DEUTSCHER WETTERDIENST

Abteilung Klima- und Umweltberatung

Bericht zu Klima und Klimaentwicklung bis Ende des Jahrhunderts, basierend auf Klimaprojektionen für Wuppertal

Auftraggeber:	Stadt Wuppertal
Wissenschaftliche Bearbeitung:	Dipl.-Met. Guido Halbig Dipl.-Met. Thomas Kesseler-Lauterkorn

Essen, den 16.04.2021

.....	.....
Dipl.-Met. Guido Halbig Leiter Regionales Klimabüro Essen	Dipl.-Met. Th. Kesseler-Lauterkorn Leiter Sachgebiet Planungsgutachten

Dieser Bericht ist urheberrechtlich geschützt, außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte ist seine Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte sowie die Mitteilung seines Inhaltes, auch auszugsweise, nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des Deutschen Wetterdienstes gestattet.

Inhalt

1 Einleitung und Zielsetzung 3
2 Klimadaten 4
2.1 Die naturräumliche Lage von Wuppertal 4
2.2 Datengrundlage 5
2.3 Lufttemperatur 7
2.4 Niederschlag 13
2.5 Wind 16
2.6 Sonnenschein 20
2.7 Globalstrahlung 23
2.8 Anzahl der Tage mit Hitzewarnung in Wuppertal 24
2.9 Die langzeitliche Entwicklung ausgewählter Klimaparameter 26
3 Klimaprojektionsrechnungen zum zukünftigen Klima in Wuppertal 36
3.1 Lufttemperatur 42
3.2 Niederschlag 47
4 Literatur 49

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Stadt Wuppertal hat im Sommer 2020 den Deutschen Wetterdienst, Regionales Klimabüro Essen, gebeten, eine kombinierte Klimaanalyse und Darstellung der Auswirkungen des Klimawandels für die Stadt Wuppertal zu erstellen, um die Öffentlichkeit und die lokalen Mandatsträger ausführlich informieren zu können.

Die Erstellung des Berichts erfolgte im Rahmen des Gesetzes über den Deutschen Wetterdienst gemäß §4, Abs. 4 im Rahmen des Umweltschutzes.

Kapitel 2 des Klimareports beschreibt das derzeitige Klima in Wuppertal in erster Linie anhand von Klimadaten der DWD-Messstation Wuppertal-Buchenhofen, sowie von Rasterdaten. In Kapitel 3 werden - anhand von Klimaprojektionsdaten - Aussagen zur Veränderung des Klimas in Wuppertal bis Mitte bzw. Ende des Jahrhunderts getroffen.

Kapitel 3 beschreibt die zu erwartenden Klimaänderungen in Wuppertal für die Lufttemperatur, den Niederschlag und verschiedene Kenntage wie Sommertage oder Frosttage.

2 Klimadaten

2.1 Die naturräumliche Lage von Wuppertal

Von der naturräumlichen Gliederung her liegt der Nordteil der Stadt Wuppertal im Bereich des Bergisch-Märkischen Hügellandes, während der südliche Teil zu den Mittelbergischen und Bergisch-Märkischen Hochflächen zählt. Dazwischen befindet sich in einer mittleren Höhenlage von rund 200 m über NHN die Wuppertaler Senke. In dieser verläuft die Wupper ostnordost-westsüdwest-orientiert, zuvor fließt sie im Bereich des Östlichen Wupperengtales grob in Süd-Nord-Richtung und biegt am Südrand von Oberbarmen um. Bei Sonnborn ist die zweite markante Biegung anzutreffen, in der die Wupper aus der Längstalsenke heraus und in einem Mäandertal – dem Westlichen Wupperengtal – nach Süden fließt. Die Wupper mit ihren zum Teil steilen, bewaldeten Hängen verläuft auf rund 20 Kilometern durch das Stadtgebiet.

Die höchsten Erhebungen sind in der topographisch stark gegliederten Stadt mit bis zu 350 m über NHN auf den Südhöhen im Bereich von Lichtenplatz auf dem Lichtscheider Höhenrücken zu finden. Während der langgestreckte Rücken nach Osten und Westen nur sanft auf etwa 300 m abfällt, besteht nach Norden in Richtung Tal der Wupper ein deutlich ausgeprägtes Gefälle (siehe auch nachstehende Abbildung 2-1). Am weniger steilen Südhang beginnt der Stadtbezirk Ronsdorf. Im Stadtquartier Herbringhausen im Südosten von Wuppertal werden Höhenlagen von zum Teil über 320 m über NHN erreicht. Im nördlichen Stadtgebiet in den Naturräumen von Hardenberger Hügelland und Haßlinghauser Rücken – nördlich der Wupper-Senke – sind Höhen von bis zu 300 m über NHN anzutreffen, so etwa in Dönberg oder in Nächstebreck. Der niedrigste Punkt des Stadtgebietes mit 101 m über NHN ist im äußersten Süden an der Mündung des Morsbaches in die Wupper gelegen.

Die Fläche von Wuppertal beträgt rund 168,4 km² und die Bevölkerungszahl liegt bei rund 362.000 (Stand März 2020). Sie verteilen sich auf zehn Stadtbezirke (Elberfeld, Elberfeld-West, Uellendahl-Katernberg, Vohwinkel, Cronenberg, Barmen, Oberbarmen, Heckinghausen, Langerfeld-Beyenburg und Ronsdorf). Die mittlere Einwohnerdichte liegt bei 2150 Einwohnern pro km² (2020).

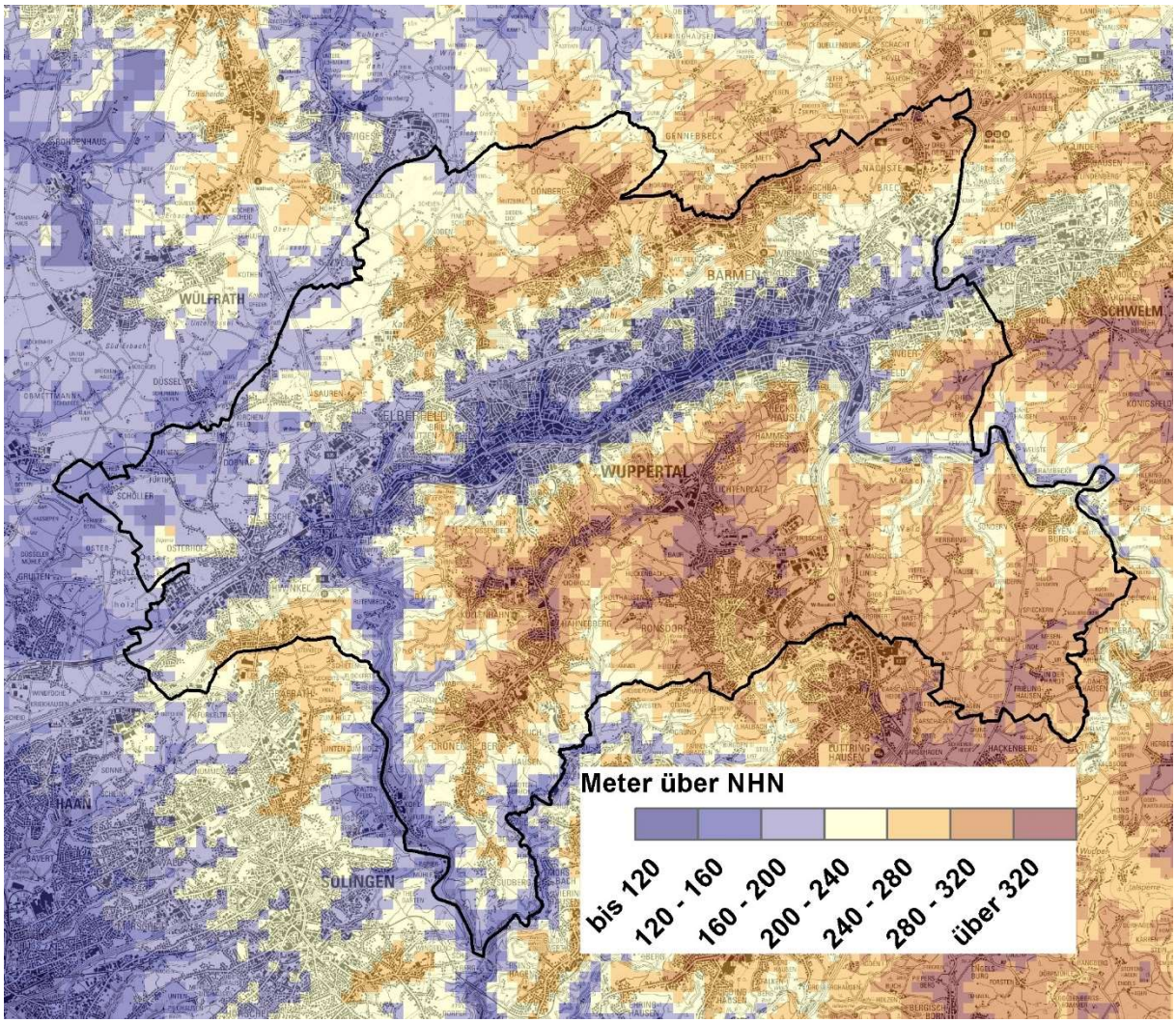

Abbildung 2-1: Stadtgebiet von Wuppertal mit Geländehöhen
Kartengrundlage: © Land NRW (2020) - Lizenz dl-de/by-2-0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0), Maßstab 1:50.000, in der Abb. verändert;Geländemodell: DGM200 © GeoBasis-DE, BKG 2020

2.2 Datengrundlage

Für die vorliegende klimatologische Auswertung werden neben flächenhaften Rasterdaten in erster Linie die Daten der Klimastation des DWD in Wuppertal-Buchenhofen (134 m über NHN, Lage siehe auch folgende Abbildung 2-2) herangezogen. Auf dem Gelände der Kläranlage Buchenhofen, die sich im Westlichen Wupperengtal befindet, wurde bereits im Juni 1946 eine Messstation eingerichtet. Somit liegt eine über 70-jährige vollständige und hinreichend homogene klimatologische Datenreihe vor, die als repräsentativ für die Tallagen des Stadtgebietes gelten kann.

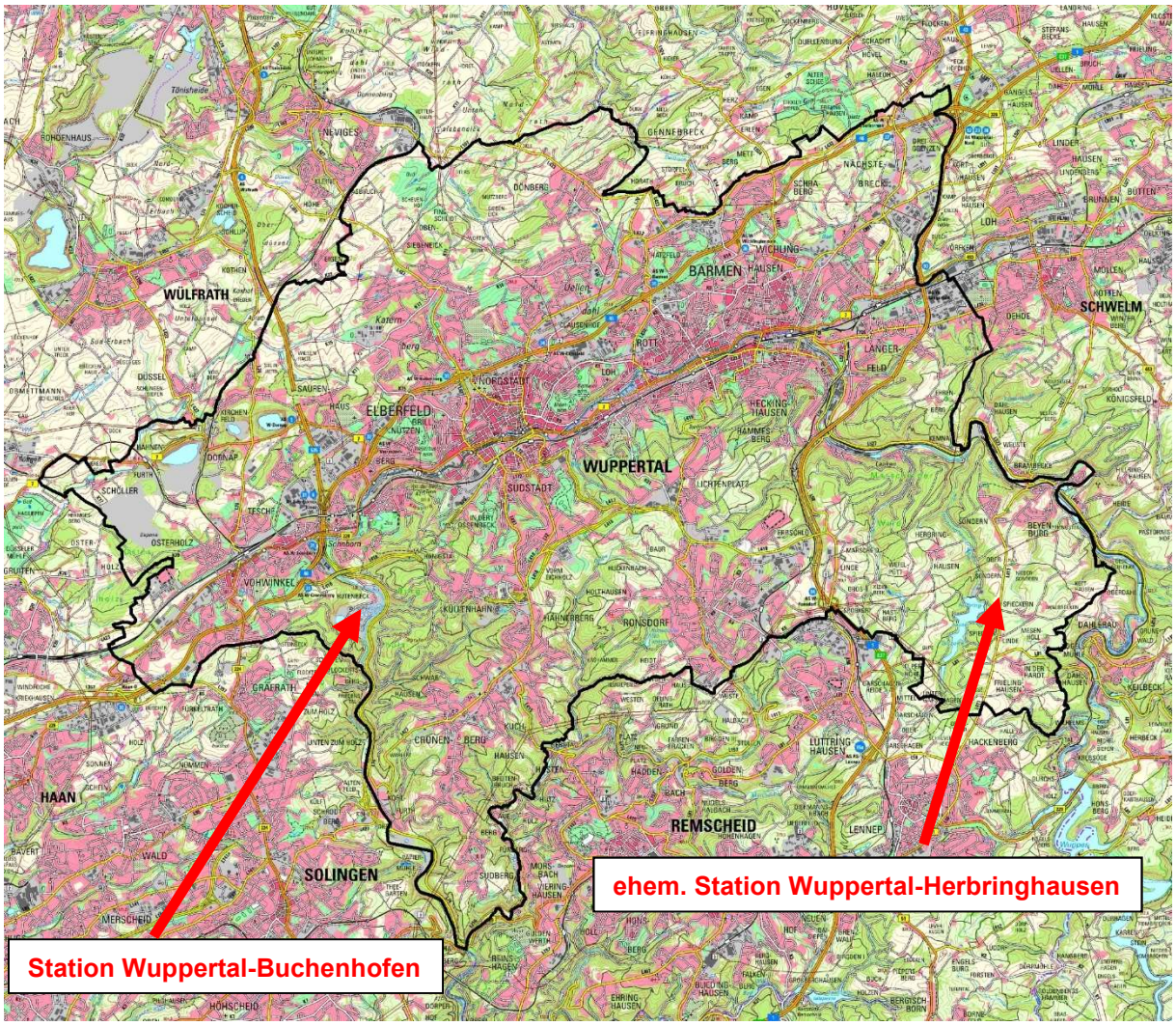

Abbildung 2-2: Wuppertal mit Lage der Klimastation Wuppertal-Buchenhofen und der ehemaligen Niederschlagsstation W-Hebringhausen (rote Pfeile, s.a. Kapitel 2.2), Kartengrundlage: © Land NRW (2020) - Lizenz dl-de/by-2-0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0), Maßstab 1:50.000, in der Abb. verändert

Die ehemalige Station Wuppertal-Herbringhausen, im Bereich des Naturraumes der Bergisch-Märkischen-Hochflächen auf einer Höhe von 275 m über NHN, war eine langjährig messende Niederschlagsstation, die den Betrieb jedoch bereits Ende 2006 einstellte. So liegt für diese Station leider keine aktuelle Messreihe vor. Allerdings wurden mit Hilfe von Interpolationsverfahren für den Zeitraum 1981-2010 vieljährige Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag berechnet.[1]

Die entsprechenden Werte der Station Wuppertal-Herbringhausen werden auf Seite 15 dargestellt.

[1] Vieljährige Mittelwerte verschiedener Referenzperioden sind auf der Homepage des DWD unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/vielj_mittelwerte.html zu finden

2.3 Lufttemperatur

Die Elemente, die beim Klima betrachtet werden, sind dieselben wie beim Wetter. Der Zeitraum, der zur Darstellung des Klimas verwendet wird, sollte ausreichend lang sein, um statistisch gesicherte Maßzahlen wie Mittelwerte, Häufigkeiten, Extrema usw. zu erhalten. Üblicherweise wird bei solchen Betrachtungen von 30-jährigen Mittelungsperioden ausgegangen.

Mit Ablauf des Jahres 2020 steht eine „neue“ Mittelungsperiode zur Verfügung – der Zeitraum 1991-2020. Zukünftig werden sich klimatische Einordnungen in der Regel auf diese neue Referenzperiode beziehen. Das aktuelle Klima für Wuppertal-Buchenhofen wird nunmehr mit dem folgenden Klimadiagramm beschrieben:

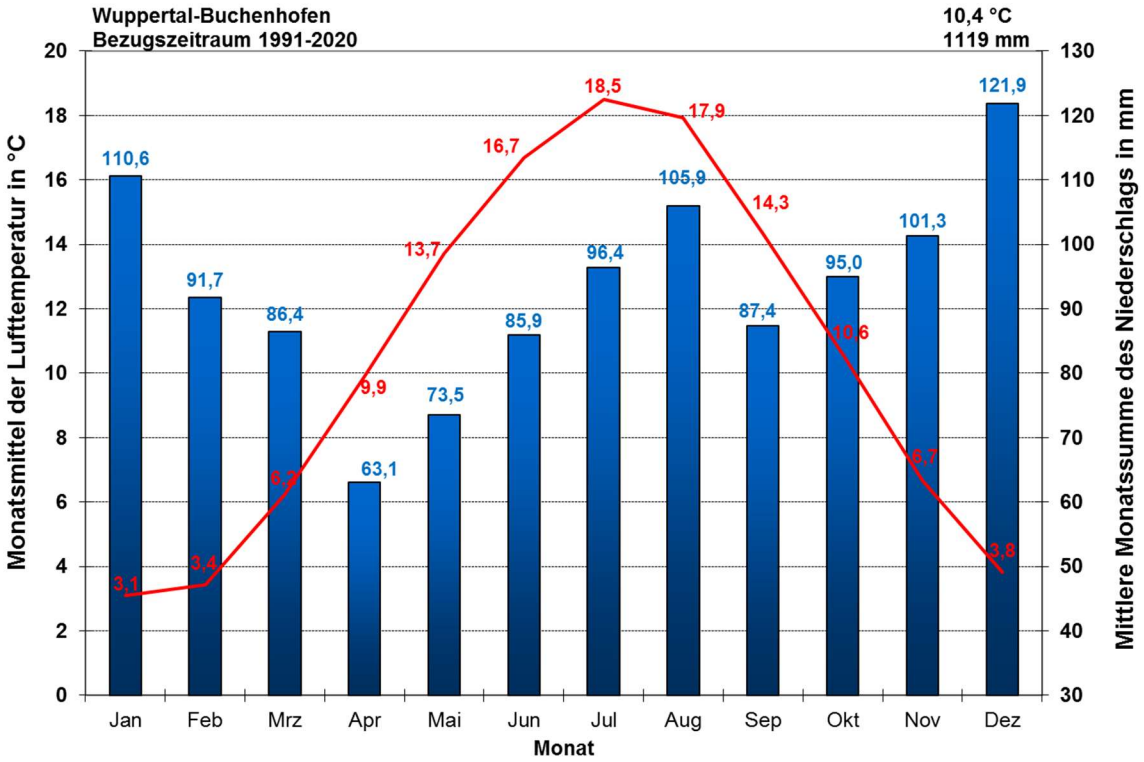

Abbildung 2-3: Klimadiagramm der Station Wuppertal-Buchenhofen (Bezugszeitraum 1991-2020)

Die Messung der Lufttemperatur erfolgt in 2 m über Grund sonnenstrahlungsgeschützt. In Wuppertal-Buchenhofen beträgt – bezogen auf den Zeitraum 1991-2020 – die langjährige Jahresdurchschnittstemperatur 10,4 °C. Das Klimadiagramm in Abbildung 2-3 zeigt, dass der Juli mit einer mittleren Mitteltemperatur von 18,5 °C der wärmste Monat ist, gefolgt vom August mit 17,9 °C (bezogen auf 1991-2020). Der kälteste Monat ist der Januar (durchschnittliches Monatsmittel 3,1 °C), gefolgt von den beiden anderen klimatologischen Wintermonaten Februar (3,4 °C) und Dezember (3,8 °C).

Seit Beginn der ununterbrochenen DWD-Aufzeichnungen an der Klimastation im Juni 1946 ist der absolut kälteste Monat der Februar 1956 mit einer Mitteltemperatur von -7,6 °C, also fast 11 K (K=Kelvin, Maßangabe für Temperaturdifferenzen) unter dem langjährigen Mittelwert. Die niedrigste Jahresmitteltemperatur wurde ebenso 1956 mit 7,7 °C verzeichnet. Das höchste

Jahresmittel der Lufttemperatur ist 2020 mit 11,5 °C aufgetreten, gefolgt von 2014 und 2018 mit jeweils 11,2 °C. Der absolut wärmste Monat ist der Juli 2006 mit einer Mitteltemperatur von 23,5 °C. Diese liegt damit 5 K über dem 30-jährigen Juli-Durchschnittswert für Wuppertal-Buchenhofen. Die größte positive Abweichung eines Monats gegenüber dem Klimamittel weist allerdings der Dezember 2015 mit 5,1 K über dem 30-jährigen Mittel auf. Die mittlere Jahresschwankung der Temperatur (Differenz zwischen der Mitteltemperatur des wärmsten und kältesten Monats) beträgt rund 15,5 K. Dieser Wert ist charakteristisch für das eher maritim beeinflusste Klima Nordwestdeutschlands. Im Gegensatz dazu beträgt der Wert im kontinentaleren Klima Süd- und Ostdeutschlands 17 bis 19 K. Die Schwankungsbreite der Monatsmitteltemperaturen ist in den Wintermonaten größer als in den Sommermonaten. Die Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Monatsmittel beträgt im Februar gut 15 K, im Juli ergibt sich immerhin eine Differenz von 9,3 K. Gerade auch in den letzten Jahren weisen einzelne Monate eine große Spannbreite der Mitteltemperaturen auf. So lag im Dezember 2015 der Wert in Wuppertal-Buchenhofen bei 8,9 °C, während im Dezember 2010 das Monatsmittel der Lufttemperatur -1,9 °C aufwies. Wie oben schon erwähnt lag der Juli 2006 bei 23,5 °C, der Juli 2011 dagegen nur bei 16,0 °C. Im März 2013 wurde in W-Buchenhofen eine Monatsmitteltemperatur von 2,0 °C erreicht, ein Jahr später waren es über 6 K mehr (8,1 °C im März 2014). Der Februar 2018 lag im Mittel bei (hoch-)winterlichen -0,3 °C, während der Februar 2020 sehr milde 6,5 °C erreichte (aber damit immer noch 1 K unter dem Rekordfebruar 1990 lag). Insgesamt bildet sich in den letzten 10 bis 15 Jahren bei weiterer Zunahme der mittleren Temperaturverhältnisse eine größere Schwankungsbreite der Temperaturen zwischen einzelnen Kalendermonaten verschiedener Jahre ab.

Eine generelle Einordnung der mittleren Temperaturverhältnisse im Untersuchungsgebiet kann auch auf der Grundlage von berechneten Temperaturrasterdaten erfolgen (Jahresmittel der Lufttemperatur in °C im Raster 1 km x 1 km, Bezug 1981-2010). Diesen Klimakarten liegen Verfahren zugrunde, die es erlauben, klimatologische Parameter, für die ein Zusammenhang (Regressionsbeziehung) zur Topographie nachgewiesen werden kann, mit einer Auflösung von einem Kilometer darzustellen. Die berechneten Werte beruhen auf Messdaten und werden - in Abhängigkeit von der Höhe mit Hilfe von variablen linearen Regressionskoeffizienten - interpoliert und in den Raum übertragen. Entsprechende Rasterdaten und Karten von Deutschland liegen zu verschiedenen Parametern (z.B. Temperatur, Niederschlag, Dampfdruck) für beliebige Zeiträume (Monate, Jahreszeiten, Halbjahre, Jahre) vor. Es ist zu beachten, dass kleinräumige klimatische Prozesse (z.B. städtische Wärmeinseln, Kaltluftabflüsse) mit dem gegebenen Stationsmessnetz und dem verwendeten Interpolationsverfahren in den Rasterdaten nicht abgebildet werden können. In der Abbildung 2-5 auf der nächsten Seite ist das Mittel der Lufttemperatur im Raster 1 km^2 im Raum Wuppertal für den Zeitraum 1981 bis 2010 dargestellt. Aufgrund der groben Rasterung können kleinräumige Strukturen zwar nur bedingt wiedergegeben werden, es wird aber deutlich, dass die Lufttemperatur innerhalb des Gebietes variiert und im Mittel mit der Geländehöhe abnimmt.

So ist trotz der groben Rasterung in der folgenden Abbildung 2-4 eine Auflösung des Tales der Wupper erkennbar; hier werden vielfach mittlere Temperaturwerte von 9,7 bis 9,9 °C, vereinzelt auch von 10,0 oder 10,1 °C (etwa im Westlichen Wupperengtal) erreicht. Diese Größenordnung passt gut zur Mitteltemperatur von der Station Wuppertal-Buchenhofen, deren

Wert im Zeitraum 1981-2010 10,1 °C beträgt. Die höchst gelegenen Bereiche in Wuppertal weisen eine Jahresmitteltemperatur von 8,7 bis 9,0 °C auf und liegen damit im mittleren Jahresmittel etwa 1 Kelvin unter den Talregionen.

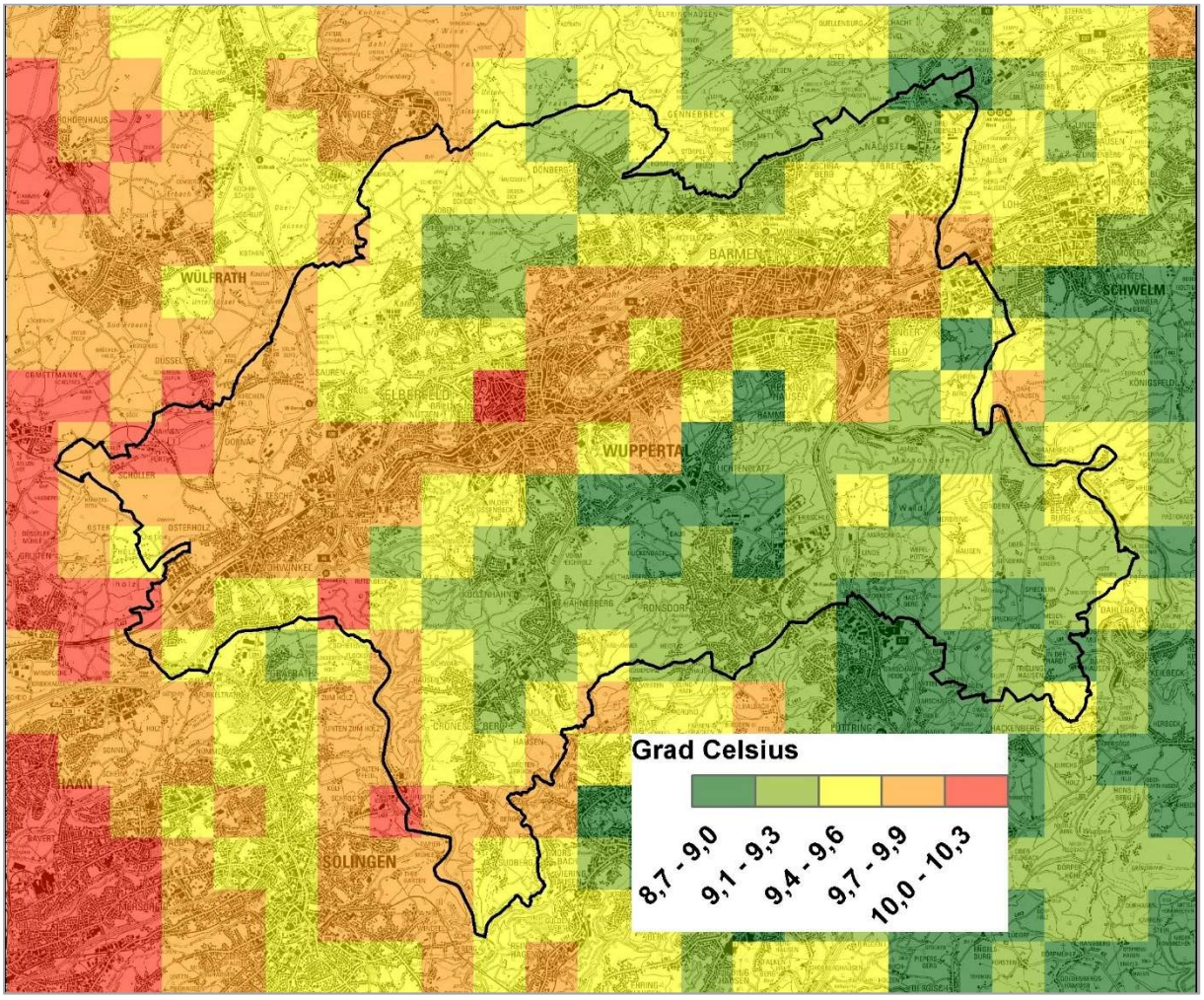

Abbildung 2-4: Mittleres Jahresmittel der Lufttemperatur im Raum Wuppertal im 1 km²-Raster im Bezugszeitraum 1981-2010, Kartengrundlage: © Land NRW (2020) - Lizenz dl-de/by-2-0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0), Maßstab 1:50.000, in der Abb. verändert

Neben den absoluten Werten und den Abweichungen geben auch die klimatologischen Kenntage einen guten Eindruck von den Temperaturverhältnissen an einem Ort. Das sind Tage, an denen die Lufttemperatur definierte Schwellenwerte über- bzw. unterschreitet. Dazu zählen Sommertage (Tagesmaximum ≥ 25 °C), heiße Tage (Tagesmaximum ≥ 30 °C), Frosttage (Tagesminimum < 0 °C) sowie Eistage (Tagesmaximum < 0 °C). In der Tabelle 2-1 sind für die Station Wuppertal-Buchenhofen die mittlere Anzahl der einzelnen Kenntage für den Bezugszeitraum 1981-2010 zu finden. Die Zahlen für den neuen Referenzzeitraum 1991-2020 sind am Ende dieses Unterkapitels zusammengestellt.

Während des gesamten Winters ist in der Region mit Frost zu rechnen, wobei von Dezember bis Februar die Zahl der Frosttage (T_{min} < 0 °C) für Lagen im (Wupper-)Talbereich mit 11 bis

14 Tagen pro Monat relativ konstant bleibt. Im Januar treten im langjährigen Durchschnitt gut 3 Eistage (T_{max} < 0 °C) auf, im Dezember und Februar sind es rund 2 Tage.

Tabelle 2-1: Mittlere Anzahl von Sommertagen (Tmax ≥ 25 °C), heißen Tagen (Tmax ≥ 30 °C), Frosttagen (Tmin < 0 °C) und Eistagen (Tmax < 0 °C) in W-Buchenhofen für den Zeitraum 1981-2010

Kenntage	JAHR	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ
Sommertage	36,8	0,0	0,0	0,0	0,8	4,3	7,2	11,9	9,8	2,7	0,1	0,0	0,0
Heiße Tage	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,2	4,0	2,7	0,1	0,0	0,0	0,0
Frosttage	55,4	13,5	13,1	8,2	3,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	4,9	11,3
Eis-Tage	7,5	3,1	2,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,9

Zudem gibt es als weitere Kenntage die sogenannten Tropennächte, diese werden erzielt, wenn das Tagesminimum 20 °C nicht unterschreitet. Tropennächte sind im Bezugszeitraum 1981-2010 an der Station Wuppertal-Buchenhofen allerdings sehr selten und bei weitem nicht jedes Jahr aufgetreten (im Schnitt nur jedes zweite bis dritte Jahr). In Kapitel 3 wird herausgearbeitet, dass in Zukunft die Anzahl der Tropennächte jedoch deutlich zunehmen wird.

Das meteorologische Frühjahr (März bis Mai) ist im vieljährigen Mittel durch einen gleichmäßigen kräftigen Temperaturanstieg geprägt (siehe auch Abbildung 2-3). Gerade im Frühjahr können aber auch noch häufig Kälterückfälle auftreten. So sind im Bereich Wuppertal statistisch im März noch jedes Jahr gut 8 Frosttage möglich, während Eistage die absolute Ausnahme darstellen (Tabelle 2-1). Im April kann die Temperatur schon auf sommerliche Werte klettern. Sommertage sind im April allerdings deutlich seltener als im September (knapp 3 Sommertage), gleichzeitig ist im April aber auch noch mit 3 Frosttagen zu rechnen, während diese im September nicht auftreten. Im Mai liegt die Monatsmitteltemperatur dann bereits bei rund 14 °C, die Zahl der Sommertage liegt im Durchschnitt bei etwa 4, und Frost ist so gut wie nicht mehr zu erwarten. In einzelnen Jahren kann der Jahresgang der Monatsmitteltemperaturen sich allerdings umkehren, d.h. der April ist dann kälter als der März oder der Mai kälter als der April.

Im Mittel sind im Juli im Bereich der Tallagen 12 Sommertage und 4 heiße Tage zu erwarten, während es im August statistisch gesehen etwa 10 Sommertage und 3 heiße Tage sind. Im September erfolgt ein deutlicher Rückgang der Monatsmitteltemperatur auf 14 bis 15 °C, allerdings kann man im September oft noch mit spätsommerlich warmer Witterung rechnen, bei der die Tageshöchsttemperatur mindestens 25 °C erreicht. Im vieljährigen Mittel sind im September noch 3 solcher Sommertage zu erwarten. Statistisch gibt es in diesem Monat so gut wie keinen heißen Tag mehr, im September 2016 wurden allerdings 4 heiße Tage erzielt, seit 1948 der höchste Wert an der Station Wuppertal-Buchenhofen.

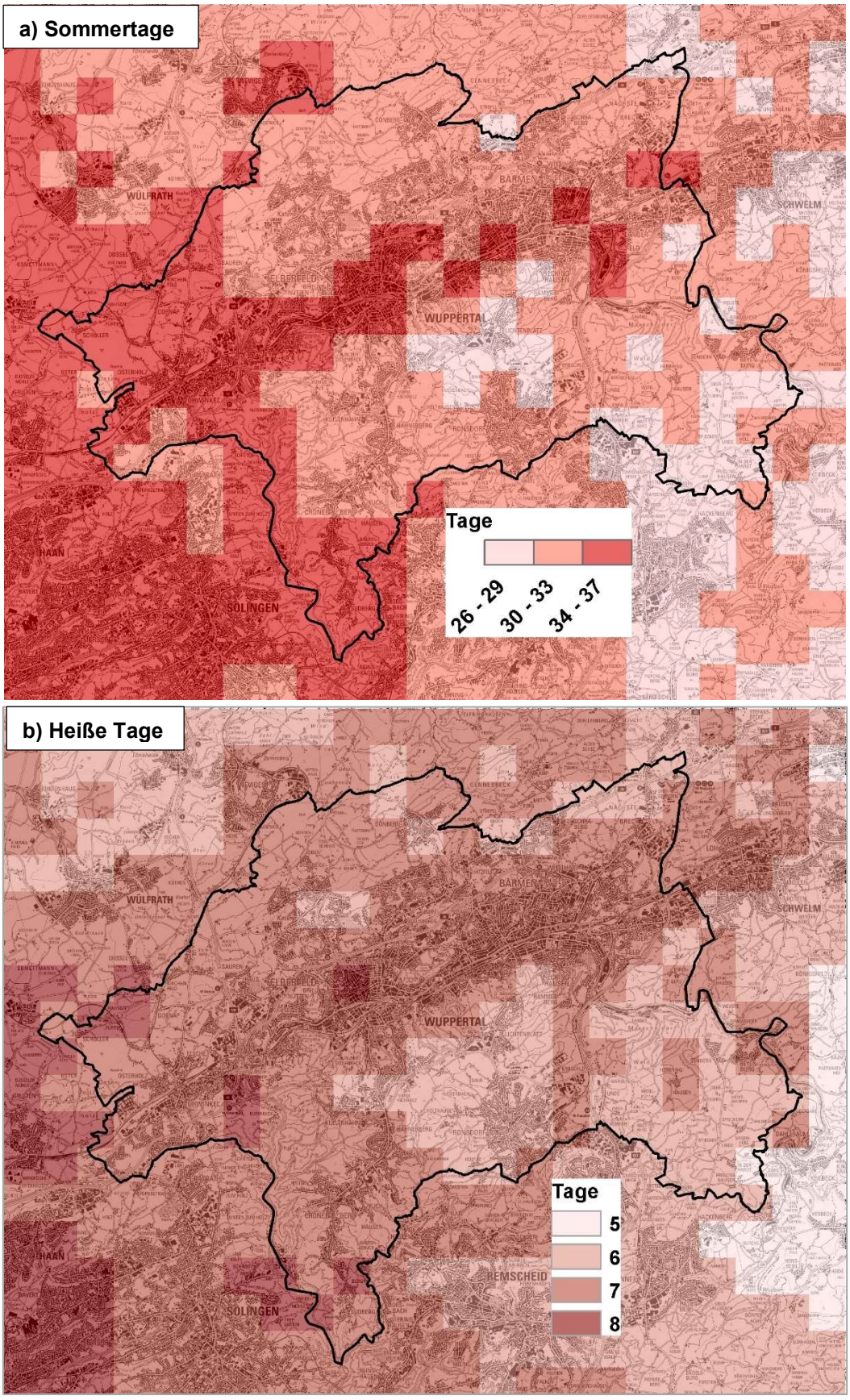

Abbildung 2-5a und 2-5b: Anzahl von Sommertagen und heißen Tagen im Raum Wuppertal im 1 km²-Raster im Bezugszeitraum 1981-2010, Kartengrundlage: © Land NRW (2020) - Lizenz dl-de/by-2-0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0), Maßstab 1:50.000, in den Abb. verändert

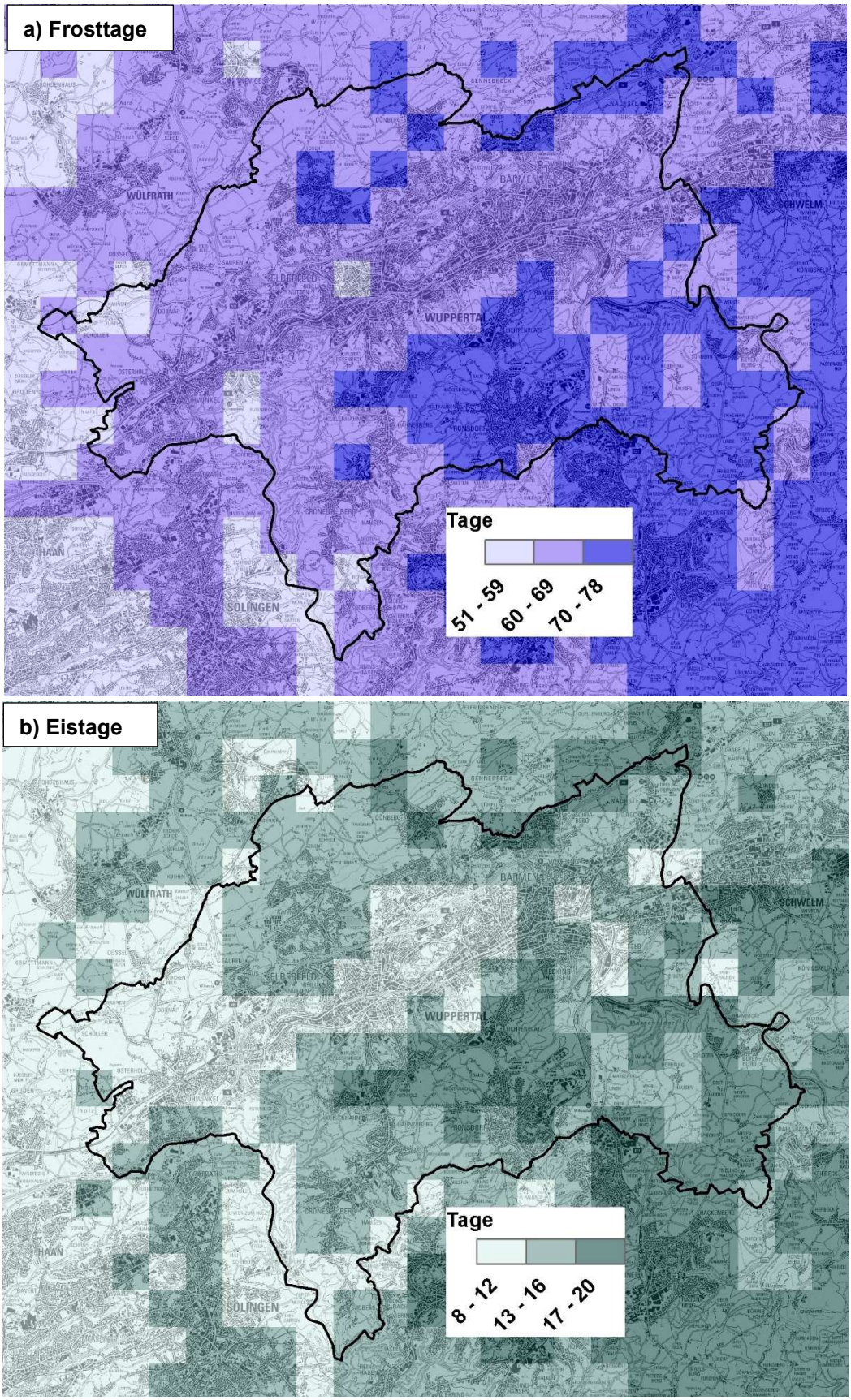

Abbildung 2-6a und 2-6b: Anzahl von Frosttagen und Eistagen im Raum Wuppertal im 1 km^2-Raster im Bezugszeitraum 1981-2010, Kartengrundlage: © Land NRW (2020) - Lizenz dl-de/by-2-0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0), Maßstab 1:50.000, in den Abb. verändert

Der Temperaturrückgang im klimatologischen Herbst (September bis November) ist generell noch stärker und gleichmäßiger als der Anstieg im Frühjahr. Bereits im Oktober kann es zu Nachtfrösten kommen und im November sind je nach Witterungsverlauf schon Eistage möglich. Allerdings können auch hier sowohl innerhalb der einzelnen Monate als auch von Jahr zu Jahr deutliche Schwankungen auftreten. Typischer Übergangsmonat ist dabei der Oktober, der eine große Spannbreite der Witterung vom „Goldenen Oktober" bis zum verfrühten Kälteeinbruch aufweisen kann.

In den Abbildungen 2-5 und 2-6 werden die verschiedenen klimatologischen Kenntage für den Bezugszeitraum 1981-2010 in der 1 km²-Rasterdarstellung im Bereich Wuppertal aufgelöst. Nach dem Klimamittel sind in den höheren Lagen des Stadtgebietes etwa 26 bis 29 Sommertage und 5 bis 6 heiße Tage zu erwarten, in tieferen Bereichen sind es 34 bis 37 Sommertage und 7 bis 8 heiße Tage. Bei den Frosttagen variiert die Anzahl in Wuppertal je nach Höhe zwischen knapp unter 60 und 78 Tagen, bei den Eistagen liegt das Klimamittel meist bei 8 bis 16 Stück, in höheren Lagen sind durchaus auch 17 bis 20 Eistage im Jahr zu erwarten.

In Tabelle 2-2 werden die Werte der Lufttemperatur und der klimatologischen Kenntage für die beiden Klimaperioden 1981-2010 und 1991-2020 noch einmal gegenübergestellt.

Tabelle 2-2: Mittlere Jahresmitteltemperatur und mittlere Anzahl von Sommertagen (Tmax ≥ 25 °C), heißen Tagen (Tmax ≥ 30 °C), Frosttagen (Tmin < 0 °C) und Eistagen (Tmax < 0 °C) für den Zeitraum 1981-2010 und den Zeitraum 1991-2020 in W-Buchenhofen

	1981-2010	**1991-2020**
Jahresmittel-temperatur	**10,1 °C**	**10,4 °C**
Sommertage	**36,8**	**40,1**
Heiße Tage	**8,2**	**9,4**
Frosttage	**55,4**	**52,8**
Eistage	**7,5**	**5,6**

2.4 Niederschlag

Niederschläge sind zeitlich und räumlich sehr unterschiedlich verteilt. Besonders konvektiv ausgelöste Schauerniederschläge werden vom Relief und den Erwärmungseigenschaften des Untergrundes beeinflusst. Deshalb können bereits auf engem Raum markante Unterschiede in Menge, Dauer und Intensität des Niederschlags auftreten. Im Allgemeinen nehmen die Niederschlagsmengen mit der Höhe des Geländes zu, dabei treten jedoch deutliche Unterschiede durch Luv-Effekte (Stauniederschläge) und Lee-Effekte auf.

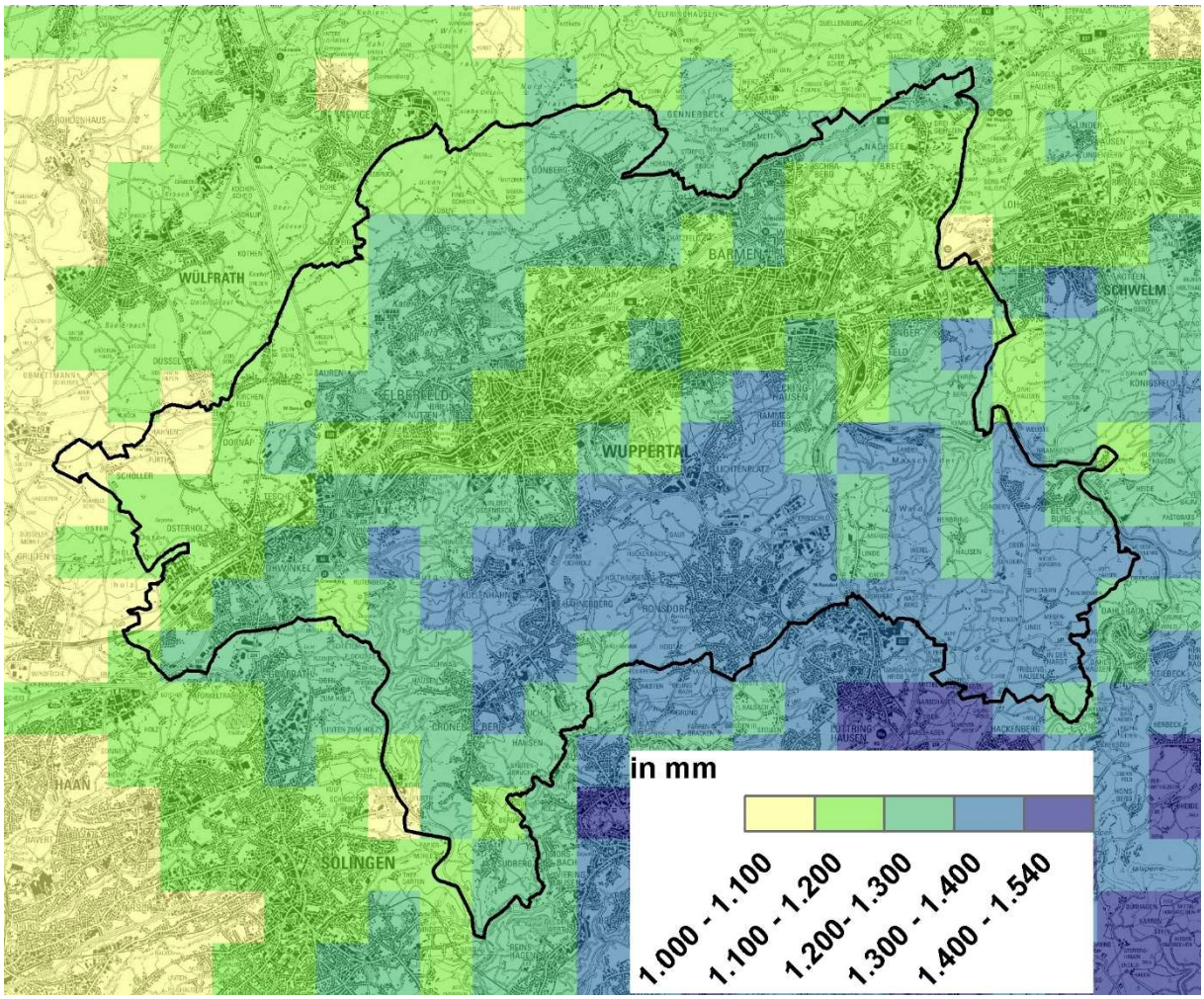

Abbildung 2-7: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe im Raum Wuppertal im 1 km²-Raster im Bezugszeitraum 1981-2010, Kartengrundlage: © Land NRW (2020) - Lizenz dl-de/by-2-0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0), Maßstab 1:50.000, in der Abb. Verändert

So sind in Nordrhein-Westfalen die Höhenlagen des Bergischen Landes sowie des Sauer- und Siegerlandes die niederschlagsreichsten Regionen. Hier liegen die mittleren jährlichen Niederschlagshöhen zum Teil bei 1500 bis 1600 mm. Am trockensten ist es dagegen in NRW in der Jülicher und Zülpicher Börde als markante Leegebiete im Schatten der Eifel, hier werden mittlere Jahressummen des Niederschlags verzeichnet, die gebietsweise nur 550 bis 600 mm erreichen.

Auch auf dem Stadtgebiet von Wuppertal ist ein deutliches Ansteigen der Regenmengen im Übergangsbereich von den Tallagen zu den Höhenlagen erkennen (Abbildung 2-7). Dies ist vor allem auf Staueffekte in Richtung der höheren Lagen – besonders nach Süden und Südosten hin –zurückzuführen (siehe auch Abbildung 2-1). So liegt das langjährige Mittel der Niederschlagssumme im Talbereich und am (nord-)westlichen Rand der Stadt vielfach bei 1100 bis 1200 mm, während es im Bereich der Südhöhen bis auf 1400 mm ansteigt. Auch in den Höhenlagen nördlich der Wupper sind 1200 bis 1300 mm mittlerer Jahresniederschlag die Regel.

In trockenen bzw. nassen Monaten oder Jahren sind erhebliche Abweichungen von den im Klimadiagrammen (Abbildungen 2-3 und 2-8) dargestellten Mittelwerten des Niederschlags möglich. So war der trockenste Monat seit 1948 (an der Station Wuppertal-Buchenhofen) der April 2007 mit 0,3 mm. Der nasseste Monat war in W-Buchenhofen der Juni 1985 mit 268 mm Niederschlagshöhe. Sehr nasse Jahre waren 1965 und 1966 oder auch 1998. So fielen im letztgenannten Jahr in Wuppertal-Buchenhofen 1478 mm, in W-Herbringhausen waren es sogar 1624 mm, davon allein im November 1998 rund 315 mm. Einen noch nasseren Monat gab es an dieser Station zwischen 1947 und 2006 nur im Februar 2002 mit 320 mm Niederschlag. Das „Trockenjahr“ 1959 kam in Wuppertal-Buchenhofen auf 697 mm und in Wuppertal-Herbringhausen auf 734 mm Niederschlag.

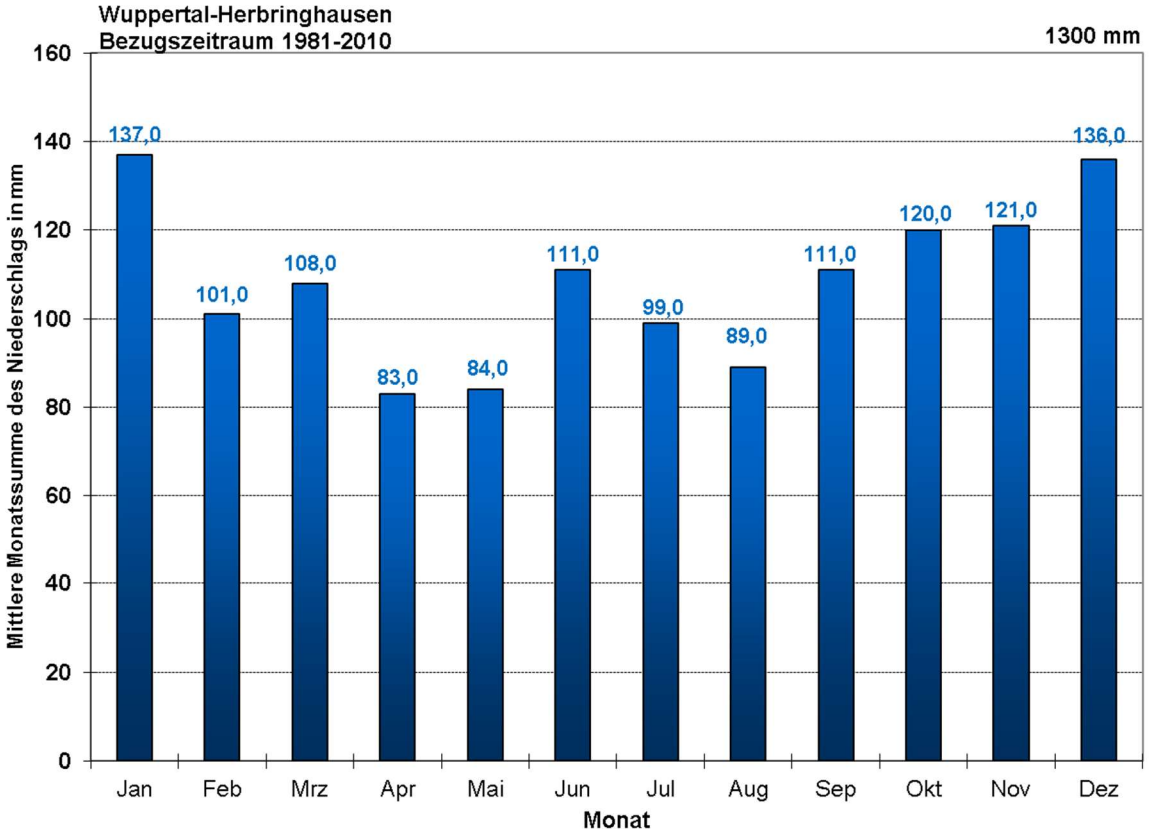

Abbildung 2-8: Niederschlagsdiagramm der Station Wuppertal-Herbringhausen (Bezugszeitraum 1981-2010)

Das Jahresmittel des Niederschlags für den Bezugszeitraum 1981 bis 2010 liegt in Wuppertal-Hebringhausen (Lage siehe Abbildung 2-1) bei 1300 mm, an der Station Wuppertal-Buchenhofen sind es 1175 mm. Diese Werte passen stimmen gut mit der Rasterdarstellung des Niederschlags (Abbildung 2-7) überein.

Die Abbildungen 2-3 und 2-8 zeigen, dass im Mittel wie erwartet die höchsten Niederschlagsmengen in den Wintermonaten Dezember und Januar verzeichnet werden, wobei in Buchenhofen im Mittel der Dezember der nasseste Monat ist, während in Herbringhausen Dezember und Januar fast gleich hohe Werte aufweisen. Die durchschnittlich trockensten Monate sind an beiden Stationen April und Mai. Die für Teile des Nordwestdeutschen Tieflandes typische „Doppelwelle des Niederschlags“ mit hohen Werten im Sommer und Winter sowie niedrigen Werten in den Übergangsjahreszeiten ist an den beiden Wuppertaler Stationen nur noch im Ansatz erkennbar. Das „herbstliche“ Minimum im September ist in Buchenhofen nur schwach und in Herbringhausen gar nicht ausgeprägt. Hier steigen die monatlichen Niederschlagsmittel von August bis Dezember kontinuierlich an, dabei ist der August der deutlich trockenste Sommermonat. Der Februar wiederum weist an beiden betrachteten Wuppertaler Stationen ein relatives Minimum auf.

2.5 Wind

Die Windverteilung (Richtung und Geschwindigkeit) an einem Ort wird einerseits durch die großräumigen Strömungsverhältnisse, andererseits durch die orographische Struktur der Umgebung bestimmt. Je stärker die Landschaft gegliedert ist, desto eher ergeben sich am Ort Abweichungen von den großräumigen Strömungsverhältnissen. Der Wind ist eine vektorielle Größe, d.h. durch die Angabe von Richtung und Geschwindigkeit charakterisiert. Im meteorologischen Mess- und Beobachtungsnetz des Deutschen Wetterdienstes wird besonderer Wert auf die Gewinnung möglichst repräsentativer Daten gelegt. Deshalb wird der Wind in der Regel in 10 m über Grund gemessen, um die störenden Einflüsse durch die aerodynamische Rauigkeit des Bodens möglichst gering zu halten.

An DWD-Windmessstationen mit langjähriger Datenverfügbarkeit sind in der Umgebung von Wuppertal die Stationen Düsseldorf-Flughafen und Lüdenscheid verfügbar. Die Abbildung 2-9 zeigt die Lage der beiden Windmessstellen.

Abbildung 2-9: Lage der beiden DWD-Windmessstationen in der Umgebung von Wuppertal, Düsseldorf-Flughafen und Lüdenscheid. Kartengrundlage: TOPPlus-Open, © GeoBasis-DE, BKG 2020

In Abbildung 2-10a und 2-10b sind Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit (in 2,0-m/s Klasseneinteilung) in Abhängigkeit von der Windrichtung (zwölf Sektoren zu je 30° Breite) basierend auf Stundenwerten (Stärkewindrose) im Bezugszeitraum 2008 bis 2019 für die Station Düsseldorf-Flughafen und im Zeitraum 1994 bis 2018 für Lüdenscheid dargestellt. Die Abbildung für Lüdenscheid (2-11b) weist eine für frei anströmbare Lagen Nordwestdeutschlands typische Verteilung auf, in der der Wind in fast der Hälfte der Jahresstunden aus westsüdwestlichen (um 240°) bis westlichen Richtungen (um 270°) weht. Das sekundäre Maximum der Verteilung findet sich dann häufig in den entgegengesetzten Richtungen Ostnordost (um 60°) bis Ost (um 90°). Diese Windrichtungscharakteristik ist sicherlich auch für viele freie, durch Orographie und Bebauung unbeeinflusste Lagen in Wuppertal typisch. Neben Kanalisierungs- und Leitwirkungseffekten des Windes im Bereich des Tales der Wupper, kann sich in den äußersten nordwestlichen Gebieten von Wuppertal Richtung Mettmann und Haan noch zusätzlich eine Prägung durch das Rheintal bemerkbar machen, das auch die Stärkewindrose von Düsseldorf-Flughafen zeigt (Abb. 2-10a): Hier gibt es neben den „klassischen“ Hauptwindrichtungen aus Südsüdwest bis West(südwest) ein Maximum der Windverteilung aus Südsüdost (150°).

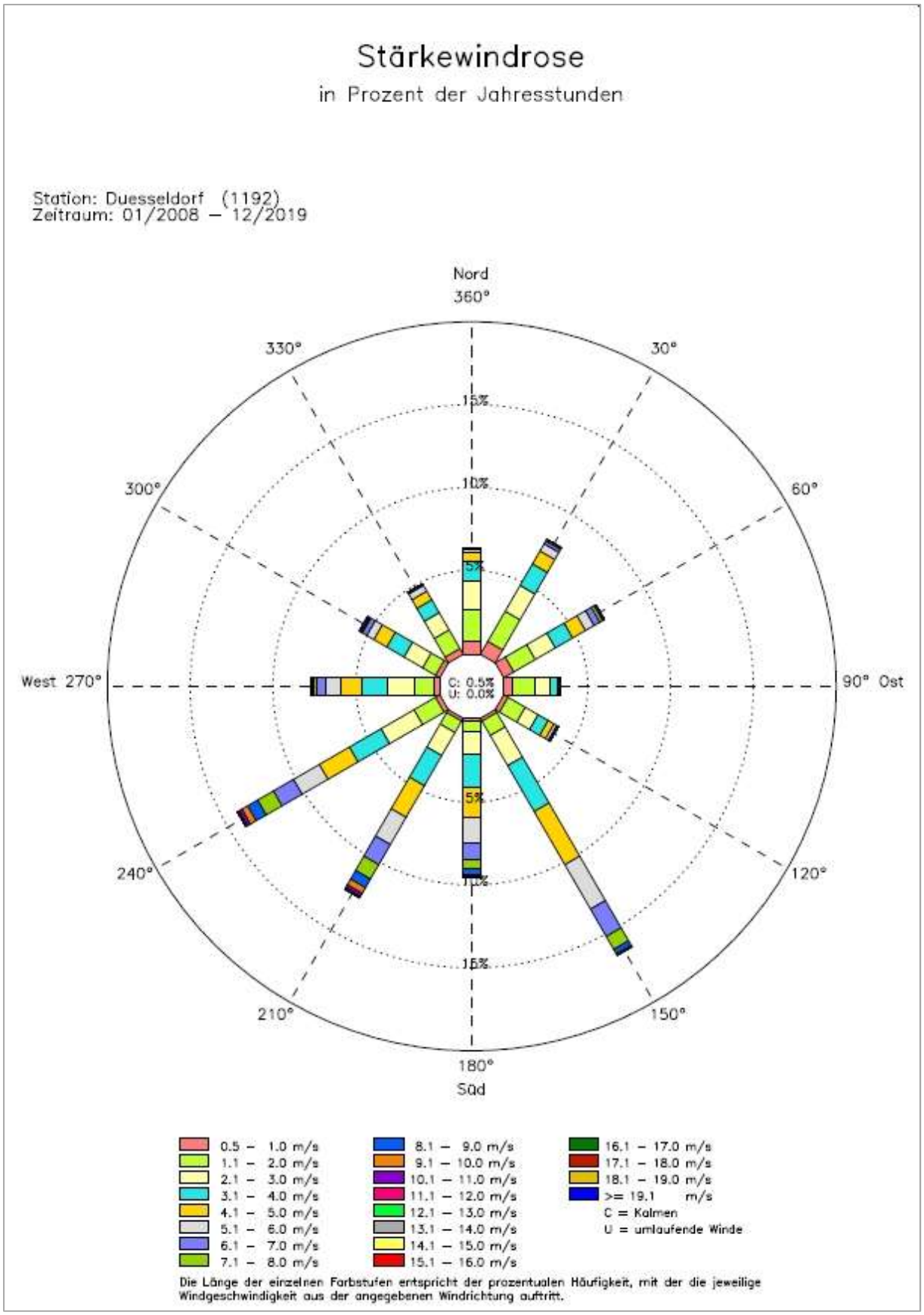

Abbildung 2-10a: Zweidimensionale Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen in 12 Sektoren zu je 30° Breite und der Windgeschwindigkeiten in m/s-Intervallen aus stündlichen Daten an der Station Düsseldorf-Flughafen für den Bezugszeitraum 2008 bis 2019

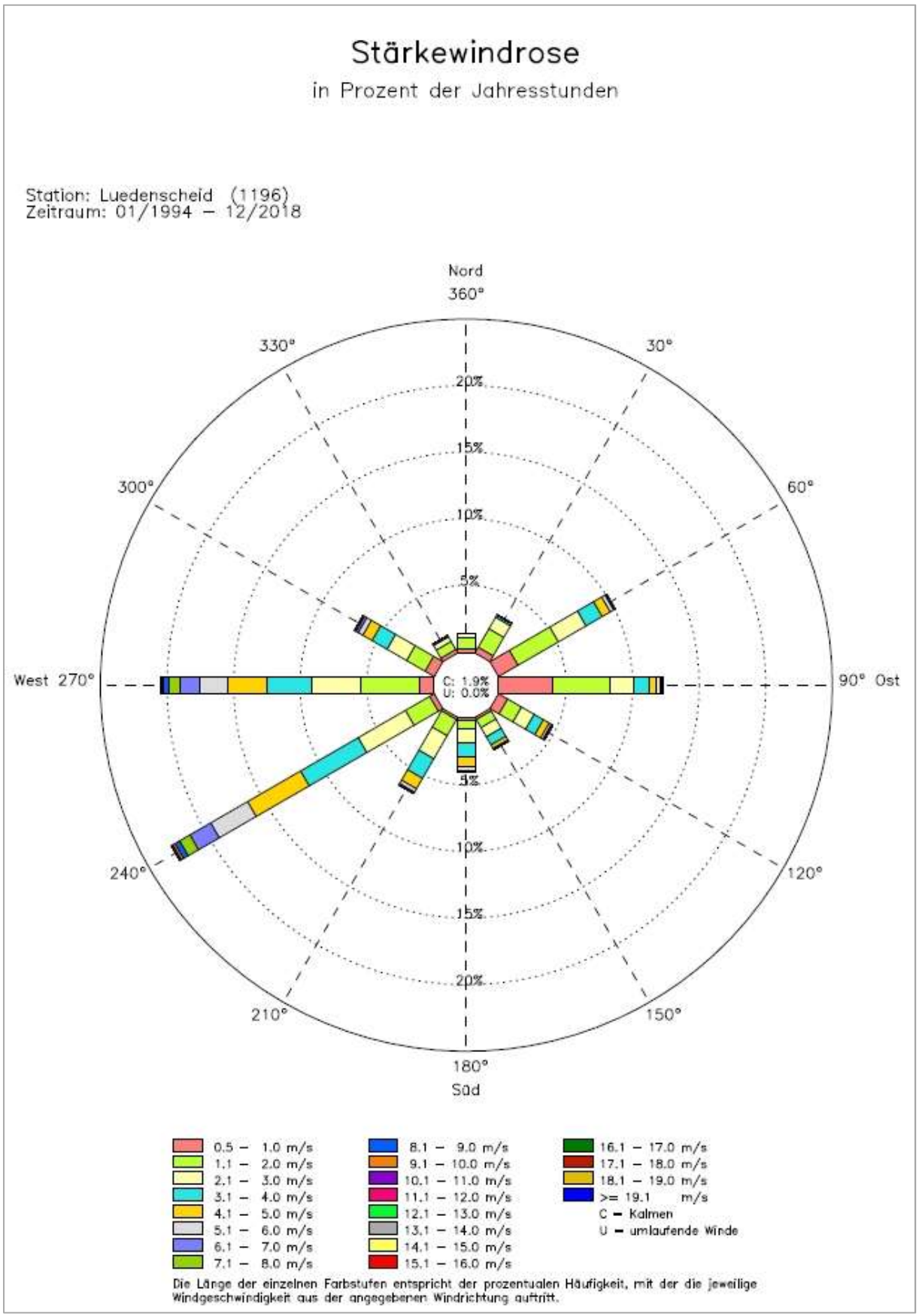

Abbildung 2-10b: wie Abbildung 2-10a, nur für die Station Lüdenscheid, Bezugszeitraum 1994-2018

Die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in Lüdenscheid liegt im Zeitraum 1994-2018 bei 3,1 m/s, in Düsseldorf 2008-2019 bei 3,9 m/s. 3 bis 4 m/s sind für freie Lagen in Nordrhein-Westfalen übliche Werte. Tabelle 2-2 unten für Lüdenscheid zeigt, dass im Jahresgang die höchsten mittleren monatlichen Windgeschwindigkeiten im Winter mit Werten von 3,6 bis 3,7 m/s auftreten. In den Sommermonaten und im September geht dieser Wert auf 2,5 bis 2,7 m/s zurück. Die höchste Böen-Windgeschwindgeschwindigkeit im Untersuchungszeitraum an der Station Lüdenscheid ist am 18.01.2007 mit 34,8 m/s im Zusammenhang mit Orkantief „Kyrill“ registriert worden. Das Orkantief „Jeanett“ am 27.10.2002 brachte in Lüdenscheid eine maximale Windböe von 33,9 m/s.

Tabelle 2-2: Mittlere Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit in m/s, maximale Böen pro Monat in m/s und mittlere Zahl der Tage mit Böen pro Monat von mindestens 8 Beaufort an der Station Lüdenscheid-Wetterwarte Bezugszeitraum 1994-2018

Wind in m/s	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ
Mittl. Windgeschw.	**3,7**	**3,6**	**3,4**	**2,9**	**2,8**	**2,7**	**2,6**	**2,5**	**2,6**	**3,0**	**3,2**	**3,6**
Maximale Böengeschw.	**34,8**	**30,3**	**31,3**	**26,3**	**29,3**	**24,1**	**27,8**	**23,1**	**23,4**	**33,9**	**25,3**	**27,2**
Tage mit Böen ≥ 8 Bft	**3,9**	**3,1**	**3,0**	**1,1**	**0,8**	**0,9**	**1,0**	**0,5**	**0,5**	**1,3**	**1,6**	**2,5**

Eine Auswertung der Zahl der Tage mit mindestens 8 Beaufort in Böen (≥ 17,2 m/s) zeigt, dass in Lüdenscheid im Mittel der Jahre 1994-2018 gut 20 solcher Tage pro Jahr aufgetreten sind. In den Wintermonaten und im März können im Schnitt durchaus 3 bis 4 Tage pro Monat mit mindestens Windstärke 8 Beaufort auftreten. Von April bis September geht die Häufigkeit dieser Ereignisse durchschnittlich auf ein Tag pro Monat zurück (im August und September im Mittel noch etwas weniger - siehe auch Tabelle 2-2). In Einzeljahren können Tage mit einer Windstärke von mindestens 8 Beaufort in Böen gehäuft auftreten, so z.B. im Jahr 1994 mit 40 solcher Tage in Lüdenscheid, andererseits gibt es auch ausgesprochen ruhige Jahre wie das Jahr 1996, in denen nur an 10 Tagen Spitzenböen von mindestens 8 Beaufort gemessen wurden. Das Auftreten von Böen mit Windstärke 8 Beaufort und mehr ist in den Wintermonaten häufig mit dem Durchzug von Sturmtiefs verbunden. In den Sommermonaten kommen diese Böen meistens in Verbindung mit kräftigen Gewittern und Schauern vor.

2.6 Sonnenschein

Bei wolkenlosem Himmel wird die Sonnenscheindauer von der Tageslänge bestimmt, die von der Jahreszeit und der geographischen Breite eines Ortes abhängt. Aber auch die topographischen Verhältnisse am Ort und in der Umgebung der Messstelle beeinflussen die Sonnenscheindauer. In Tälern z.B. kann sie je nach Jahreszeit bedeutend kürzer ausfallen als die tatsächliche Tagphase (Sonnenauf- bis Sonnenuntergang), da die Berge den Horizont einengen. Auch Gebäude und hohe Bäume können zeitweise die direkte Sonnenbestrahlung des Sonnenscheinregistriergerätes verhindern und die tatsächliche Sonnenscheindauer gegenüber der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer verkürzen.

Am stärksten wird die Sonnenscheindauer jedoch von der Bewölkung bestimmt. Dafür sind in Tabelle 2-3 den Bedeckungsgrad des Himmels in Prozent (langjährige Jahres- und Monatsmittelwerte) der Station Wuppertal-Buchenhofen angegeben. Im vieljährigen Durchschnitt tritt das Maximum des Bedeckungsgrades im Spätherbst/Winter auf. November, Dezember und Januar haben mit 75 bis 78 % den höchsten Bewölkungsanteil, während im August mit durchschnittlich knapp 59 % die geringste Bewölkung im Jahresverlauf zu finden ist. Der durchschnittliche Bedeckungsgrad für das Jahr beträgt etwa 67 %. Bemerkenswert ist der Monat April. Dieser Monat weist im langjährigen Mittel einen Bedeckungsgrad von nur rund 61 % auf, betrachtet man die letzten 15 Jahre, liegen eine ganze Reihe von April-Monaten sogar nur bei rund 50 bis 60 % Bedeckungsgrad und damit oft unterhalb des langjährigen Augustwertes. Dies ist auf die Häufung von sonnenscheinreichen und warmen April-Monaten in den letzten Jahren zurückzuführen. Ob sich daraus ein Trend für die zukünftigen Jahre ableiten lässt, ist noch offen. Aktuellere Daten für den Bedeckungsgrad liegen leider nicht vor.

Tabelle 2-3: Mittlere Jahres- und Monatsmittelwerte des Bedeckungsgrades in % in Wuppertal-Buchenhofen für den Bezugszeitraum 1981-2010

JAHR	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ
66,8	**75,2**	**69,2**	**68,1**	**60,5**	**61,3**	**64,2**	**60,9**	**58,7**	**64,0**	**66,8**	**74,8**	**77,8**

Da von der Station Wuppertal-Buchenhofen keine Monatssummen der Sonnenscheindauer zur Verfügung stehen, wurde auf die Daten von Lüdenscheid zurückgegriffen. Abbildung 2-11 zeigt den Jahresgang der mittleren Sonnenscheindauer in für den Bezugszeitraum 1994-2020. Die mittlere Jahressumme der Sonnenscheindauer liegt in Lüdenscheid bei etwa 1490 Stunden. Die Monate Mai bis August sind (natürlich auch aufgrund des Sonnenstandes) die sonnenscheinreichsten Monate des Jahres. Dabei zeigen Juni und Juli mit knapp 190 Stunden Sonne im Monat eine ähnliche Größenordnung, Mai und August liegen mit 183 bzw. 185 Stunden mittlerer Sonnenscheindauer jedoch kaum dahinter. Dass gerade im Monat Juli eine sehr große Spanne der Sonnenstunden möglich ist, haben die letzten 20 Jahre gezeigt: Die Werte schwanken zwischen rund 300 Stunden Sonne im Juli 2006 und nur etwa 81 Stunden im Juli 2000! Nach einem deutlichen Abfall zum September (140 Stunden) und zum November mit 55 Stunden wird im Dezember mit durchschnittlich etwa 41 Sonnenstunden das Jahresminimum erreicht.

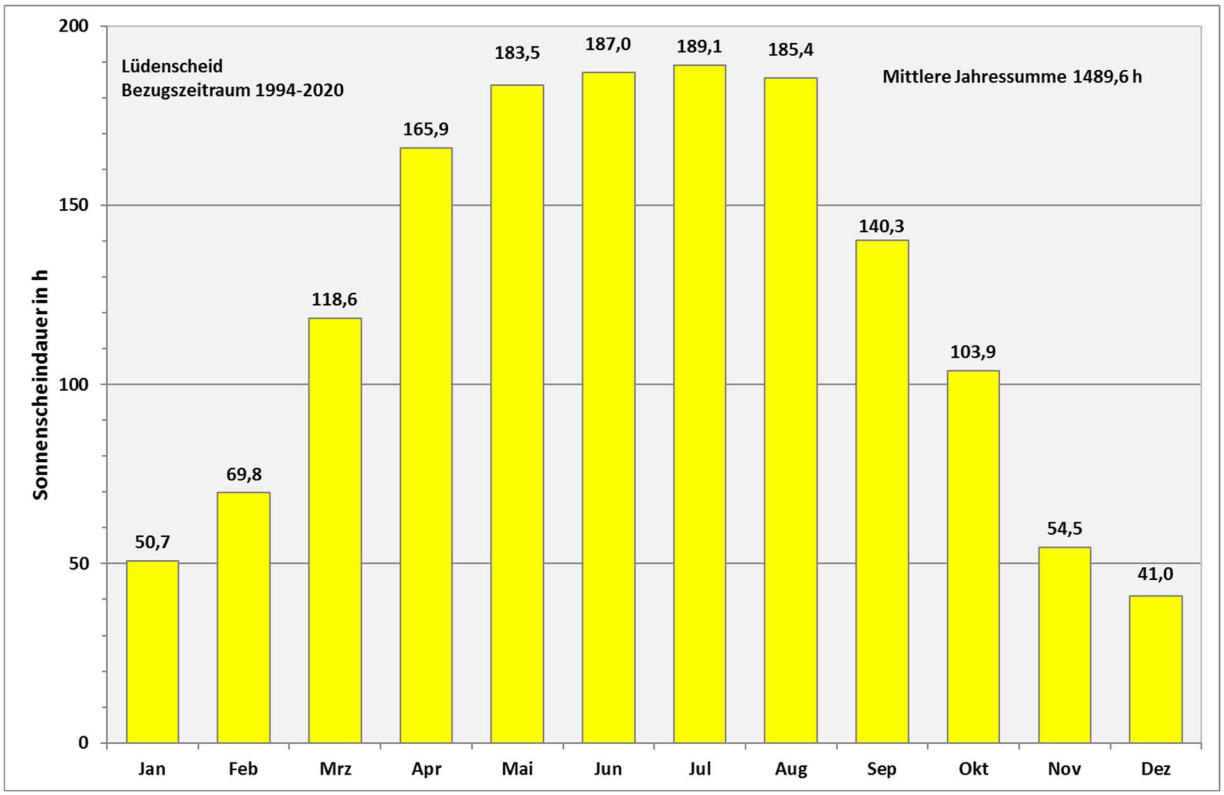

Abbildung 2-11: Mittlere Monatssummen der Sonnenscheindauer in Stunden an der Station Lüdenscheid im Bezugszeitraum 1994-2020

Die folgende Abbildung 2-12 zeigt die mittlere jährliche Sonnenscheindauer in der Region Wuppertal für den Bezugszeitraum 1981-2010 in 1 km²-Rasterdarstellung. Hiernach stellen 1500 bis 1530 Stunden Sonne im Jahr einen guten Durchschnittswert für das Stadtgebiet dar. Nach Osten hin liegen die Werte zum Teil etwas niedriger, nach (Nord-)Westen hin etwas höher. An der Station Düsseldorf-Flughafen liegt die mittlere jährliche Sonnenscheindauer zum Beispiel bei gut 1550 Stunden (Bezugszeitraum 1981-2010).

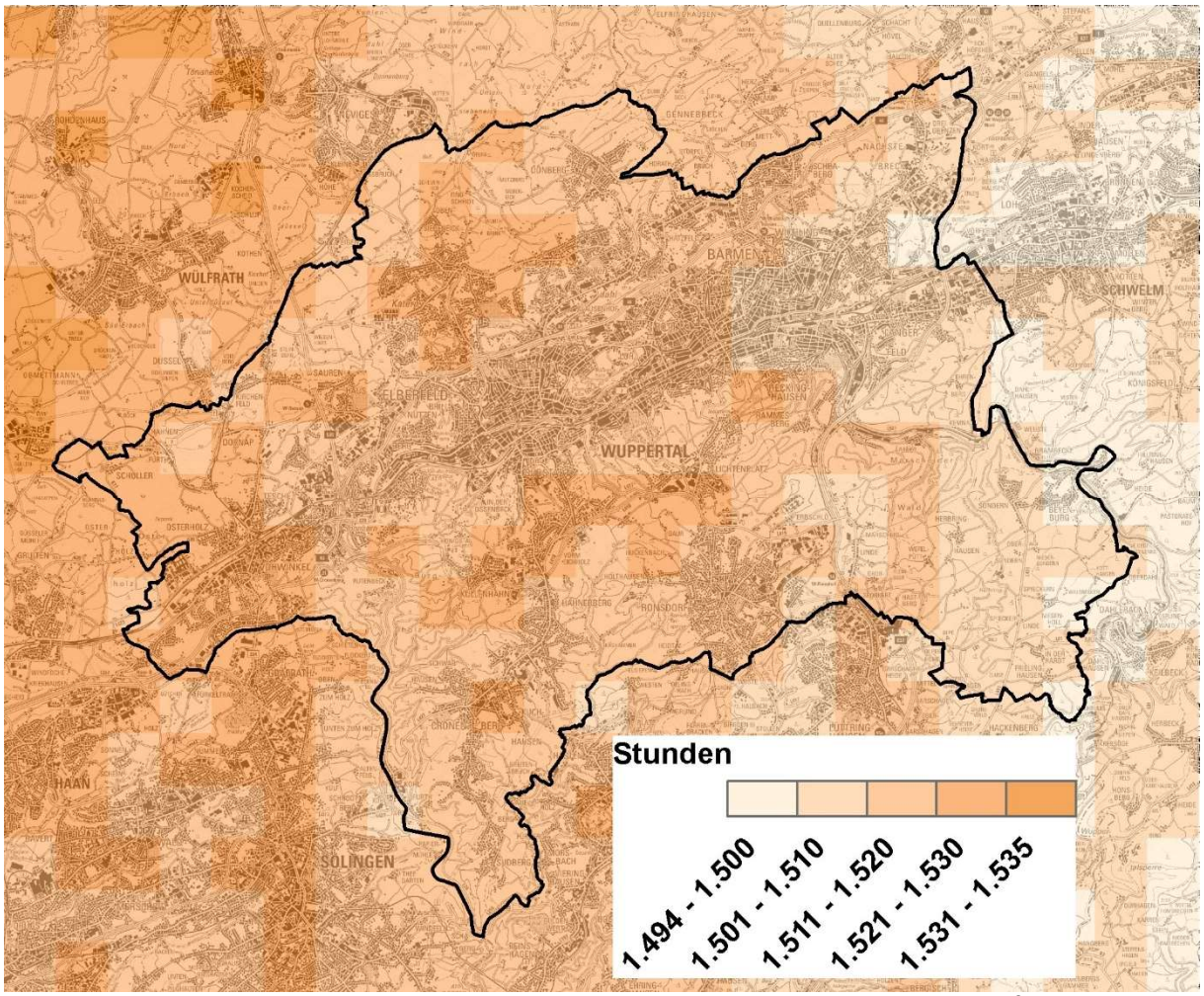

Abbildung 2-12: Mittlere jährliche Sonnenscheindauer im Raum Wuppertal im 1 km²-Raster im Bezugszeitraum 1981-2010, Kartengrundlage: © Land NRW (2020) - Lizenz dl-de/by-2-0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0), Maßstab 1:50.000, in der Abb. verändert

2.7 Globalstrahlung

Die gesamte am Boden ankommende Sonnenstrahlung wird Globalstrahlung genannt. Sie setzt sich zusammen aus der direkten, Schatten werfenden Strahlung und der gestreuten Sonnenstrahlung (diffuse Himmelsstrahlung) aus der Himmelshalbkugel. Die Stärke der den Boden erreichenden Strahlung ist abhängig von geographischer Breite, Tageszeit, Jahreszeit und der Geländeform, d.h. dem Winkel, unter dem die Strahlen auftreffen. Standardmäßig werden die Globalstrahlung und die diffuse Strahlung auf eine horizontale Ebene bezogen gemessen. Aus beiden Komponenten lässt sich dann die direkte Sonnenstrahlung ableiten.

Die meteorologische Größe Globalstrahlung ist im Vergleich zu den Parametern Temperatur und Niederschlag eine vergleichsweise junge Messgröße. Die längste in Deutschland bestehende Zeitreihe beginnt 1937 an der Station Potsdam. In der Zeit zwischen 1975 und 1980 wurde dann im Deutschen Wetterdienst systematisch ein Messnetz mit Strahlungssensorik eingerichtet. Dieses Messnetz wurde in den folgenden Jahren immer wieder dem technischen Standard angepasst.

Von der Globalstrahlung stehen Rasterwerte in einer Auflösung von 1 km² für Deutschland zur Verfügung. Grundlage bilden satellitenabgeleitete Strahlungsdaten, die über Bodenmessungen angepasst werden. Sie sind als aktuelle Monats- und Jahreswerte sowie als vieljährige mittlere monatliche und jährliche Werte für die Bezugsperiode 1981 bis 2010 für jeden beliebigen Punkt Deutschlands verfügbar. Tabelle 2-4 zeigt Werte der Globalstrahlung für Rasterpunkte im Zentrum von Wuppertal (Wuppertal-Elberfeld).

	2015	2016	2017	2018	2019	1981-2010
	Mittlere monatliche Tagessumme in Wh/m²					
Januar	511	693	912	527	539	667
Februar	1306	1287	1285	1939	1843	1295
März	2339	2176	2817	2221	2080	2242
April	4397	3700	3782	4042	4262	3731
Mai	4820	5082	5238	6023	4488	4670
Juni	5460	4560	5411	5375	6465	5018
Juli	4941	4966	4877	6373	5181	4904
August	4508	4199	3901	4929	4448	4160
September	2766	3748	2896	3444	3040	2816
Oktober	1712	1526	1497	2023	1554	1713
November	902	748	730	987	789	800
Dezember	665	654	307	391	531	511
	Jahressumme in kWh/m²					
Jahr	**1049**	**1018**	**1026**	**1167**	**1072**	**993**

Tabelle 2-4: Mittlere monatliche Tagessumme und mittlere Jahressumme der Globalstrahlung in den letzten 5 Jahren und im Mittel 1981-2010 bezogen auf eine horizontale Ebene, Standort: Wuppertal-Elberfeld

2.8 Anzahl der Tage mit Hitzewarnung in Wuppertal

Im Rahmen seiner gesetzlichen Aufgaben hat der Deutsche Wetterdienst ein Hitzewarnsystem eingerichtet. Das Hitzewarnsystem verwendet die aktuellen Wettervorhersagen dazu, Episoden mit hoher Wärmebelastung vorherzusagen. Um die thermische Umwelt gesundheitsrelevant bewerten zu können, wird bei dem Deutschen Wetterdienst die Gefühlte Temperatur verwendet. Diese basiert auf einem Wärmehaushaltsmodell des menschlichen Körpers und umfasst alle relevanten Mechanismen des Wärmeaustauschs. Dabei werden die meteorologischen Elemente Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit sowie die lang- und kurzwelligen Strahlungsflüsse berücksichtigt. Der Wärmeaustausch wird für einen Standard-Menschen modelliert (Klima-Michel). Dieser passt seine Bekleidung soweit an, dass er nach Möglichkeit im thermischen Komfortbereich bleibt.

Gewarnt wird täglich gegen 10 Uhr für den aktuellen Tag und den Folgetag, wenn die Gefühlte Temperatur die Warnschwelle von rund 32 °C (Warnung vor starker Wärmebelastung) bzw. 38 °C (Warnung vor extremer Wärmebelastung) überschreitet. Aufgrund eines Akklimatisationseffektes kann dieser Schwellenwert bei frühsommerlichen Hitzewellen und in nördlichen Breiten etwas niedriger, im Hochsommer und in südlichen Breiten etwas höher liegen. Wird allerdings erwartet, dass die Nacht gut auskühlt, wird selbst bei Erreichen der Warnschwelle nicht gewarnt, da bei entsprechender nächtlicher Abkühlung die Belastung für den menschlichen Organismus geringer ausfällt.

Für die Stadt Wuppertal liegen seit 2005 Werte vor. Das Verfahren wurde im Jahr 2012 umgestellt: Anstelle der nächtlichen Außentemperatur wird nun die nächtliche Innenraumtemperatur verwendet. Abbildung 2-13 unten zeigt die jährliche Anzahl der Tage mit Hitzewarnung (Warnschwelle der gefühlten Temperatur: 32 °C) für die Jahre 2005 bis 2020. Die Anzahl der Warntage liegt im Mittel etwa bei 8 Tagen pro Jahr. Ein eindeutig ansteigender Trend ist in den 15 Jahren nicht erkennbar. Mit jeweils 14 Tagen mit Hitzewarnung liegen die Jahre 2006 und 2018 vorne, im Jahr 2017 wurde keine einzige Hitzewarnung für Wuppertal ausgegeben. Auffällig sind die letzten drei Jahre 2018, 2019 und 2020: Drei Jahre hintereinander mit einer so großen Anzahl von Tagen mit Hitzewarnungen (im Schnitt wurden in den Jahren 2018 bis 2020 an 12 Tagen Hitzewarnungen ausgegeben) gab es in den letzten 16 Jahren noch nicht.

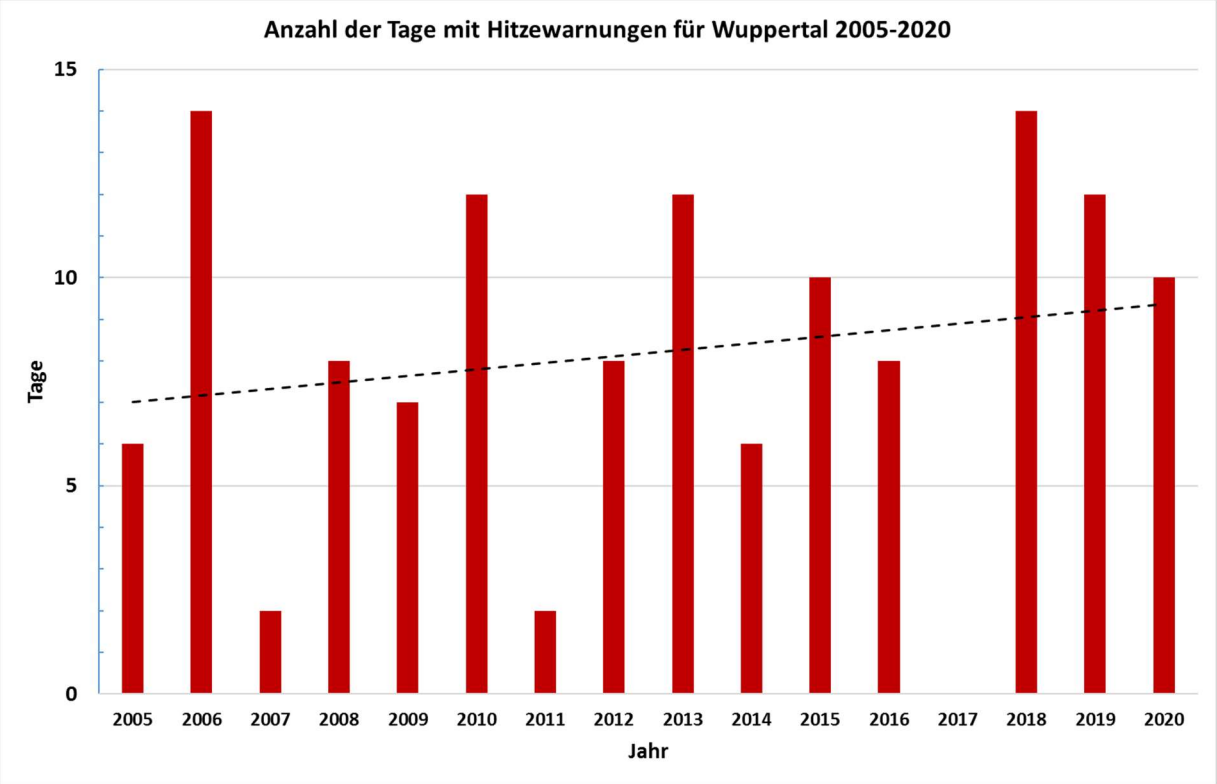

Abbildung 2-13: Jährliche Anzahl der Tage mit Hitzewarnung (Warnschwelle der Gefühlten Temperatur: 32 °C) für die Jahre 2005 bis 2020 in Wuppertal

2.9 Die langzeitliche Entwicklung ausgewählter Klimaparameter

Die Lufttemperatur dient oftmals als Leitgröße zur Beschreibung der Klimaveränderung in den letzten Jahrzehnten, da durch die Zunahme der Konzentration sogenannter Treibhausgase der natürliche Treibhauseffekt verstärkt wird und damit eine Temperaturzunahme in der unteren Atmosphäre verbunden ist. Abbildung 2-14 zeigt nun die Zeitreihe des Jahresmittelwertes der Lufttemperatur (gemessen in 2 m über Grund) in Wuppertal-Buchenhofen für den Zeitraum 1948 bis 2020. Zusätzlich dargestellt ist die lineare Trendlinie. Der durchschnittliche Temperaturanstieg beträgt knapp 0,28 Kelvin pro Dekade.

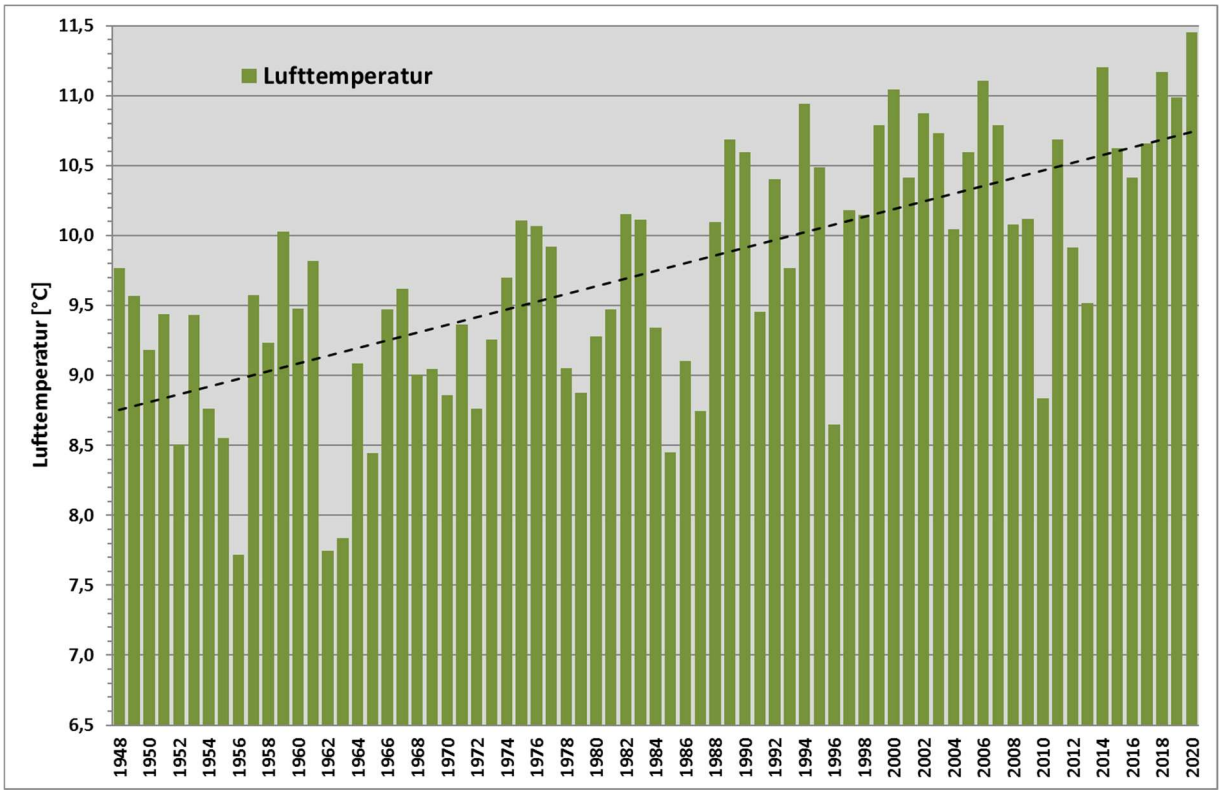

Abbildung 2-14: Zeitreihe der Jahresmitteltemperatur der Station Wuppertal-Buchenhofen 1948-2020

Die hochsignifikante Temperaturzunahme in den letzten Jahrzehnten wird auch in der Abbildung 2-15 verdeutlicht. Hier sind für verschiedene Zeiträume die mittleren Lufttemperaturen an der Station Wuppertal-Buchenhofen dargestellt. Während für die bis Ende 2020 international gültige Referenzperiode 1961-1990 das Temperaturmittel bei gut 9,3 °C lag, waren es im Zeitraum 1971-2000 bereits 9,4 °C und 1981-2010 wurden 10,1 °C registriert, dementsprechend ein Anstieg um 0,7 K in 20 Jahren. In den letzten 20 Jahren hat sich der Temperaturanstieg nochmals verstärkt. So liegt der Mittelwert der nun gültigen Vergleichsperiode von 1991 bis 2020 in Wuppertal-Buchenhofen bereits bei 10,4. Betrachtet man die Jahre 2001-2020 erreicht die mittlere Lufttemperatur 10,5 °C und in den letzten 10 Jahren waren es sogar 10,7 °C. In den letzten 40 Jahren liegt der durchschnittliche Temperaturanstieg bei 0,32 Kelvin pro Dekade, somit bei knapp 1 Kelvin in 30 Jahren. Der Unterschied zwischen der „alten“ Klimareferenzperiode 1961-1990 und dem nun gültigen „Klimanormalwert“ für den Zeitraum 1991-2020 beträgt 1,1 K – klimatologisch gesehen eine enorme Zunahme. Diese Größenordnung gilt nicht nur für die betrachtete Station Wuppertal-Buchenhofen, sondern auch für das gesamte Bergische Land, das Flächenmittel von ganz Nordrhein-Westfalen und Deutschland.

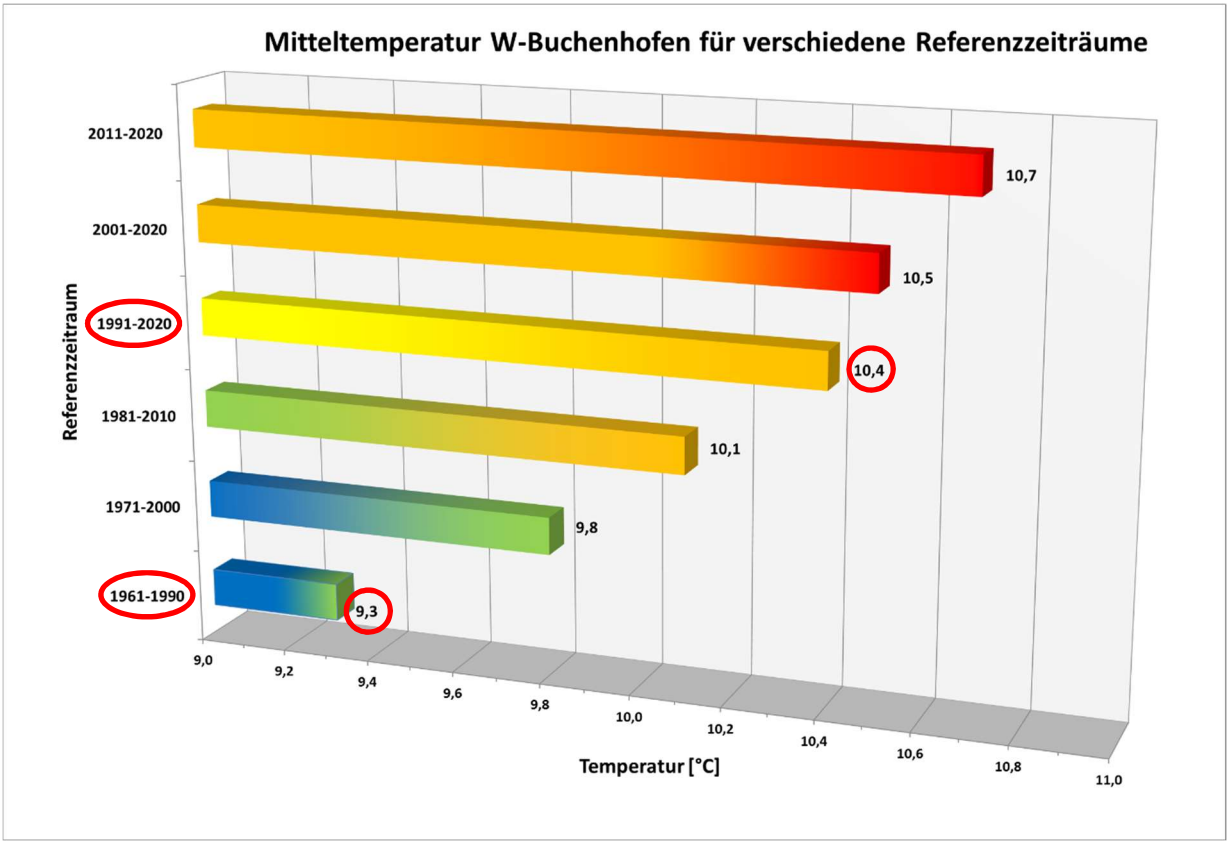

Abbildung 2-15: Mittlere Lufttemperatur verschiedener Zeiträume an der Station W-Buchenhofen. Die „alte“ offizielle Referenzperiode 1961-1990 und die „Neue“ 1991-2020 sind hervorgehoben.

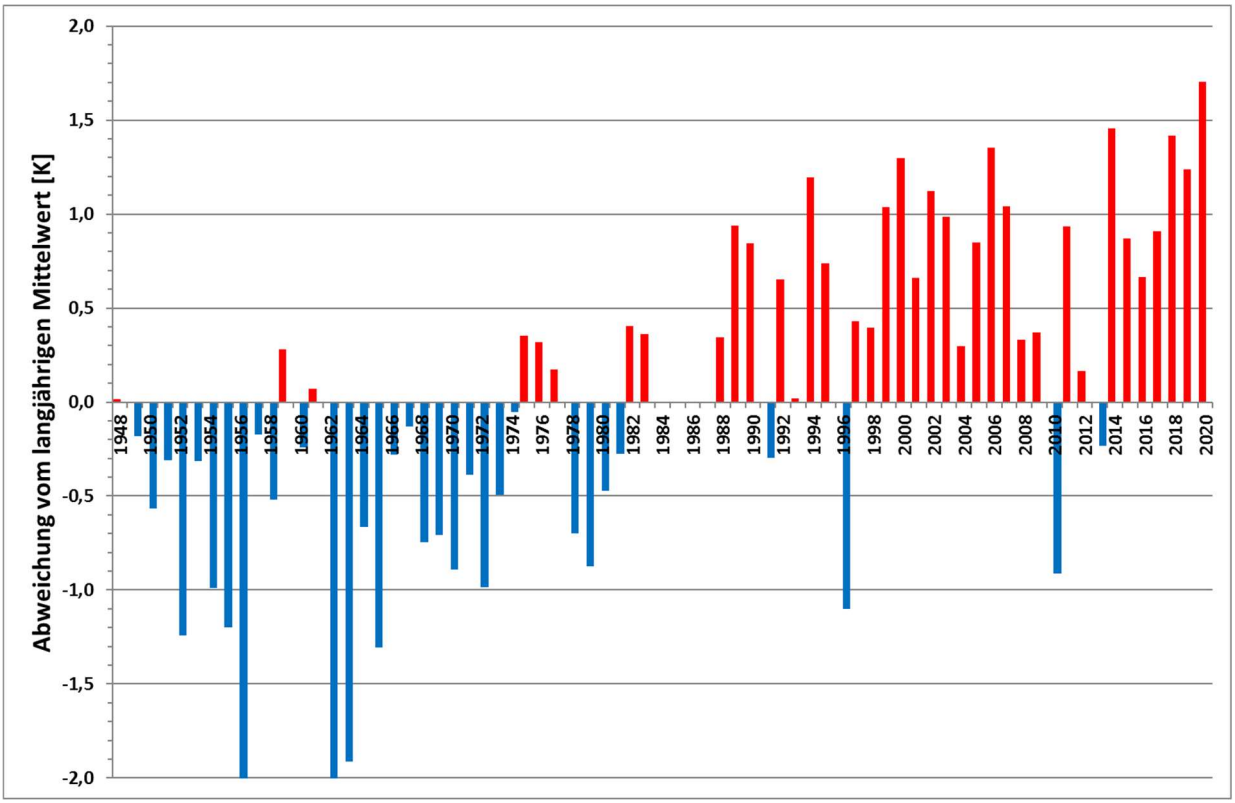

Abbildung 2-16: Abweichung vom langjährigen Mittel der Lufttemperatur an der Station Wuppertal-Buchenhofen 1948-2020

Die markante Erwärmung seit Ende der 1980er-Jahre tritt ebenso in der Abbildung 2-16 hervor. Dargestellt sind die Abweichungen gegenüber dem Mittel 1948-2020 an der Station Wuppertal-Buchenhofen. Die höchsten negativen Abweichungen vom Mittelwert des gesamten Messzeitraums sind 1956 und 1962 mit rund -2,0 K zu verzeichnen. 2014 gab es dagegen eine positive Abweichung von gut +1,4 K vom langjährigen Durchschnitt und im Jahr 2020 waren es sogar +1,7 K. Augenfällig ist die Häufung der Jahre mit positiven Abweichungen seit 1988, ein deutlicher Beleg für die Klimaerwärmung.

Neben den absoluten Werten und den Abweichungen geben auch die langjährigen Zeitreihen der Temperaturkenntage einen Eindruck über die Klimaentwicklung in einem Gebiet. Die Anzahl dieser Kenntage für die Station Wuppertal-Buchenhofen für den Messzeitraum 1948 bis 2020 ist in den Abbildungen 2-17 und 2-19 dargestellt. Sommertage (Tagesmaximum ≥ 25 °C) und heiße Tage (Tagesmaximum ≥ 30 °C) zeigen in den letzten Jahrzehnten eine zunehmende Tendenz. Herausragend ist dabei das Jahr 2018 mit 82 Sommertagen, das bedeutet rund 45 Tage mehr als im Mittel 1981-2010, das in Wuppertal-Buchenhofen bei knapp 37 Sommertagen liegt (Bezug 1981-2010). Im Bezugszeitraum 1991-2020 sind es im Mittel gut 40 Sommertage.

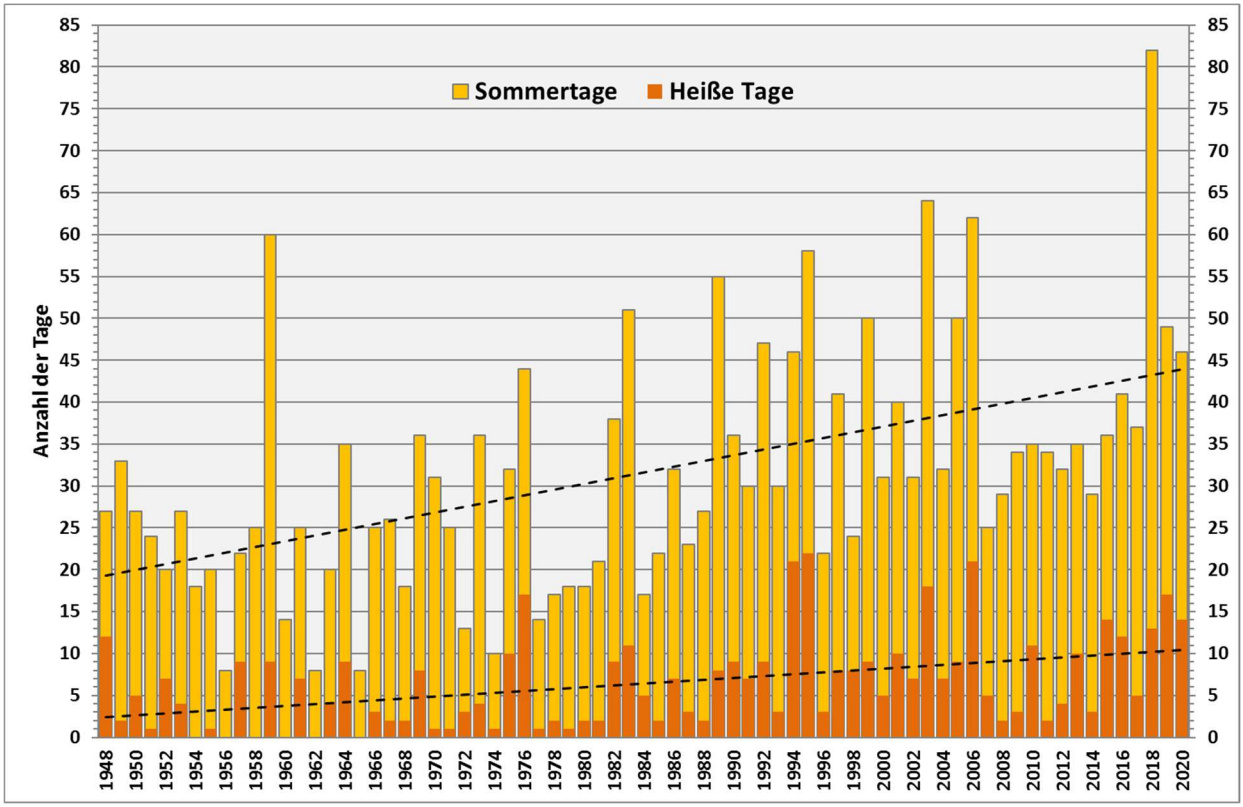

Abbildung 2-17 Anzahl der Sommertage / heißen Tage an der Station W-Buchenhofen 1948-2020

In den folgenden Abbildungen 2-18a und b ist das Jahr 2018 für die beiden Kenntage in 1 km²-Rasterdarstellung im Bereich Wuppertal aufgelöst (siehe auch Abb. 2-5a und 2-5b). Je nach Lage sind danach 2018 in Wuppertal 67 bis 82 Sommertage, dazu 13 bis 18 heiße Tage. Das heißt im Jahr 2018 ist auf dem Stadtgebiet von Wuppertal nach den Rasterdaten bei den Sommertagen ein Unterschied von bis zu fünfzehn Stück und bei den heißen Tagen von bis zu fünf Stück aufgetreten.

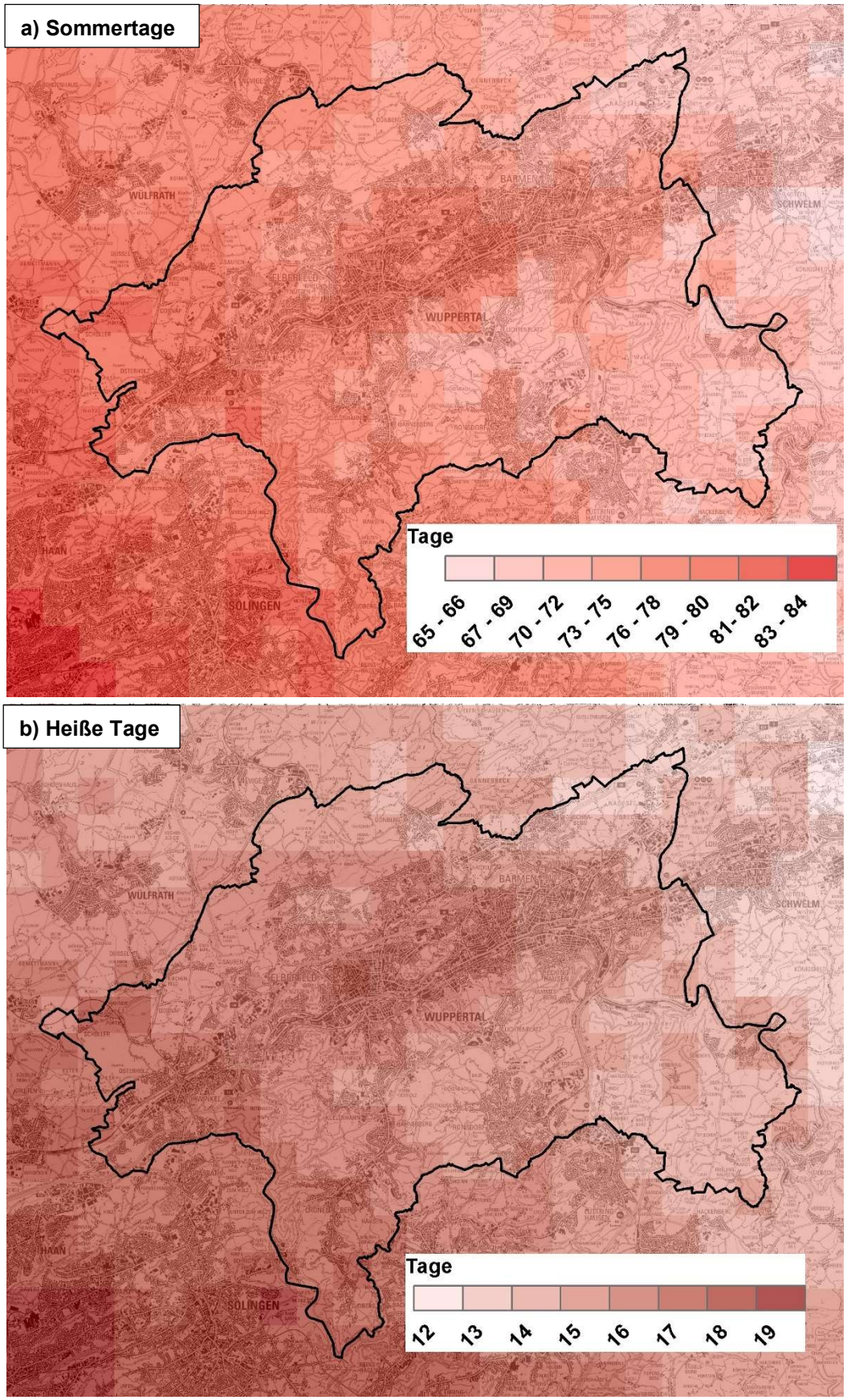

Abbildung 2-18a und 2-18b: Anzahl von Sommertagen und heißen Tagen im Raum Wuppertal im 1 km^2-Raster für das Jahr 2018, Kartengrundlage: © Land NRW (2020) - Lizenz dl-de/by-2-0 (www.govdata.de/dl-de/by-2-0), Maßstab 1:50.000, in der Abb. Verändert

Eistage (Tagesmaximum < 0 °C) und Frosttage (Tagesminimum < 0 °C) haben in den letzten Jahrzehnten deutlich abgenommen. Der Rückgang bei den Eistagen ist nicht ganz so stark, wie bei den Frosttagen. In jüngerer Vergangenheit sticht besonders das Jahr 2010 mit seiner überdurchschnittlich hohen Anzahl an Frost- und Eistagen hervor.

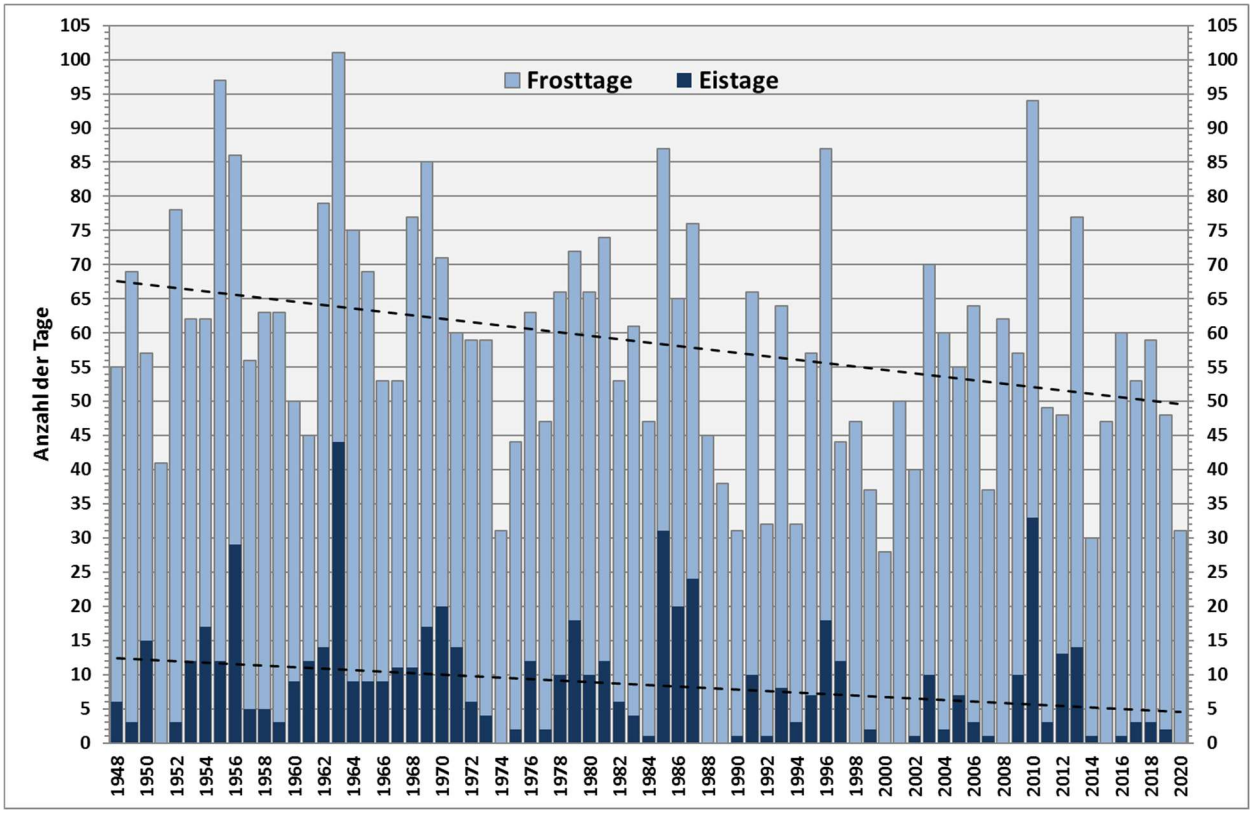

Abbildung 2-19: Anzahl der Frosttage und Eistage an der Station W-Buchenhofen 1948-2020

Bei der Jahressumme des Niederschlags ist seit 1948 kein ganz eindeutiger Trend festzumachen (siehe Abbildung 2-20 auf der nächsten Seite). Neben der großen jährlichen Schwankungsbreite fällt allerdings auf, dass seit 2008 viele Jahre relativ trocken waren. Alle Einzeljahre von 2008 bis 2020 liegen unter dem langjährigen Durchschnittswert von 1175 mm (Bezugszeitraum 1981-2010). Im Bezugszeitraum 1991-2020 wurden im Schnitt etwa 1119 mm registriert – eine Größenordnung, die auch für die Zeiträume 1961-1990 und 1971-2000 gilt. Der Mittelwert in den letzten 12 Jahren liegt bei knapp 1030 mm und damit fast 150 mm unter dem Klimanormalwert 1981-2010 und rund 90 mm unter dem neuen Mittel. Ob dies ein Trend zu insgesamt niedrigeren jährlichen Niederschlagsmengen bedeutet, lässt sich noch nicht beurteilen. 2018 war in Wuppertal-Buchenhofen nach 1959 das trockenste Jahr seit 1948.

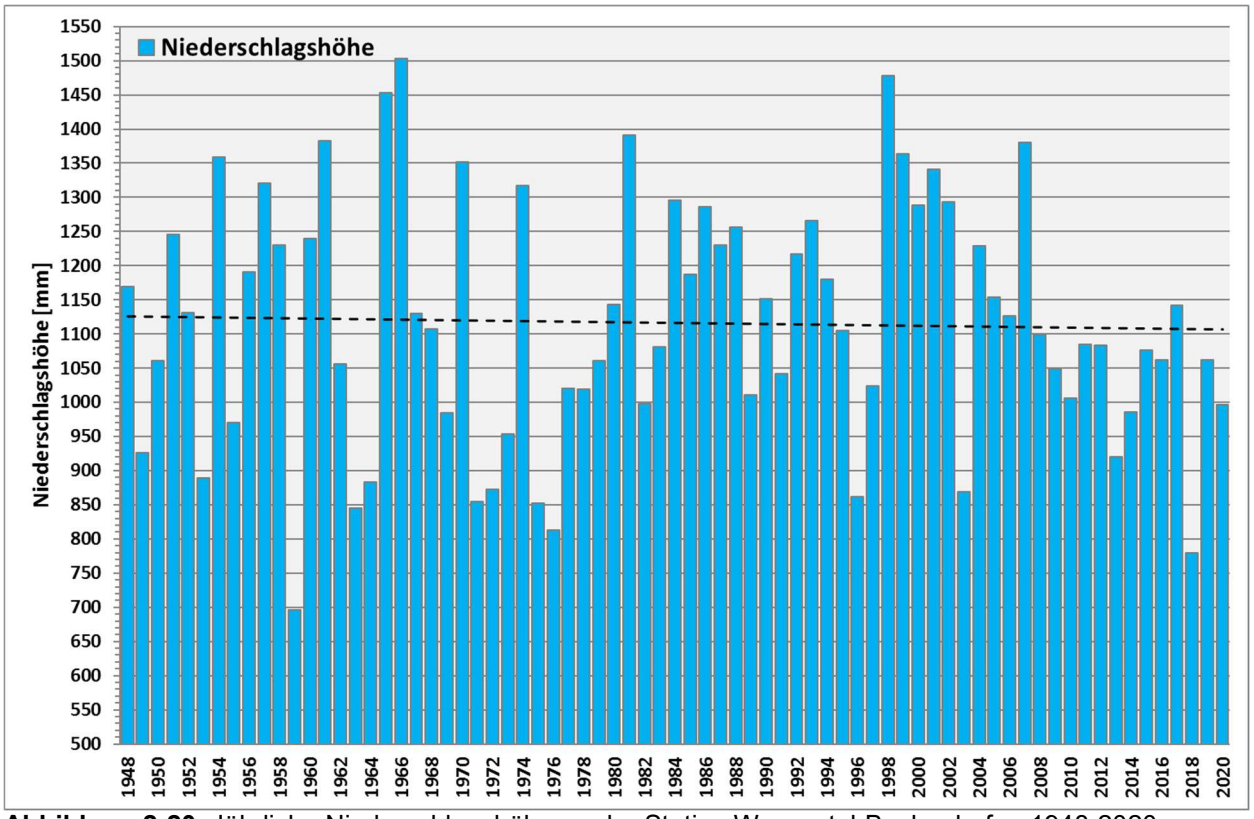

Abbildung 2-20: Jährliche Niederschlagshöhe an der Station Wuppertal-Buchenhofen 1948-2020

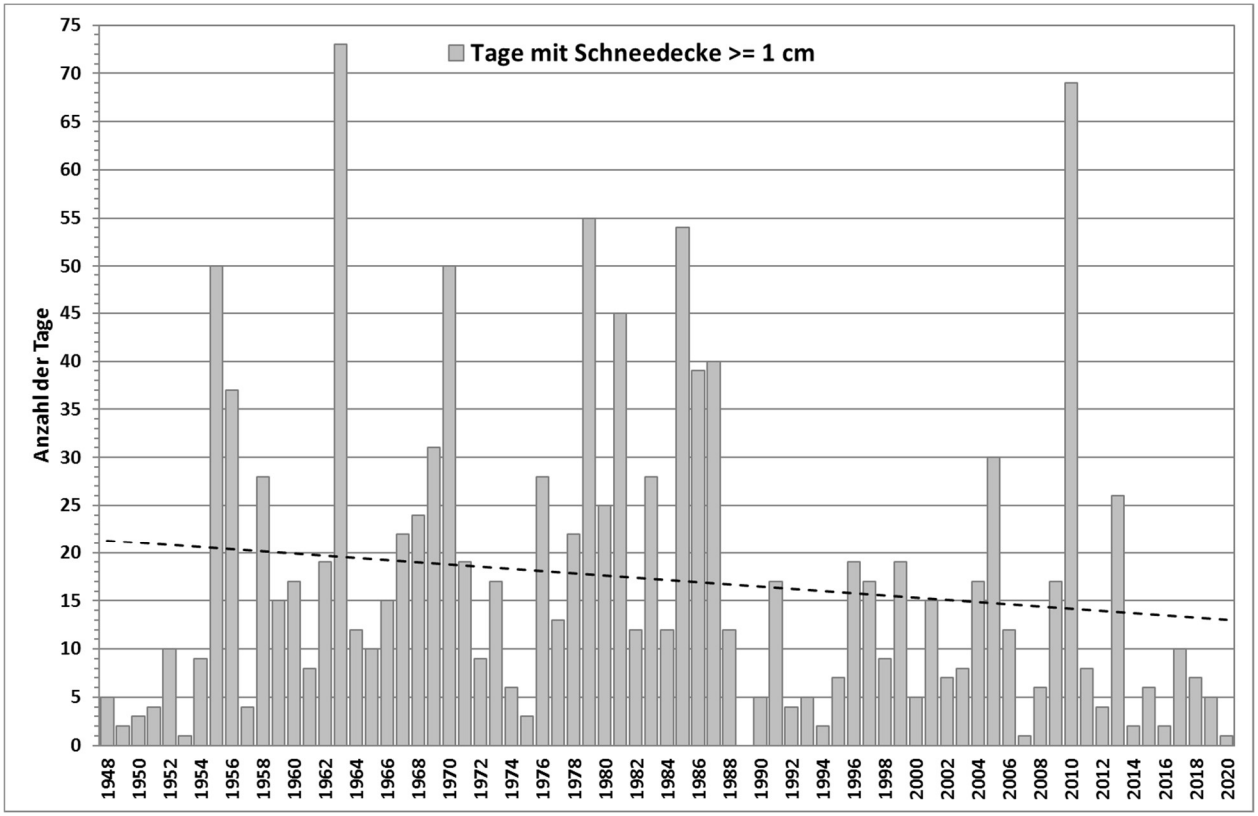

Abbildung 2-21: Anzahl der Tage mit Schneedecke ≥ 1 cm an der Station W-Buchenhofen 1948-2020

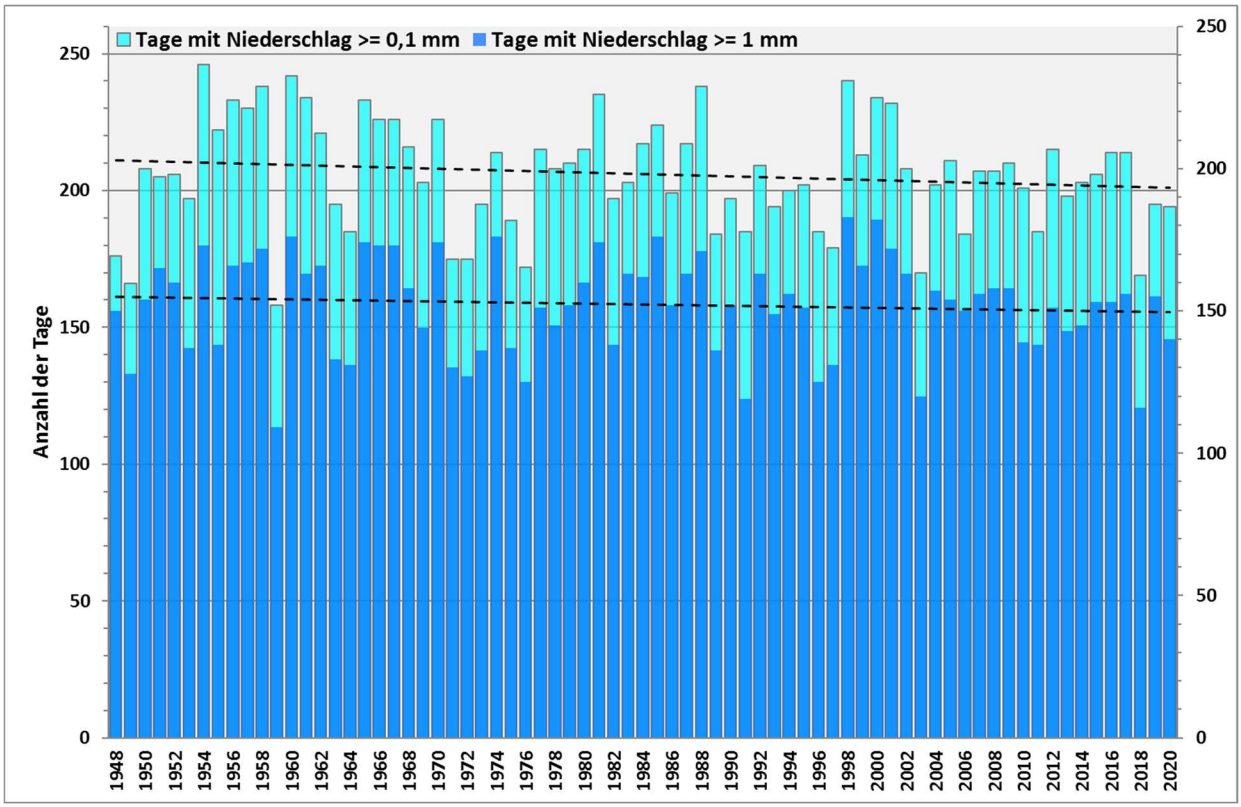

Abbildung 2-22: Anzahl der Tage mit einer Niederschlagshöhe ≥ 0,1 mm und ≥ 1 mm an der Station Wuppertal-Buchenhofen 1948-2020

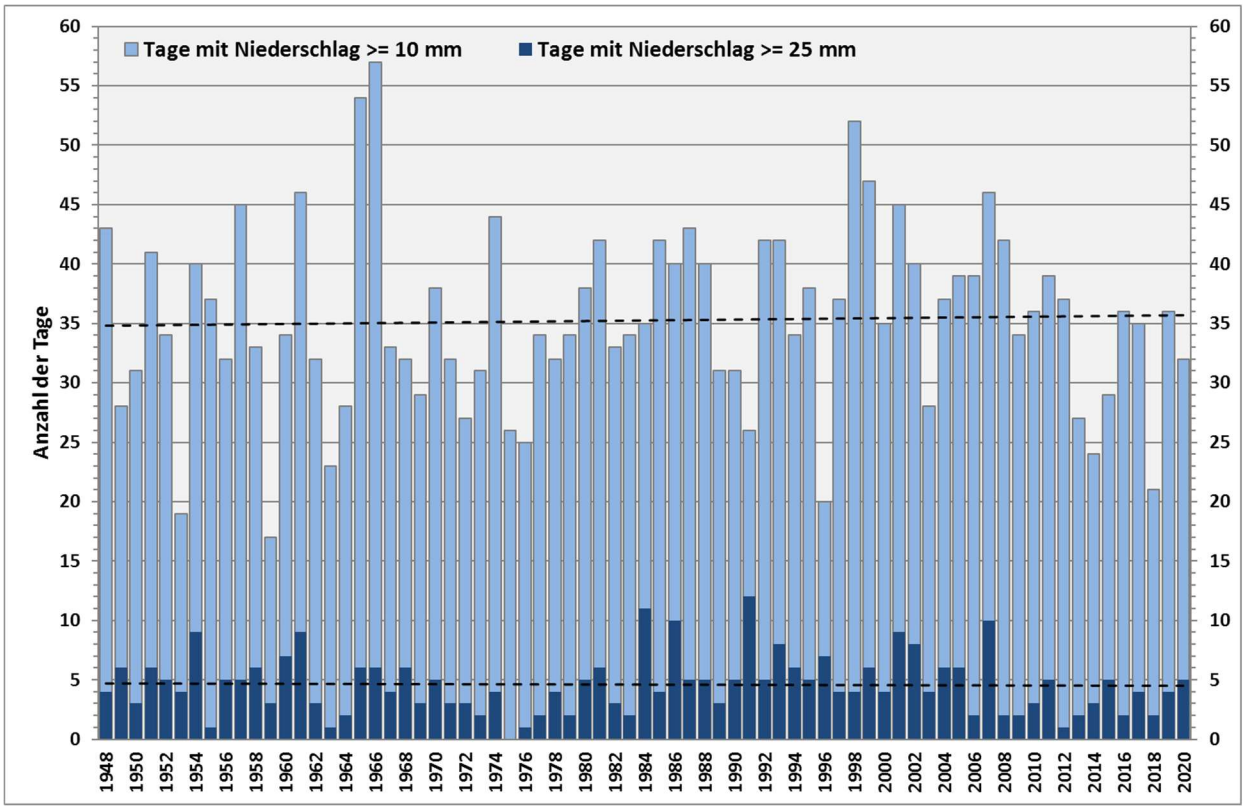

Abbildung 2-23: Anzahl der Tage mit einer Niederschlagshöhe ≥ 10 mm und ≥ 25 mm an der Station Wuppertal-Buchenhofen 1948-2020

Die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke von mindestens einem Zentimeter Höhe ist besonders seit Ende der 1980er-Jahre eindeutig rückläufig. Einen deutlichen Ausreißer nach oben stellt dabei das Jahr 2010 mit 69 Tagen dar (Abbildung 2-21).

Bei der Anzahl der Tage mit Überschreitung bestimmter Niederschlagshöhen (Abbildungen 2-22 und 2-23) fällt auf, dass die Anzahl der Tage mit mindestens 0,1 mm und 1 mm eher rückläufig sind, während die Tage mit höheren Niederschlägen von mindestens 10 mm leicht (wenn auch nicht signifikant) zunehmen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass trockene Tage bzw. Tage mit nur sehr geringem Niederschlag unter 0,1 mm etwas häufiger geworden sind. Ob dies – wie auch die Niederschlagssummen der letzten 12 Jahre – ein Beleg dafür ist, dass es bereits insgesamt trockener geworden ist, bei jedoch zunehmender Tendenz von stärkeren Niederschlägen, kann nach derzeitigem Stand noch nicht abschließend bewertet werden.

Die langzeitliche Entwicklung der Sonnenscheindauer weist auch für den kürzeren Zeitraum der Station Lüdenscheid seit 1994 eine recht deutliche Zunahme auf (Abbildung 2-24). Seit 2003 ist der langjährige Mittelwert von rund 1490 Stunden mehrmals deutlich überschritten worden. Die rund 1966 Sonnenstunden des Jahres 2003 stellen dabei das absolute Maximum dar, gefolgt von 2018 mit gut 1809 Stunden Sonne. Den geringsten Wert in den letzten 15 Jahren weist das Jahr 2013 mit 1335 Sonnenstunden in Lüdenscheid auf. Zwischen dem alten Klimamittel 1961-1990 und dem 1991-2020 stehen bei der jährlichen Summe der Sonnenscheindauer etwa 130 Sonnenstunden mehr zu Buche. Dies gilt nicht nur für Lüdenscheid, sondern für ganz NRW und damit auch für Wuppertal.

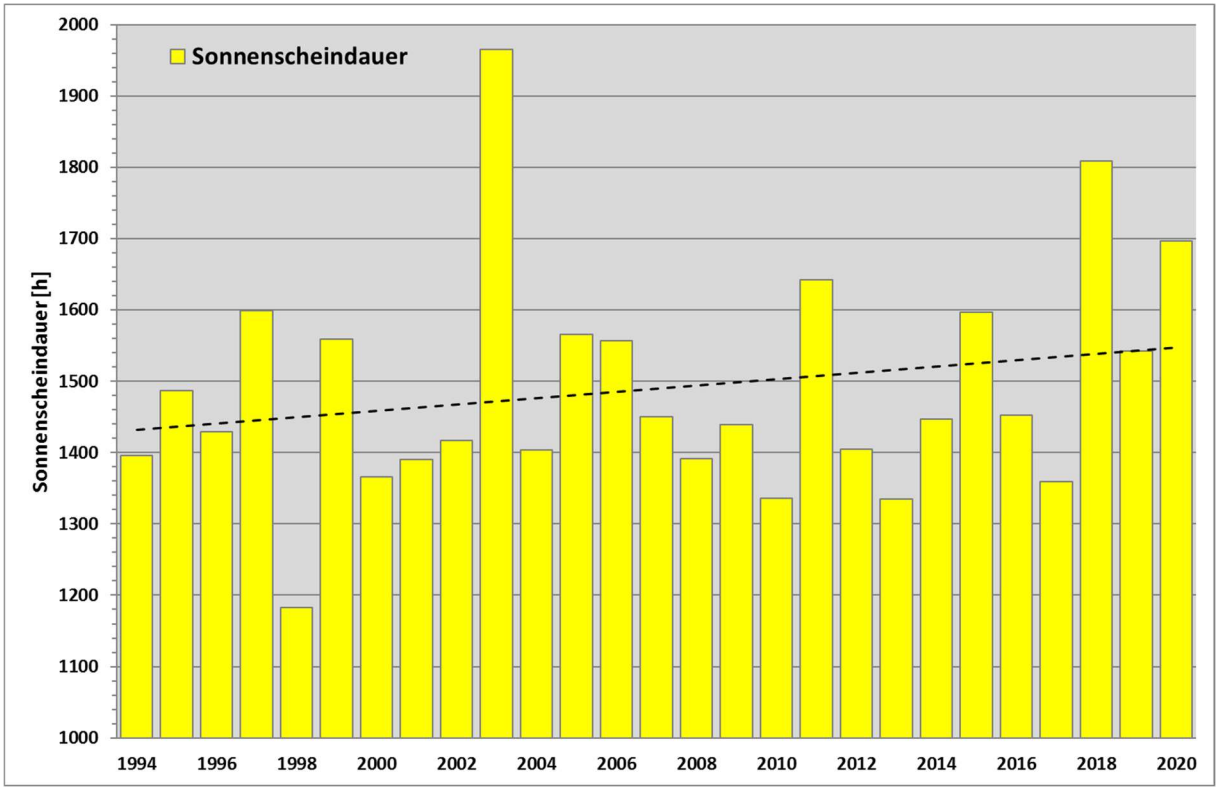

Abbildung 2-24: Jährliche Summen der Sonnenscheindauer an der Station Lüdenscheid für den Zeitraum 1994-2020.

Zusammenfassung

Das Klima in Wuppertal wird besonders durch die starke topographische Gliederung der Stadt geprägt. So liegen die mittleren jährlichen Temperaturen je nach (Höhen-)Lage im Stadtgebiet zwischen 8,8 °C und 10,1 °C, die durchschnittliche jährliche Niederschlagshöhe bewegt sich in Wuppertal meist zwischen 1100 und bis zu 1400 mm. Als mittlere jährliche Sonnenscheindauer ist in der Region von gut 1500 Stunden auszugehen (Bezug: DWD-Rasterdaten 1981-2010).

In den letzten 60 bis 70 Jahren ist im Mittel bei Temperatur und Sonnenscheindauer im Raum Wuppertal ein enormer Anstieg zu verzeichnen. Im Vergleich der beiden Klimaperioden 1961-1990 und 1991-2020 hat die mittlere Jahresmitteltemperatur um gut 1 Grad zugenommen. Klimatologisch gesehen stellt dies eine enorme Größenordnung dar. In den letzten Jahrzehnten liegt der hochsignifikante Anstieg pro Dekade bei etwa 0,32 Grad. Entsprechend lässt sich eine markante Zunahme bei Sommertagen und heißen Tagen und eine deutliche Abnahme bei den winterlichen Klima-Kenntagen feststellen. Die durchschnittliche Sonnenscheindauer hat im Vergleich der beiden Perioden um etwa 130 Stunden im Jahr zugenommen. Beim Niederschlag gibt es dagegen keinen eindeutigen Trend. Insbesondere bei Betrachtung der letzten 10 bis 12 Jahre macht sich jedoch eine Tendenz zu insgesamt trockeneren Verhältnissen bei gleichzeitiger Zunahme der (sommerlichen) Stark-Niederschläge bemerkbar.

Ein Vergleich der mittleren Jahresmitteltemperaturen der innerstädtischen Messstation Bundesallee in Elberfeld (30 m über Grund, Überdachstation) mit der DWD-Station Buchenhofen in den letzten 10 Jahren (2010-2019) zeigt, dass der Unterschied von einer relativ freien Lage im Tal der Wupper mit dem verdichteten Innenstadtbereich 0,6 K beträgt.

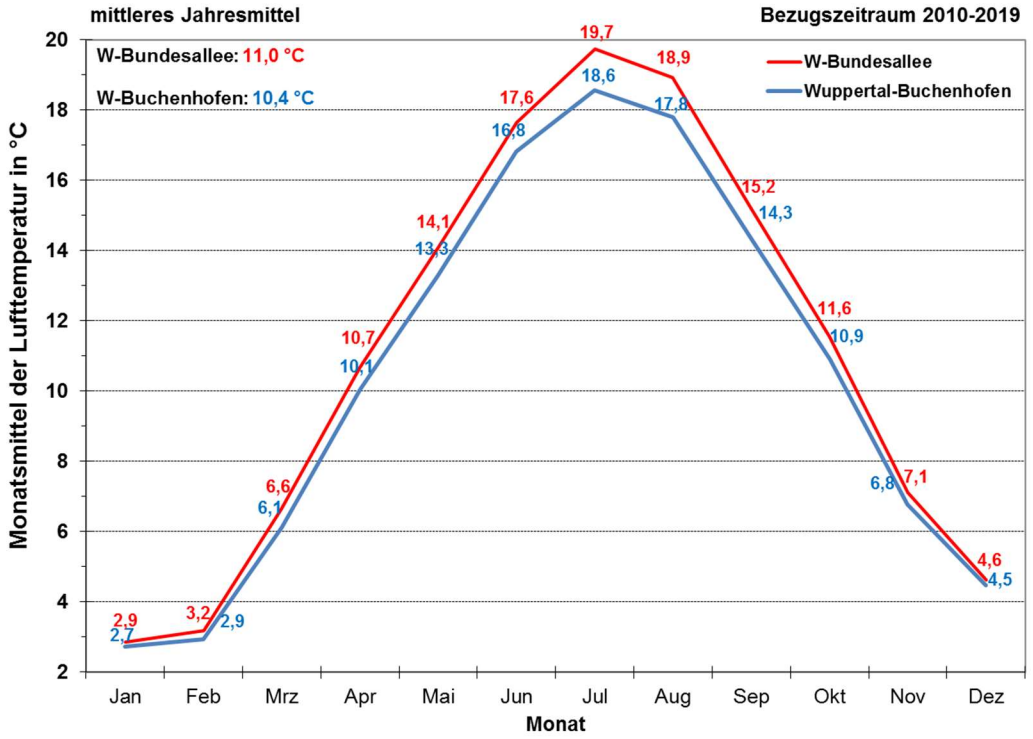

Abbildung 2-25: Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur in Wuppertal-Bundesallee und Wuppertal-Buchenhofen im Bezugszeitraum 2010-2019

Im Jahresgang der mittleren Monatsmitteltemperaturen ist festzustellen, dass die höchsten Differenzen zwischen den beiden Stationen in den Monaten April bis Oktober auftreten (mit einem Maximum von 1,2 K im Juli und 1,1 K im August). Von November bis Februar liegt der Unterschied dagegen nur bei durchschnittlich rund 0,2 K (siehe auch Abbildung 2-25). Dieser jahreszeitliche Unterschied ist auf die innerstädtisch geprägte Lage von der Station Bundesallee und dem damit verbundenen städtischen Wärmeinseleffekt zurückzuführen. Dieser ist in den Monaten April bis September am stärksten ausgeprägt. Die Anzahl der sommerlichen Kenntage (Sommertage, heiße Tage) in der Innenstadt liegt im Vergleich mit Buchenhofen näherungsweise etwa 10 bis 20 % höher. So wird der Einfluss von dicht(er) bebauten, versiegelten Bereichen (urbane Wärmeinsel) innerhalb eines Stadtgebietes noch einmal besonders deutlich.

Wirksame Maßnahmen zur Verringerung der Überwärmung in verdichteten Siedlungsbereichen können neben dem Erhalt/der Schaffung von Grün- und Freiflächen z. B. Rückbau und Entsiegelung von Grundstücken (Verringerung der Bebauungsdichte) sein. Klimaverbessernde Wirkungen für den unmittelbaren Lebensraum gehen auch schon von kleinen Grünflächen oder einzelnen Bäumen aus. Weitere Möglichkeiten wären etwa Verschattung von Straßen, Plätzen, Gebäuden, aber auch Innen-/Hinterhofbegrünung, Schaffung von innerstädtischen Wasserflächen und Fassaden- oder Dachbegrünung.

3 Klimaprojektionsrechnungen zum zukünftigen Klima in Wuppertal

Für die Simulation des zukünftig zu erwartenden Klimas wird vorwiegend eine Kombination aus globalen und regionalen Klimamodellen eingesetzt. Bei den globalen Modellen (GCMs) handelt es sich um sogenannte Zirkulationsmodelle, die unter Verwendung physikalischer atmosphärischer Grundgleichungen Projektionen eines zukünftigen Klimas in verschiedenen räumlichen Auflösungen liefern. Aktuelle globale Klimamodelle setzen sich aus einem allgemeinen Zirkulationsmodell für die Atmosphäre, wie es beispielsweise auch für die Wettervorhersage eingesetzt wird und zusätzlichen Modellen für einzelne Komponenten des Klimasystems zusammen (Roeckner, 2003). In diesen sind etliche Komponenten des Klimasystems wie die Atmosphäre, der Ozean, die Kryosphäre und die Landoberfläche durch den Austausch von beispielsweise Energie, Wasser, Impuls, Aerosol und Kohlendioxid (CO_2) miteinander gekoppelt. Diese als Erdsystemmodelle (ESMs) bezeichneten GCMs wurden in den letzten Jahren und Jahrzehnten zunehmend komplexer. Durch diese Erweiterungen wurden einige Unsicherheiten, die durch die Randbedingungen des Klimasystems verursacht werden und für langjährige Klimaprojektionen von großer Bedeutung sind, identifiziert und deutlich verringert.

Die Auflösung der globalen Klimamodelle (mit Gitterabständen von mehr als 100 km) reicht derzeit nicht aus, um die Unterschiede in den Ausprägungen des Klimawandels einer Region der Erde (z.B. Europa, Deutschland) detailliert zu beschreiben. Hierfür werden regionale Klimamodelle (RCMs; Regional Climate Models) mit einem viel engmaschigeren Netz von Gitterpunkten eingesetzt. Die regionalen Klimamodelle werden mit den Ergebnissen der globalen Klimamodelle angetrieben (siehe Abbildung 3-2). In den regionalen Modellen kann die Gitterweite bis auf horizontale Abstände von 1-20 km verringert werden, wodurch mehr Prozesse direkt von den, dem Modell zugrundeliegenden Gleichungen abgebildet und weniger Prozesse parametrisiert werden müssen.

Grundlage zur Ermittlung der hier dargestellten Änderungssignale (Differenz eines betrachteten Zeitraums, z.B. 2021 bis 2050, zu einem Referenzzeitraum, z.B. 1971 bis 2000) sind Ergebnisse globaler ESMs, die im fünften Sachstandbericht des Weltklimarates (IPCC, 2014) Verwendung fanden. Ein Großteil der regionalen Klimaprojektionen für die Atmosphäre wurde im Rahmen des EURO-CORDEX-Projektes (https://www.euro-cordex.net/) erzeugt und bereitgestellt. Dieses Ensemble basiert auf verschiedenen Globalmodellen, drei verschiedenen Emissionsszenarien (RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5) und mehreren regionalen Klimamodellen, die verwendeten Modelläufe sind hier aufgelistet: http://www.dwd.de/ref-ensemble. Die verwendeten regionalen Klimaprojektionen liegen in einer zeitlichen Auflösung von einem Tag und einer räumlichen Auflösung von 0.11° (~12 km) vor. Die Daten wurden mittels eines statistischen Downscaling-Verfahrens auf ein 5 x 5 km Gitter übertragen (entspricht dem Gitter des HYRAS-Datensatzes, ETRS89-LCC; siehe Rauthe et al., 2013) und einer BIAS-Adjustierung unterzogen, um die in den Klimamodellen enthaltenen systematischen Fehler (Bias) zu verringern (siehe auch https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Home/home_node.html).

Da die Klimamodelle sowohl methodische als auch modellbedingte Fehler aufweisen und die Atmosphäre ein chaotisches System ist, werden zur Betrachtung der Auswirkungen stets mehrere Modellergebnisse herangezogen, man spricht von Ensemble-Betrachtungen. Zudem ist es unerlässlich, Szenarien zu möglichen zukünftigen Emissionen von Treibhausgasen zu verwenden. Diesen Szenarien liegen unterschiedliche Annahmen über zukünftige globale Wirtschaftsentwicklungen (und damit resultierende Treibhausgasemissionspfade) zugrunde. Die aktuellen RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) reichen von einem Klimaschutzszenario durch „rigorose Klimaschutzmaßnahmen“ (RCP 2.6), über das moderate RCP 4.5-Szenario bis zu einem Szenario “ungebremsten Wirtschaftswachstums“ mit hohen Treibhausgasemissionen (RCP 8.5) [IPCC, 2014, Umweltbericht NRW, 2016]. Die RCP-Szenarien zeigen jeweils unterschiedliche in CO_2-Äquivalenten angegebene Konzentrationen der Treibhausgase (siehe Abbildung 3-1). Jede dieser Konzentrationen würde den Strahlungsantrieb der Atmosphäre und damit den Treibhauseffekt signifikant beeinflussen. Und damit letztlich auch die Änderung der weltweiten globalen Lufttemperatur (Abbildung 3-1, untere Graphik).

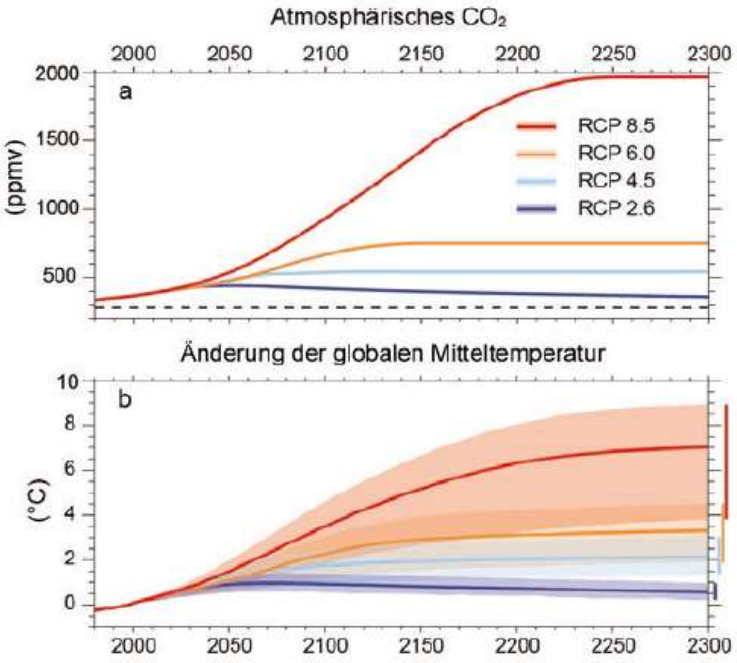

Abbildung 3-1: Entwicklung des atmosphärischen Kohlendioxids (oben) und der globalen Mitteltemperatur bis zum Jahr 2300 (unten) für die verschiedenen IPCC-Emissionsszenarien RCP 2.6 bis RCP8.5 [Nationaler Klimareport, 2016].

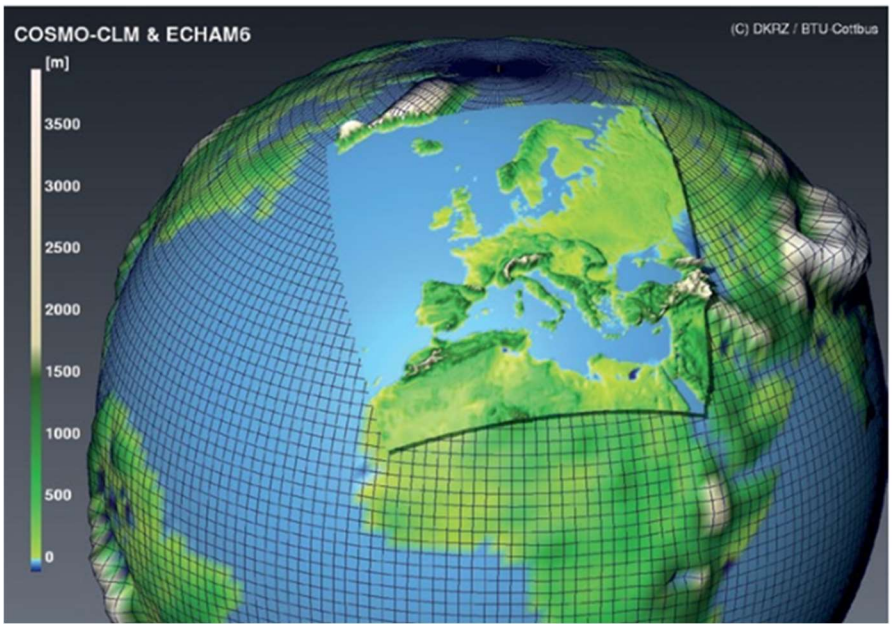

Abbildung 3-2: Beispiel für eine Koppelung eines Globalmodells (hier: ECHAM6) und einem Regionalmodell, hier dem dynamischen regionalen Klimamodell COSMO (COnsortium for Small-scale MOdelling)-CLM bzw. CCLM Modell, das aus dem Wettervorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes entwickelt und durch eine internationale Gemeinschaft von Wissenschaftlern der CLM (Climate Limited-area Modelling)-Community verwendet und weiterentwickelt wird (http://www.clm-community.eu). Quelle: DKRZ

Wie man von den Einzelergebnissen der Klimarechnungen zu einer statistischen Aussage (Perzentile) kommt, wird im Nachfolgenden beispielhaft erläutert.

Hat ein Ensemble regionaler Modelle etwa die in Abbildung 3-3 dargestellte Verteilung von Simulationswerten der bodennahen Lufttemperatur ergeben, werden diese Werte zunächst ihrer Größe nach geordnet (Abbildung 3-4) und dann abschließend erfolgt die Einteilung in Perzentile (Abbildung 3-5).

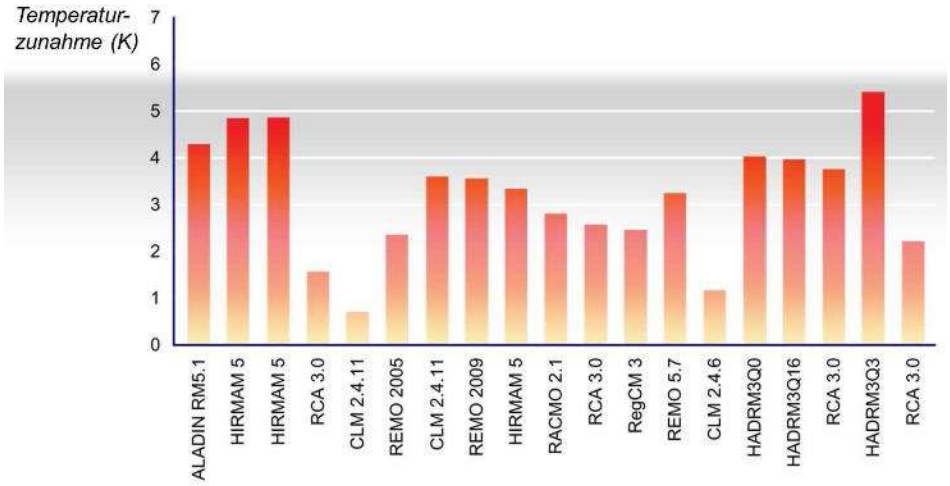

Abbildung 3-3: Beispiel von Ergebnissen regionaler Klimamodelle in unsortierte Folge

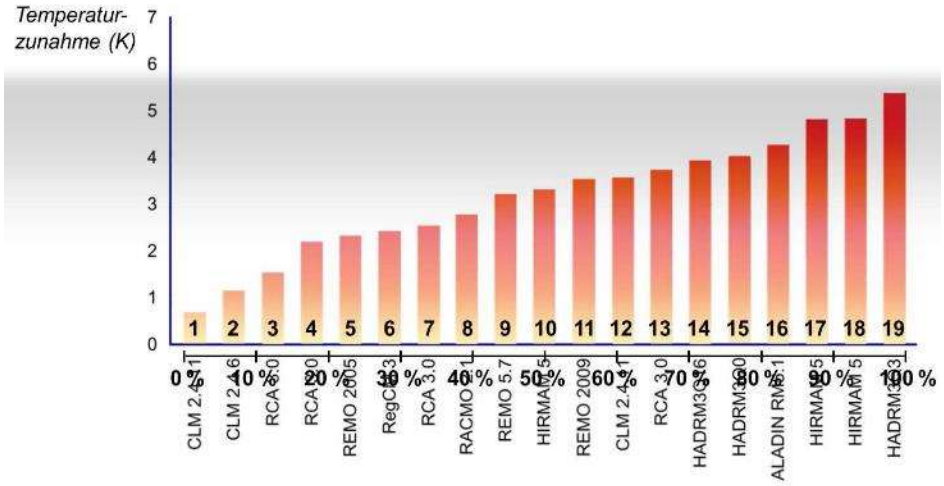

Abbildung 3-4: Ihrem Wert nach geordnete Simulationswerte, vergleiche Abbildung 3-3

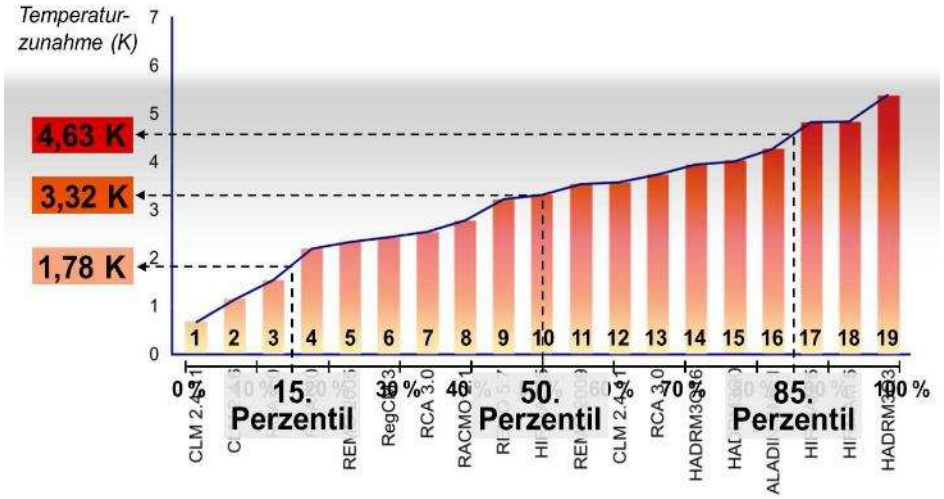

Abbildung 3-5: Einteilung der Werte aus Abbildung 3-4 in Perzentile.

In dem Beispiel (Abbildung 3-5) liegen die Ergebnisse von 50 % der Modelle über und die von 50 Prozent unter dem 50. Perzentil. In dem Intervall zwischen dem 15. und 85. Perzentil befinden sich 70 % der Simulationen, 15 % der Modelle errechnen niedrigere und 15 % errechnen höhere Werte. Im Allgemeinen, und auch hier in diesem Bericht, wird die Spanne zwischen dem 15. und 85. Perzentil als eine realistische Spannbreite möglicher Änderungen angesehen: nur 30 % aller betrachteten Modelle zeigen Werte außerhalb dieser Spannweite (15 % höhere, 15 % niedrigere Werte).

Der aktuelle Sonderbericht des IPCC [IPCC, 2018] sagt aus, dass die im Pariser Abkommen vereinbarte Obergrenze des erdweiten Temperaturanstiegs auf maximal 2 Grad, besser 1,5 Grad (über dem vorindustriellen Niveau) nur dann erreichbar ist, wenn die weltweiten Treibhausgasemissionen rasch und drastisch gesenkt werden. Die derzeitigen aktuellen Werte der Treibhausgas-Emissionen sowie der Treibhausgas-Konzentrationen zeigen weiterhin ansteigende Tendenz, so dass das Erreichen des 1,5 Grad-Ziel wohl nur mit größten Anstrengungen

aller Staaten der Erde erreichbar sein wird und momentan als eher nicht realistisch eingeschätzt werden muss. Trotzdem werden in diesem Bericht das RCP 2.6 („Klimaschutzszenario“) sowie die Emissionsszenarien RCP 4.5 („Stabilisierungsszenario“ mit einem mittleren Strahlungsantrieb) und RCP 8.5 (hohe Treibhausgasemissionen - „weiter wie bisher“-Szenario) verwendet. So wird eine Spannweite zwischen einem eher unrealistischen, aber möglichen RCP 2.6-Klimaszenario und einem extremen zukünftigen Klima (RCP 8.5) aufgespannt. Die Ergebnisse des Szenario 6.0 sind in der Spannweite der verwendeten Szenarien RCP 2.6, 4.5 und 8.5 mit enthalten und werden hier nicht gesondert betrachtet.

Durch die Verwendung des 15., 50. und 85. Perzentils werden wiederum 70 % der Modellergebnisse je betrachteten Emissionsszenario (RCP 4.5 und RCP 8.5) abgebildet.

Um eine Abschätzung der Änderungen des Klimas bis Mitte / Ende des Jahrhunderts in Wuppertal zu erhalten, wird ein Gebiet von 7 x 5 Gitterzellen (räumliche Auflösung 5 km x 5 km je Gitterzelle) ausgewählt und ausgewertet, das Wuppertal mit Umgebung enthält (siehe Abbildung 3-6b).

Folgende Auswertungen für das Gebiet von Wuppertal werden präsentiert:

- Änderung der mittleren jährlichen Lufttemperatur (Jahreswerte) sowie der mittleren Lufttemperatur für die Jahreszeiten, dabei bedeuten z.B. der Sommer die Monate Juni, Juli, August und der Winter die Monate Dezember, Januar und Februar.
- Änderung der mittleren Niederschlagsumme (Jahreswerte) und der mittleren Niederschlagssummen für die Jahreszeiten
- Änderung der mittleren jährlichen Anzahl von Tagen mit Niederschlagssummen von mehr als 20 mm (pro Tag)
- Änderung der mittleren jährlichen Anzahl von Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten
- Änderung der mittleren jährlichen Anzahl an Frost- und Eistagen

Die Werte geben die sogenannten Änderungssignale an, d.h. die Differenzen der Werte der Perioden 2031 bis 2060 (**nahe Zukunft**) und 2071 bis 2100 (**ferne Zukunft**) in Kelvin, Prozent oder Anzahl von Tagen an, bezogen auf die Referenzperiode 1971 bis 2000 (HYRAS-Datensatz. Es werden zusätzlich die tatsächlichen Werte als Summe aus Referenzwert und Änderungssignal angegeben.

Die Ergebnisse der verwendeten Ensembles werden auf einem äquidistanten Gitter in einer 5 km x 5 km räumlichen Auflösung (geographische Koordinaten) dargestellt. Die Abbildung 3-6a zeigt ein Beispiel für das Land NRW. Für die Betrachtungen für Wuppertal wurde ein Gebiet mit 7 mal 5 Gitterpunkten gewählt (Abbildung 3-6b).

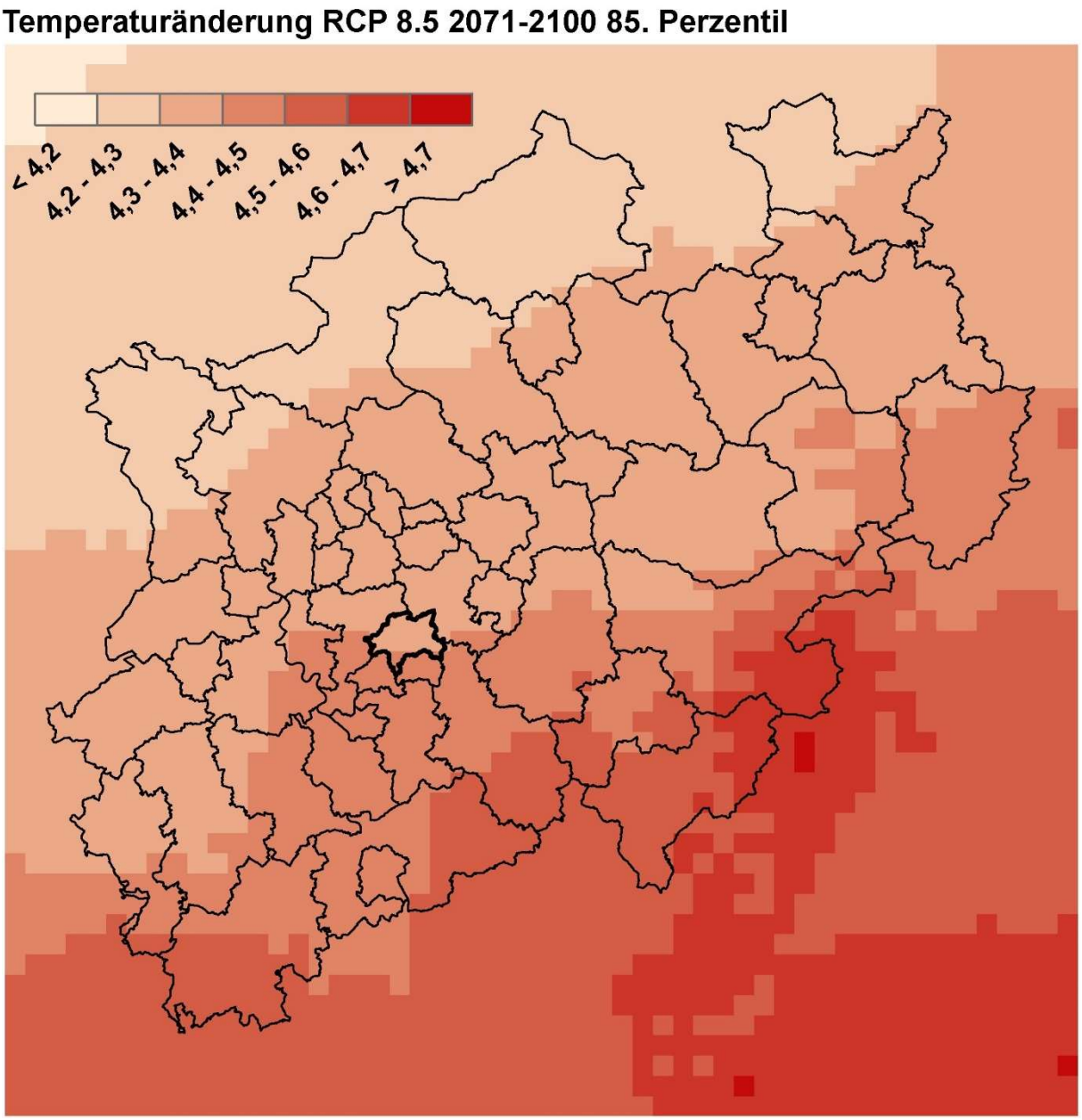

Abbildung 3-6a: Beispiel (Änderungssignal der Lufttemperatur, RCP 8.5, 85. Perzentil) für das räumliche Raster (5 km x 5 km) des verwendeten Ensembles der Klimaprojektionsrechnungen für das Land NRW

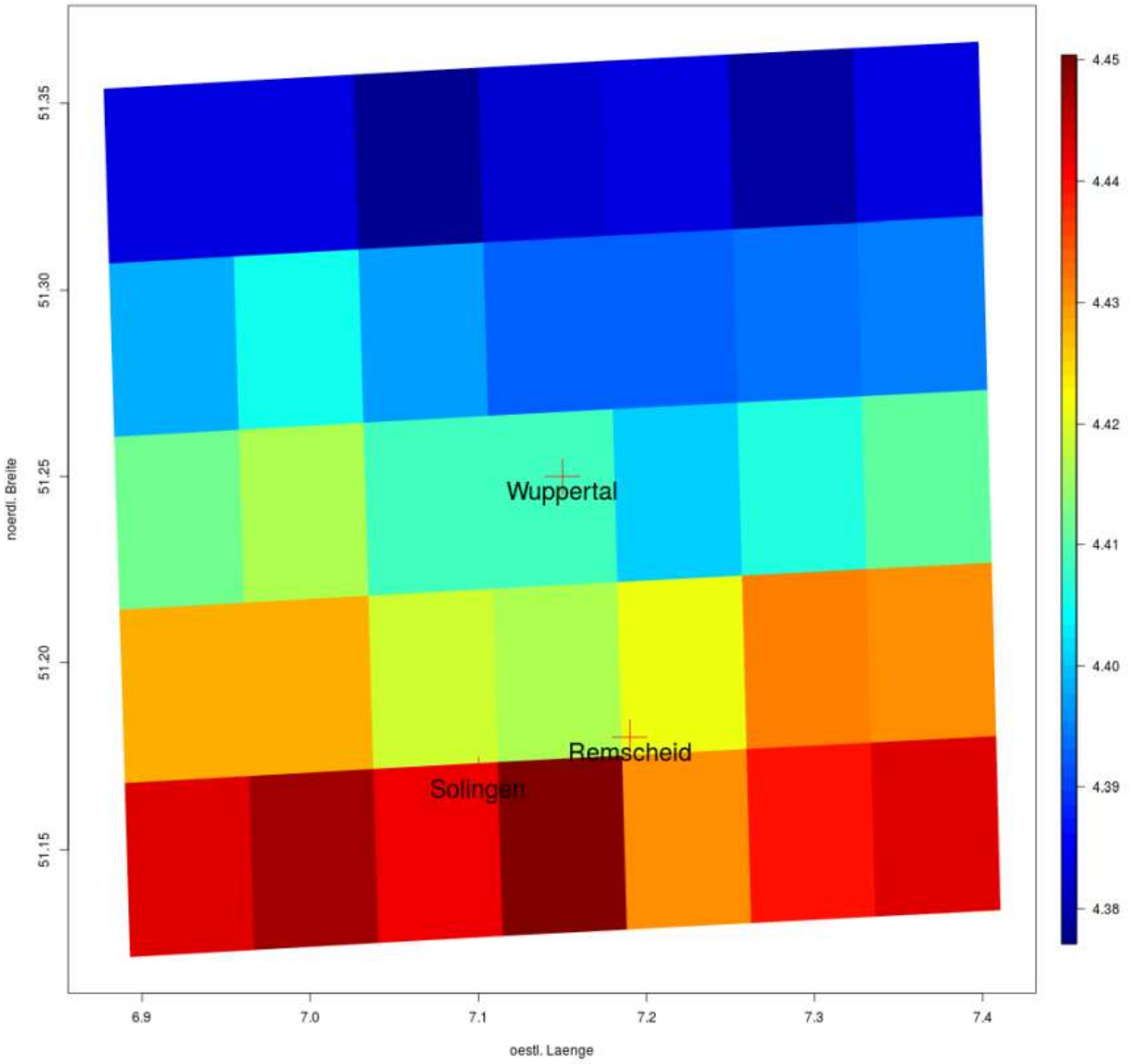

Abbildung 3-6b: Darstellung des verwendeten räumlichen Rasters für Wuppertal plus Umgebung (7 x 5 Gitterpunkte je 5 km x 5 km Auflösung) am Beispiel des Änderungssignals der Lufttemperatur in Kelvin (2071-2100, RCP 8.5, 85. Perzentil)

Der Stand der Auswertung ist der 30.06.2018. Dies bedeutet, dass alle zu diesem Zeitpunkt dem DWD verfügbaren und verwertbaren Modelläufe verwendet und zu einem Ensemble verarbeitet wurden. Nach dem Stichtag erfolgte Änderungen (z.B. durch einen Rückzug von Klimaprojektionsdaten oder durch eine Aufstockung des Ensembles mit neuen Klimasimulationsrechnungen) sind somit nicht berücksichtigt.

3.1 Lufttemperatur

Ein weiterer Anstieg der Lufttemperatur (Temperatur in 2 m Höhe über Grund) in Nordrhein-Westfalen, und somit auch in Wuppertal, ist so gut wie sicher zu erwarten (siehe Abbildung 3-7). Für den Zeithorizont 2071 bis 2100 beträgt der modellierte Anstieg der bodennahen Lufttemperatur in NRW gegenüber der Referenzperiode (1971 bis 2000) etwa 1 Kelvin (RCP 4.5, 15. Perzentil und über 4 Kelvin (RCP 8.5, 85. Perzentil).

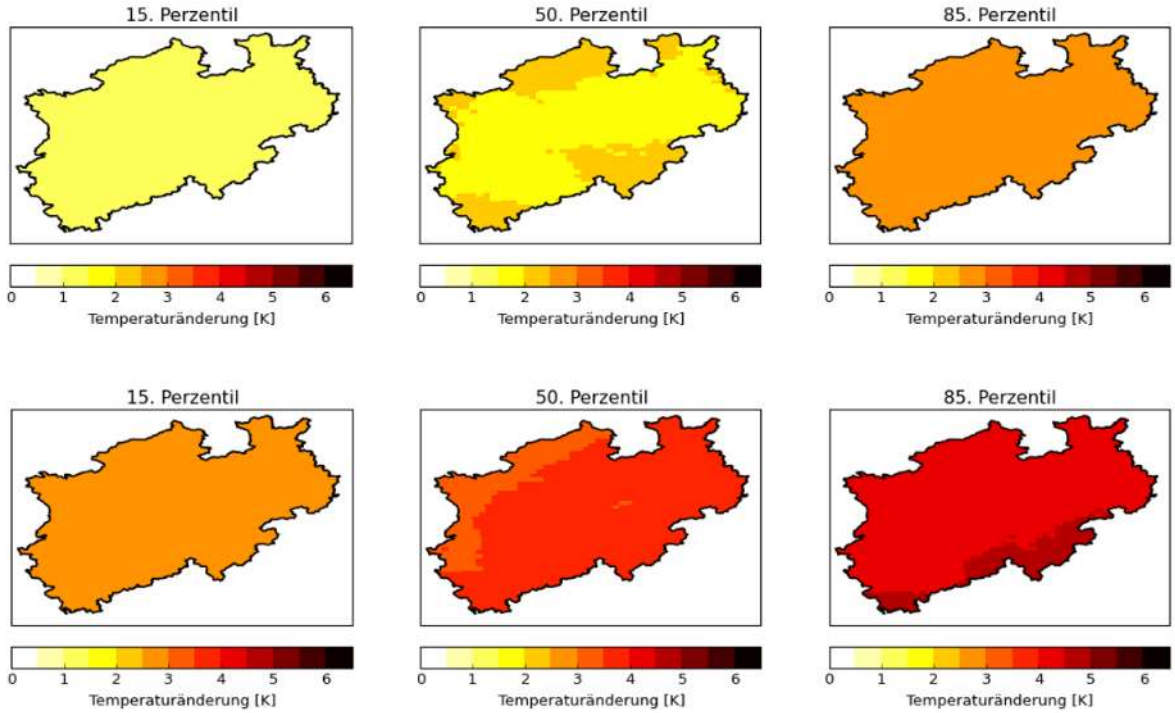

Abbildung 3-7: Änderung der mittleren jährlichen Lufttemperatur (in Kelvin) in der Periode 2071 bis 2100 in NRW (bezogen auf die Referenzperiode 1971 bis 2000); betrachtet werden das „Stabilisierungsszenario“ RCP 4.5 (oben) und das „weiter wie bisher“-Szenario RCP 8.5 (unten), jeweils für das 15., 50. und 85. Perzentil (Quelle: DWD)

Zur Abschätzung der klimatischen Veränderungen für Wuppertal wird ein räumliches arithmetisches Mittel aus den betrachteten Gitterboxen betrachtet, die die Stadtgebiete überdecken (siehe Abbildung 3-6b). Die Spannweite der betrachteten Szenarien (RCP 2.6, 4.5 und RCP 8.5) und der herangezogenen Perzentile (15. und 85. Perzentil) ergibt für die Jahresmitteltemperatur (siehe Tabelle 3-1):

- Für die Periode 2031 bis 2060 (nahe Zukunft) eine erwartete **Zunahme der Jahresmitteltemperatur von etwa 0,7 bis 2,1 Kelvin**[2] gegenüber der Vergleichsperiode 1971 bis 2000 und
- für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) wird ein Temperaturanstieg zwischen **0,8 und 4,4 Kelvin** erwartet.

Dabei liegen die erwarteten mittleren jährlichen Temperaturzunahmen bei dem Klimaschutzszenario RCP 2.6 bei 0,7 bis 1,5 Kelvin (nahe Zukunft) und 0,8 bis 1,6 Kelvin (ferne Zukunft), beim „weiter wie bisher“ Szenario RCP 8.5 bei 1,3 bis 2,1 Kelvin (nahe Zukunft) und 2,7 bis 4,4 Kelvin (ferne Zukunft).

Tabelle 3-1: Änderungssignal der mittleren jährlichen Lufttemperatur t_diff (in Kelvin) sowie tatsächliche Temperatur t_abs (in Grad Celsius) im Gebiet Wuppertal für die Emissionsszenarien RCP2.6,

[2] Temperaturdifferenzen werden in der Meteorologie meist mit Kelvin bezeichnet. Eine Temperaturdifferenz von 1 Kelvin entspricht einer Temperaturdifferenz von einem Grad Celsius.

RCP 4.5 und RCP 8.5, die nahe Zukunft (2031-2060) und die ferne Zukunft (2071-2100) als Spannweite zwischen dem 15. und dem 85. Perzentil, jeweils bezogen auf die Referenzperiode 1971 bis 2000

Temperatur										
	Jahr		**Winter**		**Frühling**		**Sommer**		**Herbst**	
HYRAS 1971-2000	9,4		2,4		8,9		16,7		9,5	
2031-2060	**t_diff**	**t_abs**	**t_diff**	**t_abs**	**t_diff**	**t_abs**	**t_diff**	**t_abs**	**t_diff**	**t_abs**
Lauf: tas_y_31_rcp26_15	0,7	10,1	0,9	3,3	0,4	9,3	0,5	17,2	0,9	10,4
Lauf: tas_y_31_rcp26_85	1,5	10,9	1,3	3,7	1,2	10	1,5	18,2	2	11,5
Lauf: tas_y_31_rcp45_15	0,8	10,2	0,8	3,2	0,5	9,3	0,9	17,6	0,8	10,4
Lauf: tas_y_31_rcp45_85	1,9	11,3	1,9	4,3	1,5	10,3	1,6	18,3	2	11,6
Lauf: tas_y_31_rcp85_15	1,3	10,7	1,1	3,5	1	9,8	1,4	18,1	1,4	11
Lauf: tas_y_31_rcp85_85	**2,1**	11,5	2,5	4,9	1,7	10,5	2,2	18,9	2,6	12,1
	Jahr		**Winter**		**Frühling**		**Sommer**		**Herbst**	
HYRAS 1971-2000	9,4		2,3		8,8		16,7		9,5	
2071-2099	diff	abs	t_diff	t_abs	t_diff	t_abs	t_diff	t_abs	t_diff	t_abs
Lauf: tas_y_71_rcp26_15	0,8	10,2	1	3,3	0,6	9,4	0,9	17,6	0,6	10,1
Lauf: tas_y_71_rcp26_85	1,6	11	1,5	3,9	1,2	10	1,7	18,4	2	11,5
Lauf: tas_y_71_rcp45_15	1,3	10,7	1,5	3,9	0,9	9,7	1,4	18,1	1,6	11,2
Lauf: tas_y_71_rcp45_85	2,7	12,1	2,5	4,9	2	10,8	2,5	19,2	3,3	12,9
Lauf: tas_y_71_rcp85_15	2,7	12,1	3	5,4	2,1	10,9	3	19,7	3	12,5
Lauf: tas_y_71_rcp85_85	**4,4**	13,8	4,3	6,7	3,2	12	4,7	21,4	5,4	15

Zusätzlich zu den Jahresmitteltemperaturen enthält Tabelle 3-1 auch die mittleren Temperaturänderungen für die vier meteorologischen Jahreszeiten. Der Frühling besteht aus den drei Kalendermonaten März, April und Mai, usw. Die geringste Erwärmung wird für den Frühling erwartet (0,4 bis 3,2 Kelvin), die höchste für den Herbst (0,9 bis 5,4 Kelvin).

Tabelle 3-1 enthält zu den Änderungssignalen t_diff (in Kelvin) zusätzlich die tatsächliche Temperatur (in Grad Celsius) als Summe aus dem Referenzwert 1971-2000 (HYRAS-Datensatz) und dem Änderungssignal t_diff. Die Jahresmitteltemperatur für die nahe Zukunft bewegt sich demzufolge (für die unterschiedlichen Emissionsszenarien) zwischen 10,1 und 11,5, für die ferne Zukunft zwischen 10,2 und 13,8 Grad Celsius.

Eine Reduktion der Treibhausgase, die zu einem Emissionspfad entsprechend dem Emissionsszenario RCP 2.6 führt (siehe Abbildung 3-1), lässt für die Jahresmitteltemperatur (und die Jahreszeiten) einen deutlich geringeren Anstieg erwarten als bei dem „weiter-wie-bisher“-Szenario (RCP 8.5), besonders zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft): Der erwartete Anstieg der Jahresmitteltemperatur (gegenüber der Referenzperiode 1971-2000) reduziert sich von der Spanne 2,7 bis 4,4 Kelvin (RCP8.5) auf die Spanne 0,8 bis 1,6 Kelvin (RCP 2.6). Ähnliches gilt auch z.B. für den Herbst: die zu erwartende Spanne 3,0 bis 5,4 Kelvin (RCP 8.5) verringert sich auf die Spanne 0,6 bis 2,0 Kelvin (siehe Tabelle 3-1).

Für eine Abschätzung der Zunahme der Wärmebelastung – und somit der Gesundheitsgefährdung für die Menschen - ist die mittlere jährliche Lufttemperatur keine brauchbare Größe. Häufig werden hierfür Energiebilanzmodelle des Menschen verwendet, die über Größen wie die „Gefühlte Temperatur“ oder Hitzewarntage (siehe Kapitel 2.8) eine Bewertung der Wärmebelastung erlauben (siehe auch www.dwd.de -> Wetterlexikon). Hier soll, da o.g. Größen derzeit in Kombination mit den Klimaprojektionsdaten noch nicht zur Verfügung stehen – die Zunahme der Wärmebelastung durch die Anzahl der Sommertage (Anzahl der Tage mit mindestens 25 Grad C), die Anzahl „Heißer Tage“ (mindestens 30 Grad C) und die Anzahl der „Tropennächte“ (minimale Lufttemperatur nachts zwischen 18 und 6 Uhr mindestens 20 °C) abgeschätzt werden.

Für die nahe Zukunft (2031 bis 2060) zeigen die betrachteten Emissionsszenarien (RCP 2.6, 4.5, RCP 8.5) eine mittlere Zunahme der Anzahl der Sommertage (im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000) von etwa 4 bis 17 Tagen (Tabelle 3-2). Bis Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) könnte die Anzahl der Sommertage um bis knapp 50 Tage (Spanne von 5 bis 49 Tage) zunehmen (siehe Tabelle 3-2). Bezogen auf den Referenzlauf (1971 bis 2000) mit 25,7 Sommertagen bedeutet dies, dass es bereits in der nahen Zukunft mit bis zu 43 Sommertagen zu einer deutlichen Zunahme von Sommertagen kommen kann (+70 %), für die ferne Zukunft kann es mit bis zu 74 Sommertagen bis zu einer Verdreifachung der Sommertage kommen.

Tabelle 3-2: Änderungssignal (_diff) und tatsächliche Anzahl (_abs) von Kenntagen (pro Jahr): Sommertag sd (mindestens 25 Grad C), heißer Tagen (hd, mindestens 30 Grad C), Tropennacht (tn), Frosttag (fd) und Eistag (iD) im Gebiet Wuppertal für die Emissionsszenarien RCP 2.6, 4.5 und 8.5, für die nahe Zukunft (2031-2060) und die ferne Zukunft (2071-2100) als Spannweite zwischen dem 15. und 85. Perzentil, jeweils bezogen auf die HYRAS-Referenzperiode 1971 bis 2000

	Sommertage		**heiße Tage**		**Tropennächte**		**Frosttage**		**Eistage**	
HYRAS 1971-2000	25,7		4,2		0,2		59,5		11,6	
2031-2060	sd_diff	sd_abs	hd_diff	hd_abs	tn_diff	tn_abs	fd_diff	fd_abs	id_diff	id_abs
31_rcp26_85	4,1	29,8	1,5	5,7	0,1	0,3	-22,7	36,8	-5,8	5,8
31_rcp26_85	13	38,7	5,4	9,6	1,9	2	-13,9	45,5	-3,5	8,1
31_rcp45_15	5,3	31	2,9	7,1	1,1	1,2	-29,6	29,9	-8,6	3
31_rcp45_85	18,2	43,9	8,6	12,7	2,5	2,6	-12,3	47,2	-3,1	8,5
31_rcp85_15	10,9	36,6	4,2	8,4	1,7	1,8	-30,9	28,6	-9,2	2,4
31_rcp85_85	17,3	42,9	9,4	13,6	3,9	4	-18,1	41,4	-4,7	6,9
2071-2099	**Sommertage**		**heiße Tage**		**Tropennächte**		**Frosttage**		**Eistage**	
HYRAS 1971-2000	25,7		4,2		0,1		59,5		11,6	
Lauf	sd_diff	sd_abs	hd_diff	hd_abs	tn_diff	tn_abs	fd_diff	fd_abs	id_diff	id_abs
71_rcp26_15	5,4	31,1	2,2	6,4	0,8	0,9	-22,7	36,8	-7,2	4,4
71_rcp26_85	13	38,7	7,2	11,3	2,4	2,5	-11,6	47,9	-4,3	7,3
71_rcp45_15	12,1	37,7	5,3	9,5	1,5	1,7	-38,6	20,9	-9,7	1,9
71_rcp45_85	21,7	47,4	11,9	16	5,6	5,7	-16,3	43,1	-4,7	6,9
71_rcp85_15	25,9	51,6	11,7	15,9	8,1	8,2	-50,6	8,9	-11,5	0,1
71_rcp85_85	48,5	74,2	22,9	27,1	18,2	18,3	-35,1	24,4	-8,7	2,9

Auch die Heißen Tage (Tage mit mindestens 30 Grad C) zeigen in allen betrachteten Szenarien eine deutliche Zunahme (bezogen auf den Referenzlauf 1971-2000, siehe Tabelle 3-1). Wie bei den Sommertagen zeigen die Berechnungen, dass die Zunahme an Heißen Tagen für die ferne Zukunft beim Emissionsszenario Klimaschutz (RCP 2.6) mit +2,2 bis +7,2 Tagen deutlich geringer erwartet wird als im Emissionsszenario RCP 8.5 (+ 11,7 bis + 22,9 Tage).

Eine Tropennacht ist eine Nacht, in der das Minimum der Lufttemperatur ≥ 20 °C beträgt (täglicher Messzeitraum: 18 UTC bis 06 UTC). Tropennächte treten häufig in Zusammenhang mit Hitzewellen auf: Während tagsüber hohe Temperaturen herrschen, kühlt die Temperatur nachts (insbesondere in dicht bebauten Gebieten) nur wenig ab. Dies erhöht die Wärmebelastung für die Stadtbewohner. Somit ist eine Zunahme der Anzahl der Tropennächte, ebenso wie die der Sommertage / Heißen Tage ein Hinweis auf eine Zunahme der Wärmebelastung für die Stadtbewohner.

Für alle betrachteten Szenarien nimmt die Anzahl der Tropennächte zu (bezogen auf den Referenzlauf 1971-2000, siehe Tabelle 3-1). Für die nahe Zukunft werden zwischen 0,1 und 3,9 zusätzliche Tropennächte erwartet, für die ferne Zukunft liegt die Zunahme zwischen 0,8 und +18 Tagen (pro Jahr), bei bisher weniger als einem Tag pro Jahr (HYRAS-Datensatz 1971-2000)

Wie aufgrund der Zunahme der Temperatur zu erwarten, nehmen sowohl die Frosttage (Minimumtemperatur unter Null Grad) als auch die Eistage (Tagesmaximum unter Null Grad) für alle betrachteten Szenarien ab (Tabelle 3_1). Für die ferne Zukunft und das Emissionsszenario rcp8.5 kann dies bedeuten, dass es bis Ende des Jahrhunderts nur noch 9 Frosttage geben wird (bei ca. 60 Tagen im HYRAS-Referenzdatensatz 1971-2000) und Jahre auftreten werden, die keinen Eistag aufweisen.

Zusammenfassung

Im Zuge des fortschreitenden Klimawandels werden die Jahresmitteltemperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts weiter ansteigen. Auch die gesundheitsgefährdende Wärmebelastung – hier durch die Kennzahlen Sommertage, Heiße Tage und Tropennächte beschrieben – wird weiter zunehmen. Wenn rasche und umfassende Klimaschutzmaßnahmen (regional wie erdenweit) durchgeführt werden, die einen Pfad zum Szenario RCP 2.6 eröffnen (siehe Abbildung 3-1), so erscheint es möglich, die Temperaturzunahme (zum Referenzlauf 1971 bis 2000) in Wuppertal zum Ende des Jahrhunderts von maximal zu erwartenden über 4 Kelvin (Szenario rcp8.5) auf etwa 2 Kelvin zu beschränken. Damit wäre man aber noch weit vom Ziel des Paris-Abkommens entfernt, da eine Zunahme um 2 Grad gegenüber 1971 bis 2000 eine Zunahme von etwa 2,7 Grad seit vorindustriellem Niveau (1850 bis 1900) bedeutet.

Dass Klimaschutzmaßnahmen regional und weltweit wichtig sind, zeigt Tabelle 3-1: Wenn die Treibhausgasemissionen soweit zurückgehen, dass das RCP 2.6-Szenario eingehalten werden kann (siehe Abbildung 3-1), dürfte die Zunahme der Zahl der Sommertage (und somit die Wärmebelastung für die Bewohner) bis Ende des Jahrhunderts mit 5 bis 13 Sommertagen deutlich geringer ausfallen als im RCP 8.5-Szenario mit 26 bis 49 Tagen.

3.2 Niederschlag

Die Niederschlagsänderungen (in Prozent) für das Gebiet von Wuppertal werden für die Zeitscheiben nahe und ferne Zukunft sowie die Emissionsszenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Tabelle 3-3: Änderungssignal des Niederschlags (_diff, in Prozent) sowie tatsächlicher Niederschlag _abs im Gebiet von Wuppertal für die Emissionsszenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5, für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100), dargestellt als Spannweite zwischen dem 15. und dem 85. Perzentil, jeweils bezogen auf die Referenzperiode 1971 bis 2000

Niederschlag										
Änderungen (_diff) in %	**Jahr**		**Winter**		**Frühling**		**Sommer**		**Herbst**	
HYRAS 1971-2000	1099,8		298,8		243,7		273,4		283,8	
2031-2060	**pr_diff**	**pr_abs**	**pr_diff**	**pr_abs**	**pr_diff**	**pr_abs**	**pr_diff**	**pr_abs**	**pr_diff**	**pr_abs**
Lauf: pr_31_rcp26_15	-3,8	1058,0	-1	295,8	-1,8	239,3	-15,5	231,0	-7,1	263,7
Lauf: pr_31_rcp26_85	7,1	1177,9	14,4	341,8	13,8	277,3	7,4	293,6	6,4	302,0
Lauf: pr_31_rcp45_15	-0,1	1098,7	1,6	303,6	5	255,9	-15,3	231,6	-6,7	264,8
Lauf: pr_31_rcp45_85	7,9	1186,7	10,5	330,2	13,4	276,4	6,5	291,2	19	337,7
Lauf: pr_31_rcp85_15	-1,4	1084,4	-0,7	296,7	1,6	247,6	-15,7	230,5	-8,6	259,4
Lauf: pr_31_rcp85_85	**6,8**	1174,6	20,4	359,8	12,9	275,1	4,6	286,0	9,4	310,5
	Jahr		**Winter**		**Frühling**		**Sommer**		**Herbst**	
HYRAS 1971-2000	1099,8		298,8		243,7		273,4		283,8	
2071-2099	t_diff	t_abs	pr_diff	pr_abs	pr_diff	pr_abs	pr_diff	pr_abs	pr_diff	pr_abs
Lauf: pr_71_rcp26_15	-5,3	1041,5	-7,9	275,2	-5,7	229,8	-12,5	239,2	-8,1	260,8
Lauf: pr_71_rcp26_85	4,9	1153,7	11	331,7	13,3	276,1	5,4	288,2	7,3	304,5
Lauf: pr_71_rcp45_15	0,9	1109,7	2,5	306,3	10,2	268,6	-13,7	235,9	-7,4	262,8
Lauf: pr_71_rcp45_85	11,3	1224,1	13,8	340,0	19,7	291,7	8,9	297,7	13,4	321,8
Lauf: pr_71_rcp85_15	-3,3	1063,5	4,3	311,6	0,2	244,2	-23,1	210,2	-11,6	250,9
Lauf: pr_71_rcp85_85	**11,4**	1225,2	24,2	371,1	21,6	296,3	-1,2	270,1	13,5	322,1

Für alle betrachteten Szenarien (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5) und sowohl für die nahe als auch die ferne Zukunft werden bis auf einen Fall sowohl Zunahmen als auch Abnahmen für den Jahresniederschlag berechnet. Die Spannweite reicht von einer Abnahme von 5,2 % bis zu einer Zunahme von 11,4 %. Lediglich für das Szenario 4.5 und die ferne Zukunft zeigen alle Ensemblemitglieder eine Zunahme der Jahresniederschläge (0,9 bis 11,3 %).

Für die **nahe Zukunft** (2031 bis 2060) lassen die Projektionen für den Jahresniederschlag bei den betrachteten Emissionsszenarien eine leichte Abnahme (-3,8 %) bis zu einer Zunahme von etwa 8 Prozent des mittleren Jahresniederschlags erwarten. Für den Sommer (Juni, Juli, August) ist keine klare Tendenz zu erkennen, es überwiegen aber Simulationen mit einer Abnahme der Sommerniederschläge. Für den Winterniederschlag (Dezember, Januar, Februar) zeigt die überwiegende Anzahl der Projektionsrechnungen einen Anstieg der Winterniederschläge um bis zu 20 Prozent (RCP 8.5).

Die Aussagen für die **ferne Zukunft** (2071 bis 2100) sind etwas klarer. Ohne das – derzeit eher unwahrscheinliche Emissionsszenario RCP 2.6 – können Zunahmen des Jahresniederschlags von bis zu 11 % erwartet werden. Speziell das Szenario RCP 8.5 zeigt deutliche Abnahmen der Sommerniederschläge (-23,1 bis -1,2 %), während für den Winter Zunahmen der Niederschläge um bis zu 14 % (RCP 4.5) und 24 % (RCP 8.5) zu erwarten sind.

Für Städte sind – auch hinsichtlich erforderlicher Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel – Starkniederschläge relevanter als mittlere Niederschlagssummen: Wird es zukünftig häufiger zu Starkniederschlagsereignissen mit gravierenden Folgen für die Menschen und die städtische Infrastruktur kommen?

Die Beantwortung dieser Frage ist derzeit Gegenstand von Wissenschaft und Forschung. Zur besseren Erfassung konvektiver Ereignisse (Gewitter, Starkregenereignisse) ist zukünftig eine höhere Modellauflösung der Klimamodelle erforderlich (sog. konvektionserlaubende Modelle).

Einen ersten Hinweis darauf, ob die derzeitigen Klimaprojektionen eine Zunahme von Starkregenereignissen zeigen, bietet die Auszählung der Anzahl der Tage mit Schwellenwerten des Niederschlags, hier mit dem Schwellenwert 20 mm pro Tag (siehe Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Änderung der mittleren Anzahl der Tage mit Niederschlagsmengen von mindestens 20 mm (r20mm_rel) pro Jahr sowie der tatsächlichen Niederschläge (r20mm_abs) im Gebiet von Wuppertal für die Emissionsszenarien RCP2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5, die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100) für das 85. Perzentil (bezogen auf die Referenzperiode 1971 bis 2000)

Angaben in Tagen pro Jahr	**r20mm**	
HYRAS 1971-2000	8,3	
2031-2060	r20mm_diff	r20mm_abs
31_rcp26_85	0	8,3
31_rcp26_85	1,3	9,7
31_rcp45_15	0,1	8,4
31_rcp45_85	1,7	10,1
31_rcp85_15	0,2	8,6
31_rcp85_85	2,2	10,6
	r20mm	
HYRAS 1971-2000	8,3	
2071-2099	r20mm_diff	r20mm_abs
71_rcp26_15	-0,1	8,2
71_rcp26_85	1,1	9,4
71_rcp45_15	0,1	8,5
71_rcp45_85	2,6	11
71_rcp85_15	1,1	9,5
71_rcp85_85	3,7	12

Bei der Anzahl der Tage mit mindestens 20 mm pro Tag wird für die nahe Zukunft (2031-2060) eine maximale Zunahme von 2,2 Tagen (pro Jahr), für die ferne Zukunft (2071-2099) eine Zunahme von bis zu knapp 4 Tagen (RCP 8.5, 85. Perzentil) erwartet, was bezogen auf den Referenzzeitraum (8,3 Tage) eine Zunahme von ca. 45 % bedeutet.

Diese Auswertungen, die keine Extremwertstatistiken darstellen, legen die Vermutung nahe, dass in Wuppertal zukünftig häufiger mit Starkregenereignissen zu rechnen ist. Dieser Trend wird durch indirekte Untersuchungsmethoden (z.B. Auszählung von Wetterlagen, die für Starkregenereignisse typisch sind) – in anderen Bereichen Deutschlands – gestützt [Hänsel et al., 2015].

Die Betrachtungen zur Entwicklung zu den Starkniederschlägen weisen eine hohe Unsicherheit auf, nicht zuletzt durch die zu grobe räumliche Auflösung der derzeitigen Klimamodelle. Dies bedeutet, dass konvektive Ereignisse (Gewitter) nicht direkt modelliert, sondern nur parametrisiert in die Modellrechnungen eingehen.

Zusammenfassung

Die Aussagen aus den Klimaprojektionsrechnungen zum Niederschlag sind mit mehr Unsicherheiten behaftet als die Aussagen zu den Temperaturänderungen. Die Klimaprojektionen für Wuppertal zeigen einen Anstieg der Niederschlagsmengen für das Jahr und den Winter, während sie für die mittleren Sommerniederschläge, insbesondere in der fernen Zukunft, eine deutliche Abnahme erwarten lassen. Ob und in welcher Größenordnung (sommerliche) Starkregenereignisse zunehmen werden, lässt sich nach derzeitigem Stand der Wissenschaft noch nicht abschließend beantworten, auch wenn eine Zunahme solcher Ereignisse plausibel erscheint.

4 Literatur

IPCC, 2014: Climate Change 2014, Synthesis Report Summary for Policymakers (Synthesebericht des 5. Sachstandsbericht): https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf (zuletzt aufgerufen: 27.12.2019)

IPCC, 2018: IPCC Special Report Global Warming of 1.5 ºC; Summary for Policymakers. https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf (zuletzt aufgerufen am 27.12.2019)

Hänsel, Stephanie; Schucknecht, Anne; Böttcher, Falk; Bernhofer, Christian; Matschullat, Jörg, 2015: Niederschlagsveränderungen in Sachsen von 1901 bis 2100: Starkniederschlags- und Trockenheitstrends. Berichte des DWD Nr. 246

LANUV, 2013: Klimawandelgerechte Metropole Köln. Abschlussbericht. LANUV-Fachbericht Nr. 50

Nationaler Klimareport, 2016: Nationaler Klimareport 2016, Klima – Gestern, heute und in der Zukunft. Deutscher Wetterdienst

Rauthe M, Steiner H, Riediger U, Mazurkiewicz A, Gratzki A (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). Met Z, 22(3), 235-256, doi:10.1127/0941-2048/2013/0436.

Roeckner E (2003): Allgemeine Zirkulationsmodelle, Atmosphäre. In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), Numerische Klimamodelle – Was können sie, wo müssen sie verbessert werden? Teil II: Modellierung natürlicher Klimaschwankungen, Promet, 29, 6-14.

Umweltbericht NRW, 2016: Umweltbericht Nordrhein-Westfalen 2016, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen