturzunahme in den aktuellen regionalen Klimamodellierungen erkennen. Für die im

Zuge der Klimaanalyse NRW ermittelten, bereits unter heutigen Bedingungen im regionalen Betrachtungsmaßstab als bedeutsam bewerteten bioklimatischen Belastungsräume ist demnach künftig – ohne entsprechende Gegenmaßnahmen – eine weitere Zunahme der Belastungen anzunehmen, da sich die makroskaligen Bedingungen hin zu noch höheren (Ausgangs-)Temperaturen entwickeln werden.

Durch die mit großer Sicherheit steigenden Durchschnittstemperaturen wird aufgrund der anzunehmenden Normalverteilung der Aufttrittshäufigkeiten bestimmter Temperaturen (vgl. Abbildung 9) statistisch gesehen auch eine zunehmende Häufung von Hitze-Extremen einhergehen.



**Abbildung 9:** Einfluss der prognostizierten Zunahmen von Mitteltemperatur und Streuung auf die Häufigkeit von Extremereignissen (IPCC 2001, dt. nach HUPFER, BÖRNGEN 2004, zitiert nach: SCHÖNWIESE 2007)

Auf Grundlage der vorgestellten Ergebnisse der Klimaprojektionen für NRW sowie der allgemeinen Erwartung der Zunahme von Hitzeextremen (Abbildung 9) wird ein vereinfachter Ansatz zur Berücksichtigung des anthropogenen Klimawandels in den Klimaanalysekarten verwendet. Dieser berücksichtigt einen pauschalen Temperaturanstieg und stellt Gebiete, die durch diesen pauschalen Temperaturzuschlag zusätzlich in die höchste Belastungsklasse fallen würden, gesondert als „Klimawandel-Vorsorgebereiche“ dar (Kapitel 4.4). Für den Temperaturzuschlag wird der Median (50 %-Perzentil) der Modellergebnisse – gerundet auf 1 K – verwendet.

## **4. Methodik und Vorgehensweise**

Nachdem in den vorherigen Kapiteln Datengrundlagen und wesentliche Grundlageninformationen beschrieben wurden, wird in diesem Kapitel die konkrete Methodik und Vorgehensweise der Klimaanalyse NRW erläutert. Dabei wird in Kapitel 4.1 zunächst das Vorgehen bei der Klimatopausweisung dargestellt, bevor auf die Methodik der Klimamodellsimulation eingegangen wird (Kapitel 4.2). Anschließend wird in Kapitel 4.3 aufgezeigt, wie die verschiedenen Klimaanalysekarten für Nordrhein-Westfalen erstellt wurden. Darüber hinaus wird die Darstellung von Klimawandel-Vorsorgebereichen (Kapitel 4.4) und die Auswertung der von thermischer Belastung betroffenen Bevölkerung beschrieben (Kapitel 4.5).

Die Erstellung von Klimaanalysen wird dabei grundsätzlich durch die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (VDI 2015) beschrieben. Das Ziel der Klimaanalyse NRW ist die Untersuchung und Bewertung der klimatischen (thermischen) Bedingungen für die gesamte Landesfläche Nordrhein-Westfalen und die kartographische Aufbereitung der Ergebnisse. Die dabei erstellten Klimaanalysekarten stellen wichtige Grundlagen für die Stadt- und Regionalplanung dar, auf deren Basis auch bereits Hinweise für die Planung abgeleitet werden können. Aus diesem Grund wird eine räumliche Auflösung – insbesondere für die durchgeführten Klimamodellsimulationen – von 100 m × 100 m gewählt. Dies entspricht nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 der Schnittstelle zwischen Regional- und Flächennutzungsplan. Für die Regionalplanung ist diese Auflösung mehr als ausreichend und erfordert teilweise sogar eine gewisse Abstraktion der Ergebnisse bzw. Darstellungen. Für die kommunale Ebene können durch die gewählte räumliche Auflösung (und dem damit verbundenen Maßstab) Datengrundlagen bereitgestellt werden, die erste Hinweise auf die thermische Situation und das klimatische Prozessgeschehen liefern. Eine räumlich detaillierte Betrachtung stadtklimatischer Besonderheiten auf lokaler Ebene kann im Rahmen der landesweiten Klimaanalyse jedoch nicht erfolgen und erfordert gegebenenfalls weitere Untersuchungen vor Ort mit einer höheren Auflösung (z. B. 25 m × 25 m).

Als Untersuchungsgegenstand wird der Fokus auf die thermische Belastung gelegt, die durch den vom Menschen verursachten Klimawandel zukünftig weiter zunehmen wird. Aber auch unter heutigen Bedingungen und vor dem Hintergrund der hohen Bevölkerungsanzahl und – dichte in Nordrhein-Westfalen zeigt diese Belastung bereits starke Auswirkungen und darüber hinaus erhebliche räumliche Unterschiede. Weitere Aspekte des Stadtklimas wie die Lufthygiene werden an anderer Stelle umfangreich analysiert und dokumentiert (kommunale Luftreinhaltepläne, Luftqualitätsüberwachungssystem LUQS, etc.) und in der Klimaanalyse NRW nicht betrachtet.

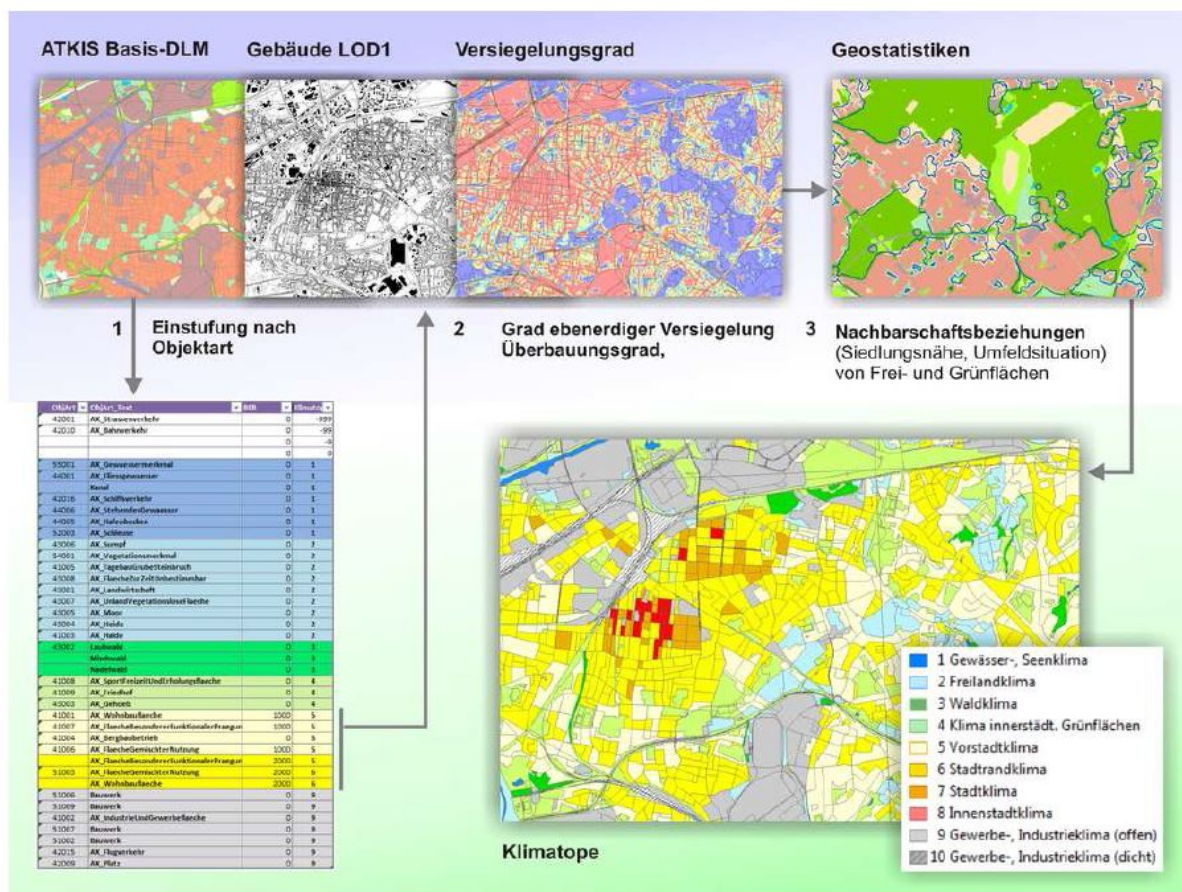
### **4.1 Klimatopausweisung**

Klimatope sind räumliche Einheiten, die ähnliche mikroklimatische Bedingungen aufweisen. Die klimatischen Gegebenheiten einer Fläche werden dabei in erster Linie durch die Flächennutzung bestimmt, und zusätzlich durch die Bebauungsdichte, den

Versiegelungsgrad, die Oberflächenstruktur, das Relief oder die Vegetationsart beeinflusst (VDI 2015).

Gemäß VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (VDI 2015) ist die Konzeption von Klimaanalysekarten in aufeinander aufbauenden thematischen Schritten durchzuführen. Der erste und grundlegende dieser Schritte ist die Klimatopausweisung. Dabei werden Flächen bzw. Gebiete mit ähnlichen mikroklimatischen Bedingungen abgeleitet und zugeordnet. Die flächendeckende Abgrenzung der Klimatoptypen dient dabei als Grundlage für die Einbeziehung weiterer Fachinformationen (vgl. Kapitel 4.2) und vertiefende Analysen (Kapitel 4.3).

Die Ausweisung der Klimatope erfolgt nach einer automatisierten Methode, die in der Studie „Handbuch Stadtklima Teil II – Methoden“ (MKULNV 2014) für NRW entwickelt wurde (Abbildung 10). Dabei wird zunächst anhand der Daten zur Flächennutzung (ATKIS Basis-DLM, vgl. Kapitel 2.2) jeder Fläche ein Klimatoptyp zugeordnet. Bei einigen Objektarten ist die Zuordnung sehr einfach und eindeutig (z. B. zählen Fließgewässer zum Klimatoptyp „Gewässer-, Seenklima“), bei anderen gilt dies jedoch nicht. So kann z. B. Wohnbaufläche als Klimatoptyp *Vorstadt-*, *Stadttrand-*, *Stadt-* oder *Innenstadtklima* klassifiziert werden. Daher wird zunächst unter Zuhilfenahme des Objektattributs „BEB“ (offene oder geschlossene Bauweise) vorläufig nach den Klimatoptypen Vorstadt und Stadttrand differenziert (vgl. Tabelle 7). Diese Einteilung wird durch die Einbeziehung des Versiegelungs- und Überbauungsgrads (vgl. Kapitel 2.2) weiter spezifiziert. Dieselbe Vorgehensweise wird für Gewerbeflächen herangezogen. Die zur Abgrenzung verwendeten Versiegelungsanteile sind in Tabelle 8 aufgelistet. Als weiterer Arbeitsschritt werden darüber hinaus die Nachbarschaftsbeziehungen herangezogen. So kann der Klimatoptyp 4 *Klima innerstädtischer Grünflächen* durch die Lage im Siedlungskörper sowie der Klimatoptyp 6 *Stadttrandklima* durch die Lage am Siedlungsrand identifiziert werden.

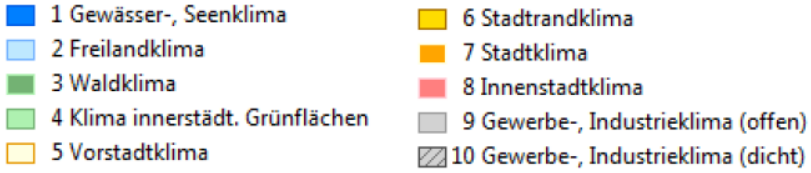


**Abbildung 10:** Ablauf-Schema zur automatisierten Ausweisung der Klimatope in NRW (GEO-NET 2014)

**Tabelle 7:** Primäre Zuordnung der Objektarten (ATKIS Basis-DLM) zu den Klimatoptypen (GEO-NET 2014)

| Objekt-art | Objektart Text             | BEB | Primärer Klimatoptyp | Treffer-sicherheit    |
|------------|----------------------------|-----|----------------------|-----------------------|
| 55001      | Gewässermerkmal            | 0   | 1                    | eindeutig             |
| 44001      | Fließgewässer              | 0   | 1                    | eindeutig             |
| 44001      | Kanal                      | 0   | 1                    | eindeutig             |
| 44006      | Stehendes Gewässer         | 0   | 1                    | eindeutig             |
| 22005      | Hafenbecken                | 0   | 1                    | eindeutig             |
| 52003      | Schleuse                   | 0   | 1                    | mehrdeutig            |
| 43006      | Sumpf                      | 0   | 2                    | eindeutig             |
| 54001      | Vegetationsmerkmal         | 0   | 2                    | mehrdeutig (Lage)     |
| 41005      | Tagebau/ Grube/ Steinbruch | 0   | 2                    | mehrdeutig (Struktur) |

| Objekt-art | Objektart Text                         | BEB  | Primärer Klimatotyp | Treffer-sicherheit          |
|------------|----------------------------------------|------|---------------------|-----------------------------|
| 43008      | Fläche zur Zeit Unbestimmbar           | 0    | 2                   | mehrdeutig (Lage, Struktur) |
| 43001      | Landwirtschaft                         | 0    | 2                   | eindeutig                   |
| 43007      | Unland/ Vegetationslose Fläche         | 0    | 2                   | mehrdeutig (Lage)           |
| 43005      | Moor                                   | 0    | 2                   | eindeutig                   |
| 43004      | Heide                                  | 0    | 2                   | eindeutig                   |
| 41003      | Halde                                  | 0    | 2                   | mehrdeutig (Struktur)       |
| 43002      | Laubwald                               | 0    | 3                   | eindeutig                   |
| 43002      | Mischwald                              | 0    | 3                   | eindeutig                   |
| 43002      | Nadelwald                              | 0    | 3                   | eindeutig                   |
| 41008      | Sport, -Freizeit- und Erholungsfläche  | 0    | 4                   | mehrdeutig (Lage, Struktur) |
| 41009      | Friedhof                               | 0    | 4                   | mehrdeutig (Lage, Struktur) |
| 43003      | Gehölz                                 | 0    | 4                   | mehrdeutig (Lage)           |
| 41004      | Bergbaubetrieb                         | 0    | 5                   | mehrdeutig (Struktur)       |
| 41006      | Fläche gemischter Nutzung              | 1000 | 5                   | mehrdeutig (Lage, Struktur) |
| 41001      | Wohnbaufläche                          | 1000 | 5                   | mehrdeutig (Struktur)       |
|            |                                        | 2000 | 6                   | mehrdeutig (Struktur)       |
| 41007      | Fläche besonderer Funktionaler Prägung | 1000 | 5                   | mehrdeutig (Lage, Struktur) |
|            |                                        | 2000 | 6                   | mehrdeutig (Lage, Struktur) |
| 51003      | Fläche gemischter Nutzung              | 2000 | 6                   | mehrdeutig (Lage, Struktur) |
| 42016      | Schiffsverkehr                         | 0    | 9                   | eindeutig                   |
| 51009      | Bauwerk                                | 0    | 9                   | eindeutig                   |
| 41002      | Industrie- und Gewerbefläche           | 0    | 9                   | mehrdeutig (Struktur)       |
| 51007      | Bauwerk                                | 0    | 9                   | eindeutig                   |
| 51002      | Bauwerk                                | 0    | 9                   | eindeutig                   |
| 42015      | Flugverkehr                            | 0    | 9                   | mehrdeutig (Struktur)       |
| 42009      | Platz                                  | 0    | 9                   | mehrdeutig (Lage, Struktur) |

| Objekt-art                                                                         | Objektart Text | BEB | Primärer Klimatotyp | Treffer-sicherheit |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----|---------------------|--------------------|
| 42001                                                                              | Straßenverkehr | 0   | -999                | keine Zuordnung    |
| 42010                                                                              | Bahnverkehr    | 0   | -99                 | keine Zuordnung    |
|  |                |     |                     |                    |

**Tabelle 8:** Spezifizierung der Klimatopzuweisung anhand des überbauten Flächenanteils ( $VS_{Bau}$ ) sowie der Gesamtversiegelung (verändert nach GEO-NET 2014)

| Primärer Klimatotyp                             | Versiegelungsschwellenwerte           | Spezifizierter Klimatotyp        |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Vorstadtklimatop (5) oder Stadtrandklimatop (6) | $0,2 > VS_{Bau} \leq 0,4$             | Primärer Klimatotyp „+1“         |
| Vorstadtklimatop (5) oder Stadtrandklimatop (6) | $VS_{Bau} > 0,4$                      | Primärer Klimatotyp „+2“         |
| Gewerbe-, Industrieklimatop (9)                 | $VS_{Bau} > 0,4$                      | Gewerbe-, Industrieklimatop (10) |
| Gewerbe-, Industrieklimatop (9)                 | $VS_{Bau} > 0,2$ und $VS_{Ges} > 0,7$ | Gewerbe-, Industrieklimatop (10) |

Somit wird jeder einzelnen Fläche (Objekt/Baublock nach ATKIS Basis-DLM) ein bestimmter Klimatotyp zugeordnet. In der Realität sind die Übergänge zwischen den Klimatopen jedoch fließend, da sich die klimatischen Gegebenheiten an den Flächengrenzen zwischen den Klimatopen nicht abrupt verändern.

Die Ergebnisse der Klimatopausweisung für Nordrhein-Westfalen werden in Kapitel 5 dargestellt.

## 4.2 Klimamodellsimulation - Einbeziehung weiterer Fachinformationen

Da die Klimatopkarte auf rein statischen Grundlagen basiert (vor allem Flächennutzung), können aus ihr keine Aussagen zum Prozessgeschehen zwischen den Klimatopflächen abgeleitet werden. So sieht die VDI-Richtlinie 3878, Blatt 1 die Einbringung weiterer Fachinformationen wie die Analyse von Lufttemperatur-, Luftfeuchte- und Windverhältnissen, von Kaltluftabflüssen und thermisch induzierten Winden sowie der human-biometeorologischen Verhältnisse vor. In kommunalen Klimaanalysen werden diese Daten häufig durch temporäre Messprogramme gewonnen. In der vorliegenden Klimaanalyse NRW

werden aufgrund des Maßstabs der landesweiten Betrachtung Klimamodellsimulationen zur Erfassung der genannten weiteren Fachinformationen verwendet.

Für die Klimaanalyse NRW wird hierfür das mesoskalige Modell FITNAH verwendet (Kapitel 3.2). Eine detaillierte Beschreibung von FITNAH erfolgt beispielsweise in GROß 1993. Ausgehend von der Fläche des Landes Nordrhein-Westfalen (ca. 34.000 km<sup>2</sup>) wird ein rechteckiges Untersuchungsgebiet mit den Abmessungen 288 km x 282 km gebildet, das dementsprechend eine Fläche von mehr als 81.000 km<sup>2</sup> umfasst. Die Modellierung der meteorologischen Parameter erfolgt somit für mehr als 8,1 Millionen Rasterzellen mit einer Zellengröße von jeweils 100 m x 100 m. In das Modell fließen die Geländehöhe, die Flächennutzung sowie als Startbedingung die meteorologischen Parameter eines typischen Sommertags als Grundlagen ein (vgl. Kapitel 2 und 3.2.3). Das Klimamodell berechnet für die Klimaanalyse NRW flächendeckend das Lufttemperaturfeld, das Windfeld sowie als biometeorologische Kenngröße die PET (vgl. Glossar, Kapitel 3.1.2). Aus den Ergebnissen des Lufttemperatur- und des Windfelds können wiederum Aussagen zur Kaltluftströmung (bedingt durch das Relief oder thermisch induziert) sowie zum Kaltluftvolumenstrom (also die Menge bzw. Mächtigkeit der Kaltluftströmung, vgl. Glossar, Kapitel 3.1.3) abgeleitet werden. In Kapitel 3.1 sind die grundlegenden Informationen zur Wirkung unterschiedlicher Flächennutzungen auf die Temperatur und der Kaltluftströmung dargestellt.

Für die Klimamodellsimulation müssen die Eingangsdaten zunächst aufbereitet werden. Dazu werden aus den flächenhaft (polygon- bzw. vektorbasiert) vorliegenden Daten gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 100 m erzeugt (vgl. Abbildung 11 oben). Aus diesen gerasterten Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form rasterweise berechneter Klimaparameter (Abbildung 11 unten). Qualifizierende Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Stattdessen wird eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch möglichst homogene Flächeneinheiten vorgenommen. Diese sollten in der Realität nachvollziehbar und beispielsweise administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Um die Rasterergebnisse auf planungsrelevante und maßstabsgerechte Einheiten zu übertragen, werden die Rechenergebnisse aller Rasterzellen, die von einer bestimmten homogen strukturierten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zonaler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche eine umfassende Statistik aller zugehörigen Klimaparameter, die u. a. den Mittelwert der flächenspezifischen Wertaussparungen umfasst.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Klimamodellsimulation beschrieben.



Vektorbasierte Realnutzung      Polygondarstellung      der      Auflösung in ein 100 m-Raster



Berechnung der Klimaparameter im 100 m-Raster      Rückbezug der Modellergebnisse auf die vektorbasierte Polygondarstellung

**Abbildung 11:** Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen (Vektor-) und Rasterinformation

### 4.3 Vertiefende Analyse

In der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 werden für Klimaanalysen auch vertiefende Analysen mit Aussagen zur Kaltluftströmung, Lufttemperatur und dem Bioklima thematisiert, die in Klimaanalysekarten dargestellt werden können. Grundsätzlich beschreibt eine Klimaanalysekarte die räumlichen Klimaeigenschaften, die sich durch die Flächennutzung und Topographie ergeben (VDI 2015). In der Klimaanalyse NRW werden hierfür die Ergebnisse in drei Klimaanalysekarten aufbereitet. Die Klimaanalysekarte der Nachtsituation (Kapitel 4.3.1) stellt die nächtliche Temperaturverteilung und die Kaltluftströmung dar, in der Klimaanalysekarte der Tagsituation (Kapitel 4.3.2) wird die bioklimatische Situation tagsüber anhand der PET aufbereitet und die Klimaanalysekarte Gesamtbetrachtung (Kapitel 4.3.3) fasst schließlich flächendeckend für NRW die Ergebnisse der beiden vorangegangenen Karten in einer Gesamtbetrachtung und -bewertung zusammen. Darüber hinaus werden auf

Basis der Gesamtbetrachtung Planungshinweise gegeben. Diese Karte ist somit mit einer Planungshinweiskarte, die eine integrierte Bewertung der Inhalte der Klimaanalysekarten mit Blick auf die planungsrelevanten Aspekte vornimmt (VDI 2015), vergleichbar.

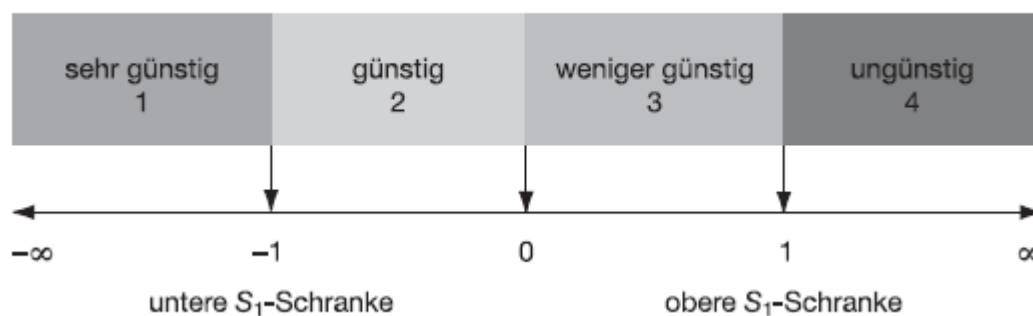
Ausgangspunkt der vorliegenden Klimaanalyse ist dabei die Gliederung der nordrhein-westfälischen Landesfläche in bioklimatisch belastete Siedlungsräume (Wirkräume, vgl. Glossar) einerseits und kaltluftproduzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen des Freiraums andererseits (Ausgleichsräume). Zu den Wirkräumen (Siedlungsbereiche) zählen alle Wohn-, Gewerbe- und Industrieflächen. Ausgleichsräume (Freiraum) umfassen sowohl außerhalb von Siedlungen gelegene, vegetationsgeprägte, und weitgehend unversiegelte Flächen (z. B. Wiesen, Wälder, Moore, landwirtschaftlich genutzte Flächen), als auch größere innerorts gelegene Grünflächen wie Parks, Landschaftsgärten, Friedhöfe oder Stadtwälder. Verkehrsflächen (Straßen, Bahnverkehrsanlagen) sowie Wasserfläche werden keiner Bewertung unterzogen.

Sofern die Prozessräume nicht unmittelbar aneinandergrenzen und die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können linear ausgerichtete, gering überbaute Freiflächen (Luftleitbahnen, vgl. Glossar) beide miteinander verbinden. Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie den verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkraum-Gefüges (vgl. Glossar) im Bundesland NRW. Die Karten bilden dabei den planungsrelevanten Ist-Zustand der Klimasituation auf Grundlage des hochaufgelösten 100 m-Rasters ab.

Auf Grundlage der Abgrenzung von Wirk- und Ausgleichsräumen sowie des sie verbindenden Prozessgeschehens wird eine qualitative Bewertung der thermischen Belastung bzw. Ausgleichsfunktion der Räume und einzelnen Flächen vorgenommen. Für die Bewertung von Klimafaktoren bedarf es eines begründeten, nachvollziehbaren Maßstabes. In der VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 wird vorgeschlagen, für eine Beurteilung das lokale oder regionale Wertenniveau einer Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen (VDI 2008). Somit wird die Differenzierung der Untersuchungsflächen üblicherweise auf Basis einer standardisierten Bewertung der sogenannten z-Transformation (vgl. Glossar) vorgenommen. Rechnerisch wird dabei von jedem Ausgangswert der Variablen (X) das arithmetische Gebietsmittel ( $\mu$ ) abgezogen und durch die Standardabweichung ( $\sigma$ ) aller Werte geteilt, wie in der nachfolgenden Formel (nach VDI 2008) dargestellt:

$$z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Hieraus würden sich vier Bewertungskategorien ergeben, deren Abgrenzung durch den Mittelwert („Null“) sowie die einfache positive und negative Standardabweichung (untere und obere  $S_1$ -Schranke) von diesem Mittelwert festgelegt ist (vgl. Abbildung 12).



**Abbildung 12:** Bewertungskategorien der z-Transformation (VDI 2008)

Dieser Methodik wird aus verschiedenen Gründen in der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht gefolgt (Ausnahme: Bewertung des nächtlichen Kaltluftproduktionspotenzials im Freiraum). Zum einen sollen Ergebnisse erzeugt werden, die auch auf der Ebene einzelner Kommunen betrachtet werden können. Dabei ist z. B. von Bedeutung, dass unterschiedlich thermisch belastete Räume voneinander abgegrenzt werden können, um beispielsweise Gebiete zu identifizieren, für die Klimaanpassungsmaßnahmen zu priorisieren sind. Da die Ergebnisse aber auf landesweiter Basis vorliegen und sich in NRW allein schon durch die Topographie und Nutzung große thermische Unterschiede ergeben, wären durch die standardisierte Bewertung nach z-Transformation die kommunalen Differenzen unterrepräsentiert bzw. es käme zu „Fehlklassifikationen“: Eine 4-stufige Skalierung von *sehr günstig* bis *ungünstig* vorausgesetzt, wären z. B. Flächen mit einer PET von  $> 34\text{ °C}$  noch als bioklimatisch *günstig* bewertet worden, was in keiner Weise den bei derartigen Temperaturen zu erwartenden human-physiologischen Auswirkungen und dem realen Belastungsempfinden der Betroffenen entspricht (vgl. Kapitel 3.1.2).

Mit der Verwendung „absoluter“ Werte und Klassengrenzen kann nicht nur auf landesweiter Ebene eine Bewertung der Belastung vorgenommen werden, sondern auch eine Differenzierung auf kommunaler Ebene erfolgen. Dieses Vorgehen wird auch durch die Ergebnisse einer Befragung von Vertretern der regionalen Planungsbehörden in NRW unterstützt. Die in der vorliegenden Klimaanalyse NRW verwendeten Schwellenwerte und Klassen werden wirkungsbezogenen, in Anlehnung an wissenschaftliche Erkenntnisse zu human-physiologischen Effekten verschiedener Umgebungstemperaturen definiert und orientieren sich soweit möglich an vorliegenden Richtlinien bzw. Untersuchungen. Die Klassenabgrenzung wird für die einzelnen Parameter der Klimaanalysekarten in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Die Ergebnisse der Klimaanalyse für Nordrhein-Westfalen werden in Kapitel 7 beschrieben.

### 4.3.1 Klimaanalyse Nachtsituation

Für die Klimaanalyse der Nachtsituation werden die meteorologischen Parameter wie Temperaturfeld, Kaltluftvolumenstrom und autochthones Strömungsfeld (vgl. Glossar) für eine für NRW typische Sommernacht modelliert und in ihrer flächenhaften Ausprägung dargestellt. Als Zeitpunkt wird hierfür 4 Uhr morgens ausgewählt, da dies dem Auftreten des Temperaturminimums im Tagesgang entspricht und die Kaltluftströmung in etwa ihr Maximum erreicht.

#### Siedlungsraum (Wirkraum)

Ein erholsamer Schlaf ist abhängig von den thermischen Bedingungen, womit der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Da die klimatischen Verhältnisse in Wohnungen nachts in der Regel nur durch den Luftaustausch mit dem Außenbereich modifiziert werden können, ist die Temperatur der Außenluft der entscheidende Faktor bei der Bewertung der thermophysiologischen Belastung der Bewohner. Entsprechend spiegelt die Beurteilung des Bioklimas weniger die thermische Beanspruchung des Menschen im Freien wider, als vielmehr die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas.

Für Siedlungsbereiche ist dabei die potenzielle Überwärmung oder die Bildung einer urbanen Wärmeinsel (UHI von engl.: urban heat island) der entscheidende Faktor, weshalb die Klassifizierung der Siedlungsflächen anhand der Lufttemperatur vorgenommen wird (Tabelle 9). Die Bewertung der nächtlichen Lufttemperatur erfolgt zum einen unter der Annahme, dass eine für den Menschen optimale Schlafumgebungstemperatur zwischen 16 und 18 °C liegt (UBA 2015), und zum anderen angelehnt an die Definition einer Tropennacht, in welcher die Lufttemperatur (außen) nicht unter 20 °C absinkt. Dies gilt als besonders belastend für den menschlichen Organismus (u. a. UBA 2015).

**Tabelle 9:** Bewertung der nächtlichen Überwärmung im Siedlungsraum

| Lufttemperatur     | Qualitative Bewertung |
|--------------------|-----------------------|
| ≤ 17,0 °C          | keine UHI vorhanden   |
| > 17,0 bis 18,5 °C | schwache UHI          |
| > 18,5 bis 20,0 °C | mäßige UHI            |
| > 20,0 °C          | starke UHI            |

#### Freiraum (Ausgleichsflächen)

Grünflächen im Freiraum (z. B. Wiesen, Moore, landwirtschaftliche Flächen, Wälder oder auch Friedhöfe Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen) können klimaökologische Ausgleichsräume darstellen und über Flurwinde (vgl. Glossar) und Kaltluftabflüsse die Wärmebelastung in den Siedlungsflächen verringern. In der Nachtsituation ist für den Freiraum daher das Kaltluftproduktionspotenzial entscheidend. Der Freiraum wird nach der

Kaltluftlieferung anhand des mittleren Kaltluftvolumenstroms in Kubikmeter pro Sekunde ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) (Kapitel 3.1.3) klassifiziert. Zur Bewertung wird an dieser Stelle in Ermangelung von absoluten Schwellen- oder Grenzwerten bzw. aufgrund des fehlenden direkten Wirkzusammenhangs zur Physiologie des menschlichen Organismus eine z-Transformation (vgl. VDI 2008, Kapitel 4.3) durchgeführt. Somit ergibt sich eine Bewertung, die auf den Gebietsmittelwert von NRW zurückgeht und positive Abweichungen entsprechend gut bewertet (überdurchschnittliche Kaltluftproduktion) und negative entsprechend als schlechter (unterdurchschnittlich) bewertet. Die entsprechenden Klassengrenzen sind in nachfolgender Tabelle 10 spezifiziert:

**Tabelle 10:** Bewertung des Kaltluftvolumenstroms

| z-Wert     | Kaltluftvolumenstrom                  | Qualitative Bewertung |
|------------|---------------------------------------|-----------------------|
| > 1        | > 2700 $\text{m}^3/\text{s}$          | sehr hoch             |
| > 0 bis 1  | > 1500 bis 2700 $\text{m}^3/\text{s}$ | hoch                  |
| > -1 bis 0 | > 300 bis 1500 $\text{m}^3/\text{s}$  | mittel                |
| $\leq -1$  | $\leq 300 \text{ m}^3/\text{s}$       | gering                |

Das Kaltluftströmungsfeld, das sich während einer sommerlichen, austauscharmen Strahlungswetternacht (vgl. Glossar) autochthon ausbildet, wird in der Klimaanalysekarte durch Pfeile dargestellt. Die momentane Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeilgröße in Form von Vektoren dargestellt, wobei die Pfeile für eine übersichtlichere Darstellung nicht im 100 m-Raster, sondern als Mittelpunkt für jede Fläche des Freiraums vorliegen, sofern die Fläche mindestens einen „mittleren Kaltluftvolumenstrom“ aufweist und größer als 2 Hektar (ha) ist.

Die Ergebnisse der Klimaanalyse für die Nachtsituation werden in Kapitel 7.1 ausführlich dargestellt.

#### 4.3.2 Klimaanalyse Tagsituation

Die Klimaanalysekarte für die Tagsituation bewertet die thermische Belastung der Bevölkerung an einem für NRW typischen Sommertag zum Zeitpunkt 15 Uhr. Dies entspricht in etwa dem Zeitpunkt des Auftretens des Temperaturmaximums im Tagesgang. Da tagsüber keine Kaltluftproduktion stattfindet und das Kühlungspotenzial der Grünflächen rein auf Verdunstungseffekten beruht, sind die Temperaturunterschiede zwischen Siedlungsraum und Freiraum zu diesem Zeitpunkt nur gering ausgeprägt (vgl. Kapitel 3.1.1). Tagsüber wird zur Klassifizierung somit sowohl für den Siedlungsraum als auch für den Freiraum der human-bioklimatische Index PET genutzt (vgl. Kapitel 3.1.2), der verschiedene Einflussgrößen auf das thermische Empfinden berücksichtigt. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifiziert (z. B. *starke Wärmebelastung* ab PET > 35 °C; VDI 2004). Die Bewertung der thermischen Belastung im Untersuchungsgebiet für die Tagsituation orientiert sich daher an dieser Skala und wird in Tabelle 11 dargestellt:

**Tabelle 11:** Bewertung der thermischen Belastung anhand der PET (verändert nach VDI 2004)

| PET            | Qualitative Bewertung („Wärmebelastung“) |
|----------------|------------------------------------------|
| ≤ 29 °C        | schwach                                  |
| > 29 bis 35 °C | mäßig                                    |
| > 35 bis 41 °C | stark                                    |
| > 41 °C        | extrem                                   |

In Kapitel 7.2 werden die Ergebnisse der Klimaanalyse der Tagsituation für Nordrhein-Westfalen erläutert.

### 4.3.3 Klimaanalyse Gesamtbetrachtung

Das Ziel der Klimaanalyse ist es, eine klimatische Bewertung für alle Flächen Nordrhein-Westfalens zu treffen, auf deren Basis planungsrelevante Aussagen abgeleitet werden können. Um aus den Einzelbetrachtungen der Nacht- und der Tagsituation eine thermische Gesamtbewertung abzuleiten, wird im Rahmen der Klimaanalyse NRW zusätzlich die Klimaanalysekarte Gesamtbetrachtung erstellt, die das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen mit der Wärmebelastung am Tage verknüpft. Da insbesondere für Risikogruppen neben der mangelnden Erholung durch nächtliche Überwärmung auch die Hitzebelastung am Tag von Bedeutung ist, und diese durch den anthropogenen Klimawandel zukünftig zunehmen wird (Kapitel 3.3), werden in der Gesamtbetrachtung beide Zeitpunkte berücksichtigt.

Die Gesamtbetrachtung zielt darauf ab, eine integrierte Bewertung der in den Klimaanalysekarten Tag- und Nachtsituation dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange vorzunehmen. So lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas und – über die Effekte der Verdünnung und des Abtransportes – auch der Luft ableiten sowie Räume identifizieren, für die Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu priorisieren sind. Zusätzlich zur qualitativen Gesamtbewertung werden auf Basis dieser Einteilung auch informelle Planungshinweise gegeben. Diese geben Auskunft über die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen, aus denen sich klimatisch begründete Anforderungen und Maßnahmen im Rahmen der räumlichen Planung beispielsweise zum Flächenerhalt und zur -weiterentwicklung ableiten lassen.

Die Bewertung des Siedlungsraums und des Freiraums erfolgt in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 (VDI 2008; VDI 2015). Zusätzlich zu der in der genannten Richtlinie vorgeschlagenen 4-stufigen Klassifizierung der Belastung von Siedlungsflächen bzw. zur Funktionalität von Flächen im Freiraum wird jeweils eine weitere Klasse eingeführt, um Differenzierungen im Stadtgebiet besser abbilden zu können und

besonders belastete bzw. bedeutende Gebiete zu erfassen (*sehr ungünstige thermische Situation* bzw. *höchste thermische Ausgleichsfunktion*).

Die Ergebnisse der Gesamtbetrachtung als zentrales Resultat der Klimaanalyse NRW werden in Kapitel 7.3 näher beschrieben.

### **Siedlungsraum (Wirkraum)**

Der Siedlungsraum stellt den primären Wirkraum des stadtklimatischen Prozessgeschehens dar. Zur Beurteilung der Gesamtsituation in den Siedlungsräumen werden die Einzelergebnisse der Tag- und Nachtsituation aggregiert. Dies erfolgte über eine matrizenbasierte Verknüpfung der Bewertungen von Nacht- und Tagsituation zu einem Gesamtergebnis. Die Klassifizierung der Gesamtsituation erfolgt wie in Tabelle 12 dargestellt:

**Tabelle 12:** Klassenbasierte Bewertung der thermischen Situation in Siedlungsräumen in der Gesamtbetrachtung

| Klasse | Belastungsstufe                       |
|--------|---------------------------------------|
| 1      | sehr günstige thermische Situation    |
| 2      | günstige thermische Situation         |
| 3      | weniger günstige thermische Situation |
| 4      | ungünstige thermische Situation       |
| 5      | sehr ungünstige thermische Situation  |

Dabei werden für Wohn- und Gewerbeflächen jeweils ein separates Vorgehen zur Verknüpfung erstellt (Tabelle 13). Bei Wohnflächen ist ein erholsamer Schlaf für die menschliche Gesundheit relevanter als die thermische Belastung am Tage, da die Anpassungskapazität der Bevölkerung an Hitzestress tagsüber grundsätzlich höher einzustufen ist. Daher geht die nächtliche Überwärmung stärker gewichtet in die Berechnung ein (Tabelle 13 links). Demgegenüber wird in der Bewertung der Gesamtsituation für Gewerbeflächen die Tagsituation stärker gewichtet. Gewerbeflächen werden vorwiegend tagsüber genutzt, sodass hier die thermische Belastung am Tage die entscheidende Rolle spielt (Arbeit im Freien, Arbeitswege, Innenraumklima, etc.). Auch nachts werden Gewerbeflächen zum Teil genutzt, jedoch sollten selbst in Tropennächten die Lufttemperaturen keine gesundheitliche Belastung für die Arbeitskräfte darstellen. Da die nächtliche Überwärmung jedoch einen Einfluss darauf hat, ob bzw. inwieweit ein Gebäude nachts abkühlen kann (sodass die Vorbelastung für den nächsten Arbeitstag geringer ist), geht sie ebenfalls in die Berechnung für Gewerbeflächen ein (Tabelle 13 rechts).

**Tabelle 13:** Verknüpfung der Bewertung der thermischen Belastung von Tag- und Nachtsituation in der Gesamtbetrachtung bei Wohn- und Gewerbeflächen

| Wohn-<br>flächen                    |   | Nächtliche<br>Überwärmung |   |   |   |
|-------------------------------------|---|---------------------------|---|---|---|
|                                     |   | 1                         | 2 | 3 | 4 |
| thermische<br>Belastung<br>tagsüber | 1 | 1                         | 2 | 3 | 3 |
|                                     | 2 | 1                         | 2 | 3 | 4 |
|                                     | 3 | 2                         | 3 | 4 | 5 |
|                                     | 4 | 3                         | 3 | 4 | 5 |

| Gewerbe-<br>flächen                 |   | Nächtliche<br>Überwärmung |   |   |   |
|-------------------------------------|---|---------------------------|---|---|---|
|                                     |   | 1                         | 2 | 3 | 4 |
| thermische<br>Belastung<br>tagsüber | 1 | 1                         | 1 | 1 | 2 |
|                                     | 2 | 2                         | 2 | 2 | 3 |
|                                     | 3 | 3                         | 3 | 3 | 4 |
|                                     | 4 | 4                         | 4 | 4 | 5 |

### Freiraum (Ausgleichsflächen)

Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika des Freiraums in der Gesamtbetrachtung bedarf es im Hinblick auf planungsrelevante Belange einer Analyse der vorhandenen Ausgleichsraum-Wirkraum-Systeme im Untersuchungsgebiet. Dabei stehen im Gegensatz zu den Klimaanalysekarten der Nacht- und Tagsituation in der Gesamtbetrachtung die generelle bioklimatische Bedeutung von Flächen des Freiraums sowie deren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Daher wird hier als Grundlage nicht die Klassifizierung der Flächen des Freiraums aus der Klimaanalyse der Nacht- und der Tagsituation verwendet, sondern die Freiraumflächen werden in der zusammenfassenden Gesamtbetrachtung nochmals einem eigenständigen Bewertungsverfahren unterzogen (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14). Dieses wird erneut jeweils für die Nacht- und die Tagsituation separat durchgeführt, ehe beide Ergebnisse zusammengeführt werden (Tabelle 15). Die Kaltluftproduktion im Freiraum kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen (vgl. Glossar) profitieren kann. Für die Bewertung der bioklimatischen Bedeutung der Flächen des Freiraums wird daher ein teilautomatisierbares Verfahren angewendet, das insbesondere die räumliche Nähe zu belasteten Siedlungsbereichen berücksichtigt und das im Folgenden näher beschrieben wird.

Die Flächen des Freiraums werden dabei für die Bewertung der Nacht- und Tagsituation jeweils in vier Stufen von *geringe* bis *sehr hohe bioklimatische Bedeutung* eingeteilt. Analog zu den Siedlungsräumen wird bei der zusammenfassenden Klassifizierung im Rahmen der Gesamtbetrachtung auch für den Freiraum eine fünfte Stufe eingeführt, um eine bessere Differenzierung zu ermöglichen (Tabelle 14). Bei der Verknüpfung der Einzelbewertungen zu einer Gesamtbetrachtung wird die Nachtsituation stärker gewichtet als die Tagsituation (Tabelle 15).

**Tabelle 14:** Klassenbasierte Bewertung der thermischen Ausgleichfunktion von Flächen des Freiraums in der Gesamtbetrachtung

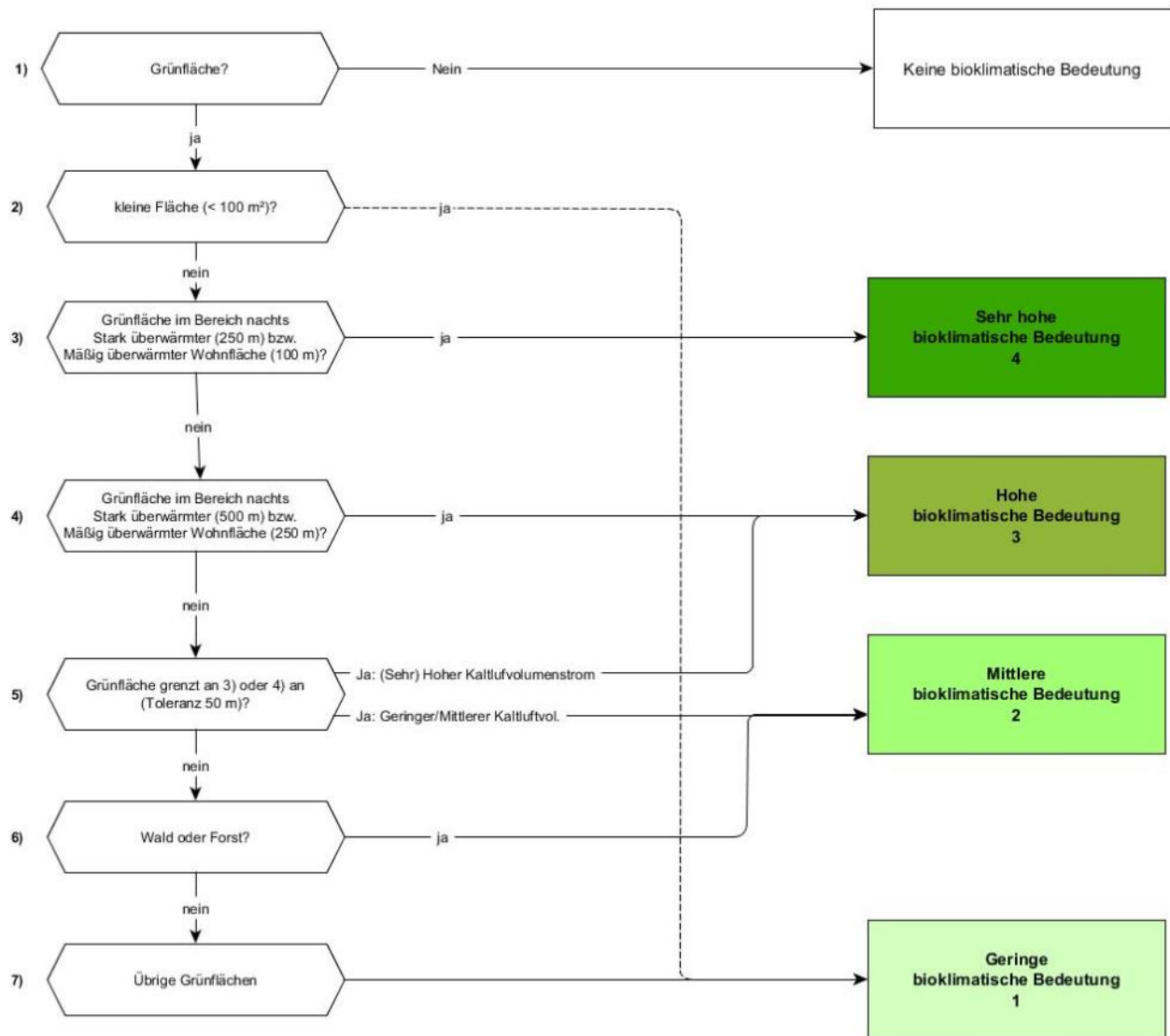
| Klasse | Bedeutung                               |
|--------|-----------------------------------------|
| 1      | geringe thermische Ausgleichsfunktion   |
| 2      | mittlere thermische Ausgleichsfunktion  |
| 3      | hohe thermische Ausgleichsfunktion      |
| 4      | sehr hohe thermische Ausgleichsfunktion |
| 5      | höchste thermische Ausgleichsfunktion   |

Die Bewertung des Freiraums in der Gesamtbetrachtung ist – wie die gesamte Studie – anthropozentrisch ausgerichtet, d. h. Flächen, die für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion erfüllen bzw. keinen Ausgleichsraum darstellen, werden entsprechend gering bewertet. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion zu einem späteren Zeitpunkt jedoch ändern und muss dann neu bewertet werden.

**Tabelle 15:** Matrix zur Verknüpfung der Bewertung von Tag- und Nachtsituation bei Flächen des Freiraums in der Gesamtbetrachtung

| Grün-<br>flächen      |   | Bedeutung nachts |   |   |   |
|-----------------------|---|------------------|---|---|---|
|                       |   | 1                | 2 | 3 | 4 |
| Bedeutung<br>tagsüber | 1 | 1                | 2 | 3 | 3 |
|                       | 2 | 1                | 2 | 3 | 4 |
|                       | 3 | 2                | 3 | 4 | 5 |
|                       | 4 | 3                | 3 | 4 | 5 |

Für die im Rahmen der Gesamtbetrachtung neu durchgeführte Bewertung des Freiraums in der Nacht steht der Kaltluftaustausch im Fokus. So hängt hier die Bedeutung der Flächen vor allem von ihrer Entfernung zu belasteten Siedlungsräumen (ohne Gewerbenutzung) ab. Grünflächen im Umfeld belasteter Wohnflächen kommt grundsätzlich eine hohe Bedeutung zu. Zusätzlich zu ihrem Kaltluftliefervermögen wirken sie ausgleichend auf das thermische Sonderklima in ihrem meist dicht bebauten Umfeld. Je stärker die Wohnfläche belastet ist, desto wichtiger sind Ausgleichsflächen des Freiraums, sodass die maximale Entfernung zu den Wohngebieten entsprechend differenziert wird. Der verwendete Bewertungsschlüssel wird im Folgenden durch die vereinfachte Darstellung in Abbildung 13 sowie die Erläuterungen in Tabelle 16 aufgezeigt.



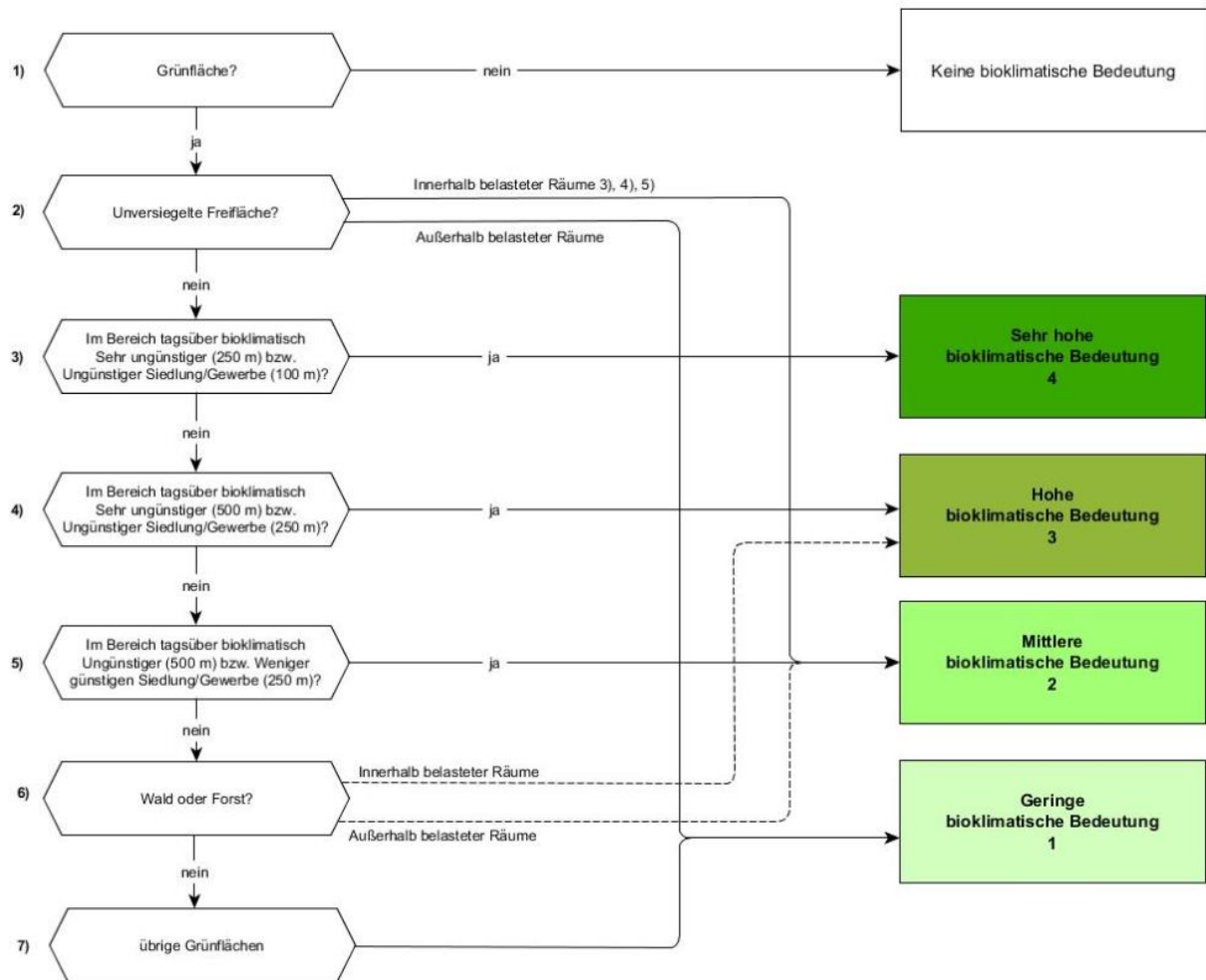
**Abbildung 13:** Ablaufschema zur Bewertung der bioklimatischen Bedeutung des Freiraums in der Nacht

**Tabelle 16:** Erläuterungen zur Bewertung der bioklimatischen Bedeutung des Freiraums in der Nacht

| Klasse | Belastungsstufe                    | Bewertungsschlüssel                                                                                                                                                                   |
|--------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4      | sehr hohe bioklimatische Bedeutung | a) Flächen des Freiraums, die im Bereich von Siedlungsflächen mit <i>starker</i> (bis 250 m Entfernung) bzw. <i>mäßiger nächtlicher Überwärmung</i> liegen (bis 100 m).               |
| 3      | hohe bioklimatische Bedeutung      | b) Flächen des Freiraums, die im Bereich von Wohnflächen mit <i>starker</i> (> 250 - 500 m Entfernung) bzw. <i>mäßiger nächtlicher Überwärmung</i> liegen (> 100 - 250 m Entfernung). |
|        |                                    | c) Flächen des Freiraums, die an die Flächen aus a) bzw. b) angrenzen (Toleranz 50 m) und einen mindestens <i>hohen Kaltluftvolumenstrom</i> aufweisen.                               |

| Klasse | Belastungsstufe                   | Bewertungsschlüssel                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2      | mittlere bioklimatische Bedeutung | d) Flächen des Freiraums, die an die Flächen aus a) bzw. b) angrenzen (Toleranz 50 m) und einen <i>mittleren</i> bzw. <i>geringen Kaltluftvolumenstrom</i> aufweisen.                                                                                              |
|        |                                   | e) Waldflächen, sofern sie nicht in eine der vorgenannten Kategorien fallen. Auf diese Weise kommt Wäldern in jedem Fall eine mindestens mittlere bioklimatische Bedeutung zu.                                                                                     |
| 1      | geringe bioklimatische Bedeutung  | f) Kleine Flächen des Freiraums (< 100 m <sup>2</sup> ).<br>In Bezug auf das Kaltluftliefervermögen einer Grünfläche ist auch die Größe der Fläche von Bedeutung, da diese Einfluss auf die thermische Reichweite hat (vgl. KUTTLER 2011, Glossar).                |
|        |                                   | g) Übrige Flächen des Freiraums, die keine der genannten Kriterien erfüllen sowie Tagebauflächen deren Fläche > 1 km <sup>2</sup> umfasst, da diese aufgrund ihrer topographischen Eigenschaft als Grube kaum Austauschströmungen mit umgebenden Flächen zulassen. |

Für den Tag basiert bei der Gesamtbetrachtung die Bewertung des Freiraums hauptsächlich auf der Entfernung – und damit indirekt auch der Erreichbarkeit/Nutzbarkeit – zu belasteten Wohn- und Gewerbegebieten. Somit kommt Ausgleichsflächen im Umfeld belasteter Siedlungsräume grundsätzlich eine hohe Bedeutung zu. Je stärker ein Siedlungsraum belastet ist, desto wichtiger sind schattenspendende Grünflächen als Rückzugsorte, sodass die Maximal-Entfernung zu diesen entsprechend differenziert wird. Insbesondere Bäume können durch ihren Schattenwurf für ein angenehmeres Aufenthaltsklima sorgen, da der höhere Bewuchs den Strahlungseinfluss deutlich vermindert. Somit stellen Wälder aufgrund ihres dichten Baumbestandes (zumeist größere) Flächen mit deutlich herabgesetzter Wärmebelastung dar und können am Tag als Rückzugsorte dienen. Aus diesem Grund wird z. B. Wäldern innerhalb belasteter Räume grundsätzlich eine mindestens hohe Bedeutung zugewiesen. Freiflächen hingegen wird keine hohe Bedeutung zugesprochen: Aufgrund der ungehinderten Einstrahlung heizen sich unversiegelte, insbesondere trockene, Freiflächen am Tage ähnlich stark auf wie versiegelte Flächen. Freiflächen können jedoch bei übergeordnetem Luftaustausch überströmt werden und so für Durchlüftung sorgen, sodass Freiflächen innerhalb belasteter Siedlungsräume eine mittlere Bedeutung zugesprochen wird. Der Bewertungsschlüssel, der der Einstufung im Einzelnen zugrunde liegt, wird in der vereinfachten Darstellung in Abbildung 14 sowie durch die Erläuterungen in Tabelle 17 dargestellt.



**Abbildung 14:** Ablaufschema zur Bewertung zur bioklimatischen Bedeutung des Freiraums am Tag

**Tabelle 17:** Erläuterungen zur Bewertung der bioklimatischen Bedeutung des Freiraums am Tag

| Klasse | Belastungsstufe                    | Bewertungsschlüssel                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4      | sehr hohe bioklimatische Bedeutung | a) Flächen des Freiraums, die im Bereich von Wohn-/Gewerbeflächen mit einer <i>sehr ungünstigen</i> (bis 250 m Entfernung) bzw. <i>ungünstigen bioklimatischen Situation</i> liegen (bis 100 m).                                                                               |
| 3      | hohe bioklimatische Bedeutung      | b) Flächen des Freiraums, die im Bereich von Wohn-/Gewerbeflächen mit einer <i>sehr ungünstigen</i> (> 250 - 500 m Entfernung) bzw. <i>ungünstigen bioklimatischen Situation</i> liegen (> 100 - 250 m).<br>c) Wald- und Forstflächen innerhalb der in d) ermittelten Flächen. |
| 2      | mittlere bioklimatische Bedeutung  | d) Flächen des Freiraums (ohne Wald- und Forstflächen), die im Bereich von Wohn-/Gewerbeflächen mit einer <i>ungünstigen</i> (> 250 - 500 m Entfernung) bzw. <i>weniger günstigen bioklimatischen Situation</i> liegen (bis 250 m).                                            |

| Klasse | Belastungsstufe                  | Bewertungsschlüssel                                                                                                                    |
|--------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        |                                  | e) Wald- und Forstflächen die außerhalb aller vorgenannten Kategorien liegen.                                                          |
|        |                                  | f) Unversiegelte Freiflächen ohne oder mit geringem Vegetationsbestand die innerhalb der in a), b) oder d) ermittelten Flächen liegen. |
| 1      | geringe bioklimatische Bedeutung | g) Flächen des Freiraums inkl. unversiegelter Freiflächen, die keine der oben genannten Kriterien erfüllen.                            |

#### 4.4 Klimawandel-Vorsorgebereiche

Die bisherigen Ausführungen zur Methodik der Klimaanalyse NRW mit den Klimaanalysekarten der Nachtsituation, der Tagsituation und der Gesamtbetrachtung beziehen sich auf die Bewertung der thermischen Verhältnisse in der Ist-Situation. Sie stellen also heutige Belastungen und Ausgleichspotenziale dar. Um die Auswirkungen des fortschreitenden, anthropogenen Klimawandels (vgl. Kapitel 3.3) auf die bioklimatische Belastung der Bevölkerung in NRW zu verdeutlichen, werden darüber hinaus in den Klimaanalysekarten Klimawandel-Vorsorgebereiche dargestellt. Somit kann die Bedeutung von Planungsaussagen für diese Flächen gesteigert werden und in die Priorisierung zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen mit einbezogen werden (VDI 2015).

Die Darstellung der Klimawandel-Vorsorgebereiche erfolgt ebenfalls zum einen getrennt für die Tag- und Nachtsituation, zum anderen als Gesamtbetrachtung. Die Klimawandel-Vorsorgebereiche beziehen sich dabei auf thermisch belastete Siedlungsgebiete, für die erwartet wird, dass der Klimawandel und damit verbunden der Anstieg der Temperaturen eine Veränderung der Bewertung zur Folge haben wird. Die Klimawandel-Vorsorgebereiche werden dabei als zusätzliche Inhalte in die Klimaanalysekarte für die Nachtsituation, die Tagsituation und die zusammenfassende Gesamtbetrachtung integriert.

Grundlage für die Ausweisung ist die aus den regionalisierten Klimaprojektionen für NRW abgeleitete Erwartung, dass die durchschnittliche Jahres- sowie Sommertemperatur in NRW bis zum Jahr 2050 um etwa 1 K ansteigen wird (vgl. Kapitel 3.3). Konkret werden mit den Vorsorgebereichen jene Siedlungsbereiche dargestellt, die nach einer pauschalen Beaufschlagung auf die in der Klimaanalyse Nacht- bzw. Tagsituation ermittelte Belastung neu in die jeweils höchste Belastungsklasse einzuordnen wären. Der pauschale Aufschlag wird für die Nachtsituation auf 1 °C Lufttemperatur festgelegt. Der Aufschlag für die bei der Beschreibung der Belastung am Tage verwendeten PET-Werte wird auf 1,5 °C festgelegt, was in etwa einer Zunahme der Lufttemperatur von 1 °C entspricht.

In der Gesamtbetrachtung werden nicht nur die Flächen als Vorsorgebereiche dargestellt, die durch den beschriebenen Temperatureaufschlag neu in die höchste Belastungsklasse (Klasse 5) aufsteigen, sondern auch die Flächen, die neu in der zweithöchsten

Belastungsklasse (Klasse 4) einzuordnen sind. Für die Ableitung der Klimawandel-Vorsorgebereiche in der Gesamtbetrachtung wird entsprechend der Bewertungsmethodik für die thermische Belastung (vgl. Kapitel 4.3.3) das matrixbasierte Bewertungsschema (Tabelle 13) angewendet. Als Basis dienen jedoch die „beaufschlagten“ Klassen der Klimaanalyse der Nacht- und Tagsituation.

## **4.5 Anzahl betroffener Menschen**

Im Rahmen der Klimaanalyse NRW wird auch untersucht, wie viele Menschen in NRW von den ermittelten klimatischen Belastungssituationen in den Siedlungsräumen betroffen sind. Aufgrund fehlender landesweiter Daten zur Bevölkerung und ihrer detaillierten räumlichen Verteilung (z. B. auf Ebene von Gebäuden, Blocks oder Quartieren) wird die Anzahl der Betroffenen mit Hilfe gemeindespezifischer Bevölkerungsdichten näherungsweise abgeschätzt.

Die Bevölkerungsdichte wird bestimmt, indem die Anzahl der Einwohner einer Gemeinde (Datenquelle: IT NRW, Stand 31.12.2015) ins Verhältnis zur jeweiligen Siedlungsfläche gesetzt wird. Zur Siedlungsfläche zählen dabei sowohl Wohn- als auch Gewerbe und Industrieflächen (ATKIS Datensätze „Wohnbaufläche“, „Industrie- und Gewerbefläche“, „Fläche gemischter Nutzung“, „Fläche besonderer funktionaler Prägung“, „Bauwerk im Verkehrsbereich“). Anschließend werden zur Auswertung der jeweiligen Betroffenenzahlen in den einzelnen Belastungsklassen für jede Gemeinde die Flächengröße der jeweiligen Klasse mit der gemeindespezifischen Bevölkerungsdichte je Hektar Siedlungsfläche multipliziert.

Dieser Ansatz liefert Orientierungswerte und geht vereinfachend von einer auf der gesamten Siedlungsfläche einer Gemeinde einheitlichen Bevölkerungsdichte bzw. einer gleichmäßigen Einwohnerverteilung aus. Die Abschätzung der Anzahl der von bestimmten Belastungen betroffenen Menschen ist somit mit Ungenauigkeiten verbunden. Diese erscheinen jedoch vor dem Hintergrund der landesweiten Betrachtung unvermeidbar und müssen im Einzelfall vor Ort auf Ebene von Stadtbezirken, Quartieren oder Straßenzügen konkretisiert werden.

## 5. Ergebnisse der Klimatopausweisung

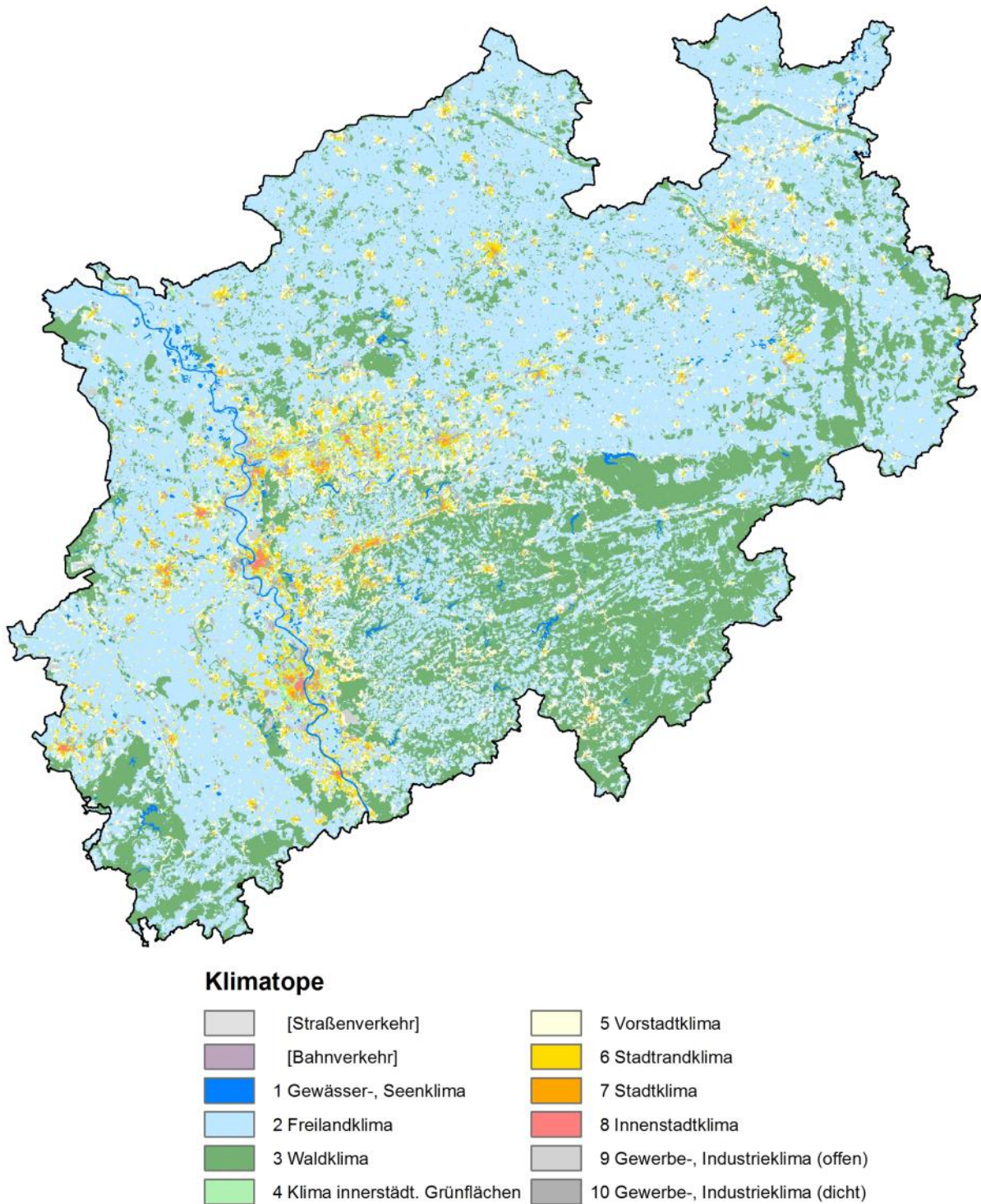
Die Zuordnung von Flächen zu den verschiedenen Klimatoptypen erfolgt wie in Kapitel 4.1 beschrieben hauptsächlich auf Basis der Flächennutzungsstruktur. Die Ergebnisse der Klimatopausweisung sind in der Klimatopkarte (Abbildung 15) abgebildet, die jeweiligen Flächenanteile der einzelnen Klimatoptypen in NRW sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Flächenanteile der einzelnen Klimatoptypen an der Gesamtfläche Nordrhein-Westfalens

| Nr. | Klimatoptyp                 | Anteil in % |
|-----|-----------------------------|-------------|
| 1   | Gewässer                    | 1,2         |
| 2   | Freiland                    | 51,8        |
| 3   | Wald                        | 25,5        |
| 4   | innerstädtische Grünflächen | 4,2         |
| 5   | Vorstadt                    | 9,5         |
| 6   | Stadttrand                  | 3,4         |
| 7   | Stadt                       | 0,2         |
| 8   | Innenstadt                  | 0,1         |
| 9   | Gewerbe offen               | 2,1         |
| 10  | Gewerbe dicht               | 1,4         |

In der NRW-weiten Übersicht sieht man den hohen Anteil an Freilandklimatopen im Münsterland sowie an Waldklimatopen in den Mittelgebirgsbereichen (Sieger- und Sauerland, Eifel, Weserbergland). Die großen Ballungsgebiete entlang von Rhein und Ruhr sind geprägt von einem hohen Anteil an Siedlungs-Klimatoptypen (Vorstadt- bis Innenstadtklimatop, Gewerbeklimatop, Bahn- und Straßenverkehr). Dennoch sind die mit hohen thermischen Belastungen verbundenen Innenstadtklimatope nicht ausschließlich auf die dicht besiedelten Großstädte beschränkt. Auch kleinere Gemeinden mit unterschiedlich hoher Einwohnerdichte weisen Innenstadtklimatopbereiche auf. Diese sind dort meist in hoch versiegelten, dicht bebauten Altstadtkernen zu finden.

Der höchste Anteil von Innenstadt- und Stadtklimatopen an der Gesamtstadtdfläche ist in Düsseldorf zu finden. Köln, Herne, Wuppertal, Gelsenkirchen, Krefeld, Essen, Mönchengladbach, Duisburg, Aachen und Bonn weisen ebenfalls einen hohen Anteil auf. Gemeinden, die weder einen nennenswerten Anteil an Innenstadt- noch an Stadtklimatopen aufweisen, sind meist Gemeinden mit einer geringen Bevölkerungszahl und -dichte. Als Beispiele hierfür können Saerbeck oder Nettersheim genannt werden.



**Abbildung 15:** Klimatopkarte

Die Ergebnisse der Klimatopausweisung können im Fachinformationssystem Klimaanpassung unter [www.klimaanpassung.nrw.de](http://www.klimaanpassung.nrw.de) genauer betrachtet werden.

## **6. Ergebnisse der Klimamodellsimulation**

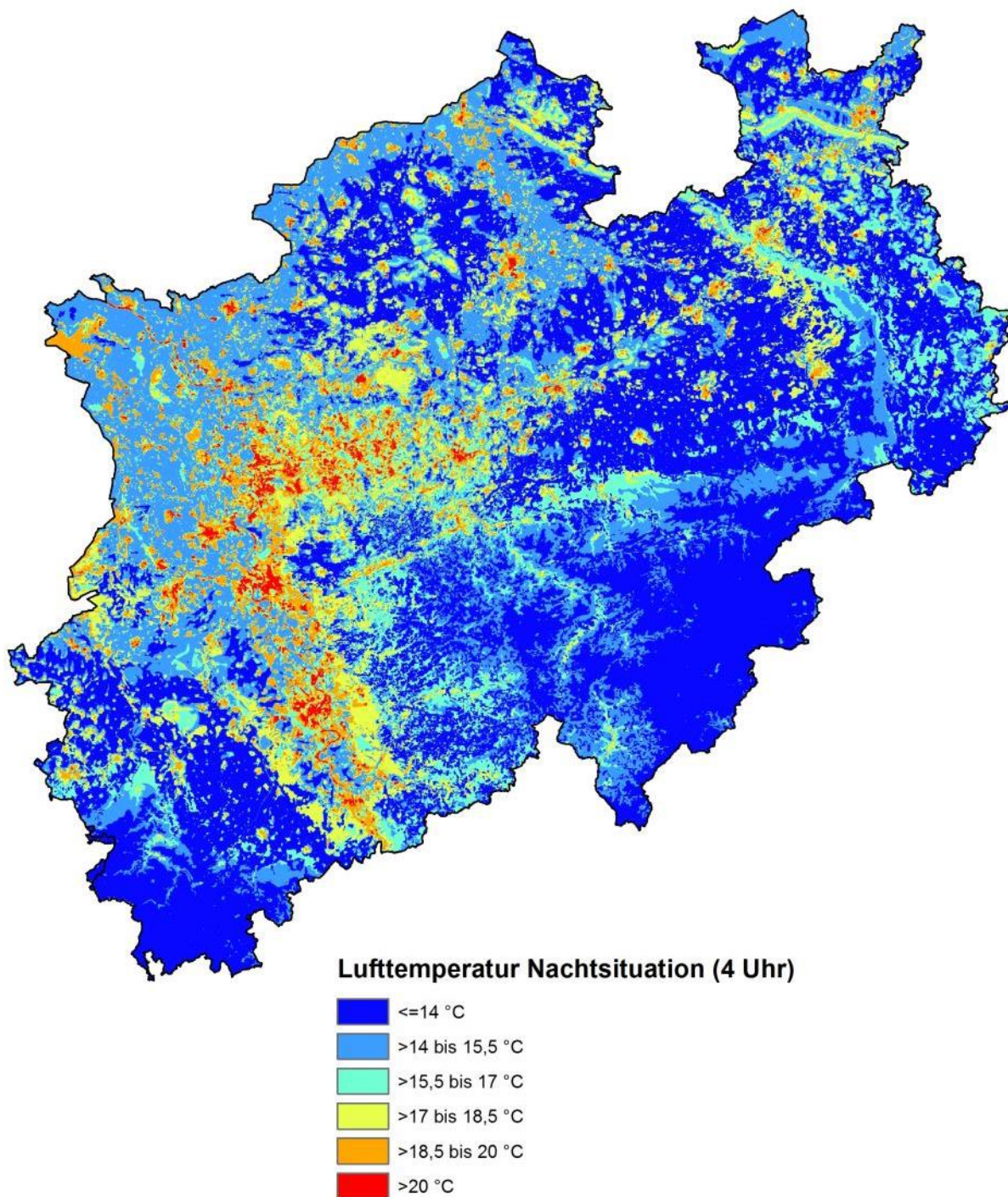
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Klimasimulation mit dem Modell FITNAH zu den Parametern Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie PET (Tagsituation) erläutert. Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen, (2 m über Grund) und für die zugrunde gelegte typische, sommerliche, autochthone Wetterlage (u. a. 20 °C um 21 Uhr; vgl. Kapitel 3.2.3).

### **6.1 Nachtsituation**

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen sowie die räumliche Ausprägung und Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abzuschätzen. Als Auswertungszeitpunkt für die Nachtsituation wird 4 Uhr ausgewählt, da die Temperaturunterschiede zwischen verschiedenen Flächennutzungsstrukturen und damit auch die lokalen Windsysteme zu diesem Zeitpunkt meist am stärksten ausgebildet sind.

#### **6.1.1 Nächtliches Lufttemperaturfeld**

Das sich um 4 Uhr in der Nacht einstellende Lufttemperaturfeld in Nordrhein-Westfalen umfasst unter gleichen großräumigen Rahmenbedingungen (Kapitel 3.2.3) eine sehr große Spannweite von ca. 15 K. Hierbei werden die Minimalwerte von unter 10 °C über den stadtfernen Flächen des Freiraums in Hochlagen von Sauerland, Hohes Venn und Eifel erreicht, während in verdichteten Innenstadtbereichen urbaner Zentren und Agglomerationsräumen sowie in großen Industriegebieten Lufttemperaturen von bis zu 22 °C auftreten (Abbildung 16). Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen zum Zeitpunkt 4 Uhr nachts bei 14,7 °C.



**Abbildung 16:** Nächtliches Lufttemperaturfeld

Die Temperaturverteilung ist überdies auch innerhalb der bebauten Gebiete räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Kernbebauung sowie Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Die höchsten Temperaturen innerhalb der Bebauung treten in den Kernbereichen der Innenstädte auf und resultieren aus dem großen Bauvolumen sowie dem hohen Oberflächenversiegelungsgrad im Stadtzentrum. In nahezu allen Stadtgebieten der Westfälischen Bucht und dem Niederrheinischen Tiefland treten nächtliche Temperaturen von über  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf. In den

Innenstadtbereichen von Düsseldorf und Köln werden in Teilgebieten sogar Temperaturen von über 22 °C erreicht.

Die sich an die Innenstadtbereiche der Großstädte anschließende und in den Stadtteilzentren auftretende Block- und Blockrandbebauung besitzt mit ca. 20 bis knapp 21 °C ebenfalls ein gegenüber dem Flächenmittel deutlich erhöhtes Temperaturniveau. Dies trifft noch mehr auf Industrie- und Gewerbeflächen zu, die vor allem im Ruhrgebiet, aber auch entlang des Rheins zwischen Duisburg und Köln weite Areale charakterisieren und aufgrund ihrer hohen Versiegelung sowie teilweise erheblicher Mengen emittierter Abwärme nächtliche Tiefstwerte von über 21 °C erreichen. Diesbezüglich sticht insbesondere auch der Chemiepark Marl aufgrund seines räumlichen Ausmaßes mit Temperaturen von über 21 °C deutlich hervor.

Die Randbereiche der Großstädte, sowie die außerstädtischen Siedlungsflächen im gesamten Landesgebiet sind vermehrt durch eine ausgedehnte Einzel- und Reihenhausbauung geprägt. Diese Bauungsstruktur weist unter den Siedlungsflächen mit durchschnittlich 16,7 °C das geringste nächtliche Temperaturniveau auf. Die durch Abstandsflächen geprägte Zeilenbebauung, wie sie flächenhaft in allen größeren Siedlungen auftreten, liegt mit durchschnittlich 18,4 °C als nächtliche Lufttemperatur zwischen den übrigen Strukturtypen.

Unbebaute, vegetationsgeprägte Flächen zeigen hingegen deutlich geringere Temperaturwerte. Die niedrigsten Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet mit unter 10 °C sind erwartungsgemäß über den höhergelegenen Gebieten im gebirgigen Süden und Südosten des Landes zu verzeichnen. Ähnlich geringe Werte können kleinräumig in Senkenbereichen auftreten, in denen sich Kaltluft aufgrund ihrer, verglichen mit wärmeren Luftmassen, höheren Dichte sammelt. In den ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Arealen der Westfälischen Bucht und im Niederrheinischen Tiefland treten häufig Werte von bis zu 15 °C auf.

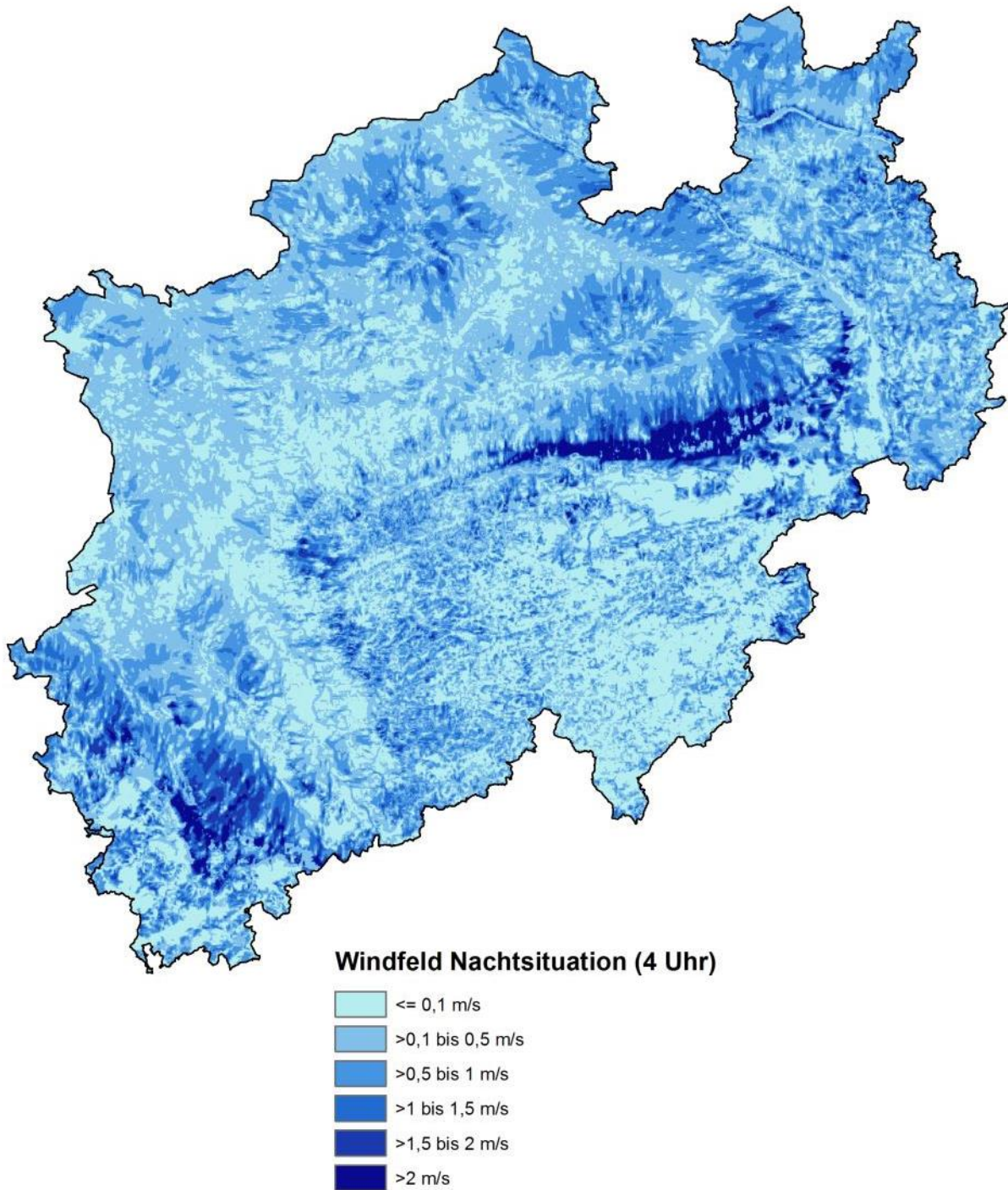
Waldareale besitzen in Abhängigkeit von der Höhenlage ein vergleichsweise hohes Temperaturniveau. Außerhalb der Siedlungsbereiche ist hier die bodennahe nächtliche Temperatur um 2 bis 3 K höher als im benachbarten Freiland. Das Kronendach dämpft die nächtliche Ausstrahlung und damit auch eine stärkere Abnahme der bodennahen Lufttemperatur.

Es ist darauf hinzuweisen, dass innerstädtische Grünflächen in der hier verwendeten Rasterauflösung von 100 m x 100 m aufgrund ihres oft geringen Flächenausmaßes meist nicht abgebildet sind. Generell aber weisen Grünflächen im Stadtgebiet im Vergleich mit den häufig weitläufigeren Freiraumflächen des Umlandes, abhängig von ihrer Größe und Form, höhere Temperaturwerte auf. Hier wird deutlich, dass diese Flächen in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind und daher die vergleichsweise geringen Temperaturen des Umlandes nicht erreicht werden. Dennoch treten auch die vegetationsgeprägten Areale in den Stadtgebieten mit – im Vergleich zu den überwärmten bebauten Flächen – niedrigeren Temperaturen hervor.

### **6.1.2 Autochthones Windfeld (Kaltluftströmungsfeld)**

Die variable bodennahe Lufttemperaturverteilung bedingt horizontale und vertikale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale, thermisch angetriebene Windsysteme sind (vgl. Kapitel 3.1.3) und somit das autochthone Windfeld ausbilden. Die wichtigsten nächtlichen Luftströmungen dieser Art sind zum einen gravitationsbedingte Berg- und Hangabwinde, zum anderen die als direkte Ausgleichsströmungen vom hohen zum tiefen Luftdruck aufzufassenden Flurwinde.

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes sowie der Luftaustauschprozesse an den Siedlungsrändern. Die für eine Höhe von 2 m über dem Boden ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten sind für das Landesgebiet erwartungsgemäß sehr divers: Sie reichen von vollkommener Windstille in Teilen der Stadtgebiete bis zu Maximalwerten von über 3,0 m/s, beispielsweise im Bereich der nördlichen Abdachung des Sauerlands, wo die Strömung orographisch verstärkt wird (Abbildung 17). In weniger reliefgeprägten Bereichen des Landes erreichen Flurwinde vor allem in Gebieten mit starken Temperaturdifferenzen höhere Geschwindigkeiten, so zum Beispiel über großen Freiflächen in der Nähe von überwärmten Siedlungsgebieten. Aber auch in den weniger großflächigen Freiräumen zwischen den dichter besiedelten Arealen der Großstädte ist eine erkennbar erhöhte Windgeschwindigkeit zu verzeichnen. Überdies sind auch Leitbahnen teilweise gut erkennbar. In Richtung der Stadtzentren nimmt die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der Bebauung sukzessive ab, vornehmlich aufgelockerte Siedlungsbereiche werden teilweise noch wirksam durchlüftet ( $> 0,1$  m/s), während in weiten Teilen der Zentren keine wirksame Strömung mehr erreicht wird. Wo keine Höhenunterschiede zum Tragen kommen, ist die Strömungsrichtung der Flurwinde von Flächen des Freiraums (Kaltluftentstehungsgebiete) in Richtung der erwärmten überbauten Flächen deutlich zu erkennen.

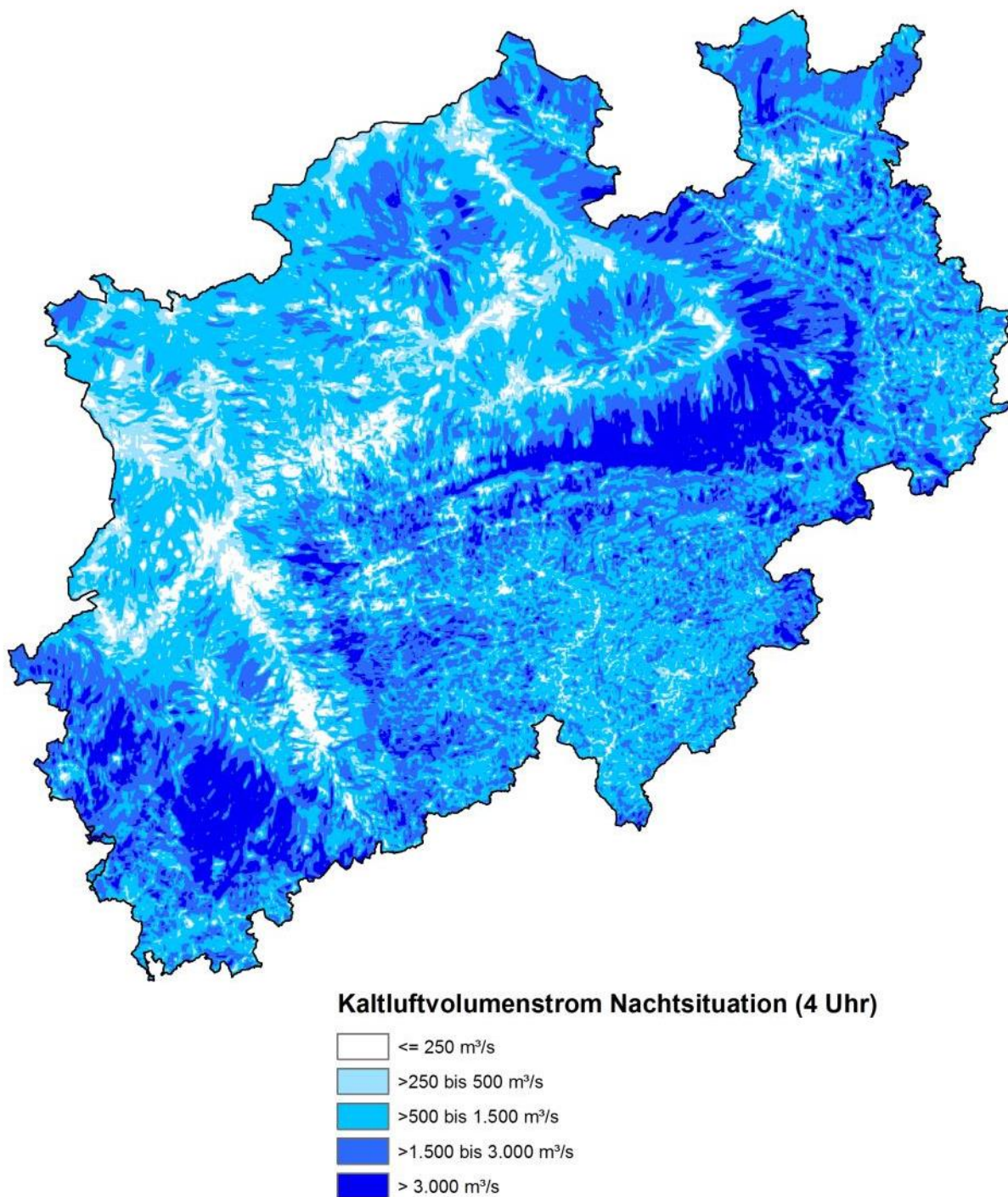


**Abbildung 17:** Nächtliches Windfeld

### 6.1.3 Kaltluftvolumenstrom

Zur Beschreibung der potenziellen Kühl- und Ausgleichswirkung des Freiraums kann nicht allein die Windgeschwindigkeit als Parameter herangezogen werden. Eine wesentliche Rolle spielt auch die Mächtigkeit (d. h. die Höhe) der Kaltluftschicht. Daher wird zur Bewertung des Freiraums der Kaltluftvolumenstrom als weiterer Klimaparameter herangezogen.

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms in Nordrhein-Westfalen verhält sich im Wesentlichen kongruent zu jener des bereits dargestellten Strömungsfeldes, sodass die dort beschriebenen Ergebnisse übertragbar sind: Während im überwiegenden Teil der städtischen Bereiche kaum Kaltluftströmungen feststellbar sind ( $< 250 \text{ m}^3/\text{s}$ ), sind vor allem die großflächigen reliefbedingten Kaltluftabflüsse in den Gebieten mit hoher Reliefenergie und weiträumigen Freiflächen (bis knapp  $9.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) gut erkennbar (Abbildung 18).

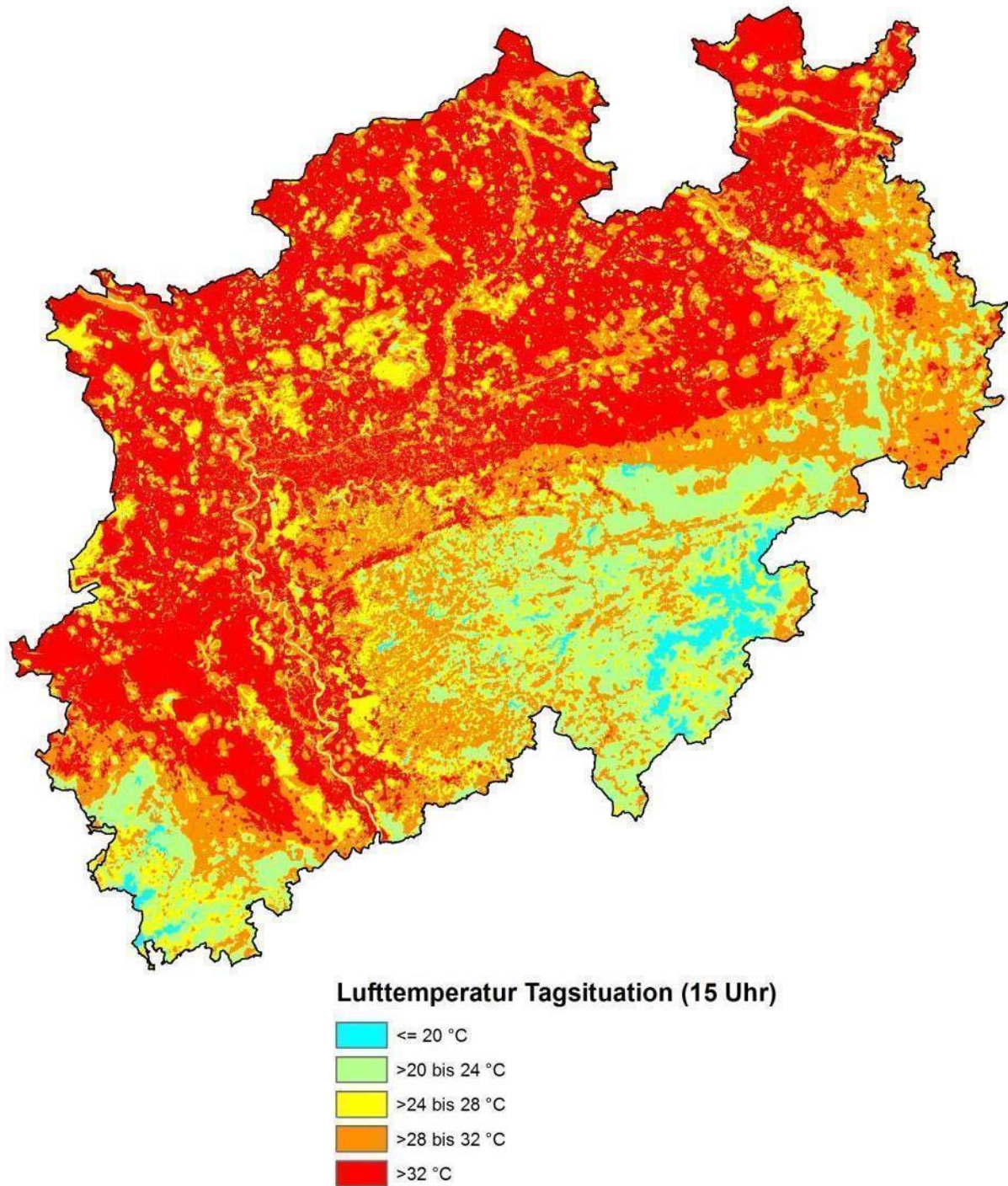


**Abbildung 18:** Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom

## 6.2 Tagsituation: Thermische Belastung (PET)

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. In der Klimaanalyse NRW wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET verwendet (vgl. Kapitel 3.1.2).

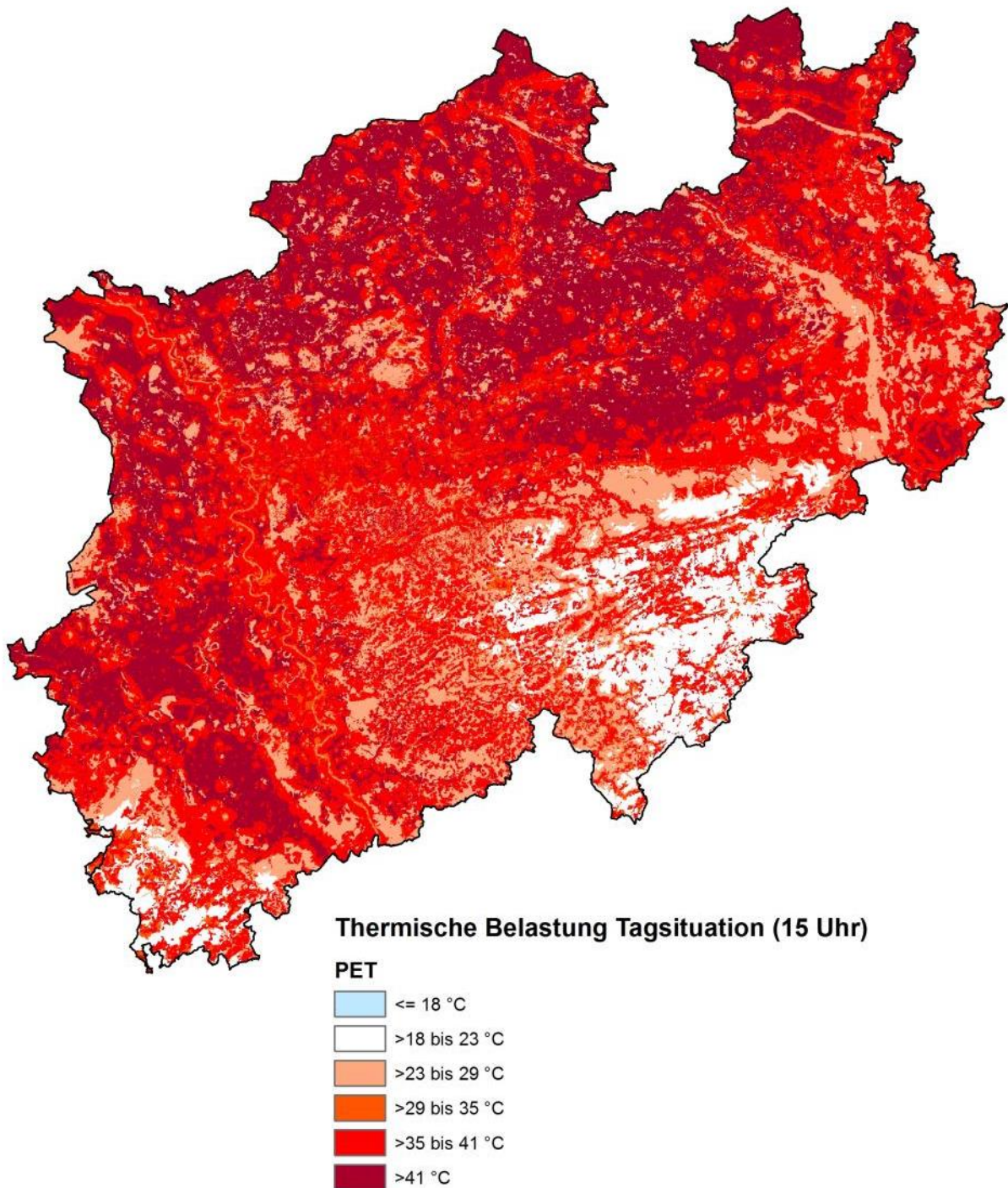
Im Vergleich zur Lufttemperatur (Abbildung 19) weist die PET zum Zeitpunkt 15 Uhr erwartungsgemäß eine höhere Spannweite im Untersuchungsgebiet auf. Dies repräsentiert auch den Einfluss der weiteren auf das thermische Empfinden wirkenden Faktoren, in erster Linie die vorhandene Sonneneinstrahlung. PET-Werte, die *keine Wärmebelastung* repräsentieren ( $PET \leq 23 \text{ °C}$ ) stellen hierbei eine Ausnahme dar und sind einzig in den Waldgebieten der Mittelgebirge im Süden und Südosten (Eifel, Sauerland, Rothaargebirge) zu finden (Abbildung 20). Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit einer *schwachen Wärmebelastung* hervor (PET zwischen  $23 \text{ °C}$  und  $29 \text{ °C}$ ), da der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m über Grund unterhalb des Kronendachs liegt, sodass dieser Bereich vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt wird.



**Abbildung 19:** Lufttemperatur (Tagsituation)

Es zeigt sich dabei, dass die auftretende Wärmebelastung in den Siedlungsräumen am Tage vor allem von der Verschattung beeinflusst wird, was auf die starke Abhängigkeit der PET von der Strahlungstemperatur zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 3.1.2). Im Gegensatz zur Situation in der Nacht fällt die thermische Belastung in innerstädtischen Siedlungsbereichen infolge der Verschattungseffekte der dichten Bebauung weniger stark aus, hier liegt meist eine *mäßige Wärmebelastung* vor (PET zwischen 29 °C und 35 °C). Dem stehen zum Teil stark besonnte Areale des Freiraums gegenüber, wo die Wärmebelastung mit einer PET von

deutlich mehr als 35 °C häufig als *stark* einzustufen ist. Die höchste Belastung tritt über den weitläufigen landwirtschaftlich genutzten Flächen im Norden des Bundeslandes auf (PET bis über 44 °C).



**Abbildung 20:** Thermische Belastung (PET) (Tagsituation)

## 7. Ergebnisse der Klimaanalyse

Die Klimaanalysekarten treffen auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Klimamodellierung Aussagen über die klimaökologisch relevanten Strukturen in Nordrhein-Westfalen. Dabei werden die Nacht- und Tagsituation sowohl getrennt voneinander betrachtet und kartographisch dargestellt als auch in einer Gesamtbetrachtung als Karte zusammengefasst. Der Aufbau der Kartenlegende folgt dem Konzept des Ausgleichsraum-Wirkraum-Gefüges, wobei im Folgenden näher auf die einzelnen Inhalte eingegangen wird.

Als Grundlage für die Analyse und Bewertung der siedlungsklimatischen Zusammenhänge dienen die modellierten meteorologischen Parameter der Klimamodellsimulation. Methodischer Ausgangspunkt für die Analyse der klimaökologischen Funktionen ist die Gliederung der Landesfläche in verschiedene Raumkategorien:

- mehr oder weniger stark thermisch belastete Siedlungsräume (Wirkräume)
- kaltluftproduzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen im Freiraum (Ausgleichsräume)
- Luftaustauschprozesse, welche allein thermisch (Flurwind) oder thermisch-orographisch angetrieben (Kaltluftabfluss) sein können und teils erhebliche Entfernungen überbrückend Wirk- und Ausgleichsräumen miteinander verbinden.

Der Siedlungsraum (Wirkraum) umfasst alle Wohn-, Gewerbe- und Industrieflächen. Zu den Ausgleichsräumen zählen die Flächen des Freiraums, und damit sowohl außerhalb von Siedlungen gelegene, vegetationsgeprägte oder weitgehend unversiegelte Flächen als auch größere, innerorts gelegene Grünflächen wie Parks, Landschaftsgärten oder Stadtwälder. Verkehrsflächen (Straßen, Bahnverkehrsanlagen) sowie Wasserfläche werden keiner Bewertung unterzogen.

Die abgegrenzten klimatischen Funktionsräume sollen dazu beitragen

- die Ausgleichsflächen entsprechend ihres Kaltluftliefervermögens zu qualifizieren,
- die Wirkräume hinsichtlich ihrer bioklimatischen Belastung zu charakterisieren, sowie
- die regional und lokal bedeutsamen Luftaustauschbeziehungen zu lokalisieren und in ihrer räumlichen Ausprägung und ihrer bioklimatischen Bedeutung zu bewerten.

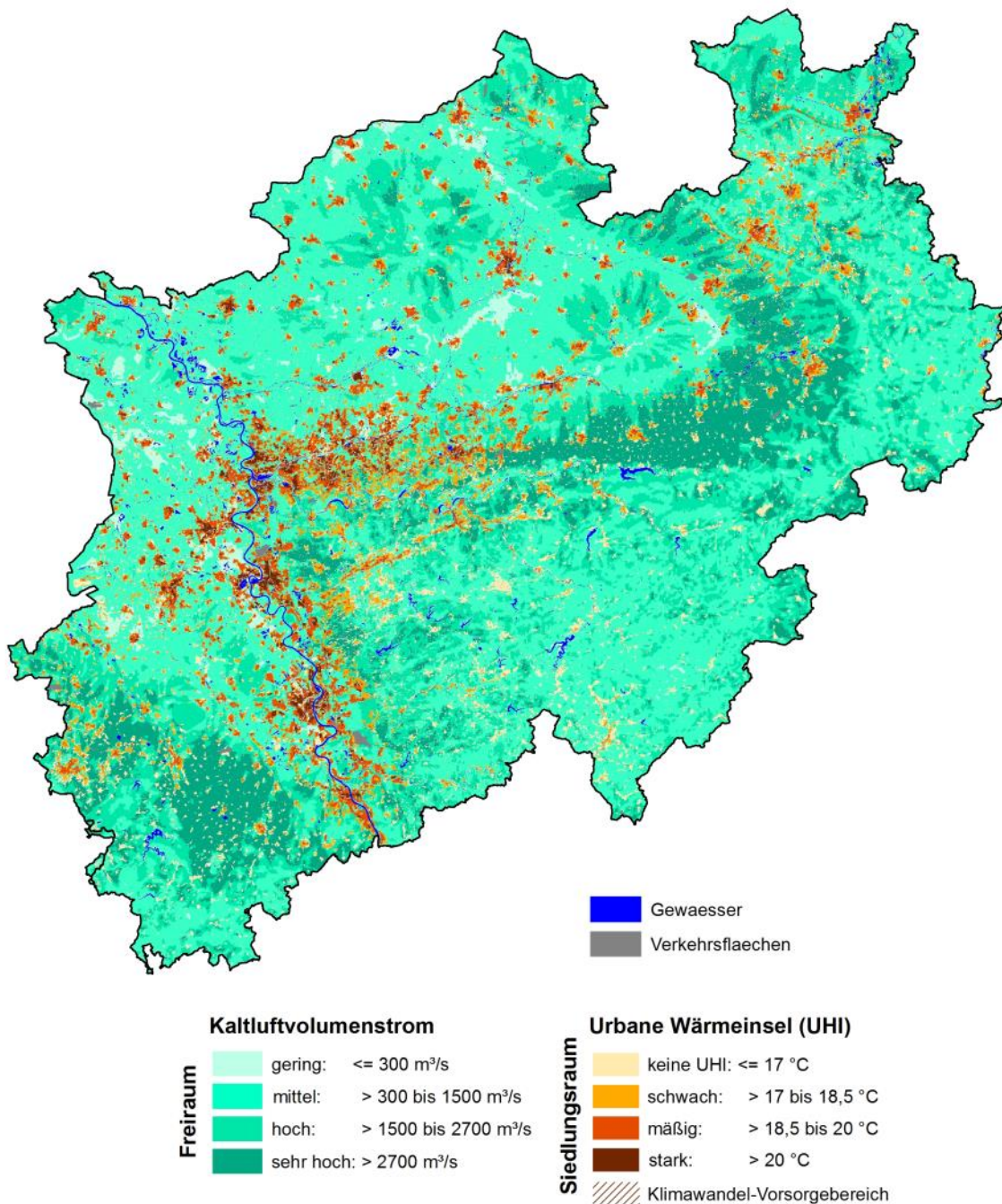
Auf Basis der in der Zusammenschau aus Tag- und Nachtsituation bewerteten Raumstrukturen werden Handlungsempfehlungen zum Erhalt oder zur Entwicklung der Flächen abgeleitet. Durch die konkrete Zuordnung planungsrelevanter Aussagen zu den wichtigen, das klimaökologische Prozessgeschehen steuernden Strukturelementen, wie z. B. Kaltluftentstehungsflächen, können Flächen benannt werden, die in ihrem Bestand gesichert und vor negativen Einflüssen geschützt werden müssen. Andererseits werden Belastungsräume mit einem Mangel an Durchlüftung identifiziert, welche mithin sanierungsbedürftig sind.

Dieses Vorgehen im Rahmen der Klimaanalyse NRW unterscheidet sich in zwei Punkten vom bisher in der Praxis verbreiteten, sich im Wesentlichen auf die VDI Richtlinie 3787, Blatt 1 stützenden Vorgehen. Zum einen wird das Prozessgeschehen (Luftaustausch zwischen Wirk- und Ausgleichsräumen) nicht nur kartographisch dargestellt, sondern auch in die Bewertung mit einbezogen. Das bedeutet, dass keine rein statische Betrachtung auf der Basis von Klimatopen erfolgt, für welche unabhängig von ihrer Lage, entsprechend der vorherrschenden Nutzung, ein einheitliches Mikroklima angenommen wird. Zum anderen wird nicht nur ein Zeitraum (zumeist die Nachtsituation) betrachtet, sondern es werden sowohl Tag- und Nachtsituation berücksichtigt als auch eine zusammenfassende Gesamtbetrachtung erstellt. Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist davon auszugehen, dass insbesondere die bioklimatischen Verhältnisse während des Tages für die Hitzebelastung der Bevölkerung an Bedeutung gewinnen werden. Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung eingesetzte Methode bietet den Vorteil, dass das Luftaustauschgeschehen und die Verhältnisse der bodennahen Atmosphäre umfassend abgebildet werden. Somit liegt eine räumlich hochauflösende Information und Bewertung der klimaökologischen Gegebenheiten sowohl für die Nacht- und die Tag-Situation als auch als Gesamtbetrachtung vor, welche für die verschiedenen Planungsebenen bereitgestellt wird.

Sämtliche in diesem Kapitel dargestellten Karten werden im Fachinformationssystem Klimaanpassung ([www.klimaanpassung.nrw.de](http://www.klimaanpassung.nrw.de)) eingestellt und können dort in einer hohen räumlichen Auflösung betrachtet werden.

## **7.1 Klimaanalyse Nachtsituation**

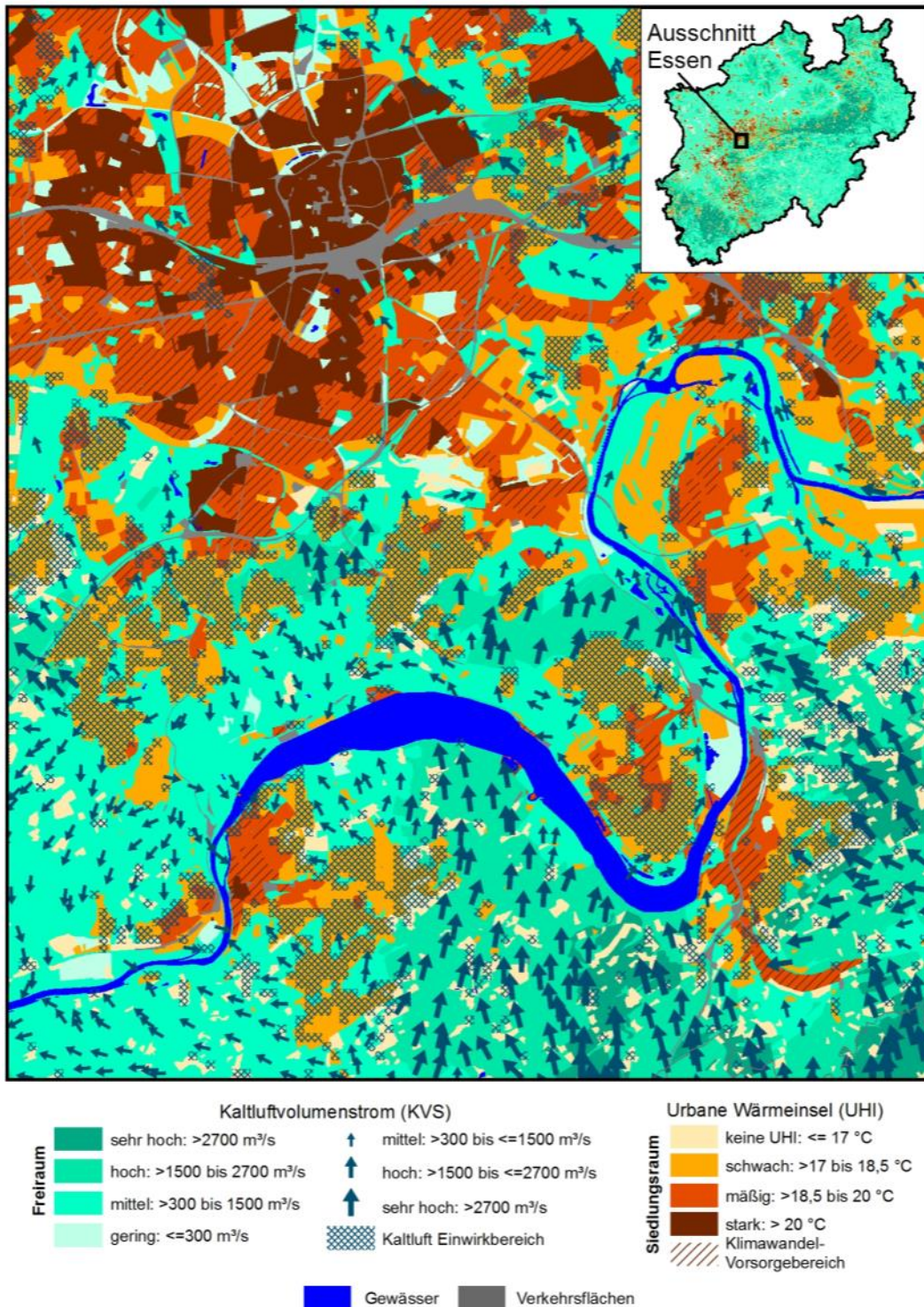
Für die Nachtsituation werden die bereits beschriebenen meteorologischen Parameter wie Temperaturfeld, Kaltluftvolumenstrom und autochthones Strömungsfeld modelliert und in ihrer flächenhaften Ausprägung dargestellt. Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Ist-Zustand der nächtlichen Klimasituation in NRW (Abbildung 21).



**Abbildung 21:** Klimaanalysekarte Nachtsituation (4 Uhr)

Luftleitbahnen können Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkräume) miteinander verbinden und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Als geeignete Oberflächenstrukturen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen innerhalb von Siedlungsräumen sowohl gering bebaute, vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale und breite Straßenräume. Die im Rahmen der Studie erarbeitete Klimaanalysekarte für die Nachtsituation stellt das im Modell berechnete Strömungsfeld samt Richtungs- und Geschwindigkeitsvektoren dar und soll zusammen mit den weiteren

vorhandenen Geodaten den Kommunen als erste Grundlage für die Sicherung und Entwicklung von auf kommunaler Ebene relevanten Leitbahnen dienen (Detaildarstellung Abbildung 22). Eine Festlegung bzw. räumlich differenzierte Abgrenzung und separate Darstellung derartiger, mithin kleinräumiger Leitbahnen ist jedoch vor dem Hintergrund des landesweiten Betrachtungsmaßstabs und der damit im Hinblick auf kommunale Fragestellungen vergleichsweise groben Rasterauflösung nicht sinnvoll zu leisten.



**Abbildung 22:** Detailausschnitt Klimaanalysekarte Nachtsituation (4 Uhr)

## Siedlungsraum (Wirkraum)

Ein erholsamer Schlaf ist nur bei günstigen thermischen Bedingungen möglich, weshalb der Belastungssituation in den Nachtstunden eine besondere Bedeutung zukommt. Die Bewertung der Nachtsituation erfolgt über die Lufttemperatur (vgl. Kapitel 4.3.1, Tabelle 9), die die positive Beeinflussbarkeit des nächtlichen Innenraumklimas widerspiegelt.

Für NRW ergibt sich eine räumliche Untergliederung des Siedlungsraumes in thermisch *mäßig* oder *stark* belastete Bereiche einerseits sowie *unbelastete* bzw. lediglich *schwach belastete* andererseits. Die genauen Flächenanteile bezogen auf die Gesamtfläche NRWs sowie der abgeschätzte Anteil der in diesen Flächen lebenden Bevölkerung (vgl. Kapitel 4.5) sind in Tabelle 19 dargestellt.

**Tabelle 19:** Flächenanteile der Bewertungsklassen des Siedlungsraums in der Nacht (Wärmeinseleffekt) sowie Anzahl der betroffenen Einwohner

| Qualitative Bewertung       | absolute Fläche in km² | Anteil an der Landesfläche NRWs in % | Anteil an der Siedlungsfläche NRWs in % | Anzahl betroffener Einwohner (Werte gerundet) |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| keine UHI                   | 2.719                  | 8,1                                  | 47,5                                    | 6.700.000                                     |
| schwache UHI                | 1.458                  | 4,3                                  | 25,5                                    | 4.900.000                                     |
| mäßige UHI                  | 1.253                  | 3,7                                  | 21,9                                    | 4.800.000                                     |
| starke UHI                  | 290                    | 0,9                                  | 5,1                                     | 1.300.000                                     |
| Klimawandel-Vorsorgebereich | 657                    | 2,0                                  | 11,5                                    | 2.700.000                                     |

Die *unbelasteten* oder *schwach belasteten* Siedlungsräume zeichnen sich dadurch aus, dass sie durch benachbarte kaltluftproduzierende Freiraumflächen begünstigt werden, nur gering überwärmt sind und somit ausreichend durchlüftete Kaltluftereinwirkbereiche darstellen. Kaltluftereinwirkbereiche werden durch Windgeschwindigkeiten von mindestens 0,1 m/s innerhalb der Bebauung definiert und sind in der Klimaanalysekarte der Nachtsituation durch eine blaue Kreuzschraffur gekennzeichnet (Abbildung 22). Am Ende einer warmen Sommernacht werden bis 4 Uhr ca. 60 % des in NRW vorhandenen Siedlungsraums zumindest mit geringen Mengen an Kaltluft versorgt und befinden sich damit im Einwirkbereich von Flurwinden oder lokalen Kaltluftabflüssen.

Die Eindringtiefe der Kaltluft beträgt, abhängig von der Bebauungsstruktur, zwischen ca. 100 m und 700 m. Darüber hinaus spielt auch die Hinderniswirkung des angrenzenden Bebauungstyps eine wesentliche Rolle. In den peripheren, vergleichsweise gering überbauten dörflichen Siedlungsflächen oder Ortsteilen erfolgt häufig ein flächenhaftes Eindringen von Kaltluft in den Siedlungsraum. Mit Blick auf die Gesamtsituation in NRW ist die thermische Belastung bei einer Einzel- und Reihenhausbauform mit einem vergleichsweise niedrigen Versiegelungsgrad und hohen Grünanteil zwar am geringsten ausgeprägt, diese Bauform ist jedoch in der Regel mit negativen Auswirkungen wie

Zersiedelung und Freirauminanspruchnahme verbunden und sollte daher im Allgemeinen nicht die angestrebte Form der Siedlungsentwicklung darstellen

Diesen Gebieten stehen Belastungsbereiche mit einer überdurchschnittlichen Wärmebelastung und einem Durchlüftungsdefizit gegenüber. Dies betrifft vor allem die Innenstädte der Ballungszentren sowie Stadtteilzentren, in denen thermisch *weniger günstige* bzw. *ungünstige* Bedingungen vorliegen. Diese resultieren aus dem hohen Überbauungs- und Versiegelungsgrad sowie einer in Teilen unzureichenden Durchlüftung. Dabei treten auch die größeren Gewerbe- und Industrieareale mit einer ausgeprägten Belastungssituation hervor, da sie oftmals eine ähnlich verdichtete Bebauungsstruktur und hohe Versiegelungsgrade wie eine Zentrumsbebauung aufweisen. Außerhalb der Ballungsgebiete des Ruhrgebiets und der Rheinschiene findet man nur wenige *stark überwärmte* Bereiche. Insgesamt machen die *stark belasteten* Räume somit einen Anteil von etwa 5 % der Siedlungsfläche Nordrhein-Westfalens aus, womit ca. 1,3 Millionen Bürger nachts durch eine *starke thermische Belastung (UHI)* während typischer sommerlicher Wetterlagen betroffen sind.

Zusätzlich zu diesen bereits in der Ist-Situation nachts *stark belasteten* Gebieten werden Flächen als Vorsorgebereiche dargestellt, die zukünftig durch den Klimawandel voraussichtlich ebenfalls zu der Klasse der höchsten Belastung zählen werden (Kapitel 4.4.). Die so abgeleiteten Gebiete befinden sich meist ebenfalls in den besonders dicht bebauten Stadtbereichen oder im direkten Anschluss daran. Insgesamt nehmen die Klimawandel-Vorsorgebereiche eine Fläche von gut 650 km<sup>2</sup> ein, was einem durchaus relevanten Anteil von 11,5 % der Siedlungsfläche Nordrhein-Westfalens entspricht. Es ist also davon auszugehen, dass bis zur Mitte des Jahrhunderts zusätzlich 2,7 Millionen Einwohner von einer *starken Wärmebelastung (UHI)* betroffen sein werden.

### **Freiraum (Ausgleichsflächen)**

Für die Charakterisierung der Ausgleichsleistung von kaltluftproduzierende Flächen des Freiraums wird in der Klimaanalysekarte der Kaltluftvolumenstrom herangezogen (vgl. Kapitel 3.1.3). Die Einstufung des innerhalb von diesen Flächen auftretenden Kaltluftvolumenstroms erfolgt nach dem Verfahren der z-Transformation (vgl. Kapitel 4.3, Tabelle 10).

Die in die höchste Kategorie mit einem *sehr hohen Kaltluftvolumenstrom* eingestuften Flächen sind vor allem in Bereichen mit Reliefeinfluss zu finden. Auch die Flächen des Freiraums mit einem *hohen Kaltluftvolumenstrom* werden vorrangig durch reliefinduzierte Hangabflüsse gekennzeichnet. Die Ausgleichsleistung von Flächen, die einen *mittleren Kaltluftvolumenstrom* aufweisen, ist ebenfalls als klimaökologisch relevant einzuschätzen. Dies betrifft insbesondere die großflächigen Areale im ländlich geprägten Raum, aber auch größere innerstädtischen Parkareale. Tabelle 20 fasst die Flächengrößen und -anteile der einzelnen Kategorien zusammen.

**Tabelle 20:** Flächenanteile der Bewertungsklassen des Freiraums in der Nacht (Kaltluftvolumenstrom)

| Qualitative Bewertung | Absolute Fläche in km <sup>2</sup> | Anteil an der Landesfläche NRWs in % | Anteil am Freiraum NRWs in % |
|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| KVS sehr hoch         | 3.736                              | 11,1                                 | 13,4                         |
| KVS hoch              | 7.710                              | 22,9                                 | 27,6                         |
| KVS mittel            | 15.530                             | 46,2                                 | 55,6                         |
| KVS gering            | 940                                | 2,8                                  | 3,4                          |

Darüber hinaus sind kleinere, vegetationsgeprägte Freiflächen und nicht überbaute Brachflächen mit geringer Größe und *geringem Kaltluftvolumenstrom* zu nennen. Diese Areale bilden selten eine eigene Kaltluftströmung und damit einen Einwirkbereich aus, da sie in eine insgesamt wärmere Bebauung eingebettet sind. Durch die isolierte Lage in der Bebauung weisen sie zudem keine Anbindung an vorhandene Leitbahnen auf.

Auch einige Waldflächen weisen eine geringe Kaltluftlieferung auf. Waldbereiche weisen eine unterdurchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft im Stammraum auf, was mit entsprechend geringen Werten einhergeht. Flächen mit einem *geringen Kaltluftvolumenstrom* nehmen aber mit etwa 3 % des Freiraums nur einen geringen Anteil ein. Dennoch führen unterschiedliche Struktureigenschaften der Flächen zu einem Mosaik aus Flächen unterschiedlicher Kaltluftdynamik. Die einzelnen (Teil-)Areale innerhalb eines Kaltlufteinzugsgebietes besitzen in ihrer Summenwirkung eine Entlastungsfunktion für benachbarte und weiter entfernte Siedlungsräume.

### Luftaustausch

Das Kaltluftströmungsfeld, das sich während einer sommerlichen, austauscharmen Strahlungswetternacht autochthon ausbildet, wird in der Klimaanalysekarte Nachtsituation durch blaue Pfeile dargestellt. Die momentane Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeilgröße wiedergegeben (vgl. Abbildung 22).

Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere planerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis. Aus diesem Grund sind die Durchlüftung der Stadtkörper und ihr 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 austauschschwachen Wetterlagen und für Siedlungen in Muldenlage wirken sich diese Faktoren humanbioklimatisch 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 und sind somit im Sinne einer nachhaltigen Stadtentwicklung planerisch zu schützen und ggf. weiter zu entwickeln.

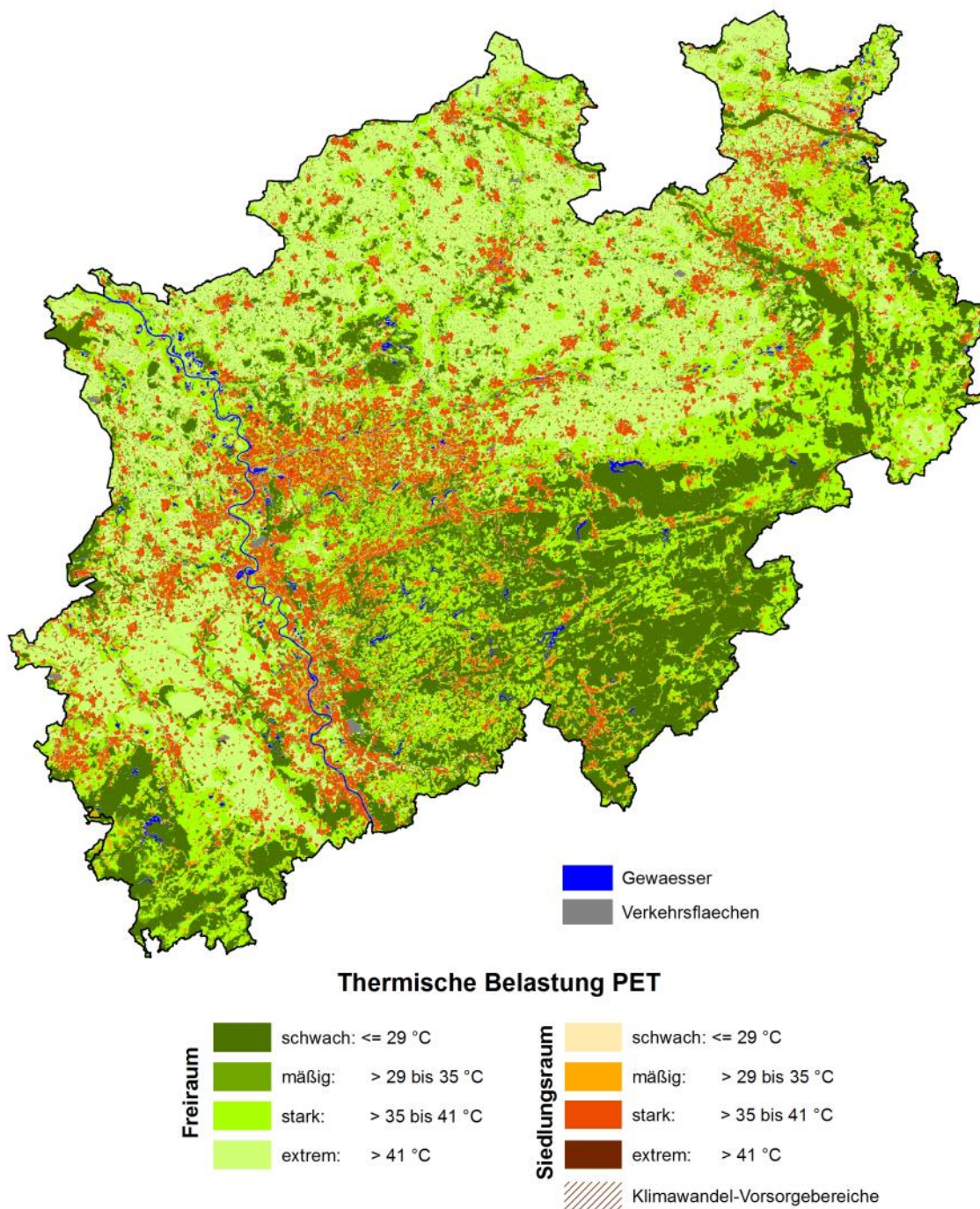
## 7.2 Klimaanalyse Tagsituation

Die Klimaanalysekarte der Tagsituation trifft Aussagen über die thermische Belastung der Bevölkerung um 15 Uhr. Zur Bewertung eignet sich sowohl für den Siedlungsraum als auch für den Freiraum der humanbioklimatische Index PET (Kapitel 3.1.2; Tabelle 4). Die Zuordnung der Fläche Nordrhein-Westfalens zu den einzelnen Belastungsklassen ist in Tabelle 21 aufgeführt.

**Tabelle 21:** Flächenanteile der Bewertungsklassen des Siedlungs- und Freiraums am Tage (thermischen Belastung) sowie Anzahl der betroffenen Einwohner

|               | Qualitative Bewertung         | absolute Fläche in km <sup>2</sup> | Anteil an der Landesfläche NRW in % | Anteil am Siedlungs- bzw. Freiraum | Anzahl betroffener Einwohner (Werte gerundet) |
|---------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Siedlungsraum | schwache thermische Belastung | 103                                | 0,3                                 | 1,8                                | 300.000                                       |
|               | mäßige thermische Belastung   | 674                                | 2,0                                 | 11,8                               | 2.000.000                                     |
|               | starke thermische Belastung   | 4.284                              | 12,7                                | 74,9                               | 14.000.000                                    |
|               | extreme thermische Belastung  | 659                                | 2,0                                 | 11,5                               | 1.600.000                                     |
|               | Klimawandel-Vorsorgebereiche  | 446                                | 1,3                                 | 7,8                                | 1.300.000                                     |
| Freiraum      | schwache thermische Belastung | 7.523                              | 22,4                                | 26,9                               | -                                             |
|               | mäßige thermische Belastung   | 1.717                              | 5,1                                 | 6,2                                | -                                             |
|               | starke thermische Belastung   | 8.828                              | 26,2                                | 31,6                               | -                                             |
|               | extreme thermische Belastung  | 9.849                              | 29,3                                | 35,3                               | -                                             |

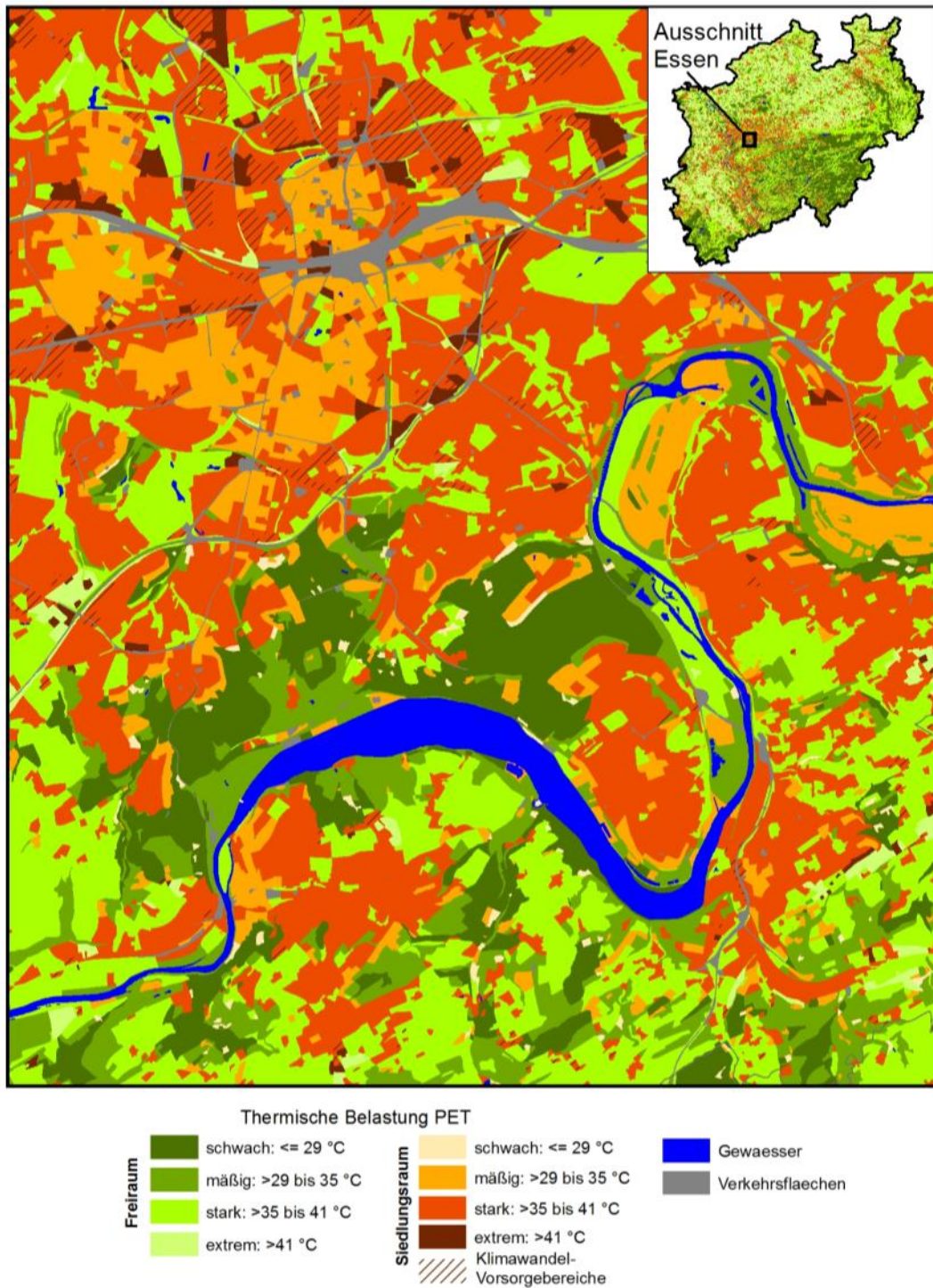
Wie in Kapitel 6.2 beschrieben, unterscheidet sich die räumliche Ausprägung der belasteten Bereiche am Tage deutlich von der Nachtsituation. Insgesamt sind tagsüber die Unterschiede zwischen stark verdichteten innerstädtischen Siedlungsbereichen und den dünner besiedelten Randlagen deutlich geringer als in der Nacht. Der Einfluss der direkten Sonneneinstrahlung wird hier besonders deutlich, so sind *stark* und *extrem wärmebelastete* Flächen des Siedlungsraums weniger in der dichten Zentrumsbebauung zu finden, als vielmehr im dünn besiedelten Außenraum nahe großflächiger landwirtschaftlicher Areale mit niedriger Vegetation, die der Sonneneinstrahlung nahezu ohne Verschattung ausgesetzt sind (Abbildung 23). Auch viele Industrie- und Gewerbeflächen fallen aufgrund des hohen Versiegelungsgrades und relativ wenig Verschattung durch *starke* oder *extreme Wärmebelastung* am Tage auf. Die Bewertung des Freiraums zeigt für Waldflächen häufig eine *schwache Wärmebelastung*. Bei fehlender Verschattung können im Gegensatz dazu am Tage auch Flächen des Freiraums von einer größeren Belastung geprägt sein.



**Abbildung 23:** Klimaanalysekarte Tagsituation (15 Uhr)

Zusätzlich zur Beschreibung der Ist-Situation werden auch für die Tagsituation Klimawandel-Vorsorgebereiche ausgewiesen (vgl. Kapitel 4.4). Die Klimawandel-Vorsorgebereiche sind vor allem im direkten Umfeld der Bereiche zu finden, die bereits unter heutigen Bedingungen eine *extreme Wärmebelastung* aufweisen, und werden in der Karte schraffiert dargestellt (Detailansicht Abbildung 24). Mit einem Anteil von knapp 8 % an der Siedlungsfläche (knapp 450 km<sup>2</sup>) würde sich bis zur Mitte des Jahrhunderts nur ein geringer Anteil der unter heutigen Bedingungen am Tag als *stark thermisch belasteten* klassifizierten Fläche in die höchste

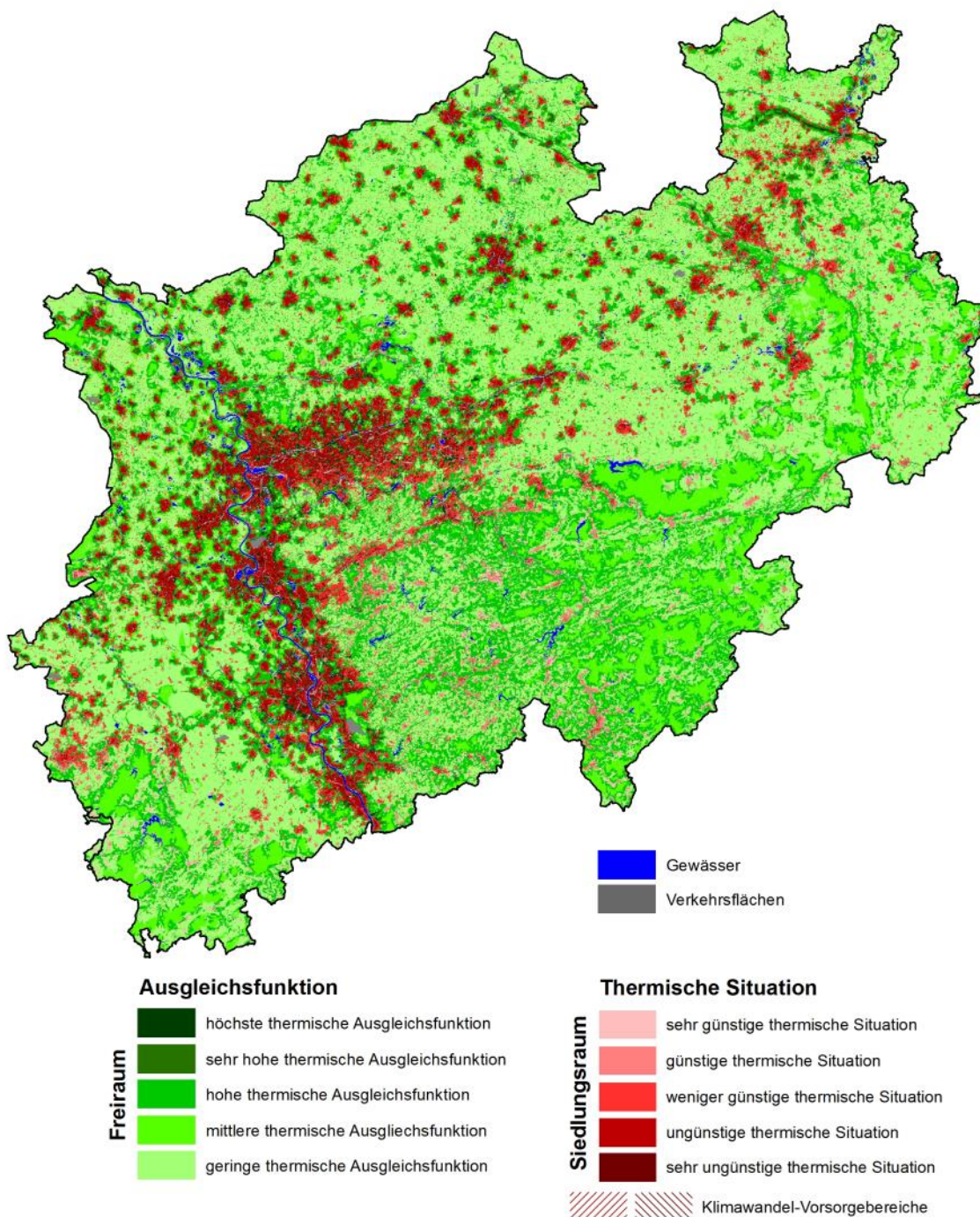
Belastungsstufe verschieben. Dadurch wären voraussichtlich etwa 1,3 Millionen Einwohner zusätzlich von *extremer Wärmebelastung* am Tage betroffen.



**Abbildung 24:** Detailausschnitt Klimaanalysekarte Tagsituation (15 Uhr)

### 7.3 Klimaanalyse Gesamtbetrachtung und Ableitung von Planungshinweisen

In der Klimaanalysekarte Gesamtbetrachtung werden schließlich die Ergebnisse aus der Nacht- und der Tagsituation zusammengefasst und bewertet (Abbildung 25). Die Bewertung und kartographische Darstellung erfolgt getrennt nach Siedlungsraum und Freiraum.



**Abbildung 25:** Klimaanalysekarte Gesamtbetrachtung

## Siedlungsraum (Wirkraum)

Tabelle 22 veranschaulicht die Flächenanteile der Bewertungsklassen des Siedlungsraums sowie die Anzahl der betroffenen Einwohner in der Gesamtbetrachtung.

**Tabelle 22:** Flächenanteile der Bewertungsklassen des Siedlungsraums in der Gesamtbetrachtung (thermische Situation) sowie Anzahl der betroffenen Einwohner

| Qualitative Bewertung der thermischen Situation     | Fläche in km² | Anteil an der Landesfläche NRW in % |                    | Anteil an der Siedlungsfläche NRW in % |                    | Anzahl betroffener Einwohner (Werte gerundet) |
|-----------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|
|                                                     |               | Wohnfläche                          | Gewerbe-<br>fläche | Wohnfläche                             | Gewerbe-<br>fläche |                                               |
| sehr günstig                                        | 410           | 1,2                                 | 0,1                | 6,9                                    | 0,3                | 1.000.000                                     |
| günstig                                             | 1.534         | 4,1                                 | 0,5                | 23,9                                   | 3,0                | 4.100.000                                     |
| weniger günstig                                     | 2.433         | 5,3                                 | 2,0                | 31,0                                   | 11,6               | 7.500.000                                     |
| ungünstig                                           | 1.278         | 3,1                                 | 0,7                | 18,0                                   | 4,4                | 5.000.000                                     |
| sehr ungünstig                                      | 66            | 0,2                                 | 0,0                | 1,0                                    | 0,2                | 300.000                                       |
| <i>Klimawandel-Vorsorgebereich (ungünstig)</i>      | <i>1.085</i>  | <i>2,7</i>                          | <i>0,6</i>         | <i>15,6</i>                            | <i>3,4</i>         | <i>3.700.000</i>                              |
| <i>Klimawandel-Vorsorgebereich (sehr ungünstig)</i> | <i>500</i>    | <i>1,4</i>                          | <i>0,1</i>         | <i>8,3</i>                             | <i>0,4</i>         | <i>2.100.000</i>                              |

Bei der Analyse der räumlichen Verteilung der unterschiedlich zu bewertenden Bereiche fällt auf, dass *günstige bis sehr günstige* Verhältnisse fast nur in den dünn besiedelten Landesteilen vorzufinden sind. Den größten Flächenanteil unabhängig von Wohn-, oder Gewerbenutzung nimmt die Kategorie *weniger günstige thermische Situation* ein. Diese Flächen erstrecken sich dabei über den ländlichen Raum bis in die Randbereiche der Ballungsgebiete. Tendenziell verbessert sich die bioklimatische Situation also mit zunehmender Entfernung zu den großen urbanen Ballungsgebieten. Mit einer *ungünstigen bis sehr ungünstigen thermischen Situation* sind somit vor allem innerstädtische Siedlungsbereiche bewertet. Bezogen auf den Siedlungsraum nehmen diese Klassen etwa einen Flächenanteil von 24 % ein. Insgesamt sind während einer typischen sommerlichen Wetterlage etwa 5,3 Millionen Einwohner in NRW von einer *ungünstigen* oder *sehr ungünstigen* Situation betroffen.

Auf Basis dieser Bewertung werden für jede der Bewertungsklassen Planungsempfehlungen für Anpassungsmaßnahmen abgeleitet (Tabelle 23). Diese Hinweise sollen insbesondere für die kommunale Ebene einer ersten Einschätzung dienen und somit eine Grundlage zur Priorisierung von Flächen bzw. Maßnahmen liefern. Aufgrund des landesweiten Maßstabs

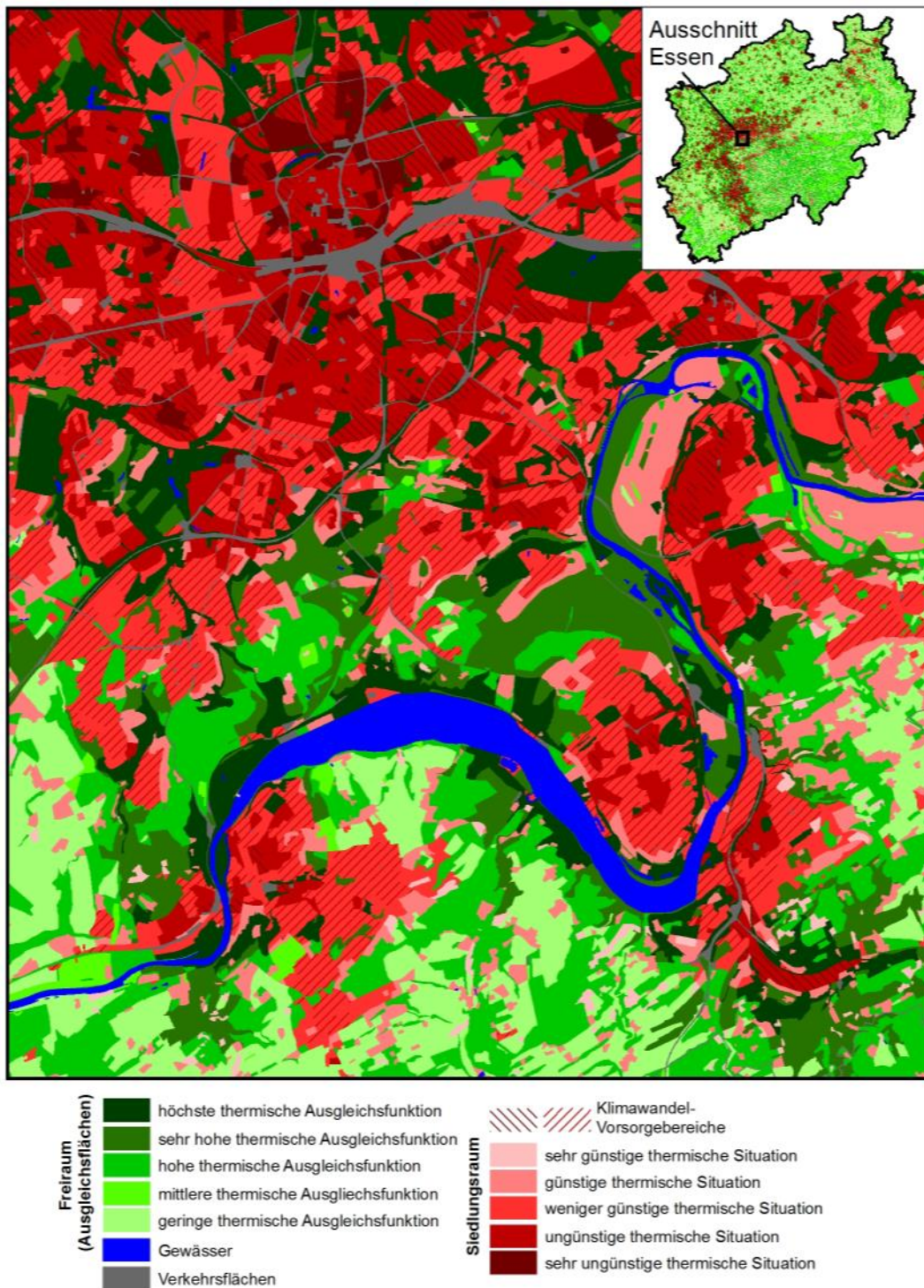
der Klimaanalyse NRW sollten die vor Ort ggf. vorhandenen, detaillierteren Daten, lokalen Expertisen und Erfahrungen zusätzlich eingebracht werden.

**Tabelle 23:** Planungshinweise für die Bewertungsklassen des Siedlungsraums in der Gesamtbetrachtung

| Klasse                                | Allgemeine Planungshinweise                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| sehr günstige thermische Situation    | Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Keine Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation notwendig. Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen. Der Vegetationsanteil sollte erhalten werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| günstige thermische Situation         | Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Keine Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation notwendig. Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen und die Baukörperstellung sollte beachtet werden. Der Vegetationsanteil sollte erhalten werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| weniger günstige thermische Situation | Mittlere bis hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Nachverdichtungen sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen und die Baukörperstellung sollte beachtet sowie möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| ungünstige thermische Situation       | Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Nachverdichtungen sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen und eine Verbesserung der Durchlüftung sowie eine Erhöhung des Vegetationsanteils sollte angestrebt werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| sehr ungünstige thermische Situation  | Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sie sollten sich sowohl auf die Tag- als auch Nachtsituation auswirken. Eine Nachverdichtung sollte nur auf bereits versiegelten oder teilversiegelten Flächen ohne klimarelevante Funktionen oder durch Nutzungsintensivierung auf bereits bebauter Fläche erfolgen. Der Erhalt des unversiegelten Freiraums und die Verbesserung der Durchlüftung sowie eine Erhöhung des Vegetationsanteils bzw. Entsiegelungsmaßnahmen sind vorrangig anzustreben. Bei baulicher Nachverdichtung sind die Vorhaben hinsichtlich der mikroklimatischen Situation zu optimieren und beispielsweise Maßnahmen zur Begrünung an Fassaden oder Dächern anzustreben |

Zusätzlich zu den fünf Bewertungsklassen, die die aktuelle klimatische Situation einer für NRW typischen sommerlichen Wetterlage widerspiegeln, werden wie auch für die Nacht- und die Tagsituation Klimawandel-Vorsorgebereiche (vgl. Kapitel 4.4) für den Siedlungsraum in der Klimaanalyse Gesamtbetrachtung ausgewiesen. Dabei wird die fünfstufige Bewertungsskala der Gesamtbetrachtung berücksichtigt und nicht nur für die höchste Stufe der *sehr ungünstigen thermischen Situation*, sondern auch für die Klasse *ungünstige thermische Situation* Flächen im Siedlungsraum bestimmt, die unter bis zur Mitte des Jahrhunderts durch den Klimawandel voraussichtlich zusätzlich zu diesen Belastungsklassen

zu zählen sind. Dabei sind die Flächen die sich durch den Klimawandel in die Kategorie *sehr ungünstig* verschieben werden, vor allem in den dicht bebauten Innenstadtbereichen zu finden. Dahingegen können zukünftig auch Flächen, die sich eher in Stadtrandlage befinden, ebenfalls von einer *ungünstigen thermischen Situation* betroffen sein. Die Klimawandel-Vorsorgebereiche sind in der Karte durch unterschiedlich farbige Schraffuren dargestellt (Detailansicht Abbildung 26). Damit erhöht sich die Zahl der Menschen in NRW, die durch den Klimawandel in Zukunft voraussichtlich zusätzlich von einer *ungünstigen* oder *sehr ungünstigen thermischen Situation* betroffenen sein werden, um etwa 3,7 Millionen auf dann 9 Millionen Einwohner.



**Abbildung 26:** Detailausschnitt Klimaanalysekarte Gesamtbetrachtung

## Freiraum (Ausgleichsflächen)

Da die Einordnung der bioklimatischen Bedeutung des Freiraums maßgeblich von der Lage in Bezug zu belasteten Siedlungsräumen (wertgebender funktionaler Wirkungszusammenhang; Abbildung 13 und Abbildung 14) abhängig ist, sind die beiden höchsten Bewertungs-Kategorien *sehr hohe bzw. höchste thermische Ausgleichsfunktion* vor allem in den Ballungszentren von Ruhrgebiet und Rheinschiene zu finden. Insgesamt machen die genannten Klassen jedoch nur einen geringen Anteil des Freiraums aus. Der überwiegende Teil dieser Flächen ist dagegen im gesamten Bundesland von einer *geringen thermischen Ausgleichsfunktion* gekennzeichnet, die sich durch die Lage im ländlichen Raum ergibt. Weiterhin einen hohen Flächenanteil nehmen Gebiete mit *mittlerer* und *hoher thermischer Ausgleichsfunktion* ein. Die Flächen der Bewertungsklassen und ihre Anteile bezogen auf die Landesfläche sind in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Flächenanteile der Bewertungsklassen des Freiraums (thermische Ausgleichsfunktion) in der Gesamtbetrachtung

| Klasse | Qualitative Bewertung                   | Absolute Fläche in km² | Anteil an der Landesfläche NRWs in % | Anteil am Freiraum in NRW in % |
|--------|-----------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1      | geringe thermische Ausgleichsfunktion   | 14.791                 | 44,0                                 | 53,0                           |
| 2      | mittlere thermische Ausgleichsfunktion  | 3.326                  | 9,9                                  | 11,9                           |
| 3      | hohe thermische Ausgleichsfunktion      | 7.971                  | 23,7                                 | 28,6                           |
| 4      | sehr hohe thermische Ausgleichsfunktion | 1.134                  | 3,4                                  | 4,1                            |
| 5      | höchste thermische Ausgleichsfunktion   | 694                    | 2,1                                  | 2,5                            |

Generell muss beachtet werden, dass im Falle einer neuen Bebauung der Flächen des Freiraums selbst bzw. ihrer näheren Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss und die bestehende Funktion beeinträchtigt wird, völlig verloren geht, möglicherweise aber auch an Bedeutung für ein neues Siedlungsgebiet gewinnt. Ebenso wie für den bewerteten Siedlungsraum, sind dem Freiraum allgemeine Planungshinweise zugeordnet, die eine erste Bewertung von Handlungserfordernissen sowie eine Einschätzung möglicher Maßnahmen erlauben, doch bezogen auf den Einzelfall vor Ort (z. B. Prüfung der Auswirkungen eines Bebauungsplans) maßstabsbedingt ggf. genauer betrachtet werden müssen (Tabelle 25).

**Tabelle 25:** Planungshinweise für die Bewertungsklassen des Freiraums in der Gesamtbetrachtung

| Klasse | Allgemeine Planungshinweise                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen (vgl. Glossar) bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung sollte die Bewertung neu vorgenommen werden.                                                                                                                                          |
| 2      | Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung sollte die Bewertung neu vorgenommen werden.                                            |
| 3      | Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.                                                                                                                                                                                                                                 |
| 4      | Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden .                                                                                                                                                                                                                           |
| 5      | Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich vorbereitet, unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbbarkeit der angrenzenden Bebauung sollte angestrebt und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/ Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen). |

## 8. Ausblick und Anwendungsmöglichkeiten

Die Ergebnisse der landesweiten Klimaanalyse zeigen, dass die Hitzebelastung von Menschen in Nordrhein-Westfalen bereits heute eine relevante Herausforderung ist. Die große Anzahl von Menschen im Land, die insbesondere in verdichteten innerstädtischen Bereichen von *ungünstigen* und *sehr ungünstigen* thermischen Verhältnissen betroffen sind, verdeutlicht, dass eine angemessene Berücksichtigung klimaökologischer Prozesse und Funktionen im Rahmen von Politik und Planung effektive Strategien und Maßnahmen erfordern.

Durch den anthropogenen Klimawandel und den damit verbundenen zu erwartenden Temperaturanstieg wird die Bedeutung von klimaökologischen Ausgleichsräumen und von an den Klimawandel und die steigende Hitzebelastung der Bevölkerung angepassten Siedlungsstrukturen dabei weiter an Bedeutung gewinnen. Da gegenwärtige planerische Entscheidungen insbesondere in der Siedlungsentwicklung die Bebauungsstrukturen und damit auch Einflussfaktoren auf das Ausmaß der thermischen Belastung der Bevölkerung in NRW langfristig beeinflussen und festlegen, sind bereits heute klimaökologische Anforderungen sowie Maßnahmen und Strategien vor dem Hintergrund des zu erwartenden Klimawandels verstärkt zu berücksichtigen.

Es steht außer Frage, dass die auf heutigen klimatischen Bedingungen aufsetzenden und bereits unter diesen Bedingungen als bedeutend zu bewertenden klimaökologischen Belastungsräume und Ausgleichsfunktionen auch unter dem Aspekt des Klimawandels Gültigkeit bewahren und darüber hinaus noch an Bedeutung gewinnen werden. Planerische Maßnahmen zur Sicherung bestehender Funktionen und die Sanierung vorhandener übermäßiger Belastungen sind demnach mittel- und langfristig sinnvoll und zweckmäßig. Die Ergebnisse der Klimaanalyse NRW und darauf basierende Empfehlungen und angestoßene planerische Maßnahmen folgen damit dem sogenannten „No-Regret-Ansatz“. Die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels in NRW unterstützen die im Rahmen der Klimaanalyse erarbeiteten planerischen Empfehlungen und betonen überdies den vielerorts bereits heute bestehenden Handlungsbedarf.

Darüber hinaus liefern die Ergebnisse der Klimaanalyse NRW wichtige Hinweise zu den klimaökologischen Funktionen von Flächen und somit zur konkreten Verortung der Bereiche mit besonderer Bedeutung. Hierzu zählen vor allem Siedlungsgebiete mit einer besonderen thermischen Belastung und Freiraumbereiche, die im relevanten Umfang zur Versorgung von Siedlungsbereichen mit Kaltluft beitragen. Durch die Darstellung von Klimawandel-Vorsorgebereichen wird auch ein Ausblick auf eine zu erwartende Verschärfung der Problematik bis zur Mitte dieses Jahrhunderts gegeben.

### 8.1 Handlungsansätze auf regionaler Ebene

Durch die nun erstmals landesweit vorliegenden Informationen wird eine Datengrundlage geschaffen, die eine verstärkte Berücksichtigung klimaökologischer Belange z. B. im

Rahmen von Planungsprozessen oder Konzepten zur Anpassung an den Klimawandel ermöglicht. Dabei stehen aufgrund des landesweiten Maßstabs der Klimaanalyse vor allem übergeordnete Betrachtungen, z. B. auf regionaler Ebene, im Fokus.

Damit Ausgleichsräume und Kaltluftleitbahnen zu einer Verbesserung der thermischen Situation beitragen können, ist es erforderlich, dass der Luftaustausch bzw. ein Transport kühlerer Luft in angrenzende Belastungsräume möglich ist. Kaltluftleitbahnen müssen daher, ebenso wie kaltluftproduzierende Flächen, dort, wo sie eine klimaökologische Ausgleichsfunktion für hitzebelastete Siedlungsbereiche erfüllen sollen, gesichert oder wiederhergestellt werden. Insbesondere größere Kaltluftleitbahnen oder besonders große Belastungen können dabei überörtliche Ansätze erfordern, die über die kommunale Ebene hinausgehen. Hier ist insbesondere die Regionalplanung gefordert, klimaökologisch bedeutsame Flächen vor Bebauung, Versiegelung und Luftverschmutzungen zu schützen, auch gerade im ländlichen Raum.

Die Ergebnisse der Klimaanalyse NRW können der Regionalplanung dabei als Grundlage und Hilfestellung bei der stärkeren Berücksichtigung klimatischer Belange im Rahmen ihrer Aufgabe der Ordnung, Sicherung und Entwicklung des Raumes dienen. In diesem Zusammenhang bestehen zum Beispiel die im Folgenden näher beschriebenen Einsatzmöglichkeiten:

- Berücksichtigung als Abwägungsgrundlage bei der Fortschreibung von Regionalplänen und im Zuge der Erarbeitung raumordnerischer Stellungnahmen/Einwendungen,
- Berücksichtigung als Abwägungsgrundlage bei der räumlichen Steuerung von mit den klimatischen Belangen konkurrierenden Raumnutzungen,
- Erweiterung des Begründungshorizonts und damit Schärfung bestehender (multifunktionaler) Ziele und Grundsätze bzw. Planzeichen, sowie inhaltliche und ggf. flächenmäßige Weiterentwicklung multifunktionaler Planzeichen
- Entwicklung und Einführung innovativer monofunktionaler Ziel- und Grundsatzfestlegungen sowie ggf. Planzeichen.

### **Berücksichtigung als Abwägungsgrundlage bei der Fortschreibung von Regionalplänen und im Zuge der Erarbeitung raumordnerischer Stellungnahmen/Einwendungen**

Die Ergebnisse der Klimaanalyse stellen eine hilfreiche und der Maßstabsebene entsprechend aufbereitete, fachliche Datengrundlage dar. Durch das LANUV werden im Rahmen der für die Fortschreibung von Regionalplänen zu erstellenden Fachbeiträge zum Klimawandel die Ergebnisse der Klimaanalyse NRW auch hinsichtlich ihrer Raumbedeutsamkeit und Überörtlichkeit bewertet und so die bereits im Rahmen der Regionalplanung zu berücksichtigenden klimatischen Funktionen und Belange abgebildet. Die nach fachlichen Kriterien begründeten und überdies raumspezifisch abgeleiteten Inhalte der Fachbeiträge können im Zuge von Raumordnungsverfahren zu raumbedeutsamen Plänen oder Projekten sowie von raumordnerischen Stellungnahmen mit den Inhalten dieser Vorhaben überlagert und abgeglichen werden. Dies erlaubt eine unkomplizierte und dennoch fachlich qualifizierte Berücksichtigung der klimatischen Fragestellung in derartigen

Verfahren, wodurch gleichermaßen eine Stärkung klimatischer Belange auf Ebene der Regionalplanung erwartet werden kann.

### **Berücksichtigung als Abwägungsgrundlage bei der räumlichen Steuerung von mit klimatischen Belangen konkurrierenden Raumnutzungen**

Die Ergebnisse der Klimaanalyse NRW im Allgemeinen und deren auf die regionale Ebene gerichtete Auswertung im Rahmen der angesprochenen Fachbeiträge Klima für die Regionalplanung im Speziellen eignen sich neben der Berücksichtigung bei der Fortschreibung von Regionalplänen insbesondere auch für eine angemessene Beachtung im Zuge eigener Planungen. In erster Linie können die Informationen in diesem Zusammenhang dazu dienen, die Verortung und konkrete Abgrenzung bestehender Planzeichen mit dem Ziel einer „klimaoptimierten“ Planung zu überprüfen und ggf. zu beeinflussen.

Die konkrete Berücksichtigung der in der Klimaanalyse NRW und den Fachbeiträgen abgebildeten klimatischen Belange kann entweder bereits in Form eines Bausteins des gesamträumlichen Planungskonzepts sowie der Alternativenentwicklung erfolgen, oder aber im Zuge der nach § 8 ROG durchzuführenden Umweltprüfung. Durch eine stärkere direkte Berücksichtigung klimatischer Belange bei der Standortsteuerung von Siedlungsflächen können z. B. bei der Festlegung von Siedlungszuwachsflächen als regionalplanerische Vorranggebiete entsprechende Flächen sowohl mit einer hohen Klimarelevanz als auch mit Bedeutung für die siedlungsnahen Erholung gesichert oder von entgegenstehenden Festlegungen freigehalten werden. Es können auch Vorranggebiete oder Vorbehaltsgebiete für landwirtschaftliche Flächen in den Regionalplänen zur Sicherung von Böden oder Flächen zur Bodenkühlleistung festgelegt werden.

Überdies können die fach- und raumspezifischen Planungsempfehlungen der Klimaanalyse NRW im Zuge der Umweltprüfung als umfassende Datengrundlage dienen und ermöglichen damit eine gegenüber dem heutigen Standard erheblich detailliertere Erfassung und Bewertung der durch den Plan und die geprüften Festlegungen zu erwartenden erheblichen Auswirkungen auf das Schutzgut Klima. Auf diese Weise kann eine flächenspezifische Rückkopplung zwischen Umweltprüfung und Planinhalten hinsichtlich klimatischer Fragestellungen gewährleistet werden, mit der Folge, dass nunmehr bereits frühzeitig wirkungsvolle Vermeidungsmaßnahmen entwickelt oder gar eine Modifikation der geplanten Festlegungs-Kulisse mit dem Ziel der „Klimaoptimierung“ möglich wird.

Dies eröffnet infolge der in der nordrhein-westfälischen Regionalplanung verankerten positiv-allokativen Standortplanung bei der Siedlungs- und Gewerbeentwicklung insbesondere für die Steuerung und Ordnung der zukünftigen Siedlungsentwicklung die Möglichkeit, klimaökologische Fragestellungen und Anforderungen auf Grundlage von vorliegenden Planungsempfehlungen für die Regionalplanung weitaus umfassender als bisher zu berücksichtigen. So kann die Entwicklung auf klimatisch unkritische oder zumindest weniger problematische Teilflächen gelenkt und konzentriert werden, solange der allgemeine Freiraumschutz weiterhin gewährleistet wird.

### **Erweiterung des Begründungshorizonts und damit Schärfung bestehender (multifunktionaler) Ziele und Grundsätze bzw. Planzeichen sowie inhaltliche und ggf. flächenmäßige Weiterentwicklung multifunktionaler Planzeichen**

Zur Reduktion bioklimatischer Belastungen kann die Regionalplanung neben den beschriebenen indirekten Berücksichtigungsformen klimatische Funktionen auch mit Hilfe multi- oder monofunktionaler Festlegungen gezielt und direkt schützen und entwickeln. Insbesondere können klimatische Belange – ohne dabei in den Verdacht zu geraten, den regionalplanerischen Kompetenzrahmen zu überschreiten sowie ohne das Erfordernis einer Einführung neuer, zusätzlicher Planzeichen – im Zusammenhang mit bestehenden multifunktionalen Festlegungen und Planzeichen gezielt adressiert werden. Auf diese Weise können mit den klimaspezifischen Inhalten die bestehenden Festlegungen geschärft, weitergehend begründet und ihrer Durchsetzungsfähigkeit auch flächenscharf erheblich gestärkt werden. Gleichwohl mag die Einbindung der klimatischen Belange in zahlreichen Fällen auch dazu führen, dass die bestehenden Festlegungen insbesondere hinsichtlich ihrer flächenspezifischen Nachvollziehbarkeit und Begründbarkeit zu überprüfen und zu überarbeiten sind.

Als geeignete, bereits bestehende multifunktionale Festlegungen sind dabei zuallererst die „Regionalen Grünzüge“ zu nennen, welche unterschiedliche Raumfunktionen schützen sollen und Freiräume vor einer baulichen Inanspruchnahme bewahren. Die nordrhein-westfälische Regionalplanung adressiert mit den Regionalen Grünzügen teilweise bereits ganz konkret klimatische Raumfunktionen. Jedoch werden diese bisher zum Teil nicht weitergehend definiert und räumlich spezifiziert. So können sie sich bislang offensichtlich in Ermangelung „harter“, fachwissenschaftlich belastbarer und flächenspezifischer Daten nicht spürbar auf die Flächenkulisse der Festlegung auswirken und so auch nicht für die Begründung einzelner Festlegungsflächen als starker, durchsetzungsfähiger Belang herangezogen werden. Ähnliches mag für die bestehenden erholungsbezogenen Planzeichen gelten, für die eine mitunter bestehende Klimagunst in Verbindung mit nahe gelegenen thermischen Belastungsräumen einen zusätzlichen, neu hinzukommenden Begründungsfaktor darstellt. Auf Basis der nun vorliegenden Daten und Empfehlungen ist daher ein erhebliches Überarbeitungs- und Optimierungspotenzial für derartige multifunktionale Festlegungen zu sehen.

### **Entwicklung und Einführung innovativer monofunktionaler Ziel- und Grundsatzfestlegungen sowie ggf. Planzeichen.**

Ein besonders weitgehender und innovativer Umsetzungsansatz zur regionalplanerischen Berücksichtigung klimaökologischer Belange besteht in der Möglichkeit der Einführung zusätzlicher monofunktionaler, d. h. allein mit klimatischen Funktionen zu begründenden Planzeichen. So könnten monofunktionale Raumordnungsgebiete Flächen sowohl für Kaltluftentstehung als auch den Kaltlufttransport sichern. Denkbar wäre z. B. die Einführung eines Planzeichens „Vorranggebiet Kaltluftaustausch“ als Ziel der Raumordnung. Hierbei wäre allerdings im Einzelfall kritisch zu prüfen, ob die zugrundeliegende landesweite Modellrechnung der Klimaanalyse NRW derart weitgehende Eingriffe in die nachfolgenden Planungsebenen und ggf. private Belange rechtfertigen kann, und ob der kommunalen

Planung noch ein hinreichender Ausgestaltungsspielraum verbleibt. Da die Einführung derartiger Planzeichen somit teilweise noch juristischem Klärungsbedarf bzw. Unwägbarkeiten unterliegt und ferner erst von der Landesplanung Nordrhein-Westfalens vorzugeben wäre, erscheint für eine möglichst zügige und rechtssichere, damit wirkungsvolle Umsetzung der im Zuge der Klimaanalyse NRW erarbeiteten Ergebnisse und Planungsempfehlungen für die Regionalplanung die Neu-Einführung monofunktionaler Planzeichen aus heutiger Sicht nicht als das Mittel der Wahl.

Nichtsdestotrotz bestehen alternative Möglichkeiten der monofunktionalen Berücksichtigung klimatischer Fragestellungen in den Regionalplänen des Landes NRW. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die Option, auf Basis der Fachbeiträge Klima durchsetzungsstarke textliche Zielformulierungen mit klimabezogenen oder flächenerhaltenden Inhalten zu formulieren, welche mit Hilfe von fachspezifischen thematischen Beikarten räumlich konkretisiert und gefasst werden. Von Vorteil ist bei diesem Vorgehen, dass keine zusätzlichen Planzeichen im Sinne von raumordnerischen Vorranggebieten eingeführt werden müssen und infolge der vornehmlich textlichen Ziel-Formulierung die Möglichkeit besteht, der kommunalen Planung einen hinreichend weiten Ausgestaltungsspielraum bei der Umsetzung der von der Regionalplanung festgelegten Ziele einzuräumen.

Ein Beispiel für das Zusammenwirken von textlichen Festlegungen und ihrer räumlichen Konkretisierung durch den Einsatz von Beikarten beinhaltet der aktuelle Entwurf des „Regionalplans Leipzig-West Sachsen 2017“. Dieser benennt in seinem Ziel Z 4.1.4.1 u. a. sogenannte „Regional bedeutsame Kaltluftentstehungsgebiete“ und „Regional bedeutsame Kaltluftabflussbahnen“. Für die einzelnen benannten Gebiete werden im Zuge der Ziel-Festlegung gebietsspezifisch weitergehende, konkretisierende Bestimmungen getroffen. So wird z. B. festgelegt, dass die regional bedeutsamen Kaltluftentstehungsgebiete von großflächigen Versiegelungen und abriegelnden Bebauungen freizuhalten sind. Die explizit textlich benannten Gebiete werden in einer dem Festlegungsteil des Regionalplans beigegebenen thematischen Karte räumlich eingegrenzt.

Im Zusammenspiel von textlicher Festlegung und ergänzender räumlicher Darstellung der verschiedenen im Text eingeführten Flächenkategorien verbleibt auf diese Weise einerseits der kommunalen Planung ein angemessener Ausgestaltungsspielraum bei der Bewertung und Auslegung. Auf der anderen Seite wird durch die verbindliche Zielfestlegung in Kombination mit der räumlichen Konkretisierung innerhalb der benannten Raumkategorien eine sachgerechte Prüfung, ggf. unter Einsatz von vertiefenden, maßstabsgerechten Fachgutachten zu den voraussichtlichen Auswirkungen eines Vorhabens auf die bestehenden Klima-Funktionen zwingend erforderlich.

Weitergehende allgemeine Hilfestellungen insbesondere zum Planungsprozess sowie zu innovativen Festlegungen können dem vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung herausgegebenen „Methodenhandbuch zur regionalen Klimafolgenbewertung in der räumlichen Planung“ (BMVI 2017) oder der Praxishilfe „Klimaanpassung in der räumlichen Planung“ (UBA 2016) des Umweltbundesamtes entnommen werden.

## 8.2 Handlungsansätze auf kommunaler Ebene

Über § 9 BauGB bestehen umfassende Festsetzungsmöglichkeiten von Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels in den verbindlichen Bauleitplänen und über § 5 BauGB für Darstellungen in Flächennutzungsplänen, die von den Kommunen genutzt werden sollten. Die Ergebnisse der landesweiten Klimaanalyse können auch für die kommunale Ebene erste Hinweise auf einen etwaigen bestehenden Handlungs- und Steuerungsbedarf geben. Durch den landesweiten Betrachtungsmaßstab ist die Auflösung der zu Grunde liegenden Modellierung allerdings mit einem gewissen Abstraktionsgrad verbundenen. Für detaillierte Analysen von klimaökologischen Funktionen und Anforderungen auf den konkreter werdenden Planungsebenen von Stadtbezirken, Quartieren oder einzelnen Bauvorhaben sollten die Ergebnisse der Klimaanalyse daher überprüft und gegebenenfalls modifiziert werden. Eine umfangreiche Darstellung zahlreicher Hinweise und konkreter Maßnahmenvorschläge kann dem "Handbuch Stadtklima" (MUNLV 2010) entnommen werden.

Soweit möglich sollte durch die kommunale Bauleitplanung der Grünanteil im belasteten Siedlungsgebiet erhöht werden, z. B. durch die Anlage von Pocket-Parks (kleine, gärtnerisch gestaltete Flächen) oder großflächige Grünanlagen. Dies gilt insbesondere in thermisch besonders belasteten Bereichen (*ungünstige* und *sehr ungünstige* Bewertung). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen grüingeprägte Flächen des Freiraums nachts deutlich schneller ab und können ab einer gewissen Größe als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekten zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Neben ihrem Potenzial zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen auch Bäume und Sträucher im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der vertikale Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten.

Ein weiterer Ansatzpunkt ist das klimaangepasste Bauen, welches am ehesten bei Neubauten umzusetzen ist. Doch auch im Bestand und bei der Nachverdichtung sind entsprechende Maßnahmen möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren sowie darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beizubehalten bzw. zu erreichen (parallel zur Kaltluftströmung, ausreichend grüne Freiflächen zwischen den Gebäuden, etc.). Hierbei ist jedoch eine enge Abstimmung mit der energietechnischen Planung und Optimierung der Gebäude erforderlich, um nicht mitunter besonders energieeffiziente und energiesparende, dem Klimaschutz Rechnung tragende Gebäudekonzepte zur konterkarieren. Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren (Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften und Albedo). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente oder

Wärmedämmung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude.

Die Nachverdichtung im Stadtgebiet, welche aus Sicht des Klima- und Flächenschutzes zunächst grundsätzlich wünschenswert ist, kann unter dem Gesichtspunkt des urbanen Bioklimas jedoch auch negative Auswirkungen haben. Hier sollte vor allem bei *ungünstigen* und *sehr ungünstigen bioklimatischen Situationen* mit Nachdruck auf eine adäquate Berücksichtigung der Belange des klimaangepassten Bauens hingewirkt werden, was insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung betrifft. In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss.

## 9. Literatur

Deutscher Wetterdienst [DWD]: Website Bioklima

[https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku\\_beratung/gesundheits/bioklima/bioklima\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ku_beratung/gesundheits/bioklima/bioklima_node.html) (zuletzt aufgerufen am 26.03.2018)

EURO-CORDEX – Coordinated Downscaling Experiment – European Domain: <http://www.euro-cordex.net/index.php.en> (zuletzt aufgerufen am 07.07.2017).

European Environment Agency [EEA] (2012): Fast Track Service Precursor (FTSP) on Land Monitoring. Degree of soil sealing.

European Environment Agency [EEA] (2003): Corine Land Cover 2000, Corine-Datensatz zu Geländehöhe und Nutzungsstruktur, Copenhagen, Dänemark.

GEO-NET (2014): Konzept zur automatisierten Ableitung von Klimatopen in Nordrhein-Westfalen. Hannover, 05. Mai 2014, 20 Seiten

GEO-NET (2013): Klimaökologische Analysen Für das Gebiet des Regionalverbandes Ruhr: Kaltlufthaushalt und Durchlüftung. Im Auftrag des Regionalverbandes Ruhr, Kronprinzenstraße 35, 45128 Essen. GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover

GROSS (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. , H 62 , S. 57-72.

Gross (1993): Numerical Simulation of canopy flows. Springer Verlag Heidelberg.

Hergert (1991): Klimatische und lufthygienische Situation am Kronsberg und die Beeinträchtigung der klimaökologischen Ausgleichswirkung durch Bebauung. Diplomarbeit der der Abt. Physische Geographie und Landschaftsökologie am Geogr. Inst. der Univers. Hannover. 190 S.

Höppe (1999): The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology Volume 43, S. 71-75

Höppe, Mayer (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. Landschaft und Stadt 19 (1): S. 22-29.

Hupfer, Börngen, (2004): Gibt es "Klimakatastrophen"?, Naturwissenschaftliche Rundschau, 57, S. 233-240.

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2013): Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Im Internet abrufbar unter <http://www.ipcc.ch/report/ar5/> (zuletzt aufgerufen am 07.07.2017).

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Im Internet abrufbar unter [https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/WG1\\_TAR-FRONT.PDF](https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/WG1_TAR-FRONT.PDF) (zuletzt aufgerufen am 07.07.2017).

Kiese et al. (1988): Die Bedeutung verschiedenartiger Freiflächen für die Kaltluftproduktion und die Frischluftversorgung von Städten. Landschaft + Stadt 20, H. 2: 67-71

- klimREG – Webtool für einen Klimawandelgerechten Regionalplan: <http://www.klimreg.de> (zuletzt aufgerufen am 07.07.2017).
- Kuttler (2011): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen. Environmental Sciences Europe 2011: 23:21.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen [LANUV] (Hrsg.) (2016): Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen – Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016 – LANUV-Fachbericht 74. Recklinghausen.
- Landesdatenbank NRW: <https://www.landesdatenbank.nrw.de/ldbnrw/online/logon> (zuletzt aufgerufen am 07.07.2017).
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen [MKULNV] (Hrsg.) (2014): Handbuch Stadtklima – Teil II Methoden, Arbeitspaket 1. Düsseldorf. (unveröffentlicht)
- Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen [MUNLV] (Hrsg.) (2010): Handbuch Stadtklima – Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Düsseldorf.
- Mosimann, Trute, Frey (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- Regionaldatenbank Deutschland: <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/logon> (zuletzt aufgerufen am 07.07.2017).
- Schönwiese (2007): Wird das Klima extremer? In: Endlicher, W. & Gerstengarbe F.-H. (Hrsg.): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke, Ausblicke. Berlin.
- Umweltbundesamt [UBA] (2016): Klimaanpassung in der räumlichen Planung. Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung. Starkregen, Hochwasser, Massenbewegungen, Hitze, Dürre. Dessau
- Umweltbundesamt [UBA] (2015): Heizen, Raumtemperatur – gewusst wie. Im Internet abrufbar: <http://www.umweltbundesamt.de/umweltpipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/heizen-raumtemperatur> (letzmaliger Zugriff am 12. 06. 2017)
- U.S. Geological Survey [USGS] 2004: Geländedatensatz der SRTM-Befliegung. USGS/EROS Data Center, Attn.: Research. Sioux Falls, SD
- Verein Deutscher Ingenieure [VDI] (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lüftungshygiene.
- Verein Deutscher Ingenieure [VDI] (2008): Richtlinie VDI 3785, Blatt1, Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, Düsseldorf.
- Verein Deutscher Ingenieure [VDI] (2015): Richtlinie VDI 3787 Blatt 1. Klima- und Lüftungshygienekarten für Städte und Regionen. Düsseldorf

## **Gesetze, Verordnungen und Rechtsprechung**

Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland vom 23. Mai 1949 (BGBl. S. 1), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 23.12.2014 (BGBl. I S. 2438).

Klimaschutzgesetz Nordrhein-Westfalen vom 29.01.2013.

Landesplanungsgesetz Nordrhein-Westfalen (LPIG-NRW) vom 03.05.2005.

Raumordnungsgesetz (ROG) vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986).

Urteil des BVerwG vom 18.09.2003, Az. 4 CN 20/02.

## Glossar

**Ausgleichsleistung:** Durch lokalen →Luftaustausch bzw. Lufttransport zwischen →Ausgleichs- und →Wirkraum wird eine positive Beeinflussung der bioklimatischen bzw. lufthygienischen Verhältnisse erzielt.

**Ausgleichsraum:** Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen Wirkraum angrenzt oder mit diesem über wenig raue Strukturen (→Leitbahnen) verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen und lufthygienischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

**Austauscharme Wetterlage:** →Strahlungswetterlage

**Autochthone Wetterlage:** →Strahlungswetterlage

**Autochthones Windfeld:** Kaltluftabflüsse und Flurwinde, welche sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen →Strahlungswetterlage ausbilden.

**Bioklima:** Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (=atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf Menschen.

**Eindringtiefe:** Reichweite einer Kaltluftströmung in den →Wirkraum hinein, ausgehend vom Bebauungsrand.

**Dampfdruck:** Ein Feuchtigkeitsmaß, der den Feuchtigkeitsgehalt der Luft in Abhängigkeit von der Lufttemperatur angibt. Der Dampfdruck gibt den Druck des Wasserdampfs in der Luft an, zusammen mit dem Druck der trockenen Luft ergibt sich der Luftdruck.

**Flurwind:** Thermisch bedingte schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Er strömt vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in das Zentrum der Überwärmung (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum) ein.

**Kalt- und Frischluftströmung:** Unter Kaltluftströmung werden alle Luftmassen Bewegungen einer „kühleren“ Luftmasse als die Umgebungsluft zusammengefasst. Unterschieden werden kann die Luftmasse dabei in unbelastete Luft sog. Frischluft, also eine Luftmasse mit besonders hoher Qualität für die Versorgung und Ausgleichswirkung in der Stadt, demgegenüber stellen kann man Luftmassen, die beispielsweise eine stark befahrene Straße als Leitbahn nutzen und somit mit Luftschadstoffen (Autoabgasen) belastet werden.

**Kaltluftabfluss:** An wenig rauen Hängen und Tälern mit genügendem Gefälle (theoretisch ab etwa 0,5°) setzt sich die Kaltluft aufgrund der Schwerkraft, dem Gefälle folgend, in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.

**Kaltluftvolumenstrom:** Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom 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  $\text{m}^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-*dichte* aufzufassen. Dies kann man so veranschaulichen, indem man sich ein quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht<sup>3</sup> bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man den rasterbasierten Kaltluftvolumenstrom.

**Klimafunktionen:** Prozesse und Wirkungen in der Landschaft, die das örtliche Klima mitbestimmen und Belastungen von Organismen durch besondere Klimabedingungen erhöhen oder abbauen.

**Leitbahnen:** Linear ausgerichtet, wenig raue Freiflächen, die den lokalen Luftaustausch fördern, insbesondere den Transport von Kaltluft aus dem Ausgleichsraum in den Wirkraum. Die Leitbahneigenschaften bestimmen, in welchen Umfang eine Ausgleichsleistung erbracht wird.

**Luftaustausch:** Transport von Luftmassen mit bestimmten Eigenschaften durch turbulente Diffusion. Es werden austauschschwache Situationen mit Windgeschwindigkeiten  $\leq 1,5 \text{ m/s}$  von austauschstarken mit Windgeschwindigkeiten  $\geq 5,5 \text{ m/s}$  unterschieden.

**Perzentil:** Perzentile geben die Lage bestimmter Werte in einer statistischen Verteilung wieder. Sie sind somit den Quantilen gleichzusetzen, werden der Anschaulichkeit halber aber auf eine Grundgesamtheit von 100 % bezogen. Um Perzentile oder Quantile bestimmen zu können werden die Werte der Verteilung der Größe nach geordnet. Das bekannteste Perzentil stellt das 50 %-Perzentil dar, das auch Median genannt wird. Es teilt die Werte so, dass 50 Prozent der Werte in der Verteilung größer sind sowie 50 Prozent der Werte kleiner sind als das 50 %-Perzentil.

**PET:** Physiological Equivalent Temperature: Die physiologisch äquivalente Temperatur ist eine medizinisch relevante Größe zur Beschreibung bzw. Vorhersage der Körperreaktionen auf wechselnde Umgebungsbedingungen (vgl. HÖPPE, 1999).

**Rauigkeit:** Gibt die durch Bebauungs- oder Vegetationsstrukturen hervorgerufene Veränderungen des Windfeldes wieder. Als Maß der Rauigkeit fungiert der  $z_0$ -Wert, der in Meter angegeben wird.

**Reichweite:** →Eindringtiefe

**Strahlungswetterlage:** Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird bei dieser Wetterlage vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt. Voraussetzung für ihre Ausbildung sind eine geringe Bewölkung von weniger als 3/8 und eine mittlere Geschwindigkeit des Windes von unter  $1,5 \text{ m/s}$ .

---

<sup>3</sup> Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit geringer als  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  wird

**Strahlungstemperatur:** Die mittlere Strahlungstemperatur ist die Temperatur der auf den Wärmehaushalt des Menschen (bzw. den Messpunkt) einwirkende Wärmestrahlung aller Umschließungsflächen in Abhängigkeit von deren Emissionsvermögen.

**Strömungsfeld:** Für den Analysezeitpunkt 4 Uhr morgens simulierte flächendeckende Strömungsfeld der Kaltluftabflüsse und Flurwinde während einer windschwachen →Strahlungswetterlage.

**Thermischer bzw. bioklimatische Belastungen:** →Wärmebelastung, →Bioklima

**Wärmebelastung:** Durch Behinderung der Wärmeabgabe des Körpers hervorgerufenen Unbehaglichkeitsempfinden. Wärmebelastung tritt hauptsächlich bei sommerlichen, strahlungsreichen Hochdruckwetterlagen mit hoher Temperatur, hoher Feuchte und geringer Luftbewegung auf (Schwüle).

**Wärmeinsel:** Derjenige städtische Lebensraum, der gegenüber der Umgebung vor allem abends und nachts eine höhere Lufttemperatur aufweist. Es bilden sich in der Regel mehrkernige Wärmeinseln in einer Stadt aus. Die Jahresmitteltemperaturen sind in diesen Räumen um 0,5 bis 1,5 Kelvin gegenüber dem Umland erhöht.

**Wirkraum:** Bebauter (oder zur Bebauung vorgesehener), bioklimatisch oder lufthygienisch belasteter Raum (Belastungsraum), der an einen oder mehrere Ausgleichsräume angrenzt oder über wenig raue Strukturen angebunden ist. Durch lokale Luftaustauschprozesse erfolgt eine Zufuhr von Kaltluft aus dem →Ausgleichsraum, die zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen beiträgt.

**Z-Transformation:** In der VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008) beschriebenes Verfahren zur Z-Transformation. Dieses Vorgehen legt allgemein das lokale/regionale Wertenniveau einer Klimaanalyse zugrunde und bewertet die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen in einem Untersuchungsraum.



Landesamt für Natur, Umwelt und  
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10  
45659 Recklinghausen  
Telefon 02361 305-0  
[poststelle@lanuv.nrw.de](mailto:poststelle@lanuv.nrw.de)

[www.lanuv.nrw.de](http://www.lanuv.nrw.de)