

# Stadtklimaanalyse für die Wissenschaftsstadt Darmstadt

**ThINK –  
Thüringer Institut für Nachhaltigkeit  
und Klimaschutz GmbH**

Wissenschaftsstadt  
Darmstadt



## Bearbeitung:

**Projektleitung:** Jakob Maercker

**Mitarbeit:** Dennis Kehl, Lisa Mastaler

Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz (ThINK Gf)  
Hainstraße 1a  
07745 Jena



## im Auftrag der:

Wissenschaftsstadt Darmstadt  
Amt für Klimaschutz und Klimaanpassung  
Bessunger Straße 125 – Block A  
64295 Darmstadt

Wissenschaftsstadt  
Darmstadt



Endfassung vom 22.11.2024

# Inhalt

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Abbildungen.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>Tabellen .....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>1. Einführung und Zielstellung der Stadtklimaanalyse .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>2. Geographische Rahmenbedingungen .....</b>  | <b>12</b> |
| <b>3. Klimatische Entwicklung in Darmstadt .....</b>   | <b>13</b> |
| 3.1 Klimastationsauswertung.....   | 13        |
| 3.2 Klimaprojektionsauswertung .....   | 22        |
| <b>4. Stadtklimaanalyse .....</b>  | <b>30</b> |
| 4.1 Besonderheiten des Stadtklimas.....  | 30        |
| 4.1.1 Einführung Stadtklima.....   | 30        |
| 4.1.2 Städtischer Wärmeinseleffekt .....   | 31        |
| 4.2 Klimaanalysekarte Einführung.....  | 32        |
| 4.3 Klimatope .....  | 33        |
| 4.4 Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 .....  | 38        |
| 4.4.1 Theoretische Grundlagen .....  | 38        |
| 4.4.2 Praktische Umsetzung – Vorbereitung der Modellierung.....  | 39        |
| 4.4.3 Praktische Umsetzung – Datenaufbereitung nach der Modellierung.....  | 41        |
| 4.5 Ergebnisse der Kaltluftmodellierung .....  | 44        |
| 4.5.1 Kompletter Zeitverlauf der Kaltluftvolumenstromdichte .....  | 44        |
| 4.5.2 Grundlage für die Darstellung in der Klimaanalysekarte – Zeitschritt nach zwei Stunden Simulationszeit ..... | 51        |
| 4.6 In der Klimaanalysekarte dargestellte Kaltluftmerkmale .....   | 54        |
| 4.6.1 Luftleitbahn.....  | 55        |
| 4.6.2 lokaler Kaltluft(ab)fluss.....   | 56        |
| 4.6.3 Talwind .....  | 56        |
| 4.6.4 Kaltlufteinzugsgebiet .....  | 57        |
| 4.6.5 Kaltluftstau .....   | 57        |
| 4.6.6 Kaltfluthindernis bzw. Kaltluftbarriere.....   | 58        |
| 4.6.7 Eindringtiefe der Kaltluft .....   | 59        |
| 4.7 Überwärmung – Wärmebelastungsindex und Verschattungsanalyse .....  | 60        |
| 4.7.1 Wärmebelastungsindex - Eingangsdaten .....   | 60        |
| 4.7.2 Wärmebelastungsindex – Methodik und Ergebnis .....   | 61        |
| 4.7.3 Verschattungsanalyse.....  | 64        |
| 4.8 Exkurs: Analyse der Vegetationsvitalität im Herrngarten für zwei verschiedene Jahre anhand des NDVI.....       | 65        |
| 4.9 Verkehrsbelastung .....  | 69        |
| 4.10 Anlagen nach Bundes-Immissionsschutzverordnung .....  | 70        |
| 4.11 Darstellung und Auswertung der Klimaanalysekarte nach VDI 3787, Blatt 1 .....                                 | 71        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 4.12      | Exkurs: Entwicklung einer alternativen Klimaanalysekarte .....  | 75         |
| 4.13      | Planungshinweiskarte Einführung .....   | 77         |
| 4.14      | Planungshinweiskarte – Methodische Herleitung .....   | 80         |
| 4.15      | Darstellung und Auswertung der Planungshinweiskarte nach VDI 3787, Blatt 1<br>81                        |            |
| 4.16      | Exkurs: Entwicklung einer alternativen Planungshinweiskarte .....                                       | 85         |
| <b>5.</b> | <b>Betroffenheitsanalyse Wärmebelastung für die Bevölkerung und in sozialen<br/>Einrichtungen .....</b> | <b>88</b>  |
| <b>6.</b> | <b>Thermaldrohnenbefliegung .....</b>   | <b>92</b>  |
| 6.1       | Methodik und Anlass .....   | 92         |
| 6.2       | Standort Platz der Deutschen Einheit / Hauptbahnhof .....   | 92         |
| 6.3       | Standort Europaplatz.....   | 95         |
| 6.4       | Standort Herrngarten und Karolinenplatz .....   | 96         |
| 6.5       | Standort am Staatstheater / Georg-Büchner-Platz / Wilhelminenplatz .....                                | 98         |
| <b>7.</b> | <b>Fazit .....</b>  | <b>100</b> |
|           | <b>Literatur .....</b>  | <b>101</b> |
|           | <b>Anhang.....</b>  | <b>107</b> |

## Abbildungen

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Lage der DWD-Messstation Darmstadt an der Dieburger Straße. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD, Google Maps.....  | 13 |
| Abbildung 2: Mittlere jährliche Lufttemperatur an der der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....  | 15 |
| Abbildung 3: Mittlere jährliche Lufttemperatur an der der DWD-Messstation Frankfurt für den Zeitraum 1938-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....  | 16 |
| Abbildung 4: Vergleich der mittleren monatlichen Lufttemperatur an der DWD-Messstation Frankfurt für die beiden Klimaperioden 1961-1990 und 1991-2020. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....   | 17 |
| Abbildung 5: Jährliche Anzahl an Hitzetagen (Tage mit $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ ) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....  | 18 |
| Abbildung 6: Jährliche Anzahl an Hitzetagen (Tage mit $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ ) an der DWD-Messstation Frankfurt für den Zeitraum 1948-2022. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....  | 19 |
| Abbildung 7: Jährliche Niederschlagssumme an der DWD-Messstation Darmstadt im Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....  | 20 |
| Abbildung 8: Jährliche Niederschlagssumme an der DWD-Messstation Frankfurt im Zeitraum 1936-2022. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....  | 21 |
| Abbildung 9: Vergleich der monatlichen Niederschlagssummen an der DWD-Messstation Frankfurt für die beiden Klimaperioden 1961-1990 und 1991-2020. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....  | 22 |
| Abbildung 10: Projizierte Änderungen der Jahresmitteltemperatur im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG. ....   | 24 |
| Abbildung 11: Projizierte Änderungen der Hitzetage (Tage mit $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ ) und Tropennächte (Nächte mit $T_{min} \geq 20 \text{ °C}$ ) im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG. .... | 25 |
| Abbildung 12: Projizierte Änderungen der Frosttage (Tage mit $T_{min} < 0 \text{ °C}$ ) im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG. ....   | 26 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 13: Projizierte prozentuale Änderungen der Jahresniederschläge im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.....   | 27 |
| Abbildung 14: Projizierte prozentuale Änderungen der Sommerniederschläge im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG. ....  | 28 |
| Abbildung 15: Projizierte prozentuale Änderungen der Winterniederschläge im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.....   | 28 |
| Abbildung 16: Schematische Übersicht zum Stadtklima. Quelle: DWD (2010). ....  | 30 |
| Abbildung 17: Zusammenfassende Übersicht der Klimatope. Quelle: Legende der Klimaanalysekarte.....   | 33 |
| Abbildung 18: Digitales Geländemodell im Modelliergebiet. ....   | 42 |
| Abbildung 19: Landbedeckungsraster im Modelliergebiet. ....  | 43 |
| Abbildung 20: Zeitserie der Kaltluftvolumenstromdichte nach Sonnenuntergang. Die Legende ist vergrößert auf der rechten Seite zu sehen. ....   | 49 |
| Abbildung 21: Übersicht zur Kaltluftversorgung im Stadtgebiet von Darmstadt für verschiedene Zeitschritte. Je dunkler das Blau, desto besser. Nicht gekennzeichnete Bereiche erreichen den Grenzwert bei der Kaltluftvolumenstromdichte für eine hinreichend gute Kaltluftversorgung in den ersten sechs Nachtstunden nicht..... | 50 |
| Abbildung 22: Kaltfluthöhe zwei Stunden nach Sonnenuntergang.....  | 53 |
| Abbildung 23: Kaltluftfließgeschwindigkeit in 2 m Höhe nach Sonnenuntergang.....   | 54 |
| Abbildung 24: Schematische Darstellung des Wärmebelastungsindex und dessen Eingangsdaten am Beispiel der Innenstadt von Chemnitz.....  | 61 |
| Abbildung 25: Wärmebelastungsindex im Stadtgebiet von Darmstadt. Hinweis: Eine zusätzliche Karte mit den Standorten von sozialen Einrichtungen steht der Stadt Darmstadt zur Verfügung.....  | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 26: Ausschnitt der Karte zur Verschattungsanalyse im Umfeld der Innenstadt von Darmstadt im Originalmaßstab. Rote Farben stehen für sehr viel Sonneneinstrahlung und blaue Farben für eine geringe Sonneneinstrahlung im Sommerhalbjahr von April bis September. Hinweis: Eine zusätzliche Karte mit den Standorten von sozialen Einrichtungen steht der Stadt Darmstadt zur Verfügung. .... | 64 |
| Abbildung 27: Spektrale Reflexionskurve von gesunder Vegetation. Quelle: Roman & Tudor (2016). ....  | 65 |
| Abbildung 28: Vergleich der Spektralen Vegetationskurven von gesunder Vegetation (grün), kranker Vegetation (orange) und vegetationslosen Oberflächen (braun). Quelle: GIS Resources (2023). ....  | 66 |
| Abbildung 29: Ausschnitt der NDVI Karte für den Bereich des Herrngartens. Die dahinterstehende Satellitenaufnahme stammt vom 11.08.2022. ....  | 67 |
| Abbildung 30: Ausschnitt der NDVI Karte für den Bereich des Herrngartens. Die dahinterstehende Satellitenaufnahme stammt vom 18.06.2023. ....  | 69 |
| Abbildung 31: Klimaanalysekarte nach VDI 3787, Blatt 1 im Stadtgebiet von Darmstadt (Originalmaßstab 1:10.000). Hinweis: Aufgrund der zahlreichen, kleinräumigen Details kann die Karte an dieser Stelle im Bericht nur in reduzierter Qualität dargestellt werden. Die originale PDF-Karte mit voller Auflösung liegt der Stadt Darmstadt vor. ....   | 71 |
| Abbildung 32: Legend der Klimaanalysekarte. Teil 1 links und Teil 2 rechts. ....   | 72 |
| Abbildung 33: Ausschnitt der Klimaanalysekarte im Originalmaßstab von 1:10.000. ....   | 72 |
| Abbildung 34: Alternative Version der Klimaanalysekarte. Hinweis: Aufgrund der zahlreichen, kleinräumigen Details kann die Karte an dieser Stelle im Bericht nur in reduzierter Qualität dargestellt werden. Die originale PDF-Karte mit voller Auflösung liegt der Stadt Darmstadt vor. ....  | 75 |
| Abbildung 35: Legende der alternativen Klimaanalysekarte. Teil 1 links und Teil 2 rechts. ....   | 75 |
| Abbildung 36: Ausschnitt der alternativen Klimaanalysekarte im Originalmaßstab von 1:10.000. ....  | 75 |
| Abbildung 37: Übersicht zu den Planungshinweisen aus der Legende der Planungshinweiskarte. ....  | 77 |
| Abbildung 38: Übersetzungsmatrix zur Umwandlung der Klimaanalysekarte in die Planungshinweiskarte. Im Anschluss erfolgt eine manuelle Nachbearbeitung auf gutachterlicher Ebene. ....  | 80 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 39: Planungshinweiskarte nach VDI 3787, Blatt 1 im Stadtgebiet von Darmstadt (Originalmaßstab 1:10.000). .....   | 84  |
| Abbildung 40: Ausschnitt der Planungshinweiskarte im Originalmaßstab von 1:10.000. ....  | 85  |
| Abbildung 41: Übersicht der vier neuen siedlungsbezogenen Planungshinweisklassen, welche die beiden bisher höchsten ersetzen.....  | 85  |
| Abbildung 42: Alternative Version der Planungshinweiskarte.....  | 86  |
| Abbildung 43: Vergrößerter Ausschnitt der alternativen Planungshinweiskarte im Originalmaßstab von 1:10.000. ....  | 87  |
| Abbildung 44: Übersichtskarte zur Betroffenheitsanalyse Wärmebelastung für die Bevölkerung nach statistischen Bezirken. ....   | 90  |
| Abbildung 45: Oberflächentemperaturen am Platz der Deutschen Einheit / Hauptbahnhof .....  | 94  |
| Abbildung 46: Oberflächentemperaturen am Europaplatz.....  | 95  |
| Abbildung 47: Oberflächentemperaturen am Herrngarten und Karolinenplatz. ....  | 97  |
| Abbildung 48: Oberflächentemperaturen am Staatstheater / Georg-Büchner-Platz / Wilhelminenplatz.....   | 98  |
| Abbildung 49: Jährliche Anzahl an Eistagen (Tage mit $T_{max} < 0 \text{ °C}$ ) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....   | 108 |
| Abbildung 50: Jährliche Anzahl an Frosttagen (Tage mit $T_{min} < 0 \text{ °C}$ ) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....   | 108 |
| Abbildung 51: Jährliche Anzahl an Sommertagen (Tage mit $T_{max} \geq 25 \text{ °C}$ ) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.....  | 109 |
| Abbildung 52: Jährliche Anzahl an Tropennächten (Nächte mit $T_{min} \geq 20 \text{ °C}$ ) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Aufgrund der geringen Absolutwerte sowie eines Standortwechsels der Station im Jahr 1995 ist die im Trend dargestellte Abnahme hier nicht als aussagekräftig anzusehen. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD. .... | 109 |
| Abbildung 53: Jährliche Anzahl an Hitzewellentagen (eine Hitzewelle wird durch mindestens drei aufeinanderfolgende Hitzetage definiert) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD... ..  | 110 |
| Abbildung 54: Jährliche Anzahl an Starkregentagen (Tage mit $\geq 20 \text{ mm}$ Niederschlag) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD. ....   | 110 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 55: Jährliche Anzahl an Schneedeckentagen (Tage mit<br>Schneebedeckungsgrad > 0,5) an der DWD-Messstation<br>Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene<br>Erstellung, Datengrundlage: DWD.....                               | 111 |
| Abbildung 56: Jährliche Anzahl an Tagen mit Schwüle (Tage mit<br>Dampfdruck $\geq$ 18.8 hPa) an der DWD-Messstation Darmstadt<br>für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung,<br>Datengrundlage: DWD.....                               | 111 |
| Abbildung 57: Projizierte Änderungen der Sommertage (Tage mit $T_{max} \geq 25$<br>$^{\circ}C$ ) im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur<br>Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung,<br>Datengrundlage: HLNUG. .... | 112 |
| Abbildung 58: Projizierte Änderungen der Eistage (Tage mit $T_{max} < 0$ $^{\circ}C$ ) im<br>Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur<br>Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung,<br>Datengrundlage: HLNUG. ....        | 112 |

## Tabellen

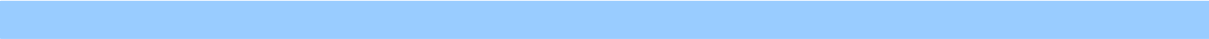
|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Zusammenfassung der zu erwartenden Klimaveränderungen für<br>die „Ferne Zukunft“ (2071-2100) im Vergleich zur<br>Referenzperiode 1971-2000 in der Stadt Darmstadt. Quelle:<br>eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.....  | 29 |
| Tabelle 2: Übersicht zur Umwandlung der Klimatopklassen zu den<br>passenden KLAM_21 Nutzungsklassen.....  | 40 |
| Tabelle 3: Wärmebelastungsindex im 50 m Radius um jede soziale<br>Einrichtung in Darmstadt. Neben dem Mittelwert sind in den<br>beiden rechten Spalten noch das Minimum und das<br>Maximum im jeweiligen Umfeld angegeben. Insgesamt<br>wurden 211 Einrichtungen untersucht. Die Nummern 2 bis 19<br>zeigen die Einrichtungen, mit der klimatisch ungünstigsten<br>Umgebung hinsichtlich des Themas Hitze, während unten die<br>Nummern 194 bis 212 die Einrichtungen mit einem besonders<br>günstigen Umfeld kennzeichnen. Die Farben entsprechen der<br>Legende des Wärmebelastungsindex. Hinweis: Die<br>Einrichtungsnamen wurden für den vorliegenden Bericht<br>ausgeblendet. Die vollständige Originaltabelle liegt der Stadt<br>Darmstadt vor..... | 91 |

## 1. Einführung und Zielstellung der Stadtklimaanalyse

Die Stadtklimaanalyse für die Wissenschaftsstadt Darmstadt bietet eine umfassende Bewertung der lokalklimatischen Situation, sowie Projektionen für zukünftige klimatische Entwicklungen und ihre möglichen Auswirkungen für die Darmstädter Bevölkerung.

Klimatische Veränderungen wurden in den letzten Jahren und Jahrzehnten in den Städten vor allem hinsichtlich der Themen Hitze und Trockenheit immer spürbarer. Die Aufenthalts- und Wohnqualität für die Bevölkerung wird vor allem in stark versiegelten und wenig durchgrüntem Stadtbereichen zunehmend beeinträchtigt. Städte heizen sich tagsüber auf und geben diese Wärme verzögert in der Nacht ab. Dies führt dazu, dass gerade in der Nacht mitunter erhebliche Unterschiede von mehreren Grad Celsius zwischen Stadt und Umland vorliegen können. Besonders betroffen sind hiervon sehr junge, alte und chronisch kranke Menschen, deren Körper die Hitze nicht gut regulieren können.

Für die Stadtplanung ergeben sich dadurch neue, teils große Herausforderungen und Spannungsfelder. So muss im Bestand geprüft werden wo, in welchem Umfang und auf welche Art und Weise Maßnahmen zur Verbesserung der lokalklimatischen Situation ergriffen werden können. Hierbei müssen sehr oft Abwägungen hinsichtlich verschiedener Themen wie z. B. Finanzierung, Flächenkonkurrenz, Denkmalschutz, Eigentumsverhältnissen, politischem Willen, etc. getroffen werden. Gleichzeitig erfolgt zunehmend auch bei neuen Bauleitplanverfahren ein Umdenken. Die Planung von



verschatteten Grün- und Freiflächen, ein möglichst geringer Versiegelungsgrad und beispielsweise an die lokalen Strömungsverhältnisse angepasste Gebäudestellungen gewinnen an Bedeutung. Dies führt wiederum dazu, dass bei Umsetzung entsprechender Maßnahmen oft weniger Platz für den mitunter dringend benötigten Wohnraum zur Verfügung steht.

Lokale Messungen mit einer Thermaldrohne, welche im Sommer 2024 in Darmstadt vorgenommen wurden, sollen dabei helfen, dass der lokale Wärmeinseleffekt des Aufheizverhaltens verschiedener Oberflächen auch auf mikroklimatischer Basis besser nachvollziehbar wird. Umfangreiche Analysen zur nächtlichen Kaltluftdynamik von Darmstadt mittels eines Kaltluftmodells zeigen deutliche Unterschiede der Kaltluftdynamik zwischen den Stadtteilen.

Damit diese Herausforderungen angegangen werden können, ist eine aktuelle und detaillierte Daten- und Kartengrundlage zur lokalklimatischen Situation elementar. Ziel der Analyse ist es, die Einwohner über die klimatischen Verhältnisse zu informieren und Entscheidungsträgern und Planern eine wissenschaftliche Grundlage zu geben, um Maßnahmen zur Klimaanpassung und Stadtentwicklung gezielt zu erarbeiten.

## 2. Geographische Rahmenbedingungen

Die kreisfreie Großstadt Darmstadt ist mit 164.792 Einwohnerinnen und Einwohnern (Stand 2023) die viertgrößte Stadt Hessens (Wikipedia 2024) und somit ein Oberzentrum der Rhein-Main Metropolregion (Wissenschaftsstadt Darmstadt o. J.). Die Fläche der Stadt beträgt 122 km<sup>2</sup> (Google Earth 2024). Sie befindet sich ca. 25 Kilometer südlich von Frankfurt am Main und ca. 45 km nördlich von Mannheim. Der Rhein fließt ca. 20 km westlich der Stadt (Google Earth).

Darmstadt liegt im Oberrheingraben und befindet sich auf einer Höhe von 144 m über NN. Gleichzeitig bildet die Stadt die Schnittstelle verschiedener Naturräume. Im Westen erstreckt sich das Hessische Ried, welches zur Oberrheinischen Tiefebene gehört (Wikipedia 2024). Darmstadts Nordosten ist Bestandteil des Messeler Hügellands mit ausgedehnten Waldgebieten (NABU Münster-Hessen o. J.). Südlich der Stadt liegt das Mittelgebirge Odenwald (Wikipedia 2024).

Nach Köppen & Geiger befindet sich Darmstadt in der warmgemäßigten, immerfeuchten, maritimen Cfb-Klimazone, charakterisiert durch warme Sommer, milde Winter und eine gleichmäßige jährliche Niederschlagsverteilung. Durch die Lage in der Oberrheinischen Tiefebene befindet sich Darmstadt in einer der wärmsten Regionen Deutschlands (Wikipedia 2024).

Neben einem Dutzend Parks weist das Stadtgebiet 13 Naturschutzgebiete auf, 9 davon zählen zu den Natura 2000 Flächen. Zudem gibt es das Landschaftsschutzgebiet „Stadt Darmstadt“ (Wikipedia 2024).

Während Darmstadt vor den Zerstörungen im Zuge des zweiten Weltkriegs als Residenzstadt fungierte, liegt heute der Fokus auf ihrer Relevanz als Wissenschafts- und Kulturstadt. So gibt es zahlreiche Theater, Museen, aber auch mehr als 30 Forschungseinrichtungen (Wissenschaftsstadt Darmstadt o. J.). Des Weiteren gilt Darmstadt als bedeutender Wirtschaftsstandort und schafft es im deutschlandweiten IW-Städteranking 2023 auf Platz 7 (IW Consult 2024), insbesondere mit Clustern im Bereich Chemie, Pharma, Weltraum- und Satellitentechnologie, Maschinenbau sowie Informationstechnik (Wissenschaftsstadt Darmstadt o. J.).

Der Verkehr in Darmstadt wird täglich von enormen Pendlerströmen geprägt, wobei über doppelt so viele Erwerbstätige in die Stadt einfahren, als sie verlassen. Dabei entsteht durch die Kreuzung der Autobahnen A67 und A5 sowie der Bundesstraßen B3 und B26 ein gut ausgebautes Straßennetz. Zudem liegt Darmstadt an einem Eisenbahnknotenpunkt. So gibt es u. a. stündliche ICE-Verbindungen zwischen Frankfurt am Main und Heidelberg, aber auch halbstündlich bis stündliche Regionalverbindungen nach Mainz, Wiesbaden und Aschaffenburg (Wikipedia 2024). Innerhalb der letzten Jahrzehnte stieg der Radverkehrsanteil der Stadt kontinuierlich auf 22 % (Stand 2018) an und soll laut Stadtverwaltung bis 2030 bei 30 % liegen (Wissenschaftsstadt Darmstadt o. J.).

### 3. Klimatische Entwicklung in Darmstadt

#### 3.1 Klimastationsauswertung

Historische Klimastationsdaten eignen sich sehr gut, um die klimatische Entwicklung in der Vergangenheit sowie aktuelle Tendenzen an einem bestimmten Ort aufzuzeigen. Messungen des DWD (Deutscher Wetterdienst) weisen hierbei eine besonders hohe Qualität auf, da deutschlandweit einheitliche Standards gelten und sich die Ergebnisse somit miteinander vergleichen lassen. Deshalb sollen in diesem Kapitel DWD-Messwerte verschiedener klimatischer Kennzahlen vorgestellt werden.

Die für Darmstadt hier nächstgelegene DWD-Station ist die Station Darmstadt, welche allerdings erst seit 1988 Messdaten liefert. Zudem kam es 1995 nochmals zu einem Standortwechsel, sodass die Station erst seit 1995 kontinuierliche Messdaten zu gleichbleibenden Bedingungen liefert (in den Abbildungen der Klimakennzahlen ist dieser Bruch durch eine gestrichelte vertikale Linie gekennzeichnet). Die Station befindet sich (aktuell) auf einer Geländehöhe von 162 m ü. NN in der Dieburger Straße im Osten Darmstadts im stadtrandnahen Umfeld lockerer Wohnbebauung und einer Kleingartenanlage (Abbildung 1). Sie liegt damit im Vergleich zur Innenstadt leicht

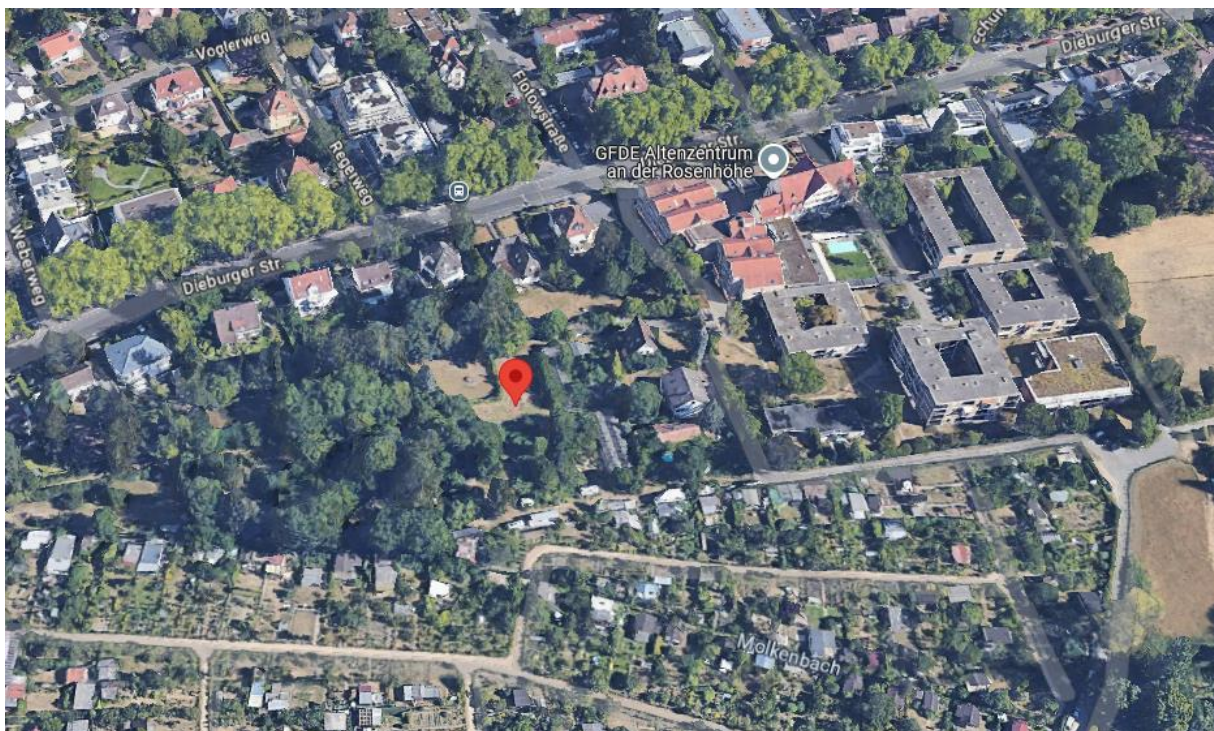


Abbildung 1: Lage der DWD-Messstation Darmstadt an der Dieburger Straße. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD, Google Maps.

erhöht. In aller Regel lassen sich grundsätzliche klimatische Trends auf das erweiterte Umfeld einer jeden Station übertragen. Zu beachten sei jedoch, dass bedingt durch die Lage der Station der städtische Wärmeinseleffekt bei den Messungen nur eingeschränkt berücksichtigt wird und etwa im Stadtzentrum insgesamt ein etwas höheres Temperaturniveau zu erwarten ist.

Aufgrund der kurzen Messreihe an der Station Darmstadt wird außerdem die DWD-Station Frankfurt/Main mit einer zusammenhängenden Messreihe ab 1948 hinzugezogen (teilweise liegen dort auch Messwerte aus den 1930er Jahren vor). Diese liegt knapp 20 km Luftlinie von der DWD-Station Darmstadt entfernt in nordöstlicher Richtung auf dem Gelände des Frankfurter Flughafens. Für den überlappenden Messzeitraum ab 1988 zeigen sich hier ähnliche Entwicklungen, sodass die Station hier als geeignet angesehen wird, um die Darmstädter Messreihe zu ergänzen. Zu beachten ist, dass die absoluten Temperaturwerte etwas über denen der Station Darmstadt liegen, jedoch sind für den Innenstadtbereich von Darmstadt, wie oben erwähnt, auch etwas höhere Werte als an der Darmstädter Station zu erwarten, weshalb die Station Frankfurt/Main hier trotzdem ergänzend als geeignet für die Bewertung der Situation in Darmstadt angesehen wird.

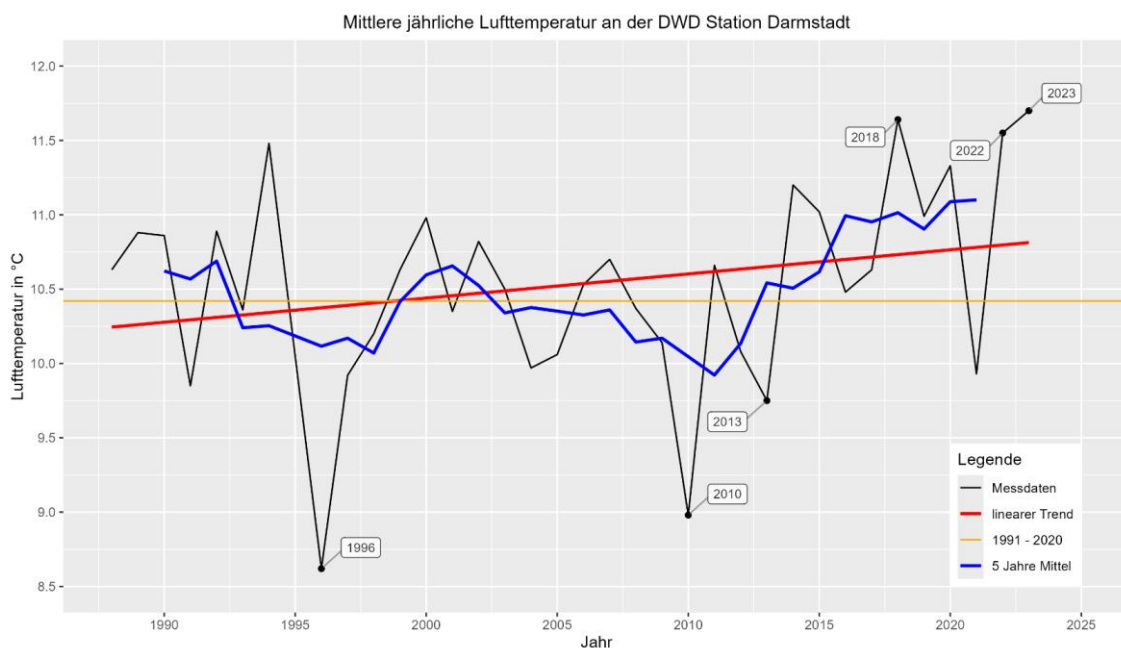
Nachfolgend werden aus Umfangsgründen nur ausgewählte Ergebnisse der Stationsauswertung genauer vorgestellt. Für weitere Diagramme sei auf den Anhang verwiesen.

### **Jahresmitteltemperatur**

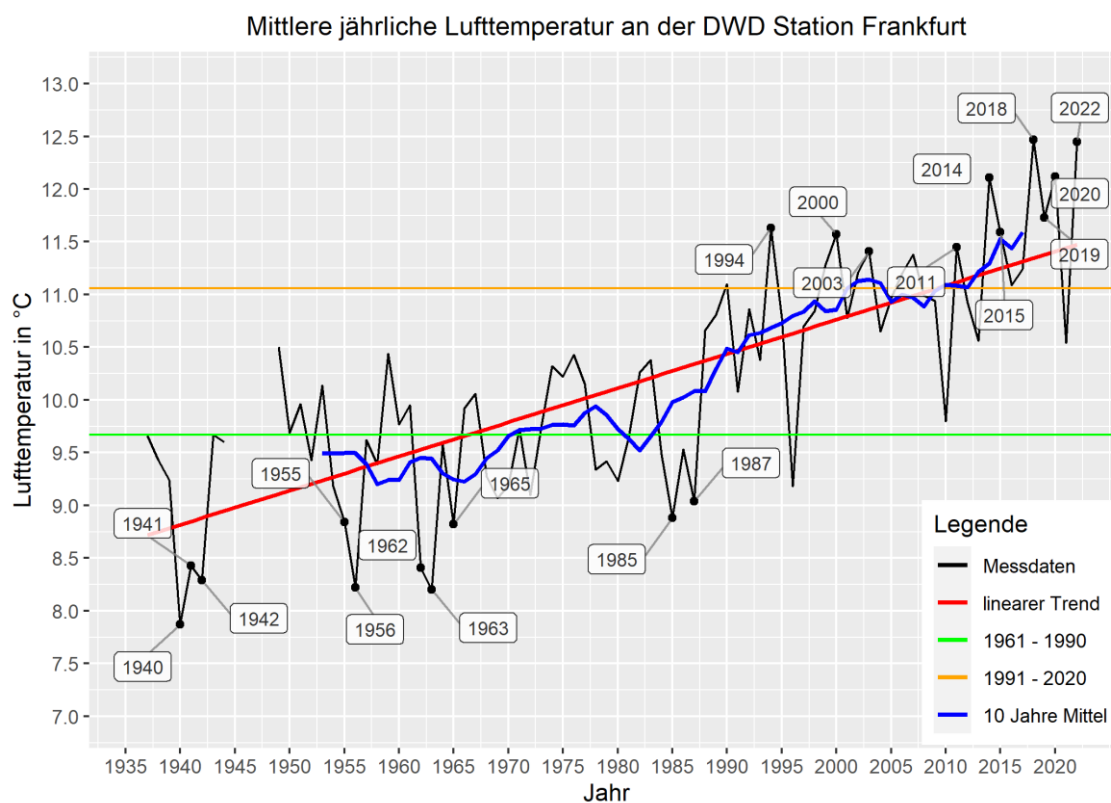
Die mittlere jährliche Lufttemperatur ist der geläufigste Indikator in der Diskussion um den Klimawandel. Zur besseren Verständlichkeit sei an dieser Stelle erwähnt, dass im Folgenden wie in der Literatur üblich, Temperaturveränderungen stets in Kelvin (K) und absolute Temperaturwerte in Grad Celsius (°C) angegeben werden.

Die Stationsabbildungen zur Jahresmitteltemperatur (Abbildung 2 und Abbildung 3) sowie zum Jahresniederschlag (Abbildung 7 und Abbildung 8) bestehen aus den folgenden Inhalten:

- *schwarze Linie*: Jahreswerte (jährlicher Mittelwert der Temperatur bzw. jährliche Summe des Niederschlags)
- *rote Linie*: lineare Trendlinie (entspricht einer linearen Regressionsanalyse)
- *grüne Linie*: langjähriger Mittelwert der alten Klimareferenzperiode von 1961 bis 1990
- *orange Linie*: langjähriger Mittelwert der aktuellen Klimareferenzperiode von 1991 bis 2020
- *blaue Linie*: gleitendes Mittel (für zehn Jahre bei den längeren Messreihen von der Station in Frankfurt, fünfjähriges Mittel für die kürzeren Messreihen in Darmstadt). Durch diese Glättung der Messdaten können lokale Trends besser abgebildet werden, als es allein mit der linearen Regression möglich ist.
- *eingetragene Jahreszahlen*: Diese stehen jeweils für die zehn (Frankfurt) bzw. drei (Darmstadt) Jahre mit den höchsten bzw. niedrigsten Werten innerhalb der abgebildeten Messreihe.



**Abbildung 2: Mittlere jährliche Lufttemperatur an der der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.**



**Abbildung 3: Mittlere jährliche Lufttemperatur an der der DWD-Messstation Frankfurt für den Zeitraum 1938-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.**

Bei der Betrachtung der gemessenen Jahresmitteltemperaturen in Frankfurt (Abbildung 3) wird deutlich, dass insbesondere seit den 1990er Jahren ein erheblicher Temperaturanstieg stattgefunden hat. So beträgt der Referenzwert für die alte Klimaperiode von 1961 bis 1990 an der Messstation Frankfurt 9,7 °C, während das neue Klimamittel bereits bei 11,1 °C. liegt. Damit liegt die an der Station Frankfurt gemessene Temperaturerhöhung für zwei aufeinanderfolgende Klimaperioden bei +1,4 K. Dieser Wert kann für solch einen kurzen Zeitraum als sehr hoch eingeordnet werden. Der Mittelwert der Klimaperiode 1991-2020 an der Messstation Darmstadt liegt mit 10,4 °C etwas niedriger als in Frankfurt, was jedoch immer noch deutlich über dem deutschlandweiten Mittel von 9,3 °C für diesen Zeitraum sowie dem hessischen Mittel von ebenfalls 9,3 °C liegt (DWD).

Generell treten für die einzelnen Jahre immer höhere Temperaturen auf und besonders warme Jahre häufen sich in immer kürzeren Abständen, während kalte Jahre mit Temperaturen ähnlich dem Beginn der für Frankfurt dargestellten langjährigen Messreihe nicht mehr vorkommen (vgl. Abbildung 3). Von den zehn wärmsten Jahren seit Messbeginn liegen allein sechs im Zeitraum von 2014 bis 2022 (Messreihe bis einschließlich 2022). Auf der anderen Seite sind die sehr kalten Jahre alle vor 1990 zu finden. Das alte Klimamittel (1961-1990) wurde letztmalig im Jahr 1996 unterschritten. Auch für Darmstadt häufen sich die besonders warmen Jahre in den letzten Jahren (vgl. Abbildung 2).

Nach jetzigem Kenntnisstand ist selbst bei global konsequent umgesetzten Klimaschutzmaßnahmen mit einem weiteren Temperaturanstieg zu rechnen. Das 1,5-Grad-Ziel des Pariser Klimaabkommens wird auf Basis der aktuellen globalen Entwicklung nicht mehr erreichbar sein. Ohne nennenswerte Klimaschutzmaßnahmen (RCP-Szenario 8.5) sind extreme Klimaveränderungen mit einem mittleren Temperaturanstieg von über +3 K zu erwarten (siehe auch Kapitel 3.2).

## Monatsmitteltemperatur

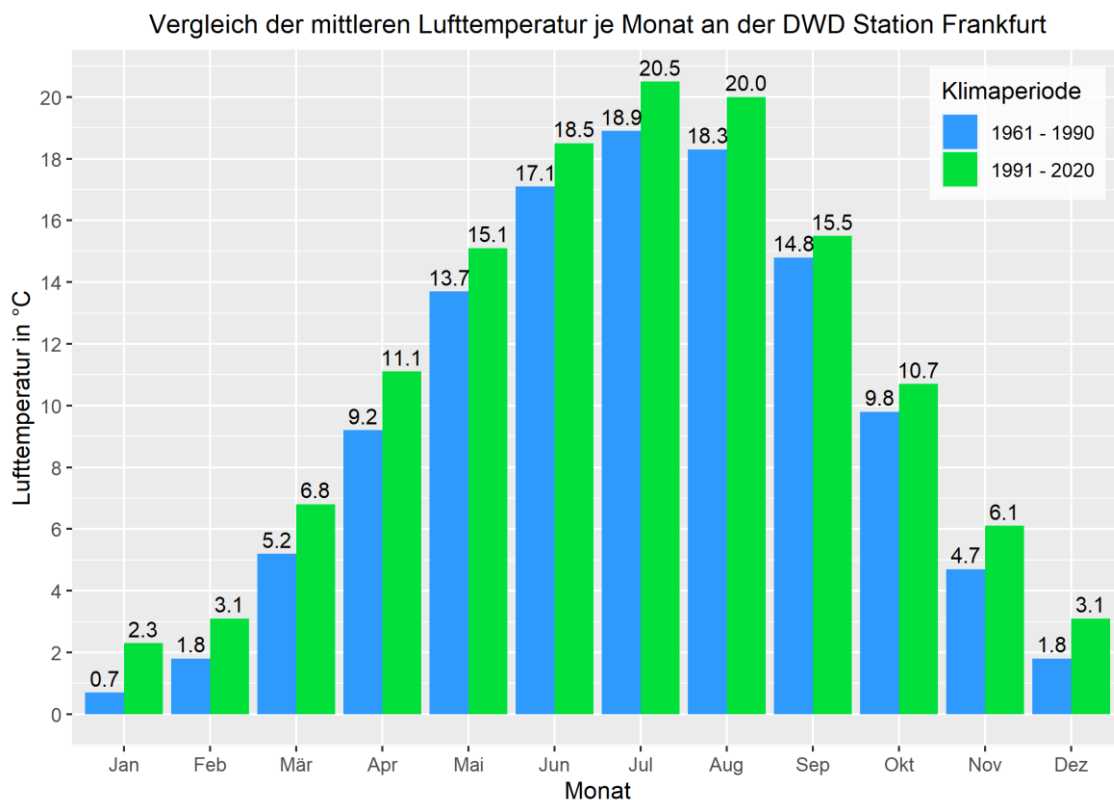


Abbildung 4: Vergleich der mittleren monatlichen Lufttemperatur an der DWD-Messtation Frankfurt für die beiden Klimaperioden 1961-1990 und 1991-2020. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

In Abbildung 4 werden monatliche Temperaturwerte der beiden Klimareferenzperioden 1961-1990 und 1991-2020 miteinander verglichen. Dadurch soll ermittelt werden, ob sich die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Veränderungen der Jahresmitteltemperatur gleichmäßig auf alle Monate verteilen oder es hier (größere) Unterschiede innerhalb des Jahresverlaufs gibt. Aufgrund der fehlenden Messdaten für die Klimaperiode 1961-1990 an der DWD-Station Darmstadt, liegt diese Darstellung nur für die Frankfurter Werte vor.

Der typische mitteleuropäische Jahresverlauf lässt sich hier gut erkennen. Weiterhin wird sichtbar, dass die mittlere Monatstemperatur in den letzten 30 Jahren in allen Monaten angestiegen ist. Der Anstieg ist allerdings unterschiedlich stark ausgeprägt. So tritt in den Monaten September (+0,7 K) und Oktober (+0,9 K) der geringste

Temperaturanstieg auf. Besonders hoch ist er hingegen im April (+1,9 K), im August (+1,7 K) sowie in den Monaten Januar, März und Juli (jeweils + 1,6 K). Für einen klimatisch gesehen sehr kurzen Zeitraum von 30 Jahren, handelt es sich hierbei um einen ausgesprochen hohen Temperaturanstieg.

### Temperaturbezogene Kenntage

Zur Beschreibung von Temperaturveränderungen eignen sich neben der mittleren Lufttemperatur auch sogenannte Kenntage bzw. Ereignistage, von denen für Darmstadt die folgenden berechnet wurden: Hitzetage, Sommertage, Hitzewellentage, Frosttage, Eistage und die Tropennächte. Mithilfe dieser Indikatoren lassen sich abstrakte Temperaturwerte etwas anschaulicher darstellen.

Ein Tag wird als Hitzetag oder auch Heißer Tag definiert, sobald die Tageshöchsttemperatur 30 °C erreicht oder übersteigt. Besonders bioklimatisch (für Mensch und Tier) belastend werden solche Tage, wenn sie in Kombination mit Tropennächten auftreten. Tropennächte sind durch eine (nächtliche) Minimaltemperatur von 20 °C definiert. Solche Tages- und Nachttemperaturen stellen gerade für Kinder, kranke und ältere Menschen gesundheitlich riskante Situationen dar, da diese ihre Körpertemperatur weniger gut regulieren können als gesunde Erwachsene. Auch für manche Haus- und Nutztiere stellen sie ein Gesundheitsrisiko dar.

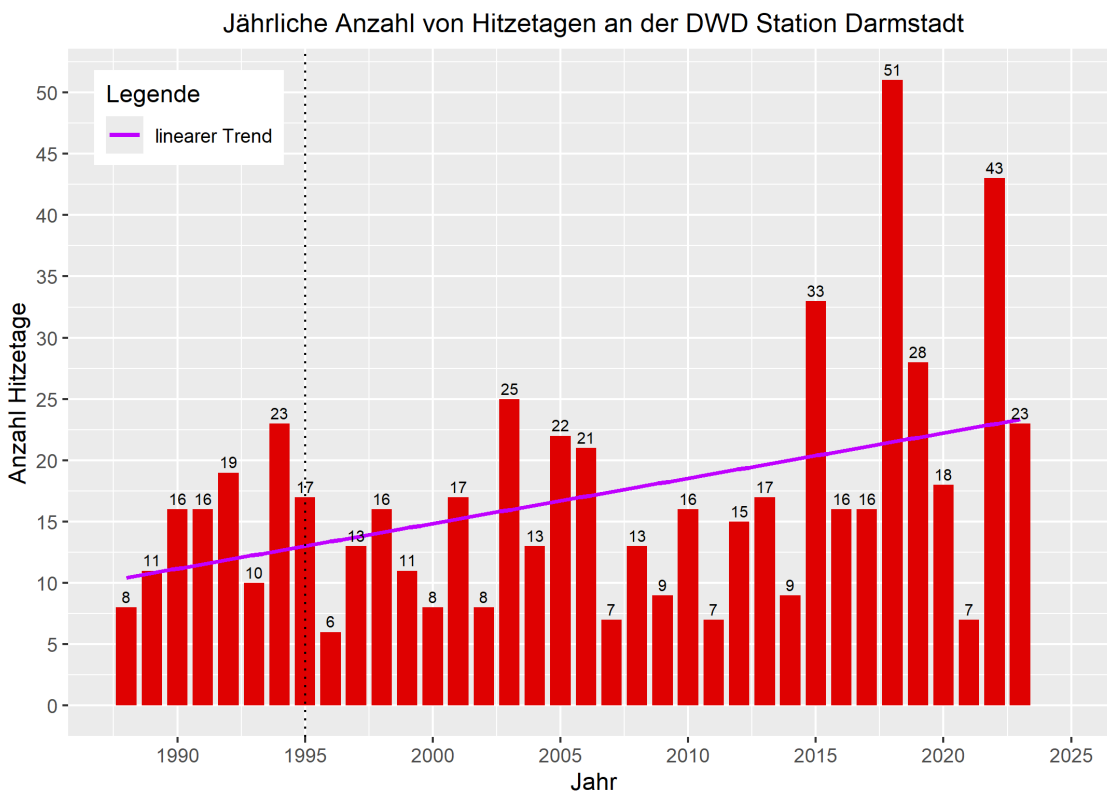


Abbildung 5: Jährliche Anzahl an Hitzetagen (Tage mit  $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ ) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

Jährliche Anzahl von Hitzetagen an der DWD Station Frankfurt

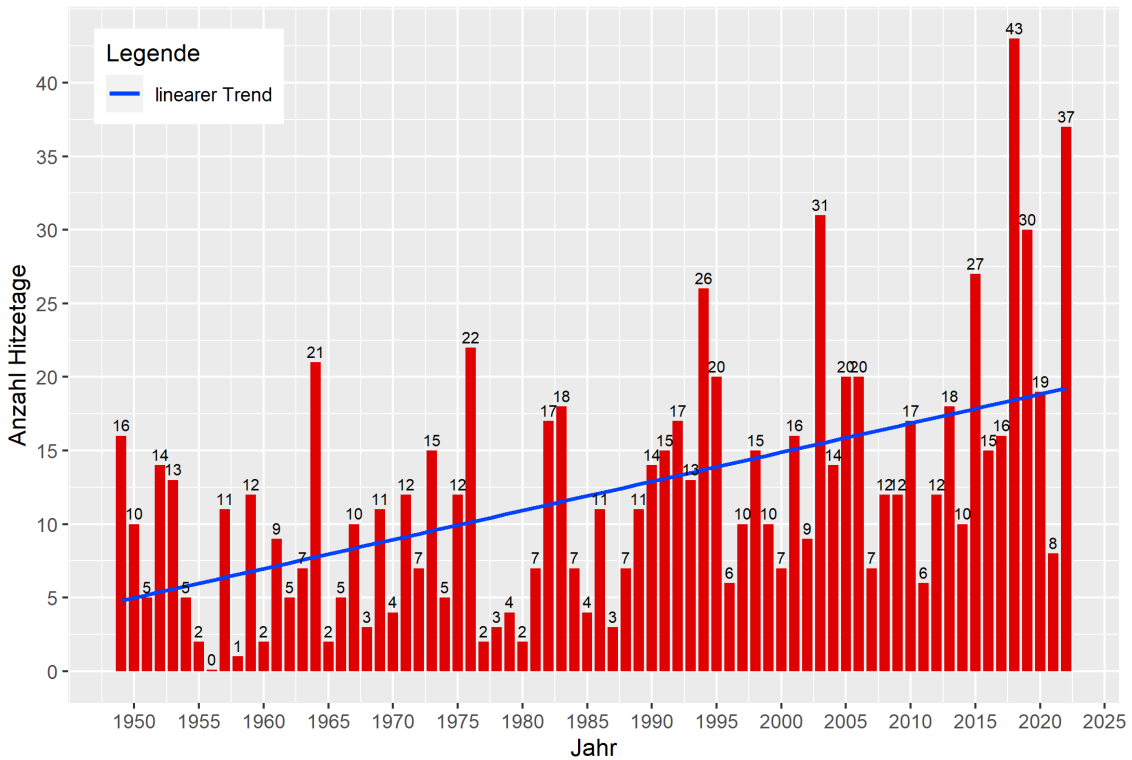


Abbildung 6: Jährliche Anzahl an Hitzetagen (Tage mit  $T_{max} \geq 30\text{ °C}$ ) an der DWD-Messstation Frankfurt für den Zeitraum 1948-2022. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

Der Blick auf Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigt einen kontinuierlichen und gleichzeitig auch starken Anstieg der Hitzetage seit Messbeginn. So gab es in den Jahren vor 1990 oft deutlich unter 10, teilweise zwischen 10 und 20, aber nur zweimal über 20 Hitzetage pro Jahr. Seit den 1990er Jahren werden diese mindestens 20 Hitzetage dagegen regelmäßig erreicht. Die Rekordwerte von 51 (Station Darmstadt 2018), 43 (Station Darmstadt 2022) und 33 Hitzetagen (Station Darmstadt 2015) liegen alle innerhalb der letzten zehn Messjahre.

Eine Fortsetzung dieses Trends ist auch für die zukünftige Entwicklung in den nächsten Jahrzehnten zu erwarten (vgl. Kapitel 3.2). Auch für die anderen oben genannten temperaturbezogenen Kennzahlen bilden sich vergleichbare Trends ab (Abnahme der Eis- und Frosttage, Zunahme der Sommertage, Hitzewellentage und Tropennächte). Die entsprechenden Abbildungen sind im Anhang zu finden.

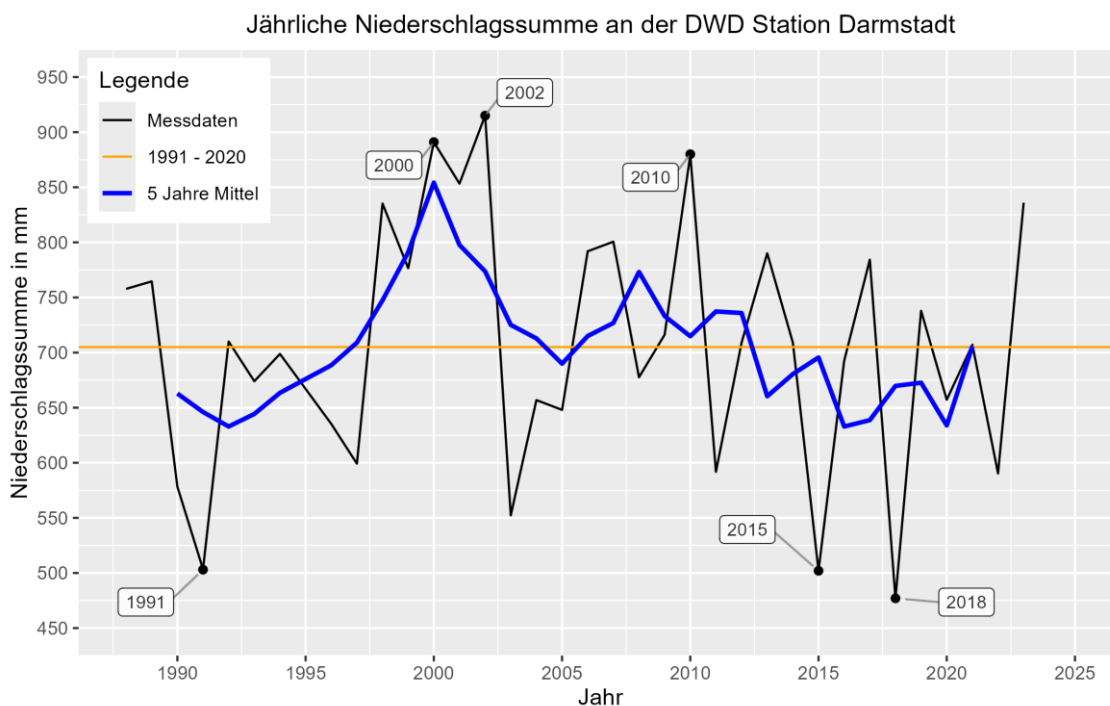
### Jahresniederschlag

Neben der Temperatur bildet der Niederschlag ein wichtiges Kriterium bei der Bewertung von Klimaveränderungen. Vor diesem Hintergrund wird auch dieser daher im Rahmen des folgenden Teilkapitels unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet. Begonnen werden soll mit dem Jahresniederschlag.

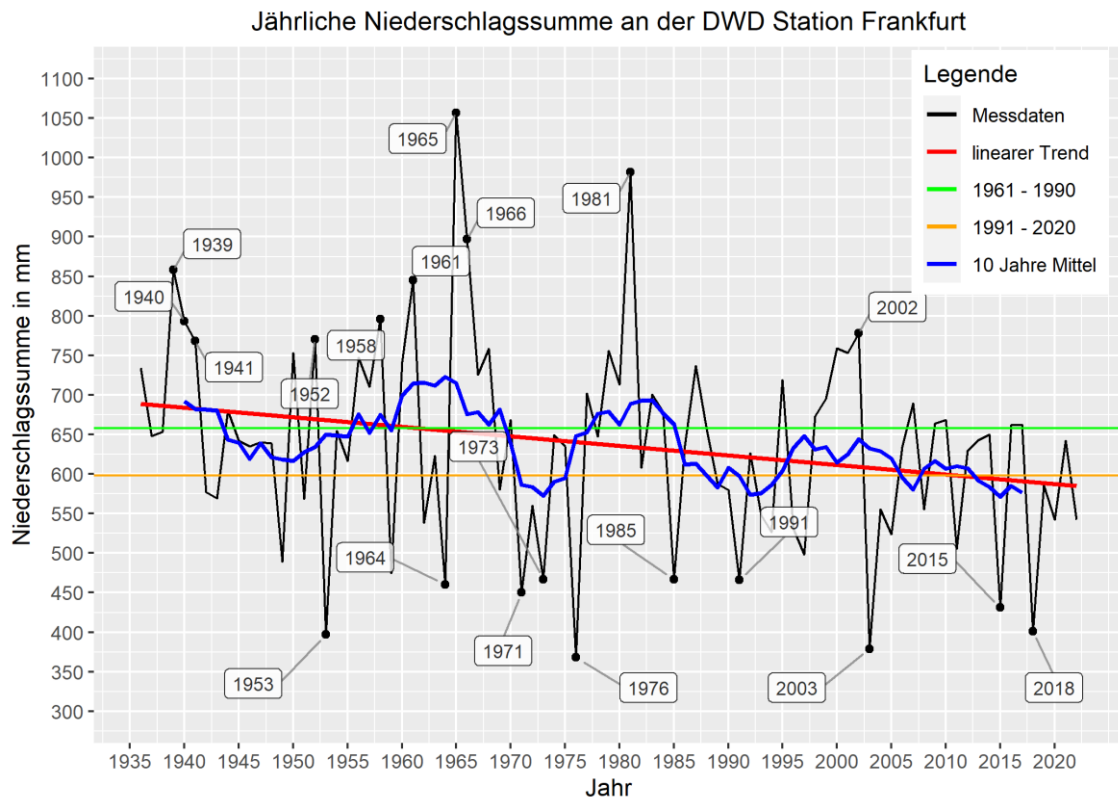
Vor allem Abbildung 8 verdeutlicht, dass es zwischen einzelnen Jahren mitunter erhebliche Unterschiede von teils mehreren hundert mm Niederschlag gibt. Die

Identifizierung eines klaren Trends ist weniger eindeutig als bei den Temperaturkennwerten. Über den gesamten Messzeitraum ist an der Station Frankfurt ein Rückgang erkennbar, allerdings ist der genauere Verlauf sehr heterogen (vgl. blaue Linie, gleitendes Mittel). Für Darmstadt zeigt sich innerhalb der letzten Jahrzehnte im Trend nur eine minimale Abnahme mit Jahreswerten von abwechselnd deutlich (bis zu 200 mm) über aber auch unter dem dreißigjährigen Mittel von etwa 700 mm von 1991-2020 (vgl. Abbildung 7).

Für die letzten Jahre ist sowohl für Darmstadt als auch für Frankfurt eine leichte Häufung trockenerer Jahre (deutlich unter dem Mittel der aktuellen Klimareferenzperiode von 1991-2020) zu verzeichnen (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8). Geringe Niederschlagssummen können besonders problematisch für die Vegetation und/oder den Grundwasserspiegel sein, wenn sie in der Vegetationsperiode oder über mehrere Jahre hinweg auftreten. Insgesamt lässt sich jedoch festhalten, dass die Prognose der zukünftigen Niederschlagsentwicklung durch Klimamodelle, im Gegensatz zu der der Temperaturentwicklung, mit großen Unsicherheiten behaftet ist.



**Abbildung 7: Jährliche Niederschlagssumme an der DWD-Messstation Darmstadt im Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.**

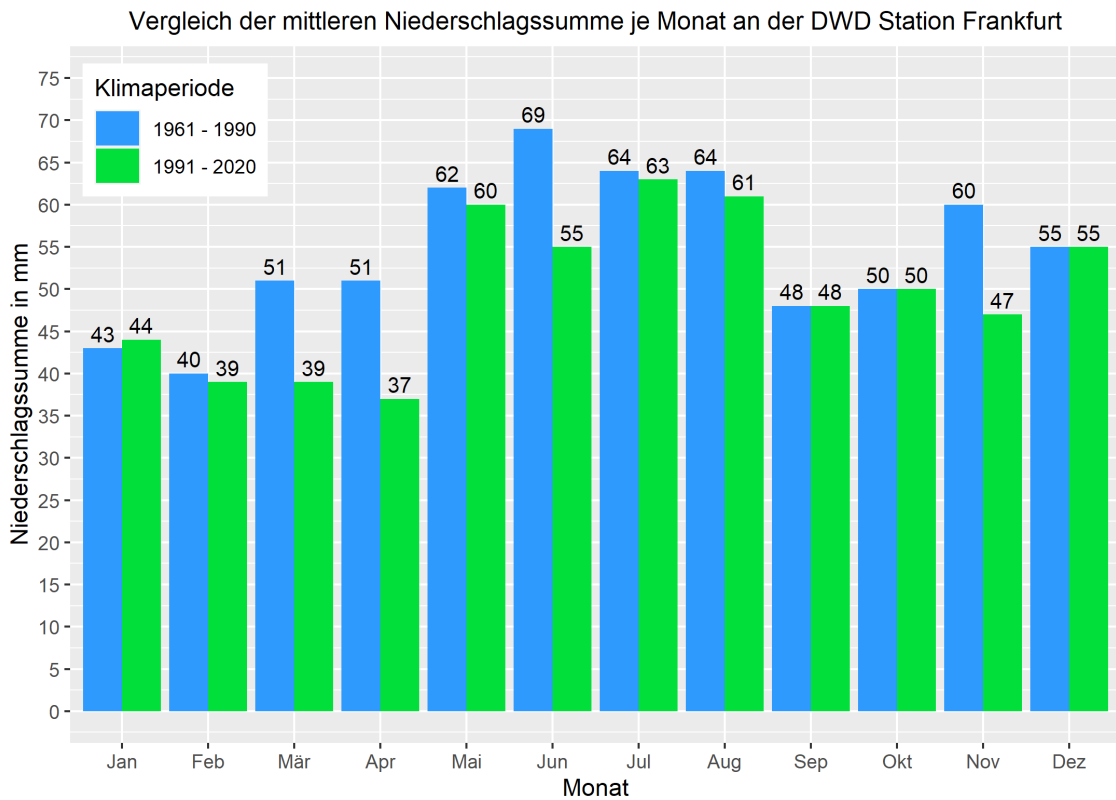


**Abbildung 8: Jährliche Niederschlagssumme an der DWD-Messtation Frankfurt im Zeitraum 1936-2022. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.**

### Monatsniederschlag

In Abbildung 9 werden monatliche Niederschlagswerte der beiden Klimareferenzperioden 1961-1990 und 1991-2020 miteinander verglichen. Dadurch soll ermittelt werden, ob sich die für den jährlichen Niederschlag festgestellten Entwicklungen gleichmäßig auf alle Monate verteilen oder es hier (größere) Unterschiede innerhalb des Jahresverlaufs gibt. Aufgrund der fehlenden Messdaten für die Klimaperiode 1961-1990 an der DWD-Station Darmstadt, liegt diese Darstellung nur für die Frankfurter Werte vor.

Aufgeschlüsselt nach den Monaten zeigt sich auch hier ein leichter Trend zur Abnahme der Niederschläge. Für alle Monate zeigen sich dabei abnehmende oder gleichbleibende Monatswerte beim Vergleich der Referenzperiode 1991-2020 mit der alten Referenzperiode von 1961-1990. Eine einzige Ausnahme bildet der Monat Januar, in dem es zu einer minimalen Zunahme (+1 mm) in diesem Zeitraum kommt. In den Monaten September, Oktober und Dezember kommt es zu keinen Änderungen. Die größten Niederschlagsabnahmen verzeichnen die Monate April und Juni (je -14 mm), gefolgt von November (-13 mm) und März (-12 mm).



**Abbildung 9: Vergleich der monatlichen Niederschlagssummen an der DWD-Messstation Frankfurt für die beiden Klimaperioden 1961-1990 und 1991-2020. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.**

### 3.2 Klimaprojektionsauswertung

Im vorherigen Kapitel wurden gemessene klimatische Entwicklungen in Darmstadt innerhalb der letzten Jahrzehnte und aktuelle Messwerte vorgestellt. Um darüber hinaus Aussagen zu zukünftigen Veränderungen machen zu können, sollen an dieser Stelle, wie auch bei den Messdaten, ausgewählte klimatische Kennzahlen in ihren zukünftig projizierten Entwicklungen dargestellt werden. Weitere ausgewertete Kennzahlen sind ebenso im Anhang zu finden.

Die abgebildeten Daten stellen dabei die von einem Ensemble an Klimamodellen projizierten Entwicklungen für zwei verschiedene Klimaszenarien dar. Das „Ensemble“ ist eine Zusammenstellung mehrerer Klimamodelle, die gemeinsam als repräsentativ für die klimatische Entwicklung im Untersuchungsgebiet angesehen werden. Für das Bundesland Hessen wurde ein Ensemble bestehend aus zehn Klimamodellen für die hessischen Naturräume aufbereitet (HLNUG 2022).

Die statistische Auswertung des Modell-Ensembles (z. B. arithm. Mittel, Median, Minimum, Maximum, Quantile) produziert nicht nur robustere Ergebnisse durch Verwendung eines Mittelwertes oder Medians anstelle eines einzelnen Modells, sondern ermöglicht darüber hinaus eine Einschätzung der Belastbarkeit der Modellergebnisse.

Es handelt sich bei den zwei betrachteten Klimaszenarien nicht um eine Prognose wahrscheinlicher Entwicklungen, sondern um die mithilfe von Modellen simulierten Entwicklungen bei zwei unterschiedlich angenommenen Entwicklungen der Treibhausgase und Aerosole in der Atmosphäre sowie der Landnutzung (IPCC DATA DISTRIBUTION CENTRE 2024). Gegenübergestellt werden dabei für jede ausgewertete Klimakennzahl das RCP-Szenario 2.6 (RCP = Representative Concentration Pathway), welches von einem umfangreichen globalen Klimaschutz innerhalb der nächsten Jahrzehnte ausgeht, sowie das Szenario RCP 8.5, in welchem keine Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden („worst-case“). Aktuelle Messdaten bewegen sich global gesehen im Bereich von RCP 8.5 oder liegen sogar darüber.

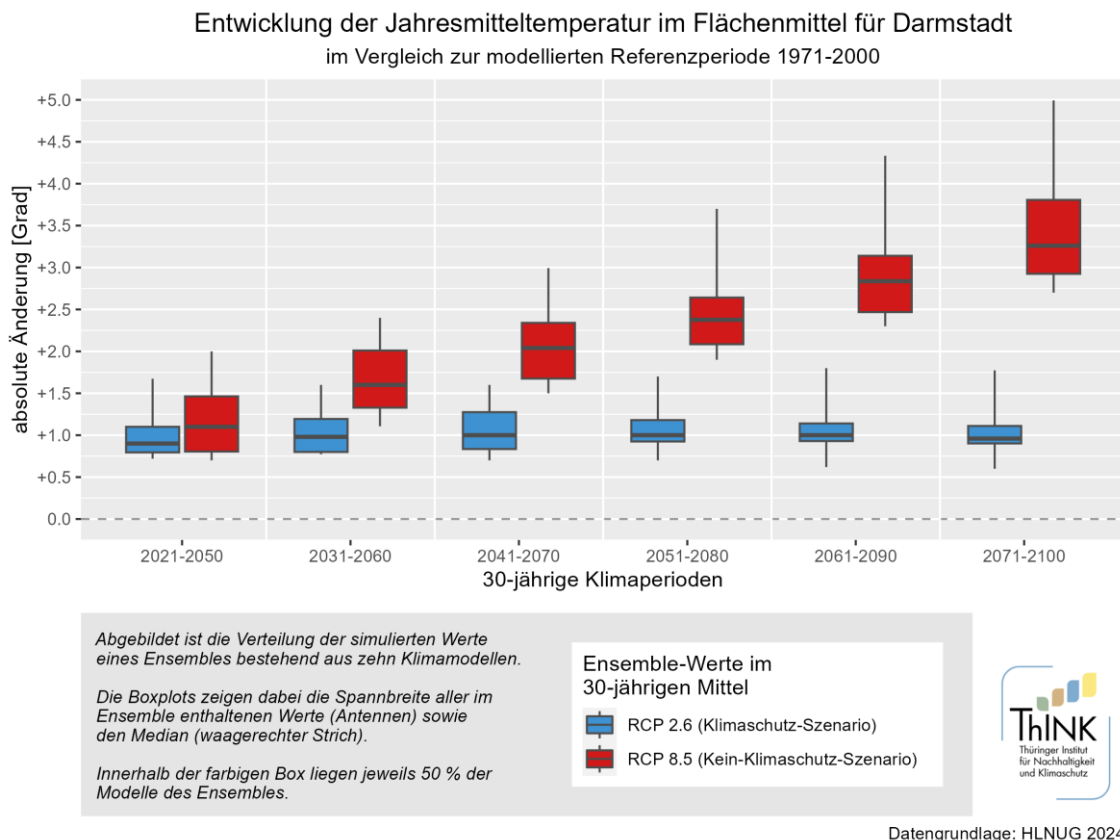
Alle im Folgenden gezeigten Abbildungen der Klimaprojektionen sind gleichermaßen aufgebaut: Für den Zeitraum 2021 bis 2100 sind in zehnjährigen Abständen (zeitlich überlappend, quasi als gleitendes Mittel) dreißigjährige Mittelwerte der jeweiligen jährlichen Werte jeweils für RCP 2.6 und RCP 8.5 dargestellt. Je Zeitschritt und RCP ist ein Boxplot abgebildet. Ein solches besteht aus einer (hier farbig hervorgehobenen) Box innerhalb welcher jeweils 50 % der Modelle des verwendeten Modell-Ensembles liegen. Der Ensemble-Median liegt dabei als horizontale Markierung innerhalb der Box. Oberhalb und unterhalb an die Box schließen sich senkrechte „Antennen“ an, welche die gesamte Spannweite aller Modelle im Ensemble anzeigen. Dargestellt sind Änderungswerte für die verschiedenen Klimakennzahlen in Relation zur Klimareferenzperiode 1971-2000 für das Flächenmittel von Darmstadt.

Eine größere Ensemble-Spannweite deutet damit auf eine höhere Unsicherheit der Modellergebnisse hinsichtlich der Stärke/Ausprägung des Klimaänderungssignals hin. Eine Ausdehnung der Spannweite über sowohl positive als auch negative Werte deutet auf eine erhöhte Unsicherheit hinsichtlich der „Richtung“, d. h. Zu- oder Abnahme, des Änderungssignals hin.

### **Jahresmitteltemperatur**

Wie auch bei den oben aufgeführten Messwerten, soll hier zunächst die Jahresmitteltemperatur betrachtet werden (vgl. Abbildung 10). Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist hier im Ensemble-Median für das „Klimaschutz-Szenario“ RCP 2.6 von einem Temperaturanstieg um knapp +1,0 K auszugehen, für das „worst case“-Szenario RCP 8.5 sogar von +3,2 K. Während der Temperaturanstieg für RCP 2.6 im Verlaufe der nächsten Jahrzehnte dabei stagniert, kommt es bei RCP 8.5 zu einem stetig fortschreitenden Anstieg. Während darüber hinaus die Modellspannweite für RCP 2.6 über den gesamten modellierten Zeitraum relativ gering ist (also wenig von Unsicherheiten in der Stärke der zu erwartenden Änderungen behaftet), zeigen die Modelle für RCP 8.5 hier teilweise sogar noch deutlich über dem Median liegende Anstiegswerte der Jahrestemperatur um bis zu + 5,0 K für das dreißigjährige Mittel 2071-2100 (Abbildung 10). Vergleicht man diese Werte mit dem 1,5 Grad-Ziel des Pariser

Klimaabkommens sind dies besorgniserregende Zahlen, die massivste Veränderungen der Lebensbedingungen für Mensch und Natur zur Folge hätten. Der Trend zur Temperaturzunahme, der auch schon in den aktuellen Messdaten (vgl. Kapitel 3.1) erkennbar ist, wird hier somit in Zukunft für beide dargestellten Szenarien, aber insbesondere bei unzureichenden globalen Klimaschutzbemühungen, fortgeführt.



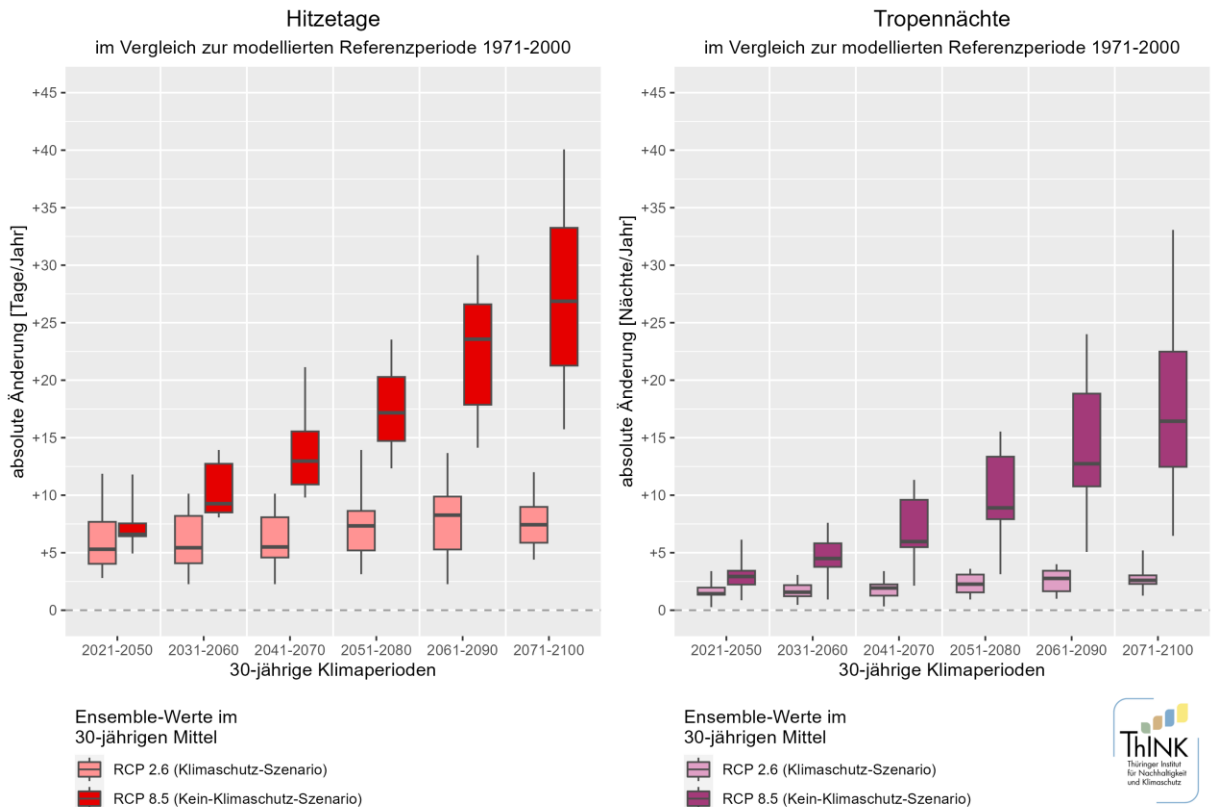
**Abbildung 10: Projizierte Änderungen der Jahresmitteltemperatur im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.**

## Temperaturbezogene Kenntage

Auch die temperaturbezogenen Kenntage weisen eindeutig auf den weiterhin zu erwartenden Temperaturanstieg hin. Exemplarisch werden hier Hitzetage und Tropennächte sowie die Frosttage vorgestellt (Sommer- und Eistage sind im Anhang zu finden und zeigen die vergleichbare Entwicklungen). Abbildung 11 zeigt die zukünftige Entwicklung der Hitzetage (Tage mit mindestens 30 °C Höchsttemperatur) und Tropennächte (Nächte, in denen die Lufttemperatur nicht unter 20 °C fällt). Wie auch schon bei der projizierten Jahresmitteltemperatur ist für RCP 2.6 für beide Kennzahlen von einem moderaten stagnierenden Anstieg (um +5 bis +8 Hitzetage bzw. +2 bis +3 Tropennächte pro Jahr im Ensemblemedian) auszugehen, während bei RCP 8.5 die Hitzetage zum Ende dieses Jahrhunderts um +27 Tage im Median und bis zu +40 Tage beim Einzelmodell mit den höchsten Werten ansteigen. Die Tropennächte erhöhen sich um +17 Nächte im Ensemblemedian und bis zu +33 Nächte für das höchste Modell. Um

sich die Tragweite dieser Änderungen bewusst zu machen, hilft ein Blick auf die aktuellen und vergangenen Messwerte: Im Jahr 2023 wurden an der DWD-Station Darmstadt 23 Hitzetage aufgezeichnet, was innerhalb der letzten Jahrzehnte schon zu den höheren Werten gehört (vgl. Abbildung 5). Bei Eintreten von RCP 8.5 wäre also von mehr als einer Verdopplung der Hitzetage des letzten Jahres bis Ende des Jahrhunderts auszugehen.

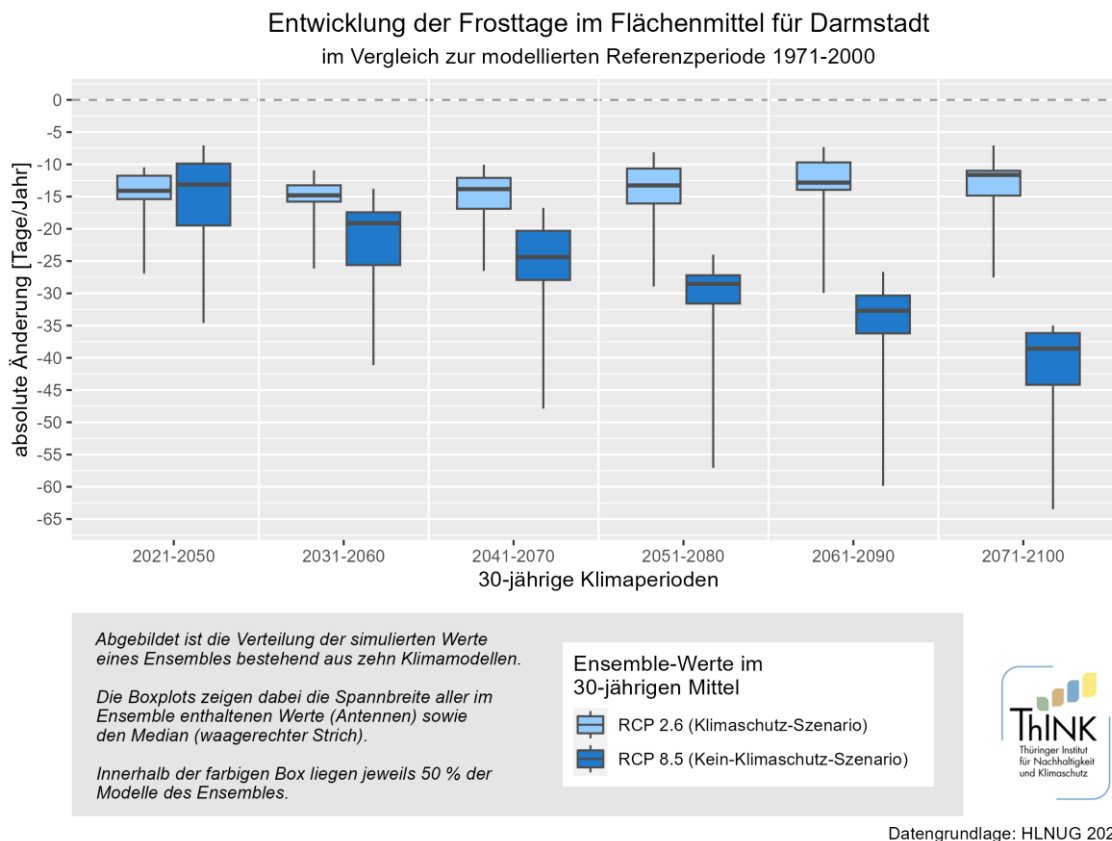
### Entwicklung der Hitzetage und Tropennächte im Flächenmittel für Darmstadt



Datengrundlage: HLNUG 2024

**Abbildung 11: Projizierte Änderungen der Hitzetage (Tage mit  $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ ) und Tropennächte (Nächte mit  $T_{min} \geq 20 \text{ °C}$ ) im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.**

Für die Frosttage (Abbildung 12) ist dementsprechend für RCP 2.6 mit einer moderaten und stagnierenden Abnahme für die nächsten Jahrzehnte (um -11 bis -15 Tage im Median) und einer deutlich stärkeren und im Verlauf des Jahrhunderts fortschreitenden Abnahme (bis zu -38 Tage im Median) für RCP 8.5 auszugehen. Auch hier zeigen einzelne Modelle zum Ende des Jahrhunderts Abnahmewerte, die deutlich über den Ensemble-Median hinausgehen. Als Frosttage sind Tage definiert, an denen das Temperaturminimum unter den Gefrierpunkt von  $0 \text{ °C}$  fällt.



**Abbildung 12: Projizierte Änderungen der Frosttage (Tage mit  $T_{min} < 0\text{ °C}$ ) im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.**

## Niederschlag

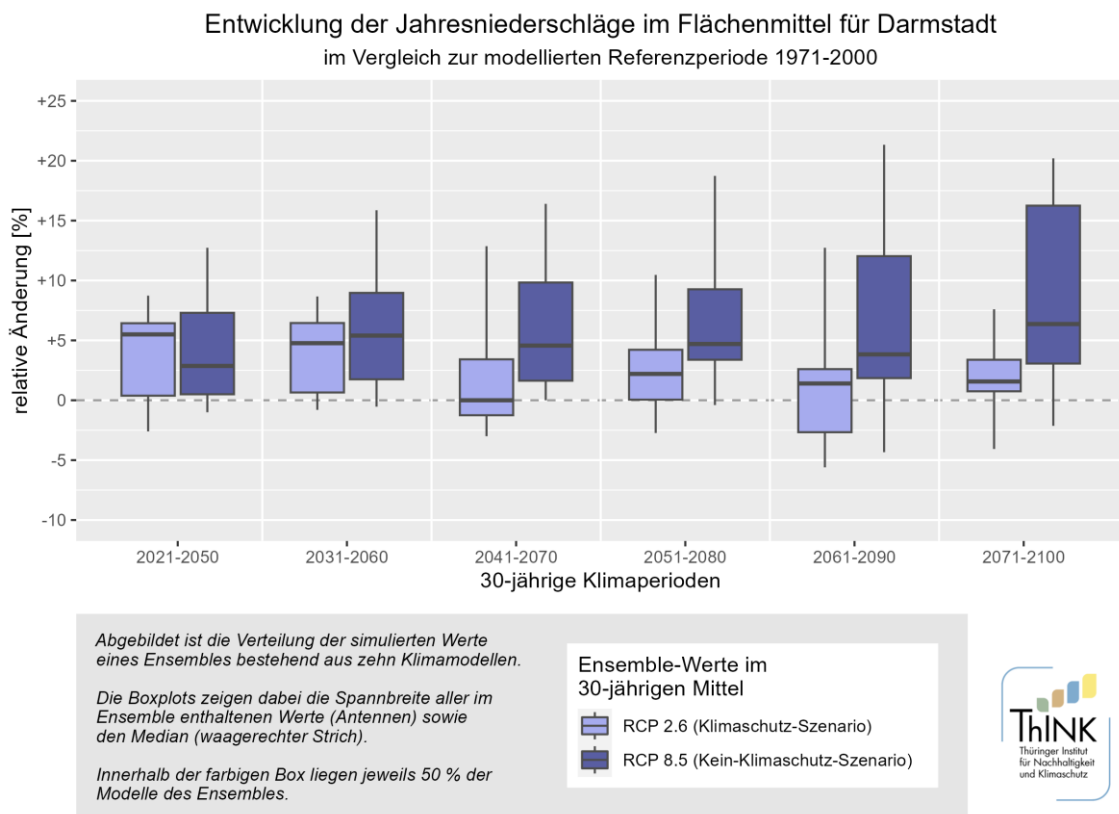
Für die zu erwartenden Niederschlagsentwicklungen lassen sich keine so eindeutigen Trends formulieren wie für die Temperaturentwicklung. Betrachtet werden dabei an dieser Stelle projizierte Jahres-, Sommer- und Winterniederschläge (Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15).

So bleiben die Jahresniederschläge für RCP 2.6 über die folgenden Jahrzehnte hinweg ungefähr gleich (mit geringen Zunahmen der Niederschlagssummen um bis zu +5 %, die gegen Ende des Jahrhunderts jedoch auf +1 bis 2 % im Ensemble-Median sinken). Einzelne Modelle zeigen jedoch auch eine leichte Abnahme der erwartbaren Niederschläge (Abbildung 13). Für RCP 8.5 dagegen ist eine geringe Zunahme der Jahresniederschläge um etwa +7 % im Median zu erwarten, mehrere Einzelmodelle zeigen allerdings dabei moderate Änderungen von mehr als +15 % für das dreißigjährige Mittel von 2071-2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000.

Die Entwicklung der Sommerniederschläge ist von den hier vorgestellten Klimakennzahlen mit den größten Unsicherheiten behaftet, da für jeden modellierten Zeitschritt und für beide RCPs innerhalb des Ensembles sowohl Zu- als auch Abnahmen der Niederschlagswerte modelliert wurden. Bei der Betrachtung der Gesamtverteilung und des Medians des Ensembles liegt allerdings eine Tendenz zur schwachen

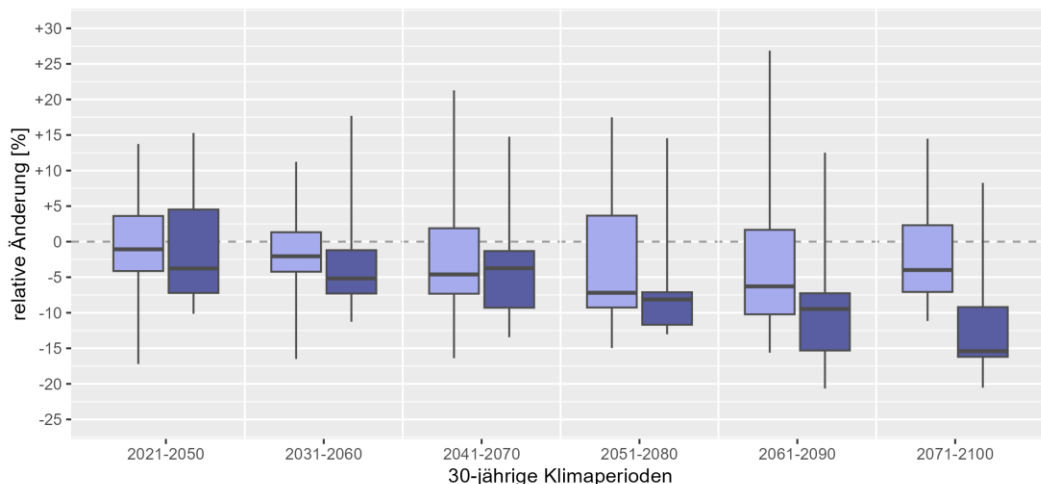
sommerlichen Niederschlagsabnahme bei RCP 2.6 und etwas verstärkten, aber noch moderaten Abnahme für RCP 8.5 für die nächsten Jahrzehnte vor (Abbildung 14). Diese ist jedoch, wie oben angesprochen, nur unter Berücksichtigung der vorliegenden Unsicherheiten anzunehmen.

Für die Winterniederschläge (vgl. Abbildung 15) lassen sich dagegen wieder eindeutigeren Entwicklungstendenzen erkennen. So zeigt sich für RCP 2.6 eine geringe Zunahme der Niederschläge, die sich die folgenden Jahrzehnte über im Ensemble-Median zwischen +8 und +4 % bewegt, aber dabei zum Ende des Jahrhunderts mit +4 % eher stagniert als weiter ansteigt. Für RCP 8.5 dagegen ist im Verlauf der nächsten Jahrzehnte mit immer weiter ansteigenden Niederschlägen um bis zu +20 % für das dreißigjährige Mittel 2071-2100 im Ensemble-Median zu rechnen, Einzelmodelle projizieren bis dahin sogar einen Anstieg um bis zu +40 %. Jedoch ist hier die Modellspannbreite mit Anstiegswerten zwischen +10 % und +40 % relativ groß. Zumindest von einem moderaten Anstieg der Winterniederschläge für RCP 8.5 kann somit jedoch ausgegangen werden.



**Abbildung 13: Projizierte prozentuale Änderungen der Jahresniederschläge im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.**

Entwicklung der Niederschläge des Sommerquartals im Flächenmittel für Darmstadt  
im Vergleich zur modellierten Referenzperiode 1971-2000



Abgebildet ist die Verteilung der simulierten Werte eines Ensembles bestehend aus zehn Klimamodellen.

Die Boxplots zeigen dabei die Spannweite aller im Ensemble enthaltenen Werte (Antennen) sowie den Median (waagerechter Strich).

Innerhalb der farbigen Box liegen jeweils 50 % der Modelle des Ensembles.

Ensemble-Werte im 30-jährigen Mittel

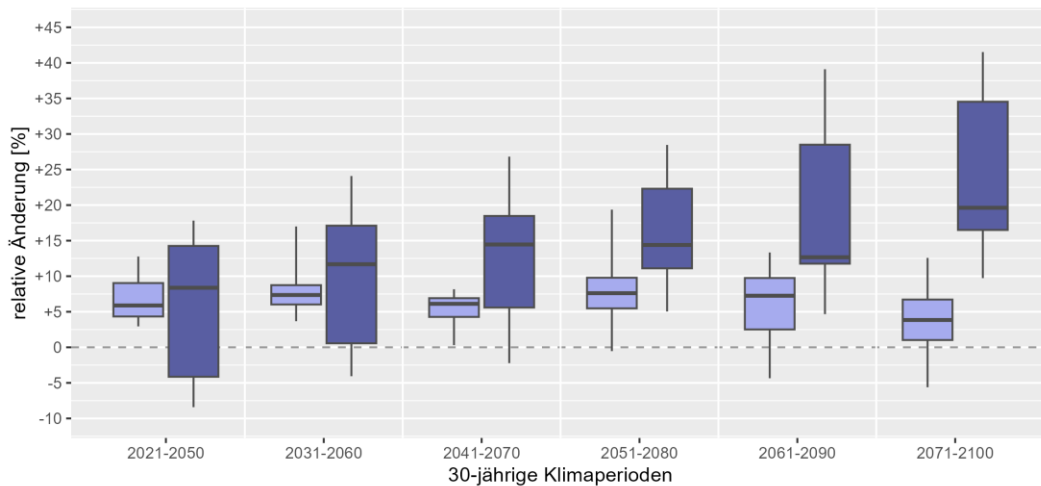
- RCP 2.6 (Klimaschutz-Szenario)
- RCP 8.5 (Kein-Klimaschutz-Szenario)



Datengrundlage: HLNUG 2024

Abbildung 14: Projizierte prozentuale Änderungen der Sommerniederschläge im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.

Entwicklung der Niederschläge des Winterquartals im Flächenmittel für Darmstadt  
im Vergleich zur modellierten Referenzperiode 1971-2000



Abgebildet ist die Verteilung der simulierten Werte eines Ensembles bestehend aus zehn Klimamodellen.

Die Boxplots zeigen dabei die Spannweite aller im Ensemble enthaltenen Werte (Antennen) sowie den Median (waagerechter Strich).

Innerhalb der farbigen Box liegen jeweils 50 % der Modelle des Ensembles.

Ensemble-Werte im 30-jährigen Mittel

- RCP 2.6 (Klimaschutz-Szenario)
- RCP 8.5 (Kein-Klimaschutz-Szenario)



Datengrundlage: HLNUG 2024

Abbildung 15: Projizierte prozentuale Änderungen der Winterniederschläge im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.

## Übersicht der Klimaänderungssignale

Die nachfolgende Tabelle stellt eine Übersicht über alle im Bericht diskutierten und sowie im Anhang zu findenden Klimakennzahlen mit ihren für das Ende des Jahrhunderts (2071-2100) projizierten Änderungsstärken und -richtungen dar. Außerdem werden Angaben zur Belastbarkeit der Änderungssignale gemacht.

**Tabelle 1: Zusammenfassung der zu erwartenden Klimaveränderungen für die „Ferne Zukunft“ (2071-2100) im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 in der Stadt Darmstadt. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.**

| Untersuchungsgebiet:                    | Stadtgebiet Darmstadt |         |
|---|-----------------------|---------|
|   | RCP 2.6               | RCP 8.5 |
| <b>Temperaturbezogene Kennzahlen</b>    |                       |         |
| Jahresmitteltemperatur                  | +                     | +++     |
| Hitzetage                               | +                     | +++     |
| Sommertage                              | ++                    | +++     |
| Frosttage                               | --                    | ---     |
| Eistage                                 | -                     | --      |
| Tropennächte                            | +                     | +++     |
| <b>Niederschlagsbezogene Kennzahlen</b> |                       |         |
| Jahresniederschlag                      | o                     | ++      |
| Sommerniederschlag (Quartal)            | -                     | --      |
| Winterniederschlag (Quartal)            | +                     | +++     |

### Belastbarkeit des Änderungssignals:

**gering** = weniger als 75 % der Modelle weisen die gleiche Richtung (Zu- bzw. Abnahme) auf

**mittel** = mind. 75 % der Modelle weisen die gleiche Richtung (Zu- bzw. Abnahme) auf

**hoch** = alle Modelle weisen die gleiche Richtung (Zu- bzw. Abnahme) auf

### Stärke des Änderungssignals:

[+ + +] starke, [+ +] mittlere oder [+] schwache Zunahme

[ o ] = etwa gleichbleibend

[ - - - ] starke, [ - - ] mittlere oder [ - ] schwache Abnahme



Windschwache Hochdruckwetterlagen begünstigen in Städten die Ausbildung einer Dunstglocke, welche sich mit der Zeit zunehmend mit Aerosolen und Luftschadstoffen anreichert (DWD 2020b, o.S.). Fehlende Vegetations- und Wasserflächen führen zu einer Erhöhung der fühlbaren Wärmeströme und zur Verringerung latenter Wärme, da weniger Verdunstung stattfinden kann (Imhoff et al. 2009, S.504, Kurmutz et al. 2012, S. 16, Stewart & Oke 2012, S.1881).

Grimmond et al. (2014) und Stewart & Oke (2012, S.1881) beschreiben weitere Faktoren, welche das Stadtklima individuell beeinflussen können. Dazu gehören beispielsweise: die Verteilung und Ausrichtung der Gebäude, die verwendeten Baumaterialien, der Anteil von Gewerbe- und Industrieflächen, der Anteil blaugrüner Infrastruktur sowie das Verkehrsaufkommen (→ Anteil der Luftschadstoffe) und das Heizen und Kühlen von Gebäuden. Die meisten der bereits beschriebenen stadtklimatischen Besonderheiten treten während des gesamten Jahres auf, wobei ihre Stärke i.d.R. bei windschwachen und sonnenreichen Wetterlagen zunimmt. Eine zusammenfassende Veranschaulichung der besprochenen Aspekte ist in der Abbildung 16 zu sehen. Diese zeigt auch bereits die städtische Wärmeinsel, um die es im folgenden Teil dieses Kapitels gehen soll.

#### 4.1.2 Städtischer Wärmeinseleffekt

Die städtische Wärmeinsel (englisch: **Urban Heat Island – UHI**) ist ein typisches Merkmal des Stadtklimas und wurde erstmals im Jahr 1818 durch Luke Howard publiziert (Deutsches Klimaportal 2020: o.S., Parlow 2011, S.291). Sie zeichnet sich durch eine Temperaturdifferenz zwischen einer Stadt und ihrer Umgebung aus und kann für sehr große Städte bis zu 10 K betragen (Bruns & Simko (2017), Deutsches Klimaportal 2020: o.S., Kurmutz et al. 2012, S.17). Im Mittel schwankt dieser Wert zwischen 2 K und 6 K (Parlow 2011, S.288).

Die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel ist insbesondere in den Nachtstunden zu beobachten, in denen die Lufttemperatur nicht so sehr abkühlen kann, wie es in der Umgebung der Fall ist (Parlow 2011, S.288). Zusätzlich ist tagsüber eine erhöhte Wärmelastung besonders in stark versiegelten und wenig durchgrüntem Stadtbereichen feststellbar. Dies gilt ebenso für Gebäude oder Plätze, welche wenig Schattenflächen aufweisen und damit einer hohen Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind.

Wie bereits beschrieben, ist die Stadtgröße ein wesentlicher Faktor für die Stärke der Ausprägung von städtischen Wärmeinseln. Zhou et al. (2017, S.1) haben 5000 Großstädte untersucht und festgestellt, dass die Intensität der städtischen Wärmeinsel logarithmisch mit der Stadtgröße zunimmt. Außerdem hat auch die Kompaktheit einer Stadt und ihre Form Einfluss auf das Ausmaß der städtischen Wärmeinsel. Sie wird darüber hinaus durch die freigesetzte Wärme von Klimaanlagen und Heizungen verstärkt (Zhou et al. 2017, S.1, DWD 2020, o.S.). Mit Blick auf dieses Phänomen

empfehlen Zhou et al. (2017, S.1) kleine, verstreute (also mit niedrigerer Bebauungsdichte) und gestreckte Städte zu entwickeln.

Die hohen nächtlichen Temperaturen stellen vor allem in den Sommermonaten eine Belastung für die Stadtbevölkerung, speziell für kleine Kinder sowie ältere und/oder kranke Menschen dar, da diese ihre Körpertemperatur weniger gut regulieren können als gesunde Erwachsene (Bruns & Simko 2017, DWD 2020a, o.S., Zhou et al. 2017, S.1).

Abschließend für dieses Unterkapitel lässt sich festhalten, dass Städte eine zunehmend wichtige Rolle vor dem Hintergrund des Klimawandels spielen (Bronto & Bulkeley 2013, S. 92). Sie müssen sich vor allem für eine Erhaltung oder Verbesserung der dortigen Umwelt- und Lebensbedingungen einsetzen, um u. a. die Gesundheit der Bevölkerung zu gewährleisten (Carmin et al. 2013, S. 4, Mirzaei 2015, S. 201 f.). Stadtplanende können hierfür beispielsweise einen Beitrag durch eine Erhöhung des städtischen Grünflächenanteils, ausreichender Verschattung und einer Verbesserung der Durchlüftung leisten, indem z. B. Kaltluftbahnen erhalten bzw. neu geschaffen werden (DWD 2020b, o.S.).

An dieser Stelle noch ein wichtiger Hinweis zu den Karten der Stadtklimaanalyse. Sie wurden für den vorliegenden Bericht auf A4-Größe komprimiert und erscheinen daher teilweise etwas unscharf. Die originalen PDF-Dateien (liegen der Stadt Darmstadt vor) sind jedoch im A0-Format (bzw. im Maßstab 1:10.000) und ermöglichen damit ein starkes Hereinzoomen in die jeweiligen Karten, um Details zu sehen, welche bei A4-Darstellung nicht oder nur sehr schwer erkennbar sind. Das gilt vor allem für die mit vielen Inhalten bestückte Klimaanalysekarte.

## 4.2 Klimaanalysekarte Einführung

Die Klimaanalysekarte beschreibt Klimaeigenschaften und Klimaphänomene für die planerische Anwendung. Adressaten sind die Stadtplanung / Stadtentwicklung oder auch die Landschafts- und Freiraumplanung, welche sich mit der Planung urbaner und suburbaner Freiräume befasst. Die Klimaanalysekarte bietet einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raumes und damit auch die Grundlage zur sachgerechten Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen (z. B. Regionalplan, Flächennutzungsplan, Bebauungsplan) in einer Stadt (VDI 2015, S.8, 13). Die Klimaanalysekarte ist darüber hinaus die Ausgangsbasis für die weiterführende Erstellung einer oder mehrerer Planungshinweiskarte(n) (VDI 2015, S.39).

Weiterhin ermöglicht die Klimaanalysekarte die Gliederung des Untersuchungsraumes in bioklimatisch belastete Siedlungsräume (Wirkungsräume) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (Ausgleichsräume). Die Klimaanalysekarte stellt die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse in einem Stadtgebiet dar, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topographie einstellen. Die VDI-

Richtlinie 3787, Blatt 1 aus dem Jahr 2015 liefert hierfür methodische und theoretische Grundlagen.

### 4.3 Klimatope

Das zentrale Element der Klimaanalysekarte bilden die Klimatope, auf deren Erstellung im Folgenden eingegangen wird. Als Klimatop werden Gebiete mit ähnlichen mikroklimatischen Ausprägungen bezeichnet (VDI 2015:4). Die Empfehlung der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 ist es, neun Klimatope auszuweisen. Dazu gehören u. a. die Klassen Freilandklima, Waldklima, Innenstadtklima sowie das Klima innerstädtischer Grünflächen. Weil in Darmstadt einige Kleingartenanlagen vorhanden sind, wurde das Kleingartenklima als weitere Klimatopklasse eingeführt, da es viele lokalklimatisch positive Eigenschaften aufweist und nicht pauschal dem Vorstadtklima oder dem Klima innerstädtischer Grünflächen zugeordnet werden kann. Eine zusammenfassende Übersicht inkl. einer Kurzbeschreibung aller zehn Klimatope kann der untenstehenden Legende der eigentlichen Klimafunktionskarte (Abbildung 17) entnommen werden.

#### Klimatope

|   |   |
|---|---|
|   | <b>Gewässer-, Seenklima:</b><br>thermisch ausgleichend, hohe Feuchtigkeit,<br>guter Luftaustausch, keine / schwache Kaltluftproduktion<br>Hinweis: Es werden nur klimatisch relevante Flächen dargestellt |
|  | <b>Freilandklima:</b><br>ungestörter stark ausgeprägter Tagesgang von Temperatur<br>und Feuchte, windoffen, starke Frisch- und Kaltluftproduktion   |
|  | <b>Waldklima:</b><br>stark gedämpfter Tagesgang der Temperatur und Feuchte,<br>Frisch- und Kaltluftproduktion, Filterfunktion   |
|  | <b>Klima innerstädtischer Grünflächen:</b><br>ausgeprägter Tagesgang der Temperatur und Feuchte,<br>klimatische Ausgleichsfläche in der Bebauung,<br>kleinräumige Frisch- und Kaltluftproduktion          |
|  | <b>Kleingartenklima:</b><br>gedämpfter Tagesgang von Temperatur und Feuchte,<br>intensive Verdunstungskühlung durch permanente Bewässerung  |
|  | <b>Vorstadtklima:</b><br>lockere Bebauung, geringer Einfluss auf Temperatur, Feuchte und Wind   |
|  | <b>Stadtrandklima:</b><br>dichtere Bebauung; wesentliche Beeinflussung von Temperatur, Feuchte<br>und Wind; Störung lokaler Windsysteme   |
|  | <b>Stadtklima:</b><br>dichte Bebauung, starke Veränderung aller Klimatelemente gegenüber dem<br>Freiland, Ausbildung einer Wärmeinsel, Luftschadstoffbelastung  |
|  | <b>Innenstadtklima:</b><br>sehr dichte Bebauung, intensiver Wärmeinseleffekt, geringe Feuchte,<br>Windfeldstörung, problematischer Luftaustausch, Luftschadstoffbelastung                                 |
|  | <b>Gewerbe/Industrieklima:</b><br>sehr hoher Versiegelungsgrad, starke Veränderung aller Klimatelemente,<br>Ausbildung eines Wärmeinseleffektes, teilweise hohe Luftschadstoffbelastung                   |

**Abbildung 17: Zusammenfassende Übersicht der Klimatope.**

**Quelle: Legende der Klimaanalysekarte.**

Die Klimatope wurden auf gutachterlicher Basis manuell durch Digitalisieren unter Verwendung von ArcGIS in der Version 10.7 erstellt. Dabei kamen mehrere weitere Datensätze bzw. Dienste als Hilfsmittel zum Einsatz. In erster Linie gilt dies für das Luftbild der Stadt Darmstadt aus dem Jahr 2022 mit einer räumlichen Auflösung von 20 cm x 20 cm, welches stets im Hintergrund als „Zeichenfläche“ vorlag. Ergänzend erfolgte u. a. eine Berücksichtigung von ALKIS-Daten (Basis-DLM) sowie vom berechneten Wärmebelastungsindex und dessen Eingangsdaten (siehe Kapitel 4.7).

Dennoch ist zu beachten, dass Flächen existieren, bei denen eine eindeutige Zuordnung bzw. Abgrenzung von Klimatopen nicht immer gegeben ist und vom Ermessen des Erstellers bzw. dem Grad der Generalisierung abhängt.

Hinsichtlich der Generalisierung wurde darauf geachtet, keine Kleinstflächen auszuweisen. In der Regel gilt (von einigen Ausnahmen abgesehen) ein Schwellwert von 0,4 ha. Lediglich innerstädtische Grünflächen wurden aufgrund ihrer hohen lokalklimatischen Bedeutung und günstigen Aufenthaltsbedingungen teilweise bis zu einer Mindestgröße von 0,1 ha erfasst.

Nachdem die Ausweisung der nicht städtisch geprägten Klimatope und des Gewerbeklimas in den meisten Fällen zweifelsfrei möglich war, soll nun (neben der Vorstellung der restlichen Klimatope) genauer auch anhand von einigen ausgewählten Beispielen erläutert werden, wie die Abgrenzung zwischen den städtischen Klimatopen (Vorstadtklima, Stadtrandklima, Stadtklima und Innenstadtklima) erfolgte und was diese jeweils kennzeichnet. Die Orientierung war hierfür wieder die VDI (2015 S.14-22), an die auch die nachfolgenden Beschreibungen angelehnt sind. Zur besseren Veranschaulichung wird für jedes Klimatop auf der linken Seite zusätzlich ein kleiner Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte gezeigt.

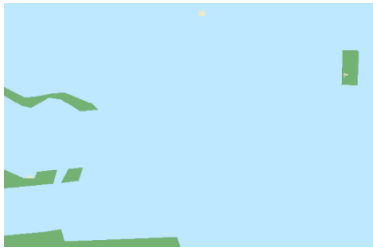
#### ■ Gewässer- und Seenklima



Wie bereits aus dem Namen hervorgeht, entfallen alle vorhandenen klimatisch relevanten Wasserflächen auf diese Klimatopklasse. Das Gewässer- und Seenklima zeichnet sich im Allgemeinen durch einen gedämpften Tages-temperaturgang verglichen mit umgebenden Bereichen aus (kühler am Tag, wärmer in der Nacht). Folgendes ist jedoch zu beachten: stehende

Gewässer können sich über die Zeit so stark aufheizen, dass von ihnen am Tag keine kühlende Wirkung mehr ausgeht und sie in der Nacht sogar als Wärmequellen fungieren. Aufgrund der geringen Rauigkeit von Wasserflächen behindern sie keine Luftaustauschvorgänge und können selbst als Luftleitbahnen in Erscheinung treten. Größere Flüsse sind in Darmstadt nicht vorhanden, allerdings gibt es einige Seen, wie z. B. der Große Woog oder den Erich-Kästner-See.

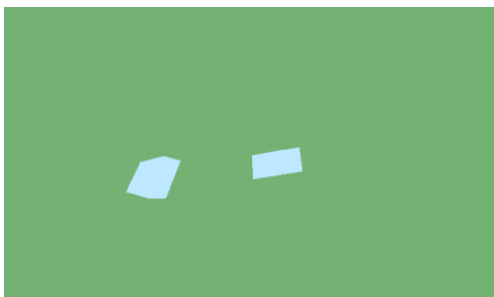
#### ■ Freilandklima



Zum Freilandklima gehören Freiflächen, wie z. B. Wiesen, Felder oder Brachen mit einem Versiegelungsgrad von weniger als 10 %, die gleichzeitig nur einen sehr geringen Baumbestand aufweisen. Der Tagesgang der Temperatur ist im Bereich des Freilandklimas ungestört, während der Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit sehr gering ist.

Entsprechende Flächen können noch zwei weitere sehr positive Eigenschaften besitzen. Zum einen bildet sich hier großflächig Kaltluft, welche bei entsprechender Hangneigung (> 2 %) auch in die (städtische) Umgebung abfließt und zum anderen kann über Freiflächen ungehinderter Luftaustausch in Form von Kaltluft-, Luftleitbahnen oder Talwinden erfolgen. Große Freiflächen befinden sich in allen Himmelsrichtungen jeweils in den Randbereichen des Stadtgebietes. Das Freilandklimatop ist mit einer Gesamtfläche von 23,9 km<sup>2</sup> (entspricht 19,5 %) das zweitgrößte Klimatop im Stadtgebiet von Darmstadt.

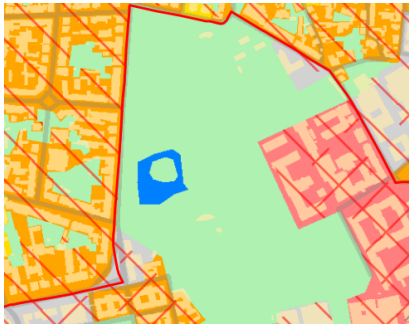
#### ■ Waldklima



Zum Waldklima gehören alle Flächen, die zu mindestens 90 % mit Laub- oder Nadelbäumen bedeckt sind. Hier liegt ein stark gedämpfter Tagesgang der Lufttemperatur und -feuchte vor. Oberhalb der Kronen bildet sich Kaltluft, die etwa ab einer Hangneigung von 2 % auch in nennenswertem Umfang abfließen kann.

Außerdem fungieren Wälder als Luftfilter, da sie verglichen mit Freiflächen in wesentlich größerem Umfang CO<sub>2</sub> in Sauerstoff umwandeln. Das größte Waldgebiet in Darmstadt ist der Stadtwald und befindet sich in der gesamten Osthälfte des Stadtgebietes. Eine weitere große Waldfläche bildet der Westwald. Insgesamt werden 61,5 km<sup>2</sup> (entspricht 50,4 %) vom Waldklimatop geprägt. Damit ist dieses Klimatop das mit Abstand größte in Darmstadt. Es handelt sich um einen stark überdurchschnittlich hohen Waldflächenanteil für eine Stadt in Deutschland.

#### ■ Klima innerstädtischer Grünflächen



Innerstädtische Grünflächen sind aufgrund ihrer sehr günstigen lokalklimatischen Eigenschaften von sehr hoher Bedeutung in Städten und können in Form von Parks, Wiesen, Friedhöfen oder mit Naturrasen begrünten Sportplätzen vorliegen. Ihr Versiegelungsgrad beträgt in aller Regel weniger als 20 %. Je nach Größe und Zusammensetzung verfügen innerstädtische Grünflächen über eine Kombination der

positiven Eigenschaften des Freiland- bzw. Waldklimas und können einen wichtigen Beitrag zur Verringerung des städtischen Wärmeinseleffektes leisten. Wichtige innerstädtische Grünflächen in Darmstadt sind u. a. der innenstadtnahe Herrngarten, der Rudolf-Müller-Anlage, der Bürgerpark oder der Park Rosenhöhe.

#### ■ Kleingartenklima



Das Kleingartenklima verfügt über einen gedämpften Tagesgang der Lufttemperatur und -feuchte. Durch die nahezu permanente Bewässerung der dortigen Grünflächen lässt sich eine intensive Verdunstungskühlung feststellen. Die geringe Versiegelung und das niedrige Bauvolumen führen zu einer geringen Wärmespeicherung.

Damit können auch Kleingartenanlagen den städtischen Wärmeinseleffekt verringern. Auf ihnen kann darüber hinaus auch Kaltluft entstehen und etwa ab einer Hangneigung von 2 % in die Umgebung abfließen. Größere Kleingartenanlagen gibt es beispielsweise am Molkenbach, westlich und nordöstlich des Bahnhofs Darmstadt Nord oder westlich des Parks Kraftsruhe.

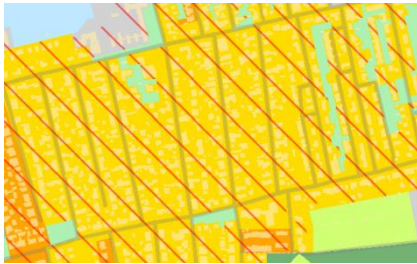
#### ■ Vorstadtklima



Das Vorstadtklima bildet den Übergangsbereich zwischen Freilandklima und städtischer Bebauung und zeichnet sich durch einen hohen Grünanteil sowie vorwiegend niedrige Ein- und Mehrfamilienhäuser in lockerer Bauweise aus (Versiegelungsgrad < 30 %), was in günstigen bioklimatischen Verhältnissen resultiert. Entsprechend ist der Einfluss auf die umgebende

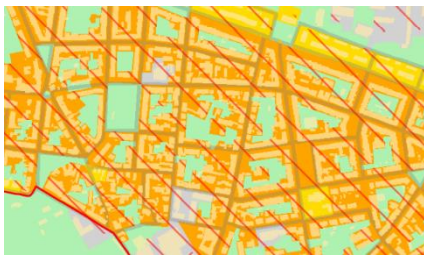
Temperatur, die Luftfeuchte und den Wind gering. Typischerweise trifft dies auf die kleineren umliegenden Siedlungen und Dörfer außerhalb der Kernstadt zu. In Darmstadt wurden unter anderem das Wohngebiet nordöstlich des alten Friedhofs und Teile der Villenkolonie im Norden von Eberstadt dem Vorstadtklima zugewiesen.

#### ■ Stadtrandklima



Die nächsthöhere Kategorie bildet das Stadtrandklima. Hier ist im Allgemeinen die Bebauung mit einem Versiegelungsgrad von ca. 30 % bis 50 % dichter und der Grünflächenanteil geringer, wodurch sich oft schon eine (schwache) Wärmeinsel bilden kann. Mit einer Fläche von knapp 9,8 km<sup>2</sup> besitzt das Stadtrandklima einen Anteil von 8,0 % an der Gesamtfläche des Stadtgebietes und bildet damit nach dem Gewerbeklima das zweithäufigste Siedlungsklimatop ab. Hierzu gehören beispielsweise weite Teile der Heimstätten-Siedlung oder des Komponistenviertels.

#### ■ Stadtklima



Noch dichtere und / oder höhere Bebauung und damit ein Versiegelungsgrad von 50 % bis 70 % ist charakteristisch für das Stadtklima. In diese Kategorie lassen sich durch Blockrandbebauung, geprägte Bereiche mit einem relativ geringen Grünflächenanteil einordnen (z. B. Johannesviertel, Martinsviertel).

Außerdem fallen weitere dicht bebaute Gebiete u. a. südöstlich der Innenstadt oder der Ortskern von Arheilgen in diese Klimatopklasse. Mit einem ausgeprägten Wärmeinseleffekt ist zu rechnen.

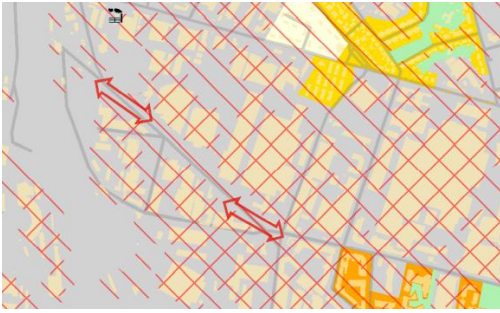
#### ■ Innenstadtklima



Die höchste Klimatopklasse bildet das Innenstadtklima, welches in der Altstadt vorliegt. Hier beträgt der Versiegelungsgrad verbreitet mehr als 70 % und die Durchgrünung beschränkt sich auf wenige Bäume oder nur sehr kleine zusammenhängende Grünflächen. Die dichte Bebauung und die daraus

resultierende hohe Rauigkeit behindern die Durchlüftung erheblich. Diese Voraussetzungen sind ideal für die Ausbildung einer sehr starken Wärmeinsel. Zusammen mit den schlechten Luftaustauschverhältnissen ergeben sich humanbiometeorologisch sehr ungünstige Aufenthaltsbedingungen.

#### ■ Gewerbe- und Industrieklima



Zu dieser Klimatopklasse gehören gewerblich geprägte Flächen mit einem Versiegelungsgrad von bis zu 100 % (Gewerbegebiete, Gewerbebrachen, Bahnanlagen, Fabriken, etc.). Entsprechende Flächen stellen häufig einen massiven Eingriff in die Natur dar und bilden je nach vorhandener Fläche eine große Wärmeinsel aus. Zudem liegt häufig auch ein

erhöhter Ausstoß an Luftschadstoffen vor, sofern es sich um produzierendes Gewerbe handelt. Vorhandene Kaltluft – oder Luftleitbahnen können z. B. durch hohe Fabriken oder Hallen abgeschwächt, umgeleitet oder sogar gänzlich gestoppt werden. Im Stadtgebiet von Darmstadt befinden sich mehrere Gewerbeflächen, die insgesamt eine Fläche von 10,5 km<sup>2</sup> einnehmen, was etwa 8,6 % des Stadtgebietes entspricht. Das Gewerbeklima ist damit das flächenmäßig verbreitetste Siedlungsklimatop in Darmstadt. Sehr prägend ist der große Gewerbekomplex in der Westhälfte des Stadtgebietes, welcher sich von der Eschollbrücker Straße im Süden bis an den südlichen Ortsrand von Arheilgen im Norden erstreckt. Alle weiteren Gewerbegebiete sind bedeutend kleiner und verteilen sich auf verschiedene Standorte.

## 4.4 Das Kaltluftabflussmodell KLAM\_21

### 4.4.1 Theoretische Grundlagen

Laut DWD (2021) ist „KLAM\_21 ein vom Deutschen Wetterdienst entwickeltes zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in orographisch gegliedertem Gelände für Fragen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung.“ Es simuliert flächendeckend die Dynamik und Entwicklung von Kaltluftflüssen sowie die Ansammlung von Kaltluft in einem beliebig rechteckig abgegrenzten Untersuchungsgebiet bei einer Maximalgröße von 3000 x 3000 Pixeln. Die Auflösung der einzelnen Rasterzellen kann dabei beliebig definiert werden. Das Untersuchungsgebiet ist so groß zu wählen, dass alle für ein Stadtgebiet relevanten Kaltlufteinzugsgebiete erfasst werden.

Für die Berechnung wird jeder Landbedeckungsklasse u. a. eine bestimmte Rauigkeit und eine Kaltluftproduktionsrate zugewiesen. Zusätzlich spielt die Geländehöhe je Pixel für die Kaltluftdynamik eine wesentliche Rolle, insbesondere da das Stadtgebiet von Darmstadt über eine weniger stark ausgeprägte Topographie verfügt und somit in weiten Teilen eine verminderte Kaltluftdynamik aufweist.

KLAM\_21 rechnet mit einer sogenannten „Strahlungsnacht“ im Sommer (kein Wind von außerhalb, kaum Wolken, gleichbleibende Ausstrahlung) mit einer Dauer von 8 Stunden, um ausschließlich das lokale Kaltluftgeschehen unabhängig von übergeordneten Wetterlagen zu erfassen. Der Simulationsbeginn liegt kurz vor Sonnenuntergang. Ergebnisse können vom Modell für jeden beliebigen Zeitpunkt ausgegeben werden. Man erhält entsprechend flächenhaft für das gesamte Modellgebiet die Verteilung der Kaltfluthöhe, den Kaltluftvolumenstrom und die mittlere Fließgeschwindigkeit. Letztere als Höhenmittel und für eine selbst zu definierende Höhe, welche standardmäßig 2 m beträgt und dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht.

Nach der VDI 3787, Blatt 1 (2015:37,38) gehört KLAM\_21 zu den Modellen, „deren Strömungsmodul nach einem anerkannten Verfahren verifiziert wurde“. Es ist somit besonders für stadtklimatische und kaltluftspezifische Fragestellungen geeignet und hat sich schon in zahlreichen amtlichen Gutachten zur Stadt-, Regional- und Landesplanung bewährt.

Neben der Einstellung von einigen KLAM\_21 Konfigurationsparametern ist es für den Start der Modellierung erforderlich, das DGM (Digitales Geländemodell) und die Landnutzung so aufzubereiten, dass sie vom Modell eingelesen werden können. Bei Interesse können weiterführende Informationen u. a. zu den mathematisch-physikalischen Grundlagen von KLAM\_21 Sievers (2005) entnommen werden.

#### 4.4.2 Praktische Umsetzung – Vorbereitung der Modellierung

| Klimatop      | KLAM_21 Klasse Name      | KLAM_21 Klasse Code |
|---------------|--------------------------|---------------------|
| Freilandklima | unversiegelte Freifläche | 7                   |
| Waldklima     | Wald                     | 3                   |

|                                    |                 |   |
|------------------------------------|-----------------|---|
| Klima innerstädtischer Grünflächen | Park            | 6 |
| Kleingartenklima                   | Park            | 6 |
| Wasserklima                        | Wasser          | 9 |
| Gewerbeklima                       | Industriegebiet | 5 |
| Vorstadtklima                      | Siedlung locker | 2 |
| Stadttrandklima                    | Siedlung locker | 2 |
| Stadtklima                         | Siedlung dicht  | 1 |
| Innenstadtklima                    | Siedlung dicht  | 1 |

**Tabelle 2: Übersicht zur Umwandlung der Klimatopklassen zu den passenden KLAM\_21 Nutzungsklassen.**

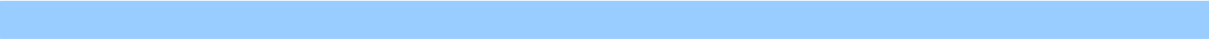
Der erste Schritt, welcher bei Bedarf im weiteren Verlauf der Vorbereitungen allerdings noch angepasst werden kann, ist die Auswahl des Modelliergebietes. Dabei sind die oben genannten Rahmenbedingungen zu beachten.

Da KLAM\_21 sensibel auf zu kleine Modelliergebiete reagiert, ist es im Zweifel immer besser dieses etwas zu groß als zu klein zu wählen Fuchs (2018:24, 63). Vor diesem Hintergrund wurde ein weit in alle Himmelsrichtungen hineinreichendes Modelliergebiet gewählt, um auch wirklich alle Kaltluftströme aus der Umgebung von Darmstadt zu erfassen. Durch die Ausnutzung der maximal möglichen Gebietsgröße von 3000 x 3000 Rasterzellen, konnte eine gesamtstädtisch recht hohe räumliche Auflösung von 10 m x 10 m realisiert werden.

Der nächste Schritt besteht nun darin, für des gewählte Modellierungsgebiet Informationen zur Geländehöhe und zur Landbedeckung so aufzubereiten, dass sie von KLAM\_21 eingelesen werden können. Hierzu wurde des für Hessen vorliegende DGM1 auf die Zielauflösung von 10 m x 10 m umgerechnet und auf das Modelliergebiet zugeschnitten (Abbildung 18).

Etwas komplizierter ist die Vorbereitung der Landbedeckung, da sich hier als aller erstes die Frage stellt, welche Daten die Grundlage bilden sollen? Hier wurde eine kombinierte Variante gewählt. Innerhalb des Stadtgebietes von Darmstadt sowie des Stadtgebietes vom westlich benachbarten Griesheim wurden die erstellten Klimatope herangezogen und gemäß Tabelle 2 in die von KLAM\_21 benötigten Klassen überführt, sodass hier eine hohe Detailqualität gewährleistet ist.

Außerhalb der beiden Stadtgebiete erfolgte die Verwendung des europäischen, aus Satellitendaten erzeugten und frei verfügbaren CORINE-Landbedeckungsdatensatzes. Dieser weist mit einer räumlichen Auflösung von 100 m x 100 m eine geringere Detailschärfe auf, verfügt andererseits jedoch über mehr als 40 Klassen, welche ebenfalls nach einer vorliegenden Tabelle umgewandelt wurden. Aufgrund deren



Größe wird sie aus Gründen der Übersichtlichkeit an dieser Stelle nicht gesondert dargestellt. Das finale Landbedeckungsraster ist Abbildung 19 zu entnehmen.

Nachdem das DGM und die Landbedeckung in für KLAM\_21 aufbereiteter Form vorliegen, kann die Modellierung gestartet werden. Für die Ergebnisausgabe wurden insgesamt elf Zeitschritte (15 min, 30 min, 60 min / 1 Stunde, 90 min, 120 min / 2 Stunden, 180 min / 3 Stunden bis 480 min / 8 Stunden) gewählt. Die angegebenen Minutenwerte entsprechen der vergangenen Zeit nach Sonnenuntergang. Die erhöhte Anzahl an Zeitschritten zu Beginn der Nacht stellt sicher, dass gerade in den (für das Einschlafen) wichtigen ersten Nachtstunden differenzierte Informationen vorliegen.

#### 4.4.3 Praktische Umsetzung – Datenaufbereitung nach der Modellierung

Sobald die Modellierung abgeschlossen ist, bietet KLAM\_21 die Möglichkeit provisorische Karten für alle Zeitschritte zu erzeugen. Von Seiten des Nutzers ermöglichen diese aber nur geringe Anpassungsmöglichkeiten. Außerdem liegen die vom Modell erstellten Ergebnisdaten in einer Form vor, in der Sie nicht weiter im GIS bearbeitet, ausgewertet und kartographisch dargestellt werden können.

Vor diesem Hintergrund wurde eine automatisierte Methodik unter Verwendung der Programmiersprache R entwickelt, welche es ermöglicht, folgende Ergebnisse jeweils für alle Zeitschritte zu erhalten:

- die Kaltfluthöhe in m als GeoTIFFs
- die Kaltluftvolumenstromdichte in  $\text{m}^3 / (\text{m} \cdot \text{s})$  als GeoTIFFs
- die Kaltluftfließgeschwindigkeiten inkl. deren Richtung als Höhenmittel und in 2 m Höhe als Punktshapefiles in der Ursprungsauflösung (10 m x 10 m)
- aggregierte Punktshapefiles der Kaltluftfließgeschwindigkeiten zur besser lesbaren Kartendarstellung (100 m x 100 m)

Mit den oben genannten Daten lassen sich nun alle erforderlichen Karten erstellen. Eine Auswahl davon wird im nächsten Kapitel vorgestellt. Alle übrigen Karten sind im (digitalen) Anhang zu finden.

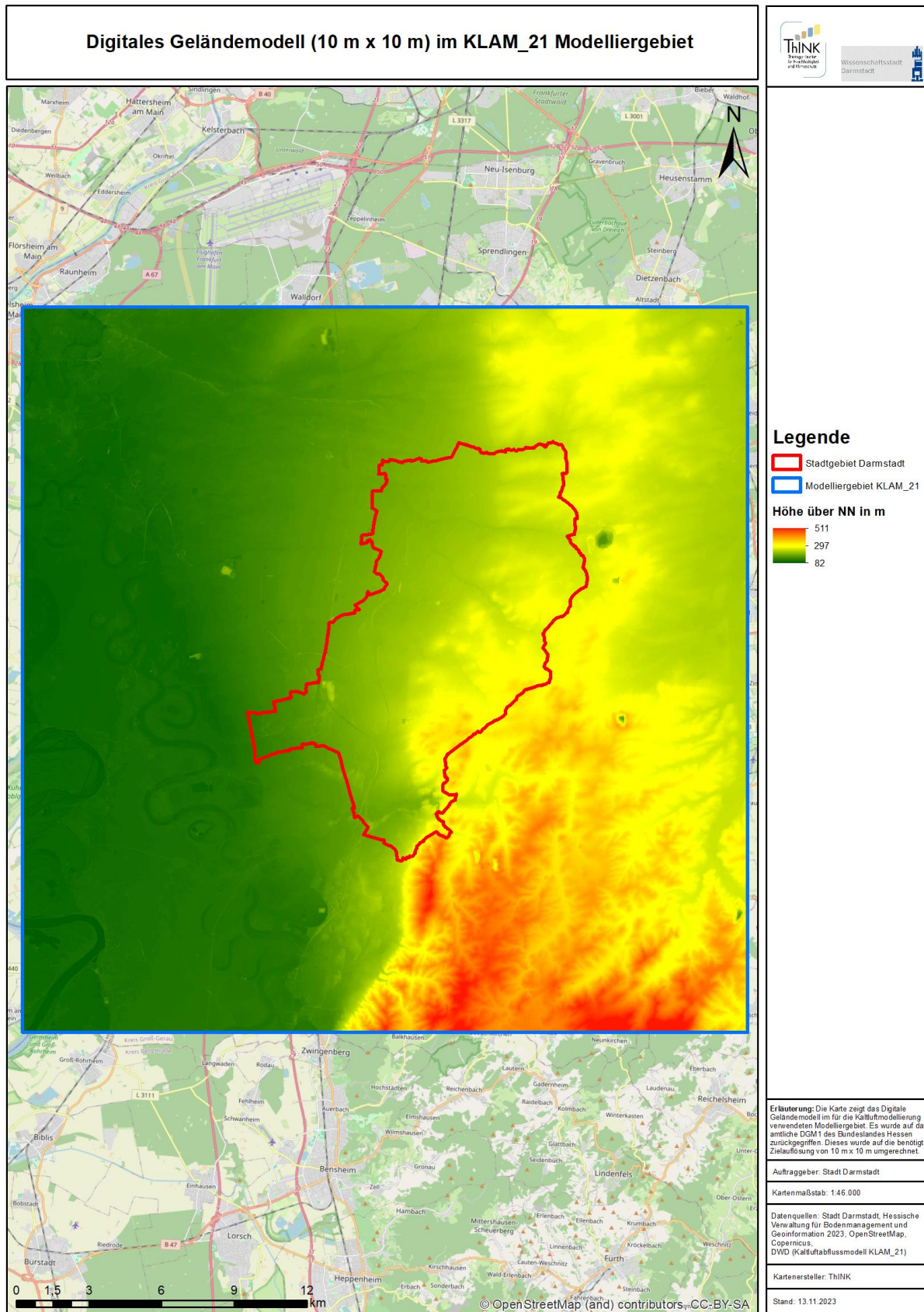
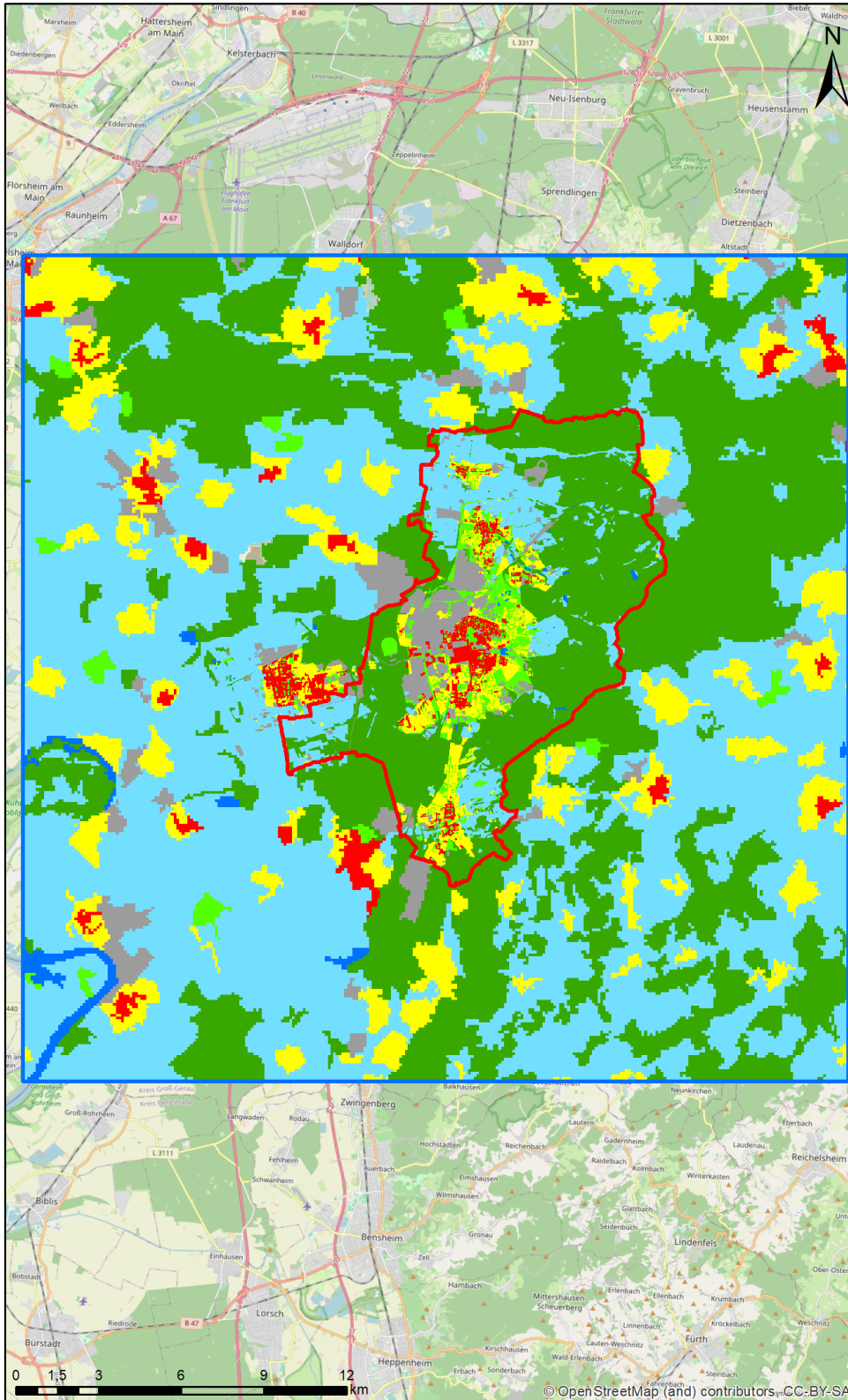


Abbildung 18: Digitales Geländemodell im Modelliergebiet.

## Landbedeckungsklassen im KLAM\_21 Modelliergebiet



Wissenschaftsstadt  
Darmstadt



### Legende

- Stadtgebiet Darmstadt
- Modelliergebiet KLAM\_21

### KLAM\_21 Landbedeckung

- Siedlung (dicht)
- Siedlung (locker)
- Wald
- Industriegebiet
- Park
- unversiegelte Freifläche
- versiegelte Freifläche
- Wasser

**Erläuterung:** Die Karte zeigt die Landbedeckung im für die Klimafußmodellierung verwendeten Modelliergebiet innerhalb des Stadtgebietes von Darmstadt und Oresheim kamen dabei als Ausgangsbasis die erstellten Klimatoppe zum Einsatz. Außerdem des Stadtgebietes wurde auf den europäischen CORINE-Landcover Datensatz zurückgegriffen. Beide wurden auf die benötigte Zellauflösung von 10 m x 10 m umgerechnet und miteinander kombiniert.

Auftraggeber: Stadt Darmstadt

Kartenmaßstab: 1:46.000

Datenquellen: Stadt Darmstadt, Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation 2023, OpenStreetMap, Copernicus, DWD (Klimafußmodell KLAM\_21)

Kartensteller: THINK

Stand: 13.11.2023

Abbildung 19: Landbedeckungsraster im Modelliergebiet.

## 4.5 Ergebnisse der Kaltluftmodellierung

Um den Umfang dieses Unterkapitels sowie die Anzahl an Karten zu begrenzen, wird nachfolgend zunächst der Zeitverlauf der Kaltluftvolumenstromdichte präsentiert, bevor darauffolgend für alle drei Parameter der Zeitschritt nach zwei Stunden gesondert besprochen wird, da dieser in großen Teilen maßgeblich für die späteren Darstellungen in der Klimaanalysekarte ist (siehe Kapitel 4.11).

### 4.5.1 Kompletter Zeitverlauf der Kaltluftvolumenstromdichte

Die Karten zur Kaltluftvolumenstromdichte gelten als besonders anschaulich, um die zeitliche Kaltluftdynamik im Stadtgebiet von Darmstadt zu visualisieren, weshalb im Folgenden alle elf Zeitschritte dargestellt sind (Abbildung 20) und kurz zusammenfassend erläutert werden. Zusätzlich ist zum besseren Verständnis auch eine Definition der Kaltluftvolumenstromdichte angegeben. Die gleichen Zeitserien zur Kaltluftfließgeschwindigkeit sowie zur Kaltfluthöhe sind im Anhang zu finden.

**Definition Kaltluftvolumenstromdichte:** Die Kaltluftvolumenstromdichte ist diejenige Kaltluftmenge in  $\text{m}^3$ , die pro Sekunde durch einen 1 m breiten Streifen zwischen der Erdoberfläche und der Obergrenze der Kaltluftschicht, welche senkrecht zur Strömung steht, fließt.

Ihre Werte können folgendermaßen eingeordnet werden:

0 bis 2: sehr niedrig

> 2 bis 10: niedrig

>10 bis 20: mäßig

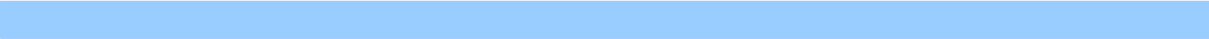
> 20 bis 50: hoch

> 50 bis 100: sehr hoch

> 100: extrem hoch

Die Stadt Darmstadt verfügt aufgrund der vorliegenden Topographie (Höhenunterschied von ca. 180 m, geringste Werte im Westen, höchste im Südosten) verglichen mit vielen anderen Städte in Deutschland über eine schwach bis mittelstark ausgeprägte Kaltluftdynamik. Während einige Teile des Stadtgebietes (primär Eberstadt im Süden) bei Hochdruckwetterlagen günstige Kaltluftverhältnisse aufweisen, ist vor allem die Westhälfte von Darmstadt in dieser Hinsicht stark benachteiligt.

Hauptantrieb für die Kaltluft ist das Gelände, da die kalte Luft entsprechend von höheren Bereichen in tiefere Lagen fließt. Je stärker die Höhenunterschiede ausgeprägt sind, desto besser ist die Kaltluftversorgung. Neben geringen Höhenunterschieden wirken sich vor allem stark verdichtete und hoch bebaute Siedlungsbereiche negativ auf die lokalen Kaltluftverhältnisse aus.



Besonders prägnant sind Bereiche, welche frühzeitig in den ersten Nachtstunden in violetten Farben auftauchen. Dort werden Kaltluftvolumenstromdichten von mehr als  $50 \text{ m}^3 / \text{m}^*\text{s}$  erreicht, was sehr hohen Werten entspricht (DWD 2017:53). Zwei Stunden nach Sonnenuntergang profitiert Eberstadt von einem entsprechend starken, von Osten kommenden Kaltluftstrom. Eine weitere, insbesondere für die Darmstädter Innenstadt, wichtige Kaltluftbahn verläuft in etwa entlang folgender Linie: Darmbachau => An den Lichtwiesen => Botanischer Garten => Großer Woog => Rudolf-Müller-Anlage. Der hier fließende Kaltluftstrom ist allerdings deutlich schwächer ausgeprägt als der bei Eberstadt.

Sobald eine Kaltluftvolumenstromdichte von mehr als  $10 \text{ m}^3 / \text{m}^*\text{s}$  erreicht wird, kann diese als klimatisch relevant bezeichnet werden, da die Abkühlung dann auch von der Bevölkerung wahrgenommen wird. Je früher dies im Laufe der Nacht der Fall ist, desto besser (Moldenauer et al. 2015, S.41).

Zwei Stunden nach Sonnenuntergang (ca. 23 bis 0 Uhr im Sommer) weisen nur wenige Orte (neben den genannten nur noch Teile von Kranichstein) in Darmstadt eine entsprechend hohe Kaltluftvolumenstromdichte auf. Entsprechend lassen sich verbreitet erschwerte Einschlafbedingungen für die Bevölkerung feststellen, da in Darmstadt ein ausgeprägter städtischer Wärmeinseleffekt mit entsprechend starker Aufheizung tagsüber vorliegt (vgl. Kapitel 4.7).

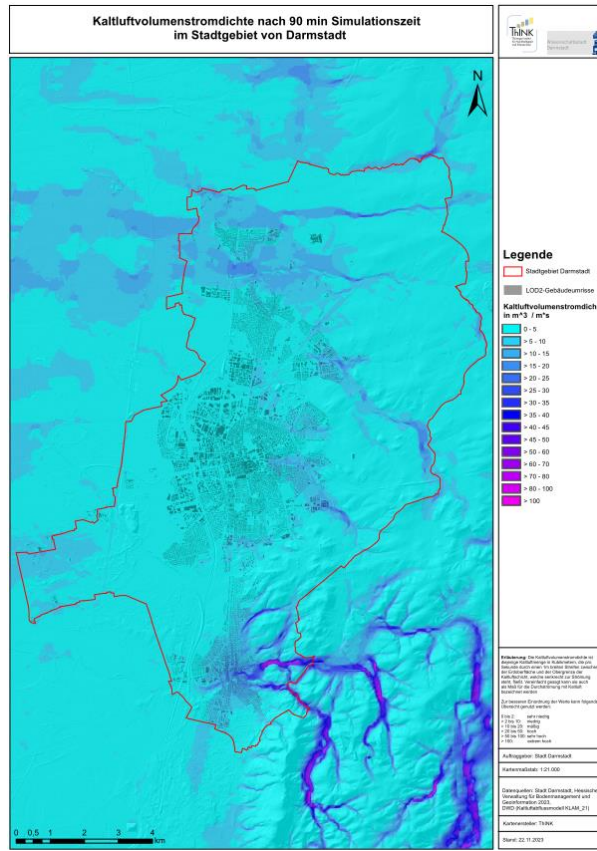
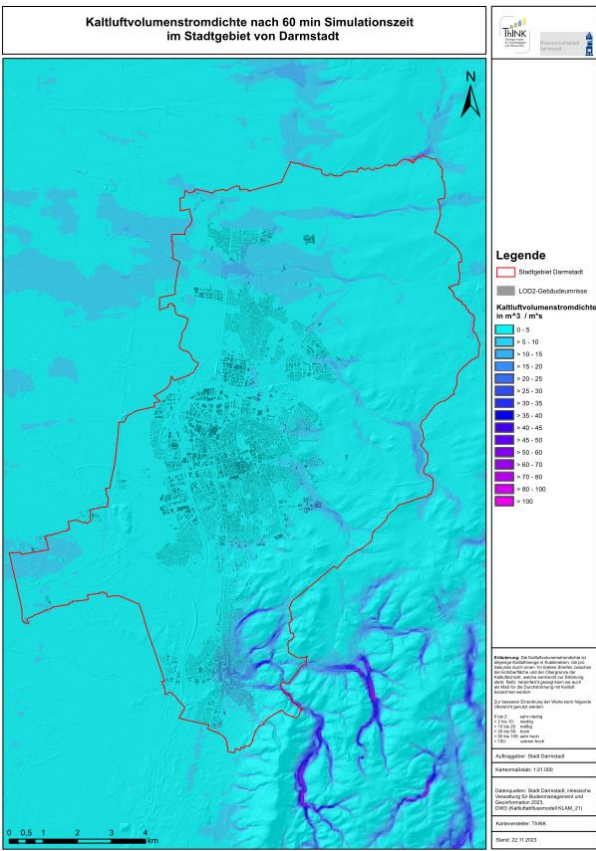
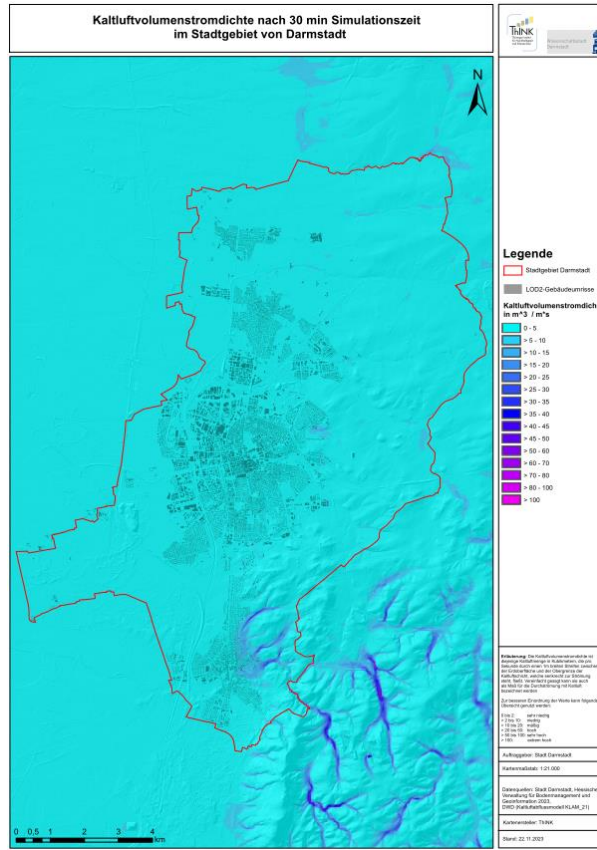
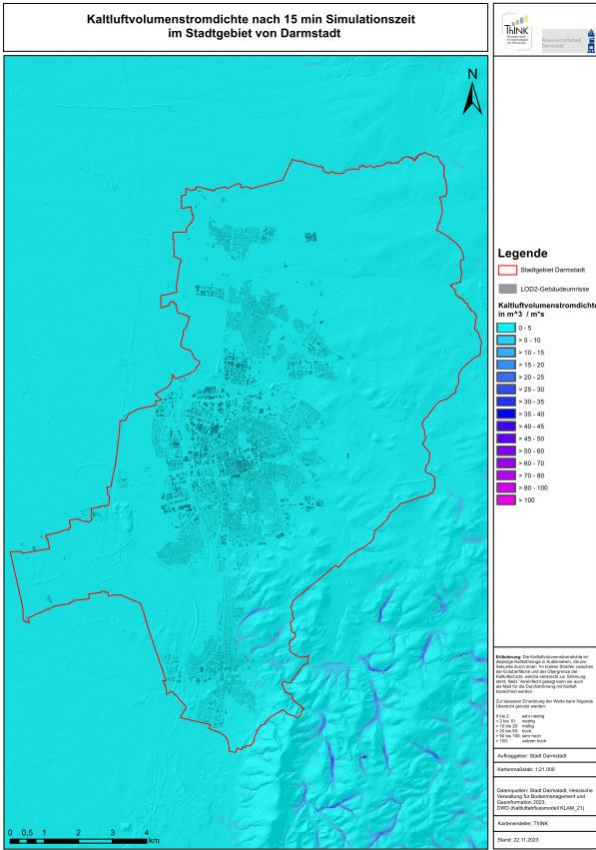
Die Flächen mit einer Kaltluftvolumenstromdichte von mehr als  $10 \text{ m}^3 / \text{m}^*\text{s}$  vergrößern sich in den weiteren Nachtstunden nur sehr langsam. Etwa vier Stunden nach Sonnenuntergang werden der östliche Rand der Innenstadt sowie Teile des nördlichen Gewerbegebietes (Merck KGaA) erreicht.

In mehreren Bereichen von Darmstadt ist die nächtliche Kaltluftsituation besonders ungünstig. Dort erreicht die Kaltluftvolumenstromdichte zu keinem Zeitpunkt der sommerlichen Strahlungsnacht Werte von mehr als  $10 \text{ m}^3 / \text{m}^*\text{s}$ . Das betrifft u.a.: die westliche Innenstadt, praktisch die kompletten Stadtteile Darmstadt-West und Darmstadt-Bessungen, das Europaviertel, das Johannesviertel oder das Martinsviertel. Entsprechend kann dort die tagsüber angestaute Wärme allein durch die lokalen Strömungen kaum abtransportiert werden. Es ist in den genannten Bereichen besonders wichtig, möglichst viele, am besten miteinander vernetzte Grünflächen/Grünstrukturen zu schaffen, um die lokale Kaltluftbildung vor Ort zu verbessern.

Plakativ ist das Ganze in Abbildung 21 visualisiert. Dort wird gezeigt, wo die Kaltluftvolumenstromdichte zu bestimmten Zeitpunkt den Grenzwert von  $10 \text{ m}^3 / \text{m}^*\text{s}$  übersteigt.

Für detaillierte Informationen sei auf die Einzelkarten zu den jeweiligen Zeitschritten bzw. auf die der Stadt Darmstadt bereitgestellten Animationen verwiesen.







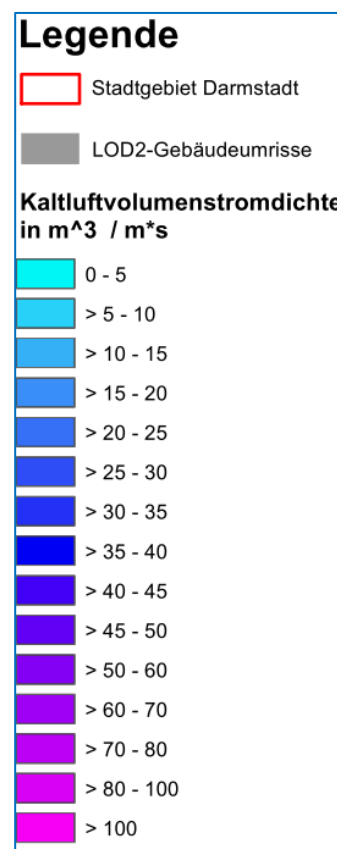
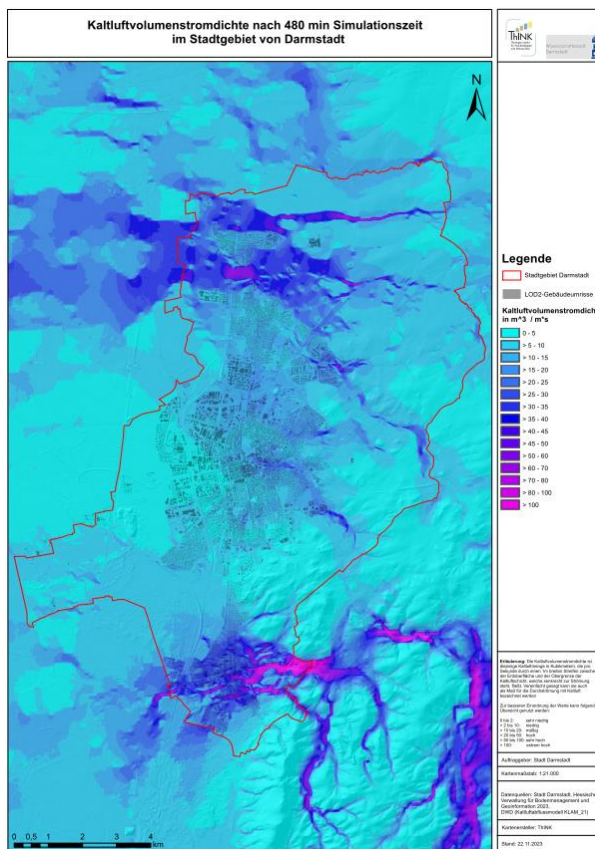
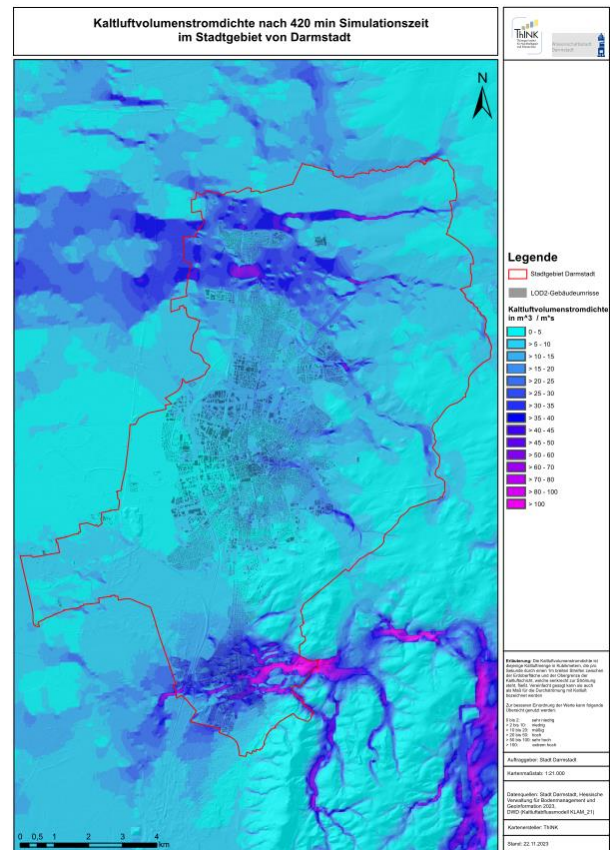
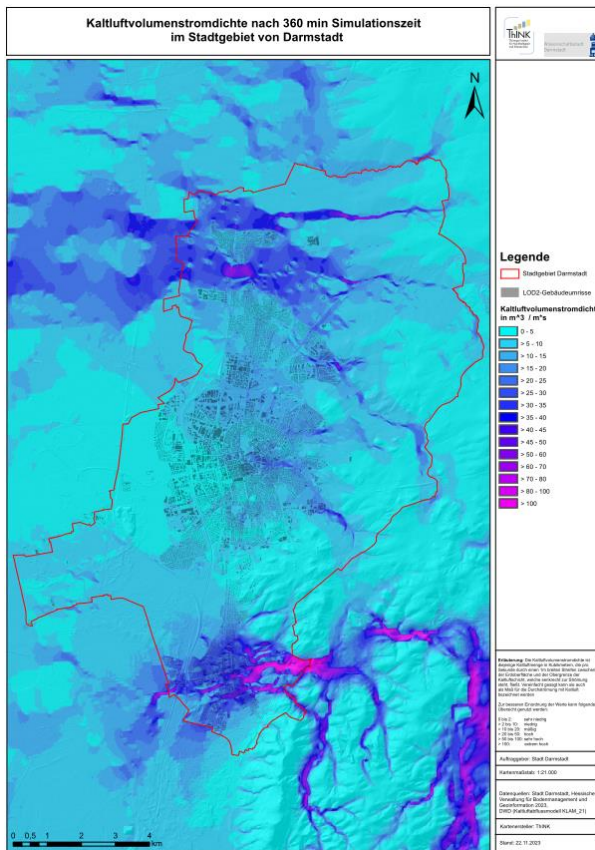
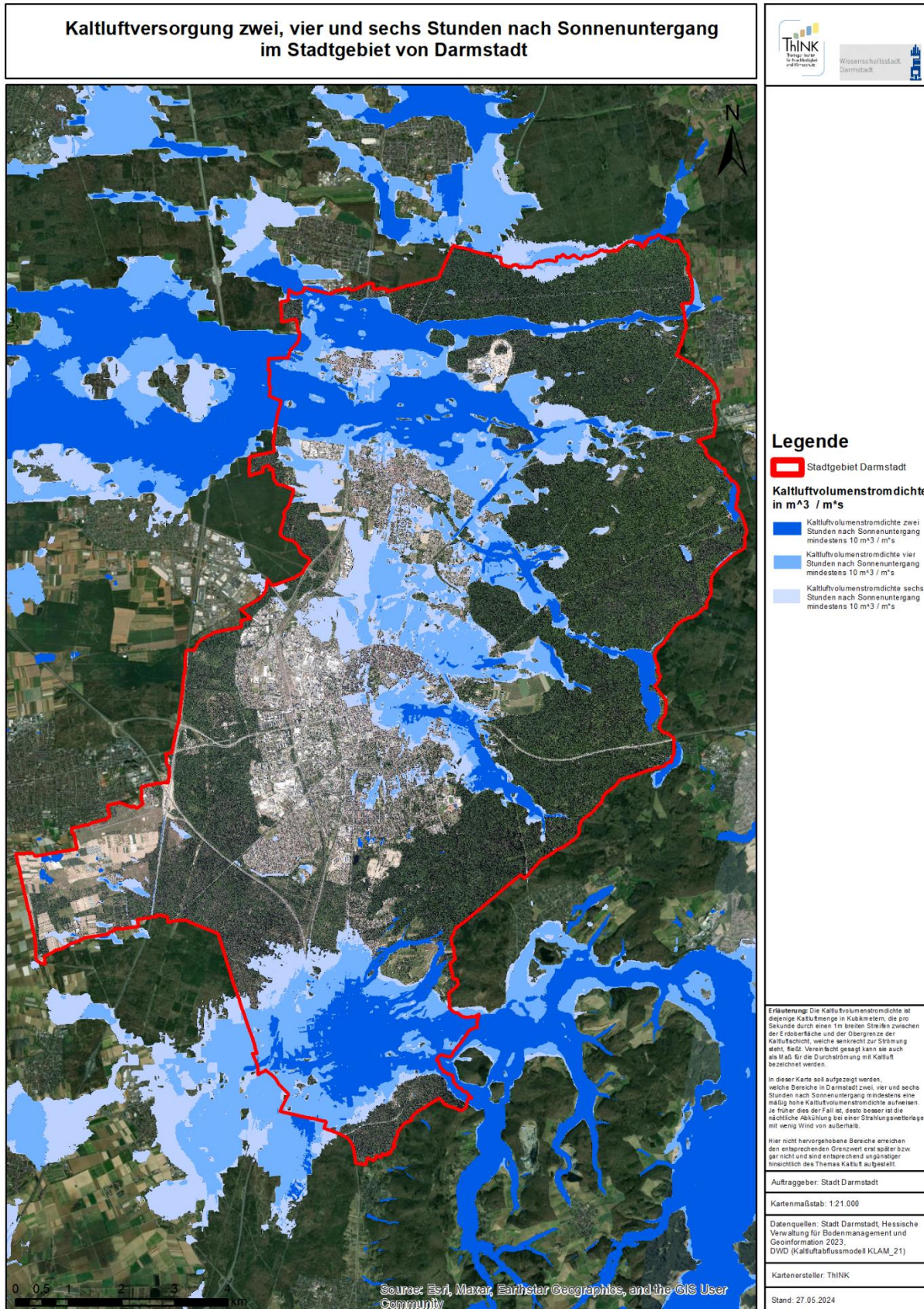


Abbildung 20: Zeitserie der Kaltluftvolumenstromdichte nach Sonnenuntergang. Die Legende ist vergrößert auf der rechten Seite zu sehen.



**Abbildung 21: Übersicht zur Kaltluftversorgung im Stadtgebiet von Darmstadt für verschiedene Zeitschritte. Je dunkler das Blau, desto besser. Nicht gekennzeichnete Bereiche erreichen den Grenzwert bei der Kaltluftvolumenstromdichte für eine hinreichend gute Kaltluftversorgung in den ersten sechs Nachtstunden nicht.**

#### 4.5.2 Grundlage für die Darstellung in der Klimaanalysekarte – Zeitschritt nach zwei Stunden Simulationszeit

Die Klimaanalysekarte allein ist nicht in der Lage als statische Karte den kompletten nächtlichen Zeitverlauf der Kaltluftdynamik zu erfassen. Da jedoch gerade im Sommer die ersten Nachtstunden entscheidend für eine schnelle Abkühlung überwärmter Bereiche sind, ist die Klimaanalysekarte darauf ausgelegt, im Wesentlichen die „Anfangsphase der Nacht“ abzubilden (Moldenauer et al. 2017, S.39ff., Geißler & Dröscher 2017, S.106ff., VDI 2015).

Vor diesem Hintergrund und auf Basis der Erfahrung aus anderen Städten fiel die Wahl auf den Zeitpunkt von 120 min nach Simulationsbeginn / Sonnenuntergang. Das entspricht im Hochsommer in etwa 23 bis 0 Uhr. Dieser Zeitpunkt bildet damit die Grundlage für alle im Kapitel 4.6 vorstellten Kaltluftmerkmale.

Da zur Kaltluftvolumenstromdichte bereits im vorangegangenen Abschnitt Aussagen getätigt wurden, soll sich dieses Unterkapitel auf die Kaltfluthöhe (Abbildung 8) sowie die bodennahe Kaltluftfließgeschwindigkeit (Abbildung 9) konzentrieren. Je größer die Kaltfluthöhe ist, desto stärker kann die Luft darunter abkühlen. Ebenfalls positiv sind hohe bodennahe Fließgeschwindigkeiten in den ersten Nachtstunden. Wichtig zu beachten ist jedoch, dass diese mit steigender Kaltfluthöhe abnehmen, da kalte Luftmassen schwerer und damit auch träger sind als wärmere. Sie kommen sozusagen „zur Ruhe.“ Dieses Verhalten lässt sich in Darmstadt sehr gut anhand der Animation zur bodennahen Fließgeschwindigkeit nachvollziehen. So breiteten sich die Bereiche mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten in 2 m Höhe von weniger als 0,1 m/s im Laufe der Nacht proportional zur Zunahme der Kaltfluthöhe immer weiter aus. Hohe bodennahe Fließgeschwindigkeiten treten typischerweise auf Berg- bzw. Hangkuppen oder an der Vorderseite eines Kaltluftstromes auf.

Zwei Stunden nach Sonnenuntergang treten in Eberstadt mit Kaltfluthöhen von 30 bis 50 m die höchsten Werte in ganz Darmstadt auf. Bei den im vorangegangenen Kapitel genannten Defizitbereichen im Westen von Darmstadt beträgt die Kaltfluthöhe oft weniger als 5 m. Der Rest liegt dazwischen, wobei höhere Werte von um die 20 m im Bereich von Wixhausen, im Woogsviertel oder in Kranichstein vorkommen.

An zwei Stellen in Darmstadt gibt es noch Bereiche mit Kaltluftstau. Dabei handelt es sich um flache Gebiete (Walflächen, Wiesen, Acker) mit sehr geringen Hangneigungen. Auf diesen kann die sich bildende Kaltluft nicht bzw. nur sehr langsam abfließen und wächst an Ort und Stelle zunehmend in die Höhe. In Darmstadt betrifft dies den äußersten Südwesten des Stadtgebietes oder den Bereich um die Bahnstrecke zwischen den Bahnhöfen Darmstadt-Kranichstein und Messel.



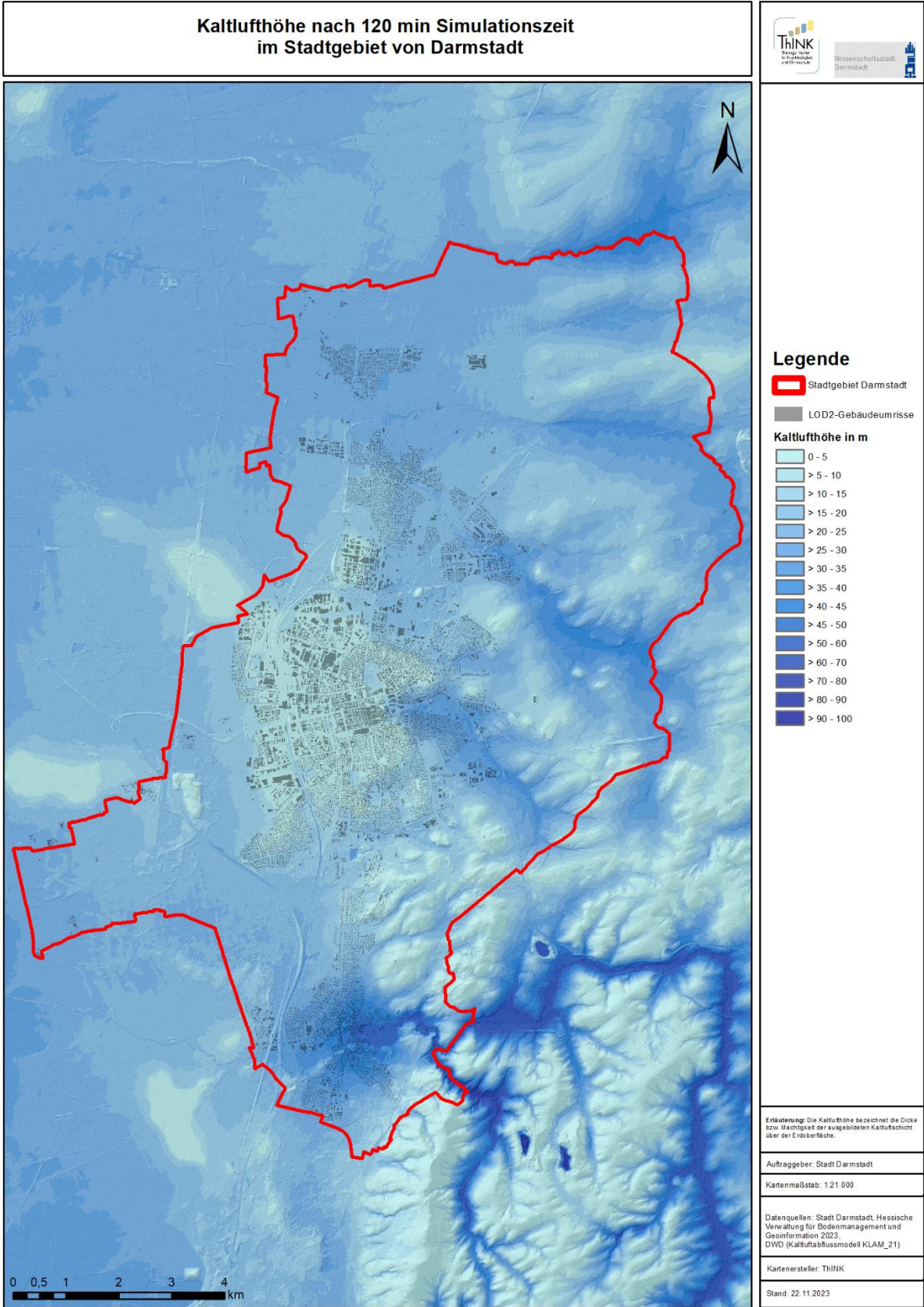


Abbildung 22: Kaltfluthöhe zwei Stunden nach Sonnenuntergang.

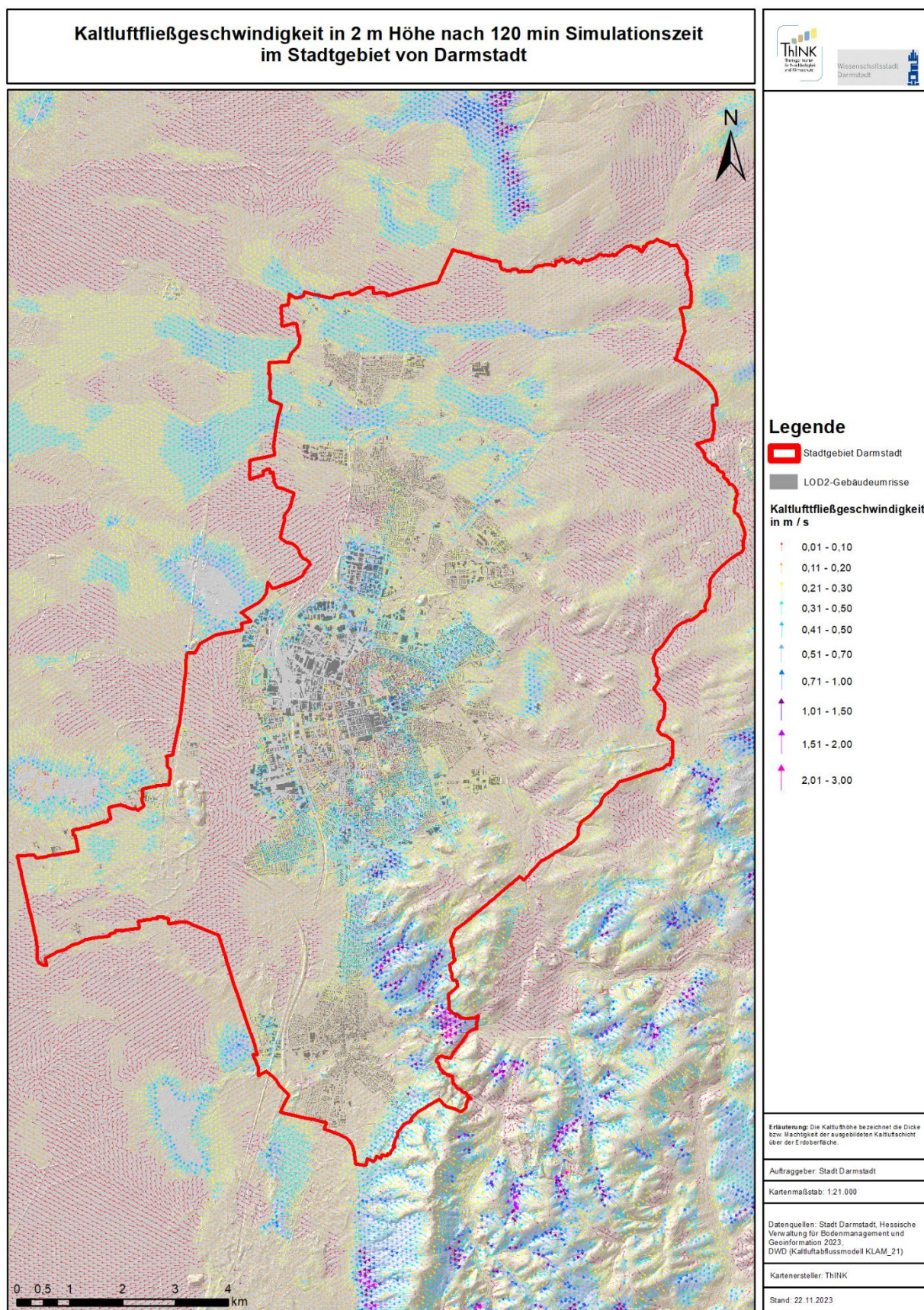


Abbildung 23: Kaltluftfließgeschwindigkeit in 2 m Höhe nach Sonnenuntergang.

## 4.6 In der Klimaanalysekarte dargestellte Kaltluftmerkmale

Die im Kapitel 4.5 sowie im Anhang gezeigten Modellierungsergebnisse wurden als Ausgangsbasis verwendet und im GIS (Geographisches Informationssystem) umfassend aufbereitet, um die VDI-konformen Kaltluftinformationen zu gewinnen. Folgende kaltluftbezogene Informationsebenen wurden abgeleitet und in der Klimafunktionskarte dargestellt (bitte beachten: alle Pfeile sind idealisierte Piktogramme räumlich kontinuierlicher Phänomene, somit ist keine scharfe Grenzziehung möglich). Darüber hinaus ist folgender Aspekt unbedingt zu beachten.

Weiterhin gilt es zu beachten, dass auch in Bereichen wo keine Kaltluft eingezeichnet ist, diese durchaus vorhanden ist, aber eben nicht die für die Darstellung erforderlich Grenzwerte erfüllt. Die Festlegung von entsprechenden Grenzwerten ist notwendig, um für die Kaltluftversorgung in Darmstadt besonders relevante Flächen zu identifizieren und damit letztlich eine Differenzierung zu ermöglichen.

#### 4.6.1 Luftleitbahn



Gemäß Moldenauer et al. (2015, S.39) sind Luftleitbahnen bzw. auch Ventilationsbahnen Bereiche, „in denen sich der regionale Windeinfluss, insbesondere bezüglich der Hauptwindrichtung, unbehindert entfalten kann. In Darmstadt handelt es sich dabei um West / Südwest. Voraussetzung für die Entstehung einer Luftleitbahn sind nach VDI (2015, S.25) eine geringe Rauigkeit ohne Hindernisse im gesamten Verlauf, eine möglichst geradlinige oder nur leicht gekrümmte Ausrichtung und eine hinreichend große Breite. Ideal wären mehr als 300 m. Außerdem sollte die Hangneigung sehr gering sein. Diese Bedingungen sind häufig z. B. im Fall von breiten Flussauen, Straßen und Bahngleisen erfüllt.

Wichtig zu beachten ist darüber hinaus, dass Luftleitbahnen sowohl in der Nacht als auch am Tag bestehen. Alle anderen Kaltluftmerkmale beziehen sich hingegen nur auf die Nachtsituation.

Führen Luftleitbahnen entlang von Straßen mit einer täglichen Verkehrsbelastung von mehr als 10.000 Kfz oder queren diese, so gelten sie als potenziell lufthygienisch belastet und werden in roter Farbe dargestellt.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Topographie befinden sich in Darmstadt einige Luftleitbahnen. Ihre Lage wurde qualitativ auf Basis des Wissens um die Hauptwindrichtung und der Betrachtung der Geländebeschaffenheit sowie der bodennahen Strömungsrichtung in 2 m Höhe während der ersten vier Nachtstunden ermittelt. Innenstadtnah ist die B26 oder auch die Frankfurter Straße stellvertretend für potenziell Schadstoffbelastete Luftleitbahnen zu nennen. Unbelastete Luftleitbahnen befinden sich u. a. im Umwelt von Wixhausen oder entlang der Bahnstrecke von Darmstadt Hbf in Richtung Darmstadt Süd.

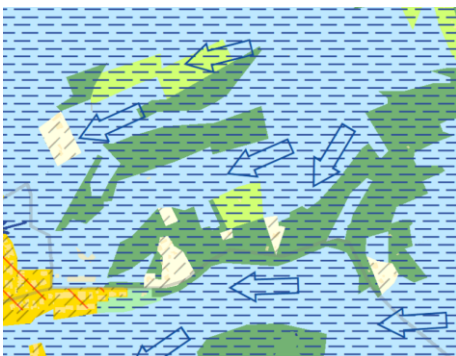
#### 4.6.2 lokaler Kaltluft(ab)fluss



Der nächtliche flächenhafte Kaltluftabfluss (dargestellt durch kleine blaue Pfeile – siehe Abb. links) ist Teil eines thermisch induzierten Windsystems (Hangab- und -aufwind). Nachts fließt die bodennah gebildete Kaltluft am Hang ab, ist also durch die Schwerkraft beeinflusst (VDI 2015). Prinzipiell kann an allen Hängen mit naturnaher Vegetation (Wiese, Wald) oder auf Ackerflächen Kaltluft entstehen und ab einem Gefälle von etwa  $1^\circ$  (Wiese, Ackerland) bzw.  $5^\circ$  (höherer Bewuchs) in Richtung Talsohle abfließen (VDI 2003). Im Planungskontext sind jedoch vor allem die Kaltluftabflüsse relevant, die einen Siedlungsbezug haben, also von einem Ausgleichsraum (Wald, Wiese, Park) zu einem Wirkungsraum (Siedlungsbereiche) strömen und bioklimatische Entlastung bringen (z. B. in Kranichstein oder Eberstadt).

Flächenhafte Kaltluftabflüsse bestimmen besonders in der Anfangsphase einer Strahlungsnacht das Kaltluftgeschehen vor Ort. Dementsprechend wurden die bodennahen Kaltluftflüsse (2 m über Grund) für den Zeitschritt 2 h (nach Sonnenuntergang), mit einer Fließgeschwindigkeit von  $\geq 0,5$  m/s und klarem Siedlungsbezug zur Herleitung verwendet. Verlaufen flächenhafte Kaltluftabflüsse entlang oder im näheren Umfeld verkehrsbelasteter Straßen (Kapitel 4.9), so erfolgt eine Darstellung in roter Farbe.

#### 4.6.3 Talwind



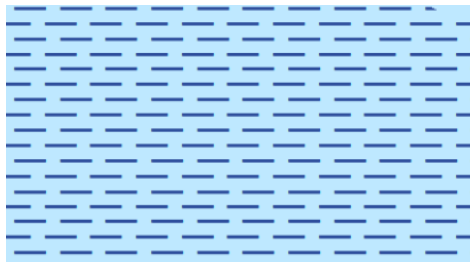
Die an den Talhängen abfließende Kaltluft sammelt sich in der Talsohle und bildet nachts talabwärts gerichtete Kaltluftströme, auch Tal(ab)winde genannt. Diese haben Ausgleichsströmungen am Tage (Bergwinde), die talaufwärts gerichtet sind und bilden zusammen ein Berg- / Talwindsystem (VDI 2015). Talwinde tragen zur Belüftung von (überwärmten) Siedlungsbereichen bei, wenn die Täler auf diese ausgerichtet sind, also Ausgleichsraum mit Wirkungsraum verbinden.

Abgeleitet wurden die Talwinde aus dem Höhenmittel der Kaltluftströme in den Talsohlen ( $> 0,5$  m/s) bei gleichzeitigen Kaltluftvolumenstromdichten von mindestens  $10 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$  nach zwei Stunden Simulationszeit und einem direkten Siedlungsbezug. Talwinde ohne Siedlungsbezug wurden nicht in die Klimaanalysekarte übernommen.

Sofern sich verkehrsbelastete Straßen in der Nähe befinden (DTV > 10.000), werden diese in roter Farbe gekennzeichnet.

Markante Talwinde verlaufen vor allem östlich von Eberstadt, nördlich und südlich von Wixhausen und entlang der Achse Darmbachau => An den Lichtwiesen => Botanischer Garten => Großer Woog => Rudolf-Müller-Anlage.

#### 4.6.4 Kaltlufteinzugsgebiet



Kaltlufteinzugsgebiete werden von Flächen gespeist, über denen infolge der nächtlichen Energiebilanz eine stärkere Abkühlung der Luft auftritt und somit Kaltluft entsteht (z. B. Wiesen, Ackerland, Wald, Parks). Über eine vorhandene Geländeneigung wird die Kaltluft hang- bzw.

talabwärts aus dem Kaltlufteinzugsgebiet zum Wirkungsraum transportiert (VDI 2015). Im Stadtgebiet von Darmstadt sind Kaltlufteinzugsgebiete vor allem im nördlichen und östlichen Teil vorhanden.

Als Basis für die Ausweisung der Kaltlufteinzugsgebiete dienen vor allem die bodennahen Kaltluftfließgeschwindigkeiten (2 m über Grund) zu Anfang der Nacht (Zeitschritt 2 h nach Sonnenuntergang), die eine Fließgeschwindigkeit von  $\geq 0,5$  m/s erreichen. Zudem wurde ein direkter Siedlungsbezug berücksichtigt, d. h., die Kaltluftentstehungsgebiete befinden sich nicht weiter als 1 km vom Siedlungsbereich entfernt. Als Siedlungsbereich wurden alle Klimatoppe außer Freiland, Wald, Kleingarten, innerstädtische Grünflächen und Wasser definiert. Außerdem muss eine Mindestgröße von 2 ha für die einzelnen Teilflächen vorliegen.

Neben der Kaltluftgeschwindigkeit wurden Kaltlufteinzugsgebiete zusätzlich auch unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichten ausgewiesen. Dies ist der Fall, wenn nach 2 h Simulationszeit eine Kaltluftvolumenstromdichte von mehr als  $10 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$  festzustellen ist.

Zusammenfassend lässt sich damit festhalten, dass Kaltlufteinzugsgebiete ausgewiesen werden, wann immer entweder das Kriterium der Fließgeschwindigkeit oder das der Kaltluftvolumenstromdichte zusätzlich zur Mindestgröße und dem Abstand von maximal 1 km zu Siedlungsflächen erfüllt ist.

#### 4.6.5 Kaltluftstau



Ein Kaltluftstau oder Kaltluftsee bildet sich vor Strömungshindernissen, z. B. an Straßen- und Bahndämmen, in natürlichen oder künstlichen Geländesenken, an Übergängen vom Freiland zum Wald oder auch vor Bebauungsriegeln. In Kaltluftstaugebieten stellen sich niedrigere Lufttemperaturen im Vergleich zur Umgebung ein und es besteht eine erhöhte Nebelneigung und

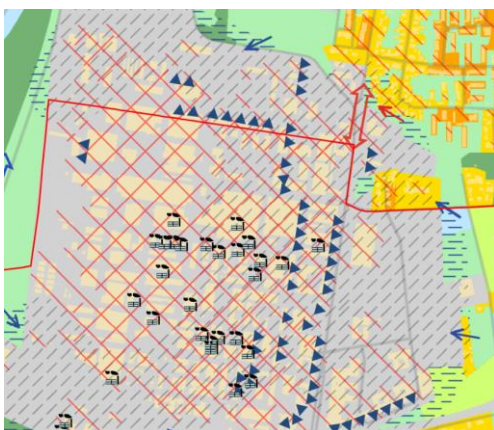
Nachtfrostgefahr (VDI 2015). Führen vielbefahrene Straßen durch Kaltluftstaugebiete, können sich dort Luftverunreinigungen aus dem Kfz-Verkehr ansammeln und zu hohen Schadstoffbelastungen führen.

Die Ableitung der Kaltluftstaugebiete erfolgte anhand von sechs Kriterien, welche im Folgenden aufgelistet sind und alle erfüllt sein müssen:

- bodennahe Kaltluftgeschwindigkeit in 2 m Höhe nach 2 Stunden Simulationszeit kleiner als 0,3 m/s
- Hangneigung kleiner als 5 °
- Kaltluftvolumenstromdichte nach 2 Stunden Simulationszeit kleiner als 10 m<sup>3</sup> / m\*s
- Kaltfluthöhe nach 8 Stunden Simulationszeit (am Ende der Nacht) größer als 50 m
- Freilandklima, Waldklima, Klima innerstädtischer Grünflächen oder Gewässerklima
- Mindestfläche 2 ha

In Darmstadt wurden die Kriterien für Kaltluftstau nur an folgenden drei Orten erfüllt: ganz im Südwesten des Stadtgebietes (südlich von Griesheim), südwestlich von Eberstadt und entlang des Baches Silz im Bereich der Waldflächen.

#### 4.6.6 Kaltfluthindernis bzw. Kaltluftbarriere



Quer zur Strömungsrichtung verlaufende Hindernisse für den Kaltluftabfluss (dargestellt durch eine gezackte Linie) können natürlicher (z. B. Waldrand, Geländekante) aber auch menschengemachter Art sein (z. B. Bahndamm, Riegelbebauung, quer stehende Gebäude) (VDI 2015). Vor diesen Hindernissen sammelt sich gerade in der Anfangsphase der Nacht Kaltluft, wenn diese noch nicht so stark ausgeprägt ist. Meist werden diese Kaltfluthindernisse mit

steigender Kaltluftschichtdicke nach einiger Zeit überströmt bzw. umströmt, stellen also nur temporäre Hindernisse für den Kaltluftabfluss dar. Wie schnell dies geschieht und wie groß die Hinderniswirkung ausfällt, ist abhängig von der lokalen Kaltluftdynamik und der Größe der Barriere. Hergeleitet wurden die Kaltfluthindernisse aus den Geschwindigkeitsabnahmen der bodennahen Kaltluftströme (2 m über Grund) in der ersten Nachthälfte (Zeitschritte bis zu 4 h nach Sonnenuntergang), wann immer diese im Zusammenhang mit hohen (größer 10 m) quer zur Strömungsrichtung stehenden Gebäuden, Waldflächen oder der Geländecharakteristik stehen.

In Darmstadt finden sich Kaltluftbarrieren sowohl in Form von ungünstig stehenden Gebäuden (besonders viele davon gibt es auf dem Gelände der Merck KGaA), als auch bei einigen Waldflächen im östlichen Stadtgebiet.

#### 4.6.7 Eindringtiefe der Kaltluft



Obwohl der Übergang von den Freiflächen des unbebauten Umlands zum Siedlungsbereich meist mit einer Verlangsamung der Kaltluftströmung sowie Kaltfluthindernissen und -staus verbunden ist, können die Kaltluftmassen vielerorts in die Bebauung eindringen und eine Abkühlung überwärmter Siedlungsbereiche bewirken. Die Eindringtiefe der Kaltluft hängt im Wesentlichen von der Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft und der

Konfiguration der Bebauung ab. Offene bzw. aufgelockerte Bebauungsstrukturen (Kleingärten, Einfamilienhaussiedlungen, etc.) ermöglichen ein weites Eindringen der Kaltluft in den Siedlungskörper, wohingegen abriegelnde, quer zur Strömungsrichtung stehende Bebauung oft ein Strömungshindernis darstellt, welches je nach Hindernishöhe und benachbarter Bebauung ggf. über- oder umströmt werden kann.

Die Ausweisung der Kaltlufteindringtiefe in der Karte basiert auf den, bis in den Siedlungsbereich vordringenden, bodennahen Kaltluftströmen (2 m über Grund) mit mindestens 0,5 m / s Strömungsgeschwindigkeit zwei Stunden nach Sonnenuntergang.

Außerdem muss die Kaltluftvolumenstromdichte zum gleichen Zeitpunkt mindestens  $10 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$  betragen.

Bedingt durch die verhältnismäßig geringe Kaltluftdynamik in Darmstadt profitieren abgesehen von Eberstadt und dem Gelände der Merck KGaA nur wenige, kleinräumige Bereiche in größerem Umfang von der vorhandenen Kaltluft.

## **4.7 Überwärmung – Wärmebelastungsindex und Verschattungsanalyse**

### **4.7.1 Wärmebelastungsindex - Eingangsdaten**

Für die Durchführung der Analyse kommen frei verfügbare amtliche Geobasisdaten sowie ebenfalls frei verfügbare fernerkundungsbasierte Satellitendaten der Raumfahrtunternehmen NASA (National Aeronautics and Space Administration) und ESA (European Space Agency) zum Einsatz. Von Seiten der NASA werden Landsat-8- bzw. Landsat-9-Daten (beide Satelliten rotieren zeitversetzt im selben Orbit) aus dem Spektrum des Thermalen Infrarots (TIR) zur Ableitung der Landoberflächentemperatur verwendet. In diesem Fall wurden Landsat 9 Daten vom 25.06.2023 mit einer ursprünglichen räumlichen Auflösung von  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  beschafft. Die ESA betreibt ihrerseits das Sentinel-2-Satellitenpaar, dessen Daten dafür geeignet sind, daraus den NDVI mit einer räumlichen Auflösung von  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  abzuleiten. Hierbei handelt es sich um einen Vegetationsindex, der es ermöglicht, Aussagen zum Vorhandensein und zur Vitalität von Vegetationsflächen am Aufnahmezeitpunkt (hier: 18.06.2023) zu treffen. Mehr Details zum NDVI gibt es in einem Exkurs im Kapitel 4.8

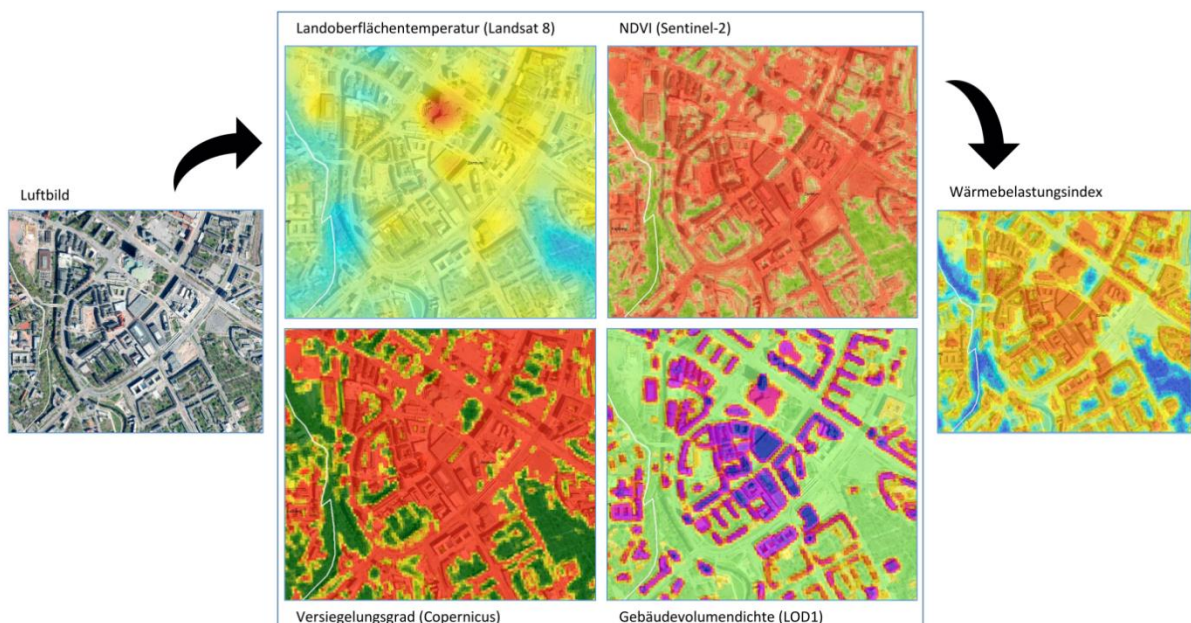
Einen weiteren aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten hier verwendeten Datensatz der ESA bildet der europaweit berechnete Versiegelungsgrad mit Stand 2018 (nächste geplante Aktualisierung ist Ende des Jahres 2024 zu erwarten), ebenfalls mit einer räumlichen Auflösung von  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ .

Als einziger nicht fernerkundungsbasierter Datensatz werden amtliche 3D-Gebäudedaten für das Untersuchungsgebiet, LoD1 oder LoD2, benötigt. Diese enthaltenen Informationen über die Gebäudegrundflächen sowie zugehörige Gebäudehöhen und ermöglichen die Ableitung der Gebäudevolumendichte, einem Maß für die Dichte und Höhe der vorliegenden Bebauung bei einer räumlichen Auflösung von  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ .

Bei den Landsat- und Sentinel-Daten, welche für Landoberflächentemperatur und NDVI herangezogen werden, handelt es sich um „Momentaufnahmen“ der Temperatur und Vegetationsvitalität zu einem spezifischen Aufnahmezeitpunkt. Bei der Auswahl geeigneter Daten sollten daher Aufnahmezeitpunkte mit hohen Temperaturen, hoher Sonneneinstrahlung und Trockenheit gewählt werden. Dies liegt zum einen darin begründet, dass für die Erzielung aussagekräftiger Ergebnisse wolkenfreie Satelliten-Szenen verwendet werden müssen. Räumliche Muster bei der Landoberflächentemperatur zeigen sich darüber hinaus am besten bei hohen

Tagestemperaturen und für die sommerliche Hitzebelastung aussagekräftige NDVI-Werte in Hinblick auf Trockenstress liegen nur im Sommer, vor allem in und nach Trockenperioden vor. Als saisonaler Zeitraum, aus dem die verwendeten Landsat- und Sentinel-Daten stammen sollten, wurde deshalb der 1. Juni bis 15. September festgesetzt. Bei der Auswahl geeigneter Aufnahmen für die Landoberflächentemperatur sollte zusätzlich die Lufttemperatur am jeweiligen Tag herangezogen werden. Hitzetage (mit  $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ ) oder zumindest annähernd hohe Temperaturen sind am besten. Am 26.06.2023 betrug die Tageshöchsttemperatur  $31,3 \text{ °C}$ .

#### 4.7.2 Wärmebelastungsindex – Methodik und Ergebnis



**Abbildung 24: Schematische Darstellung des Wärmebelastungsindex und dessen Eingangsdaten am Beispiel der Innenstadt von Chemnitz.**

Der Wärmebelastungsindex für das Stadtgebiet von Darmstadt wurde anhand eines GIS-basierten Indikatorenansatz (vgl. Abbildung 24) aus den im vorangegangenen Abschnitt genannten Eingangsdatensätzen berechnet. Für die vier Eingangsindikatoren sowie den resultierenden Wärmebelastungsindex wurden hochaufgelöste Karten im Maßstab von 1:21.000 erstellt, welche im digitalen Anhang zu finden sind.

Aus den oben genannten Rohdaten werden zunächst die benötigten vier Eingangsindikatoren Landoberflächentemperatur in Grad Celsius, NDVI (ohne Einheit) sowie die Gebäudevolumendichte in  $\text{m}^3/\text{m}^3$  berechnet. Der Versiegelungsgrad der Landoberfläche in Prozent liegt bereits in geeigneter Form vor. Anschließend erfolgt die Angleichung der Auflösung der Landoberflächentemperatur auf die der drei anderen Indikatoren. Hierfür wird eine Umrechnung von  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  auf  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  mittels

kubischem Resampling durchgeführt. Dies dient rein technisch dem Erhalt der 10 m x 10 m Auflösung des Endprodukts und ändert nichts an der inhaltlichen Aussagekraft der Daten.

Da die vier Eingangsindikatoren unterschiedliche Wertebereiche besitzen, ist auch hier eine Angleichung erforderlich. Dabei wurde eine dekadische Logarithmierung mit anschließender statistischer Normierung auf einen Wertebereich von +1 (geringste Betroffenheit) bis +2 (höchste Betroffenheit) gewählt. Dieser Wertebereich wurde den rein mathematisch gleichwertigen Grenzen von 0 bis +1 bewusst vorgezogen, um Fehlinterpretationen des Wertes 0 im Ergebnis zu vermeiden.

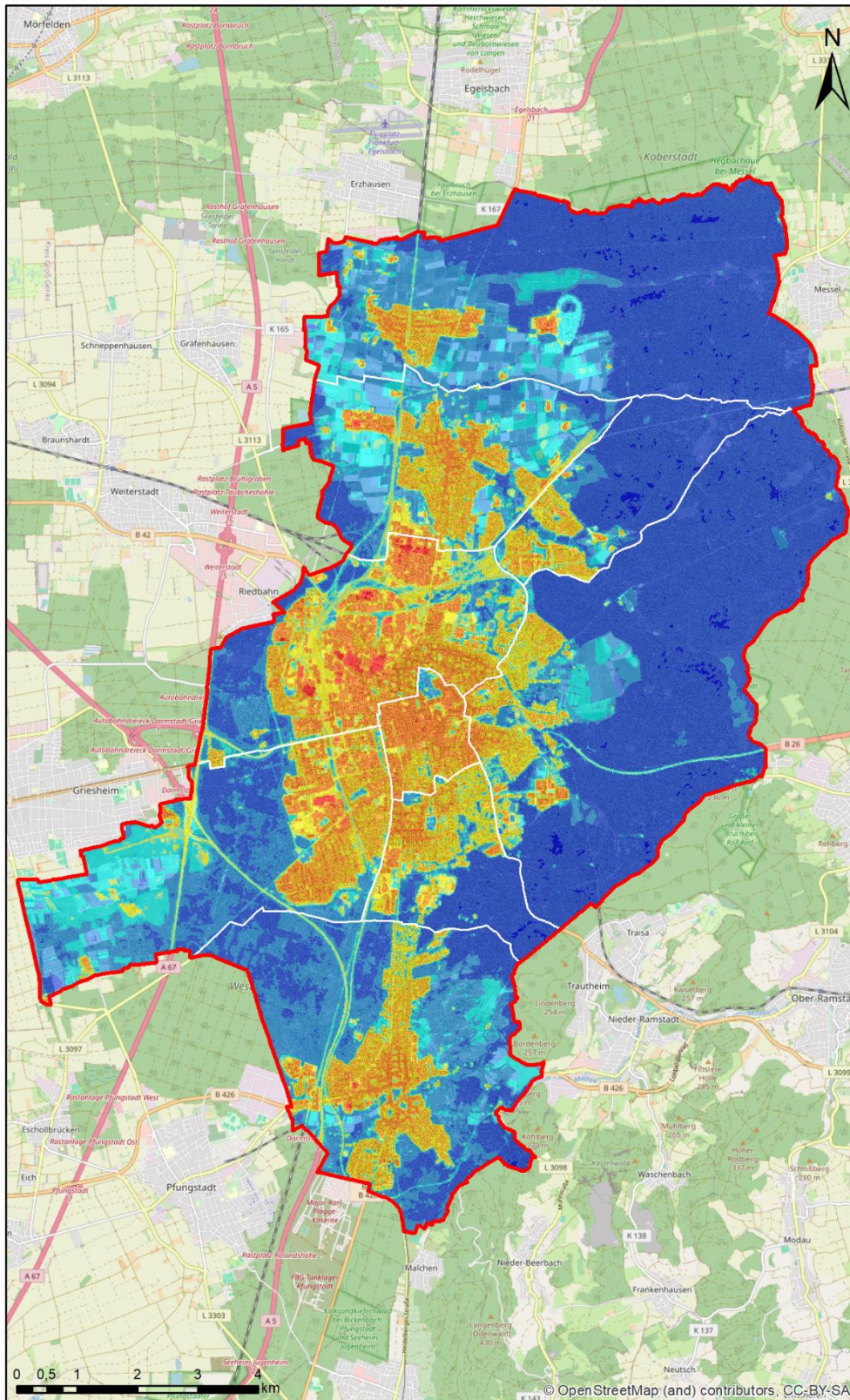
Zur Vergleichbarkeit der Eingangsdaten und in Vorbereitung auf das Logarithmieren wurden zuerst, wo nötig, Wertebereiche der Eingangsindikatoren invertiert und Null- sowie negative Werte auf inhaltlich sinnvolle Grenzwerte gesetzt.

Nachdem die vier Eingangsdatensätze in normierter Form vorliegen, werden diese jeweils mit 25 % Gewichtung multiplikativ miteinander verrechnet (geometrisches Mittel). Die multiplikative Variante hat gegenüber dem arithmetischen Mittel den Vorteil, dass besonders hohe und niedrige Wärmebelastungswerte nur dann auftreten können, wenn alle Eingangsdaten am jeweiligen Ort eine sehr hohe bzw. niedrige Betroffenheit anzeigen.

In der Klimaanalysekarte sind Bereiche mit „mäßiger Überwärmung“ sowie mit „hoher Überwärmung“ gekennzeichnet. Hierfür wurden als Grenzwerte beim Wärmebelastungsindex größer als 1,70 bzw. 1,85 angesetzt. Die höchsten Wärmebelastungswerte befinden sich in der Innenstadt von Darmstadt und in Gewerbegebieten. Um die Bedeutung vulnerabler Personengruppen deutlich zu machen, wurde im Rahmen einer zusätzlichen Analyse (Kapitel 5) genauer das Umfeld der jeweiligen Einrichtungen untersucht, um abzubilden welche Einrichtungen derzeit besonders stark von erhöhter Wärmebelastung betroffen sind.

Für das Verständnis und die Interpretation ist stets zu beachten, dass es sich beim Wärmebelastungsindex (Abbildung 25) um ein relatives Betroffenheitsmaß innerhalb eines definierten Untersuchungsgebietes handelt – hier das Stadtgebiet von Darmstadt. Die räumliche Verteilung der einzelnen Wertebereichsklassen variiert entsprechend je nach deren Charakteristik (Grünflächenverteilung, Vorhandensein von Gewässern, Vorhandensein von stark versiegelten Gewerbegebieten, Struktur der Wohnbebauung, Anordnung der Gebäude, etc.). Weiterhin kann der Wärmebelastungsindex als Beitrag der entsprechenden Flächen zum städtischen Wärmeinseleffekt verstanden werden. Je höher die Werte, desto stärker ist die Aufheizung tagsüber und desto stärker ist wiederum die nächtliche Wärmeabgabe.

## Wärmebelastungsindex im Stadtgebiet von Darmstadt - basierend auf Daten aus dem Jahr 2023 -



### Legende

Stadtgebiet Darmstadt  
(Stadtteile weiß umrandet)

### Wärmebelastungsindex

- 1,0 - 1,1
- > 1,1 - 1,2
- > 1,2 - 1,3
- > 1,3 - 1,4
- > 1,4 - 1,5
- > 1,5 - 1,6
- > 1,6 - 1,7
- > 1,7 - 1,8
- > 1,8 - 1,9
- > 1,9 - 2,0

Erläuterung: Die Karte zeigt den Wärmebelastungsindex innerhalb des Stadtgebiets von Darmstadt. Er verfügt über einen Wertebereich von -1 bis +2. Je höher der Wert ausfällt, desto höher ist auch die potenzielle Wärmebelastung (insbesondere an heißen Tagen). Die räumliche Auflösung beträgt 10 m x 10 m Zellgröße.

Grundlage für die Berechnung sind folgende Eingangsdaten, welche jeweils mit 25 % multiplikativ gewichtet wurden:

- 1.) Versiegelungsgrad in %
- 2.) Gebäudevolumendichte in m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>
- 3.) Landoberflächentemperatur vom 25.06.2023 um 10 Uhr morgens
- 4.) Umfang und Vitalität der Vegetationsbedeckung (NDVI) vom 18.05.2023

Auftraggeber: Stadt Darmstadt

Kartenmaßstab: 1:21.000

Datenquellen: Stadt Darmstadt, Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation 2023, NASA, Copernicus

Kartenersteller: THINK

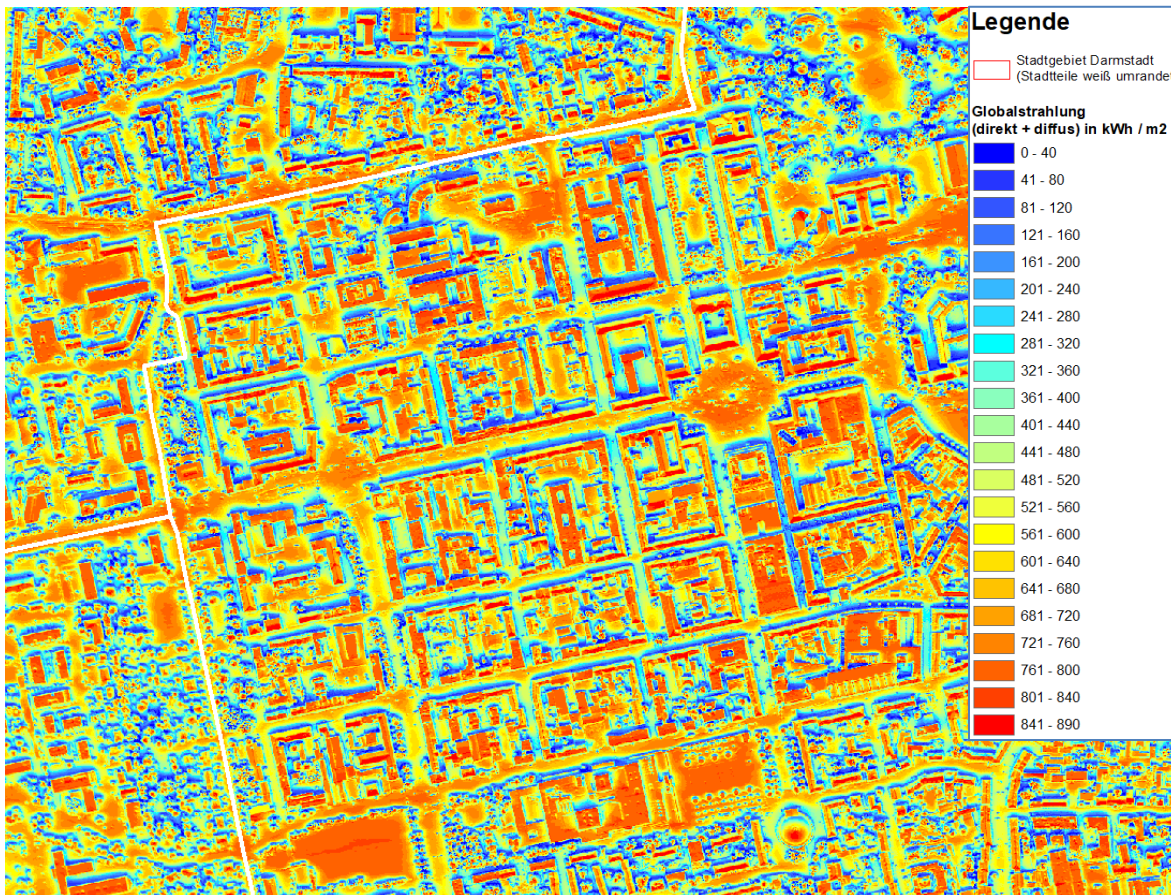
Stand: 13.11.2023

**Abbildung 25: Wärmebelastungsindex im Stadtgebiet von Darmstadt. Hinweis: Eine zusätzliche Karte mit den Standorten von sozialen Einrichtungen steht der Stadt Darmstadt zur Verfügung.**

Der Wärmebelastungsindex kann für die Stadt Darmstadt eine wichtige Datengrundlage sein, um einen belastbaren Überblick über die aktuelle Situation im

Hinblick auf städtische Überwärmung und lokale Hitzeinseln zu erhalten und auf Basis dessen Maßnahmen zur Klimaanpassung zu ergreifen bzw. diese bei künftigen Bauvorhaben von Vorherein in den Bebauungsplänen festzusetzen.

#### 4.7.3 Verschattungsanalyse



**Abbildung 26: Ausschnitt der Karte zur Verschattungsanalyse im Umfeld der Innenstadt von Darmstadt im Originalmaßstab. Rote Farben stehen für sehr viel Sonneneinstrahlung und blaue Farben für eine geringe Sonneneinstrahlung im Sommerhalbjahr von April bis September. Hinweis: Eine zusätzliche Karte mit den Standorten von sozialen Einrichtungen steht der Stadt Darmstadt zur Verfügung.**

Unter Verwendung des Digitalen Oberflächenmodells (DOM1) mit einer räumlichen Auflösung von 1 m x 1 m ist es mit Hilfe der Software ArcGIS möglich, ergänzend zum Wärmebelastungsindex eine sehr detaillierte Verschattungsanalyse durchzuführen (Kartenausschnitt in Abbildung 26). Hierfür wird für das Sommerhalbjahr von April bis September berechnet, wie viel Sonneneinstrahlung für jede Rasterzelle zu erwarten ist. Blaue Farben stehen dabei für tagesüber praktisch permanent verschattete Bereiche, während rote Farben auf eine weitgehend dauerhafte Sonneneinstrahlung hinweisen.

Die sehr hohe räumliche Auflösung ermöglicht nun – im Gegensatz zu den Satellitendaten – auch Aussagen hinsichtlich der Wirkung von einzelnen Bäumen. Weiterhin werden sehr anschaulich auch Unterschiede zwischen Nord- und Südfassaden sichtbar.

So zeigt die Analyse, dass vor allem Südfassaden und Dachflächen erheblicher Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind und sich entsprechend aufheizen können. Aber auch belebte öffentliche Bereiche, wie z. B. der Luisenplatz oder das Umfeld des Schlossmuseums Darmstadt erhalten überdurchschnittlich viel Sonneneinstrahlung. Dort, wo sich viele Bäume befinden (z. B. in Parks), ist die Sonneneinstrahlung wesentlich geringer und damit die Aufenthaltsqualität an heißen Tagen entsprechend höher. Selbst der schattenspendende Effekt einzelner Bäume ist sichtbar.

Die Verschattungsanalyse soll der Stadt Darmstadt dabei helfen, zielgerichtete Maßnahmen zur Verschattung in besonders überwärmten Bereichen, vor allem dort wo sich viele (vulnerable) Personen aufhalten, zu ergreifen. Die Karte kann beispielsweise genutzt werden, um verschattete Schulwege zu planen, oder Bereiche zu identifizieren, an denen besonders dringend Maßnahmen zur Verschattung ergriffen werden sollten. Wir empfehlen, diese Karte bei der Maßnahmenplanung gemeinsam mit dem Wärmebelastungsindex zu verwenden.

#### 4.8 Exkurs: Analyse der Vegetationsvitalität im Herrngarten für zwei verschiedene Jahre anhand des NDVI

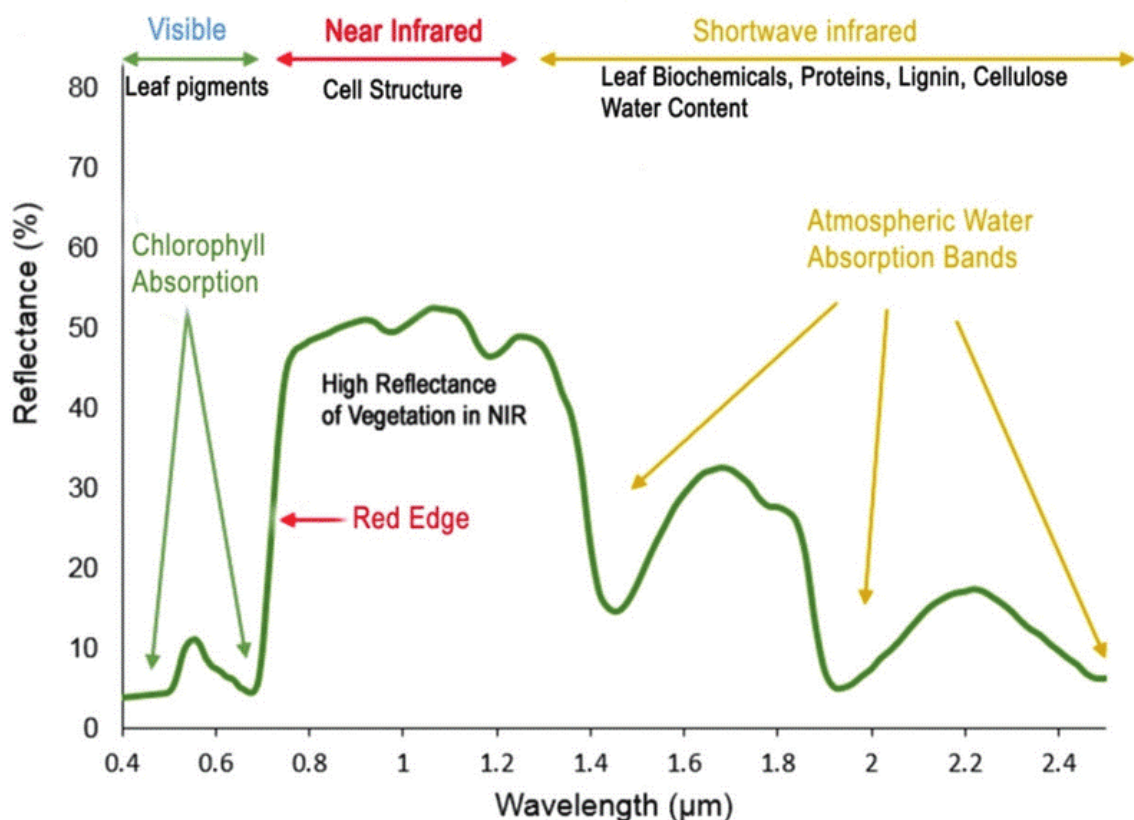
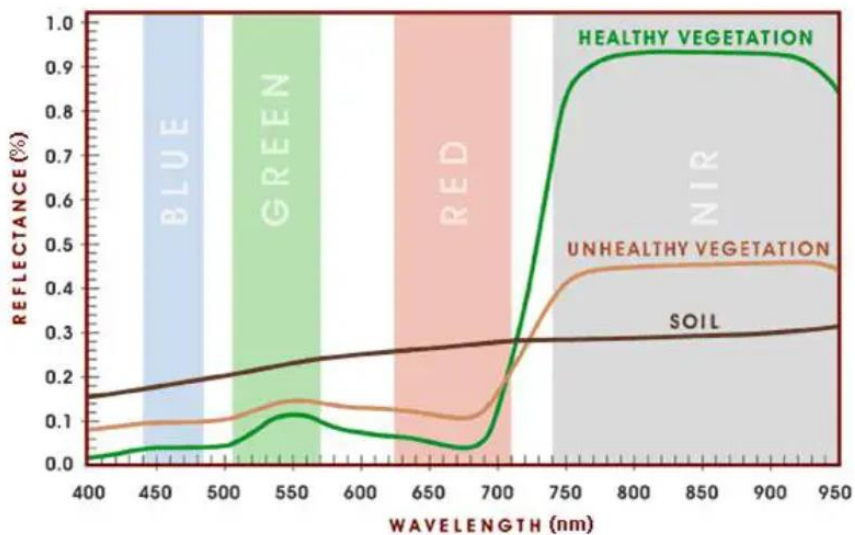


Abbildung 27: Spektrale Reflexionskurve von gesunder Vegetation. Quelle: Roman & Tudor (2016).

Im Kapitel 4.7.1 wurde der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, deutsch: Normalisierter Differenzierter Vegetationsindex) bereits kurz eingeführt. In diesem

Zusatzkapitel soll nun etwas genauer auf physikalische Hintergründe und die konkrete Anwendung am Beispiel des Herrngartens eingegangen werden.

Grundlage des NDVI ist das spektrale Reflexions- bzw. Absorptionsverhalten der Vegetation von Sonnenlicht. Abbildung 27 zeigt die spektrale Reflexionskurve von



**Abbildung 28: Vergleich der Spektralen Vegetationskurven von gesunder Vegetation (grün), kranker Vegetation (orange) und vegetationslosen Oberflächen (braun). Quelle: GIS Resources (2023).**

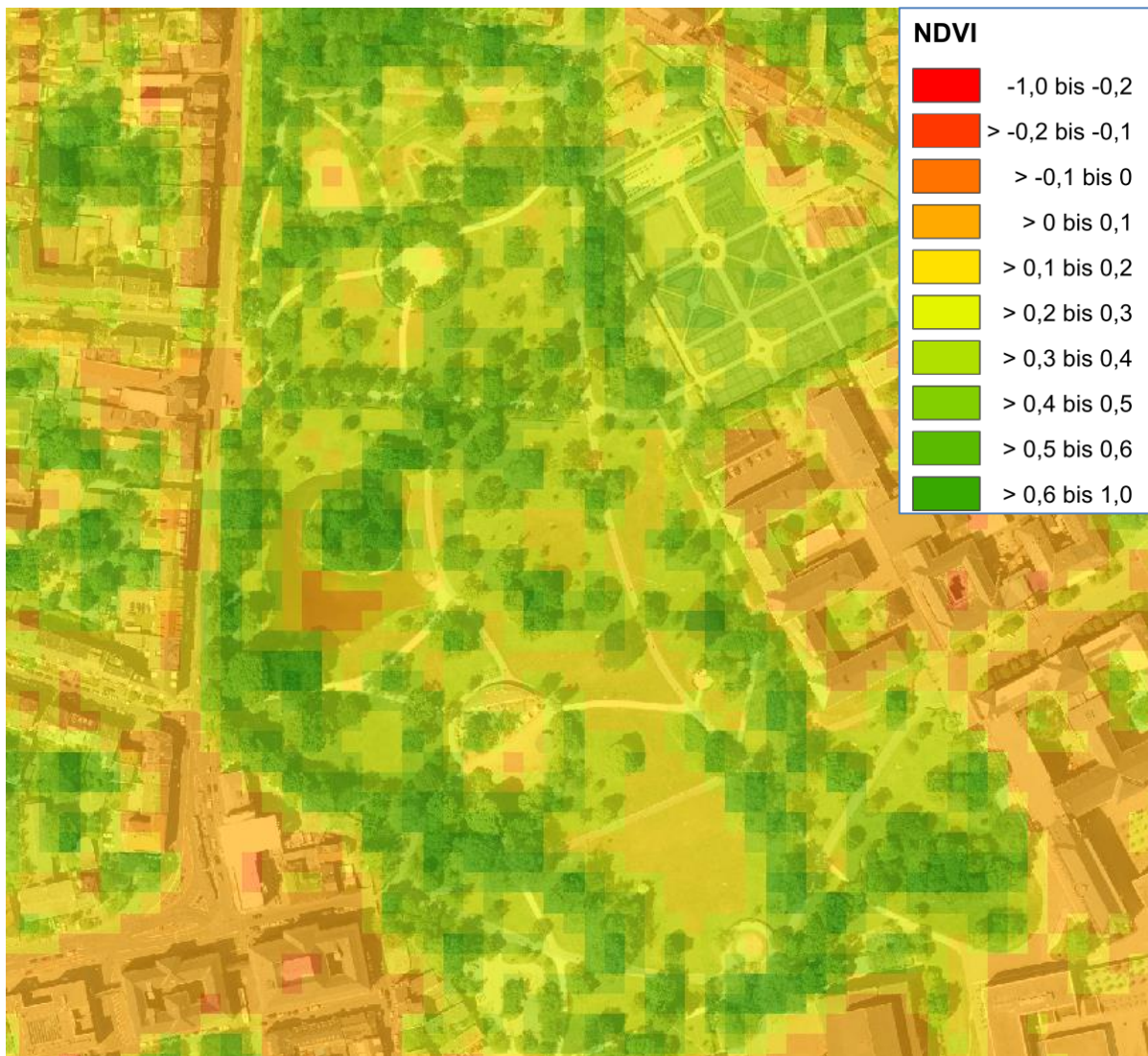
gesunder Vegetation im sichtbaren Licht sowie im Nahen und Mittleren Infrarot. Entscheidend ist hierbei die starke Absorption von rotem Licht (ca. 0,62 – 0,75  $\mu\text{m}$  Wellenlänge) und die gleichzeitig stark ausgeprägte Reflektion im Nahen Infrarot (ca. 0,75 – 1,40  $\mu\text{m}$  Wellenlänge). Ebenfalls charakteristisch für gesunde Vegetation ist die erhöhte Reflexion im grünen Spektralbereich des sichtbaren Lichtes, welche durch den Chlorophyllgehalt der Pflanzen zu Stande kommt (GIS Resources 2023).

Zusätzlich zu gesunder Vegetation zeigt Abbildung 28 noch die spektralen Reflexionskurven von kranker bzw. geschädigter Vegetation (orange Linie) und vegetationslosen Flächen (braune Linie). Entscheidend ist nun für Identifikation von kranker Vegetation, dass diese im roten Spektralbereich eine höhere und im nahen Infrarot eine niedrigere Reflexion aufweist als gesunde Vegetation (GIS Resources 2023). Unbewachsener Boden bzw. Oberflächen ohne oder mit sehr geringem Bewuchs zeigen dieses Verhältnis in noch extremerer Weise auf.

Dieses Verhalten macht sich der NDVI zu Nutze. Er ermöglicht auf Basis der beschriebenen physikalischen Gegebenheiten die Identifikation von Vegetationsflächen bei gleichzeitiger Einschätzung ihrer Vitalität und wird in zahlreichen Studien für verschiedene Fragestellungen verwendet. Beide im Rahmen des vorliegenden Berichtes verwendeten Satellitenpaare (Landsat-8/9 und Sentinel-2a/b) verfügen über entsprechende Sensoren, um den NDVI flächendeckend

ermitteln zu können. Aufgrund der etwas höheren räumlichen Auflösung, kamen für die Berechnung Sentinel-2-Aufnahmen zum Einsatz.

Der NDVI verfügt über einen Wertebereich von -1 bis +1. Er lässt sich ungefähr folgendermaßen interpretieren. Werte kleiner 0,2 weisen auf keine und/oder abgestorbene bzw. kranke Vegetation hin. Von 0,2 bis etwa 0,35 folgt ein Übergangsbereich. Noch höhere Werte weisen auf das eindeutige Vorhandensein von Vegetation hin. Dabei gilt, je höher der NDVI ist (also je näher er an +1 liegt), desto dichter und vitaler ist die Vegetation an einem Ort. Eine (weitestgehend) gesunde Vegetation kann ab etwa 0,5 bis 0,6 angenommen werden.



**Abbildung 29: Ausschnitt der NDVI Karte für den Bereich des Herrngartens. Die dahinterstehende Satellitenaufnahme stammt vom 11.08.2022.**

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden zwei Sentinel-2-Szenen aufbereitet. Die verwendeten Aufnahmen stammen jeweils vom 11.08.2022 bzw. vom 18.06.2023. Dabei repräsentiert die Szene aus dem Jahr 2022 einen trockenen und heißen Sommer, während die Szene aus dem Jahr 2023 einen mäßig warmen und verhältnismäßig feuchten Sommer abbildet. Ziel ist es nun zu analysieren wie die aus Wiesen und dichteren Baumbeständen bestehende Vegetation im Herrngarten auf die

unterschiedlichen Außenbedingungen reagiert. Beide Karten, welche das gesamte Stadtgebiet abdecken, liegen der Stadt Darmstadt vor. Dort lassen sich beispielsweise auch Unterschiede zwischen den Waldflächen im Osten (höhere Vitalität) und im Westen (schlechtere Vitalität) des Stadtgebietes erkennen.

Beim Betrachten der Situation am 11.08.2022 (Abbildung 29) fällt auf, dass vor allem die Wiesenflächen im südlichen Park NDVI-Werte von 0,1 bis 0,2 aufweisen. Gemäß der oben vorgestellten Einordnung der Werte kann damit von starker Austrocknung ausgegangen werden. Auf den nördlichen Wiesenflächen und im östlich angrenzenden Prinz-Georg-Garten werden geringfügig höhere Werte erreicht. Auch dort ist jedoch bereits von (leicht) geschädigter Vegetation auszugehen. Im Bereich der Bäume liegen die Maximalwerte bei 0,55 und schwanken ansonsten zwischen 0,4 und 0,5. Entsprechend sind die Bäume zum Aufnahmezeitpunkt noch weitgehend vital. Geringfügige Trockenschäden sind jedoch nicht auszuschließen.

Ein anderes Bild zeigt sich bei im Vorfeld nasserem Ausgangsbedingungen am 18.06.2023 (Abbildung 30). Hier verfügen alle Wiesenflächen über einen NDVI von 0,4 bis 0,5 und können damit als (weitestgehend) vital bezeichnet werden. Im Bereich des Baumbestandes liegen die Werte mit einem ungefähren Bereich von 0,5 bis 0,6 etwas höher als bei den trockenen Rahmenbedingungen im Vorjahr.

Die Untersuchung des Herrnparks zeigt somit, dass die Bäume bei Betrachtung der Jahre 2022 und 2023 einigermaßen gut mit trockeneren Bedingungen umgehen können. Ihr NDVI schwankt zwischen den Jahren um etwa 0,1. Die Wiesenflächen weisen auf der anderen Seite eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Trockenheit aus. Während sie im Juni 2023 durchgehend vital waren, kam im August 2022 ein starker

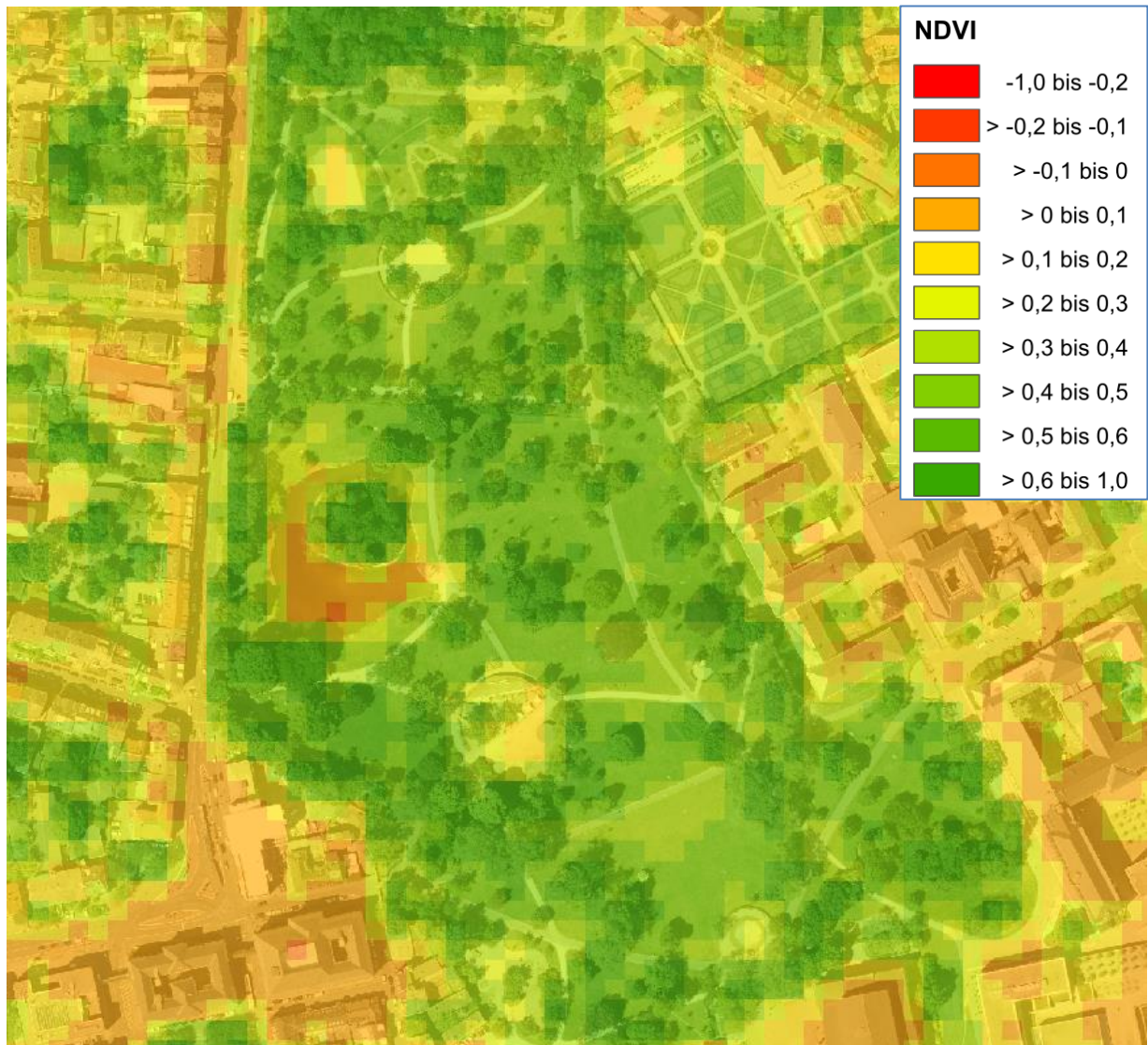


Abbildung 30: Ausschnitt der NDVI Karte für den Bereich des Herrngartens. Die dahinterstehende Satellitenaufnahme stammt vom 18.06.2023.

Trockenstress zum Vorschein.

#### 4.9 Verkehrsbelastung

Als Maß für die Verkehrsbelastung empfiehlt sich die sogenannte DTV (Digitale Tägliche Verkehrsstärke). Sie gibt an wie viele Fahrzeuge an einem typischen Tag auf bestimmten Straßen unterwegs sind.

Gemäß der VDI (2015:14) kann die DTV als „indirektes Maß für die Emissionen durch den Kfz-Verkehr herangezogen werden.“ Für die Darstellung in der Klimaanalysekarte

empfehlte die VDI (2015:26) eine Zuweisung der einzelnen Straßen in drei Stufen. Die erste bildet Straßen mit „mäßiger“ Verkehrsbelastung, welche einen DTV-Wert zwischen 10.000 und 30.000 besitzen. Es folgt die Kategorie der „hohen“ Verkehrsbelastung, in die alle Straßen mit einem DTV-Wert zwischen 30.000 und 50.000 fallen. Sofern der DTV-Wert mehr als 50.000 beträgt, erfolgt die Ausweisung als Straße mit „sehr hoher“ Verkehrsbelastung. Je höher die Kategorie einer Straße bzw. eines Straßenabschnitts ausfällt, desto stärker ist auch die Belastung mit Luftschadstoffen in angrenzenden Bereichen. Dies ist besonders problematisch, wenn entsprechende Straßen von Wohnbebauung umgeben sind oder sich dort viele Fußgänger bewegen. Von stark belasteten Straßen aus können außerdem je nach Windrichtung Luftschadstoffe in Wohngebiete transportiert werden.

Die Stadt Darmstadt hat einen bis auf wenige Ausnahmen vollständigen DTV-Datensatz bereitgestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die höchste Klasse mit sehr hoher Verkehrsbelastung „nur“ im nördlichen Teil der A5 vorkommt (Werte bis zu 60.000). Ihr südlicher Teil und die A67 weisen fallen mit Werten von 35.000 bis 40.000 in die Klasse der hohen Verkehrsbelastung. Eine mäßig hohe Verkehrsbelastung tritt beispielsweise auf vielen (auch innenstadtnahen) Abschnitten der Bundesstraßen 3 und 26 auf.

#### **4.10 Anlagen nach Bundes-Immissionsschutzverordnung**

Die VDI (2015:29) sieht vor, Gewerbegebiete oder einzelne Fabriken bzw. Kraftwerke mit erhöhten Emissionen auszuweisen. Hierfür wurde durch die Stadt Darmstadt ein insgesamt 74 Anlagen umfassender Datensatz bereitgestellt. Diese wurden mit einem Industriesymbol in der Klimafunktionskarte visualisiert. Allein 41 dieser Anlagen befinden sich auf dem Gelände der Merck KGaA.

## 4.11 Darstellung und Auswertung der Klimaanalysekarte nach VDI 3787, Blatt 1

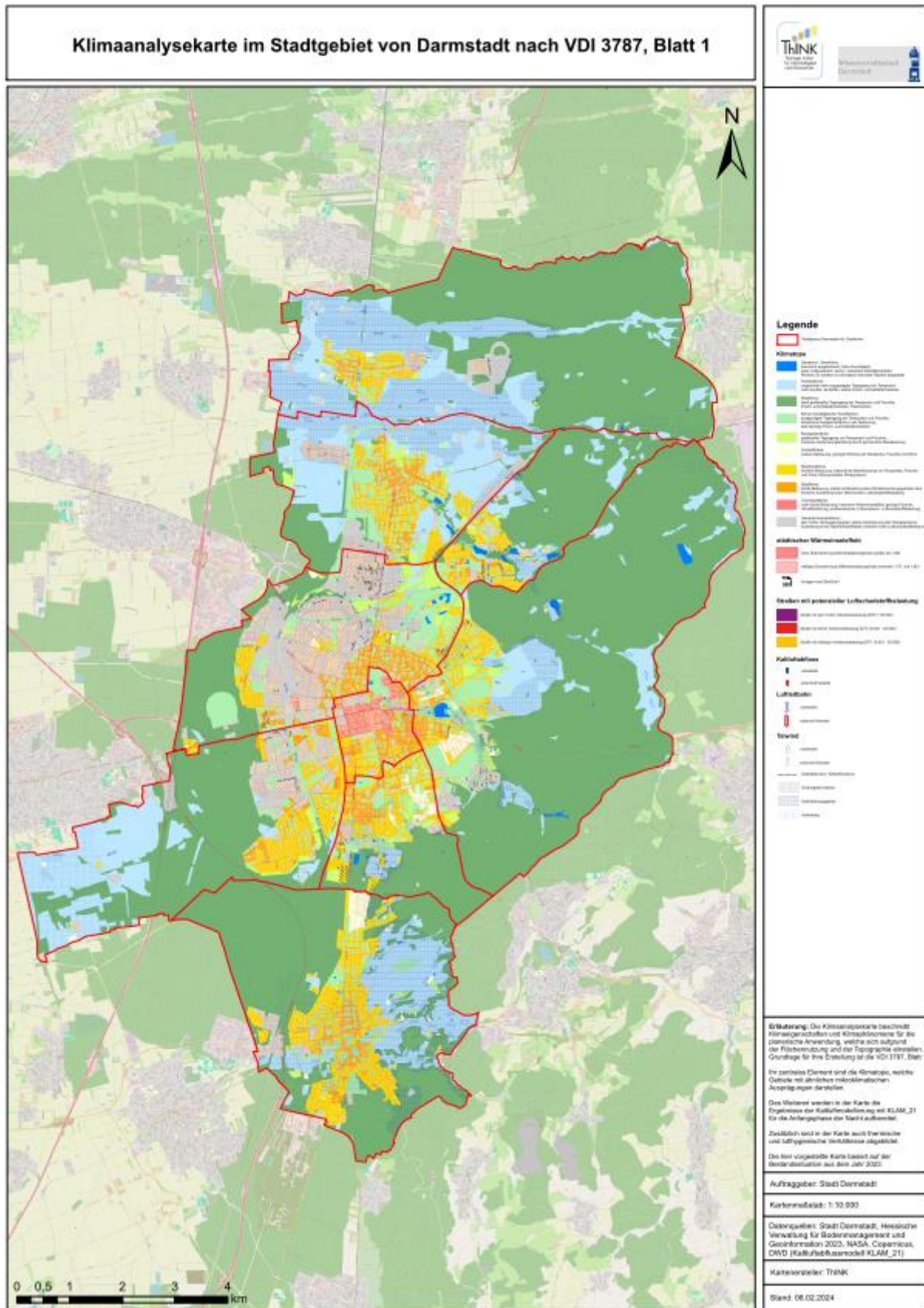


Abbildung 31: Klimaanalysekarte nach VDI 3787, Blatt 1 im Stadtgebiet von Darmstadt (Originalmaßstab 1:10.000). Hinweis: Aufgrund der zahlreichen, kleinräumigen Details kann die Karte an dieser Stelle im Bericht nur in reduzierter Qualität dargestellt werden. Die originale PDF-Karte mit voller Auflösung liegt der Stadt Darmstadt vor.

1

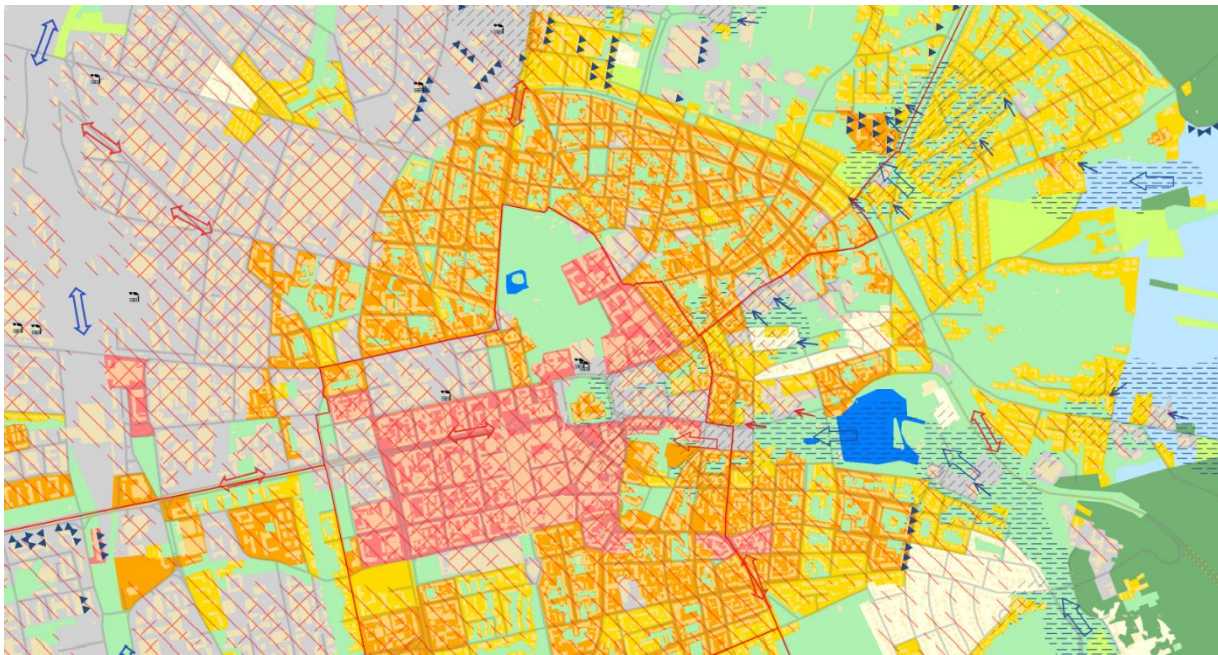


Abbildung 33: Ausschnitt der Klimaanalysekarte im Originalmaßstab von 1:10.000.

### Legende

Stadtgrenze Darmstadt inkl. Stadtteilen

#### Klimatope

- Gewässer-, Seenklima: thermisch ausgleichend, hohe Feuchtigkeit, guter Luftaustausch, keine / schwache Kaltluftproduktion  
Hinweis: Es werden nur klimatisch relevante Flächen dargestellt
- Freilandklima: ungestörter stark ausgeprägter Tagesgang von Temperatur und Feuchte, windoffen, starke Frisch- und Kaltluftproduktion
- Waldklima: stark gedämpfter Tagesgang der Temperatur und Feuchte, Frisch- und Kaltluftproduktion, Filterfunktion
- Klima innerstädtischer Grünflächen: ausgeprägter Tagesgang der Temperatur und Feuchte, klimatische Ausgleichsfläche in der Bebauung, kleinräumige Frisch- und Kaltluftproduktion
- Kleingartenklima: gedämpfter Tagesgang von Temperatur und Feuchte, intensive Verdunstungskühlung durch permanente Bewässerung
- Vorstadtklima: lockere Bebauung, geringer Einfluss auf Temperatur, Feuchte und Wind
- Stadtrandklima: dichtere Bebauung; wesentliche Beeinflussung von Temperatur, Feuchte und Wind; Störung lokaler Windsysteme
- Stadtklima: dichte Bebauung, starke Veränderung aller Klimaelemente gegenüber dem Freiland, Ausbildung einer Wärmeinsel, Luftschadstoffbelastung
- Innenstadtklima: sehr dichte Bebauung, intensiver Wärmeinseleffekt, geringe Feuchte, Windfeldstörung, problematischer Luftaustausch, Luftschadstoffbelastung
- Gewerbe/Industrieklima: sehr hoher Versiegelungsgrad, starke Veränderung aller Klimaelemente, Ausbildung eines Wärmeinseleffektes, teilweise hohe Luftschadstoffbelastung

Abbildung 32: Legend der Klimaanalysekarte. Teil 1 links und Teil 2 rechts.

### städtischer Wärmeinseleffekt

- hohe Überwärmung (Wärmebelastungsindex größer als 1,85)
- mäßige Überwärmung (Wärmebelastungsindex zwischen 1,70 und 1,85)
- Anlagen nach BImSchV

### Straßen mit potenzieller Luftschadstoffbelastung

- Straße mit sehr hoher Verkehrsbelastung (DTV > 50.000)
- Straße mit hoher Verkehrsbelastung (DTV 30.001 - 50.000)
- Straße mit mäßiger Verkehrsbelastung (DTV 10.001 - 30.000)

### Kaltluftabfluss

- unbelastet
- potenziell belastet

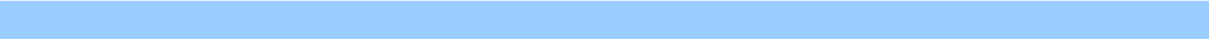
### Luftleitbahn

- unbelastet
- potenziell belastet

### Talwind

- unbelastet
- potenziell belastet

- Kaltluftbarriere / Kaltluhindernis
- Eindringtiefe Kaltluft
- Kaltlufteinzugsgebiet



Die Klimaanalysekarte (Abbildung 31, vergrößerter Ausschnitt in Abbildung 33 und Legende in Abbildung 32) fasst nun zahlreiche der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Daten und Ergebnisse in einer integrativen Karte zusammen. Dieser Umstand führt dazu, dass die Klimaanalysekarte im Gegensatz zur Planungshinweiskarte eine recht hohe Komplexität aufweist und ein gewisses Abstraktionsvermögen bei der Interpretation erfordert.

Eine beispielhafte Verwendung der Klimaanalysekarte (gemeinsam mit der Planungshinweiskarte) ist deren Anwendung bei der klimatischen Bewertung des Ist-Zustandes von Flächen für zukünftige Bauvorhaben. Im Folgenden wird zunächst auf allgemeiner Ebene beschrieben, wie dies erfolgen kann.

Am wichtigsten ist die Prüfung, welche der in der Klimaanalysekarte dargestellten klimabedeutsamen Merkmale im Zielgebiet vorliegen. In der Regel gilt: je mehr klimausgleichende oder klimabedeutsame Funktionen betroffen sind, desto bedeutender sind die negativen lokalklimatischen Auswirkungen eines geplanten Bauvorhabens. Verläuft z. B. auf einem Feld, das gleichzeitig auch Kaltluftentstehungsgebiet ist, eine Luftleitbahn oder ein Talwind, so sind die Auswirkungen (in Abhängigkeit der gewählten Bebauung und ggf. sogar auf benachbarte Stadtteile) größer, als wenn keines der beiden Merkmale vorhanden wäre. Zudem sind weitere zusätzliche Bauvorhaben in ohnehin schon mäßig bis stark überwärmten Bereichen kritischer als an Orten, wo (noch) keine erhöhte Wärmebelastung vorliegt. Weiterhin sind je nach konkretem Standort u. a. folgende Aspekte zu beachten (sofern konkrete quantitative und zeitliche Aussagen diesbezüglich benötigt werden, kann eine räumlich hochaufgelöste Differenzmodellierung des Plan-Zustandes minus den Ist-Zustand z. B. mit KLAM\_21 durchgeführt werden):

- ggf. neu entstehende Barrierewirkung durch große oder quer zu Luftleitbahnen oder Talwinden stehenden Gebäude
- Verringerung der Menge an eindringender Kaltluft in vorhandene Siedlungsbereiche
- Abschwächung, Ablenkung oder sogar vollständiges Erliegen von Luftleitbahnen und Kaltluftströmen
- Ausbildung oder Verstärkung von Wärmeinseln, wo bislang keine oder nur schwache vorhanden sind

Die tatsächlichen klimaökologischen Auswirkungen von geplanten Bauvorhaben sind hochgradig von individuellen Parametern wie der geplanten Baudichte, Gebäudestellung, dem Wasserrückhaltevermögen, der Oberflächenalbedo, der Grünausstattung und den aktuellen lokalklimatischen Gegebenheiten abhängig. Zusammen mit der Planungshinweiskarte, kann die Klimaanalysekarte ein wichtiges

Hilfsmittel bei der Bewertung geplanter Bauvorhaben und weiterer Maßnahmen der Stadtentwicklung sein.

Bei detaillierten Fragestellungen beispielsweise zum Thema Kaltluft und Überwärmung kann die Klimaanalysekarte nur ein erster Anhaltspunkt sein. Wir empfehlen daher in diesem Fall dringend die Betrachtung der jeweiligen Themenkarten (z. B. Wärmebelastungsindex, Verschattung, Kaltluftkarten- und Animationen, etc.)

## 4.12 Exkurs: Entwicklung einer alternativen Klimaanalysekarte

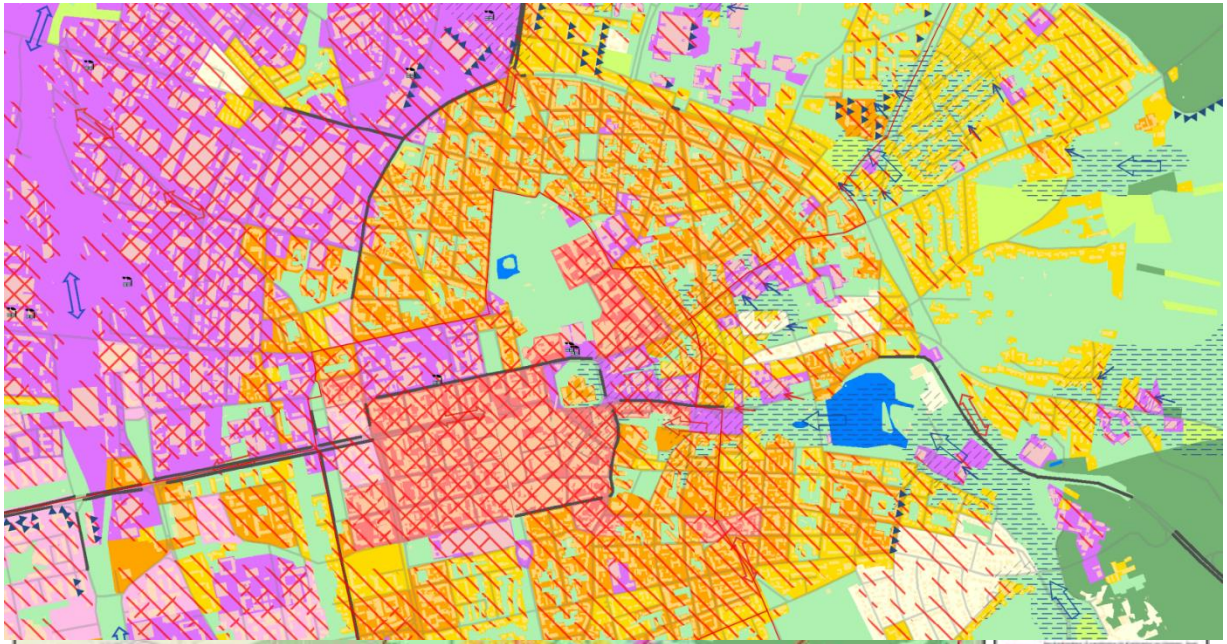


Abbildung 36: Ausschnitt der alternativen Klimaanalysekarte im Originalmaßstab von 1:10.000.

### Legende

 Stadtgrenze Darmstadt inkl. Stadtteilen

#### Klimatope



-  Gewässer-, Seenklima:  
thermisch ausgleichend, hohe Feuchtigkeit,  
guter Luftaustausch, keine / schwache Kaltluftproduktion  
Hinweis: Es werden nur klimatisch relevante Flächen dargestellt
-  Waldklima:  
stark gedämpfter Tagesgang der Temperatur und Feuchte,  
Frisch- und Kaltluftproduktion, Filterfunktion
-  Grünflächen- und Freilandklima:  
ausgeprägter Tagesgang der Temperatur und Feuchte,  
klimatische Ausgleichsfläche in der Bebauung und außerhalb,  
je nach Größe ausgeprägte Frisch- und Kaltluftproduktion
-  Kleingartenklima:  
gedämpfter Tagesgang von Temperatur und Feuchte,  
intensive Verdunstungskühlung durch permanente Bewässerung
-  Vorstadtklima:  
lockere Bebauung, geringer Einfluss auf Temperatur, Feuchte und Wind
-  Stadtrandklima:  
dichtere Bebauung: wesentliche Beeinflussung von Temperatur, Feuchte  
und Wind; Störung lokaler Windsysteme
-  Stadtklima:  
dichte Bebauung, starke Veränderung aller Klimaelemente gegenüber dem  
Freiland, Ausbildung einer Wärmeinsel, Luftschadstoffbelastung
-  Innenstadtklima:  
sehr dichte Bebauung, intensiver Wärmeinseleffekt, geringe Feuchte,  
Windfeldstörung, problematischer Luftaustausch, Luftschadstoffbelastung
-  Mischgebietsklima (Zusatzklimatop als Kombination von Gewerbe-, Stadt-,  
und Innenstadtklima):  
hoher bis sehr hoher Versiegelungsgrad, starker Wärmeinseleffekt,  
Beeinträchtigung des Windfeldes, eilweise hohe Luftschadstoffbelastung
-  Gewerbe-/Industrieklima:  
sehr hoher Versiegelungsgrad, starke Veränderung aller Klimaelemente,  
Ausbildung eines Wärmeinseleffektes, teilweise hohe Luftschadstoffbelastung

Abbildung 35: Legende der alternativen Klimaanalysekarte. Teil 1 links und Teil 2 rechts.



Abbildung 34: Alternative Version der Klimaanalysekarte. Hinweis: Aufgrund der zahlreichen, kleinräumigen Details kann die Karte an dieser Stelle im Bericht nur in reduzierter Qualität dargestellt werden. Die originale PDF-Karte mit voller Auflösung liegt der Stadt Darmstadt vor.

#### städtischer Wärmeinseleffekt



-  hohe Überwärmung (Wärmebelastungsindex größer als 1,85)
-  mäßige Überwärmung (Wärmebelastungsindex zwischen 1,70 und 1,85)

 Anlagen nach BImSchV



#### Straßen mit potenzieller Luftschadstoffbelastung

-  Straße mit mindestens mäßig hoher Verkehrsbelastung (DTV > 10.000)



#### Kaltluftabfluss

-  unbelastet
-  potenziell belastet

#### Luftleitbahn

-  unbelastet
-  potenziell belastet

#### Talwind

-  unbelastet
-  potenziell belastet

 Kaltluftbarriere / Kaltfluthindernis

 Eindringtiefe Kaltluft

 Kaltlufteinzugsgebiet

 Kaltluftstau

In enger Abstimmung mit der Stadt Darmstadt wurde zusätzlich zur VDI-konformen Variante eine alternative Version der Klimaanalysekarte entwickelt (Abbildung 34, vergrößerter Ausschnitt in Abbildung 36 und Legende in Abbildung 35). Hauptziel des Vorhabens ist die bessere Lesbarkeit der Karte und eine leichtere Interpretation der dargestellten Inhalte. Entsprechend wurden folgende Modifikationen vorgenommen:

- Einführung eines zusätzlichen Klimatopes mit dem Namen Mischklima (Farbe: rosa). Dieses Klimatop wurde eingeführt, um Stadtbereiche in Darmstadt die sich aufgrund ihrer Heterogenität hinsichtlich Gewerblicher- und Wohnnutzung nicht eindeutig in die bestehenden Klimatopklassen einordnen lassen, besser abzugrenzen. Es wurde auch an Orten angewandt, bei denen gewerblich genutzte Gebäude von ihrem Aussehen und ihrer Größe starke Ähnlichkeiten mit Wohngebäuden aufweisen. In Darmstadt wurde beispielsweise der südliche Teil des Europaviertels als Mischgebietsklimatop ausgewiesen.
- Zusammenfassung der Klimatope Freilandklima und innerstädtische Grünflächen in ein neues Klimatop mit dem Namen Grünflächen- und Freilandklima
- Anpassung der Farbe des Gewerbeklimatopes von hellgrau auf violett. Dieser Schritt soll die negativen klimatischen Eigenschaften von Gewerbegebieten besser veranschaulichen.
- Anpassung der Strichstärke bei den Signaturen zur mäßigen und hohen Überwärmung zur besseren Lesbarkeit.
- Anpassung der Punktsignaturen für verkehrsbelastete Straßen. Hier wurden Straßenabschnitte mit einem DTV-Wert von mindestens 10.000 einheitlich mit schwarzer Farbe versehen, um die Lesbarkeit zu erhöhen.

## 4.13 Planungshinweiskarte Einführung

Die Planungshinweiskarte basiert auf der bereits vorgestellten Klimaanalysekarte und „soll unter Klima- und Lufthygienegesichtspunkten die für eine möglichst optimale Raumgliederung relevanten Bereiche und Planungsaufgaben hervorheben (VDI 2015, S.39).“ Die Ausweisung der Flächen in der Planungshinweiskarte erfolgt in vier Stufen für Siedlungsflächen und in drei Stufen für Grün- und Freiflächen. Abbildung 37 zeigt eine kompakte Definition auf Basis der Legende der Planungshinweiskarte, bevor im Folgenden genauere Informationen zu den einzelnen Klassen erläutert werden. Die Ausführungen basieren auf der VDI (2015, S.42-47) sowie teilweise auch auf Geißler &

### Planungshinweise

|   |  |
|---|--|
|   | <b>Ausgleichsraum mittlerer Bedeutung:</b><br>indirekte klimatische Funktion für Siedlungsräume, geringe Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden, maßvollen Eingriffen   |
|  | <b>Ausgleichsraum hoher Bedeutung:</b><br>klimaaktive Wald- und Freiflächen mit wichtiger klimatischer Funktion und / oder direktem Bezug zum Siedlungsraum, hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen   |
|  | <b>Bebautes Gebiet mit geringer klimarelevanter Funktion:</b><br>keine nennenswerte klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung und Bebauungsverdichtung, Beachtung des Erhalts von Grün- und Ventilationsschneisen        |
|  | <b>Bebautes Gebiet mit klimarelevanter Funktion:</b><br>geringe klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung, Beachtung des Erhalts von Grün- und Ventilationsschneisen   |
|  | <b>Bebautes Gebiet mit bedeutender klimarelevanter Funktion:</b><br>erhebliche klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung   |
|  | <b>Bebautes Gebiet mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen:</b><br>verdichtete, stark versiegelte Siedlungsräume mit ausgeprägtem Wärmeinseleffekt, unter stadtklimatischen Gesichtspunkten sanierungsbedürftig, teilweise unzureichender Luftaustausch |
|  | <b>Wasser:</b> (keine Bewertung)   |

Abbildung 37: Übersicht zu den Planungshinweisen aus der Legende der Planungshinweiskarte.

Dröscher (2027, S.118-122), Moldenauer et al. (2017, S.54-61) und eigenen Referenzen.

#### Ausgleichsraum hoher Bedeutung

Wie bereits aus der Kurzbeschreibung der Klasse Ausgleichsraum hoher Bedeutung in der Abbildung 37 ersichtlich wird, sind alle entsprechend gekennzeichneten Flächen besonders schützenswert, da es sich in aller Regel um siedlungsrelevante, klimaaktive

Wald – und Freiflächen, innerstädtische Grünflächen oder Kleingartenanlagen handelt, die maßgeblich zur Verbesserung der lokalklimatischen Verhältnisse beitragen. Entsprechend herrscht eine hohe Sensibilität gegenüber Nutzungsänderungen. Bei etwaiger Bebauung sollte unbedingt auf den Erhalt der klimatischen Wirksamkeit auf angrenzende Siedlungsbereiche und die klimaökologische Funktion geachtet werden. Mit 25,7 km<sup>2</sup> fallen etwas mehr als 21 % des Stadtgebietes von Darmstadt in diese Planungshinweisklasse.

#### ■ Ausgleichsraum mittlerer Bedeutung

Die nächst niedrigere Planungshinweisklasse stellen Ausgleichsräume mittlerer Bedeutung dar. Bei diesen Flächen kann es sich auch um Kaltlufteinzugsgebiete handeln. Allerdings fließt die dort entstehende Kaltluft nicht direkt bzw. nur sehr begrenzt in bebaute Gebiete, oder ist sehr langsam, wodurch die Bevölkerung kaum von ihr profitieren kann. Vor diesem Hintergrund sind die Auswirkungen durch Nutzungsänderungen auf die Bevölkerung eher gering, sofern die geplanten Eingriffe maßvoll sind und den Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigen. Die Ausgleichsräume mittlerer Bedeutung befinden sich in Darmstadt abseits der wichtigen Kaltluftbahnen bzw. innerstädtischen Grünflächen und machen mit 69,8 km<sup>2</sup> etwa 57 % der Fläche des Stadtgebietes aus. Damit ist dies der mit Abstand am häufigsten vorkommende Planungshinweis.

#### Ausgleichsraum niedriger Bedeutung (in Darmstadt nicht ausgewiesen)

Gemäß der VDI existiert noch die dritte Klasse der Ausgleichsräume niedriger Bedeutung. Dabei handelt es sich um Grün- und Freiflächen die keine klimatische Relevanz für Siedlungen aufweisen und zudem weitgehend unbedeutend für die Kalt- und Frischluftproduktion sind. Nach eingehender Prüfung der geographischen und klimatischen Situation im Stadtgebiet von Darmstadt konnte festgestellt werden, dass solche Flächen im Untersuchungsgebiet nicht vorliegen.

#### ■ Bebautes Gebiet mit geringer klimatisch-lufthygienischer Belastung und Funktion

Hierbei handelt es sich um locker bebaute und gut durchlüftete Bereiche in denen bislang keine erhöhte Wärmebelastung vorliegt. Somit ist die Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung und Bebauungsverdichtung als sehr gering bis gering einzustufen, sofern diese die ortsüblichen Gegebenheiten nicht überschreitet. Diese Klasse kommt in Darmstadt nur in sehr geringem Umfang vor (0,4 %). Üblicherweise fallen dörflich geprägte Siedlungen in diese Kategorie.

### ■ Bebautes Gebiet mit klimarelevanter Funktion

Bebaute Gebiete mit klimarelevanter Funktion sind etwas dichter bebaute Bereiche, die eine klimarelevante Funktion übernehmen und eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung und Bebauungsverdichtung besitzen, jedoch noch keine stark erhöhte Wärmebelastung aufweisen. Zu dieser Kategorie gehören im Allgemeinen dichter bebaute Dorfkerne, randlich gelegene Stadtbereiche oder schnell von Kaltluft beeinflusste Dörfer. Mit einem Anteil von 3 % kommt dieser Planungshinweis in Darmstadt etwas häufiger vor, z.B. im nordwestlichen Teil des Bezirkes An den Lichtwiesen.

### ■ Bebautes Gebiet mit bedeutender klimarelevanter Funktion

Städtische Bereiche können aus unterschiedlichen Gründen in diese Klasse eingestuft werden (vgl. Abbildung 38). Ein Grund ergibt sich aus dichter und / oder hoher Bebauung, die keine erhöhte Wärmebelastung aufweist. Darüber hinaus fallen auch Bereiche des Stadtrandklimas, mit erhöhter Wärmebelastung und / oder eindringender Kaltluft in diese Klasse. Unabhängig von der Ursache, besteht in allen Fällen i.d.R. eine erhebliche klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung. Es werden Maßnahmen zur Verbesserung der lokalklimatischen Situation vor Ort empfohlen. Dies gilt in dem Umfang nicht für Bereiche wo eindringende Kaltluft, die Ursache für die Klassenzuweisung ist. Dort ist hingegen der zukünftige Erhalt dieser klimatisch günstigen Verhältnisse nach Möglichkeit zu gewährleisten. Unter anderem diese Klasse ist ein wichtiger Grund, weshalb die Planungshinweiskarte in Detailfragen immer gemeinsam mit der Klimaanalysekarte betrachtet werden sollte. Mit einer Fläche von 9,9 km<sup>2</sup> (8,1 %) ist dies die am zweithäufigsten vorkommende, siedlungsbezogene Planungshinweiskategorie.

### ■ Bebaute Gebiete mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen

Letztlich weist die VDI (2015, S.46) „bebaute Gebiete mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen“ als Planungshinweisklasse aus. Dazu gehören stark verdichtete oder überwärmte städtische Bereiche, in denen eine maßgebliche Behinderung des Luftaustausches vorliegt. Die VDI (2015, S.46) spricht von „aus stadtklimatischen Gesichtspunkten sanierungsbedürftigen Bereichen.“ Maßnahmen zur Verbesserung der lokalklimatischen Situation vor Ort haben hier höchste Priorität. Weite Teile des zentralen Stadtgebietes und zahlreiche Gewerbegebiete fallen in diese Planungshinweisklasse. Ihr Anteil beträgt bei einer Flächengröße von 12,0 km<sup>2</sup> 9,8 %. Sie ist damit die am häufigsten vorkommende, siedlungsbezogene Planungshinweiskategorie. Damit zeigt sich, dass in der Stadt Darmstadt ein hoher Handlungsbedarf hinsichtlich der Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der lokalklimatischen Situation besteht.

Wie die einzelnen Planungshinweise aus der Klimaanalysekarte abgeleitet wurden, wird im folgenden Kapitel aufgezeigt.

#### 4.14 Planungshinweiskarte – Methodische Herleitung

| Planungshinweise<br>→<br>Klimatope ↓ | Ausgleichsraum hoher Bedeutung       | Ausgleichsraum mittlerer Bedeutung | bebaute Gebiete mit geringer Belastung und/oder klimarelevanter Funktion | bebaute Gebiete mit mittlerer Belastung und/oder klimarelevanter Funktion | bebaute Gebiete mit hoher klimarelevanter Funktion und Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung | bebaute Gebiete mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--|---|---|--|
| Freilandklima                        | Kaltlufteinzugsgebiet, Siedlungsnähe | Übernahme                          |  |   |   |  |
| Waldklima                            | Kaltlufteinzugsgebiet, Siedlungsnähe | Übernahme                          |  |   |   |  |
| Gewässer- und Seenklima              | keine Zuweisung                      |                                    |  |   |   |  |
| Klima innerstädtischer Grünflächen   | Übernahme                            |                                    |  |   |   |  |
| Kleingartenklima                     | Übernahme                            |                                    |  |   |   |  |
| Vorstadtklima                        |                                      |                                    | Übernahme  | eindringende Kaltluft oder mit Überwärmung                                |   |  |
| Stadtrandklima                       |                                      |                                    |  | Übernahme   | eindringende Kaltluft oder mit Überwärmung  |  |
| Stadtklima                           |                                      |                                    |  |   | Übernahme   | mit Überwärmung  |
| Innenstadtklima                      |                                      |                                    |  |   |   | Übernahme  |
| Gewerbe/Industrieklima               |                                      |                                    |  | Übernahme   | eindringende Kaltluft   | mit Überwärmung  |

Abbildung 38: Übersetzungsmatrix zur Umwandlung der Klimaanalysekarte in die Planungshinweiskarte. Im Anschluss erfolgt eine manuelle Nachbearbeitung auf gutachterlicher Ebene.

Für die Übersetzung der Klimaanalysekarte in die Planungshinweiskarte (beide jeweils im Maßstab 1:10.000) wurde eigenständig eine Matrix vor dem Hintergrund lokalklimatischer- und lufthygienischer Gesichtspunkte entwickelt (Abbildung 38), die auf Basis der VDI (2015), Geißler & Dröscher (2017), Moldenauer et al. (2017) sowie eigenen Referenzen beruht, da für diesen Vorgang nach unseren Informationen kein allgemeingültiges Schema existiert.

Die Abbildung 38 zeigt in der linken Spalte die vorhandenen Klimatope und in der oberen Zeile die Planungshinweise. Alle Felder in denen „Übernahme“ angegeben ist, wurden eins zu eins aus der Klimaanalysekarte übernommen und mit dem jeweiligen Planungshinweis versehen. Da für Wasserflächen gemäß VDI (2015, S.48) in der

Planungshinweiskarte keine Eingruppierung in die bestehenden Klassen vorgesehen ist, werden diese ebenfalls direkt übernommen und separat dargestellt.

Sofern in einem Bereich gemäß der Klimafunktionskarte spezifische Merkmale in Bezug auf Kaltluft und / oder Überwärmung (siehe Kapitel 4.6 und 4.7) vorliegen, werden entsprechend betroffene Flächen über die Standardzuweisung hinaus mit einem angepassten Planungshinweis versehen. Im Fall von Wald- und Freiflächen werden diese immer dann als Ausgleichsraum hoher Bedeutung angesehen, wenn es sich nachweislich um ein siedlungsrelevantes Kaltluftentstehungsgebiet handelt (maximale Distanz 1 km). Flächen, die dem Vorstadt- oder dem Stadtrandklima zugeordnet sind, erhalten bei eindringender Kaltluft oder wenn eine erhöhte Überwärmung festgestellt wurde, eine Zuweisung in die nächsthöhere Planungshinweisklasse, da dann eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber zukünftiger Nutzungsintensivierung gegeben ist.

Im Bereich des Stadtklimas erfolgt eine Hochstufung in die höchste Planungshinweisklasse, sobald eine mäßige oder hohe Überwärmung auszumachen ist. Das Innenstadtklima wird aufgrund seiner Charakteristiken pauschal in die höchste Planungshinweisklasse überführt.

Differenzierter ist die Lage bei Gewerbe- und Industriegebieten. Hier erfolgt eine Erhöhung der Planungshinweisklasse in Abhängigkeit der Tatsache, ob Kaltluftmerkmale oder eine Überwärmung vorliegen. Hierbei ist bei einer mäßigen oder hohen Überwärmung ein erhöhter Handlungsbedarf auszuweisen. Wenn keine Überwärmung vorliegt, aber Kaltlufteinflüsse vorhanden sind, so erfolgt die Einteilung in die zweithöchste Planungshinweisklasse.

Nach der vollständig automatisierten Anwendung der Übersetzungsmatrix, erfolgte nachträglich noch eine manuelle Überprüfung auf Plausibilität. Im Zuge derer wurden einige manuelle, gutachterlich abgeleitete Anpassungen bei der Ausweisung der Planungshinweise vorgenommen.

Speziell aufgrund der – methodisch bedingt – teils kleinteiligen Strukturen wurden nach der Übersetzung zahlreiche Flächen (außer Wasser und Ausgleichsräume hoher Bedeutung) generalisiert und dem umliegenden Planungshinweis zugeordnet, mit welchem die längste gemeinsame Grenze besteht. Der Hauptgrund der vorgenommenen Generalisierung war wie schon bei der Klimaanalysekarte die Tatsache, dass sonst eine Vielzahl von Kleinstflächen individuelle Planungshinweise erhalten hätte, was für die weitere Planung nicht zielführend, sondern eher verwirrend gewesen wäre.

#### **4.15 Darstellung und Auswertung der Planungshinweiskarte nach VDI 3787, Blatt 1**

Beim Betrachten der Planungshinweiskarte (Abbildung 39, vergrößerter Ausschnitt in Abbildung 40) fällt auf, dass in Darmstadt zahlreiche Grün- und Freiflächen als

Ausgleichsräume hoher Bedeutung dargestellt sind. Dort liegen günstige Voraussetzungen für die siedlungsrelevante Kaltluftentstehung vor.

Besonders positiv und bedeutsam sind lokalklimatische Ausgleichsräume, wenn diese sich im Umfeld der höchsten Planungshinweisklassen für Siedlungsgebiete befinden. Eine sehr bedeutsame innenstadtnahe Grünfläche in Darmstadt ist der Herrngarten. Aufgrund seiner Fläche und dem vorhandenen Baumbestand kann er einen wichtigen Beitrag zur thermischen Regulierung in den angrenzenden Bereichen leisten (Moldenauer et al. 2017, S.66). Solche Grünflächen ermöglichen zudem der Bevölkerung, besonders an heißen Tagen, eine angenehme Aufenthaltsqualität. Wie Kapitel 4.8 zeigte kann jedoch vor allem die Vitalität der Wiesenflächen bei längeren Trockenperioden (stark) eingeschränkt sein. Vertrocknete Wiesenflächen können sich ähnlich stark aufheizen wie beispielsweise Asphalt. Auch die mehr oder weniger stark durchgrünten Innenhöfe im Johannes- und Martinsviertel tragen kleinräumig - im Gegensatz zur Altstadt - zur lokalen Abkühlung bei.

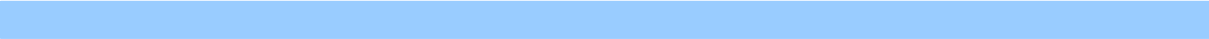
Eingriffe zur Nutzungsänderung oder Bebauung in Ausgleichsräumen hoher Bedeutung sollten nach Möglichkeit vermieden werden. Falls doch entsprechende Vorhaben geplant sind, ist es wichtig - z. B. in Form eines Gutachtens - etwaige lokalklimatische Auswirkungen auf die Fläche selbst sowie die Umgebung zu untersuchen.

Die hellgrünen Gebiete sind ebenfalls sehr häufig Kaltlufteinzugsgebiete, allerdings ist hier entweder die Entfernung zu Wohnflächen größer als 1 km oder die im Kapitel 4.6 genannten Kriterien wurden nicht erfüllt (zu niedrige Kaltluftfließgeschwindigkeit bzw. zu geringe Kaltluftvolumenstromdichte nach zwei Stunden Simulationszeit). Hier ist eine nachträgliche Nutzungsänderung oder Neubebauung weniger kritisch, sofern diese maßvoll erfolgt. Dennoch sollte auch hier stets sichergestellt sein, dass etwaige negative klimatische Auswirkungen auf bereits bewohnte Bereichen, auf ein Minimum zu reduzieren sind.

Bei den städtisch geprägten Räumen herrscht vor allem in den lila dargestellten Bereichen, besonderer Handlungsbedarf durch geeignete Maßnahmen. Dies betrifft vor allem weite Teile des zentralen Stadtgebietes und viele Gewerbegebiete. Es ergibt sich damit ein sehr großer zusammenhängender Bereich, welcher die höchste Planungshinweisklasse aufweist.

Bei den drei anderen Planungshinweisklassen lässt sich beim Vergleich mit der Klimaanalysekarte gut erkennen, wo Kaltluftmerkmale oder eine erhöhte Wärmebelastung zu einer Hochstufung führten.

Sehr wichtig ist es allerdings, bei der Interpretation und Bewertung der Planungshinweiskarte immer die Klimaanalysekarte mitzuberücksichtigen. Nur so lassen sich manche Zuweisungen von bestimmten Flächen gut nachvollziehen. Darüber hinaus sollte immer mitbedacht werden, dass die Planungshinweiskarte wie auch die Klimaanalysekarte auf den Maßstab 1:10.000 ausgelegt ist und damit für sehr kleinräumige Fragestellungen aufgrund der Generalisierung keine Aussagen getroffen



werden können. Sehr wohl ermöglicht die Planungshinweiskarte aber eine schnelle Übersicht, wo in Darmstadt der höchste Handlungsbedarf besteht und welche Flächen besonders schützenswert sind.

Da die eigentlichen Handlungsempfehlungen sich auch innerhalb einer Planungshinweisklasse je nach den Gegebenheiten vor Ort zum Teil stark unterscheiden können, empfehlen wir bei Detailplanungen eine zusätzliche Betrachtung der Themenkarten zur Wärmebelastung und zur Kaltluft sowie die alternative Planungshinweiskarte im Kapitel 4.16.

Auf Wunsch der Stadt Darmstadt wurden ergänzend die Standorte von sozialen Einrichtungen (Kita, Schulen, Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen) sowie der Feuerwehrröten integriert.

Insgesamt sollte der Fokus der Stadt Darmstadt auf dem Erhalt der wenigen vorhandenen Kaltluftbahnen sowie auf der Verbesserung der Aufenthaltsbedingungen in den vorgestellten Hitze-Hotspots liegen. Das gilt insbesondere für das zentrale Stadtgebiet, welches in weiten Teilen kaum Abkühlung durch Kaltluft erfährt und sich auf der anderen Seite tagsüber stark aufheizen kann. Vor allem die Schaffung von zusätzlichen (idealerweise verschatteten) Grünflächen, sollte höchste Priorität haben.





Abbildung 40: Ausschnitt der Planungshinweiskarte im Originalmaßstab von 1:10.000.

#### 4.16 Exkurs: Entwicklung einer alternativen Planungshinweiskarte

- 

**Bebautes Gebiet mit bedeutender klimarelevanter Funktion mit weniger als 100m Entfernung zu Ausgleichsräumen hoher Bedeutung:**  
erhebliche klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung, bessere Erreichbarkeit von Grünflächen, Begrünungs- und/oder Entsiegelungsmaßnahmen empfohlen
- 

**Bebautes Gebiet mit bedeutender klimarelevanter Funktion mit mehr als 100m Entfernung zu Ausgleichsräumen hoher Bedeutung:**  
erhebliche klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung, Begrünungs- und/oder Entsiegelungsmaßnahmen dringend empfohlen, Entfernung von Kaltluftbarrieren prüfen, bessere Erreichbarkeit von Grünflächen ist zu prüfen
- 

**Bebautes Gebiet mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen mit weniger als 100m Entfernung zu Ausgleichsräumen hoher Bedeutung:**  
verdichtete, stark versiegelte Siedlungsräume mit ausgeprägtem Wärmeeffekt, unter stadtklimatischen Gesichtspunkten sanierungsbedürftig, teilweise unzureichender Luftaustausch, bessere Erreichbarkeit von Grünflächen, Begrünungs- und/oder Entsiegelungsmaßnahmen dringend empfohlen
- 

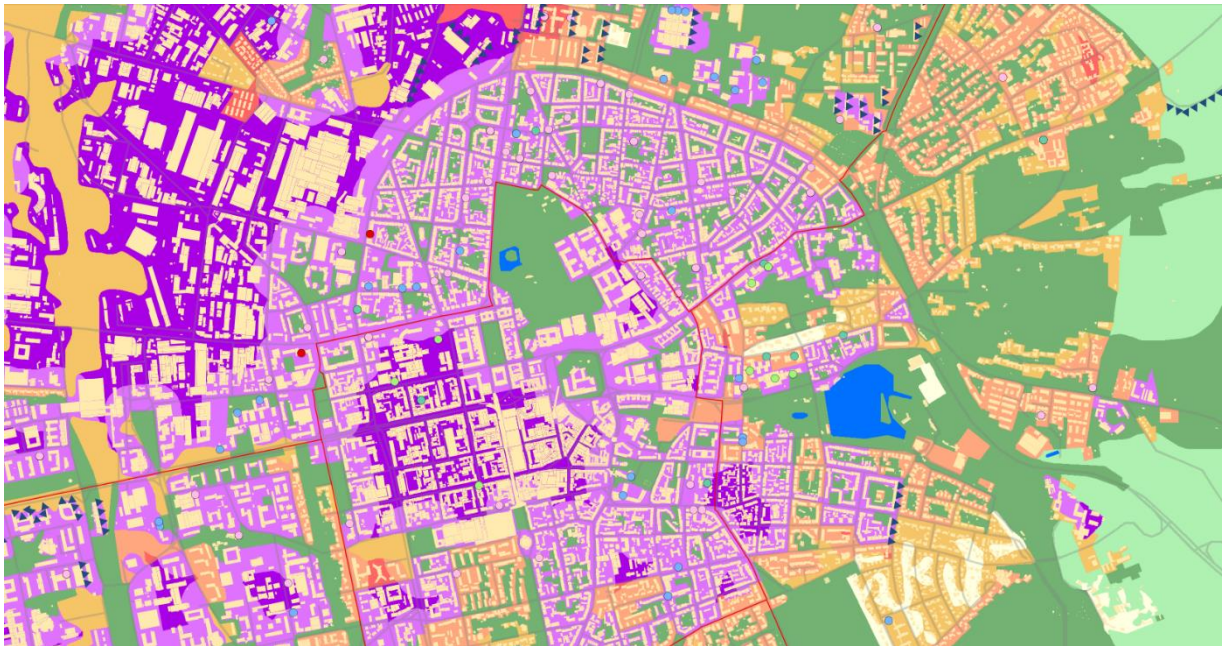
**Bebautes Gebiet mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen mit mehr als 100m Entfernung zu Ausgleichsräumen hoher Bedeutung:**  
verdichtete, stark versiegelte Siedlungsräume mit ausgeprägtem Wärmeeffekt, unter stadtklimatischen Gesichtspunkten sanierungsbedürftig, teilweise unzureichender Luftaustausch, Begrünungs- und/oder Entsiegelungsmaßnahmen sehr dringend erforderlich, Entfernung von Kaltluftbarrieren prüfen

Abbildung 41: Übersicht der vier neuen siedlungsbezogenen Planungshinweisklassen, welche die beiden bisher höchsten ersetzen.

Wie schon bei der Klimaanalysekarte (Kapitel 4.12) erfolgte in enger Abstimmung mit der Stadt Darmstadt auch die Erstellung einer zusätzlichen Planungshinweiskarte. Ihr Ziel ist es vor allem für die am stärksten von Überwärmung betroffenen Bereiche noch differenziertere Aussagen hinsichtlich der Dringlichkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen zu treffen. Entsprechend wurden die beiden bisher höchsten Planungshinweise, in insgesamt vier neue Planungshinweise überführt (vgl.



Klimaanalysekarte mit dargestellt. Als markanteste Hotspots mit defizitärer Grünflächenversorgung stellen sich in dunkelvioletlett die Darmstädter Innenstadt, die



**Abbildung 43: Vergrößerter Ausschnitt der alternativen Planungshinweiskarte im Originalmaßstab von 1:10.000.**

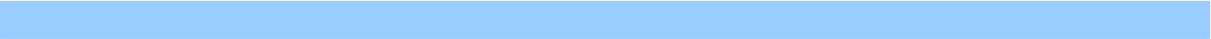
Gewerbeflächen nördlich bzw. nordöstlich des Hauptbahnhofes und das Gelände der Merck KGaA heraus (Abbildung 27, Abbildung 28).

## 5. Betroffenheitsanalyse Wärmebelastung für die Bevölkerung und in sozialen Einrichtungen

Ergänzend zum Wärmebelastungsindex und zur Verschattungsanalyse (Kapitel 4.7) soll der Fokus nun stärker auch auf vulnerablen Bevölkerungsgruppen liegen. Hierfür hat die Stadt Darmstadt Bevölkerungsdaten für alle 37 statistischen Bezirke sowie die Standorte von sozialen Einrichtungen (Kitas, Schulen, Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen) im Stadtgebiet bereitgestellt. Mit diesen Informationen ist es in einem ersten Schritt möglich Aussagen zur Betroffenheit der Bevölkerung hinsichtlich Wärmebelastung auf Ebene der statistischen Bezirke zu treffen.

Um die besonders stark von Wärmebelastung betroffenen statistischen Bezirke von Darmstadt zu identifizieren, wurden die eben genannten Daten zuzüglich dem Wärmebelastungsindex berücksichtigt. Hierfür wurden drei Indikatoren gebildet und in Form eines geometrischen (multiplikativen) Mittelwertes miteinander verrechnet. Der erste Indikator ist der gemittelte Wärmebelastungsindex pro statistischem Bezirk und hat eine Gewichtung von 35 % enthalten. Als zweiter Indikator dient die Anzahl an sozialen Einrichtungen mit einer Gewichtung von 15 %. Der dritte Indikator beschreibt die Bevölkerungszusammensetzung im jeweiligen Bezirk und besitzt eine Gewichtung von 50 % an. Besonders stark berücksichtigt wird dabei die absolute Anzahl und der prozentuale Anteil von unter 6-Jährigen und über 65-Jährigen Personen. Insgesamt gilt, dass je höher der mittlere Wärmebelastungsindex ist, je mehr soziale Einrichtungen es gibt und je mehr vulnerable Bevölkerungsgruppen in den jeweiligen statistischen Bezirken leben, desto größer ist die Betroffenheit hinsichtlich des Themas Wärmebelastung. Selbstverständlich gilt der gleiche Zusammenhang auch in umgekehrter Richtung.

Das errechnete Ergebnis ist in Abbildung 44 zu sehen. Es zeigt, dass die höchste Bevölkerung in Kranichstein-Süd ermittelt wurde. Der Grund hierfür ist vor allem im überdurchschnittlichen Anteil von vulnerablen Personengruppen und hier im speziellen bei den über 65-Jährigen zu suchen. Auf den weiteren Plätzen folgen das Martinsviertel-West, das Johannesviertel, das Kapellplatzviertel, Alt-Bessungen und das Verlegerviortel. Am anderen Ende der Skala befinden sich mit der geringsten Betroffenheit die statistischen Bezirke Hochschulviertel, Am Kavalleriesand, An der Ludwigshöhe, An den Lichtwiesen und Am Frankenstein. Beim Hochschulviertel ergibt sich die geringe Bewertung aufgrund der weit unterdurchschnittlichen Ausprägung aller sozialen Indikatoren. Der mittlere Wärmebelastungsindex liegt bei einem recht hohen Wert von 1,66. Da die Berechnungstabelle im Hintergrund sehr umfangreich ist, kann Sie im Rahmen dieses Berichtes nicht sinnvoll dargestellt werden. Sie wurde jedoch der Stadt Darmstadt übergeben, damit diese für jeden statistischen Bezirk nachvollziehen kann, wie sich die Bewertung jeweils zusammensetzt.



Bei der Interpretation zu beachten sei weiterhin, dass die Betroffenheit auf Basis der relativen Unterschiede der einzelnen Bezirke zueinander ermittelt wurde. Es lässt sich aufgrund der gewählten Methodik keine unmittelbar direkte Vergleichbarkeit mit anderen Großstädten herstellen.

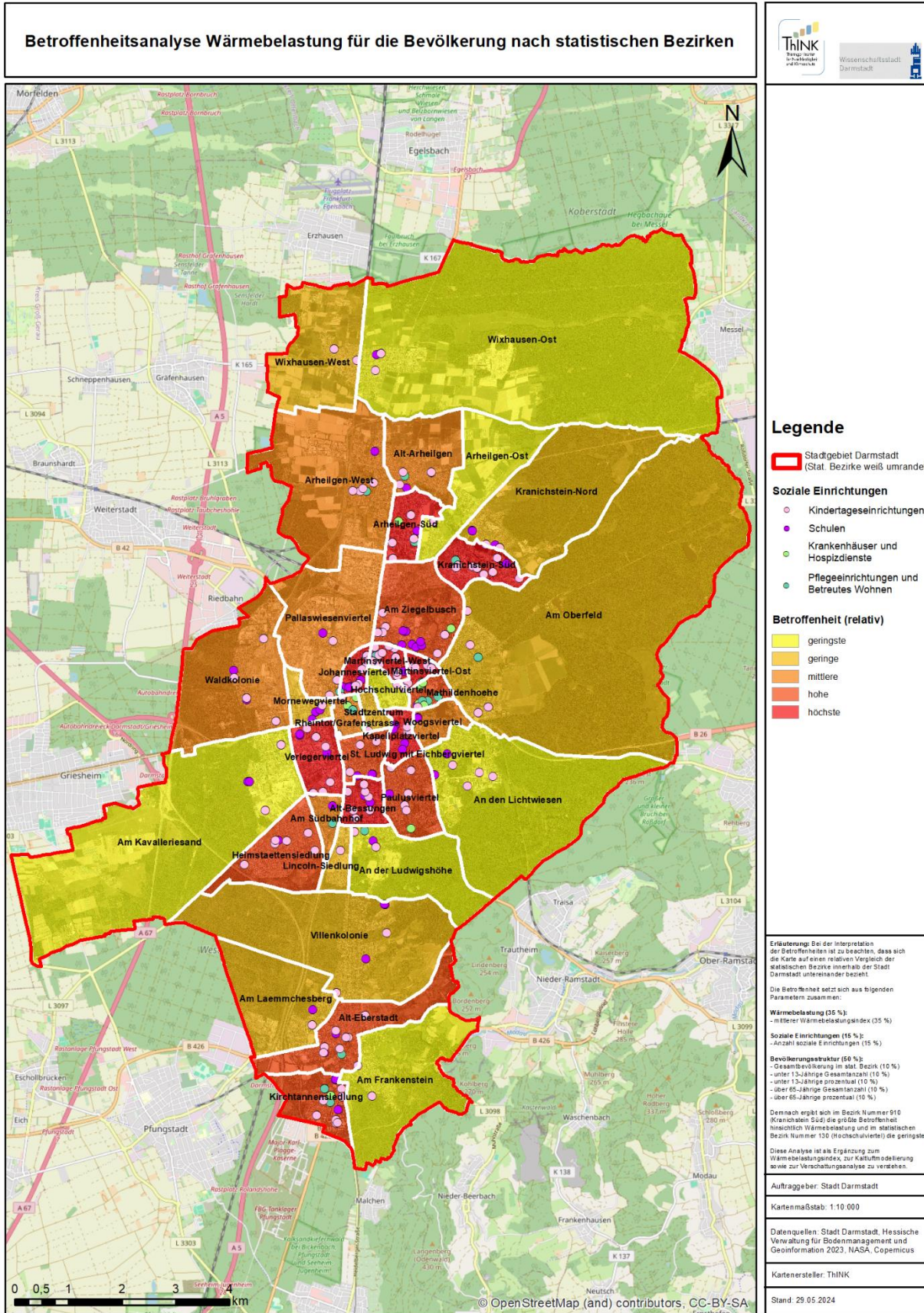


Abbildung 44: Übersichtskarte zur Betroffenheitsanalyse Wärmebelastung für die Bevölkerung nach statistischen Bezirken.

**Tabelle 3: Wärmebelastungsindex im 50 m Radius um jede soziale Einrichtung in Darmstadt. Neben dem Mittelwert sind in den beiden rechten Spalten noch das Minimum und das Maximum im jeweiligen Umfeld angegeben. Insgesamt wurden 211 Einrichtungen untersucht. Die Nummern 1 bis 18 zeigen die Einrichtungen, mit der klimatisch ungünstigsten Umgebung hinsichtlich des Themas Hitze, während unten die Nummern 191 bis 211 die Einrichtungen mit einem besonders günstigen Umfeld kennzeichnen. Die Farben entsprechen der Legende des Wärmebelastungsindex.**

| Einrichtung | WB_Mittelwert_50m | WB_min | WB_max |
|-------------|-------------------|--------|--------|
| 1.          | 1,87              | 1,82   | 1,88   |
| 2.          | 1,86              | 1,83   | 1,88   |
| 3.          | 1,85              | 1,67   | 1,90   |
| 4.          | 1,85              | 1,80   | 1,89   |
| 5.          | 1,84              | 1,80   | 1,86   |
| 6.          | 1,83              | 1,75   | 1,87   |
| 7.          | 1,83              | 1,74   | 1,88   |
| 8.          | 1,83              | 1,80   | 1,86   |
| 9.          | 1,83              | 1,70   | 1,89   |
| 10.         | 1,82              | 1,77   | 1,85   |
| 11.         | 1,82              | 1,79   | 1,85   |
| 12.         | 1,82              | 1,78   | 1,85   |
| 13.         | 1,82              | 1,70   | 1,87   |
| 14.         | 1,82              | 1,69   | 1,88   |
| 15.         | 1,82              | 1,64   | 1,87   |
| 16.         | 1,82              | 1,79   | 1,84   |
| 17.         | 1,82              | 1,64   | 1,87   |
| 18.         | 1,82              | 1,74   | 1,85   |

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 191. | 1,60 | 1,35 | 1,78 |
| 192. | 1,58 | 1,24 | 1,76 |
| 193. | 1,58 | 1,27 | 1,78 |
| 194. | 1,57 | 1,22 | 1,78 |
| 195. | 1,56 | 1,42 | 1,69 |
| 196. | 1,56 | 1,19 | 1,79 |
| 197. | 1,56 | 1,26 | 1,80 |
| 198. | 1,55 | 1,23 | 1,73 |
| 199. | 1,55 | 1,26 | 1,72 |
| 200. | 1,54 | 1,22 | 1,81 |
| 201. | 1,53 | 1,25 | 1,83 |
| 202. | 1,53 | 1,31 | 1,79 |
| 203. | 1,51 | 1,22 | 1,72 |
| 204. | 1,51 | 1,22 | 1,72 |
| 205. | 1,50 | 1,19 | 1,74 |
| 206. | 1,46 | 1,26 | 1,71 |
| 207. | 1,46 | 1,20 | 1,78 |
| 208. | 1,42 | 1,17 | 1,64 |
| 209. | 1,40 | 1,22 | 1,71 |
| 210. | 1,34 | 1,23 | 1,64 |
| 211. | 1,26 | 1,20 | 1,43 |

Für die insgesamt 211 sozialen Einrichtungen in Darmstadt (Kitas, Schulen, Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen) erfolgte auf Basis des Wärmebelastungsindex eine Bewertung ihres unmittelbaren Umfeldes (50 m Radius). Hierfür wurden das Minimum, der Mittelwert sowie das Maximum des Wärmebelastungsindex für das Umfeld einer jeden Einrichtung berechnet. Je höher der Wärmebelastungsindex im Umfeld ausfällt, desto größer ist die Betroffenheit. Die Zustände der einzelnen Gebäude hinsichtlich z. B. Dämmung oder Klimatisierung wurden aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht mitberücksichtigt. Diesbezüglich ist eine individuelle Prüfung im Einzelfall erforderlich.

Die erstellte Übersichtstabelle wurde der Stadt Darmstadt übergeben. Ein Ausschnitt aus dem oberen und unteren Ende kann Tabelle 3 entnommen werden. Zweck dieser Analyse ist es, die Stadt Darmstadt und die weiteren Träger sozialer Einrichtungen bei der Priorisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen zu unterstützen und ein mögliches Beispiel für die praktische Anwendung des Wärmebelastungsindex aufzuzeigen.

## 6. Thermaldrohnenbefliegung

### 6.1 Methodik und Anlass

Zur Schaffung einer Bewertungsgrundlage der Wärmebelastung bei hochsommerlichen Bedingungen auf Grundlage von eigenen Messdaten, fanden am 30.07.2024 UAV-gestützte Befliegungen mit Thermal- und optischem Sensor zum Sonnenhöchststand von repräsentativen Standorten in Darmstadt durch ThINK statt. Die gemessenen Oberflächentemperaturen geben dabei indirekte Rückschlüsse auf die Aufenthaltsqualität an den Standorten. Die Oberflächentemperatur entspricht dabei nicht der Lufttemperatur, allerdings wird die Temperatur der bodennahen Luftschicht erheblich durch die Wärmeabstrahlung der Oberflächen beeinflusst.

Die Aufnahmen lassen deutliche Unterschiede hinsichtlich der Oberflächentemperaturen, in einem Wertebereich von etwa 10 °C bis maximal 80 °C erkennen. Bei Materialien mit einer glatten Oberfläche (z. B. Glas, Metall), welche stark die Sonneneinstrahlung reflektieren gilt es zu beachten, dass die gemessenen Oberflächentemperaturen oft durch die Reflektion überlagert wird und nicht der tatsächlichen abgestrahlten Temperatur der Oberfläche entsprechen. Daher werden z. B. Metallaufbauten auf Gebäuden oder Blechdächern in den Thermalaufnahmen mit vergleichsweise niedrigen Oberflächentemperaturen gemessen.

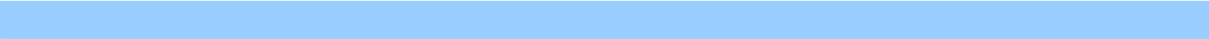
Zum Einsatz kamen dabei eine DJI Mavic 2 Enterprise Advanced mit Thermal- (IR 8 - 14 µm) sowie mit RGB-Kamera. Aus ca. 90 Meter Flughöhe wurden die Aufnahmen mit einem vorab programmierten GPS-geleiteten Flugpfad ausgeführt.

### 6.2 Standort Platz der Deutschen Einheit / Hauptbahnhof

Als besonders kühl und bioklimatisch wertvoll zeigt sich das Großgrün. Die Blattoberflächen sind deutlich kühler als die Lufttemperatur von 28 °C und tragen neben der Verschattung aktiv zur Abkühlung bei. Nur Teile der Rasenbereiche waren zum Untersuchungszeitpunkt vertrocknet und zeigen eine geringe Vitalität und damit kaum Verdunstungspotenzial.

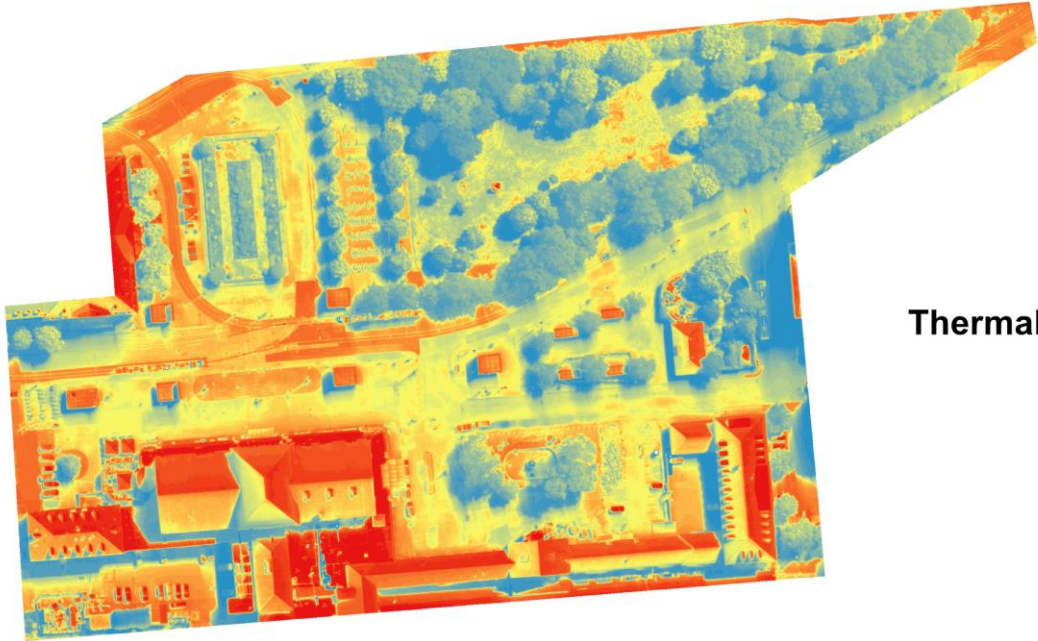
Das mit dunklen Dachziegeln ausgestattete Dach des Hauptbahnhofs sticht durch besonders hohe Oberflächentemperaturen hervor. Die nach Osten und Süden exponierten Dachbereiche erwärmen sich material- und einstrahlungsbedingt erheblich auf über 70 °C.

Vor der Haupteingang des Hauptbahnhofes sorgt der völlig unbeschattete Bereich für eine starke Erwärmung der Oberflächen auf bis zu 50 °C. Diese heizen sich entsprechend stark auf, die Asphaltbereiche noch stärker als die heller gepflasterten Bereiche. Östlich und südlich der Fassade des Hauptbahnhofes ist die



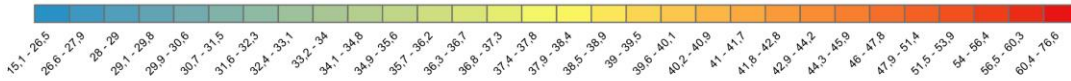
Wärmeabstrahlung des Gebäudes im Thermalbild sichtbar, welches die angrenzenden Bereiche zusätzlich aufheizt.

## Oberflächentemperaturen am Platz der deutschen Einheit / Hauptbahnhof bei hochsommerlichen wolkenfreien Bedingungen



Thermal

Oberflächentemperatur in °C



RGB



Messtechnik:  
 DJI Mavic 2 Enterprise Advanced  
 thermale Infrarotkamera:  
 640 x 512 px Wärmebildkamera mit 30Hz  
 Spektralband 8 - 14 µm  
 RGB-Kamera: 48MP  
 Flughöhe: 90 m über Grund

Messzeitpunkt:  
 30.07.2024, 12:00 Uhr - 12:15 Uhr

Wetter zum Messzeitpunkt:  
 sonnig, ca. 28°C

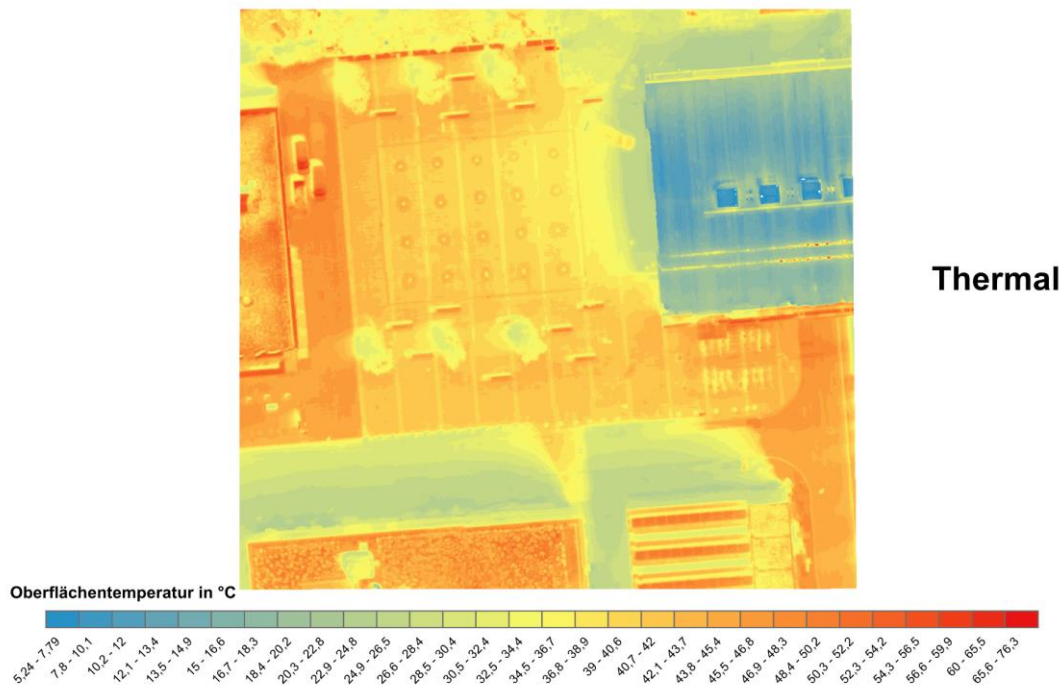
Erstellt durch THINK im Auftrag der Wissenschaftsstadt Darmstadt



Abbildung 45: Oberflächentemperaturen am Platz der Deutschen Einheit / Hauptbahnhof

## 6.3 Standort Europaplatz

### Oberflächentemperaturen am Europaplatz bei hochsommerlichen wolkenfreien Bedingungen



RGB



Messtechnik:  
DJI Mavic 2 Enterprise Advanced  
thermale Infrarotkamera:  
640 x 512 px Wärmebildkamera mit 30Hz  
Spektralband 8 - 14 µm  
RGB-Kamera: 48MP  
Flughöhe: 90 m über Grund

Messzeitpunkt:  
30.07.2024, 12:30 Uhr - 12:35 Uhr  
Wetter zum Messzeitpunkt:  
sonnig, ca. 29°C

Erstellt durch THINK im Auftrag der Wissenschaftsstadt Darmstadt

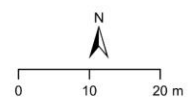


Abbildung 46: Oberflächentemperaturen am Europaplatz.

Die nur minimale Verschattung auf dem Europaplatz sorgt für ein recht einheitliches Thermalbild mit ungünstigen bioklimatischen Bedingungen auf dem Platz. Wäre die Wasseroberfläche aktiv, würde diese die Oberfläche potentiell deutlich abkühlen. Die Wanderung des Schattens des Bahnhofsgebäudes am Vormittag ist noch im Thermalbild nachvollziehbar. Dieses besitzt eine metallische Dachhaut und reflektiert, noch verstärkt durch die leichte Wölbung, besonders stark und wird daher im Thermalbild nur mit sehr niedrigen Temperaturen gemessen.

Auffällig sind die hohen Temperaturen der Gründächer am westlichen und südlichen Rand der Aufnahme. Nur der kleine Gründachbereich ganz im Südosten der Aufnahme ist deutlich kühler und deutet damit auf mehr Wasserverfügbarkeit in dem Bereich hin.

#### **6.4 Standort Herrngarten und Karolinenplatz**

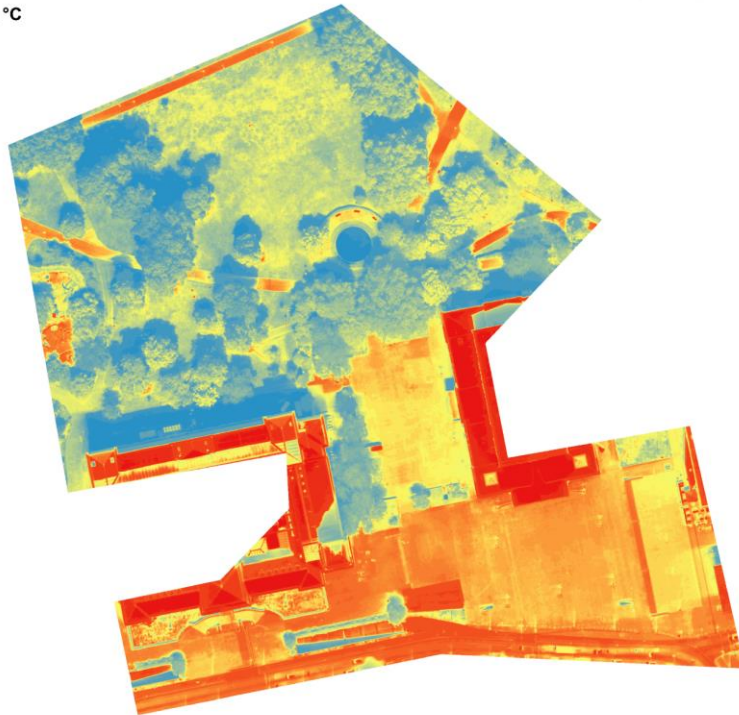
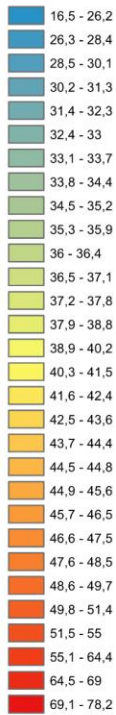
Im Herrngarten kommt das Großgrün wieder sehr deutlich in der positiven klimatischen Wirkung heraus. Nicht nur die durch Verdunstungskühlung ca. 25 °C bis 30 °C kühlen Blattoberflächen, sondern auch die Schattenbereiche der Bäume. Die Wiese teilt sich in Bereiche mit dichterem und vitaleren Bewuchs und in trockene, nur spärlich bewachsenen Bereiche. Dadurch ist die Oberflächentemperatur kleinräumig sehr heterogen ausgeprägt. Besonders kühl ist der Brunnen am südlichen Eingang zum Herrngarten. Durch die Wasserbewegung wird eine starke Erwärmung des Wasserkörpers verhindert und eine spürbare Verdunstungskühlung, zumindest im Nahbereich, an besonders heißen Tagen, aufrechterhalten.

Auf dem Karolinenplatz wird das Pflaster ca. 45 °C bis 48 °C heiß. Im Thermalbild fällt auf, dass das gleiche Pflaster im Bereich südlich des Eingangs zum Herrngarten, trotz gleicher Einstrahlung, ca. 5 Kelvin kühler ist. Nach Überprüfung lässt sich der Temperaturunterschied auf die Tiefgarage im Untergrund unter den Karolinenplatz zurückführen. Die Annahme ist, dass die Tiefgarage die Wärmeabführung in den Untergrund, im Vergleich zu nicht unterbauten Bereichen, vermindert.

Noch wärmer ist der Asphalt der Bundesstraße 26 südlich des Karolinenplatz mit Oberflächentemperaturen von deutlich über 50 °C.

## Oberflächentemperaturen am Herrngarten / Karolinenplatz bei hochsommerlichen wolkenfreien Bedingungen

Oberflächentemperatur in °C



Thermal



RGB



Messtechnik:  
DJI Mavic 2 Enterprise Advanced  
thermale Infrarotkamera:  
640 x 512 px Wärmebildkamera mit 30Hz  
Spektralband 8 - 14 µm  
RGB-Kamera: 48MP  
Flughöhe: 90 m über Grund

Messzeitpunkt:  
30.07.2024, 13:20 Uhr - 13:35 Uhr  
Wetter zum Messzeitpunkt:  
sonnig, ca. 31°C

Erstellt durch THINK im Auftrag der Wissenschaftsstadt Darmstadt

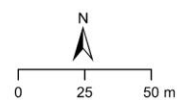
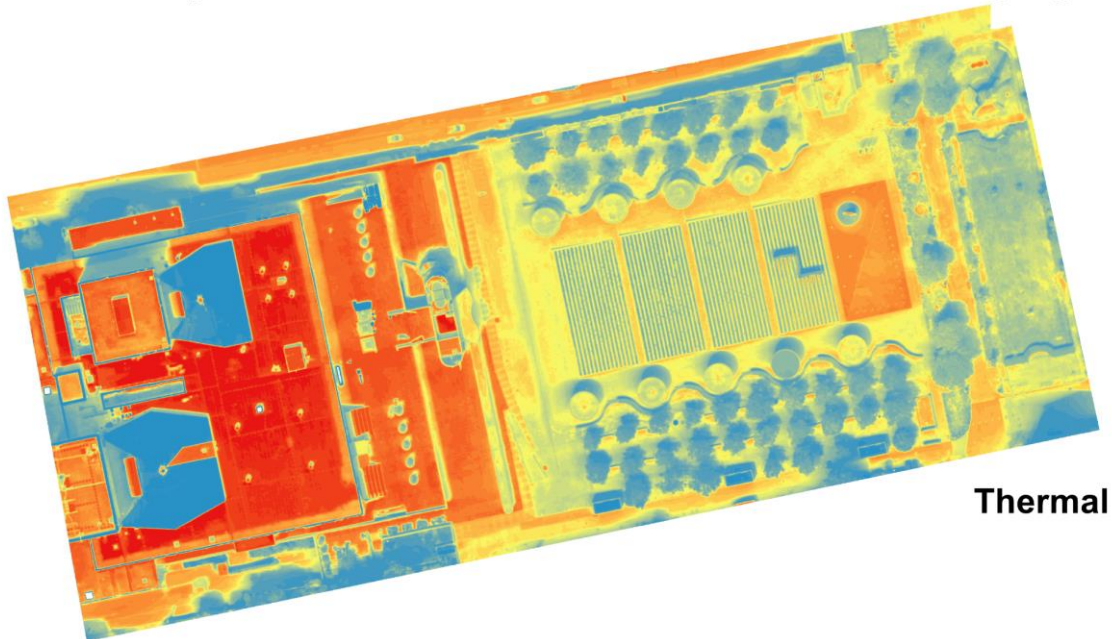


Abbildung 47: Oberflächentemperaturen am Herrngarten und Karolinenplatz.

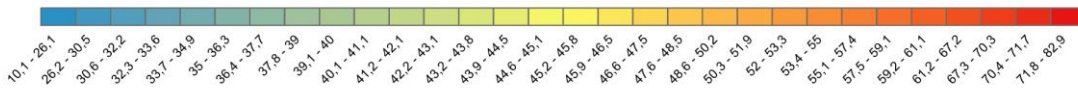
6.5 Standort am Staatstheater / Georg-Büchner-Platz / Wilhelminenplatz

Oberflächentemperaturen am Staatstheater / Georg-Büchner-Platz / Wilhelminenplatz bei hochsommerlichen wolkenfreien Bedingungen



Thermal

Oberflächentemperatur in °C



RGB



Messtechnik:  
 DJI Mavic 2 Enterprise Advanced  
 thermale Infrarotkamera:  
 640 x 512 px Wärmebildkamera mit 30Hz  
 Spektralband 8 - 14 µm  
 RGB-Kamera: 48MP  
 Flughöhe: 90 m über Grund

Messzeitpunkt:  
 30.07.2024, 14:20 Uhr - 14:30 Uhr

Wetter zum Messzeitpunkt:  
 sonnig, ca. 32°C

Erstellt durch THINK im Auftrag der Wissenschaftsstadt Darmstadt

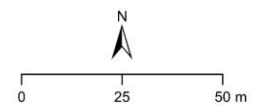
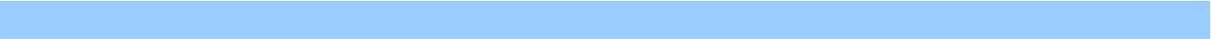


Abbildung 48: Oberflächentemperaturen am Staatstheater / Georg-Büchner-Platz / Wilhelminenplatz.



Die dunklen Steinplatten im Eingangsbereichs des Staatstheaters weisen extrem hohe Temperaturen von ca. 60 °C bis 65 °C auf. Im Gegensatz zu den stark aufgeheizten dunklen Dachflächen halten sich hier Menschen temporär auf. Der Büchner-Garten ist wiederum ein gutes Beispiel zur klimaökologischen Wirkung von vitalem Grün.

Deutlich bioklimatisch günstiger und heterogener ist der Georg-Büchner-Platz gestaltet. Die Bäume und runden „Betonschirme“ bieten Schatten und die schmalen Rasenstreifen zeigen eine gute Vitalität und damit Kühle. Das zum Zeitpunkt der Aufnahme fehlende Wasser um das Georg-Büchner Denkmal könnte für mehr Kühle in dem Bereich sorgen.

## 7. Fazit

Mit einer gemessenen Erhöhung der mittleren Jahreslufttemperatur für die Region Darmstadt von 9,7 °C auf 11,1 °C zwischen den Vergleichszeiträumen von 1961 bis 1990 und 1991 bis 2020 zeigt sich, dass der Klimawandel auch in Darmstadt deutlich angekommen ist. Dies gilt insbesondere für temperaturbezogene Kennwerte. Je nach globaler Entwicklung ist mit einer weiteren, mitunter erheblichen Zunahme der Temperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts zu rechnen. Für die Niederschlagsentwicklung ist der Trend nicht ganz so eindeutig. Das Risiko für häufigere und/oder intensivere Starkregenereignisse aufgrund höherer Lufttemperaturen wird jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit steigen. Auch ist mit einer zukünftigen Niederschlagsabnahme in den Sommermonaten und einer Niederschlagserhöhung in den Wintermonaten zu rechnen.

Mittels Satellitendaten (Wärmebelastungsindex) und eigenen Messungen mit einer Thermaldrone konnte für Darmstadt ein starker Wärmeinseleffekt auf gesamtstädtischer und mikroklimatischer Ebene nachgewiesen werden. Durch Verschneidung der Bevölkerungsdaten (Anzahl und Altersstruktur) und des Wärmebelastungsindex der statistischen Bezirke zeigt sich eine aktuell hohe Betroffenheit der Wärmebelastung auf die Bevölkerung für Arheilgen-Süd, Kranichstein-Süd, Johannesviertel, Martinsviertel-West, Martinsviertel-Ost, Alt-Bessungen und das Kapellplatzviertel im Vergleich zu den anderen Stadtteilen (statistischen Bezirken) der Wissenschaftsstadt Darmstadt.

Anhand der Modellierung der Kaltluftdynamik zeigt sich, dass in Darmstadt topographisch bedingt nur im Norden im Bereich Wixhausen und im Süden im Bereich Eberstadt der Kaltlufteinfluss günstig ist. Die Mathildenhöhe und das Woogsviertel sind die innerstädtische Bereiche, die noch über die beste Kaltluftversorgung bei wolkenfreien Hochdruckwetterlagen verfügen. Entsprechend ist für die anderen Stadtbereiche der Erhalt bzw. die Schaffung einer lokalen Kaltluftproduktion im Siedlungsraum umso wichtiger, da diese keine/wenig Kaltluft aus anderen Stadtbereichen zugeführt bekommen.

Aufbauend auf den differenzierten Analyseergebnissen zum Stadtklima von Darmstadt, zeigt sich ein hoher Handlungsdruck zur Verbesserung der stadtklimatischen Situation. Maßnahmen, welche die stadt- und bioklimatischen Gegebenheiten, insbesondere an besonders belasteten Standorten verbessern sollen, zielen auf den Ausbau der blau-grünen Infrastruktur, die Entsiegelung, Verbesserung der Kaltluftsituation und eine hitzeangepasste Architektur/ Stadtplanung ab. Damit soll eine Reduktion der Hitzebelastung, eine verbesserte Resilienz gegenüber Extremereignissen wie Starkregen und Dürre, sowie im Allgemeinen eine Erhöhung der Aufenthaltsqualität im Außenbereich durch den Ausbau, die Aufwertung und die Vernetzung von Grünelementen angestrebt werden.

Die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse sollen dabei helfen, die Sensibilisierung der Bevölkerung zum Thema Stadtklima und Auswirkungen des Klimawandels zu unterstützen.

## Literatur

- Bonafoni, S., Baldinelli, G., & P. Verducci (2017): Sustainable strategies for smart cities: Analysis of the town development effect on surface urban heat island through remote sensing methodologies. In: Sustainable Cities and Society, Heft 29, S. 211-218
- BBD - Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.) (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel; vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Berlin. Online unter [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf) (Letzter Zugriff: 14.04.2021)
- BBD - Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.) (2011): Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel; vom Bundeskabinett am 31. August 2011 beschlossen. Berlin Online unter [https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/aktionsplan\\_anpassung\\_klimawandel\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/aktionsplan_anpassung_klimawandel_bf.pdf) (Letzter Zugriff: 14.04.2021)
- Bronto, V. C. & H. Bulkeley (2013): A survey of urban climate change experiments in 100 cities. In: Global environmental change, Heft 23/1, S. 92-102
- Bruns, J. & V. Simko (2017): Stable hotspot analysis for intra-urban heat islands. In: GI Forum 2017, Heft 5, S. 79-92
- Carmin, J., Dodman, D. & E. Chu (2013): Urban climate adaptation and leadership. From Conceptual Understanding to Practical Action. In: OECD Regional Development Working Papers, Heft 2013/26, OECD Publishing
- Climate Data (2021): Klima Darmstadt. Daten und Graphen zum Klima und Wetter in Darmstadt. Online unter <https://de.climate-data.org/europa/deutschland/hessen/darmstadt-2129/> (letzter Zugriff: 05.09.2024).
- Deutsches Klimaportal (2020): Stadtklima – Wie wir auch in Zukunft im Klima unserer Städte gut leben können.

[http://www.deutschesklimaportal.de/DE/Themen/3\\_Stadtklima/Stadtklima\\_no\\_de.html](http://www.deutschesklimaportal.de/DE/Themen/3_Stadtklima/Stadtklima_no_de.html), 08.07.2020

DRKZ – Deutsches Klimarechenzentrum (2022): Die SSP-Szenarien. Online unter: <https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien> (letzter Zugriff: 08.08.2022).

DWD – Deutscher Wetterdienst (2017): Kaltluftabflusssimulation mit KLAM\_21 für die Stadt Leipzig und Umgebung. Abteilung Klima- und Umweltberatung, Offenbach. Online unter: [https://static.leipzig.de/fileadmin/mediendatenbank/leipzig-de/Stadt/02.3\\_Dez3\\_Umwelt\\_Ordnung\\_Sport/36\\_Amt\\_fuer\\_Umweltschutz/Energie\\_und\\_Klima/Stadtklima/Gutachten\\_KLAM\\_21\\_Leipzig\\_Abgabe\\_m\\_Titel.pdf](https://static.leipzig.de/fileadmin/mediendatenbank/leipzig-de/Stadt/02.3_Dez3_Umwelt_Ordnung_Sport/36_Amt_fuer_Umweltschutz/Energie_und_Klima/Stadtklima/Gutachten_KLAM_21_Leipzig_Abgabe_m_Titel.pdf), Zugriff: 16.02.2022.

DWD (2020a): Stadtklima – die Städtische Wärmeinsel. <https://opendata.dwd.de/>, 21.11.2022

DWD (2020b): Stadtklima. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=10255>, 21.11.2022

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016): Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9 (5), 1937–1958. Online unter: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016> (letzter Zugriff: 08.08.2022).

Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N. & A. Christy (2015): NDVI: Vegetation change detection using remote sensing and gis – A case study of Vellore District. In: *Procedia Computer Science*, Heft 57, S. 1199-1210

Geißler & Dröscher (2017): Stadt Reutlingen – Gesamtstädtische Klimaanalyse unter besonderer Berücksichtigung der Luftreinhaltung.

Grimmond, S., Xu, T. & A. Baklanov (2014): Towards integrated urban weather, environment and climate services. In: *WMO Bulletin*, Heft 63/1, S. 10-14

Helbig (2019): Warum es auf der Erde wärmer wird. *Unterricht Biologie – Wissen vernetzen*. Heft Nr. 449. Online unter: <https://www.friedrich-verlag.de/biologie/oekologie/warum-es-auf-der-erde-waermer-wird-1838> (letzter Zugriff: 03.08.2020).

HLNUG (2022): ReKliES-HNR. Berechnung und Bereitstellung von Klimasimulationsdaten für hessische Naturräume.

Imhoff, M. L., Zhang, P., Wolfe, R. E. & L. Bounoua (2009): Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. In: *Remote sensing of environment*, Heft 114/3, S. 504-513

- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2007): Klimaänderung 2007. Synthesebericht. Stuttgart. Online unter <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/IPCC2007-SYR-german.pdf> (Letzter Zugriff 14.04.2021)
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2012): Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. Online unter: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX\\_Full\\_Report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf) (letzter Zugriff: 15.02.2023).
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. Online unter: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf) (letzter Zugriff: 15.02.2023).
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2014a): Klimaänderung 2014. Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Berlin. Online unter [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/AR5-WGII\\_SPMgerman.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/AR5-WGII_SPMgerman.pdf) (Letzter Zugriff 14.04.2021)
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2014b): Climate Change 2014: Impacts, adaption, and vulnerability. Kernbotschaften des Berichts. Yokohama. Online unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/ipcc\\_sachstandsbericht\\_5\\_teil\\_2\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ipcc_sachstandsbericht_5_teil_2_bf.pdf) (Letzter Zugriff 14.04.2021)
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2021a): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Yokohama. Online unter <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Letzter Zugriff 17.02.2022)
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2021b): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu & B. Zhou (Hrsg.)]. Cambridge University Press. In Press.

- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2022a): Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem & B. Rama (Hrsg.)]. Cambridge University Press. In Press
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change (2022b): Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.
- IPCC DATA DISTRIBUTION CENTRE (2024): Glossary R. [https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/glossary/glossary\\_r.html](https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/glossary/glossary_r.html), (letzter Zugriff: 01.09.2024).
- IW Consult (2024): Städteranking 2023: 71 deutsche Großstädte im Vergleich. Online unter <https://www.iwconsult.de/projekte/staedteranking-2023/> (letzter Zugriff: 05.09.2024).
- Kurmutz, U., Gude, M., Maercker, J., Knopf, D., Knetsch, S., Gebhardt, O., Kober, H., Lerm, M., Reinhardt, F., Sittig, Y. & B. Vetter (2012): Handbuch Klimawandelgerechte Stadtentwicklung für Jena. In: Schriften zur Stadtentwicklung, Heft 3, S. 1-156
- Kurmutz, U., Knopf, D., Maercker, J., Knetsch, S., Dr. Mann, M., Bischoff, S., Nozik, A. (2018): Grüne Klimaoasen im urbanen Stadtraum Jenas. S. 61
- Kuttler, W. (1997): Städtische Klimamodifikation. In: VDI-Berichte, Heft 1330. Düsseldorf: VDI-Verlag, S.87-108
- Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., ... & J. A. Sobrino (2013): Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. In: Remote sensing of environment, Heft 131, S. 14-37
- Meng, Q., Zhang, L., Sun, Z., Meng, F., Wang, L., & Y. Sun (2018): Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban main built-up area: A 12-year case study in Beijing, China. In: Remote Sensing of Environment, Heft 204, S. 826-837
- Mirzaei, P. A. (2015): Recent challenges in modeling of urban heat island. In: Sustainable Cities and Society, Heft 19, S. 200-206
- Moldenauer, A., Düring, I. & E. Nitsche (2017): Klimafunktions- und Planungshinweiskarte für die Stadt Chemnitz. Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. Kg.

- NABU Münster-Hessen (o. J.): Das Messeler Hügelland. Online unter <https://nabu-muenster-hessen.de/schutzgebiete/das-messeler-huegelland/> (letzter Zugriff: 05.09.2024).
- NOAA – National Oceanic & Atmospheric Administration (2024): Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. Online unter: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> (letzter Zugriff: 23.05.2024).
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & b. M. Sanderson (2016): The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9 (9), 3461–3482. Online unter: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>. (letzter Zugriff: 08.08.2022).
- Parlow, E. (2011): Besonderheiten des Stadtklimas. In: Gebhardt, H., Glaser, R., Radtke, U. & P. Reuber (Hrsg.): *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. Heidelberg: Spektrum, S. 287-291
- Rasul, A., Balzter, H., Smith, C., Remedios, J., Adamu, B., Sobrino, J., ... & Q. Weng (2017): A review on remote sensing of urban heat and cool islands. In: *Land*, Heft 6/2, 38, S. 1-10
- Roman, A. & U. Tudor. (2016): Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks. In *Landscape archaeology on the northern frontier of the roman empire at porolissum - an interdisciplinary research project*, Cluj Napoca: Mega Publishing House
- Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM\_21: Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 227*, 101 S.
- Stewart, I. D. & T. R. Oke (2012): Local climate zones for urban temperature studies. In: *Bulletin of the American Meteorological Society*, Heft: 93/12, S. 1879-1900
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2013): *Handbuch zur guten Praxis der Anpassung an den Klimawandel*. Dessau-Roßlau. Online unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/364/publikation/n/uba\\_handbuch\\_gute\\_praxis\\_web-bf\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/364/publikation/n/uba_handbuch_gute_praxis_web-bf_0.pdf) (Letzter Zugriff: 13.04.2021)
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2015a): *Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Online unter [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikation/n/monitoringbericht\\_2015\\_zur\\_deutschen\\_anpassungsstrategie\\_an\\_den\\_klimawandel.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikation/n/monitoringbericht_2015_zur_deutschen_anpassungsstrategie_an_den_klimawandel.pdf) (Letzter Zugriff: 15.04.2021)

- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2015b): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Online unter [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikation/n/climate\\_change\\_24\\_2015\\_vulnerabilitaet\\_deutschlands\\_gegenueber\\_dem\\_klimawandel\\_1.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikation/n/climate_change_24_2015_vulnerabilitaet_deutschlands_gegenueber_dem_klimawandel_1.pdf), (Letzter Zugriff: 15.04.2021)
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Online unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das\\_monitoringbericht\\_2019\\_barrierefrei.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf) (Letzter Zugriff: 15.04.2021)
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Kurzfassung.
- UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022): Klimarisikoanalysen auf kommunaler Ebene. Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der ISO 14091. Online unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikation/n/2022\\_uba-fachbroschuere\\_kra\\_auf\\_kommunaler\\_ebene.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikation/n/2022_uba-fachbroschuere_kra_auf_kommunaler_ebene.pdf) (Letzter Zugriff: 15.08.2022)
- VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5. Umweltmeteorologie: Lokale Kaltluft.
- VDI (2015): VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lüfthygienekarten für Städte und Regionen.
- Weng, Q. (2009): Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Heft 64/4, S. 335-344
- Wissenschaftsstadt Darmstadt (o. J.): Standort. Online unter <https://www.darmstadt.de/standort> (letzter Zugriff: 05.09.2024).
- Wikipedia (2024): Darmstadt. Online unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Darmstadt> (letzter Zugriff: 05.09.2024).
- Zhou, D., Bonafoni, S., Zhang, L. & R. Wang (2017): Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban agglomeration area in East China. In: Science of the Total Environment, Heft 628, S. 415-429
- Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., ... & J. A. Sobrino (2019): Satellite remote sensing of surface urban heat islands: progress, challenges, and perspectives. In: Remote Sensing, Heft 11/1, S. 48.



## **Anhang**

**Klimadiagramme der DWD-Messreihen für weitere Klimakennzahlen**

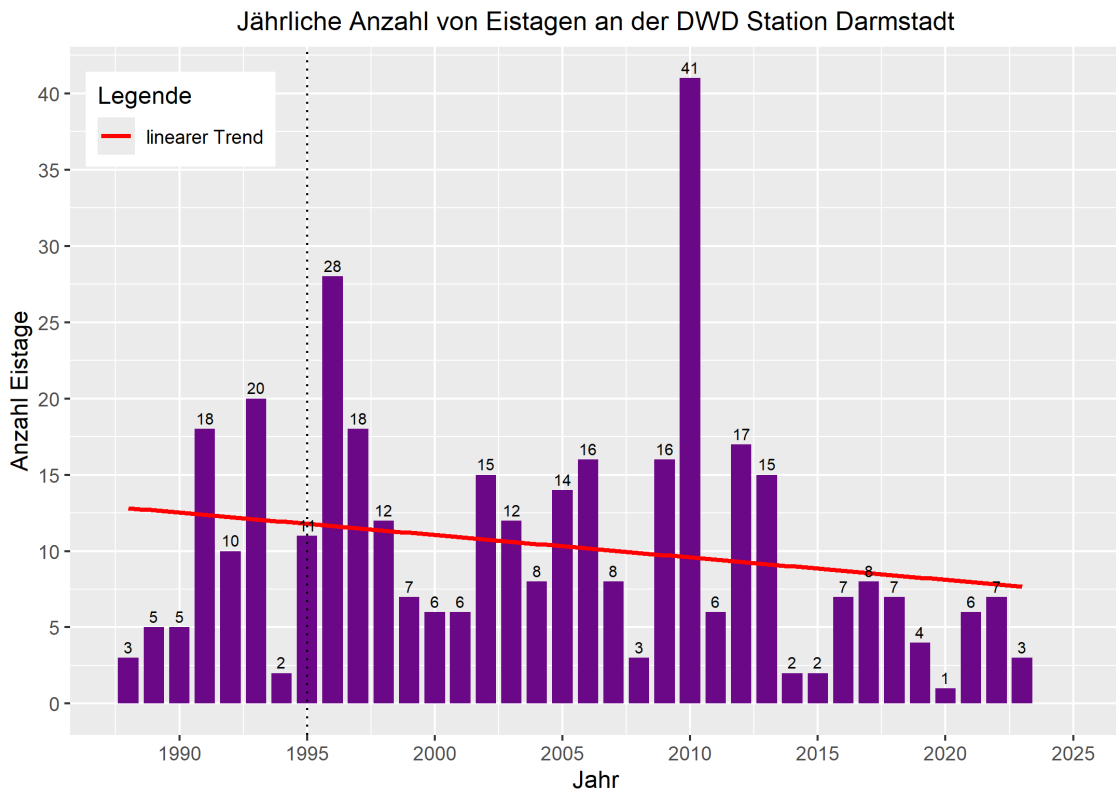


Abbildung 49: Jährliche Anzahl an Eistagen (Tage mit  $T_{max} < 0\text{ °C}$ ) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

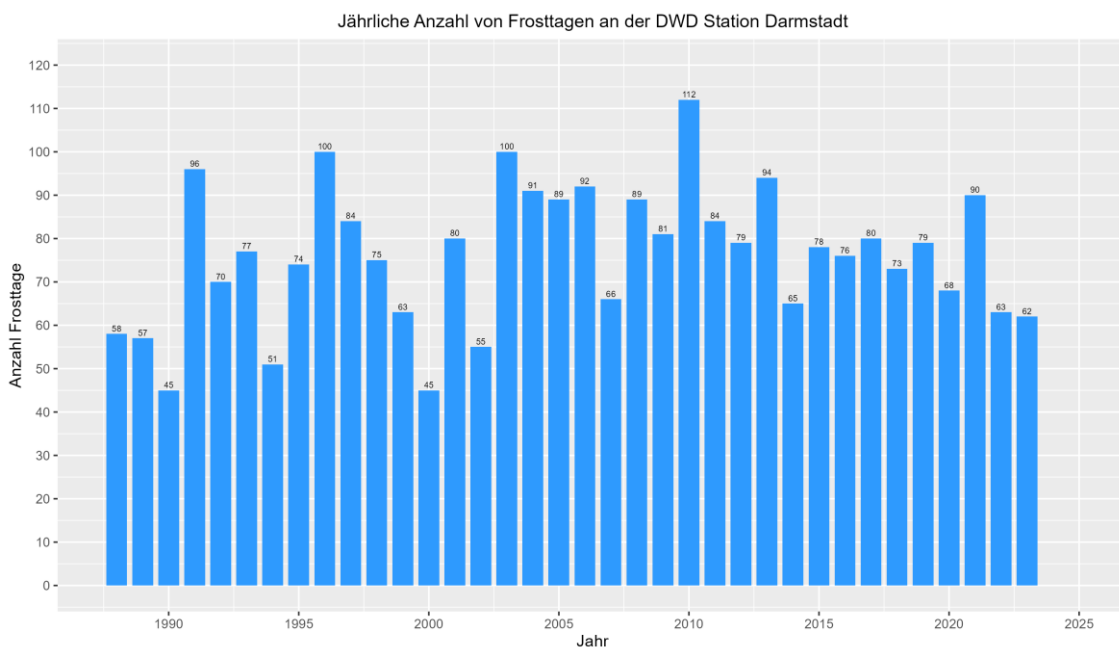


Abbildung 50: Jährliche Anzahl an Frosttagen (Tage mit  $T_{min} < 0\text{ °C}$ ) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

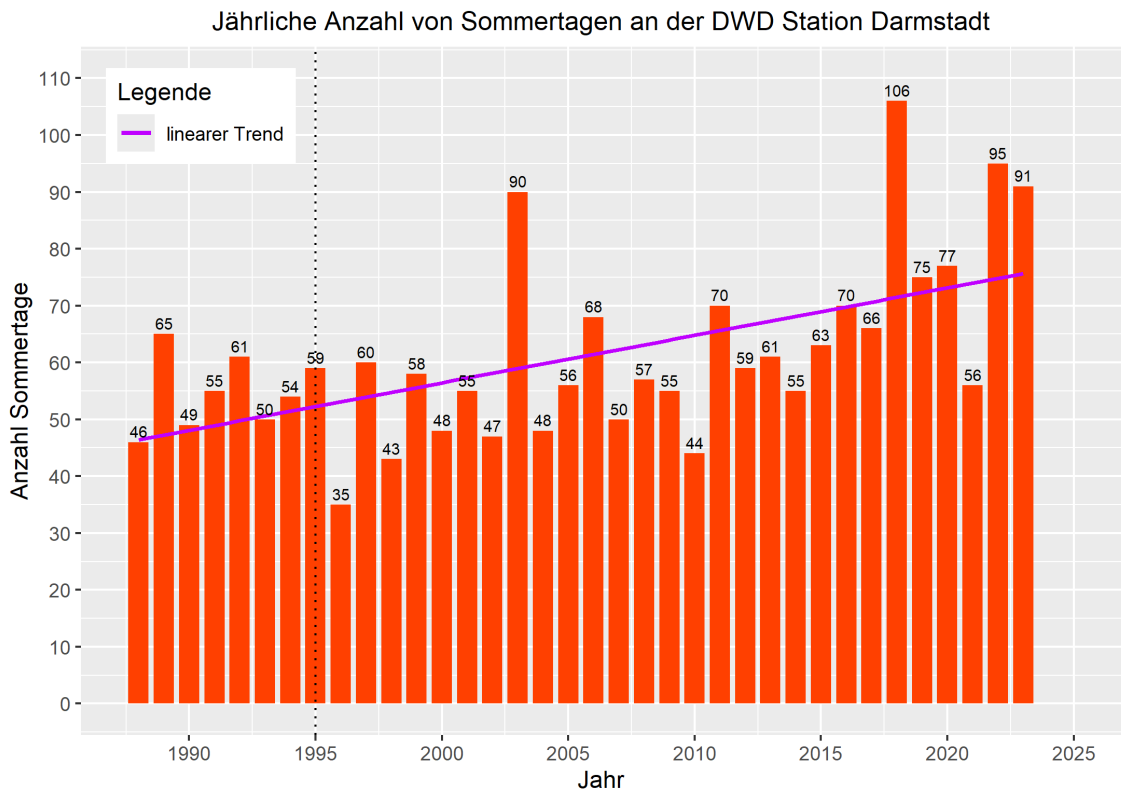
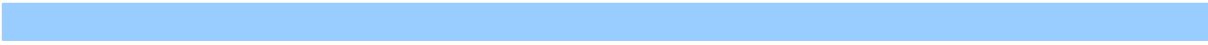


Abbildung 51: Jährliche Anzahl an Sommertagen (Tage mit  $T_{max} \geq 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

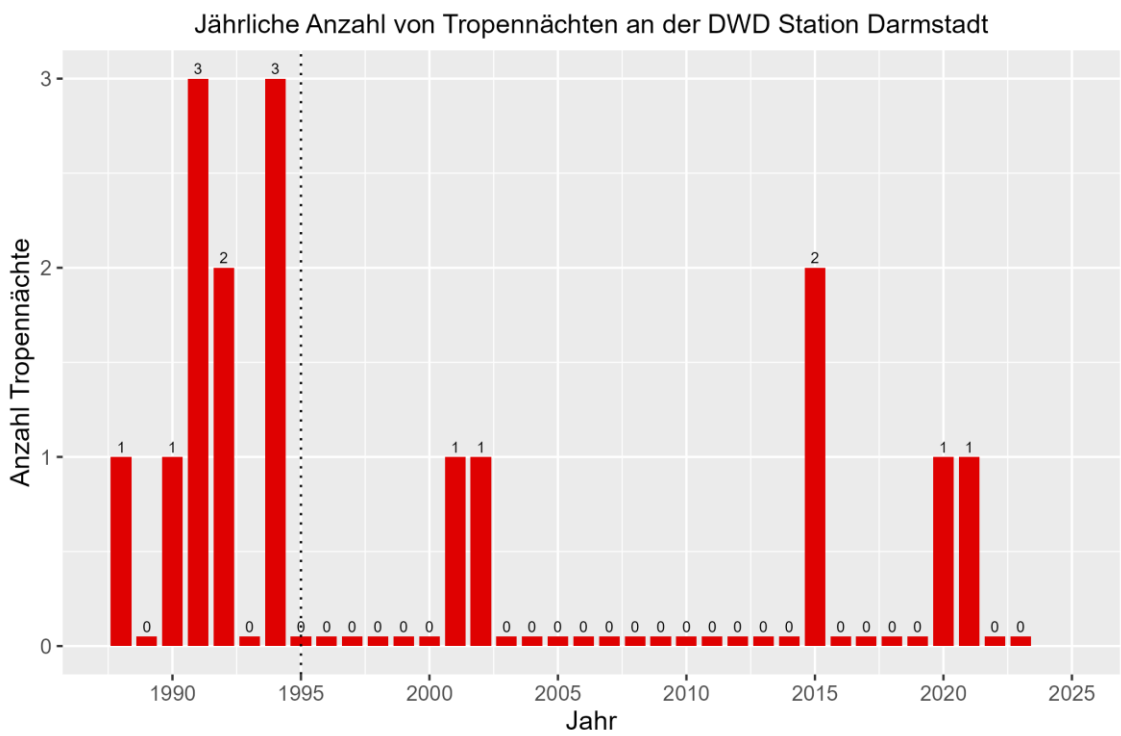


Abbildung 52: Jährliche Anzahl an Tropennächten (Nächte mit  $T_{min} \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Aufgrund der geringen Absolutwerte sowie eines Standortwechsels der Station im Jahr 1995 ist die im Trend dargestellte Abnahme hier nicht als aussagekräftig anzusehen. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

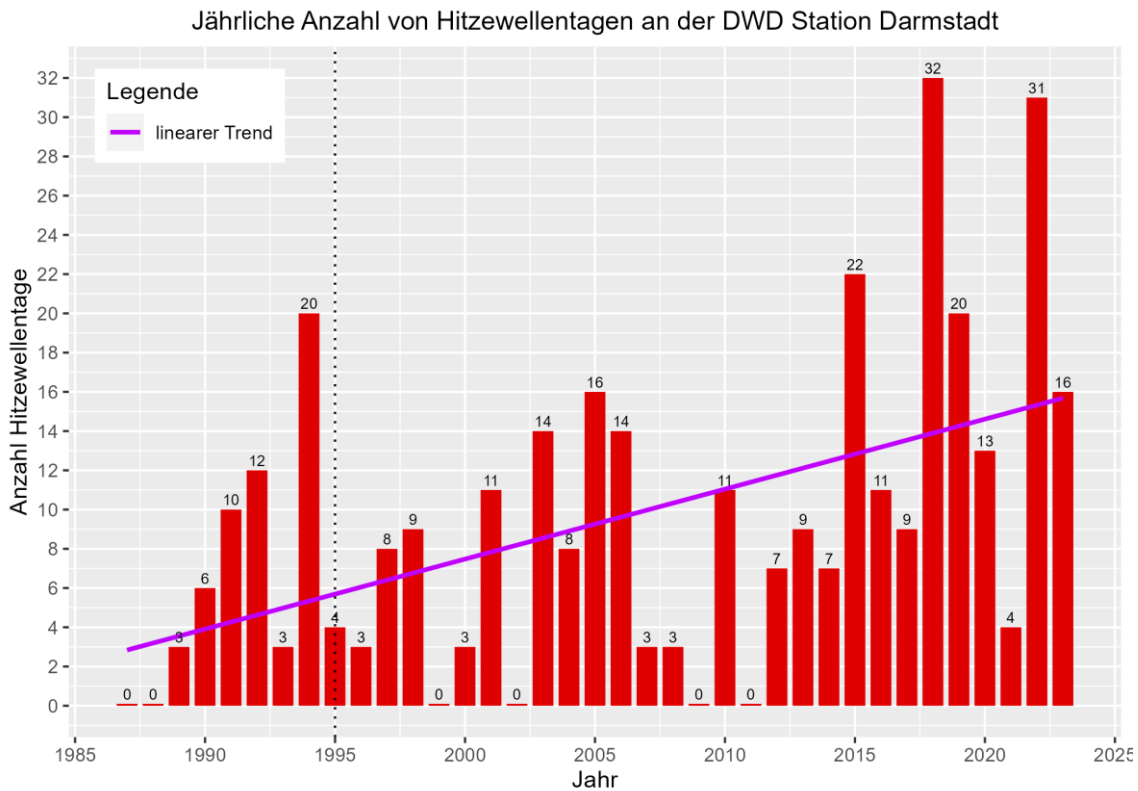


Abbildung 53: Jährliche Anzahl an Hitzewellentagen (eine Hitzewelle wird durch mindestens drei aufeinanderfolgende Hitzetage definiert) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

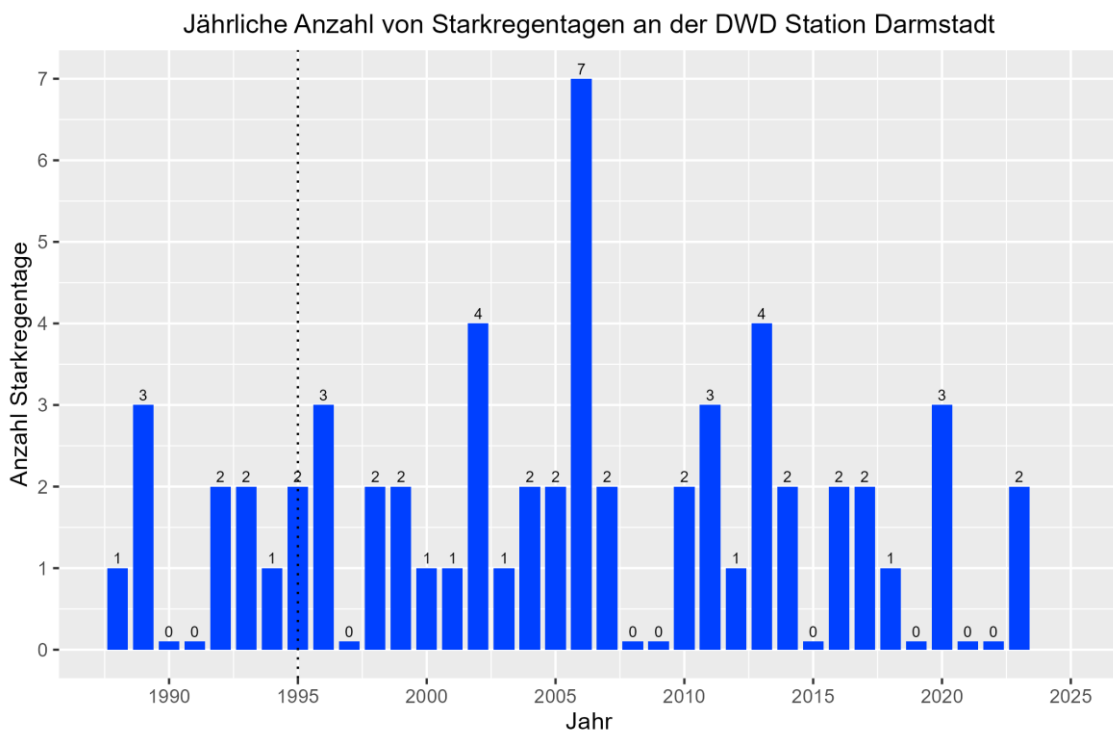


Abbildung 54: Jährliche Anzahl an Starkregentagen (Tage mit  $\geq 20$  mm Niederschlag) an der DWD-Messstation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

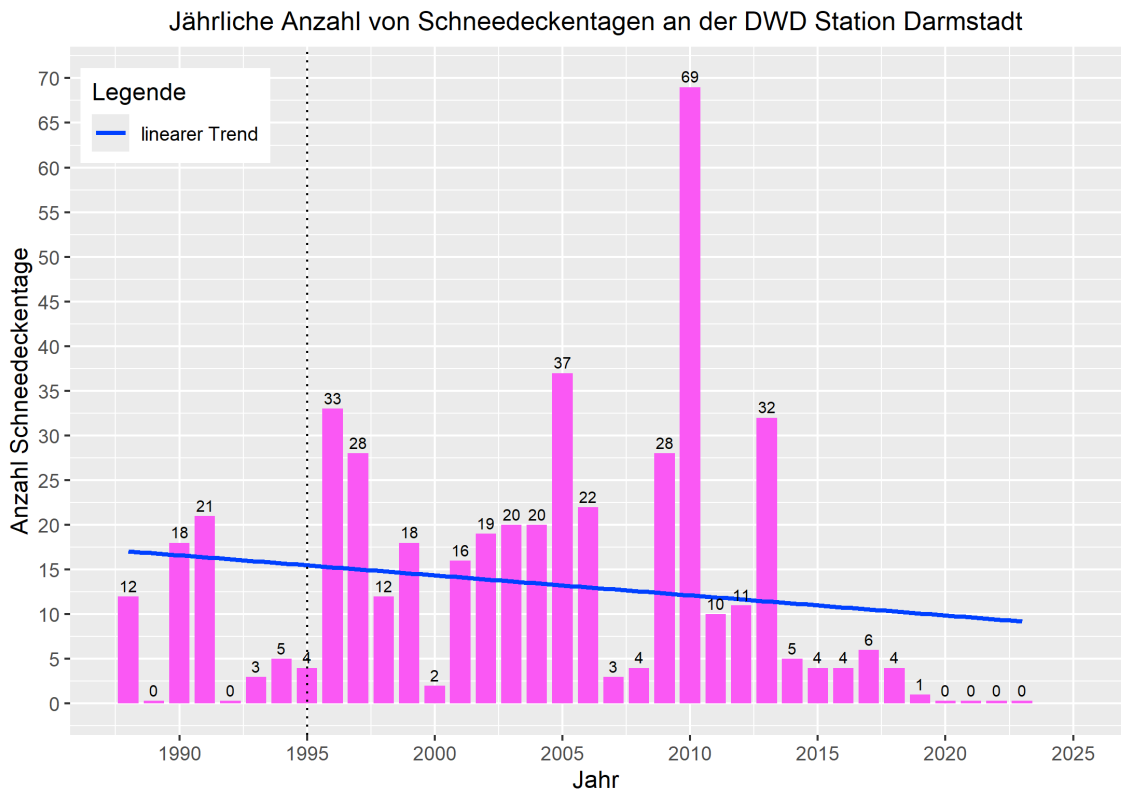
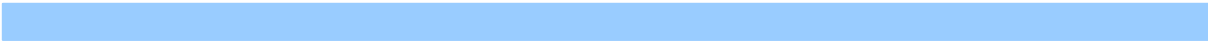


Abbildung 55: Jährliche Anzahl an Schneedeckentagen (Tage mit Schneebedeckungsgrad > 0,5) an der DWD-Messtation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

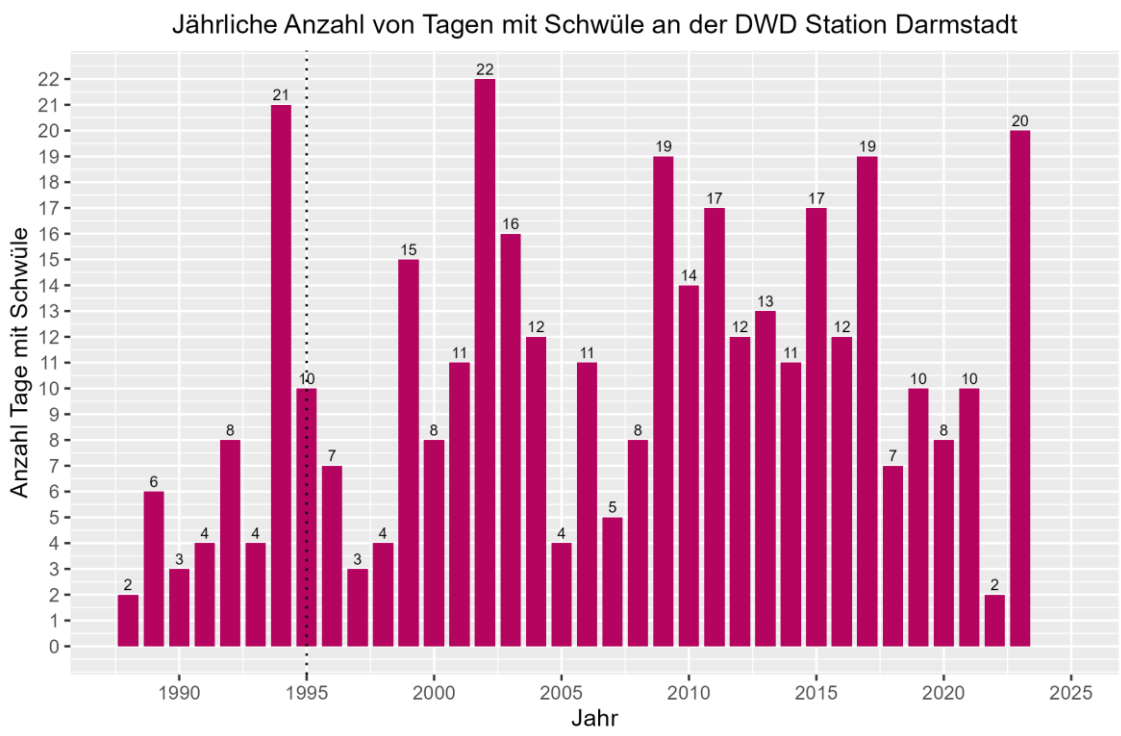
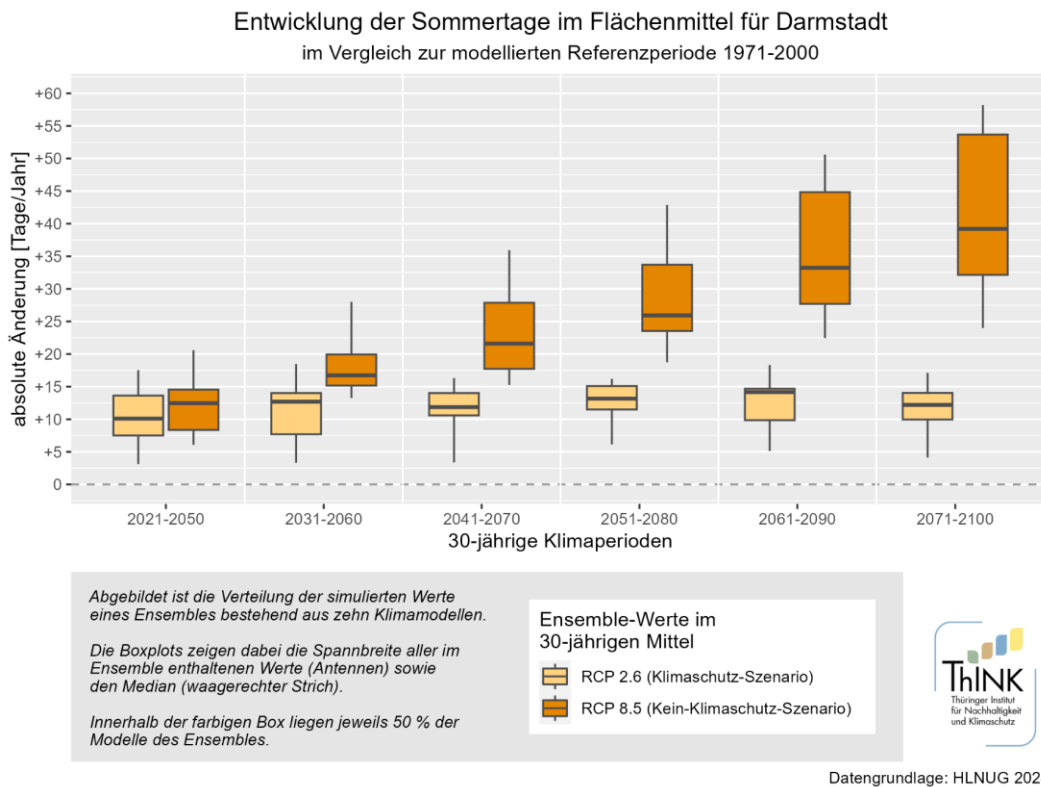
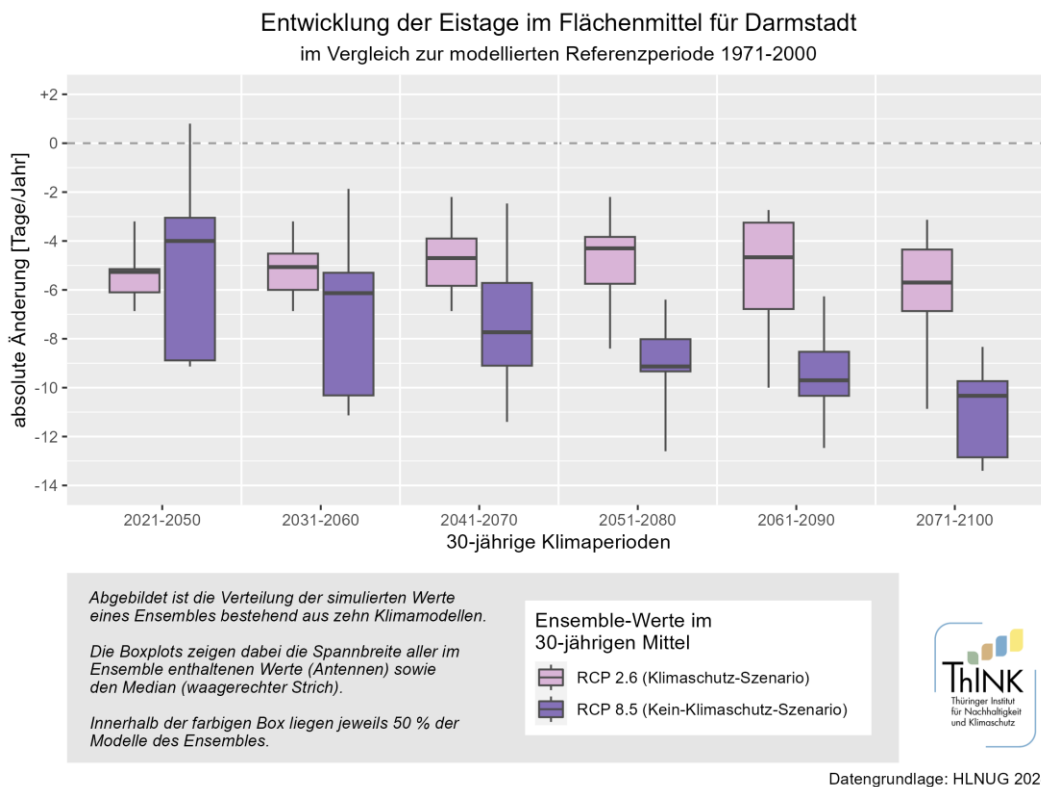


Abbildung 56: Jährliche Anzahl an Tagen mit Schwüle (Tage mit Dampfdruck  $\geq 18.8$  hPa) an der DWD-Messtation Darmstadt für den Zeitraum 1988-2023. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: DWD.

Diagramme der Klimaprojektionen für weitere Klimakennzahlen:



**Abbildung 57: Projizierte Änderungen der Sommertage (Tage mit  $T_{max} \geq 25 \text{ °C}$ ) im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.**



**Abbildung 58: Projizierte Änderungen der Eistage (Tage mit  $T_{max} < 0 \text{ °C}$ ) im Flächenmittel für Darmstadt bis 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000. Quelle: eigene Erstellung, Datengrundlage: HLNUG.**