

Stadtklimaprojektionen der Häufigkeit von Temperaturkenntagen als Grundlage für die Anpassung an den Klimawandel in Leverkusen

Autor:
Dr. Meinolf Koßmann

Deutscher Wetterdienst
Abteilung Klima- und Umweltberatung
Offenbach

25.10.2024

Abbildung Titelseite:

Analyse (1971-2000) und Projektion für das Klimaszenario RCP8.5 (2031-2060 und 2071-2100) der mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) in Leverkusen. Die RCP8.5-Karten in der Mitte und rechts oben zeigen den mittleren Wert (Medianwert, 50. Perzentil) aus einem Ensemble von 21 Stadtklimaprojektionen für dieses Szenario. Die Abbildung der Titelseite ist eine Zusammenschau von Abbildung 11, Abbildung 17 und Abbildung 23 dieses Berichts.

Impressum

Deutscher Wetterdienst
Dr. Meinolf Koßmann
Abt. Klima- und Umweltberatung
Stadt- und Regionalklimatologie
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach am Main

INHALT		Seite
Zusammenfassung		5
1	Einleitung	7
2	Methodik und Daten	8
2.1	Thermische Klimaindizes	8
2.2	Stadtklimasimulationen	8
2.2.1	Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3	9
2.2.2	Das Modellgebiet	9
2.2.3	Die Modelleingangsdaten	11
2.3	Quadermethode	15
2.4	Klimabeobachtungen und regionale Klimaprojektionen	17
3	Ergebnisse	19
3.1	Zeitraum 1971-2000 (Vergangenheit)	19
3.2	Zeitraum 2031-2060 (nahe Zukunft)	22
3.3	Zeitraum 2071-2100 (ferne Zukunft)	28
4	Schlussbemerkungen	30
Literaturverzeichnis		32
Abbildungsverzeichnis		35
Tabellenverzeichnis		38

Zusammenfassung

In Deutschland ist die Kölner Bucht eine Region mit häufigem Auftreten von hohen Tagesmaximum- und Tagesminimumtemperaturen im Sommerhalbjahr. Aufgrund des städtischen Wärmeinseleffekts ist zudem in Städten wie Leverkusen die jährliche Häufigkeit von Sommertagen ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$), Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) und Tropennächten ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$) deutlich gegenüber dem Umland erhöht. Auswertungen von Klimaprojektionen mit regionalen Klimamodellen zeigen, dass durch den Klimawandel die Häufigkeit des Auftretens dieser Temperaturkenntage in diesem Jahrhundert weiter zunehmen wird. Die regionalen Klimaprojektionen berücksichtigen aber noch nicht den Einfluss der städtischen Überwärmung.

Diese Studie stellt für die Stadt Leverkusen eine Datengrundlagen für die klimaangepasste Stadtplanung auf Quartiersebene zur Verfügung. Hierzu werden die, im aktuellen Deutschen Klimaatlas bereits auf eine Rasterweite von 5 km räumlich verfeinerten, regionalen Klimaprojektionen des Klimaszenarios RCP8.5 mit einem dynamisch-statistischen Verfahren (Quadermethode) auf eine Rasterweite von 100 m verfeinert. Zur Berücksichtigung von Stadtklima Effekten und der lokalen Geländeform werden Ergebnisse von Stadtklimasimulationen mit dem Computermodell MUKLIMO_3 verwendet. Aus dem genutzten Ensemble regionaler Klimaprojektionen ergibt sich durch die Anwendung der Quadermethode ein Ensemble von Stadtklimaprojektionen der genannten Temperaturkenntage mit einer Rasterweite von 100 m. Durch Perzentil-Auswertungen kann außerdem die Spannbreite der für das Klimaszenario RCP8.5 zu erwartenden Zunahme der Temperaturkenntage analog zum Deutschen Klimaatlas durch die Werte für das 15., das 50., und das 85. Perzentil des Ensembles beschrieben werden. Entsprechend der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 des Umweltbundesamts (KWRA, 2021) entspricht die Verwendung des RCP8.5 Szenarios dem Vorsorgeprinzip eine ausreichende Dimensionierung möglicher Anpassungsmaßnahmen sicherzustellen. Hierbei repräsentiert das 15. Perzentil den optimistischen Fall, das 85. Perzentil den pessimistischen Fall und das 50. Perzentil den mittleren Fall (Median).

Im Vergleich zum vergangenen Zeitraum 1971-2000 sind im Stadtgebiet durch den regionalen Klimawandel bis 2031-2060 für das Klimaszenario RCP8.5 Zunahmen der Anzahl Sommertage um 50-100 % und der Anzahl Heißen Tage um etwa 100 % zu erwarten. In den dicht bebauten Gebieten ergeben sich Zunahmen der Anzahl Tropennächte von 100-200 %.

Bis Ende des Jahrhunderts wird die mittlere jährliche Anzahl an Temperaturkenntagen noch weiter zunehmen. Für das Klimaszenario RCP8.5 werden für 2071-2100 im Vergleich zu 1971-2000 Zunahmen der Anzahl Sommertag um etwa 150 % und der Anzahl Heißen Tage um 200-300 % erwartet. In dicht bebauten Siedlungsgebieten ergeben sich etwa 400 % mehr Tropennächte pro Jahr.

Die bis Mitte und bis Ende des Jahrhunderts zu erwartende starke bis sehr starke Klimaerwärmung in Leverkusen erfordert möglichst frühzeitige und umfassende Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel. Die Ergebnisdaten dieser Studie bilden eine Datengrundlage zur Identifizierung von Quartieren, in denen der Bedarf zur Anpassung an Hitze besonders hoch ist. Planungen für neue Bebauung und für die Verdichtung von Bebauung sollten von Beginn an Maßnahmen beinhalten zur Kompensation oder Minimierung von zusätzlicher Hitzebelastung durch die geplanten Bauvorhaben.

1 Einleitung

Nach heutigem Kenntnisstand wird sich die seit Ende des 19ten Jahrhunderts in Mitteleuropa beobachtete Klimaerwärmung bis zum Ende dieses Jahrhunderts fortsetzen (Brienen et al., 2020; IPCC, 2023; Deutscher Klimaatlas, 2024). Urbane Räume sind aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte und der Konzentration von kritischen Infrastrukturen bei der Betrachtung des Klimawandels besonders zu berücksichtigen und stehen im Fokus der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (BMUV, 2008; BMUV, 2024). Das Klima in Städten unterscheidet sich vom Klima im Umland und ist aufgrund der dichten Bebauung und der starken Flächenversiegelung insbesondere durch höhere Lufttemperaturen gekennzeichnet. Diese Überwärmung wird als städtischer Wärmeinseleffekt bezeichnet. In großen Städten kann der Temperaturunterschied bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen mehrere Kelvin¹ betragen (Oke et al., 2017; Kuttler und Weber, 2023) und nachts Werte bis zu etwa 10 Kelvin erreichen (LANUV, 2013). Bei Hitzelagen verstärkt der städtische Wärmeinseleffekt die Risiken für die menschliche Gesundheit, die Umwelt und die Infrastruktur. Eine klimaangepasste Stadtentwicklung ist bestrebt diese Risiken zu verringern. Kommunen benötigen hierzu eine räumlich hoch aufgelöste Datengrundlage zur Beschreibung des aktuellen Stadtklimas und seiner für die kommenden Jahrzehnte zu erwartenden Veränderung. Hochaufgelöste Daten zum Klima in Städten können durch räumliche Verfeinerung (Downscaling) regionaler Klimabeobachtungen oder regionaler Klimasimulationen berechnet werden.

Ziel dieser Studie und der begleitenden Abgabe von Ergebnisdaten an die Stadt Leverkusen ist es Rasterdaten von Lufttemperaturindizes für vergangene und zukünftige 30-jährige Zeiträume als Datengrundlage für die klimaangepasste Stadtentwicklung bereitzustellen. Da auch eine Anfrage für eine Datengrundlage zur klimaangepassten Stadtplanung in Köln vorliegt, wird das Modellgebiet für die Stadtklimasimulationen so gewählt, dass die Ergebnisdaten mit einer Rasterweite von 100 m auch das Stadtgebiet von Köln abdecken.

In Kapitel 2 dieses Berichts werden die Methodik und die verwendeten Daten der Untersuchung beschrieben. Kapitel 3 präsentiert die wesentlichen Ergebnisse der Studie, insbesondere Karten der mittleren jährlichen Häufigkeit der Temperaturkentage für 30-jährige Zeiträume. Diesen Kapiteln folgen Schlussbemerkungen sowie Verzeichnisse der zitierten Literatur und der Abbildungen und Tabellen des Berichts.

¹ Temperaturdifferenzen haben die physikalische Einheit Kelvin (K), z. B. beträgt zwischen 9 Grad Celsius und 10 Grad Celsius die Differenz 1 Kelvin.

2 Methodik und Daten

2.1 Thermische Klimaindizes

Die sommerlichen Temperaturverhältnisse in Leverkusen und ihre projizierte Veränderung durch den Klimawandel, werden als 30-jährige Mittelwerte der jährlichen Anzahl von Temperaturkenntagen für die Zeiträume 1971-2000 (Vergangenheit), 2031-2060 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) beschrieben. Die Temperaturkenntage basieren auf Schwellenwerten des Tagesmaximums der Lufttemperatur (T_{\max}) beziehungsweise des Tagesminimums der Lufttemperatur (T_{\min}). Berechnet werden die mittleren jährlichen Häufigkeiten von Sommertagen ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$), Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) und Tropennächten ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$).

2.2 Stadtklimasimulationen

In diesem Unterkapitel wird die Methodik beschrieben, mit der die 100 m Rasterdaten der Temperaturkenntage für das Stadtgebiet berechnet werden (Abbildung 1). Es umfasst kurze Beschreibungen des verwendeten Stadtklimamodells MUKLIMO_3, des Modellgebiets und seiner benötigten Eingangsdaten. Die Downscaling Methode (Quadermethode) sowie die verwendeten Klimabeobachtungen und regionalen Klimasimulationen werden in den Unterkapiteln 2.3 und 2.4 beschrieben.

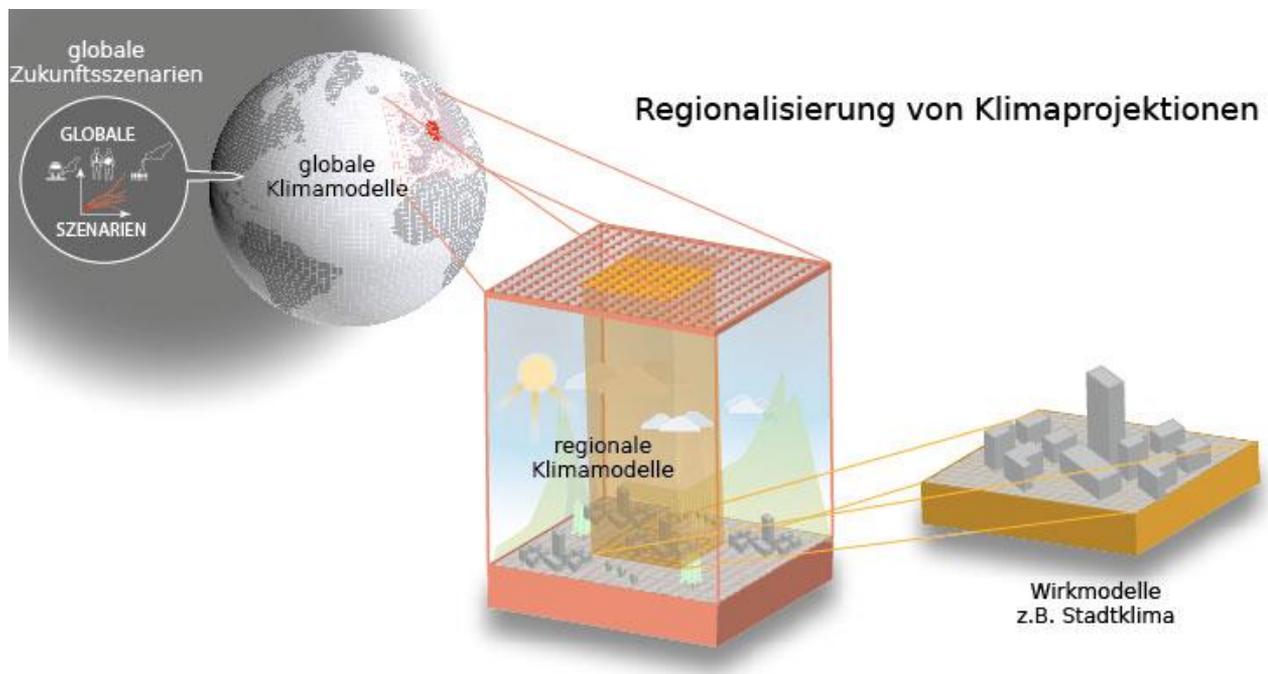


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Downscaling (d. h. der räumlichen Verfeinerung) von globalen Klimasimulationen, deren Ergebnisse als Antriebsdaten (Randwerte) von regionalen Klimasimulationen verwendet werden (dynamisches Downscaling). Die Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen dienen wiederum als Eingangsdaten für das dynamisch-statistische Downscaling auf das Stadtgebiet mit der Quadermethode. ©DWD.

2.2.1 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3

Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) des Deutschen Wetterdienstes wurde speziell zur Untersuchung stadtklimatologischer und geländeklimatologischer Fragestellungen entwickelt (Sievers und Zdunkowski, 1986; Sievers, 1990, 1995, 2012, 2016). Basierend auf den Prinzipien der Massenerhaltung, Energieerhaltung und Impulserhaltung berechnet MUKLIMO_3 auf einem 3-dimensionalen Rechengitter den Tagesgang des Windes, der Lufttemperatur und -feuchtigkeit, der solaren und thermischen Strahlung, der Temperatur und des Feuchtegehalts im Erdboden sowie weiterer relevanter Parameter.

Die räumliche Auflösung des Modells liegt typischerweise zwischen wenigen Metern und mehreren hundert Metern. Die Rechengitterweiten können im Modellgebiet horizontal und vertikal variiert werden, wobei typischerweise in Bodennähe und in dem im Mittelpunkt stehenden Teil des Untersuchungsgebiets die höchste räumliche Auflösung gewählt wird. Die für Modellsimulationen benötigten Anfangs- und Randwerte für das Modellgebiet werden durch eine zusätzlich ablaufende 1-dimensionale MUKLIMO_3 Simulation mit ländlicher Landnutzung bestimmt. Simulationen mit MUKLIMO_3 werden meist für Zeiträume zwischen mehreren Stunden und einigen Tagen durchgeführt. Da die Modellphysik von MUKLIMO_3 keine Niederschlagsbildung enthält, kann das Modell nur für niederschlagsfreie Situationen eingesetzt werden. Neben den meteorologischen Eingangsgrößen benötigt das Modell für jede Gitterzelle die Geländehöhe und Informationen zur Art der Landnutzung und deren physikalischen Eigenschaften.

Die MUKLIMO_3 Simulation in bebauten Gebieten berücksichtigt zusätzlich zu den im Umland relevanten Prozessen die Reflexion und Absorption von Strahlung durch die Gebäudeoberflächen (Sievers und Früh, 2012) sowie die Speicherung von Wärme in den Gebäuden. In Analogie zum Ansatz von Gross (1989) erfolgt die Beschreibung der Klassen mit Bebauung anhand des mittleren Gebäudegrundflächenanteils, der mittleren Gebäudehöhe, des mittleren Wandflächenindex² und des mittleren Versiegelungsanteils der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden. Die Beschreibung des Wärme- und Feuchtehaushalts des Bodens erfolgt nach der Methode von Sievers et al. (1983). Das Vegetationsmodell basiert auf einem erweiterten Ansatz nach Siebert et al. (1992). Weitere Details zum Modell MUKLIMO_3 finden sich in Früh et al. (2011) und Noppel (2017). Mit einer neuen Erweiterung von MUKLIMO_3 wurde in den Simulationen die räumliche Variabilität der Bodenart berücksichtigt. Die Bodenarten entsprechen den Definitionen von Pielke (1984) und wurden um eine 12. Bodenart Torf erweitert (Sievers, 2016).

2.2.2 Das Modellgebiet

Um alle siedlungsrelevanten Kaltlufteinzugsgebiete für die Städte Leverkusen und Köln im Bereich der Kölner Bucht zu erfassen, wurde ein 64 km x 68 km großes Gesamtgebiet für die Simulationen mit MUKLIMO_3 festgelegt, dessen Südwestecke die ETRS89 UTM32 (EPSG:25832) Koordinaten $x=333365$ und $y=5605154$ hat (Abbildung 2). Im nordwestlichen Bereich des Modellgebiets zeigt der schwarze Rahmen in Abbildung 2 das 28 km x 31 km große Kerngebiet, in dem die Modellrechnungen mit einer konstanten horizontalen Gitterweite von 100 m durchgeführt wurden. Die

² Der dimensionslose Wandflächenindex ist definiert als die Summe der Außenwandflächen pro Gebäudegrundfläche.

Südwestecke des Kerngebiets hat die Koordinaten $x=343365$, $y=5632154$. Außerhalb des Kerngebiets wurde die horizontale Gitterweite schrittweise auf 500 m vergrößert.

In vertikaler Richtung hat das orthogonale Gitter in den untersten 280 m (ausgehend von der niedrigsten Geländehöhe im Modellgebiet) eine Gitterweite von 10 m. Darüber nimmt die vertikale Gitterweite bis zum Oberrand des 690 m hohen 3-dimensionalen Modellgebiets schrittweise von 10 m auf 60 m zu. Bei weiterer schrittweiser Streckung der vertikalen Gitterweite bis auf 150 m reicht das 1-dimensionale Vorschaltmodell von MUKLIMO_3 bis zu einer Höhe von 1880 m. Zur Optimierung der Computerrechenleistung der Stadtklimasimulationen wurden Geländevertiefungen im Rheinischen Braunkohlerevier auf die maximale Tiefe von -10 m über NHN³ begrenzt. Die Bodenfelder der MUKLIMO_3 Ergebnisse werden in 5 m über Grund ausgegeben.

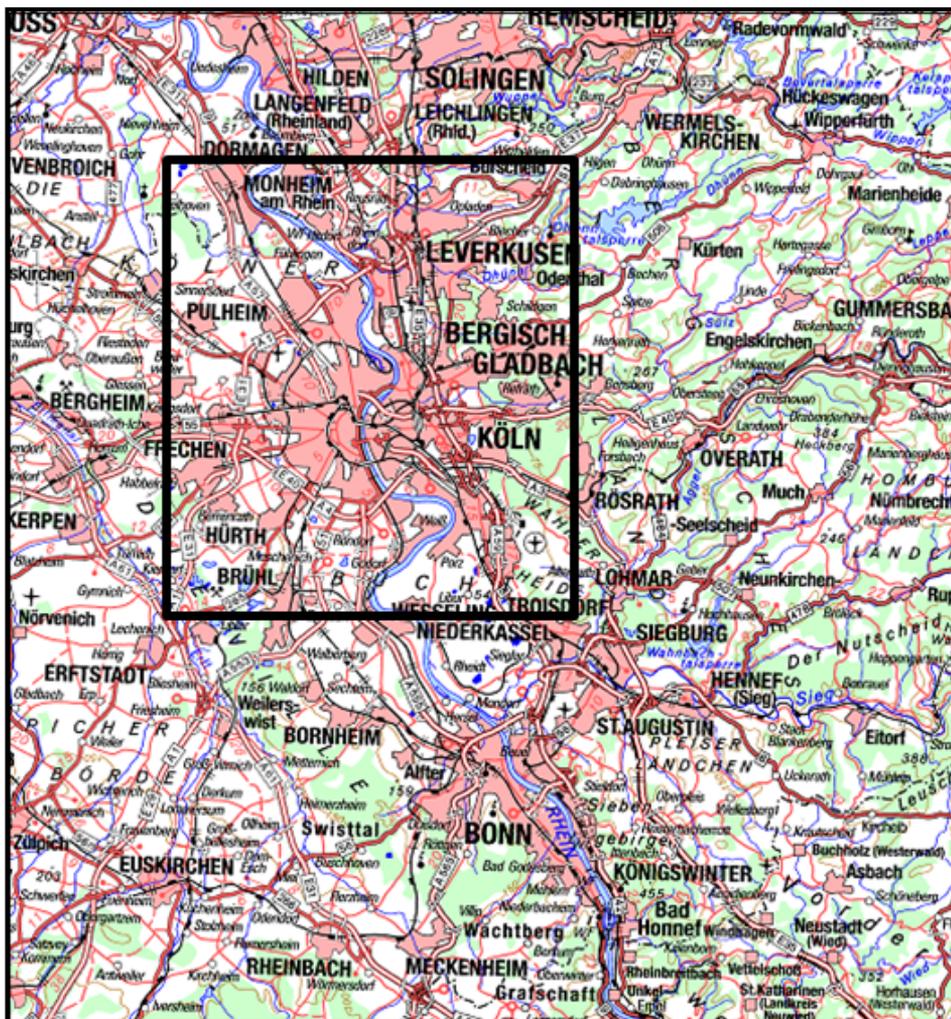


Abbildung 2: Topographische Karte des 64 km x 68 km großen Gesamtmodellgebiets (EPSG:25832 Koordinaten der Südwestecke: $x=333365$ und $y=5605154$). Der schwarze Rahmen zeigt das 28 km x 31 km große Kerngebiet in dem die Rasterweite der Stadtklimasimulationen 100 m beträgt. © GeoBasis-DE / BKG 2021.

³ Normalhöhennull (NHN): Höhe über dem Meeresspiegel

2.2.3 Die Modelleingangsdaten

Die für das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 benötigten Geodaten (z. B. Landnutzung, Gebäudeparameter, Bodenarten) wurden für die Stadtgebiete Leverkusen und Köln durch die beiden Kommunen bereitgestellt, zum einen für den Ist-Zustand (IST) als auch für einen möglichen Plan-Zustand (ZUK). Außerhalb der Stadtgebiete wurden Geodaten des Europäischen Copernicus Land Monitoring Service⁴ und Gebäudedaten (LoD1) des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) verwendet (Heene et al., 2018). Für die Geländehöhe und die Bodenart außerhalb der Stadtgebiete wurden Daten des Open Data Dienstes⁵ des Landes Nordrhein-Westfalen verwendet.

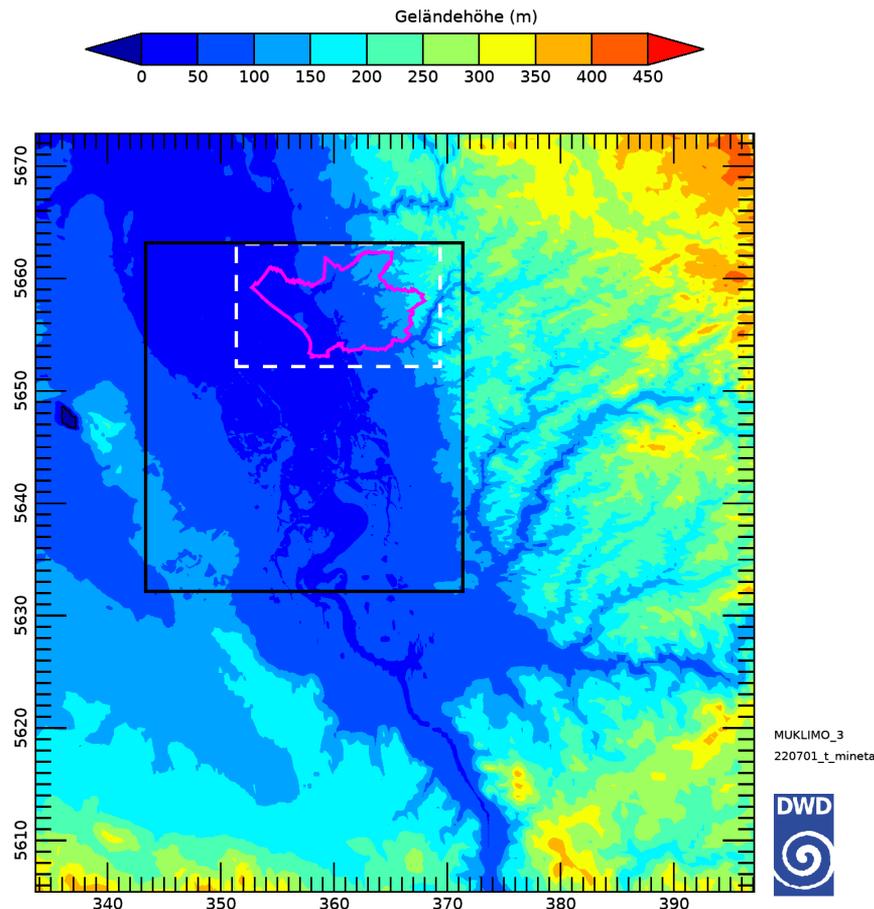


Abbildung 3: Geländehöhe (m ü. NHN) im 64 km x 68 km großen MUKLIMO_3 Modellgebiet. Die Stadtgrenze ist in magenta Farbe eingezeichnet. Der schwarze Rahmen kennzeichnet das 28 km x 31 km große Kerngebiet in dem die Rasterweite der Stadtklimasimulationen 100 m beträgt. Der weiße, gestrichelte Rahmen zeigt das 18 km x 11 km große Auswerteggebiet für die Stadt Leverkusen.

Die Karte der Geländehöhe (Abbildung 3) zeigt die Lage der Stadt Leverkusen in der Kölner Bucht, die einen nord-nordwestlich orientierten, trichterförmigen Einschnitt ins Mittelgebirgsland bildet. Die Talsohle der Kölner Bucht weist Höhen um 50 m über NHN auf und hat in nord-nordwestlicher Richtung ein Gefälle von etwa 1,2 m pro Kilometer. Südwestlich von Leverkusen erreicht der linksrheinische Höhenzug Ville Höhen zwischen 100 und etwa 200 m über NHN. Höhere Mittelgebirge

⁴ Copernicus Land Monitoring Service: [Link zur Internetseite](#)

⁵ Open NRW – Open Data: [Link zur Internetseite](#)

umschließen im Modellgebiet die Kölner Bucht im Nordosten (Bergisches Land), im Südosten (Westerwald und Siebengebirge) und im Süden und Südwesten (Eifel).

Die in Abbildung 4 dargestellten Landnutzungsklassifikationen des Amtlichen Liegenschaftskatasters (ALK) innerhalb von Leverkusen und Köln sowie des Copernicus Urban Atlas (UA) außerhalb der Städte umfassen 32 Klassen von denen 9 Klassen durch Bebauung geprägt sind (Klassen Nr. 6 bis 19). Die Bodenarten weisen im Stadtgebiet von Leverkusen eine hohe räumliche Variabilität auf, wobei Sand (1), lehmiger Sand (2), sandiger Lehm (3), schluffiger Lehm (4) und Lehm (5) die im Wesentlichen vorkommenden Bodenarten sind (Abbildung 5).

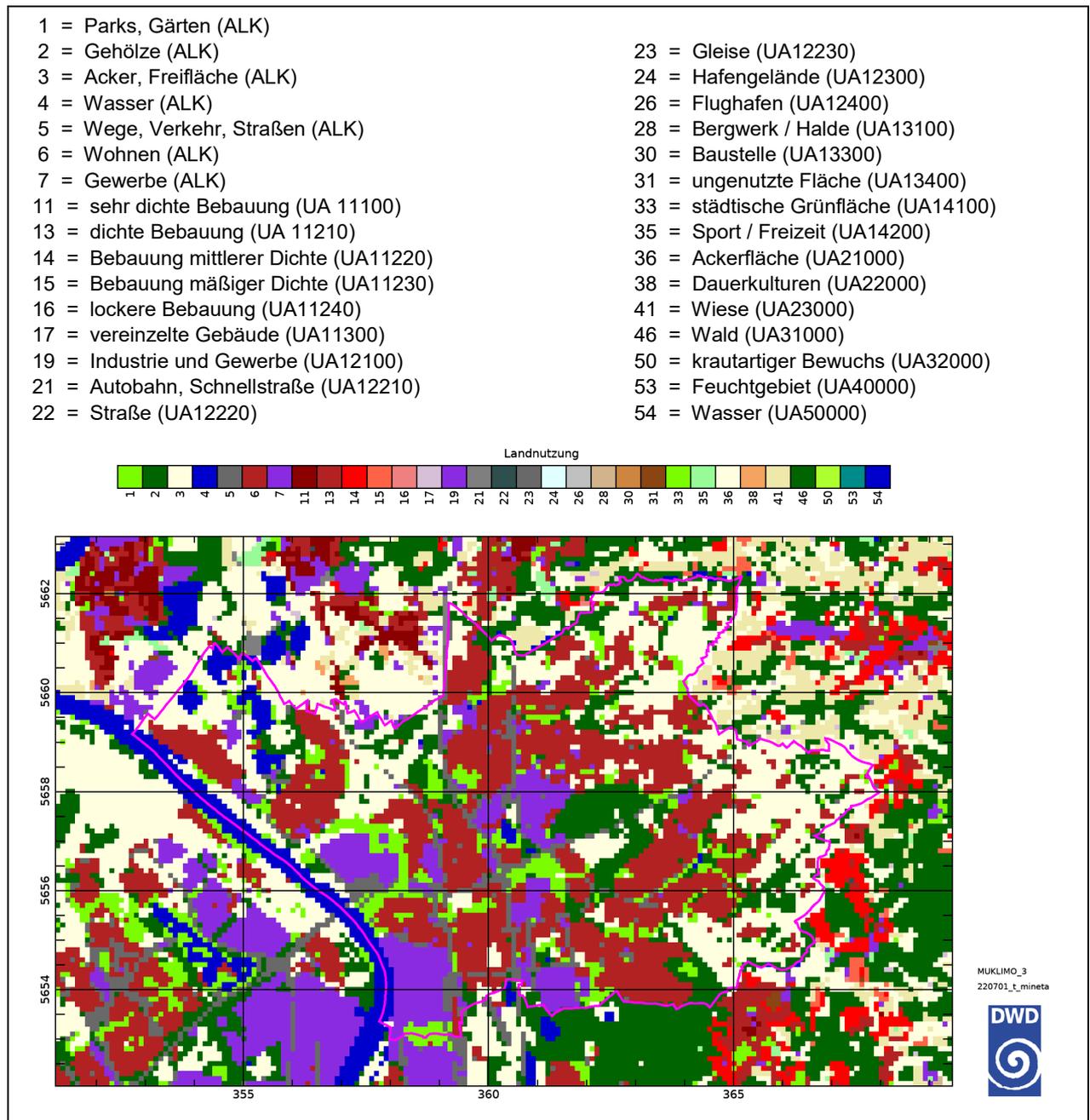


Abbildung 4: Landnutzungsklassifizierung für den IST-Zustand im Gebiet von Leverkusen (18 km x 11 km). Die Klassen 1 bis 7 entsprechen den amtlichen Liegenschaftskatastern der Städte Leverkusen und Köln, die übrigen Klassen entsprechen dem Copernicus Urban Atlas (2018) des Copernicus Land Monitoring Service. Zusätzlich ist in magenta Farbe die Stadtgrenze eingezeichnet.

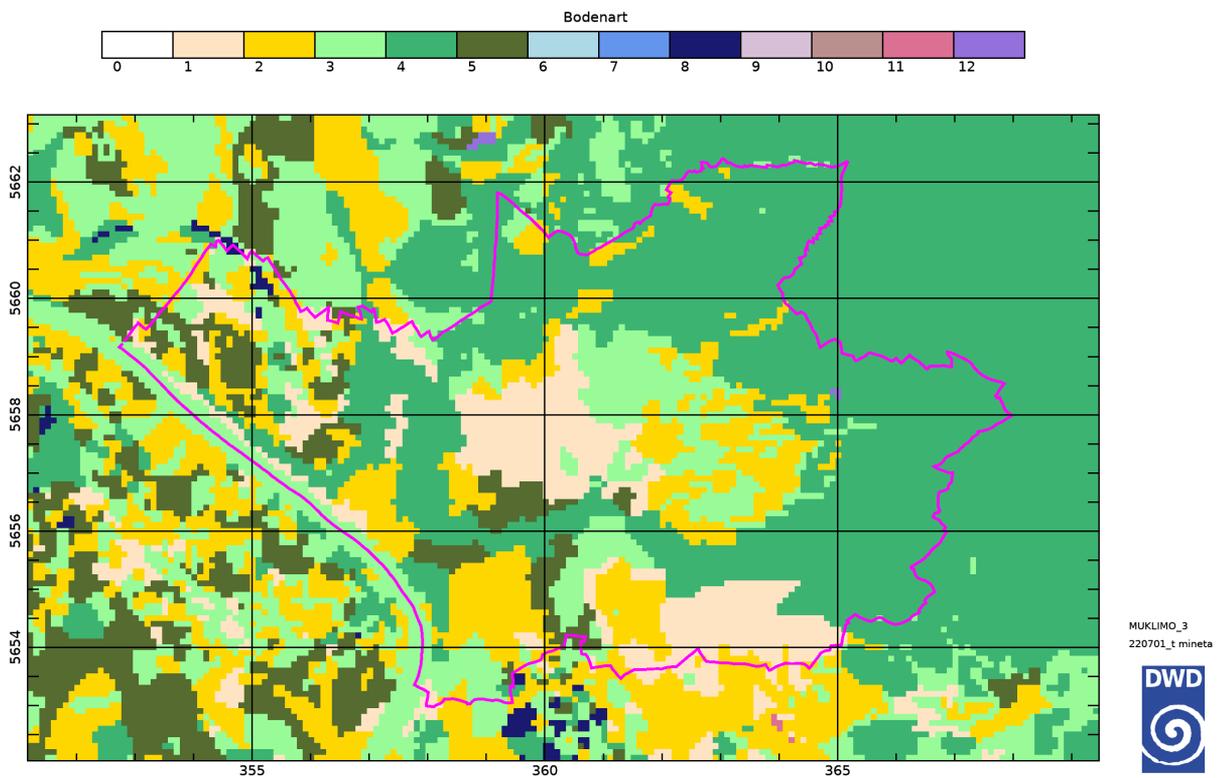


Abbildung 5: Klassifizierte Bodenarten im MUKLIMO_3 Gebiet von Leverkusen (18 km x 11 km) nach Pielke (1984) und Sievers (2016). 1 = Sand, 2 = lehmiger Sand, 3 = sandiger Lehm, 4 = schluffiger Lehm, 5 = Lehm, 6 = sandiger tonhaltiger Lehm, 7 = schluffiger tonhaltiger Lehm, 8 = toniger Lehm, 9 = sandiger Ton, 10 = schluffiger Ton, 11 = Ton, 12 = Torf. Zusätzlich ist in magenta Farbe die Stadtgrenze eingezeichnet.

In den bebauten Gebieten der Stadt Leverkusen liegt der mittlere Gebäudegrundflächenanteil verbreitet zwischen 20 % und 30 % (Abbildung 6). In den am dichtesten bebauten Quartieren erreicht der mittlere Gebäudegrundflächenanteil Werte von 40 % bis über 70 % (z. B. im Stadtteil Wiesdorf im Bereich des Friedrich-Ebert-Platzes, oder im Stadtteil Opladen nordwestlich des Bahnhofs Opladen).

Die mittlere Gebäudehöhe (Abbildung 7) liegt in den Wohngebieten verbreitet zwischen 6 m und 14 m. In dicht bebauten Quartieren (z. B. im Stadtteil Opladen) erreicht die mittlere Gebäudehöhe Werte von über 20 m. Im Bereich einzelner Gebäudekomplexe (z. B. BayArena Fußballstadion) und im Gewerbegebiet des Chempark Leverkusen erreicht die mittlere Gebäudehöhe Werte um etwa 30 m und lokal auch über 40 m.

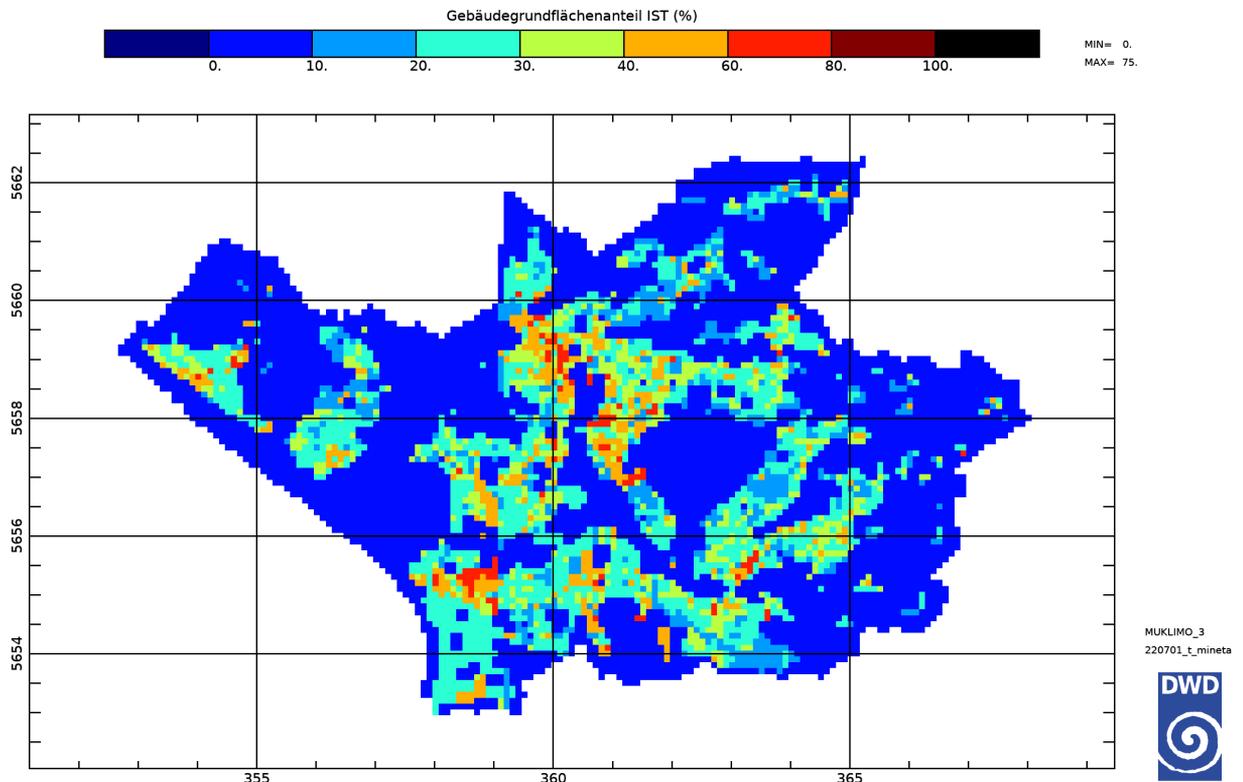


Abbildung 6: Mittlerer Gebäudegrundflächenanteil (%) im Stadtgebiet von Leverkusen.

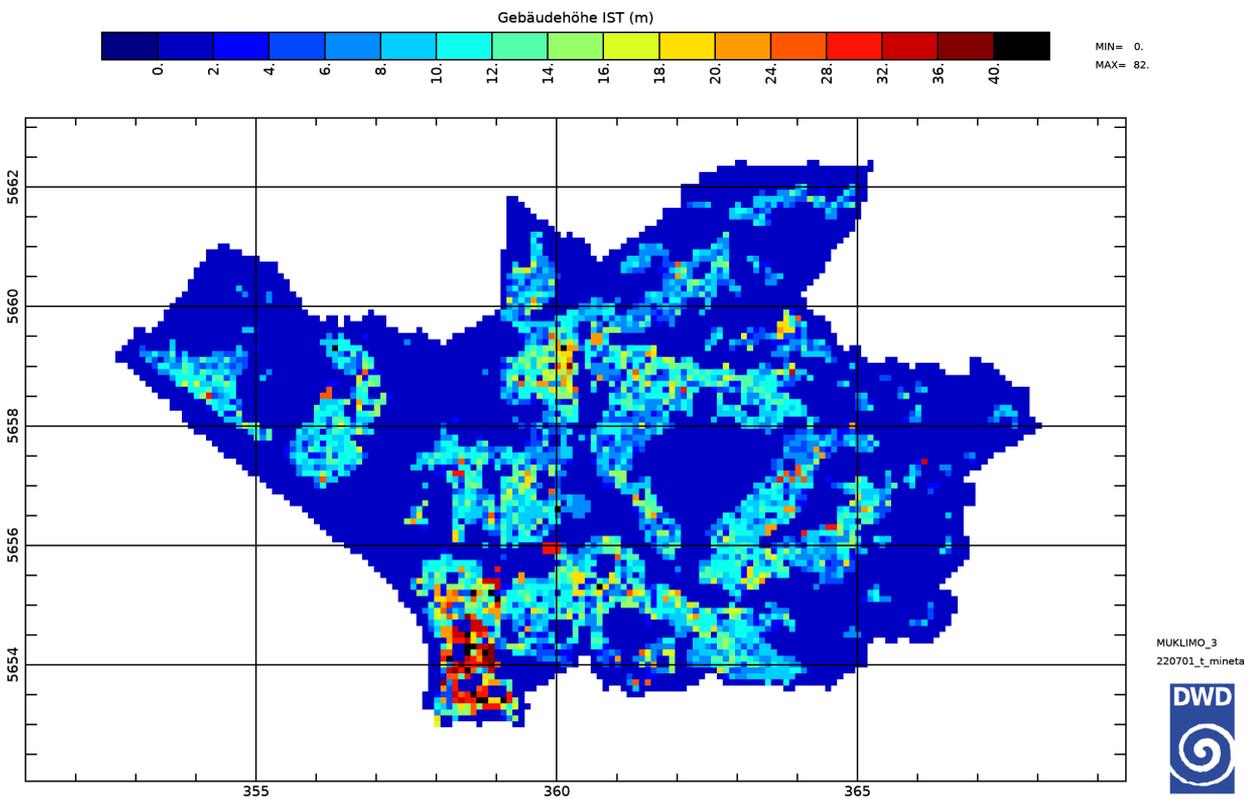


Abbildung 7: Mittlere Gebäudehöhe (m) im Stadtgebiet von Leverkusen.

2.3 Quadermethode

Hochauflösende Simulationen mit dynamischen Klimamodellen wie MUKLIMO_3 sind für klimatologische Zeiträume von 30 Jahren extrem rechenaufwändig. Zur Reduzierung des Rechenaufwands wurde daher die *Quadermethode* als dynamisch-statistisches Downscaling-Verfahren entwickelt (Früh et al., 2011a, b).

Die Quadermethode basiert auf der Annahme, dass das lokale Auftreten wärmebelastender Wetterlagen im Wesentlichen von den regional repräsentativen Werten der drei Klimaparameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit abhängt. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass man für jede der drei Größen einen Wertebereich definieren kann, auf den man sich bei seinen Betrachtungen beschränken kann. Die Minima und Maxima dieser Wertebereiche beschreiben einen dreidimensionalen Ereignisraum, der als Quader visualisiert werden kann (Abbildung 8). Da aus Klimamodellen und zum Teil auch aus Beobachtungen zwar Tagesmittel Tagesmaximum und Tagesminimum der Lufttemperatur vorliegen, für die Luftfeuchtigkeit und den Wind in der Regel aber nur Tagesmittel, wird im Folgenden für die regionalen Klimaparameter der Wertebereich ihrer Tagesmittelwerte betrachtet.

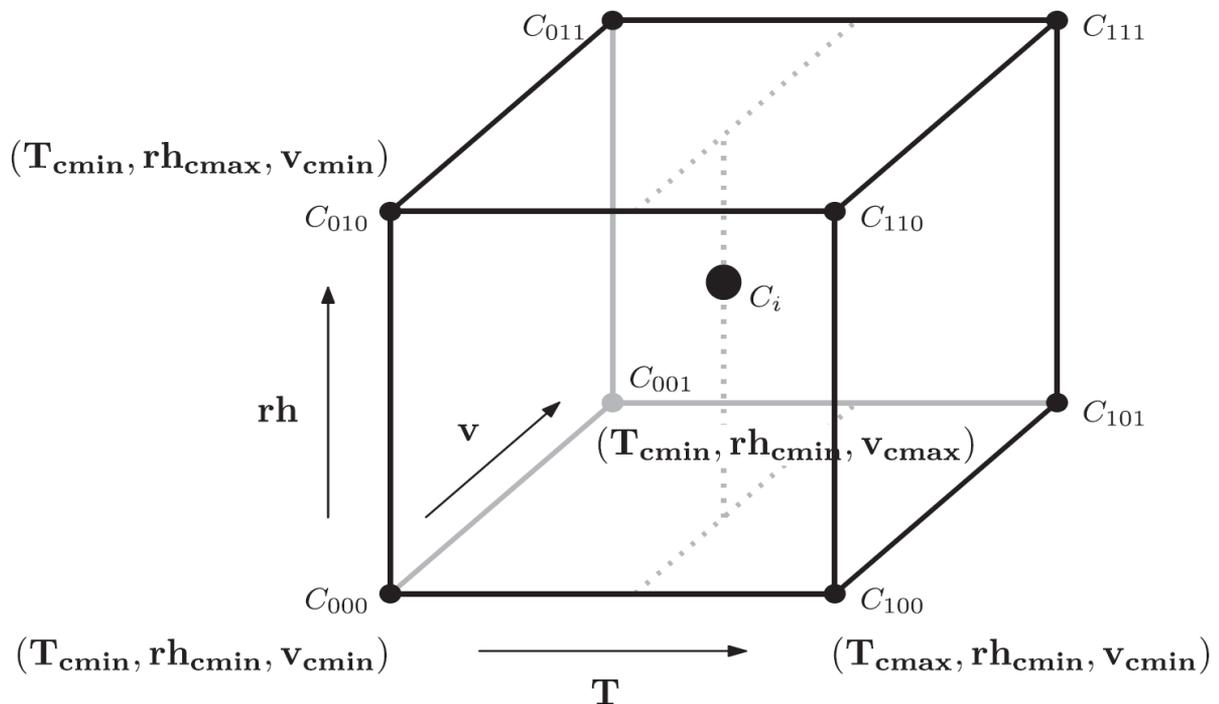


Abbildung 8: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der tri-linearen Interpolation (Žuvela-Aloise et al., 2014). Die Quadereckpunkte werden durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T_c , der relativen Luftfeuchtigkeit rh_c und der Windgeschwindigkeit v_c bestimmt und sind für die im Gebiet durchgeführten MUKLIMO_3 Simulationen in Tabelle 1 aufgelistet. Hierbei sind z. B. $T_{c,min}$, $rh_{c,min}$ und $v_{c,min}$ die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit für die in der Tabelle 1 mit „000“ gekennzeichnete, kühle, trockene und windschwache Quadereckpunktsimulation (Index c steht für engl. Corner).

Es werden für zwei Hauptwindrichtungen je acht, als Eckpunktsimulationen bezeichnete Berechnungen von räumlich hoch aufgelösten Tagesgängen des Lokalklimas mit dem Modell MUKLIMO_3 durchgeführt, die den in Abbildung 8 skizzierten Quader aufspannen. Alle 24-stündigen MUKLIMO_3 Quadereckpunktsimulationen haben den Sonnenstand des 27. Juli für die geographischen Koordinaten 50.94°N, 6.96°O. Den Tagesgang oder die Tagesmaxima und -minima der Klimaparameter an allen Gitterpunkten von MUKLIMO_3 für einen *beliebigen* Tag C_i erhält man dann aus den Ergebnissen der acht Eckpunktsimulationen für die entsprechende Windrichtung mittels dreifacher linearer (tri-linearer) Interpolation auf die regionalen Mittelwerte des Tages C_i (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit). Zur Bestimmung von klimatologischen Kenntagen werden die bodennahen Felder (Gitterpunktwerte) der Lufttemperatur des Tages ausgewertet. Entsprechend der Auswertungen von Windrichtungsmessungen (Kößmann, 2012; Zeiske 2022) sind die Hauptwindrichtungen im Untersuchungsgebiet Süd-Südost (SSO, 150 Grad) und Nord-Nordwest (NNW, 330 Grad).

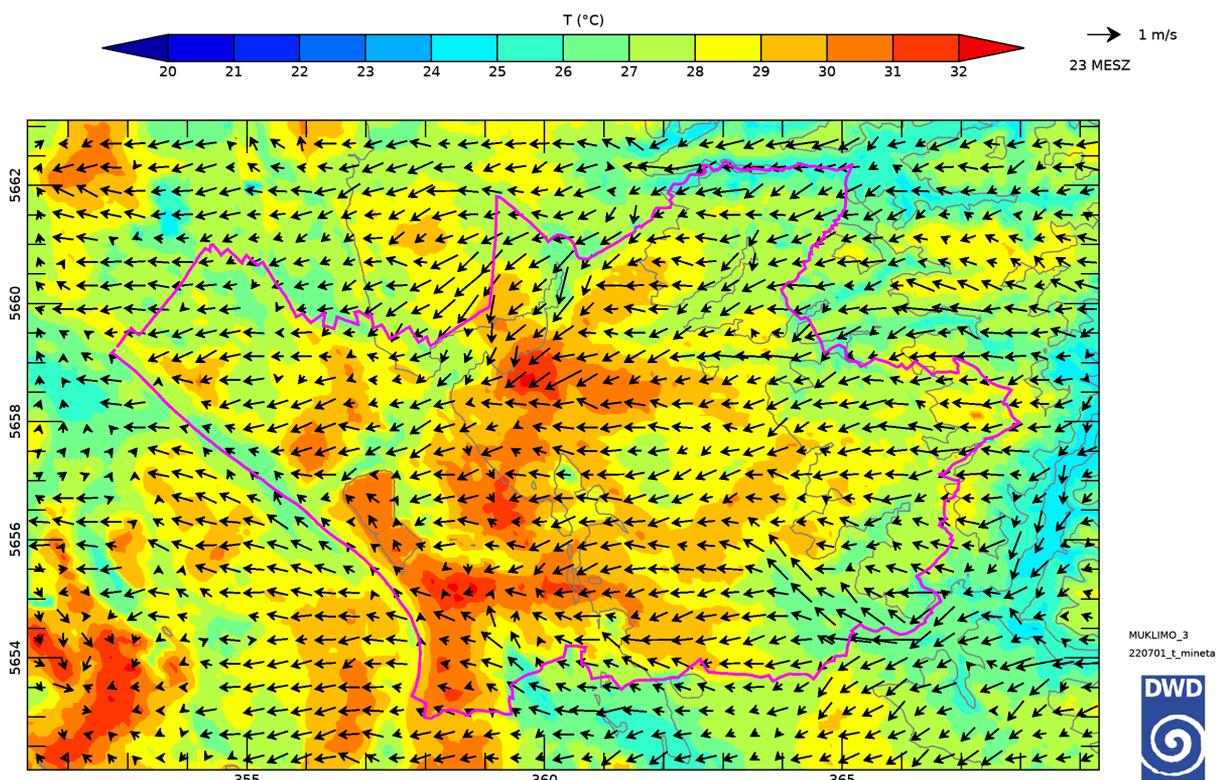


Abbildung 9: Beispielergebnis einer mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 für den IST-Zustand des Quadereckpunkts 100 (siehe Tabelle 1) im Gebiet von Leverkusen mit Sonnenstand 27. Juli und SSO Anströmung um 23 Uhr (Mittleuropäische Sommerzeit) simulierte Lufttemperatur mit Windvektoren in 5 Meter über Grund. Gut zu erkennen sind die starke Überwärmung der dicht bebauten Stadtgebiete und die aus dem kühleren ländlichen Umland in die Überwärmungsgebiete gerichteten Winde (Flurwinde und Kaltluftabflüsse von den Hängen und Seitentälern am ost-nordöstlichen Rand der Kölner Bucht).

Tabelle 1: Tagesmittelwerte bodennaher Klimaparameter für die in Abbildung 8 illustrierten acht Eckpunktsimulationen der Quadermethode.

Simulation	Lufttemperatur (°C)	Relative Luftfeuchtigkeit (%)	Windgeschwindigkeit (m/s)
000	15,0 ($T_{c,min}$)	40 ($rh_{c,min}$)	0,7 ($V_{c,min}$)
100	25,0 ($T_{c,max}$)	40 ($rh_{c,min}$)	0,7 ($V_{c,min}$)
010	15,0 ($T_{c,min}$)	80 ($rh_{c,max}$)	0,7 ($V_{c,min}$)
001	15,0 ($T_{c,min}$)	40 ($rh_{c,min}$)	3,0 ($V_{c,max}$)
110	25,0 ($T_{c,max}$)	80 ($rh_{c,max}$)	0,7 ($V_{c,min}$)
101	25,0 ($T_{c,max}$)	40 ($rh_{c,min}$)	3,0 ($V_{c,max}$)
011	15,0 ($T_{c,min}$)	80 ($rh_{c,max}$)	3,0 ($V_{c,max}$)
111	25,0 ($T_{c,max}$)	80 ($rh_{c,max}$)	3,0 ($V_{c,max}$)

2.4 Klimabeobachtungen und regionale Klimaprojektionen

Tageswerte der DWD Klimastation Köln-Wahn (Flughafen Köln/Bonn, 50,8645°N, 7,1575°O, 91 m über NHN) werden für die Quadermethode als Eingangsdaten für den vergangenen 30-jährigen Zeitraum 1971-2000 verwendet. Für den Vergleich von Gitterpunktwerten berechneter thermischer Indizes mit gemessenen Werten werden für den Zeitraum 1971-2000 zusätzlich Messdaten der Station Köln-Stammheim (50,9894°N, 6,9777°O, 43 m über NHN) und der Station Botanischer Garten Köln (50,9615°N, 6,9712°O, 45 m über NHN) genutzt. Die verwendeten Klimastationsdaten sind im Open Data Bereich des Climate Data Center (CDC) des DWD frei verfügbar (<https://www.dwd.de/cdc>).

Als regionale Klimaprojektionen für das Downscaling wird das 21 Simulationen umfassende multi-Modell „DWD Referenzensemble (v2018)⁶“ des Klimaszenarios RCP8.5 (Weiter-wie-bisher-Szenario) für die Jahre 1971-2100 genutzt. Die Klimaprojektionen des DWD Referenzensembles wurden auf ein 5 km Raster herunter skaliert und multivariat Bias-adjustiert (Krähenmann et al., 2021). Die verwendeten regionalen Klimaprojektionen sind identisch mit denen des aktuellen Deutschen Klimaatlas⁷. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der verwendeten Simulationen des DWD Referenzensembles.

Aus den meist ganz Europa abdeckenden regionalen Klimaprojektionen wurde für die Quadermethode der nord-nordwestlich von Köln gelegene Gebietsausschnitt 50,9°N-51,3°N und 6,5°O-6,9°O ausgewählt, da diese Region eine vergleichbare mittlere Geländehöhe wie die stark urbanisierten Bereiche von Köln bzw. Leverkusen sowie einen relativ hohen Flächenanteil mit Freiland aufweist (vgl. Deutschländer et al., 2008). Im Gebietsausschnitt liegen 54 (6 x 9) Gitterpunkte des mit einer Gitterweite von 5 km vorliegenden DWD Referenzensembles.

⁶ DWD Referenzensemble: [Link zur DWD Internetseite](#)

⁷ Deutscher Klimaatlas: [Link zur DWD Internetseite](#)

Tabelle 2: Regionale Klimaprojektionen des DWD Referenzensembles für das Klimaszenario RCP8.5.

Nr.	Globales Klimamodell	Regionales Klimamodell
1	ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E
2	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	KNMI-RACMO22E
3	ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E
4	IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1)	SMHI-RCA4
5	ICHEC-EC-EARTH (r12)	SMHI-RCA4
6	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	SMHI-RCA4
7	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	SMHI-RCA4
8	CCCma-CanESM2 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
9	ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17
10	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
11	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
12	MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
13	ICHEC-EC-EARTH (r12)	GERICS-REMO2015
14	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	GERICS-REMO2015
15	CCCma-CanESM2 (r1)	GERICS-REMO2015
16	MIROC-MIROC5 (r1)	GERICS-REMO2015
17	ICHEC-EC-EARTH (r12)	UHOH-WRF361H
18	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	UHOH-WRF361H
19	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H
20	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	MPI-CSC-REMO2009
21	MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009

Da die Genauigkeit von Klimaprojektionen systematischen Modellfehlern unterliegt, wurde eine implizite Bias-Korrektur (Kim et al., 2015, Imbery et al., 2013) der Ergebnisse durchgeführt. Hierzu wurde auf Basis der Klimaprojektionen mit der Quadermethode die Anzahl der Temperaturkenn-tage sowohl für die zukünftigen Zeiträume (2031-2060 und 2071-2100), als auch für den vergan-genen Referenzzeitraum (1971-2000) berechnet. Anschließend wurde durch Differenzenbildung die Änderung der Anzahl der Temperaturkenn-tage zwischen den zukünftigen und vergangenen Zeiträumen ermittelt (2031-2060 minus 1971-2000 bzw. 2071-2100 minus 1971-2000). Das heißt, man geht davon aus, dass selbst im Fall, dass bei einzelnen Projektionen die Absolutwerte gene-rell zu hoch oder zu niedrig sind, die Differenzen zwischen den Klimazeiträumen keinen signifikan-ten systematischen Fehler mehr aufweisen. Am Ende werden die Differenzen dann zu den auf Basis von Messungen bestimmten Ergebnissen für die Vergangenheit (1971–2000) hinzuaddiert, um die Werte für die Zukunft zu bestimmen.

Um die Spannweite der zukünftig zu erwartenden Änderungen der Anzahl an Temperaturkenn-tagen zu bestimmen, wurde zunächst mit der Quadermethode für alle 21 Klimaprojektionen die Än-derung der Temperaturkenn-tage auf dem MUKLIMO_3 Modellgitter berechnet. Anschließend wurden für jede Modellgitterzelle die Änderungswerte der 21 Projektionen entsprechend ihrer Stärke sortiert, mit dem Ziel, Perzentil-Karten der Änderung zwischen den 30-jährigen Zeiträumen

zu erstellen (vgl. Früh et al., 2011a, b). In Analogie zum Deutschen Klimaatlas des DWD wird die Spannweite zur Beschreibung der sich durch das Ensemble regionaler Klimaprojektionen ergebenden Unsicherheit in den 100 m Rasterdaten der Temperaturkenntage durch das 15. Perzentil (Rang 04) und das 85. Perzentil (Rang 18) des Ensembles, d. h. auf dem 70 % Signifikanzniveau, beschrieben. Zusätzlich wird auch der Medianwert des Ensembles (50. Perzentil, Rang 11) ermittelt. Um Bias-korrigierte Perzentil-Karten für die Anzahl an Kenntagen in den zukünftigen Zeiträumen 2031-2060 und 2071-2100 zu erhalten, wurden in einem nachfolgenden Schritt die Perzentil-Karten der Änderung der Temperaturkenntage mit der auf Basis der Stationsmessungen erstellten Karten des Referenzzeitraumes 1971-2000 addiert.

3 Ergebnisse

3.1 Zeitraum 1971-2000 (Vergangenheit)

Für den vergangenen Zeitraum 1971-2000 können die mit der Quadermethode berechneten Häufigkeiten von Temperaturkenntagen mit Ergebnissen von Stationsmessungen verglichen werden (Tabelle 3). Im Untersuchungsgebiet wurden in diesem Zeitraum nur die beiden DWD Stationen Köln-Stammheim und Köln-Wahn durchgängig betrieben. Da sich für die Anzahl der Tropennächte an den beiden Standorten zwischen Messung und Simulation nur ein Unterschied von 0,9 Nächten ergab, wurde für die Tropennächte keine zusätzliche Bias-Korrektur durchgeführt. Die Häufigkeit der Sommertage und Heißen Tage wurde von der Simulation jedoch deutlich unterschätzt. Für die Berechnung der Häufigkeit dieser beiden Temperaturkenntage im vergangenen und den zukünftigen Zeiträumen wurde daher für die Temperaturen der MUKLIMO_3 Simulationen eine systematische Bias-Korrektur von +0,5 Kelvin durchgeführt. Der in Tabelle 3 dargestellte Vergleich zeigt, dass dies für die Standorte Stammheim und Botanischer Garten zu einer guten Übereinstimmung der Anzahl der Sommertage und Heißen Tage führt, während am Standort Köln-Wahn die Simulationsergebnisse trotz der Bias-Korrektur immer noch 3,9 Heiße Tage und 11,6 Sommertage zu wenig ergaben. Beim Vergleich der Modellergebnisse mit den Stationsmessungen ist zu beachten, dass die Klimastationsdaten Punktmessungen sind und die Modellergebnisse und die Modellergebnisse für 100 m x 100 m große Modellgitterzellen berechnete Werte sind, und somit die Bedingungen der lokalen Stationsumgebungen nicht genau wiedergeben können.

In den ländlichen und den nur gering bebauten Gebieten Leverkusens ergeben sich im Zeitraum 1971-2000 in den Simulationen verbreitet jährlich 18-28 Sommertage und 2-7 Heiße Tage (Abbildung 10 und Abbildung 11). In den dicht bebauten Quartieren von Leverkusen zeigen die Berechnungen 32-47 Sommertage und 7-12 Heiße Tage. Tropennächte treten für den IST-Zustand im Zeitraum 1971-2000 im ländlichen Umland mit etwa 1-3 mal pro Jahr nur sehr selten auf. Entlang des Rheins werden bis zu etwa 6 Tropennächte und in dichter Bebauung etwa 8 Tropennächte erreicht (Abbildung 12).

Tabelle 3: Gemessene und per Computersimulation berechnete (Medianwert über 3 x 3 Modellgitterpunkte) mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen, Heißen Tage und Tropennächten im Zeitraum 1971-2000 für 3 Standorte in Köln.

Standort	Stammheim	Botanischer Garten	Köln Wahn
Sommertage Messung	35,1	36,1*	37,5
Sommertage Simulation^{bk}	32,4	34,7	25,9
Heiße Tage Messung	7,4	8,5*	8,3
Heiße Tage Simulation^{bk}	6,7	7,3	4,4
Tropennächte Messung	2,3	0,3*	0,4
Tropennächte Simulation	3,2	4,1	1,3

* Messungen Köln Botanischer Garten nur im Zeitraum 1971-1984.

^{bk} Sommertage und Heiße Tage mit Biaskorrektur (+0,5 K)

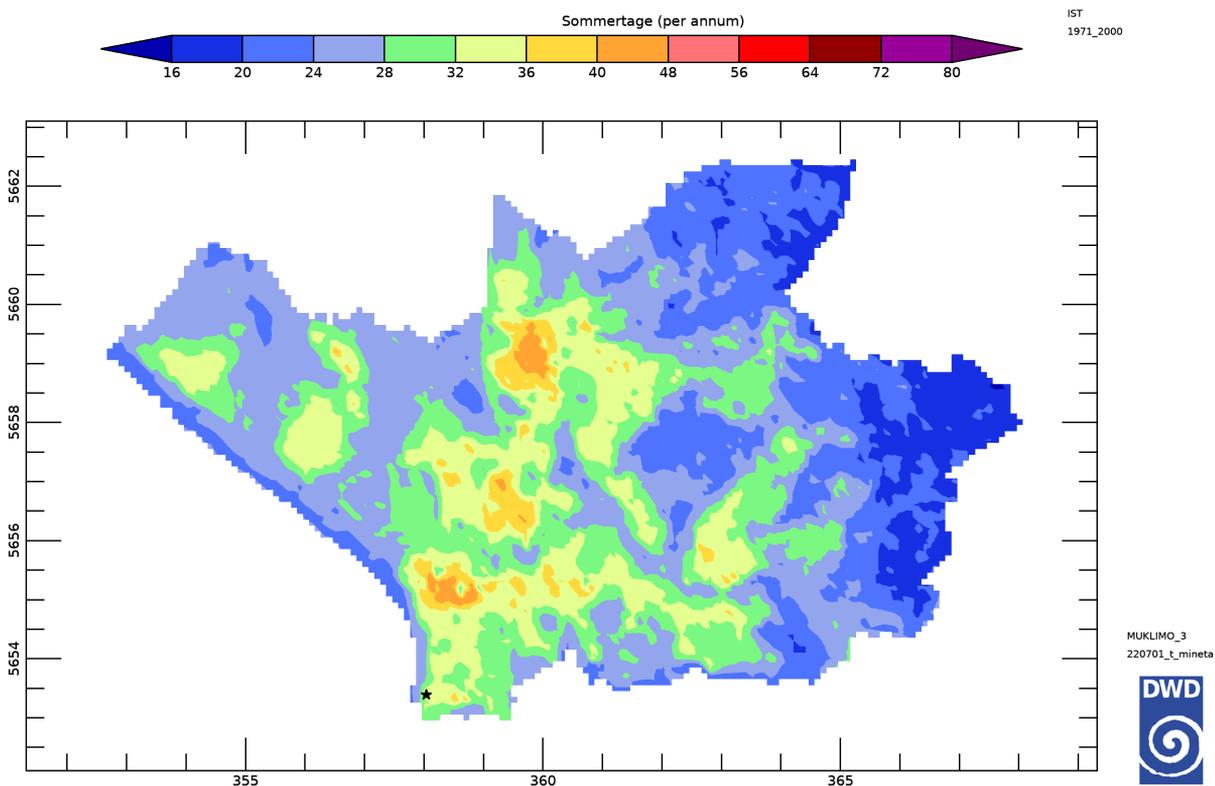


Abbildung 10: Mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen ($T_{max} \geq 25 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 1971-2000. Der schwarze Stern im Süden des Stadtgebiets zeigt hier und in nachfolgenden Ergebniskarten den Standort der Klimastation Stammheim.

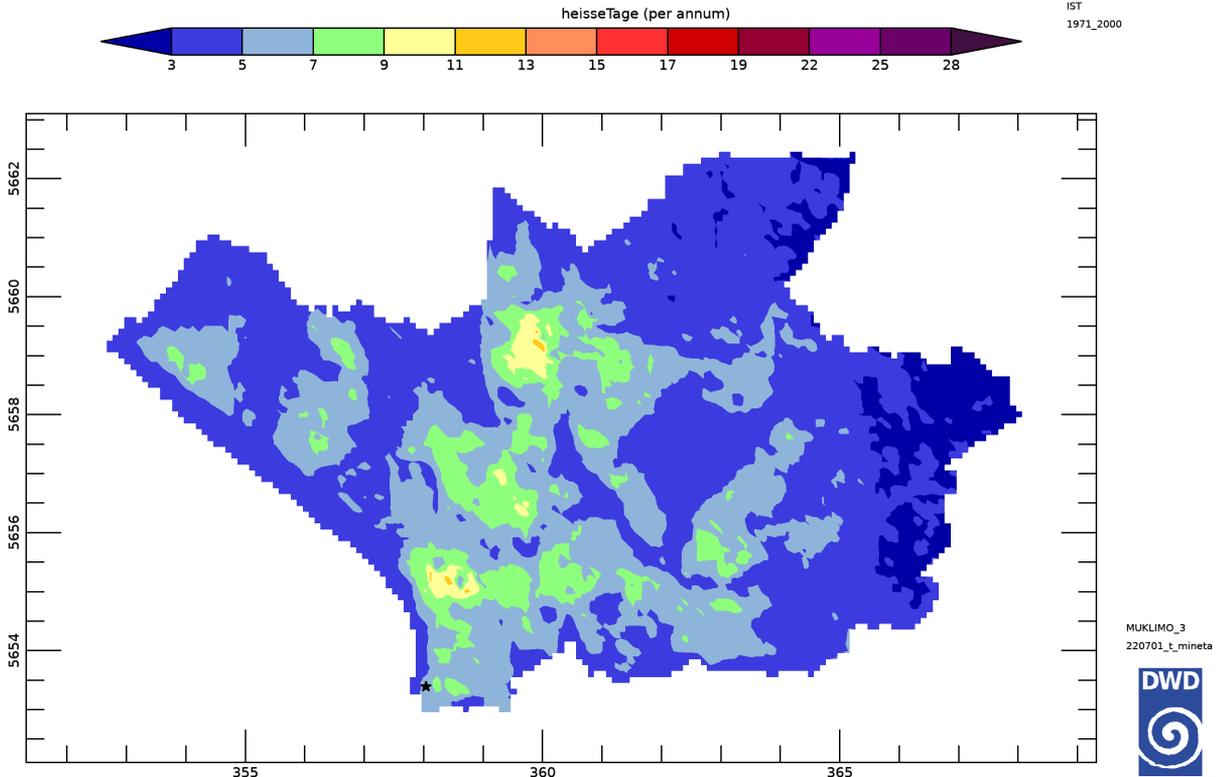


Abbildung 11: Mittlere jährliche Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 1971-2000.

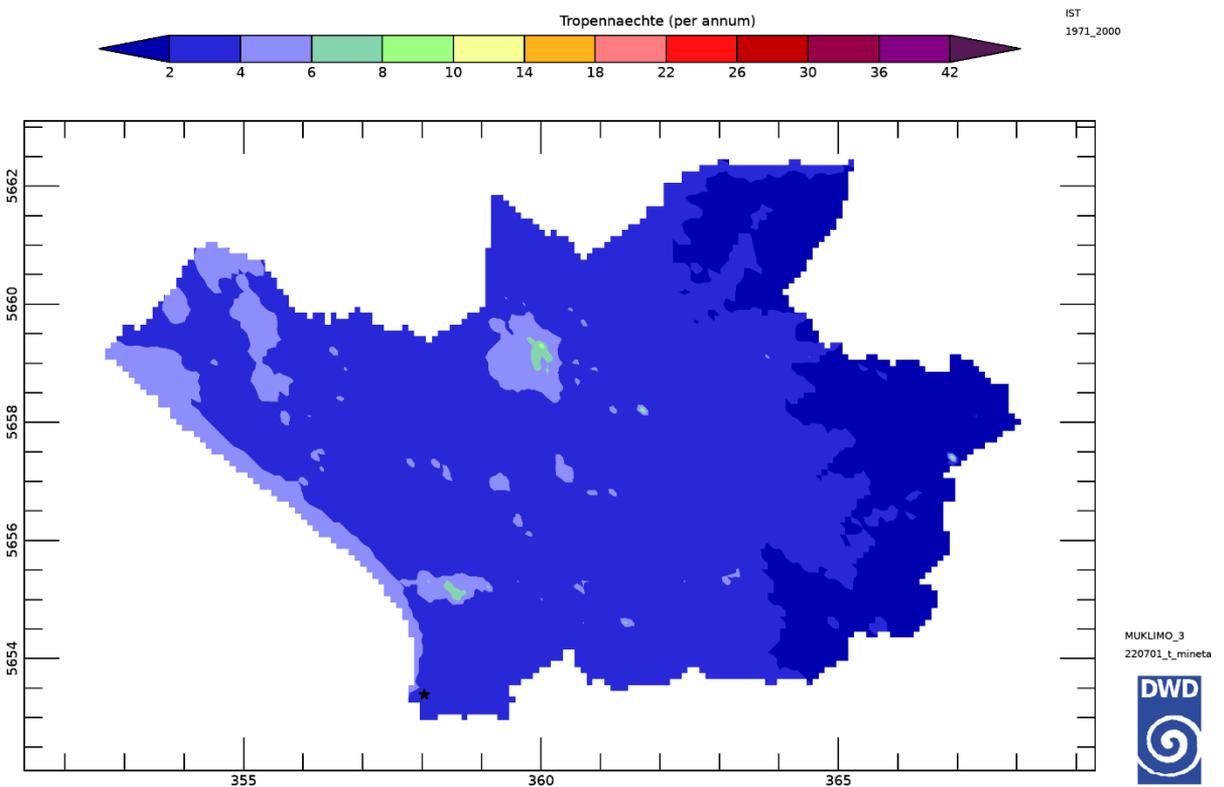


Abbildung 12: Mittlere jährliche Anzahl an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 1971-2000.

3.2 Zeitraum 2031-2060 (nahe Zukunft)

Bis zum Zeitraum 2031-2060 nimmt die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen in ländlichen Gebieten Leverkusens auf Werte zwischen 28-40 Tagen (15. Perzentil, Abbildung 13) und 32-48 Tagen (85. Perzentil, Abbildung 15) zu, während in den dicht bebauten Gebieten bereits häufig zwischen 48-62 Tage (15. Perzentil) und teilweise über 70 Tage (85. Perzentil) erreicht werden. Für den Medianwert der Auswertung (50. Perzentil, Abbildung 14) ergeben sich dazwischen liegende Werte von etwa 30-42 Sommertagen in ländlichen Gebieten und 53-65 Sommertagen in den dicht bebauten Gebieten. Im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 (Abbildung 10) bedeutet dies eine Zunahme der Anzahl Sommertage um etwa 50-100 %.

Die Heißen Tage nehmen bis 2031-2060 im Jahresmittel auf etwa 5 Tage (15. Perzentil, Abbildung 16) bis 10 Tage (85. Perzentil, Abbildung 18) im Umland und auf zwischen 12-18 Tage (15. Perzentil) und 13-22 Tage (85. Perzentil) in dicht bebauten Stadtteilen zu. Für den Median des Ensembles (50. Perzentil, Abbildung 17) ergeben sich dazwischen liegende Werte von meist 6-9 Heißen Tagen in ländlichen Gebieten und 11-20 Heißen Tagen in den dicht bebauten Quartieren. Im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 (Abbildung 11) bedeutet dies etwa eine Verdopplung (Zunahme um etwa 100 %) der Anzahl Heiße Tage.

Die im vergangenen Zeitraum 1971-2000 in ländlichen Gebieten noch seltenen Tropennächte nehmen in den Ergebnissen für den Zeitraum 2031-2060 deutlich auf etwa 9 Nächte (15. Perzentil, Abbildung 19) bis etwa 16 Nächte (85. Perzentil, Abbildung 21) zu. In den dicht bebauten Stadtquartieren ergeben sich Zunahmen auf zwischen etwa 18 Nächte (15. Perzentil) und etwa 24 Nächte (85. Perzentil). Für den Medianwert des Ensembles (50. Perzentil, Abbildung 20) sind in ländlichen Gebieten etwa 10-15 Tropennächte, in bebauten Stadtquartieren etwa 15-20 Tropennächte zu erwarten. Für die bebauten Quartiere bedeutet dies im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 (Abbildung 12) etwa eine Verdopplung bis Verdreifachung (Zunahme um etwa 100-200 %) der Anzahl Tropennächte.

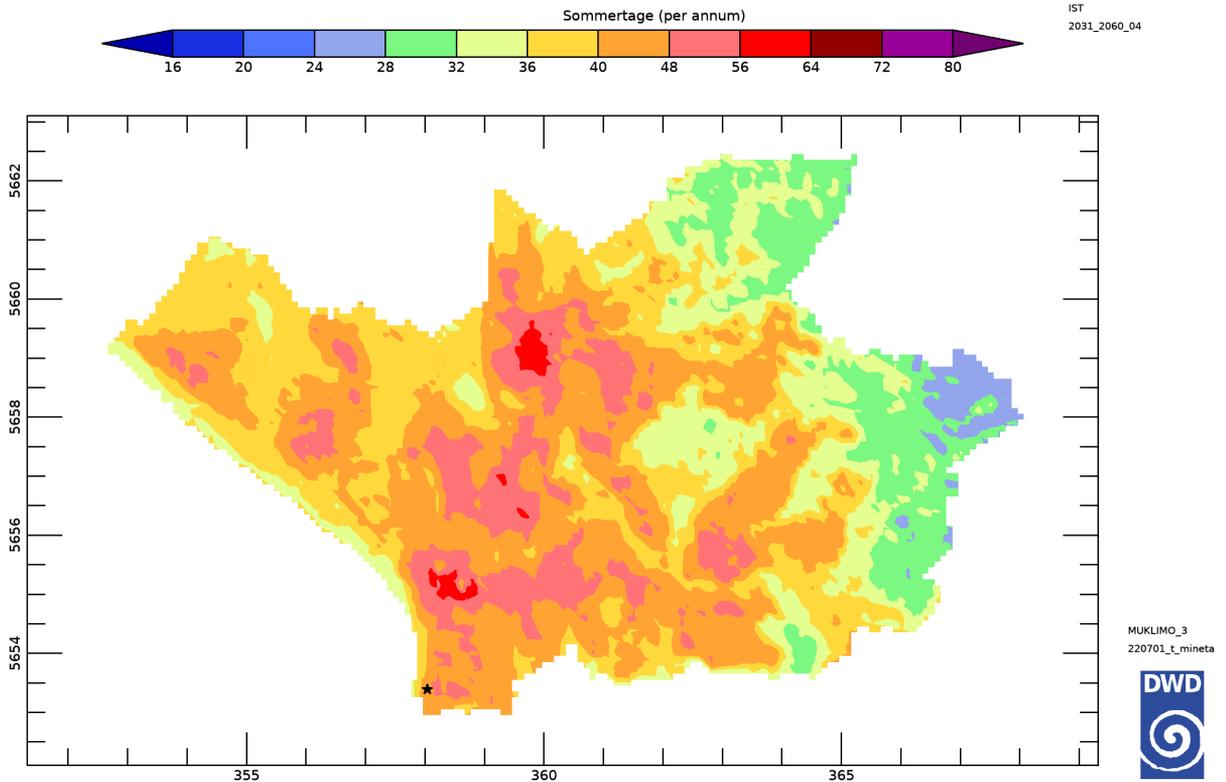


Abbildung 13: 15. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.

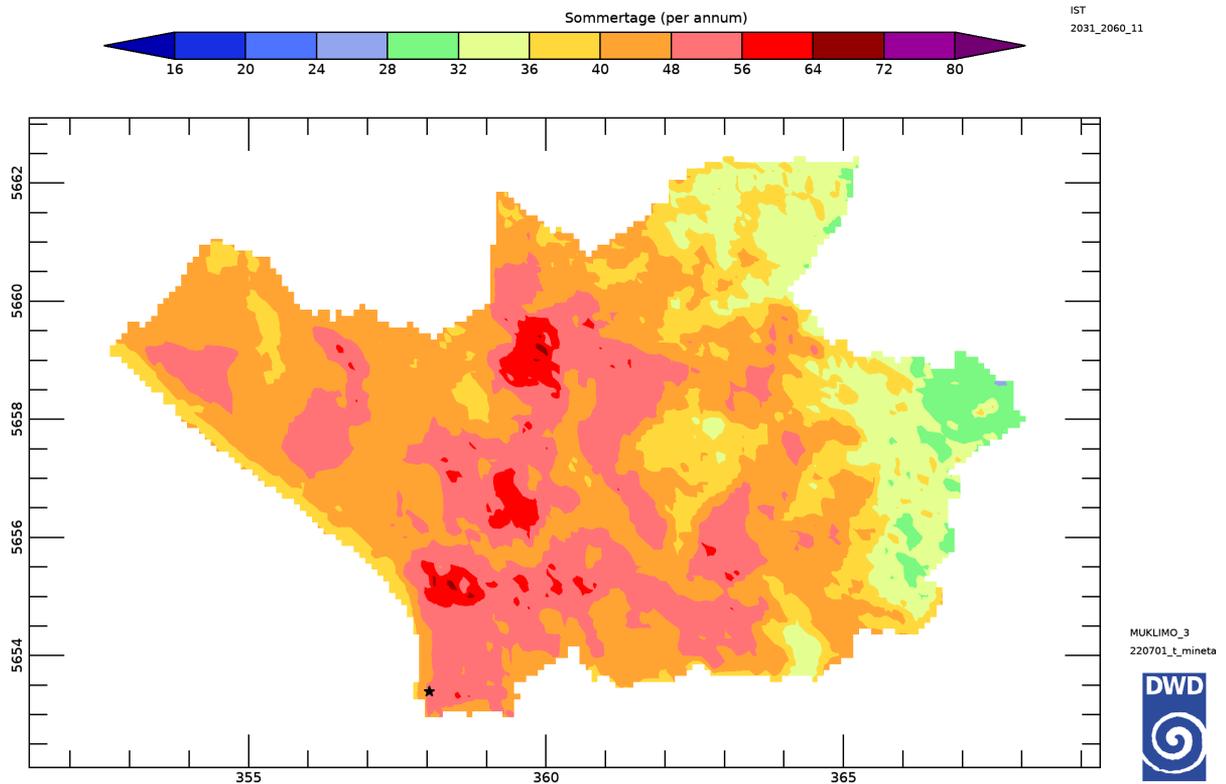


Abbildung 14: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.

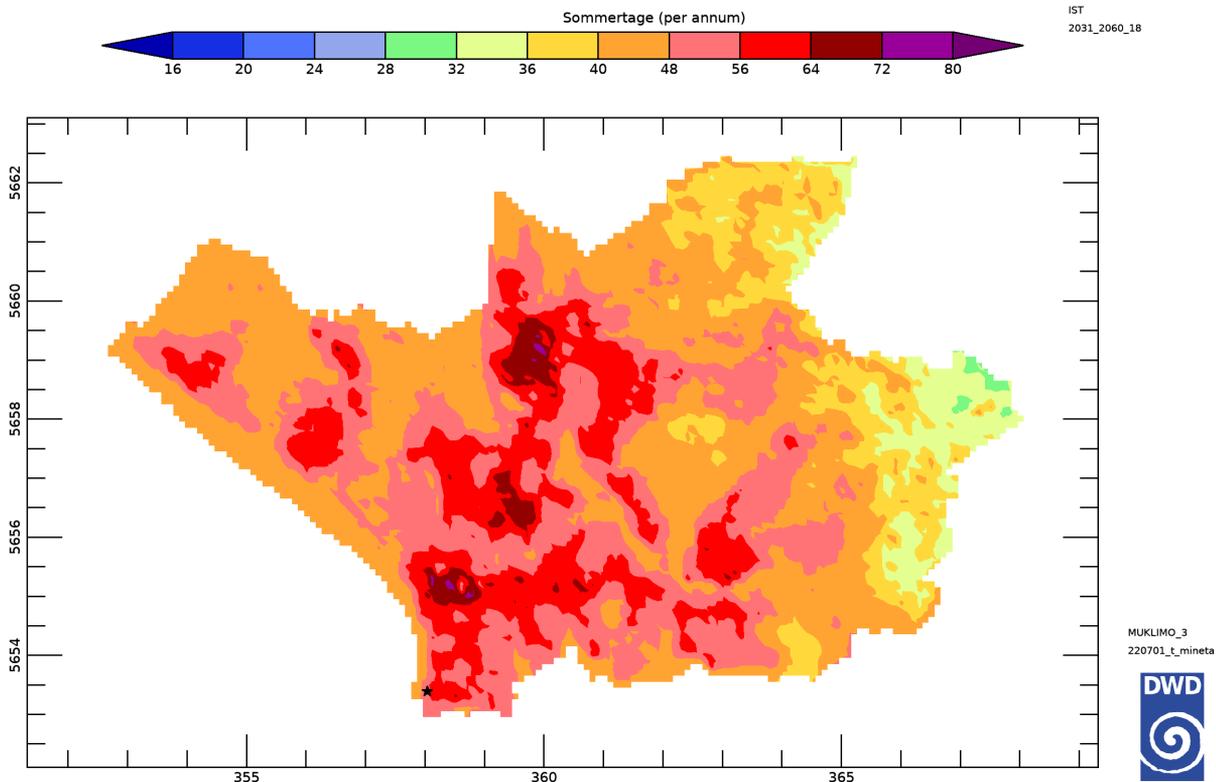


Abbildung 15: 85. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.

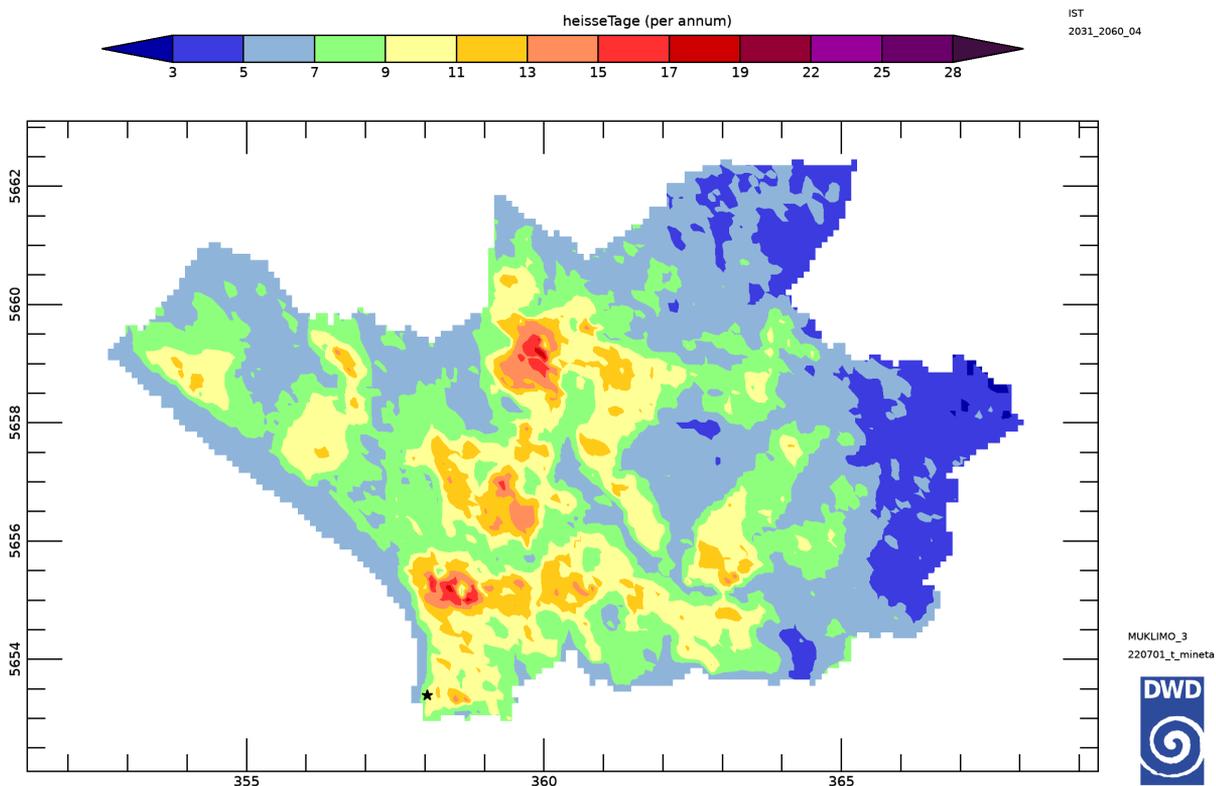


Abbildung 16: 15. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.

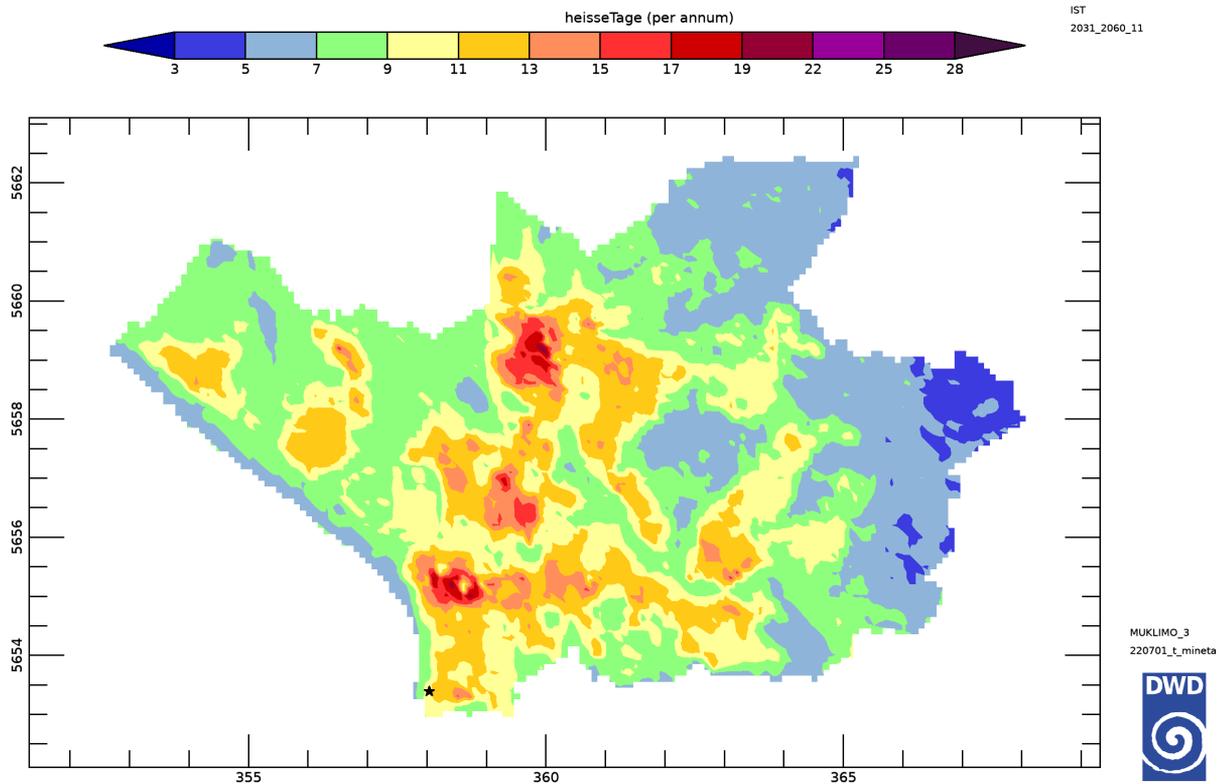


Abbildung 17: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.

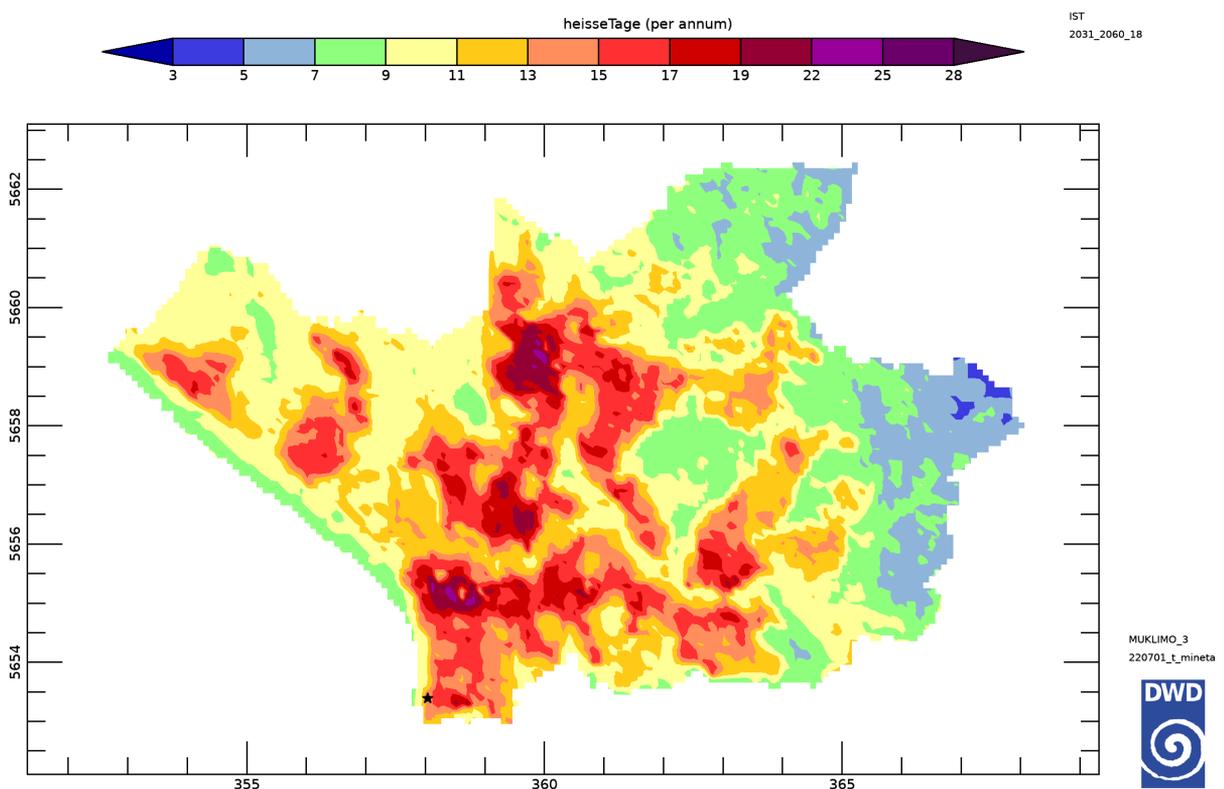


Abbildung 18: 85. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.

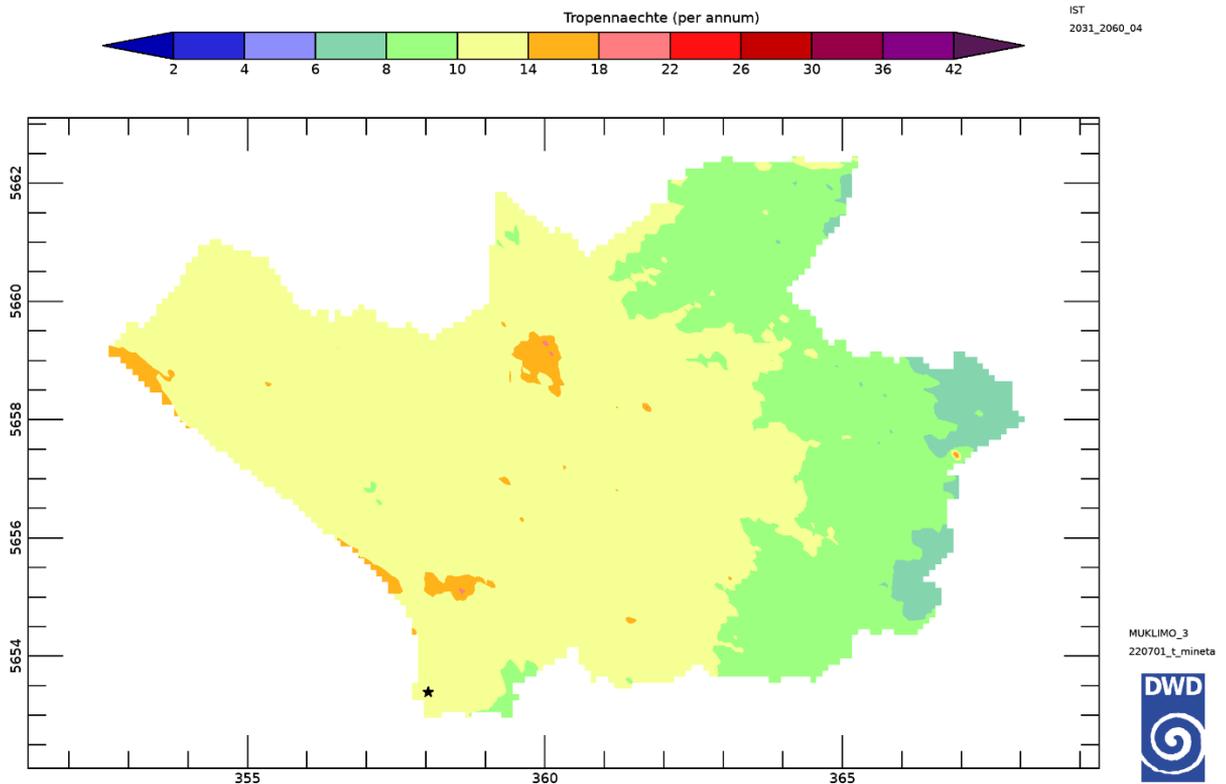


Abbildung 19: 15. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.

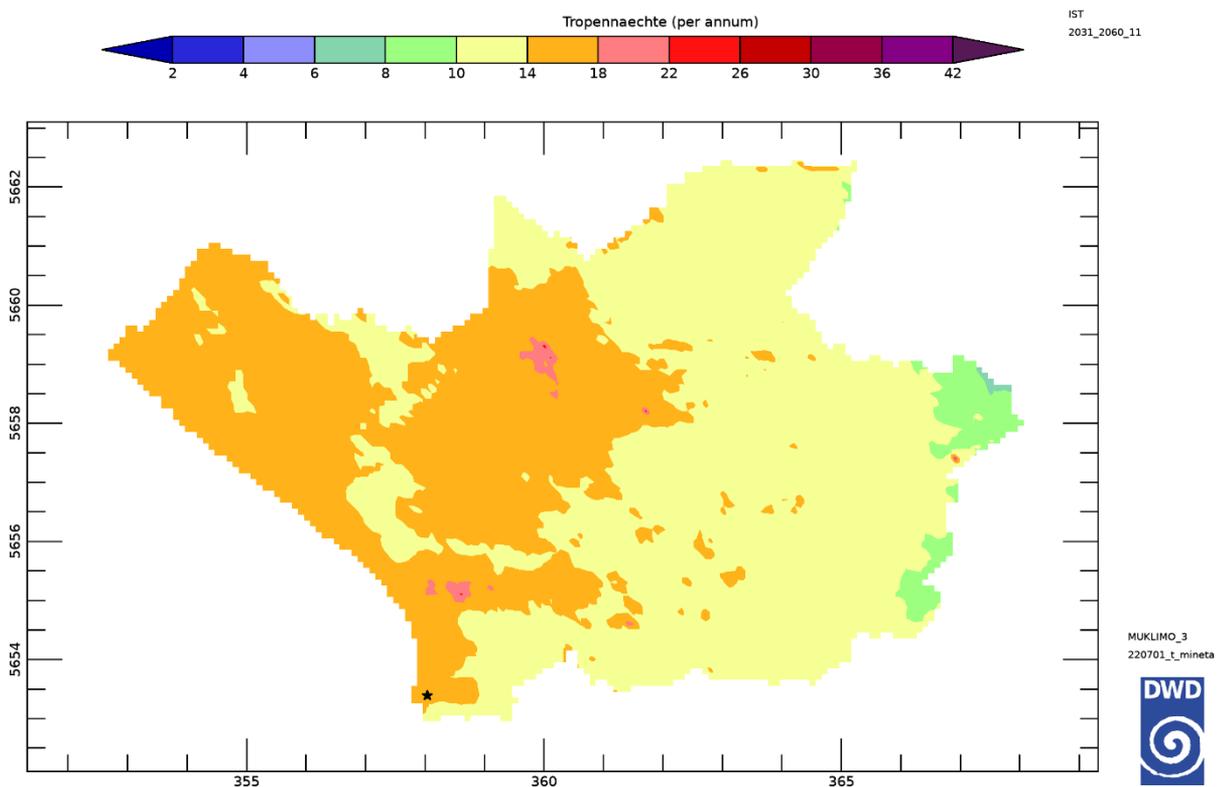


Abbildung 20: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.

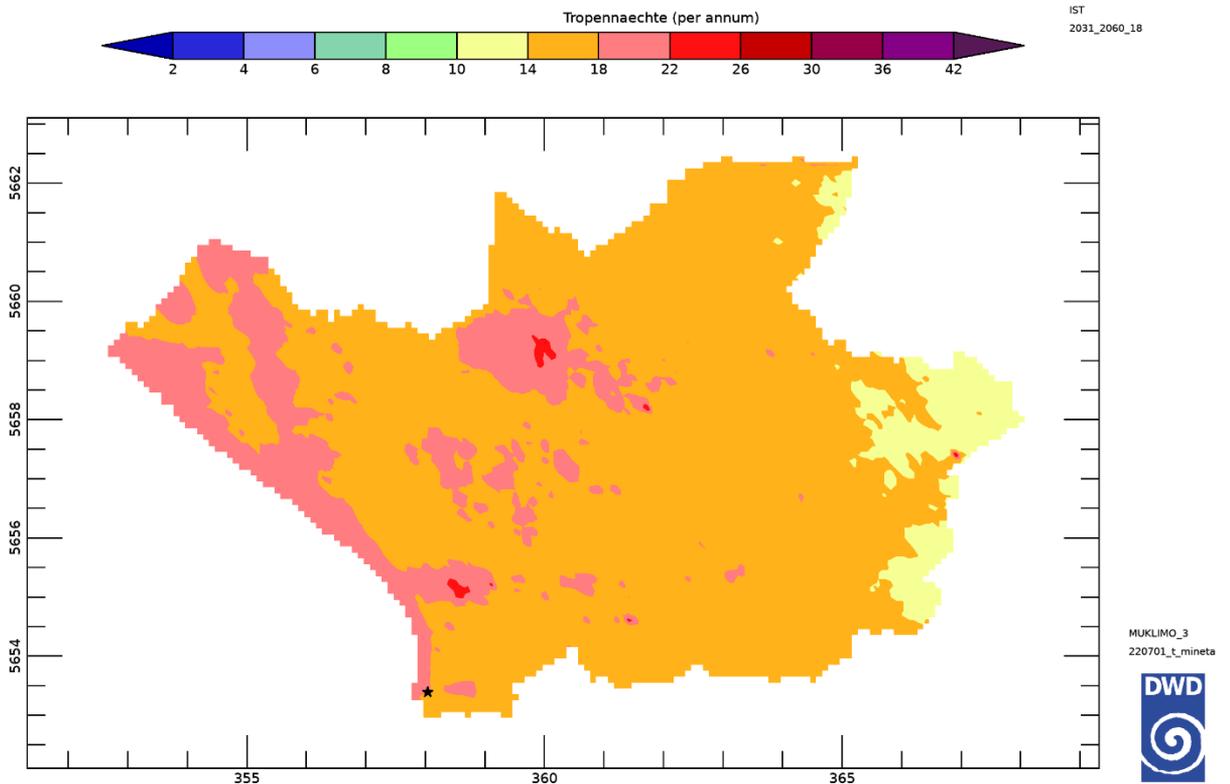


Abbildung 21: 85. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.

3.3 Zeitraum 2071-2100 (ferne Zukunft)

Im Zeitraum 2071-2100 zeigen die Auswertungen des 15. und 85. Perzentils für das Szenario RCP8.5 in Leverkusen gegenüber 2031-2060 eine weitere Zunahme der Temperaturkentage bei gleichzeitig größer werdender Spannbreite der Unsicherheit auf dem 70 % Signifikanzniveau. Während die vom Weltklimarat ausgewerteten Klimaszenarien (IPCC, 2023) bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch relativ ähnliche Klimaerwärmungen erwarten lassen, unterscheiden sich bis zum Ende des Jahrhunderts die Intensitäten der weiter zunehmenden Klimaerwärmung zwischen den Klimaszenarien deutlich. Aufgrund dieser Unsicherheiten werden in diesem Kapitel nur Ergebnisse des 50. Perzentils präsentiert. Diese dienen der Orientierung für die längerfristig erforderliche Klimaanpassung.

Der Medianwert der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen (50. Perzentil, Abbildung 22) zeigt für das Umland bis 2071-2100 verbreitet eine Zunahme auf über 60 Tage (2 Monate) und erreicht in den dicht bebauten Quartieren teils 88 und mehr Tage (ca. 3 Monate). Im Vergleich zum vergangenen Zeitraum 1971-2000 (Abbildung 10) entspricht dies einer Zunahme der Häufigkeit an Sommertagen von etwa 150 % und im Vergleich zum Medianwert für den Zeitraum 2031-2060 (Abbildung 14) entspricht dies etwa einer Zunahme der Häufigkeit um 50 %.

Bei den Heißen Tagen nimmt bis 2071-2100 der Medianwert der mittleren jährlichen Häufigkeit (50. Perzentil, Abbildung 23) im Umland auf etwa 11-17 Tage (1/2 Monat) und in dicht bebauten Gebieten auf teils über 30 Tage (1 Monat) zu. Dies entspricht gegenüber dem Zeitraum 1971-2000 (Abbildung 11) einer Zunahme der Häufigkeit um 200-300 % und gegenüber dem Medianwert des Zeitraums 2031-2060 (Abbildung 17) etwa einer Zunahme der Häufigkeit um 100 %.

Der Medianwert der mittleren jährliche Anzahl an Tropennächten (50. Perzentil, Abbildung 24) zeigt für das Umland bis 2071-2100 eine Zunahme auf etwa 23-30 Nächte (knapp 1 Monat) und in den dicht bebauten Quartieren eine Zunahme auf etwa 34 bis 42 Nächte (1 bis 1,5 Monate). Im Vergleich zum vergangenen Zeitraum 1971-2000 (Abbildung 12) entspricht dies für die dicht bebauten Gebiete etwa einer Zunahme der Häufigkeit der Tropennächte um etwa 400 %. Im Vergleich zum Medianwert für den Zeitraum 2031-2060 (Abbildung 20) nimmt die Häufigkeit sowohl im Umland als auch in den bebauten Gebieten um etwa 100 % zu.

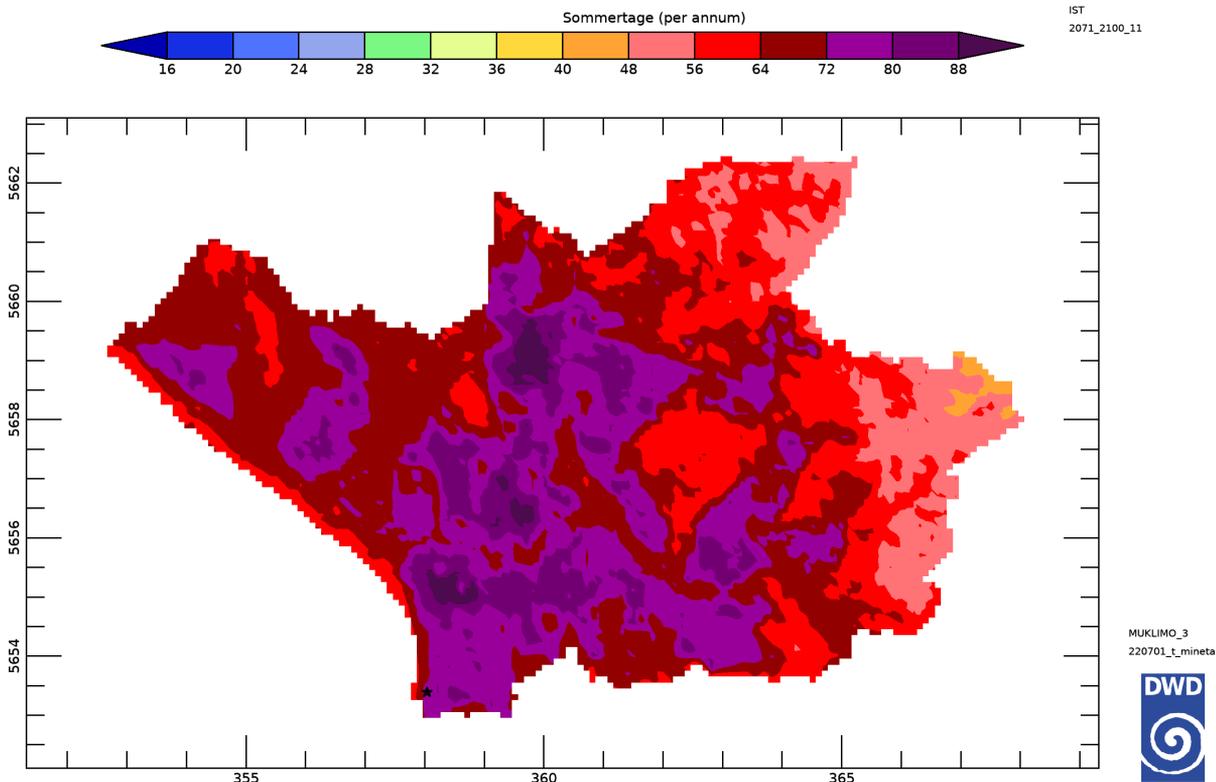


Abbildung 22: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2071-2100.

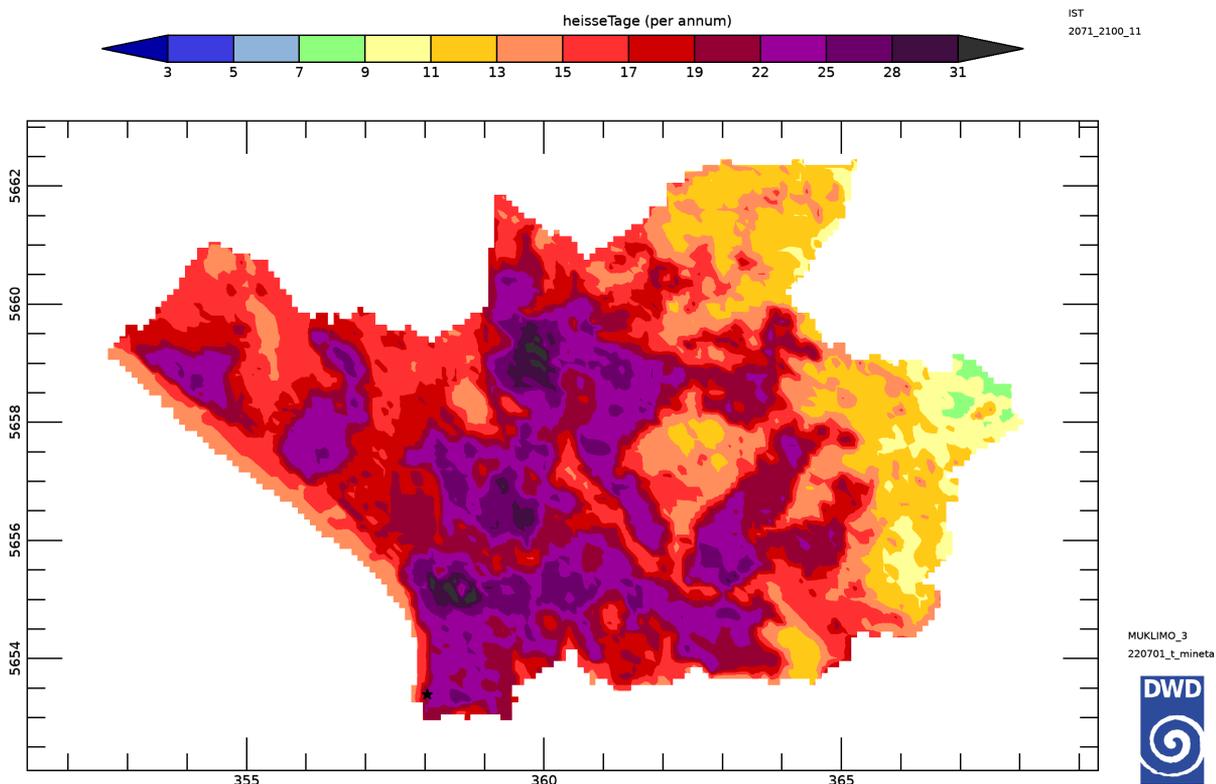


Abbildung 23: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2071-2100.

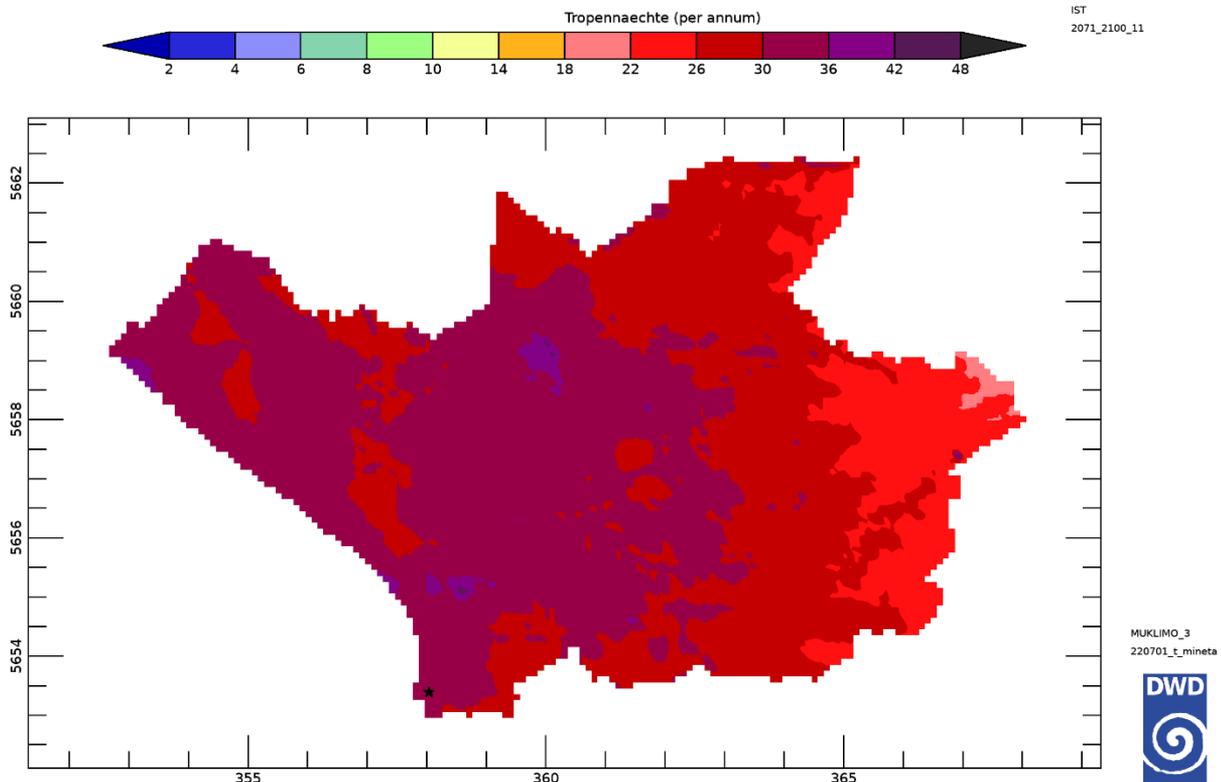


Abbildung 24: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2071-2100.

4 Schlussbemerkungen

Für das Gebiet der Kölner Bucht liefern die in dieser Studie mit der Quadermethode berechneten und auf den gleichen regionalen Klimaprojektionen (DWD Referenzensemble, Szenario RCP8.5) basierenden Temperaturkenntage ähnliche Ergebnisse wie die Deutschlandkarten der Temperaturkenntage des Deutschen Klimaatlas. Durch die detaillierte Berücksichtigung der Geländeform und der heterogenen Landnutzung weisen die Temperaturkenntage dieser Studie aber eine deutlich höhere Spannweite und räumliche Variabilität auf. So ergeben sich durch die Stadtklimaefekte für die dicht bebauten Gebiete von Leverkusen deutlich höhere Häufigkeiten der Temperaturkenntage als im Deutschen Klimaatlas. Dies gilt in besonderem Maße für die Anzahl der Tropennächte, deren häufigeres Auftreten durch die nächtliche Abgabe der tagsüber in den Gebäuden gespeicherten Energie der Sonneneinstrahlung und aufgrund der durch Gebäude reduzierten Wärmeabstrahlung begünstigt wird. Umgekehrt sind die Häufigkeiten der Sommertage und der heißen Tage in Waldgebieten aufgrund der Schattenwirkung und Verdunstung der Bäume deutlich niedriger. Des Weiteren werden durch das Downscaling auf das 100 m Raster die Randhöhen der Kölner Bucht räumlich viel besser aufgelöst. Nächtliche Kaltluftabflüsse von den Randhöhen können dadurch besser abgebildet werden und es ergibt sich auch hierdurch eine größere und realitätsnähere Variabilität der simulierten Lufttemperaturen. Aber auch für die hier präsentierten 100 m Rasterdaten der Temperaturkenntage für vergangene und zukünftige Zeiträume gelten prinzipiell die gleichen Interpretationsrichtlinien wie für regionale Klimaprojektionen (BLFG Klima, 2020). Da die räumliche Auflösung einer Simulation immer geringer ist als die Modellgitterweiten,

sollen keine einzelnen Modellgitterpunkte, sondern immer mehrere Modellgitterpunkte zusammen interpretiert werden (mindestens 3 x 3 Gitterpunkte).

Die hier vorgestellten Modellergebnisse zeigen in Leverkusen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts eine starke und bis Ende des Jahrhunderts sehr starke Zunahme der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten. Um diese Zunahmen zu kompensieren oder zu minimieren ergibt sich ein starker Handlungsbedarf für die Umsetzung von Maßnahmen zur Klimaanpassung. Viele bereits vorliegende wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass Flächenentsiegelung, Verschattung, blau-grüne Infrastruktur und die Verwendung von Sonnenlicht reflektierenden Materialien die städtische Überwärmung deutlich reduzieren können (z. B. Müller et al., 2013; Žuvela-Aloise et al., 2016; Buchholz et al., 2016). Bei zusätzlicher blauer Infrastruktur ist darauf zu achten, dass die Wassertemperatur auch während Hitzewellen niedrig genug bleibt um nachts eine kühlende Wirkung zu haben und keine unerwünschte Wärmequelle zu sein.

Des Weiteren sollte in Leverkusen die Kühlwirkung nächtlicher Kaltluftzufuhr planerisch geschützt werden. Die Kaltluftzufuhr in die bebauten Gebiete Leverkusens erfolgt schon früh in der Nacht durch Kaltluftabflüsse von den Hängen und Tälern der östlichen Randhöhen der Kölner Bucht (Bergisches Land) und durch Flurwinde (Zeiske, 2022) sowie in der zweiten Nachthälfte auch durch den Rheintalwind (Kuttler et al., 1998; Hartwig et al., 2022). Hierbei sind siedlungsrelevante Gebiete mit starker nächtlicher Kaltluftbildung von Bebauung frei zu halten (Zeiske, 2022) und das Eindringen der Kaltluft in die Stadt durch den Schutz von vorhandenen Ventilationspfaden zu begünstigen. Als Entscheidungsgrundlage für lokale Bauvorhaben empfiehlt es sich deren Klimawirkung sowie die Effektivität geplanter Anpassungsmaßnahmen mit Gebäude auflösenden Modellen zu simulieren.

Da sich die unterschiedlichen, vom Weltklimarat IPCC genutzten, Klimaszenarien bis zur Mitte des 21. Jahrhundert bezüglich der möglichen Klimaerwärmung in Deutschland nicht stark unterscheiden (IPCC, 2023), ist das hier verwendete Klimaszenario RCP8.5 für diesen Zeithorizont eine geeignete Datengrundlage für die Klimaanpassung in Leverkusen. Bis zum Ende des Jahrhunderts ergeben sich für die Klimaszenarien jedoch deutlich unterschiedliche Fortsetzungen der Klimaerwärmung. Es ist daher eine noch offene Frage an eine wie starke Klimaerwärmung in der fernen Zukunft sich die Stadt Leverkusen anpassen muss. Nach aktuellen Erkenntnissen werden jedoch global betrachtet, die Bemühungen zur Reduzierung von Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan voraussichtlich nicht für die Einhaltung der vom IPCC als Ziel proklamierten Begrenzung der globalen Klimaerwärmung auf 1,5 Kelvin über dem vorindustriellen Niveau von 1850-1900 ausreichen (sog. „1,5 Grad Ziel“, WMO, 2023; Copernicus, 2024). Für den Fall, dass die globalen Bemühungen zum Klimaschutz nicht deutlich erfolgreicher werden, können die für Leverkusen auf Basis des RCP8.5 Szenarios (Weiter-wie-bisher-Szenario) berechnete Zunahme der Temperaturkennstage bis Ende des Jahrhunderts als wichtige Orientierung für den längerfristigen Klimaanpassungsbedarf angesehen werden.

Mit der vorliegenden Untersuchung zur Veränderung sommerlicher Hitze durch den Klimawandel und den bereitgestellten digitalen Ergebnisdaten liegt der Stadt Leverkusen eine wertvolle Grundlage für die klimaangepasste Stadtentwicklung vor. Die Klimaanpassung sollte so früh und so umfassend wie möglich erfolgen. Als sehr wichtigen Schritt hierzu wird empfohlen, die in dieser Studie aufgezeigten Auswirkungen des Klimawandels im Bebauungsplan und anderen Planungswerkzeugen zu berücksichtigen.

Literaturverzeichnis

BLFG Klima, 2020: Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten. Bund-Länder-Fachgespräch „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, 59 Seiten. [Link zum Online Dokument](#)

BMBau (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau) 1980: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungsanlagen. Schriftenreihe Raumordnung 06.044, Forschungsprojekt BMBau RS II 4-70 41 02-77.10.

BMUV, 2008: Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. [Link zur BMUV Internetseite](#)

BMUV, 2024: Das Klimaanpassungsgesetz (KAnG) im Bundesgesetzblatt BGBl. 2023 I Nr. 393. [Link zur BMUV Internetseite](#)

Brienen S., Walter A., Brendel C., Fleischer C., Ganske A., Haller M., Helms M., Höpp S., Jensen C., Jochumsen K., Möller J., Krähenmann S., Nilson E., Rauthe M., Razafimaharo C., Rudolph E., Rybka H., Schade N., Stanley K. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. 157 Seiten. [Link zum Online Dokument](#)

Buchholz S., Kossmann, M., Roos, M., 2016: INKAS – a guidance tool to assess the impact of adaptation measures against urban heat. Meteorologische Zeitschrift 25, 281-289. [Link zum Online Dokument](#)

Copernicus, 2024: European State of the Climate Report 2023. Copernicus Climate Change Service (C3S). [Link zur C3S Internetseite](#)

Deutscher Klimaatlas, 2024: Online Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes. [Link zur DWD Internetseite des Deutschen Klimaatlas](#)

Deutschländer, T., Koßmann, M., Steigerwald, T., Namyslo, J., 2008: Verwendung von Klimaprojektionsdaten für die Stadtklimasimulation. Klimastatusbericht 2008, Deutscher Wetterdienst (Herausgeber), Offenbach, 13-17.

Früh, B., Koßmann, M., Roos, M., 2011a: Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237, 68 Seiten. [Link zum Online Dokument](#)

Früh, B., Becker, P., Deutschländer, T., Hessel, J.-D., Koßmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., Roos, M., Sievers, U., Steigerwald, T., Turau, H., Wienert, U., 2011b: Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. Journal of Applied Meteorology and Climatology 50, 1, 167-184. [Link zum Online Dokument](#)

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

Hartwig, C., Wieczorrek, Y., Birkenstock, S., Langen, M., Ginzel, S., Koßmann, M., 2022: Lokale und regionale Windsysteme in der Kölner Bucht sowie der kanalisierende Effekt des Rheintals - Analyse eines bodennahen Bergwindes entlang des Rheintals anhand meteorologischer Messdaten. Immissionsschutz, Ausgabe 1/2022, Seiten 4-17. [Link zum Online Dokument](#)

Heene, V., Koßmann, M., Fuchs, P., 2018: Copernicus-Daten für Stadtklimasimulationen. In I. Ehlerlert und C. Schweitzer (Herausgeber): Copernicus für das Umweltmonitoring - Eine Einführung. Seiten 38-42. [Link zum Online Dokument](#)

Imbery, F., Plagemann, S., Namyslo, J., 2013: Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS. *Advances in Science and Research* 10, 91-98 [Link zum Online Dokument](#)

IPCC, 2023: Intergovernmental Panel on Climate Change. Future global climate: Scenario based projections and near-term information. In *Climate change 2021 – the physical science basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report*, 553–672. Cambridge University Press. [Link zum Online Dokument](#)

Kim, K.B., Kwon, H., Han, D., 2015: Bias correction methods for regional climate model simulations considering the distributional parametric uncertainty underlying the observations. *Journal of Hydrology* 530, 568-579. [Link zum Online Dokument](#)

Koßmann, M., 2012: Stadtklimasimulationen mit dem Modell MUKLIMO_3 zur Veränderung sommerlicher Temperaturverhältnisse durch Klimawandel und Bebauungsänderungen in Köln. Ein Beitrag zum Projekt Köln_21. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klima- und Umweltberatung, Offenbach, 56 Seiten. [Link zum Online Dokument](#)

Krähenmann S., Walter A., Klippel L., 2021: Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Downscaling und multivariate Bias-Adjustierung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 248, ISBN 978-3-88148-528-9. [Link zum Online Dokument](#)

Kuttler, W., 2009: Zum Klima im urbanen Raum. *Klimastatusbericht 2008*. Deutscher Wetterdienst (Herausgeber), Offenbach, 6 -12.

Kuttler, W., Düttemeyer, D., Barlag, A.-B., 1998: Influence of regional and local winds on urban ventilation in Cologne, Germany. *Meteorologische Zeitschrift N.F.* 7, 77-87. [Link zum Online Dokument](#)

Kuttler, W., Weber, S., 2023. Characteristics and phenomena of the urban climate. *Meteorologische Zeitschrift*, 32 (1), 15–47. [Link zum Online Dokument](#)

LANUV, 2013: Klimawandelgerechte Metropole Köln. LANUV-Fachbericht 50, 148 Seiten. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. [Link zum Online Dokument](#)

Masson, V., Lemonsu, A., Hildago, J., Voogt, J. 2020: Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources* 45, 411-444. [Link zum Online Dokument](#)

Müller, N., Kuttler, W., Barlag, A.-B., 2013: Counteracting urban climate change: adaptation measures and their effect on thermal comfort. *Theoretical and Applied Climatology*. 115, 243-257. [Link zum Online Dokument](#)

Noppel, H., 2017: Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz: Abschlussbericht zum Arbeitspaket 3 des Projekts KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz - Stadtklima in der kommunalen Praxis. ISBN 978-3-88148-500-5, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 249*. [Link zum Online Dokument](#)

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J. A., 2017: *Urban Climates*: Cambridge University Press.

Pielke, R. A., 1984: *Mesoscale Meteorological Modelling* – Academic Press, New York, 612 Seiten.

Siebert, J.; Sievers, U.; Zdankowski, W., 1992: A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology* 59, 1-34. [Link zum Online Dokument](#)

Sievers, U., R. Forkel und W. Zdunkowski, 1983: Transport equations for heat and moisture in the soil and their application to boundary layer problems. Beiträge zur Physik der Atmosphäre 56, 58-83.

Sievers, U., Zdunkowski, W., 1986: A microscale urban climate model. Beiträge zur Physik der Atmosphäre 59, 13-40.

Sievers, U., 1990: Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. Umweltmeteorologie, Schriftenreihe Band 15: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf, 92-105.

Sievers, U., 1995: Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. Meteorologische Zeitschrift, N.F. 4, 3-15. [Link zum Online Dokument](#)

Sievers U., 2012: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 240, 142 Seiten. [Link zum Online Dokument](#)

Sievers, U., Früh, B., 2012: A practical approach to compute short-wave irradiance at the surface of sub-grid scale buildings. Meteorologische Zeitschrift. 21, 349-364. [Link zum Online Dokument](#)

Sievers U., 2016: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 248, 151 Seiten. [Link zum Online Dokument](#)

WMO, 2023: Global Annual to Decadal Climate Update. Word Meteorological Organisation (Hrsg.), [Link zum Online Dokument](#)

Zeiske, P., 2022: Untersuchung nächtlicher Lokalwinde im Raum Köln und Leverkusen aus MUKLIMO_3 Simulationen für sommerliche Hochdruckwetterlagen. Hochschule des Bundes für öffentliche Verwaltung. Fachbereich Wetterdienst, 101 Seiten. [Link zum Online Dokument](#)

Zhao, Z.-C., Luo Y., Huang J.-B., 2013: A Review on Evaluation Methods of Climate Modeling, Advances in Climate Change Research 4, 137–144. [Link zum Online Dokument](#)

Žuvela-Aloise M., Koch, R., Neureiter, A., Böhm, R., Buchholz, S., 2014: Reconstructing urban climate of Vienna based on historical maps dating to the early instrumental period, Urban Climate 10(3), 490-508. [Link zum Online Dokument](#)

Žuvela-Aloise M., Koch R., Buchholz, S., Früh, B., 2016: Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. Climatic Change 135, 425-438. [Link zum Online Dokument](#)

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Schematische Darstellung des Downscaling (d. h. der räumlichen Verfeinerung) von globalen Klimasimulationen, deren Ergebnisse als Antriebsdaten (Randwerte) von regionalen Klimasimulationen verwendet werden (dynamisches Downscaling). Die Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen dienen wiederum als Eingangsdaten für das dynamisch-statistische Downscaling auf das Stadtgebiet mit der Quadermethode. ©DWD. 8
- Abbildung 2: Topographische Karte des 64 km x 68 km großen Gesamtmodellgebiets (EPSG:25832 Koordinaten der Südwestecke: $x=333365$ und $y=5605154$). Der schwarze Rahmen zeigt das 28 km x 31 km große Kerngebiet in dem die Rasterweite der Stadtklimasimulationen 100 m beträgt. © GeoBasis-DE / BKG 2021. 10
- Abbildung 3: Geländehöhe (m ü. NHN) im 64 km x 68 km großen MUKLIMO_3 Modellgebiet. Die Stadtgrenze ist in magenta Farbe eingezeichnet. Der schwarze Rahmen kennzeichnet das 28 km x 31 km große Kerngebiet in dem die Rasterweite der Stadtklimasimulationen 100 m beträgt. Der weiße, gestrichelte Rahmen zeigt das 18 km x 11 km große Auswerteggebiet für die Stadt Leverkusen. 11
- Abbildung 4: Landnutzungsklassifizierung für den IST-Zustand im Gebiet von Leverkusen (18 km x 11 km). Die Klassen 1 bis 7 entsprechen den amtlichen Liegenschaftskatastern der Städte Leverkusen und Köln, die übrigen Klassen entsprechen dem Copernicus Urban Atlas (2018) des Copernicus Land Monitoring Service. Zusätzlich ist in magenta Farbe die Stadtgrenze eingezeichnet. 12
- Abbildung 5: Klassifizierte Bodenarten im MUKLIMO_3 Gebiet von Leverkusen (18 km x 11 km) nach Pielke (1984) und Sievers (2016). 1 = Sand, 2 = lehmiger Sand, 3 = sandiger Lehm, 4 = schluffiger Lehm, 5 = Lehm, 6 = sandiger tonhaltiger Lehm, 7 = schluffiger tonhaltiger Lehm, 8 = toniger Lehm, 9 = sandiger Ton, 10 = schluffiger Ton, 11 = Ton, 12 = Torf. Zusätzlich ist in magenta Farbe die Stadtgrenze eingezeichnet. 13
- Abbildung 6: Mittlerer Gebäudegrundflächenanteil (%) im Stadtgebiet von Leverkusen. 14
- Abbildung 7: Mittlere Gebäudehöhe (m) im Stadtgebiet von Leverkusen. 14
- Abbildung 8: Skizze des Quaders zur Illustration der Eckpunktsimulationen und der tri-linearen Interpolation (Žuvela-Aloise et al., 2014). Die Quadereckpunkte werden durch Tagesmittelwerte der Lufttemperatur T_c , der relativen Luftfeuchtigkeit rh_c und der Windgeschwindigkeit v_c bestimmt und sind für die im Gebiet durchgeführten MUKLIMO_3 Simulationen in Tabelle 1 aufgelistet. Hierbei sind z. B. $T_{c,min}$, $rh_{c,min}$ und $v_{c,min}$ die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit für die in der Tabelle 1 mit „000“ gekennzeichnete, kühle, trockene und windschwache Quadereckpunktsimulation (Index c steht für engl. Corner). 15

Abbildung 9: Beispielergebnis einer mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 für den IST-Zustand des Quadereckpunkts 100 (siehe Tabelle 1) im Gebiet von Leverkusen mit Sonnenstand 27. Juli und SSO Anströmung um 23 Uhr (Mitteleuropäische Sommerzeit) simulierte Lufttemperatur mit Windvektoren in 5 Meter über Grund. Gut zu erkennen sind die starke Überwärmung der dicht bebauten Stadtgebiete und die aus dem kühleren ländlichen Umland in die Überwärmungsgebiete gerichteten Winde (Flurwinde und Kaltluftabflüsse von den Hängen und Seitentälern am ost-nordöstlichen Rand der Kölner Bucht).....	16
Abbildung 10: Mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 1971-2000. Der schwarze Stern im Süden des Stadtgebiets zeigt hier und in nachfolgenden Ergebniskarten den Standort der Klimastation Stammheim.	20
Abbildung 11: Mittlere jährliche Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 1971-2000.....	21
Abbildung 12: Mittlere jährliche Anzahl an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 1971-2000.....	21
Abbildung 13: 15. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.....	23
Abbildung 14: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.....	23
Abbildung 15: 85. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.....	24
Abbildung 16: 15. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.....	24
Abbildung 17: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.....	25
Abbildung 18: 85. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.....	25
Abbildung 19: 15. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.....	26
Abbildung 20: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.....	26
Abbildung 21: 85. Perzentil der mittleren jährlichen Anzahl an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2031-2060.....	27
Abbildung 22: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2071-2100.....	29

Abbildung 23: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2071-2100..... 29

Abbildung 24: 50. Perzentil (Median) der mittleren jährlichen Anzahl an Tropennächten ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$) für den IST-Zustand im Stadtgebiet von Leverkusen für den Zeitraum 2071-2100..... 30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tagesmittelwerte bodennaher Klimaparameter für die in Abbildung 8 illustrierten acht Eckpunktsimulationen der Quadermethode.	17
Tabelle 2: Regionale Klimaprojektionen des DWD Referenzensembles für das Klimaszenario RCP8.5.....	18
Tabelle 3: Gemessene und per Computersimulation berechnete (Medianwert über 3 x 3 Modellgitterpunkte) mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen, Heißen Tage und Tropennächten im Zeitraum 1971-2000 für 3 Standorte in Köln.....	20

Danksagung

Besonderer Dank gilt den Städten Leverkusen und Köln für die Bereitstellung von Geodaten für die Stadtklimamodellierung und die stets kooperative Zusammenarbeit sowie den Kolleginnen aus der Abteilung Klima- und Umweltberatung des DWD in Offenbach: Dr. Heike Schau-Noppel für die Unterstützung bei den Simulationen mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3, insbesondere für die Modellerweiterung zur Berücksichtigung unterschiedlicher Bodenarten und bei der Visualisierung der Ergebnisse. Dr. Saskia Buchholz für die Bereitstellung der Geodaten außerhalb der Stadtgebiete von Köln und Leverkusen. Nora Leps für die Bereitstellung des Ensembles Regionaler Klimaprojektionen.