Klimawandel-Betroffenheit der Stadt Wuppertal
Themenfeld “Hitze in der Stadt“

Endbericht

Januar 2019

K.PLAN Klima.Umwelt&Planung GmbH

Dr. Monika Steinrücke
Denis Ahlemann
Steffen Schrödter

Steinring 55, 44789 Bochum
info@stadtklima.ruhr / www.k.plan.ruhr

Januar 2019

Inhalt

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis ii

0. Einleitung 1

1. Herangehensweise 2

2. Gesamtstädtische Analyse zur Hitze-Betroffenheit 10

2.1 Zusammenstellung der Grundlageninformationen zum Klima in Wuppertal auf einer digitalen Datenbasis 11

2.2 Kaltluftsimulation für das gesamte Stadtgebiet von Wuppertal 18

2.3 Verteilung der Klimatope im Wuppertaler Stadtgebiet im IST-Zustand und im Zukunftsszenario 2050 27

2.4 Verteilung der aktuellen und zukünftigen Hitzebelastungen im Stadtgebiet von Wuppertal 37

2.5 Verringerung der Hitzebelastung durch Umsetzung von Maßnahmenbündeln im Zukunftsszenario 40

2.6 Die Hitzebetroffenheit im Stadtgebiet von Wuppertal 54

3. Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Klimafolgenanpassung mit Handlungsempfehlungen und Maßnahmen zum Thema Hitze in der Stadt 60

3.1 Die „Handlungskarte Klimaanpassung – Themenfeld Hitze“ für die Stadt Wuppertal 69

3.2 Katalog der Klimaanpassungsmaßnahmen - Themenfeld Hitze 81

4. Mikroklimatische Untersuchungen des städtischen Quartiers Arrenberg 139

4.1 Der lokalklimatische Ist-Zustand im Quartier Arrenberg 139

4.2 Arrenberg - Szenario 1 mit Baumaßnahmen 149

4.3 Arrenberg - Szenario 2 mit verschiedenen Anpassungsmaßnahmen 153

5. Analysen zur Klimawandelbetroffenheit – Themenfeld “Starkwind und Sturm“ 162

5.1 Starkwind- und Sturmgefährdung im Stadtgebiet von Wuppertal 163

5.2 Betroffenheitsanalyse für das Themenfeld Starkwind und Sturm 168

6. Literaturverzeichnis 175

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Maximale Temperaturunterschiede zwischen Stadtzentrum und Umland in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl für Städte in NRW (Messdaten des RVR und der Abt. Klimatologie und Landschaftsökologie, Universität Duisburg-Essen)	1
Abb. 1.2	Bausteine der Analyse zur Klimawandelbetroffenheit der Stadt Wuppertal	2
Abb. 1.3	Einflussfaktoren auf die Verteilung der Hitzebelastungen im Stadtgebiet von Wuppertal	3
Abb. 1.4	Zunahme von Mittelwert und Streuung der Lufttemperaturen im zukünftigen Klima	4
Abb. 1.5	Abgrenzung von Gebieten der klimatischen Belastung des Menschen im Stadtgebiet von Wuppertal	5
Abb. 1.6	Die Handlungskarte Klimaanpassung als „Filter“ für kommunale Planungen	6
Abb. 1.7	Beispielhafte Maßnahmen und deren Wirkungen auf den drei Raumebenen	8
Abb. 2.1	Realnutzungskarte der Stadt Wuppertal	12
Abb. 2.2	Station 1: Temporäre Lufttemperaturmessungen (2 m Höhe) im Sommer 2018 in Wuppertal-Ronsdorf, Friedrichshöhe (Foto: K.PLAN, google.de)	13
Abb. 2.3	Station 2: Temporäre Lufttemperaturmessungen (2 m Höhe) im Sommer 2018 in Wuppertal-Elberfeld, Platz am Kolk (Foto: K.PLAN, google.de)	13
Abb. 2.4	Station 3: Temporäre Lufttemperaturmessungen (2 m Höhe) im Sommer 2018 in Wuppertal-Uellendahl, Untenrohleder (Foto: K.PLAN, google.de)	13
Abb. 2.5	Ergebnisse der Sonder-Lufttemperaturmessungen an drei Standorten in Wuppertal für den Zeitraum 10.07. – 07.08.2018	14
Abb. 2.6	Mittlerer Tagesgang der Lufttemperaturen an drei Standorten in Wuppertal für den Zeitraum 10.07. – 07.08.2018	15
Abb. 2.7	Lufttemperaturverteilungskarte der Stadt Wuppertal (relative nächtliche Lufttemperaturen in 2 m Höhe bei Strahlungswetterlagen)	16
Abb. 2.8	Karte der Oberflächentemperaturen für das Wuppertaler Stadtgebiet (Oberflächentemperaturen der Nachtsituation, Thermalscannerbefliegung vom 28.06.1986)	17
Abb. 2.9	Geländehöhen im Untersuchungsgebiet Wuppertal für die Kaltluftsimulations-Eingabedatei	19
Abb. 2.10	Landnutzungen im Untersuchungsgebiet Wuppertal für die Kaltluftsimulations-Eingabedatei	20
Abb. 2.11	Karte der Kaltluftverteilung nach 2 Stunden Simulationszeit (Ergebnisse der KLAM_21 – Modellrechnungen)	21
Abb. 2.12	Karte der Kaltluftverteilung nach 4 Stunden Simulationszeit (Ergebnisse der KLAM_21 – Modellrechnungen)	22
Abb. 2.13	Karte der Kaltluftverteilung nach 8 Stunden Simulationszeit (Ergebnisse der KLAM_21 – Modellrechnungen)	24/25
Abb. 2.14	Ablauf zur Berechnung der Klimatope im Stadtgebiet von Wuppertal	28
Abb. 2.15	Klimatopkarte der Stadt Wuppertal im IST-Zustand	29
Abb. 2.16	Klimawandel: Anstieg der Anzahl heißer Tage bis zum Jahr 2100 (Quelle: PIK, www.klimafolgenonline.com)	33
Abb. 2.17	Zunahme heißer Tage im Zukunftsszenario 2050 in der Region um Wuppertal (Quelle: PIK, www.klimafolgenonline.com)	34
Abb. 2.18	Zunahme von Mittelwert und Streuung der Lufttemperaturen im zukünftigen Klima	34
Abb. 2.19	Zur Neuberechnung der Zukunfts-Klimatopkarte herangezogenen Flächenentwicklungen aus dem Stadtentwicklungskonzept der Stadt Wuppertal	35
Abb. 2.20	Klimatopkarte der Stadt Wuppertal im Zukunftsszenario 2050	36
Abb. 2.21	Karte der aktuellen und zukünftigen Hitzebelastungen der Stadt Wuppertal	38/39

Abb. 2.22	Bereiche der Umsetzung des Maßnahmenbündels 1 zur Hitzereduktion in der Zukunft: Verbesserung des Kaltluftzuflusses	41
Abb. 2.23	Bereiche der Umsetzung des Maßnahmenbündels 2 zur Hitzereduktion in der Zukunft: Durchgrünung von Wohngebieten auf den Nordhöhen	42
Abb. 2.24	Bereiche der Umsetzung eines Maßnahmenbündels zur Hitzereduktion in der Zukunft: Durchgrünung von Wohngebieten im südöstlichen Stadtgebiet	43
Abb. 2.25	Bereiche der Umsetzung eines Maßnahmenbündels zur Hitzereduktion in der Zukunft: Durchgrünung und Teilentsiegelung von Gewerbe- und Industrieflächen	44
Abb. 2.26	Karte der Veränderungen der Hitzebelastung im Zukunftsszenario durch Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen	45
Abb. 2.27	Luftbild des Untersuchungsgebietes „Elberfeld City“	46
Abb. 2.28	Begrünung im Modellgebiet „Elberfeld City“ im IST-Zustand	47
Abb. 2.29	Oberflächentemperaturen um 0:00 Uhr im Modellgebiet „Elberfeld City“ im IST-Zustand	48
Abb. 2.30	IR-Aufnahmen der Oberflächentemperaturen um 20 Uhr, Untersuchungsgebiet „Elberfeld City“	49
Abb. 2.31	Virtuelles Luftbild des Untersuchungsgebietes „Elberfeld City“ nach Maßnahmenumsetzung	50
Abb. 2.32	Begrünung im Modellgebiet „Elberfeld City“ im Anpassungs-Szenario	51
Abb. 2.33	Differenzen der Oberflächentemperaturen um 23:00 Uhr im Modellgebiet „Elberfeld City“ im Anpassungs-Szenario	52
Abb. 2.34	Differenzen der Lufttemperaturen um 23:00 Uhr im Modellgebiet „Elberfeld City“ im Anpassungs-Szenario	52
Abb. 2.35	Karte der Hitzebetroffenheit der Stadt Wuppertal	56/57
Abb. 3.1	Bausteine der Analyse zur Klimawandelbetroffenheit der Stadt Wuppertal	60
Abb. 3.2	Die Handlungskarte Klimaanpassung als „Filter“ für kommunale Planungen	61
Abb. 3.3	Controllingkonzept für die Integration von Klimaanpassungsmaßnahmen in Planungsprozesse der Stadt Wuppertal	68
Abb. 3.4	Handlungskarte Klimaanpassung – Themenfeld Hitze für die Stadt Wuppertal	70/71
Abb. 4.1	Gebäude- und Vegetationsstruktur im Modellgebiet Arrenberg im IST-Zustand	140
Abb. 4.2	Ausschnitt aus der Karte der Kaltluftverteilung nach 8 Stunden Simulationszeit	141
Abb. 4.3	Modellierte Oberflächentemperaturen um 15 Uhr im Modellgebiet Arrenberg im IST-Zustand	142
Abb. 4.4	Modellierte PMV-Werte um 15 Uhr im Modellgebiet Arrenberg im IST-Zustand	144
Abb. 4.5	Modellierte Windverteilung in 10 m über Grund um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg im IST-Zustand, Anströmung aus Nordost	145
Abb. 4.6	Modellierte Schwachwindverteilung in 10 m über Grund um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg im IST-Zustand, Anströmung aus Nordost	146
Abb. 4.7	Modellierte Schwachwindverteilung in 10 m über Grund um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg im IST-Zustand, Anströmung aus Süd	146
Abb. 4.8	Modellierte Lufttemperaturen in 2 m über Grund um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg im IST-Zustand, Anströmung aus Nordost	147
Abb. 4.9	Modellierte Lufttemperaturen in 2 m über Grund um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg im IST-Zustand, Anströmung aus Süd	148
Abb. 4.10	Gebäude- und Vegetationsstruktur im Modellgebiet Arrenberg im Szenario 1	149

Abb. 4.11	Differenzen der Windgeschwindigkeiten in 10 m über Grund um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg, Szenario 1 minus IST-Situation, Anströmung aus Nordost	150
Abb. 4.12	Differenzen der Windgeschwindigkeiten in 10 m über Grund um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg, Szenario 1 minus IST-Situation, Anströmung aus Süd	151
Abb. 4.13	Differenzen der Lufttemperaturen in 2 m über Grund um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg, Szenario 1 minus IST-Situation, Anströmung aus Süd	152
Abb. 4.14	Gebäude- und Vegetationsstruktur sowie Bereiche der Maßnahmenumsetzung im Modellgebiet Arrenberg im Szenario 2	153
Abb. 4.15	Detailausschnitt aus dem Modellgebiet Arrenberg im Szenario 2, Bereich Gutenbergstraße oben: IST-Zustand, unten: mit Maßnahmenumsetzungen	154
Abb. 4.16	Detailausschnitt aus dem Modellgebiet Arrenberg im Szenario 2, Bereich Alsenstraße links: IST-Zustand, rechts: mit Maßnahmenumsetzungen	155
Abb. 4.17	Detailausschnitt aus dem Modellgebiet Arrenberg im Szenario 2, Bereich Alsenstraße oben: IST-Zustand, unten: mit Maßnahmenumsetzungen	156
Abb. 4.18	Differenzen der Oberflächentemperaturen um 15 Uhr im Modellgebiet Arrenberg, Szenario 2 minus IST-Situation, Anströmung aus Nordost	157
Abb. 4.19	Differenzen der bioklimatischen PMV-Werte um 15 Uhr im Modellgebiet Arrenberg, Szenario 2 minus IST-Situation, Anströmung aus Nordost	158
Abb. 4.20	Differenzen der Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg, Szenario 2 minus IST-Situation, Anströmung aus Süd	159
Abb. 4.21a	Differenzen der Lufttemperaturen in 2 m Höhe um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg, Teil Gutenbergplatz, Szenario 2 minus IST-Situation, Anströmung aus Nordost	160
Abb. 4.21b	Differenzen der Lufttemperaturen in 2 m Höhe um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg, Teil Steinbecker Meile/Spichernstraße, Szenario 2 minus IST-Situation, Anströmung aus Nordost	160
Abb. 4.22	Differenzen der Lufttemperaturen in 2 m Höhe um 0 Uhr im Modellgebiet Arrenberg, Szenario 2 minus IST-Situation, Anströmung aus Süd	161
Abb. 5.1	Starkwindgefährdungskarte für die Stadt Wuppertal	166/167
Abb. 5.2	Karte der Starkwindanfälligkeit für die Stadt Wuppertal	170/171
Abb. 5.3	Karte der Starkwindbetroffenheit für die Stadt Wuppertal	172/173

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Möglichkeiten zur Klimaanpassung im Quartier (positive Beispiele)	53
Tab. 2.2	Gebiete mit einer Hitzebelastung im Stadtgebiet von Wuppertal	58/59
Tab. 4.1	Meteorologische Startparameter für die ENVI-met Modellrechnungen	141
Tab. 4.2	Werteskala der PMV-Feineinteilung	143
Tab. 5.1	Indikatoren für eine Starkwindgefährdung im Stadtgebiet von Wuppertal	164/165
Tab. 5.2	Indikatoren für eine Starkwindanfälligkeit im Stadtgebiet von Wuppertal	168/169

0. Einleitung

Während der Klimaschutz seit vielen Jahren fester Bestandteil der Kommunalpolitik in Nordrhein-Westfalen ist und zahlreiche Städte und Gemeinden eigene Klimaschutzziele und Klimaschutzstrategien haben, beginnt man auf der kommunalen Ebene in den letzten Jahren damit, sich auf die nicht mehr abwendbaren Folgen des Klimawandels einzustellen. Anpassung an den Klimawandel wird zu einem Schwerpunktthema, das in den nächsten Jahren in Wuppertal bearbeitet wird. Die hier vorliegende Analyse bildet eine Arbeitsgrundlage dafür. Die den Lebensalltag beeinflussenden Veränderungen des Klimas gehen mit erheblichen Belastungen und Risiken einher. Dort, wo Menschen eng zusammenleben und eine funktionierende Infrastruktur sehr wichtig ist, steigt die Anfälligkeit für Störungen durch Wetterereignisse, die Risiken und Gefährdungen sind dort besonders ausgeprägt. Daher kommen insbesondere in den Städten der vorsorgenden Planung und der Durchführung von präventiven Maßnahmen eine große Bedeutung zu. Insgesamt ist die Stadt Wuppertal aufgrund ihrer Rahmenbedingungen gut aufgestellt, um zukünftig die zu erwartenden negativen Folgen des Klimawandels in ihren Wirkungen durch geeignete Maßnahmen abmildern zu können. Auch wenn die genauen Zahlen des Klimawandels und deren Folgen für die Stadt Wuppertal unsicher sind, gilt, dass es zu viel Anpassung nicht gibt. Anpassung an das Klima und dessen Wandel ist immer auch mit einer Steigerung der Umwelt- und Lebensqualität verbunden und deshalb niemals überflüssig.

Jeder Mensch, die arbeitende Bevölkerung, aber insbesondere ältere Menschen, die aufgrund des demographischen Wandels bald einen großen Teil der Gesamtbevölkerung ausmachen werden, sowie Säuglinge, Kleinkinder und Kranke leiden verstärkt unter langen Hitzeperioden oder größeren Temperaturschwankungen. In städtischen Gebieten mit hoher Bevölkerungs- und Bebauungsdichte liegen die durchschnittlichen Temperaturen bereits heute höher als im unbebauten Umland (Abb. 1.1). Hier wird man in Zukunft damit rechnen müssen, stärker als andere Gebiete von Hitzebelastungen betroffen zu sein. Aus diesen Gründen müssen sich Städte verstärkt und frühzeitig um Anpassungsmaßnahmen zur Hitzereduktion kümmern.

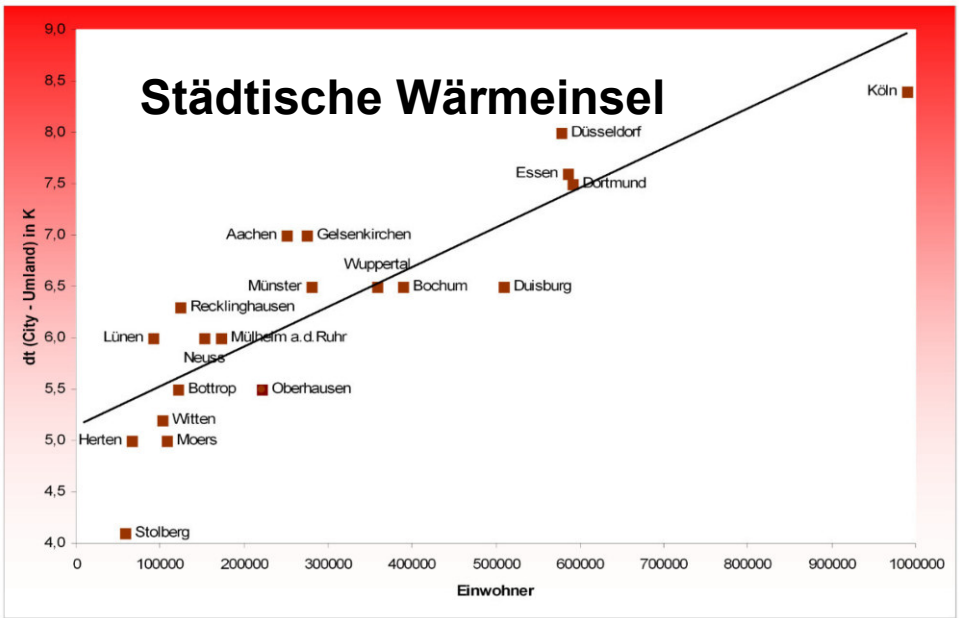


Abb. 1.1 Maximale Temperaturunterschiede zwischen Stadtzentrum und Umland in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl für Städte in NRW (Messdaten des RVR und der Abt. Klimatologie und Landschaftsökologie, Universität Duisburg-Essen)

1. Herangehensweise

Bereits heute sind Teile des Stadtgebietes von Wuppertal durch Wärmeinseleffekte, verminderte Durchlüftung und mangelnde nächtliche Abkühlung gekennzeichnet. In einer sommerlichen Nacht bei Strahlungswetterlagen (wolkenloser Himmel und nur geringe Windgeschwindigkeiten) kann es in den Wuppertaler Stadtzentren von Oberbarmen bis Vohwinkel um 6 bis 7 Grad wärmer sein als im unbebauten Umland (Abb. 1.1). Die daraus resultierenden Handlungserfordernisse werden in ihrer Dringlichkeit erheblich verschärft durch die in den nächsten Jahrzehnten absehbaren Klimaveränderungen. Da bei einem nachhaltigen Stadtumbau mit langwierigen Prozessen gerechnet werden muss, müssen rechtzeitig, das heißt jetzt Maßnahmen getroffen werden, um die Anfälligkeit von Mensch und Umwelt gegenüber den Folgen des Klimawandels zu verringern. Dabei wirken sich die Effekte von Anpassungsmaßnahmen unmittelbar „vor Ort“ positiv aus.

Erste Untersuchungen wurden in Wuppertal bereits durchgeführt. Dabei orientiert sich die Stadt Wuppertal am Klimaanpassungskonzept (2013) für Remscheid und Solingen, um im bergischen Städtedreieck einen gemeinsamen Weg zu beschreiten. Dabei fehlen aber Wuppertal-spezifische Untersuchungen zu Hitzebelastungen und zur Hitze-Betroffenheit für das gesamte Stadtgebiet. Im Folgenden hat sich Wuppertal am Projekt „BESTKLIMA“ (2015-17) beteiligt, bei dem Untersuchungen zum Tal der Wupper sowie zum Quartier Arrenberg durchgeführt wurden. Die vorliegende Untersuchung greift die vorhandenen Analysen und Daten auf und führt eine Analyse zur Klimawandel-Betroffenheit der Stadt Wuppertal für das Themenfeld „Hitze“ durch. Abbildung. 1.2 zeigt die einzelnen Bausteine dieser Analyse.

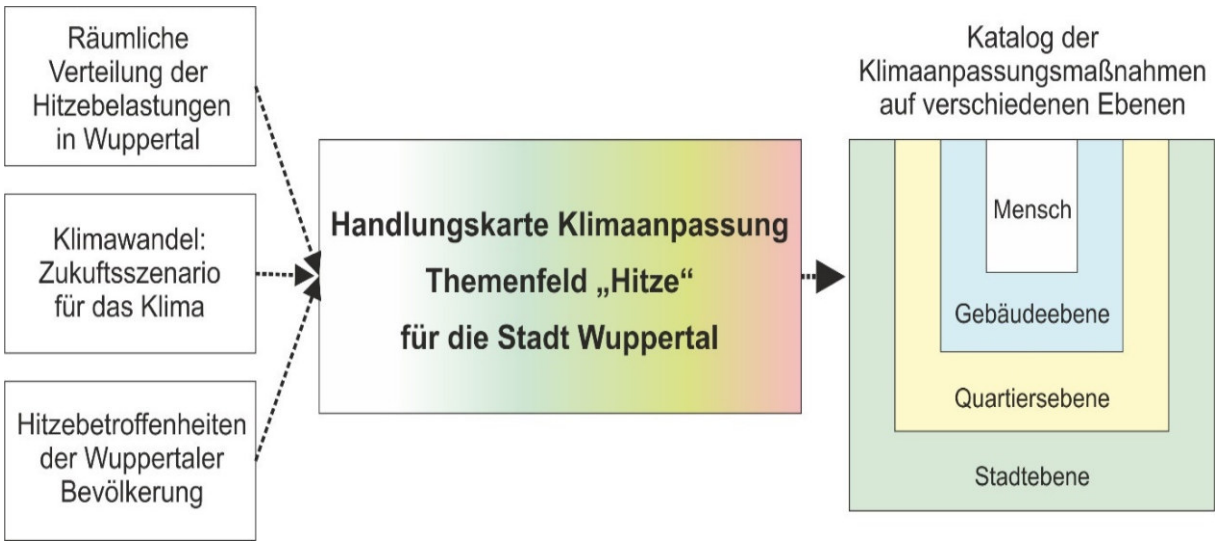


Abb. 1.2 Bausteine der Analyse zur Klimawandelbetroffenheit der Stadt Wuppertal

Räumliche Verteilung der Hitzebelastungen in Wuppertal

Die räumlichen Verteilungen der Hitzebelastungen und der Hitzebetroffenheit in Wuppertal sowie die regionalen Prognosen zum Klimawandel bilden die Grundlagen der Analyse. Die Grundlagendaten, die Methoden sowie die Ergebnisse zur Hitzebetroffenheitsanalyse werden ausführlich im Kapitel 2 beschrieben.

Die wichtigsten Einflussfaktoren für die Verteilung der Hitzebelastungen in Wuppertal sind in der Abbildung 1.3 zusammengefasst. Zur Ermittlung dieser Faktoren wurden die aktuellen Realnutzungsdaten der Stadt Wuppertal ausgewertet, eigene Lufttemperaturmessungen durchgeführt und eine Kaltluftsimulation für das gesamte Stadtgebiet berechnet. Für die Ausbildung einer Hitzebelastung spielen in erster Linie die Bebauung und Versiegelung eines Gebietes eine Rolle. Variationen ergeben sich durch den Einsatz verschiedenen Materialien (je dunkler, desto stärker erwärmen sich Oberflächen) und durch den Durchgrünungsgrad. Vegetation kann durch Schattenwurf und Verdunstung erheblich zur Temperaturabsenkung beitragen. Die Höhenlage und Belüftungsbahnen können für den Abtransport von warmer bzw. die Zuführung von kühler Luft sorgen. Auf dieser Grundlage wurde die Karte der Hitzebelastungen für die Stadt Wuppertal (Kapitel 2.4) erstellt.

Abb. 1.3 Einflussfaktoren auf die Verteilung der Hitzebelastungen im Stadtgebiet von Wuppertal

Klimawandel: Zukuftsszenario für das Klima

Die für Nordrhein-Westfalen prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels zeigen, dass sich die Randbedingungen in Richtung Hitzewellen mit hohem Mortalitätsrisiko verändern werden. Dass schwerwiegende Folgen von Hitzewellen vor allem in Städten auftreten, liegt an der Bedeutung der Nachttemperaturen für die Erholungsphase des Menschen. Der Effekt der städtischen Wärmeinsel führt durch Speicherung der eingestrahlten Sonnenenergie zu stark überhöhten nächtlichen Temperaturen. Durch reduzierte nächtliche Abkühlungen werden die gesundheitsschädlichen Auswirkungen von Hitzewellen in Städten in Zukunft deutlich zunehmen. Abbildung 1.4 zeigt die Verschiebung des zukünftigen Klimas hin zu mehr und stärkerer Hitze. Insbesondere die Zunahme der Streuung, also das häufige Auftreten von Extremereignissen, führt dazu, dass die Hitze in Zukunft um ein Vielfaches zunimmt, während die kalten Wintertemperaturen nur eine geringe Änderung zeigen.

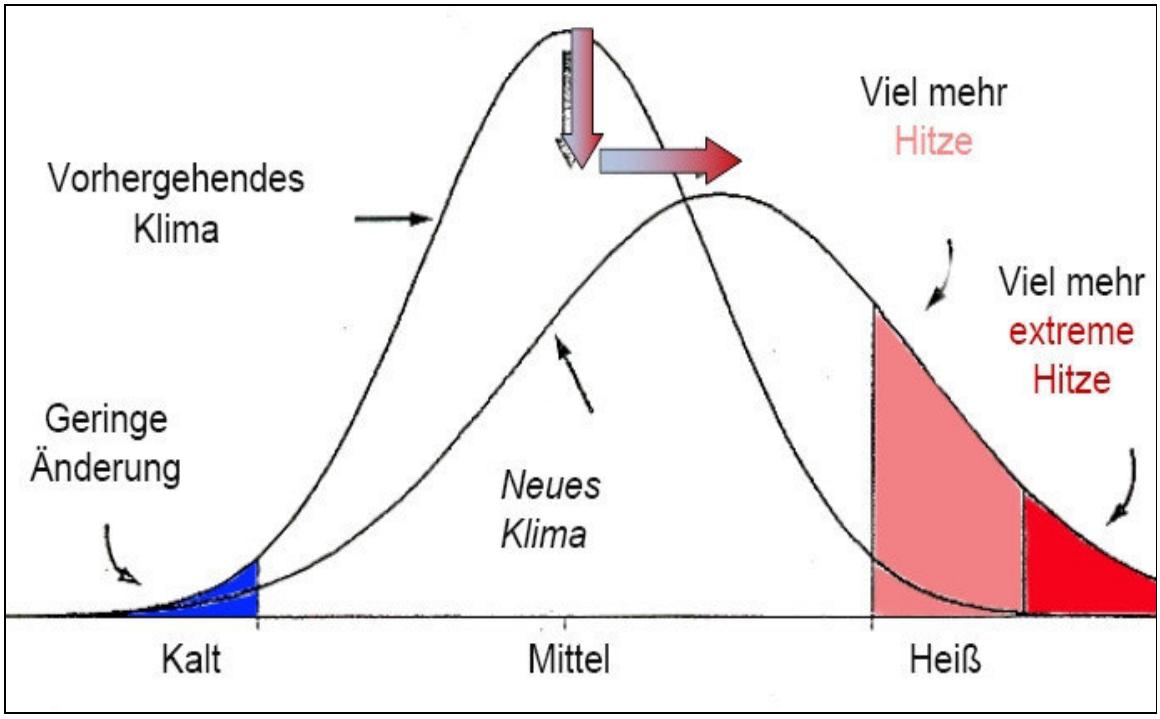


Abb. 1.4 Zunahme von Mittelwert und Streuung der Lufttemperaturen im zukünftigen Klima (Hupfer 2006)

Nicht der mittlere globale Temperaturanstieg in Deutschland von rund 2 bis 4 Grad in den nächsten 50 bis 100 Jahren ist von Bedeutung für Klimaanpassungsmaßnahmen, sondern die aus der Verschiebung der Temperaturverteilung resultierende zunehmende Hitzebelastung in den Innenstädten. Während in den vergangenen 100 Jahren die Anzahl der Heißen Tage (Tagestemperaturmaximum ≥ 30 °C) im Mittel schon um rund 100 % angestiegen ist, kommt in den nächsten 50 Jahren nochmal ein Anstieg von über 100 % dazu. Für das Zukunftsszenario 2050 (bezogen auf die Dekade 2050-2060) wurde die Ausweitung der Hitzebelastungen im Stadtgebiet berechnet. Durch die virtuelle Umsetzung von verschiedenen Maßnahmenbündeln zur Klimaanpassung kann die Ausweitung der Hitzebelastung im Zukunftsszenario weitgehend auf den IST-Zustand zurückgesetzt werden. Dies wird beispielhaft stadtweit und kleinräumig für ein Modellgebiet am Rathaus Elberfeld umgesetzt. Die Ergebnisse hierzu sind im Kapitel 2.5 beschrieben.

Hitzebetroffenheiten der Wuppertaler Bevölkerung

Für die Anfälligkeit eines Gebietes gegenüber einer klimatischen Belastung des Menschen spielen neben dem Hitzepotential auch die Einwohnerdichte sowie soziodemographische Faktoren wie das Alter der Bevölkerung eine Rolle. Je größer die Einwohnerdichte ist, desto mehr Menschen sind einer möglichen Hitzebelastung ausgesetzt. Ältere Menschen sowie Kleinkinder zeigen eine schlechtere Anpassung an extreme Hitze mit gesundheitlichen Folgen, die von Abgeschlagenheit bis hin zu Hitzschlag und Herzversagen reichen können. Gebiete mit einem hohen Anteil älterer Menschen oder Kleinkinder können daher als anfälliger gegenüber Hitzestress charakterisiert werden. Aus der Verschneidung der Bereiche der städtischen Wärmeinseln (Hitzebelastungen) mit der Bevölkerungsdichte, dem Anteil der über 65Jährigen und unter 3Jährigen und sensiblen Einrichtungen wie Altenheime, Krankenhäuser und Kindertagesstätten ergeben sich als Ergebnis Belastungsgebiete unter dem Aspekt Hitze mit verschiedenen Anfälligkeitsstufen (Abb. 1.5). Die Karte der Hitzebetroffenheit für die Stadt Wuppertal wird im Kapitel 2.6 erläutert.

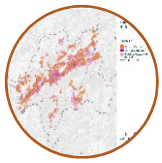
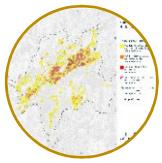
Ausgangsdaten	**Parameter**	
- Bereiche der Städtischen Wärmeinsel (Ist und Zukunft):	Hitzebelastung	
- Einwohnerdichte in den Stadtvierteln von Wuppertal:	Anfälligkeit	
- Anteil der Einwohner über 65 Jahre:	Anfälligkeit	
- Anteil von Kindern unter 3 Jahren:	Anfälligkeit	
- Hitzesensible Einrichtungen:	Anfälligkeit	

Abb. 1.5 Abgrenzung von Gebieten der klimatischen Belastung des Menschen im Stadtgebiet von Wuppertal

Handlungskarte Klimaanpassung – Themenfeld Hitze für die Stadt Wuppertal

Aus den Analyseergebnissen des Kapitels 2 wird im Kapitel 3 eine Handlungskarte für das Stadtgebiet entwickelt. In dieser Karte werden alle Flächen ausgewiesen, die momentan oder auf das Zukunftsszenario 2050 bezogen ein Konfliktpotential im Hinblick auf den Klimawandel unter dem Aspekt Hitze aufweisen. Um Anpassungsmaßnahmen an das Stadtklima unter Berücksichtigung des Klimawandels gezielt ein- und möglichst effektiv umzusetzen, sollten die Gebiete und Bereiche identifiziert werden, die eine besondere Sensitivität gegenüber den Folgen des Klimawandels aufweisen. Das sind Gebiete, in denen aufgrund der sozialen, ökonomischen und naturräumlichen Rahmenbedingungen vor Ort besondere Probleme durch die klimatischen Änderungen zu erwarten sind. Neben der Berücksichtigung anderer Belange sollte die Handlungskarte zukünftig in alle Planungsprozesse der Stadt Wuppertal integriert werden. Sie enthält neben der Darstellung des Konfliktpotentials auch schon einen Überblick

über notwendige Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel und Vorschläge, die in Planungsprozesse einfließen sollen. Diese Handlungskarte ist wie ein Filter, durch den zukünftig alle Planungen im Stadtgebiet gefiltert werden sollten (Abb. 1.6).

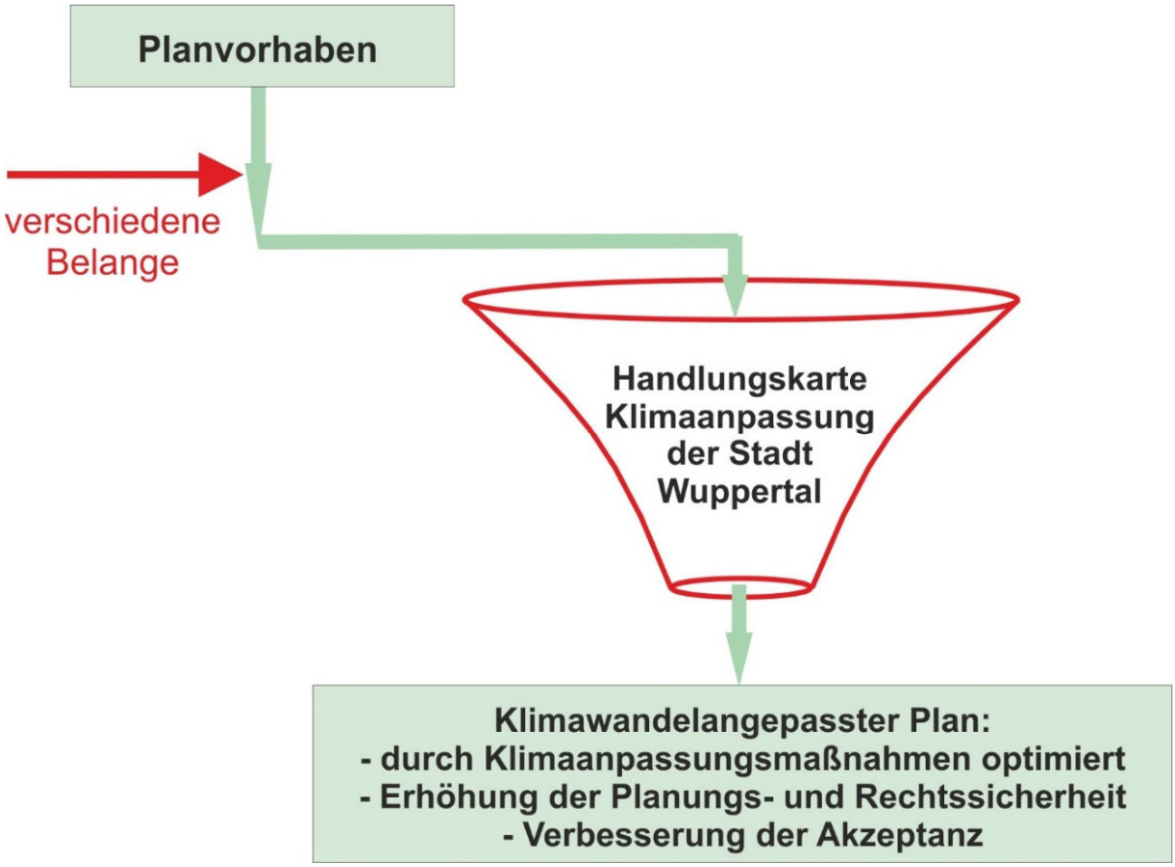


Abb. 1.6 Die Handlungskarte Klimaanpassung als „Filter“ für kommunale Planungen

Bevor es zu einer Entscheidung zugunsten einer konkreten Fläche kommt, muss vorab verwaltungsintern mit Hilfe der Handlungskarte abgeglichen werden, ob die angestrebte Fläche ein dort ausgewiesenes Konfliktpotential aufweist. Ist dies zutreffend, so muss geklärt werden, um welche Art von Konfliktpotential, z. B. Hitzebelastung oder die Belüftungs- oder Kühlfunktion einer Fläche, es sich handelt. Ab diesem Zeitpunkt müssen Maßnahmen aufgezeigt und in den weiteren Schritten des Planungsverfahren mitberücksichtigt werden. Die kommunalen Planungen müssen als Weichenstellung für die zukünftige Stadtentwicklung verstanden werden. Neben der Vorbildfunktion der Stadt für das Thema der Klimaanpassung geht es auch um einen Stadtortfaktor für Wuppertal und die Lebensqualität in der Stadt. Eine weitreichende Kommunikation der „Handlungskarte Klimaanpassung – Themenfeld Hitze“ in die Öffentlichkeit hinein erleichtert die Anwendung des Maßnahmenkatalogs auch im Bereich privater Grundstücksflächen.

Maßnahmenkatalog

Während es in den heißen Klimazonen der Erde schon immer einen klimaangepassten Städtebau (z. B. enge Gassen mit Verschattung der Hauswände, helle Oberflächen) gegeben hat, ist in unseren Regionen ein Umdenken erforderlich, um eine Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu erreichen. Es muss eine Umgestaltung auf Stadt-, Quartiers- und Gebäudeebene stattfinden, um eine Verminderung der zukünftigen Belastungen durch die Folgen des Klimawandels zu erreichen. Zusätzlich muss sich das Verhalten des Menschen verändern, damit die Anfälligkeit gegenüber Hitze abnimmt. Im Kapitel 3.2 wird ein Katalog mit verschiedenen Anpassungsmaßnahmen auf diesen vier Ebenen zusammengestellt. Die Maßnahmen werden anhand eines jeweils zweiseitigen Steckbriefs erläutert mit einer Beschreibung der Maßnahme, ihren Anwendungsbereichen, Synergien, Zielkonflikten, Akteuren, Kooperationspartnern, Zielgruppen und möglichen Umsetzungsinstrumenten sowie anschaulichen Beispielen.

Anpassungsmaßnahmen auf Stadtebene

Langfristig umzusetzende Maßnahmen fallen in den Bereich der Freiraumplanung und Stadtentwicklung. Aufgrund der sehr langsamen Geschwindigkeit eines nachhaltigen Stadtumbaus besteht hier ein hoher Handlungsdruck für die Stadtentwicklungsplanung. Anpassungsmaßnahmen für Veränderungen, die sich erst in der Zukunft ergeben, müssen bereits heute beginnen. Freiwerdende Flächen sind im Sinnen der Stadtbelüftung einer sorgfältigen Abwägung über die zukünftige Nutzung zu unterziehen.

Anpassungsmaßnahmen auf Quartiersebene

Kurz- und mittelfristig umzusetzende Maßnahmen zur Anpassung der städtischen Infrastruktur an den Klimawandel sind Begrünungs- und Entsiegelungsmaßnahmen im Straßenraum. Ebenfalls kurz- bis mittelfristig umsetzbar ist die Schaffung von kleineren offenen Wasserflächen im Stadtbereich. Maßnahmen einer baulichen Quartiersumgestaltung sind nur mittel- oder langfristig umsetzbar.

Anpassungsmaßnahmen auf Gebäudeebene

Kurz- bis mittelfristig umzusetzende Maßnahmen zur Reduzierung der Hitzebelastung im städtischen Raum auf Gebäudeebene sind Dach- und Fassadenbegrünungen. Veränderungen im Gebäudedesign, wie die Gebäudeausrichtung, Hauswandverschattung, Wärmedämmung und der Einsatz von geeigneten Baumaterialien können als mittelfristige Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zusammengefasst werden. Neben dem Gebäude an sich wird auch das direkte Gebäudeumfeld betrachtet, z. B. die Gartengestaltung.

Anpassungsmaßnahmen auf Verhaltensebene

Eine stärkere Vernetzung von kommunalen Akteuren, Verbänden, sozialen Einrichtungen, Investoren und der Bürgerschaft ist zukünftig notwendig, um die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen voranzutreiben. Dazu gehört auch, die Akzeptanz in Politik und Gesellschaft zu erhöhen und aufzuzeigen, dass Klimaanpassung immer auch mit einer Aufwertung von Stadtvierteln und einer besseren Lebensqualität verknüpft ist. Das persönliche Verhalten im Fall von extremer Trockenheit (Brandgefahr, Bewässerung) und Hitze muss an die zukünftigen Klimabedingungen angepasst werden. Für besonders betroffene Personenkreise wie alte und kranke Menschen sind Pläne zur Verhaltensvorsorge aufzustellen.

Stadtebene	**Quartiersebene**	**Gebäudeebene**
Frischluftschneisen und Luftleitbahnen mit Kaltluftabfluss in überwärmte Bereiche	Offene Wasserflächen oder Springbrunnen zur Kühlung von innerstädtischen Plätzen	Begrünte Dächer im Stadtgebiet vermindern das Aufheizen der Dachflächen und verbessern das Mikroklima
Frischluftschneisen und Luftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete oder Frischluftflächen mit überwärmten städtischen Bereichen und sind somit ein wichtiger Bestandteil des städtischen Luftaustausches. Insbesondere bei austauscharmen Wetterlagen sind sie klimarelevant, da über sie eine Belüftung hoch versiegelter Bereiche stattfinden kann. Den Austausch hemmende Faktoren können neben Baukörpern auch hohe und dichte Vegetation (Sträucher und Bäume) sein. Besonders nachteilig wirkt sich dieser Effekt auf strahlungsnächtliche, häufig nur schwach ausgebildete Kaltluftabflüsse aus.	Die Verdunstung von Wasser verbraucht Wärmeenergie aus der Luft und trägt so zur Abkühlung der aufgeheizten Innenstadtluft bei. Über eine Steigerung des Anteils von Wasser- und Grünflächen in Städten kann damit ein Abkühlungseffekt erzielt und gleichzeitig in der meist relativ trockenen Stadtatmosphäre die Luftfeuchtigkeit erhöht werden. Bewegtes Wasser wie innerstädtische Springbrunnen oder Wasserzerstäuber tragen insgesamt in größerem Maß zur Verdunstungskühlung bei als stehende Wasserflächen. Stark besonnte Standorte erhöhen den Effekt der Abkühlung durch Verdunstung.	Dachbegrünungen haben positive Auswirkungen auf das thermische, lufthygienische und energetische Potential eines Gebäudes. Im Jahresverlauf werden Temperaturextreme abgemildert. Das Blattwerk, das Luftpolster und die Verdunstung in der Vegetationsschicht vermindern das Aufheizen der Dachfläche im Sommer und den Wärmeverlust des Hauses im Winter. Dies führt zu einer ausgeglicheneren Klimatisierung der darunter liegenden Räume. Erst in einem größeren Verbund können sich auch Auswirkungen auf das Mikroklima eines Stadtviertels ergeben. Durch Speicherung und Verdunstung von Wasser auf der Dachfläche ergeben sich Synergien mit dem städtischen Wasserhaushalt.

Abb. 1.7 Beispielhafte Maßnahmen und deren Wirkungen auf den drei Raumebenen

Die vorliegende Analyse zur Hitzebetroffenheit in Wuppertal soll den erforderlichen Werkzeugkasten für eine nachhaltige Klimaanpassung in der Stadt Wuppertal bereitstellen. Aus dem Zusammenspiel von Handlungskarte und Anpassungssteckbriefen können zukünftig konkrete Anpassungsprojekte entwickelt und deren Nutzen abgeschätzt werden.

Beispielhaft wurden für das Quartier Arrenberg, das schon im Projekt „BESTKLIMA“ als Modellgebiet genauer betrachtet wurde, detailliert die Belastungspotenziale durch Hitze mittels Modellierungen untersucht und darauf aufbauend konkrete Vorschläge zur Klimaanpassung entwickelt. In diesem Quartier fallen hohe Hitzebelastungen und mangelnde Durchlüftung durch eine dichte Bebauung mit einer schwachen und daher anfälligen Kaltluftzufuhr aus kleinen Nebentälern der Wupper zusammen. Damit ist das Quartier Arrenberg ein geeignetes Untersuchungsgebiet mit der Möglichkeit, die Ergebnisse auf andere Stadtquartiere zu übertragen. Durch mikroskalige Modellierungen wurden für zwei Varianten die Veränderungen im Quartier, sowohl bauliche Maßnahmen wie auch Begrünung, Entsiegelung und

Verdunstungskühlung durch bewegtes Wasser, im Hinblick auf Überhitzung und insbesondere bezüglich der Belüftung im Untersuchungsgebiet überprüft. Das mikroklimatische Modell ENVI-met dient zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung sowie der bioklimatischen Belastung (PMV-Index) in städtischen Quartieren. ENVI-met versetzt z. B. Stadtplaner in die Lage, die Auswirkungen von gezielten Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel innerhalb verschiedener Planungsszenarien zu simulieren und zu vergleichen, ohne dass das untersuchte Gebiet bzw. die Anpassungsmaßnahmen in der Realität existieren müssen. Die Auswertungen dieser mikroklimatischen Untersuchungen sind im Kapitel 4 nachlesbar.

Bei der Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen sind vielfältige Synergien, beispielsweise mit der Niederschlagsretention auf Grünflächen, aber auch Konflikte mit anderen Themenfeldern wie „Innenentwicklung“ gegeben. Neben dem großen Themenbereich des Klimaschutzes müssen auch die weiteren Folgen des Klimawandels wie Trockenheit, Extremniederschläge und Sturm in die Überlegungen einbezogen werden. Im Kapitel 5 wird ein erster Ausblick auf die Klimawandelbetroffenheit der Stadt Wuppertal im Themenfeld „Starkwind und Sturm“ gegeben. Diese Themenfeld ist beispielsweise bei der Planung von Begrünungen mit Bäumen einzubeziehen. Städtische Baumstandorte sind in der Regel Extremstandorte, die stärker von Trockenperioden und Sturmereignissen getroffen werden können.

Zusammengefasst behandelt die vorliegende Analyse die folgenden Schritte:

- Handlungsschwerpunkte identifizieren
- Priorisierung des Handlungsbedarfs
- Werkzeugkasten zur Umsetzung und Optimierung von Planungsvorhaben

2. Gesamtstädtische Analyse zur Hitze-Betroffenheit

Die Landnutzungs- und Siedlungsstruktur ist von großflächiger Bebauung im Tal der Wupper, an dessen Hängen und – ausgehend von den kleineren Siedlungskernen – auf den höheren Lagen geprägt. Durch die teils stark verdichteten Siedlungskernen Oberbarmen, Barmen, Elberfeld und Vohwinkel im Tal der Wupper und die kleineren bzw. weniger verdichteten Siedlungsansätzen an den Hängen und auf den Kuppen neben dem Tal ist die städtische Wärmeinsel von Wuppertal bandförmig angeordnet mit „Hot Spots“ und untergeordneten schwachen Nebenwärmeinseln. Typisch ist dabei über größere Teile des Talbodens eine Gemengelage von teils dicht nebeneinanderliegenden gewerblich genutzten Flächen (mit teils stark industrieller Nutzung) und Wohnbauflächen verschiedener Dichte (städtische Mischnutzung). In dem engen Längstal wird zudem viel Platz durch übergeordnete Infrastruktur (Bundesstraßen, Fernbahnstrecken) in Anspruch genommen, die Wupper selbst ist teilweise überbaut.

Zur Beurteilung der stadtklimatischen Situation werden alle vorhandenen Klimauntersuchungen und städtischen Daten der Stadt Wuppertal herangezogen. Aus der Auswertung lassen sich Belastungsgebieten, in denen aktuell oder zukünftig bedingt durch den Klimawandel verschärft Probleme auftreten werden, berechnen. Hierzu werden neben den Klimaanalysen die Realnutzungsdaten, Klimakarten, das digitale Höhenmodell und Bevölkerungsdaten herangezogen. Die Ausgangsdaten der nachfolgenden Analysen werden im Kapitel 2.1 vorgestellt und durch eine Kaltluftsimulation für das gesamte Wuppertaler Stadtgebiet (Kap. 2.2) ergänzt.

Als Grundlage der Abgrenzung von Gebieten mit einer deutlichen Hitzebelastung wird eine digitale Klimatopkarte für das gesamte Stadtgebiet erstellt (Kap.2.3). Zusätzlich zum Ist-Zustand der Klimakarte wird ein Zukunftsszenario 2050 der Klimatope unter Berücksichtigung von regionalen Klimawandel-Projektionen und städtebaulichen Vorhaben aus dem Stadtentwicklungskonzept (Stand 03.2018) berechnet. Anhand der Karten „IST“ und „Zukunftsszenario“ kann die Veränderung der Hitzebelastungen durch Ausweitung der entsprechenden Klimatope im Stadtgebiet in der Zukunft abgeschätzt werden (Kap. 2.4). Auf dieser Grundlage wird beispielhaft ein Maßnahmenbündel erarbeitet, mit dem die Klimakarte des Zukunftsszenarios bezüglich der Intensität und Ausweitung der Hitzeareale wieder weitgehend auf den IST-Zustand gesetzt werden kann. Dazu gehören beispielsweise die Entsiegelung und Begrünung von Flächen, Straßen- und Innenhofbegrünung und die Verbesserung der Funktion der Belüftungsbahnen. An einem innerstädtischen Untersuchungsgebiet in Wuppertal-Elberfeld wird die Wirksamkeit einiger Maßnahmen beispielhaft durch mikroskalige Modellierungen überprüft (Kap. 2.5).

Konkrete Aussagen zu Betroffenheiten der Bevölkerung in Gebieten, in denen aktuell und in Zukunft verstärkt Hitzebelastungen auftreten, werden durch eine Verknüpfung der Hitzebelastungsbereiche im Stadtgebiet mit den Daten zur Bevölkerungsdichte sowie dem Anteil an über 65-jährigen und unter 3-jährigen Bewohnern und hitzesensiblen Einrichtungen getroffen (Kap. 2.6). Die so berechnete „Karte der Hitzebetroffenheit“ für die Stadt Wuppertal hat das Ziel aufzuzeigen, in welchen Stadtgebieten der vordringlichste Handlungs- und Planungsbedarf bezogen auf den Aspekt „Hitzebelastung“ besteht.

2.1 Zusammenstellung der Grundlageninformationen zum Klima in Wuppertal auf einer digitalen Datenbasis

Die vielfältigen vorhandenen Klimauntersuchungen und Ergebniskarten zum Wuppertaler Stadtklima werden im Folgenden ausgewertet und aktualisiert, um alle erforderlichen Grundlagendaten für eine gesamtstädtische Analyse zur Klimawandelfolgen-Betroffenheit bezüglich der Hitzebelastungen zusammenstellen zu können. Dies sind im Einzelnen:

- Realnutzungsdaten der Stadt Wuppertal, Datenstand 14.02.2018
- Orographie des Wuppertaler Stadtgebietes und Umgebung, Auflösung: 1m Rasterweite
- Entwurf der Klimatopkarte Wuppertal, Stand Februar 2018
- Abschlussbericht zum Projekt BESTKLIMA der Städte Remscheid, Solingen und Wuppertal, 2017
- Handlungskonzept Klima und Lufthygiene für die Stadt Wuppertal mit:
  Stadtklimaanalysekarte und Planungshinweiskarte (Ingenieurbüro Lohmeyer, 2000)
- Klimaanalyse Stadt Wuppertal (Bangert et al, 1988)
- Stadtentwicklungskonzept: Städtebauliche Vorhaben/ Projekte, Arbeitsplan, Stand 03.2018
- Baublöcke mit Einwohnerzahlen nach Altersklassen, Datenstand 3. Quartal 2017

Aus diesen Daten lassen sich die wichtigsten Einflussfaktoren für die Verteilung der Hitzebelastungen in Wuppertal ableiten:

- ♦ Höhenlage
- ♦ Belüftungsbahn
- ♦ Durchgrünung
- ♦ Versiegelungsgrad
- ♦ Bebauungsdichte
- ♦ Materialien/ Farben

Ausgangspunkt ist die Berechnung einer aktuellen Klimatopkarte (Kap. 2.3). Unter dem Begriff Klimatop werden Stadtbereiche mit gleicher Struktur und klimatischer Ausprägung zusammengefasst. Bestimmend für die Einteilung des Stadtgebietes in Klimatope sind die dominierende Nutzungsart sowie die thermale Situation an dem jeweiligen Ort. Entsprechend dienen als Grundlage für die Berechnung der Klimatopkarte die Realnutzungskarte, die Karte der Lufttemperaturverteilung während einer sommerlichen Strahlungsnacht sowie eine Karte der Oberflächentemperaturen.

Abbildung 2.1 zeigt die Realnutzungskarte der Stadt Wuppertal entsprechend dem von der Stadt zur Verfügung gestellten Nutzungsschlüssel. Deutlich ist das Siedlungsband entlang der Wupper erkennbar. Dieses ist durchzogen von gewerblich und industriell genutzten Flächen. Die Siedlungen auf den Hang- und Kuppenlagen sind mäßig bis stark verdichtet und überwiegend von Freiland und Waldgebieten umgeben.

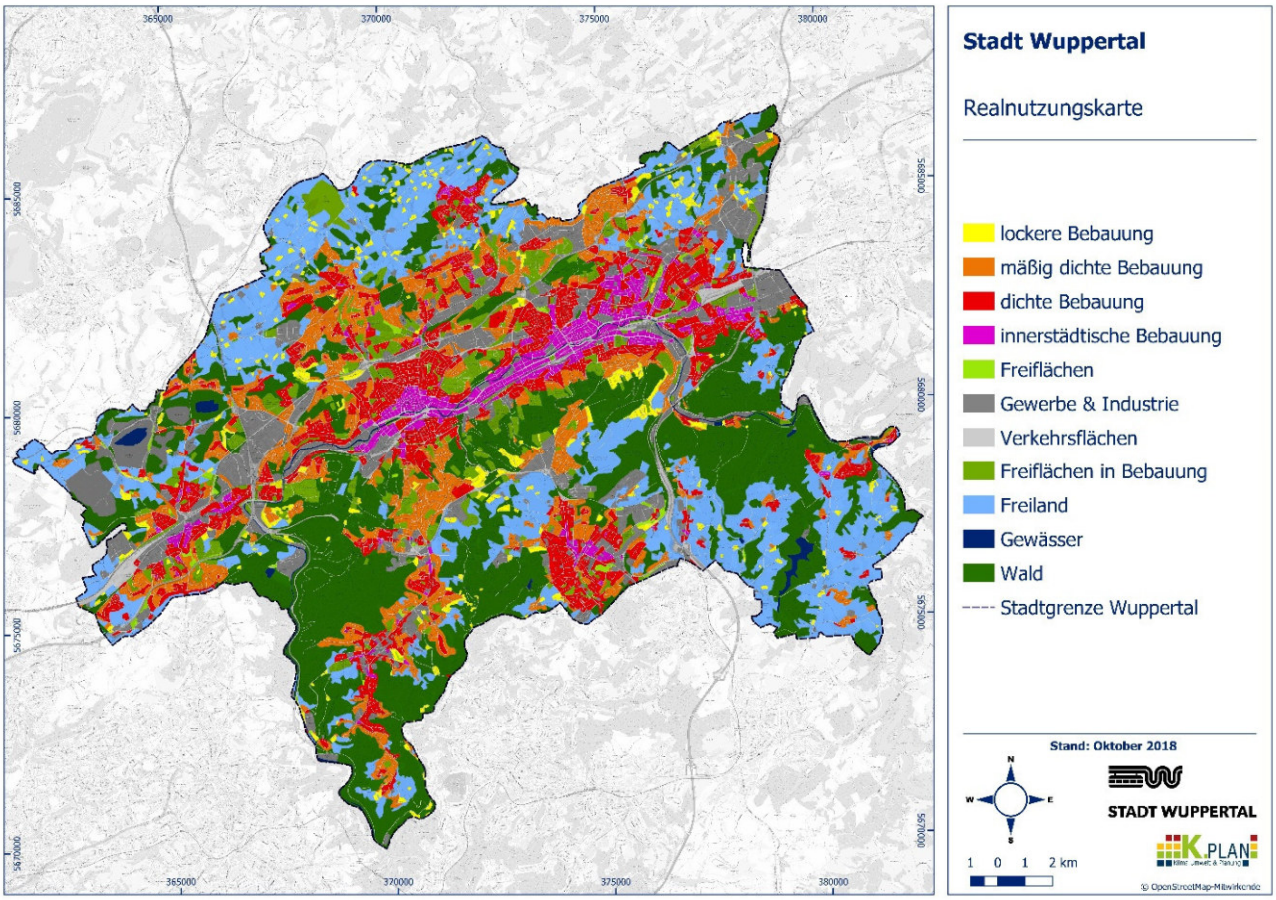


Abb. 2.1 Realnutzungskarte der Stadt Wuppertal

Eine aktuelle Lufttemperaturverteilungskarte für das Stadtgebiet von Wuppertal existierte nicht. Deshalb musste eine neue Lufttemperaturverteilungskarte der Stadt Wuppertal (Abb. 2.7) entwickelt werden. Grundlage bildeten die Temperaturuntersuchungen der alten Analysen. Zusätzlich waren aktuelle Messungen auf einem Nord-Süd-Profil in unterschiedlichen orographischen Lagen und Nutzungsstrukturen notwendig, um die in der Literatur angegebenen möglichen maximalen Lufttemperaturunterschiede in einer Sommernacht bei Hitzewetterlagen zwischen innerstädtischem Raum und Freiland zu verifizieren.

Im Sommer 2018 wurden für 2 Monate an drei verschiedenen Standorten Lufttemperaturmessungen durchgeführt. Station 1 (siehe Abb. 2.2) lag am Siedlungsrand von Wuppertal-Ronsdorf in einer Freiland-Kuppenlage. Station 2 (Abb.2.3), im Zentrum von Wuppertal-Elberfeld, repräsentierte die innerstädtische Wärmeinsel und Station 3 (Abb.2.4), in Wuppertal-Uellendahl, die klimatische Situation in einer leichten Senkenlage im Freiland. Durch diese Auswahl wurden drei Extremstandorte erfasst, die anzeigen, welche Temperunterschiede in einer sommerlichen Strahlungsnacht auftreten können. Ausgewertet und dargestellt sind im Folgenden die Temperaturverläufe während einer ausgeprägten Hitzewelle in Juli/ August 2018.

Abb. 2.2 Station 1: Temporäre Lufttemperaturmessungen (2 m Höhe) im Sommer 2018 in Wuppertal-Ronsdorf, Friedrichshöhe (Foto: K.PLAN, google.de)

Abb. 2.3 Station 2: Temporäre Lufttemperaturmessungen (2 m Höhe) im Sommer 2018 in Wuppertal-Elberfeld, Platz am Kolk (Foto: K.PLAN, google.de)

Abb. 2.4 Station 3: Temporäre Lufttemperaturmessungen (2 m Höhe) im Sommer 2018 in Wuppertal-Uellendahl, Untenrohleder (Foto: K.PLAN, google.de)

Abbildung 2.5 zeigt die Ergebnisse der Lufttemperaturmessungen für den Zeitraum vom 17.07.18 bis 07.08.18. In diesem Zeitraum wurden mehrmals über 30 °C Tageshöchsttemperaturen erreicht. Deutlich ist zu sehen, dass sich die Lufttemperaturen tagsüber nur wenig unterscheiden, hier ist die gut durchlüftete Kuppenstation (Station 1 in Ronsdorf) immer etwas kühler als die anderen Standorte. Nachts dagegen sind die Freilandstandorte (Station 1 und 3) häufig deutlich kühler als der Standort in der Innenstadt von Elberfeld. Die tagsüber eingestrahlte Sonnenenergie wird hier in den Gebäuden und versiegelten Flächen gespeichert, zusätzlich ist die Durchlüftung durch die Baukörper reduziert. Nachts wird die gespeicherte Wärme langsam an die Luft abgegeben und wirkt dadurch der nächtlichen Abkühlung entgegen.

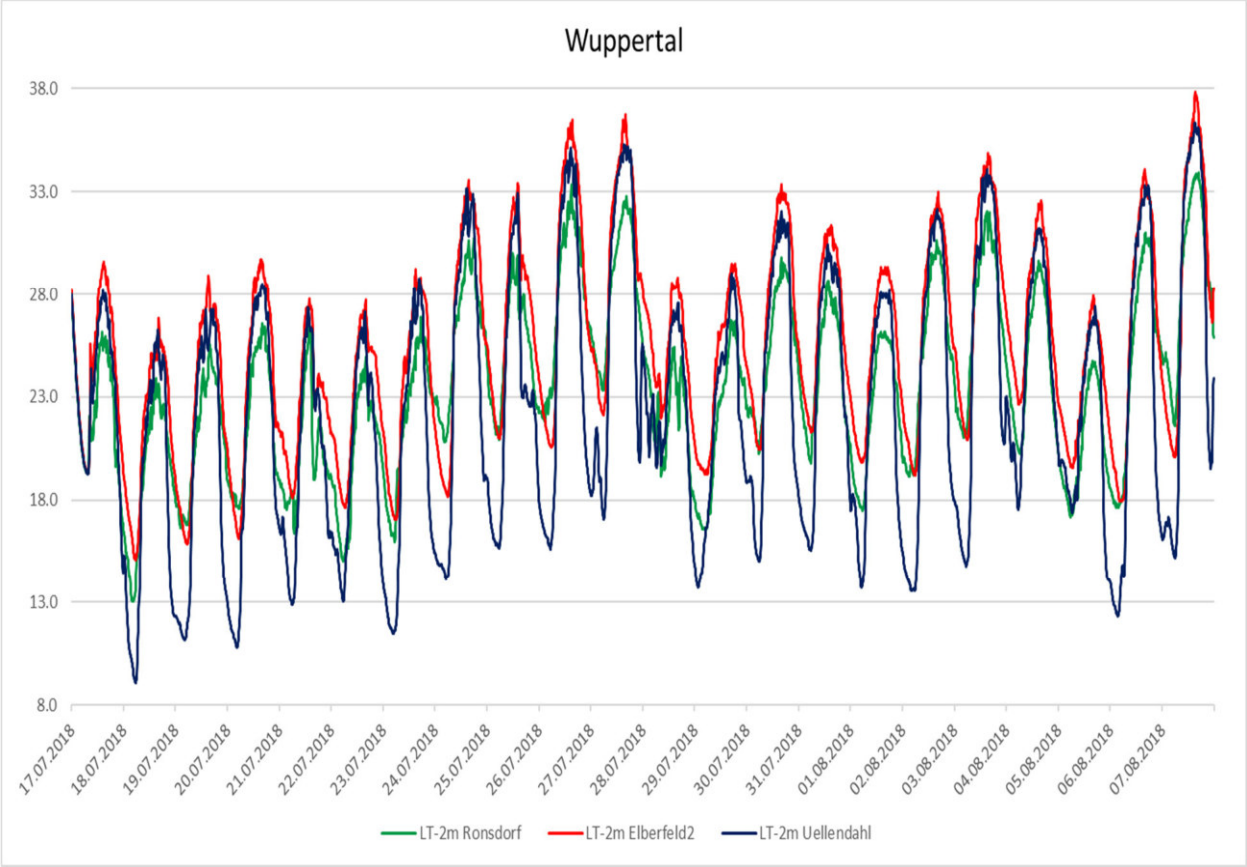


Abb. 2.5 Ergebnisse der Sonder-Lufttemperaturmessungen an drei Standorten in Wuppertal für den Zeitraum 10.07. – 07.08.2018

Der mittlere Unterschied der Lufttemperaturen an den drei Standorten im Tagesgang ist in der Abbildung 2.6 dargestellt. Deutlich wird der große Unterschied der Freiland-Senkenstation in Uellendahl im Vergleich zur Innenstadt, die im Mittel nachts rund 6 Kelvin beträgt. Da nächtlich gebildete Kaltluft von Kuppen und oberen Hanglagen abfließt, ragen Kuppen als „kleine Wärmeinseln“ aus der Freiland-Kaltluft heraus. Die nächtlichen Lufttemperaturen an der Freiland-Kuppenstation in Ronsdorf liegen im Mittel deshalb nur rund 2 Kelvin unter denen im Elberfeld. Siedlungen in Kuppenlage können deshalb auch bei einer nur mäßigen Verdichtung eine deutliche nächtliche Wärmeinsel ausbilden.

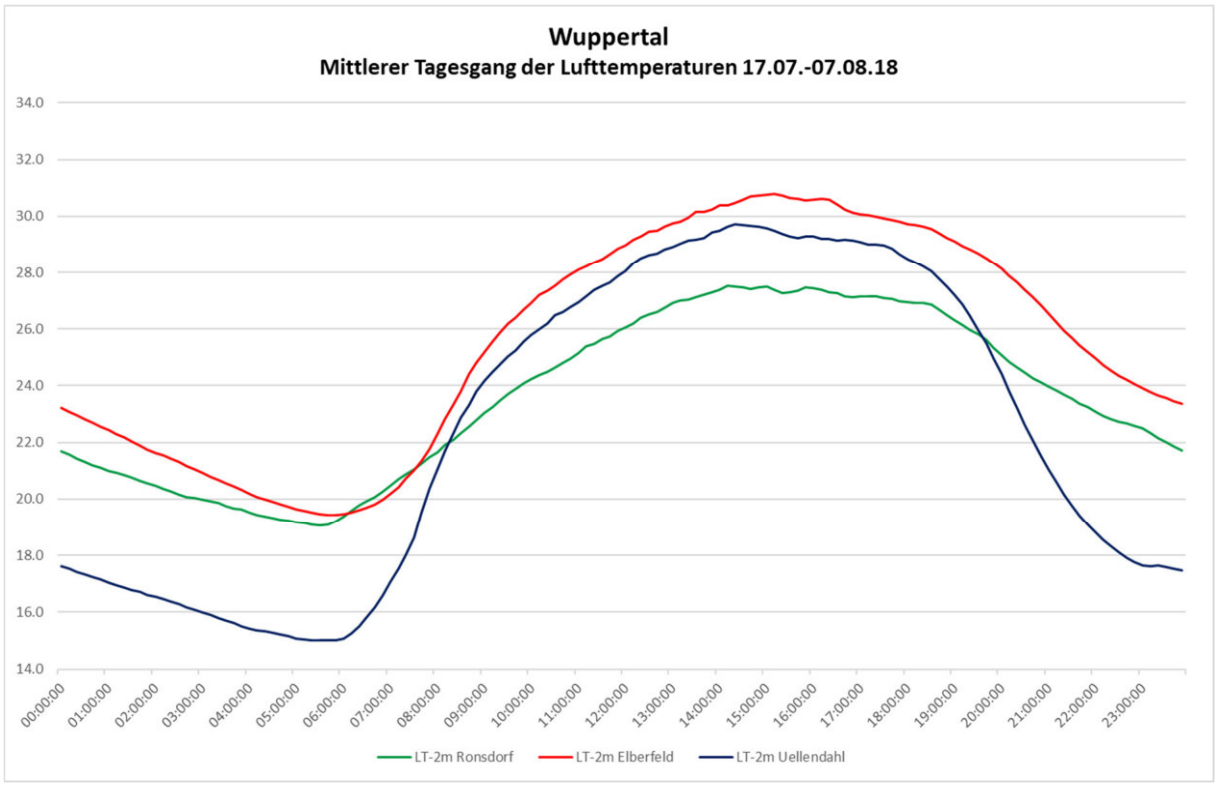


Abb. 2.6 Mittlerer Tagesgang der Lufttemperaturen an drei Standorten in Wuppertal für den Zeitraum 10.07. – 07.08.2018

In der Karte der Lufttemperaturverteilung (Abb. 2.7) dargestellt sind relative nächtliche Lufttemperaturen in der Messhöhe 2 m über Grund, wie sie bei Strahlungswetterlagen während wolkenloser Nächte auftreten können. Bei diesen Wetterlagen bilden sich die durch Flächennutzungen und Oberflächenformen verursachten Temperaturunterschiede am deutlichsten aus. Damit können die dargestellten Lufttemperaturunterschiede als Idealfall einer nur von den Standortunterschieden beeinflussten Temperaturverteilung angesehen werden. Bei anderen Wetterlagen schwächen sich die Unterschiede ab oder verschwinden völlig.

Untersuchungen im Rahmen der verschiedenen Klimaanalysen für die Stadt Wuppertal seit 1988 zeigen eine starke räumliche Variation der Temperaturverhältnisse im Stadtgebiet bedingt durch das Relief und die Landnutzung. Die großen Freilandflächen im Norden und Süden des Wuppertaler Stadtgebietes sind wichtige Kaltluftproduzenten. Verglichen mit diesen Freilandflächen sind die Waldgebiete im Süden schlechtere Kaltluftproduzenten, dafür gute Frischluftlieferanten. Kaltluftabfluss aus den Freilandflächen im Norden und vor allem im Süden kann durch die höheren Lagen in Richtung des dichten Siedlungsbands im Tal der Wupper stattfinden. Eine gute Belüftungssituation ergibt sich auf den großen Freilandflächen des Stadtgebietes. Gebiete innerhalb des Stadtkerns, wie auch in größeren Bereichen außerhalb des Stadtkerns weisen eine schlechte Belüftungssituation auf. Genauere Untersuchungen zur Kaltluftbildung und zum Kaltluftabfluss im gesamten Stadtgebiet wurden durch eine Kaltluftsimulation (siehe Kap. 2.2) durchgeführt.

Wenn in den überwärmten Siedlungsgebieten die nächtlichen Lufttemperaturen nicht unter 20 °C absinken, spricht man von Tropennächten. Nachttemperaturen über 20 °C gelten als belastend für den menschlichen Organismus.

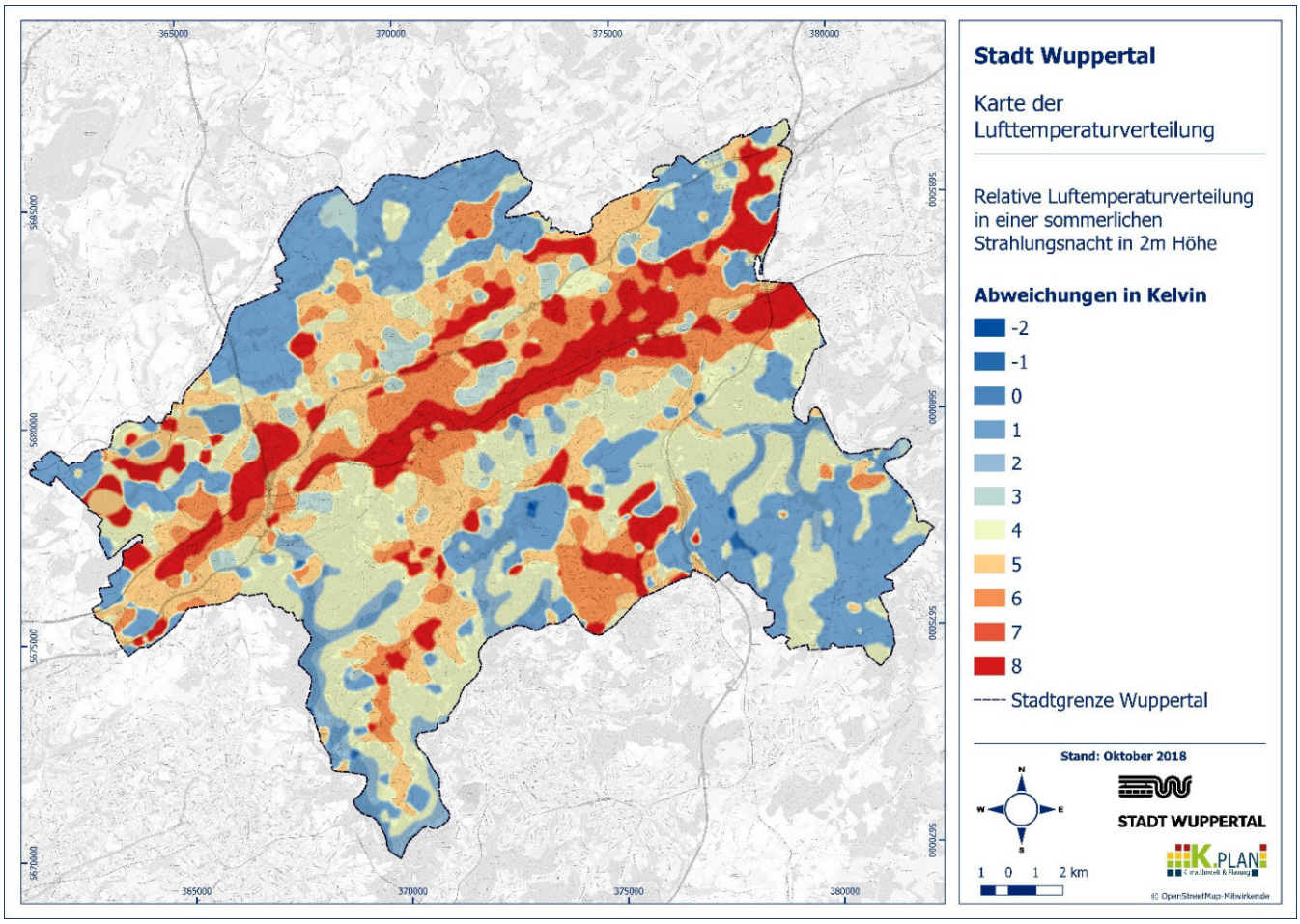


Abb. 2.7 Lufttemperaturverteilungskarte der Stadt Wuppertal (relative nächtliche Lufttemperaturen in 2 m Höhe bei Strahlungswetterlagen)

- Zwischen den Freilandgebieten, auf denen Kaltluftbildung stattfindet, und den stark versiegelten Innenstadtbereichen können in windschwachen, wolkenfreien Sommernächten Temperaturunterschiede von 6 bis 8 Kelvin auftreten.
- Dies kann bedeuten, dass es nachts im Innenstadtbereich nicht unter 20 °C abkühlt.
- Solche überwärmten Nächte gelten als gesundheitlich belastend, insbesondere wenn mehrere solcher „Tropennächte“ in Folge auftreten.

Um die Oberflächentemperaturen als dritte Eingangsgröße zur Berechnung der Klimatopkarte zu erhalten, wurde eine existierende Infrarotaufnahme aus der Wuppertaler Klimaanalyse von 1988 hinzugezogen (Abb. 2.8, Karte der Oberflächentemperaturen der Stadt Wuppertal)**.** Die Karte weist die ansteigenden Oberflächentemperaturen von Kaltluftflächen zu Wärmeinseln in den Farbstufen Blau, Gelb und Rot aus. Thermalbilder sind in ihrer Eigenschaft der strikten Abbildung der Oberflächentemperaturen für die Beurteilung der stadtklimatischen Situation nur indirekt nutzbar. Die Luft wird über den Oberflächen erwärmt oder abgekühlt, das heißt, dass sehr warme Oberflächen zu erhöhten Lufttemperaturen führen können. Versiegelte Flächen und Bebauungen speichern viel Energie und kühlen sich auch nachts nur langsam ab. In Verbindung mit einem geringen Luftaustausch in bebauten Stadtgebieten führt dies zur Ausprägung von Wärmeinseln. Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Wuppertaler Stadtgebiet auf versiegelten Verkehrsflächen und in den Innenstadtbereichen auf.

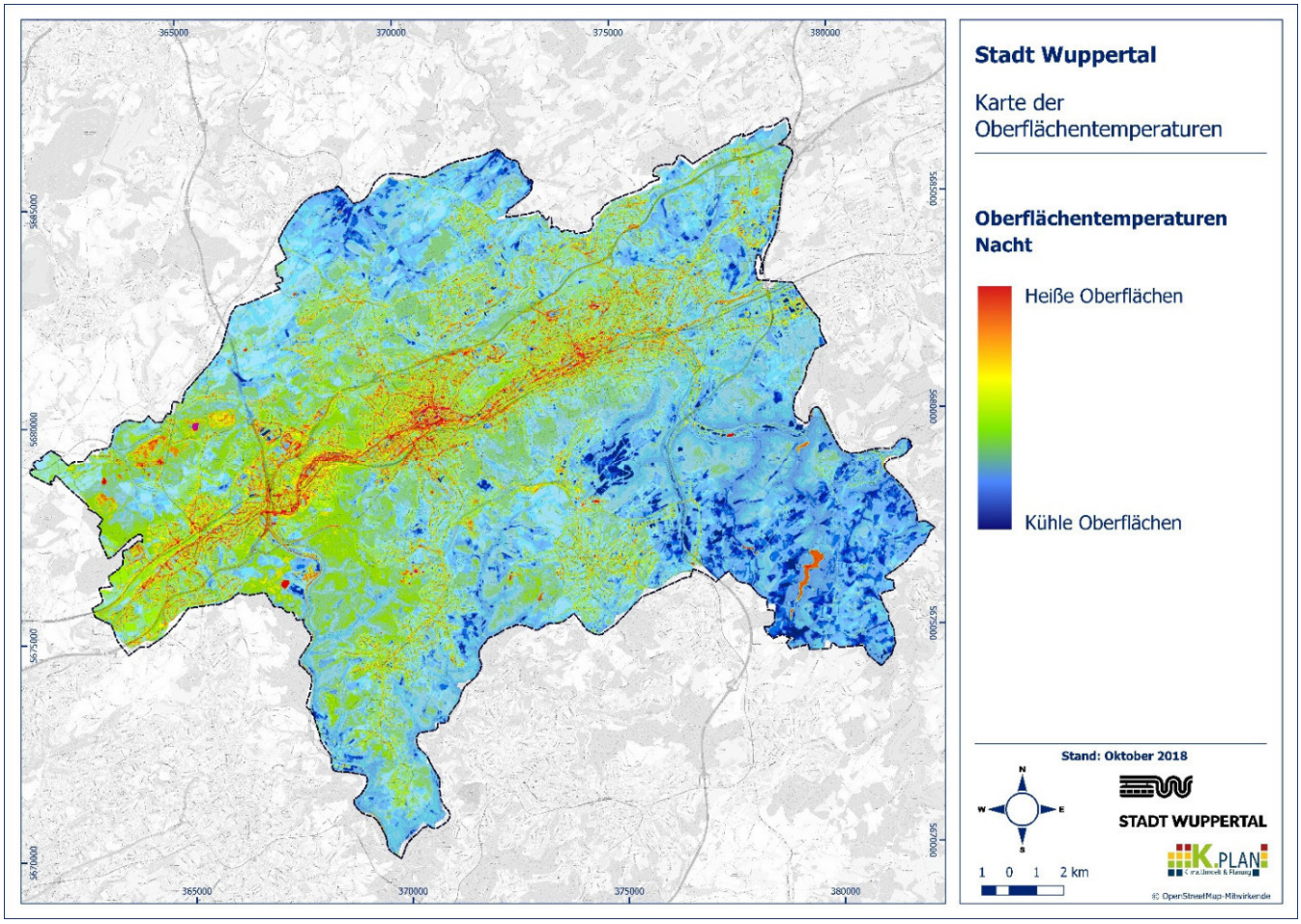


Abb. 2.8 Karte der Oberflächentemperaturen für das Wuppertaler Stadtgebiet (Oberflächentemperaturen der Nachtsituation, Thermalscannerbefliegung vom 28.06.1986)

Freiflächen kühlen nachts sehr schnell ab und haben niedrige Oberflächentemperaturen. Diese kühlen die darüber liegenden Luftschichten und führen zu einer nächtlichen Kaltluftbildung auf den Flächen. Bei austauscharmen Wetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten können die entsprechend der Geländeneigung abfließenden Kaltluftmassen einen erheblichen Betrag zur Belüftung und Kühlung von erwärmten Stadtgebieten leisten. Im Winter kann es dagegen im Bereich von Kaltluftbildungs-, Kaltluftabfluss- und Kaltluftsammelgebieten zu vermehrter Nebel- oder Frostbildung kommen.

2.2 Kaltluftsimulation für das gesamte Stadtgebiet von Wuppertal

Da im Stadtgebiet von Wuppertal insbesondere bei austauscharmen sommerlichen Hitzewetterlagen lokale Windsysteme für die Belüftungsverhältnisse von Bedeutung sind, werden diese durch den Einsatz eines Kaltluftabflußmodells zusätzlich betrachtet. Durch die Kaltluftsimulation werden qualitative und quantitative Aussagen erarbeitet. Für das Stadtgebiet von Wuppertal wurde eine Modellsimulation mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes (Sievers, U., 2005; VDI, 2003) durchgeführt. KLAM_21 ist ein zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen und Kaltluftansammlungen in orographisch gegliedertem Gelände (Sievers, U., 2005. In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Band 227, Offenbach am Main). Die Randbedingungen und Ergebnisse der Kaltluftberechnungen werden folgend beschrieben.

Unter bestimmten meteorologischen Bedingungen können sich nachts über geneigtem Gelände sogenannte Kaltluftabflüsse bilden; dabei fließt in Bodennähe (bzw. bei Wald über dem Kronenraum) gebildete kalte Luft hangabwärts. Die Dicke solcher Kaltluftschichten liegt meist zwischen 1 m und 50 m, in sogenannten Kaltluftseen, in denen sich die Kaltluft staut, kann die Schicht auf über 100 m anwachsen. Die typische Fließgeschwindigkeit der Kaltluft liegt in der Größenordnung von 1 m/s bis 3 m/s. Die folgenden beiden meteorologischen Bedingungen müssen für die Ausbildung von Kaltluftabflüssen erfüllt sein:

- wolkenarme Nächte: durch die aufgrund fehlender Wolken reduzierte Gegenstrahlung der Atmosphäre kann die Erdoberfläche kräftig auskühlen
- großräumig windschwache Situation: dadurch kann sich die Tendenz der Kaltluft, an geneigten Flächen abzufließen, gegenüber dem Umgebungswind durchsetzen.

Die Produktionsrate von Kaltluft hängt stark vom Untergrund ab: Freilandflächen weisen beispielsweise hohe Kaltluftproduktion auf, während sich bebaute Gebiete bezüglich der Kaltluftproduktion neutral bis kontraproduktiv (städtische Wärmeinsel) verhalten. Hoch versiegelte Bereiche können durch deutliche Erwärmung der herangeführten Luftschichten zum Abbau von Kaltluft führen.

Unter Umweltgesichtspunkten hat Kaltluft eine doppelte Bedeutung: zum einen kann Kaltluft nachts für Belüftung und damit Abkühlung thermisch belasteter Siedlungsgebiete sorgen. Zum anderen sorgt Kaltluft, die aus Reinluftgebieten kommt, für die nächtliche Belüftung schadstoffbelasteter Siedlungsräume. Kaltluft kann aber auch auf ihrem Weg Luftbeimengungen (Autoabgase, Geruchsstoffe etc.) aufnehmen und transportieren. Für die Regional- und Stadtplanung ist es daher von großer Bedeutung, Kaltluftabflüsse in einem Gebiet qualitativ und auch quantitativ bestimmen zu können.

Voraussetzung für eine Kaltluftsimulation ist eine für Kaltluftabflüsse optimale Situation, d.h. eine klare und windstille Nacht. Das Modell berechnet die zeitliche Entwicklung der Kaltluftströmung, ausgehend vom Ruhezustand (keine Strömung) bei gegebener zeitlich konstanter Kaltluftproduktionsrate. Diese, ebenso wie die Reibungskoeffizienten, werden über die Art der Landnutzung gesteuert. Die Kaltluftflüsse hängen in erster Linie von den orographischen Gegebenheiten ab. Neben den Realnutzungsdaten der Stadt Wuppertal gehen die Daten des digitalen Geländemodells als weitere Eingangsgröße in die Simulation ein. Sowohl die Daten der Flächennutzungen wie auch die Geländehöhen wurden weiträumig um das Stadtgebiet von Wuppertal herum in die Simulation aufgenommen, damit die Kaltluftströmungen in den Randbereichen des Stadtgebietes entsprechend den topographischen Gegebenheiten der umliegenden Bereiche erfasst werden können

Für die Kaltluftsimulation des gesamten Wuppertaler Stadtgebietes werden 9 Landnutzungsklassen, die sich hinsichtlich ihrer dynamischen und thermischen Oberflächeneigenschaften wie z.B. Oberflächenrauhigkeit, Verdrängungsschichtdicke, Versiegelungsgrad und Kaltluftproduktivität unterscheiden, berücksichtigt:

- Siedlung (dicht)
- Siedlung (locker)
- Wald
- Halb versiegelte Flächen (z. B. Bahnanlagen)
- Kernstadt (führt zum Abbau von Kaltluft)
- Park
- Unversiegelte Freiflächen
- Versiegelte Flächen (z. B. Autobahnen)
- Wasser

Die Abbildungen 2.9 und 2.10 zeigen die Modell-Eingangsdaten der Geländehöhen und der Landnutzungen im erweiterten Untersuchungsgebiet für die Kaltluft-Simulationen. Um sowohl die größerskaligen Abflüsse als auch die Details der innerstädtischen Bereiche erfassen zu können, wurde im gesamten Untersuchungsgebiet mit einer sehr genauen Auflösung von 10 m x 10 m gerechnet. Die Größe des Untersuchungsgebietes lag dementsprechend 2086 x 1673 Rasterfeldern, das entspricht einer Ausdehnung von 20,86 km in Ost-West-Richtung und 16,73 km im Nord-Süd-Richtung.

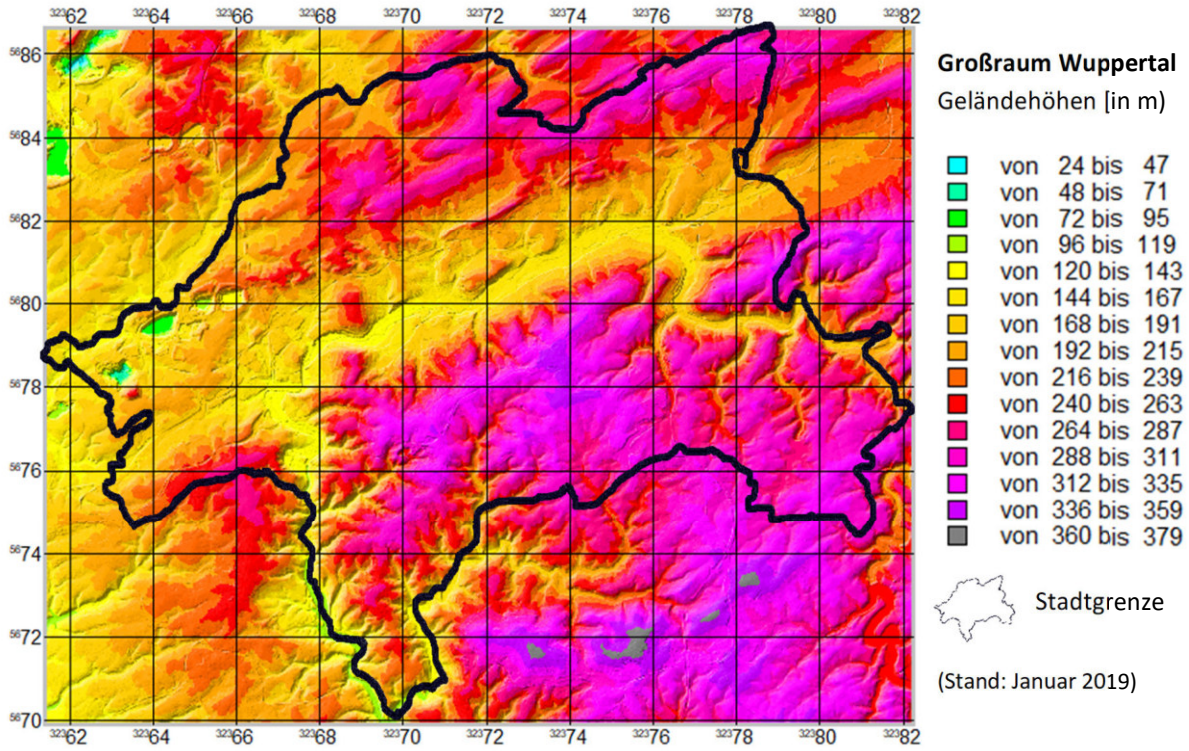


Abb. 2.9 Geländehöhen im Untersuchungsgebiet Wuppertal für die Kaltluftsimulations-Eingabedatei

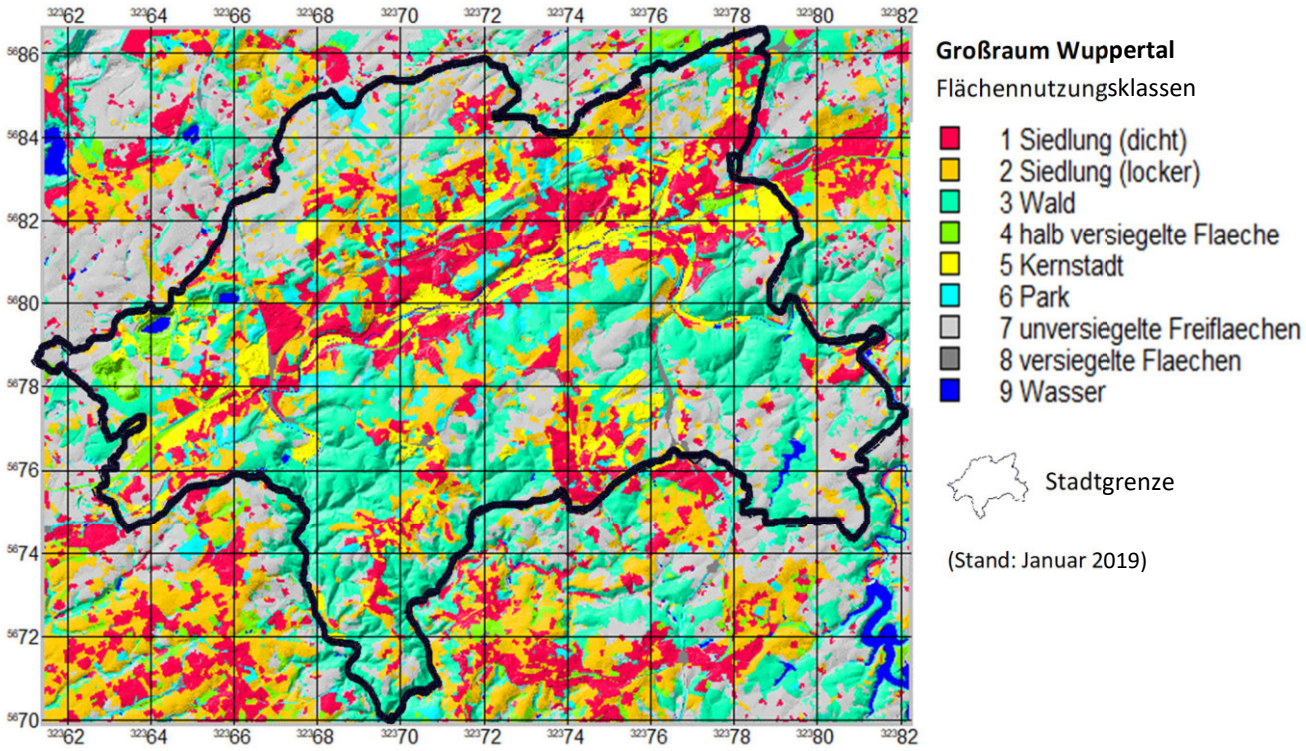


Abb. 2.10 Landnutzungen im Untersuchungsgebiet Wuppertal für die Kaltluftsimulations-Eingabedatei

Ergebnisse der Kaltluftsimulationen

Die Kaltluftabflüsse sind in klaren oder nur gering bewölkten windschwachen Nächten am deutlichsten ausgeprägt. Sie treten an Hängen als hangabwärts orientierte Hangwinde auf, in Tälern als talachsenparallele Bergwinde. Mit zunehmender Kaltluftmächtigkeit gehen die Hangwinde in Bergwinde über. Strömungsgeschwindigkeit und Kaltluftmächtigkeit hängen stark von der Talgröße und vom Taltyp ab. In Tälern mit größeren Einzugsgebieten können die Abflüsse im Laufe einer Nacht Mächtigkeiten bis zu 17 m erreichen, während Hangwinde geringere Mächtigkeiten (weniger als 2 m), aber höhere Strömungsgeschwindigkeiten (je nach Hangneigung etwa 1 m/s bis 3 m/s) aufweisen. In breiten Tälern dagegen liegt die Abflussgeschwindigkeit oft unter 1 m/s. In solchen Tälern und in Senken findet man häufig auch Kaltluftstaugebiete, dort können wegen der schlechten Austauschbedingungen erhöhte Luftschadstoffkonzentrationen auftreten.

Mit der KLAM_21 - Kaltluftsimulation wird die Dicke der Kaltluftschicht sowie die beiden horizontalen Geschwindigkeitskomponenten (West-Ost und Süd-Nord), gemittelt über die Dicke der Kaltluftschicht, berechnet. Die Darstellung der Kaltlufthöhe und des Schichtmittelwerts der Strömungsgeschwindigkeit wurde gewählt, um einerseits den in der Natur auftretenden Schwankungen der Kaltluftschichtdicke Rechnung zu tragen, andererseits um die für planerische Zwecke (Bebauungshöhe) wichtige vertikale Variation der Kaltluftflüsse zu erfassen. Für vorgegebene Zeitpunkte im Verlauf der Nacht wird jeweils eine entsprechende Ergebnisdatei erzeugt. Die folgenden Darstellungen und Diskussionen der Simulationsergebnisse beziehen sich auf drei unterschiedliche Zeitpunkte nach Einsetzen der Kaltluftbildung am Abend. Einmal wird die Anfangsphase der Kaltluftbedingungen betrachtet, in der sich die

bodennahen Hangwinde ausbilden (nach 2 Stunden simulierter Zeit). Dann wird der Zeitpunkt der vollständigen Ausbildung der Kaltluftströmungen in der ersten Nachthälfte dargestellt (nach 4 Stunden simulierter Zeit). Nach dieser Zeit haben sich, sofern die Topographie es zulässt, stationäre Verhältnisse eingestellt. Die besondere Situation in Wuppertal erfordert zusätzlich die Betrachtung zu einem späteren Zeitpunkt, damit sich die regional bedeutsame Kaltluftbewegung ausbilden kann. In der zweiten Nachthälfte kommen in den breiten Tälern teilweise talparallele Abflüsse zum Tragen, die mit den Darstellungen zum Ende der Nacht (nach 8 Stunden simulierter Zeit) aufgezeigt werden.

Abbildung 2.11 zeigt die Ergebnisse der Kaltluftberechnungen nach 2 Stunden simulierter Zeit. In dieser Anfangsphase der Kaltluftentstehung sind an den Hängen mit starker Neigung und über dem Freiland die intensivsten Kaltluftströmungen zu erkennen. In den eingeschnittenen Tälern sammelt sich rasch die Kaltluft an und bewegt sich der Neigung folgend. In diesen Bereichen herrschen schon kurz nach Einsetzen der Kaltluftbildung intensive Volumenströme vor.

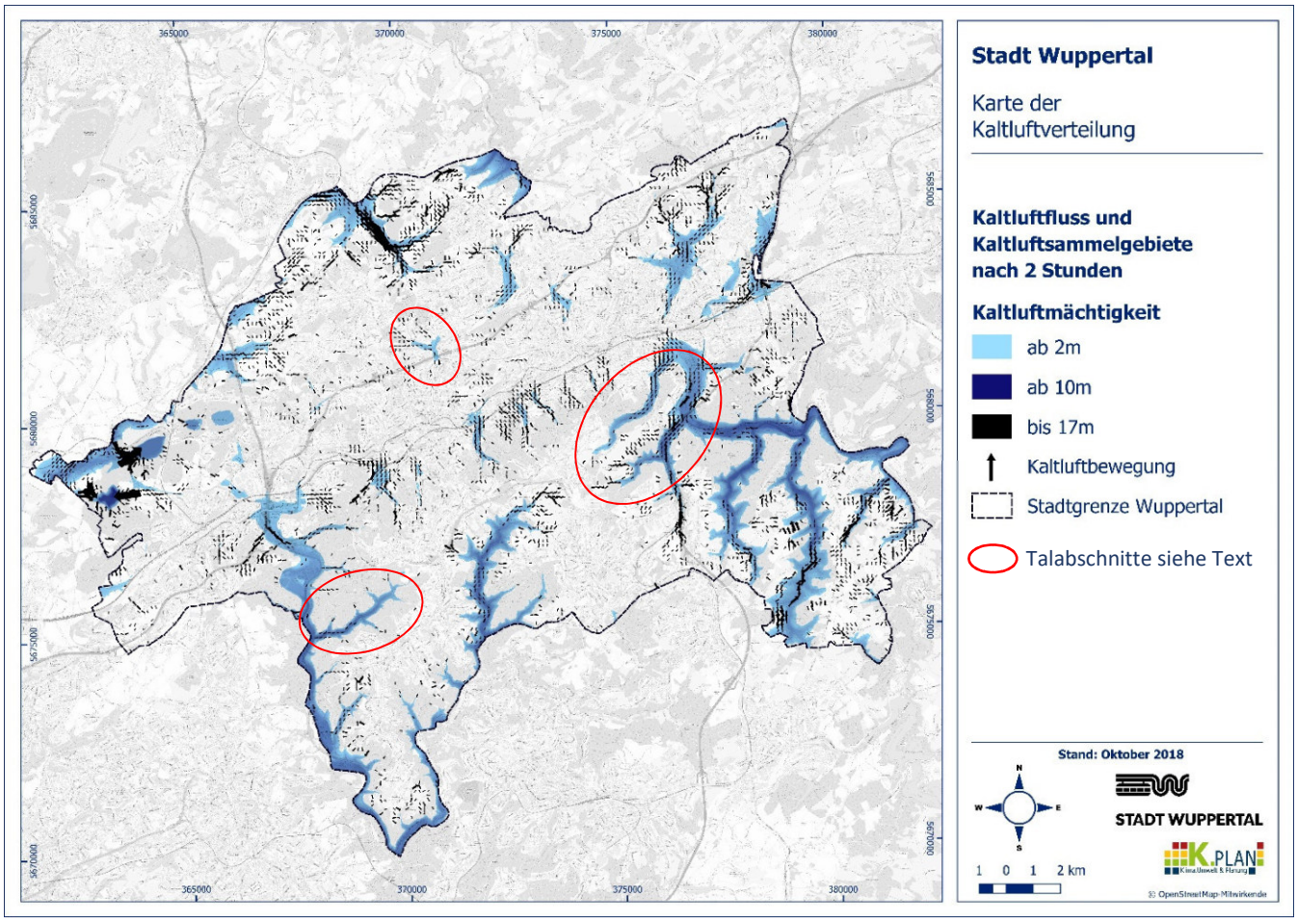


Abb. 2.11 Karte der Kaltluftverteilung nach 2 Stunden Simulationszeit (Ergebnisse der KLAM_21 – Modellrechnungen)

In der Anfangsphase dominieren die Hangabwinde mit teilweise bedeutenden Strömungsgeschwindigkeiten. Die Hangabwinde weisen zu dieser Zeit eine geringe Mächtigkeit und damit größtenteils eine geringe Kaltlufthöhe auf. Bei gut ausgebildeten Kaltluftbedingungen sind in den Hangbereichen die

höchsten Strömungsgeschwindigkeiten ausgebildet. In tief eingeschnittenen Tälern treten dagegen geringe Strömungsgeschwindigkeiten auf, da dort aufgrund des intensiven Zuströmens der Luft Kaltluftansammlungen entstehen. Damit nehmen am unteren Hang die Strömungsgeschwindigkeiten ab. Die talparallelen Kaltluftbewegungen weisen schon in dieser Anfangsphase eine intensive Mächtigkeit bei meist reduzierten Strömungsgeschwindigkeiten auf. Damit werden die Hangabwinde im Bereich des Hangfußes in die talparallele Strömung umgelenkt. Solche Kaltluftströmungen haben eine hohe Bedeutung für die Belüftung anschließender Siedlungsbereiche. Dies ist in der Abbildung 2.11 anhand der Darstellungen der Kaltluftschichtdicken zu erkennen. In den schmalen Tälern sind relativ große Kaltluftmächtigkeiten von bis zu 10 m zu erkennen. Die Kaltluftströmungen greifen auch in bebaute Bereiche ein. In der frühen Nacht wirkt insbesondere kleinräumig lokaler Kaltluftabfluss von den Hängen und aus kleinen Tälern. Die Täler von Burgholzbach, Murmelbach, Blombacher Bach, Mirker Bach (siehe rote Umrandungen in der Abbildung 2.11) und anderen führen zusätzliche Mengen Kaltluft heran, die vor allem in den frühen Nachtstunden einen relativ großen Beitrag zur Abkühlung von Siedlungsbereichen leisten, wobei aber im Hauptsiedlungsbereich der Talachse mehrere kaltluftfreie Wärmeinselkerne verbleiben.

Nach der ersten Nachthälfte (nach 4 Stunden Simulationszeit, siehe Abbildung 2.12) entsteht Kaltluft in verschiedenen Teilen des Stadtgebiets in unterschiedlichen Größenordnungen und teilweise komplizierter Überlagerung.

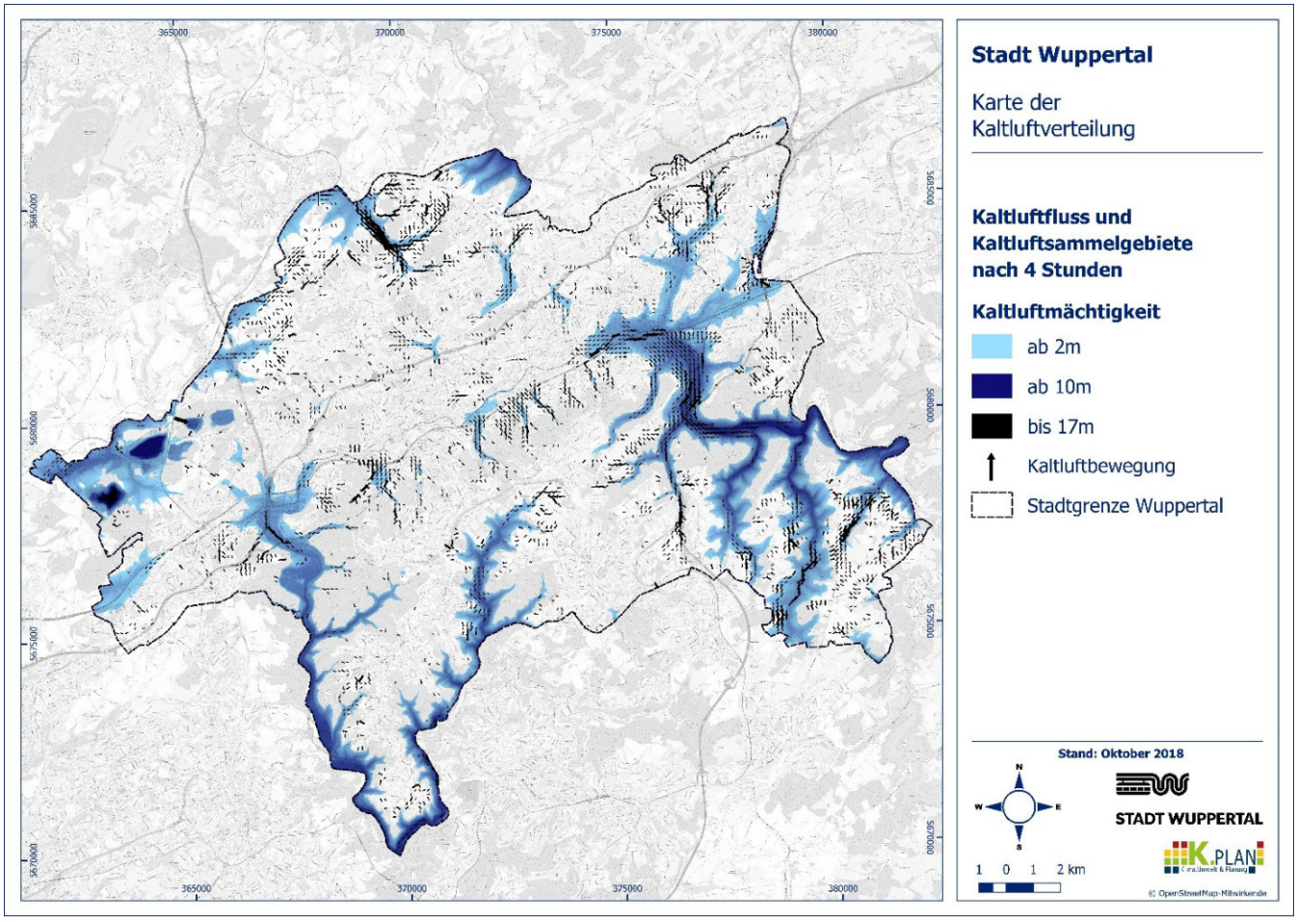


Abb. 2.12 Karte der Kaltluftverteilung nach 4 Stunden Simulationszeit (Ergebnisse der KLAM_21 – Modellrechnungen)

Es bildet sich zunächst in den unbebauten Teilen des Stadtgebiets Kaltluft auf Hängen und in Mulden, die sich in kleinen Tälern zu Kaltluftströmen sammelt und in Richtung auf die noch vom Tage warme Bebauung zuströmt. Weiterhin hat der Kaltluftzufluss aus den kleineren Tälern eine große Bedeutung. Der kleine Kaltluftstrom im Tal des Mirker Bachs verstärkt sich im Laufe der Nacht und versorgt Elberfeld-Zentrum mit Kaltluft. Dies hat für Elberfeld eine besondere Bedeutung, da hier die Wirkung des Kaltluftstroms aus dem oberen Tal der Wupper schon stark abgeschwächt ist, während die Kaltluftwirkung im weiter oberhalb des Talverlaufs liegenden Barmen deutlicher zu spüren ist.

Sowohl aus dem oberen als auch aus dem unteren Tal der Wupper strömt Kaltluft auf die dichter bebauten Teile des Tals in Wuppertal zu, im Fall der Kaltluft aus dem unteren Tal der Wupper sogar entgegen dem Gefälle. Ursache ist der dort früh einsetzende Kaltluftstau in Folge des geringen Längsgefälles und des großen Zuflusses von Kaltluft aus dem Süden. Zunächst werden die Randbereiche von Langerfeld bzw. Sonnborn erreicht. Hier führen kleine stadtnahe Seitentäler des Tals der Wupper (Burgholzbach, Murmelbach, Blombacher Bach) zusätzliche Mengen Kaltluft heran, die damit – vor allem in den frühen Nachtstunden – einen relativ großen Beitrag leisten, bevor später in der Nacht sehr große Kaltluftmengen aus dem oberen Tal der Wupper eintreffen. Die sehr verschieden starken Kaltluftströme erreichen in der frühen Nacht die stärker bebauten Stadtteile noch weitgehend getrennt. Im Tal der Wupper zwischen Langerfeld und Vohwinkel ergeben sich dementsprechend noch getrennte und unterschiedlich weitreichende kleine Kaltlufteinzugsgebiete. Der Ortsteil Arrenberg wird teilweise von kleinen Kaltluftströmen schon früh in der Nacht erreicht.

In der zweiten Nachthälfte finden sich in nahezu allen tief gelegenen Bereichen Kaltluftansammlungen und die Strömungsgeschwindigkeiten nehmen dort ab. Die Bereiche mit intensiven Hangabwinden sind deutlich seltener gegenüber der ersten Nachthälfte. Selbst in den dicht bebauten Talbereichen sind zum Ende der Nacht Kaltluftansammlungen zu finden (Abb. 2.13). Das führt im Tal der Wupper zu einer nach Osten gerichteten mächtigen Kaltluftströmung mit allerdings geringen Strömungsgeschwindigkeiten.

In der späten Nacht (8 h nach Sonnenuntergang, Abb. 2.13) dringt die Kaltluft aus dem oberen Tal der Wupper als zusammenhängender großer Kaltluftstrom weit in die zentralen Stadtteile von Wuppertal vor und erreicht dann Elberfeld-Zentrum. Es handelt sich dabei um einen für eine Großstadt im Mittelgebirgsraum vergleichsweise großen Kaltluftstrom. Kaltluft aus dem unteren Tal der Wupper strömt weiter talaufwärts nach Wuppertal ein, vergrößert seine Reichweite gegenüber der frühen Nachtsituation dort aber wenig. Alle im Tal gelegenen Teile der Stadt werden zu dieser Zeit von Kaltluft erreicht, lediglich einzelne Kuppenlagen bleiben kaltluftfrei.

Fast alle der in der frühen Nacht aktiven kleinen Kaltluftströme aus den Seitentälern und seitlichen Mulden des Tals der Wupper bleiben auch in der späten Nacht aktiv. In den oberhalb und unterhalb der Stadt liegenden Teilen des Tals der Wupper überwiegt Kaltluftstau, d.h. stagnierende oder sehr langsam strömende Kaltluft. Dabei werden erhebliche Kaltluftmächtigkeiten erreicht. Im unteren Tal der Wupper sind diese Kaltluftstaubereiche auf die Talachse konzentriert, im oberen Tal der Wupper hingegen großflächig. Randlich zur Einmündung der Kaltluftströme aus dem unteren und oberen Tal der Wupper (bei Sonnborn, Vohwinkel und im Westteil von Arrenberg bzw. nordöstlich von Oberbarmen) herrscht im Randbereich der Bebauung flächenhaft Kaltluftstau; diese Bereiche können sich als besonders immissionsgefährdet erweisen. Die Belüftungsverhältnisse in Arrenberg werden in einem gesonderten Kapitel (Kap. 4) mittels mikroskaliger Modellierungen intensiver betrachtet.

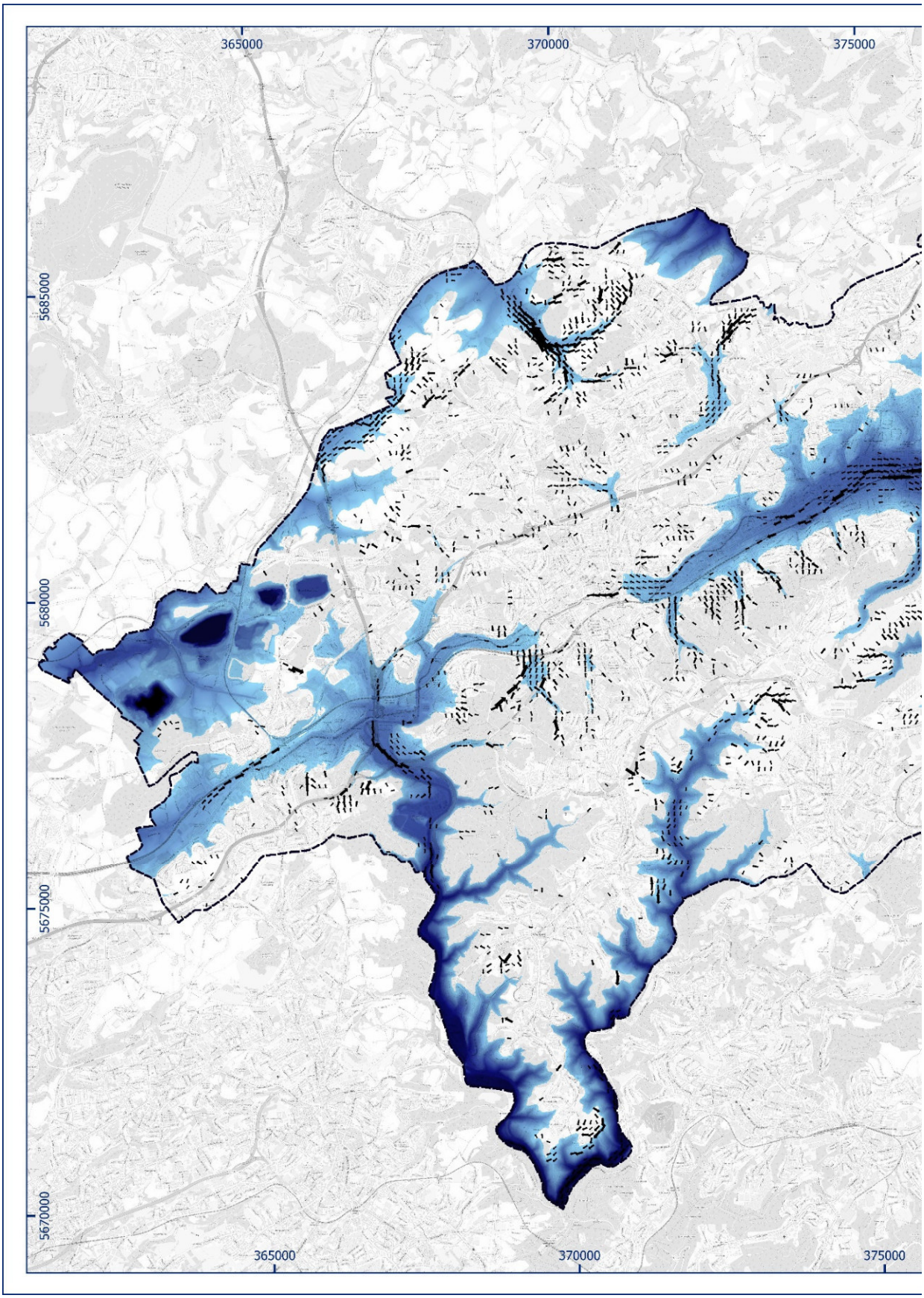
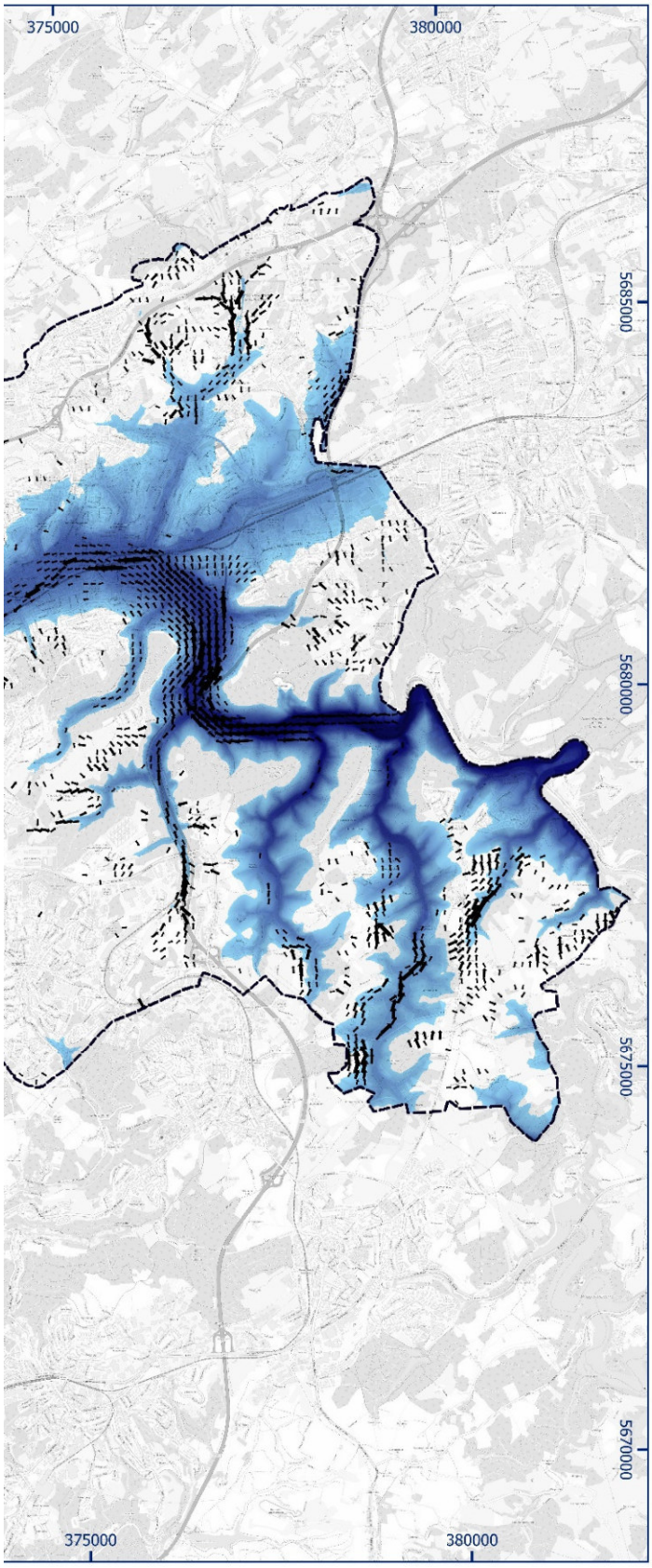


Abb. 2.13 Karte der Kaltluftverteilung nach 8 Stunden Simulationszeit (Ergebnisse der KLAM_21 – Modellrechnungen, die Karte ist in hoher Auflösung auch im digitalen Anhang des Berichts einzusehen)



Stadt Wuppertal

Karte der Kaltluftverteilung

Kaltluftfluss und Kaltluftsammelgebiete nach 8 Stunden

Kaltluftmächtigkeit

- ab 2m
- ab 10m
- bis 17m
- Kaltluftbewegung
- Stadtgrenze Wuppertal

Stand: Oktober 2018

N
W
E
S

1 0 1 2 km

STADT WUPPERTAL

K.PLAN Klima.Umwelt & Planung

© OpenStreetMap-Mitwirkende

Zusammenfassung der Ergebnisse

Kennzeichnend für Wuppertal ist die Lage in einem teils engem Mittelgebirgstal mit untypischem Talverlauf (wechselnde Breite, starke Richtungsänderungen, Verbindungen in Form niedriger Pässe zu Nebentälern), wodurch es zu untypisch erschwertem Kaltluftabfluss auch mit gegen das Gefälle gerichteter Strömung kommt, es gibt zudem einige kleinere Seitentäler und am Talrand gelegene Mulden, so dass im Einzelnen ein komplexes Strömungsbild entsteht. Die hohe bauliche Dichte entlang der Talachse behindert den Kaltluftabfluss und bewirkt Aufzehrungstendenzen der Kaltluft. Das gesamtstädtische Kaltluftmodell arbeitet nicht mit einzelnen Bauwerksstrukturen, sondern nur über Flächennutzungsklassen. Deshalb werden einzelne Strömungshindernisse im Kaltluftfluss nicht berücksichtigt und die Ergebnisse sind als potentielle Kaltluftbewegungen im Stadtgebiet zu verstehen.

Die Pfeilsignaturen zeigen, dass in den Hangbereichen teilweise intensive Kaltluftströmungen anzutreffen sind. Sofern die oberen Hangbereiche Freiland oder nur lockere Bebauung aufweisen, bilden sich Kaltluftabflüsse aus, die die thermischen Verhältnisse im Stadtgebiet günstig beeinflussen. Hangbereiche mit dichter Bebauung zeigen deutliche Einschränkungen der Kaltluftströmungen. Im Osten des Stadtgebietes mündet aus südlicher Richtung der Taleinschnitt der Wupper in den Stadtbereich. Hier bildet sich ein deutliches Talwindsystem aus. Die südlich und südöstlich vom Stadtbezirk Heckinghausen gelegenen Freiflächen stellen das Einzugsgebiet der Kaltluft dar. Dem Gelände folgende Hangabwinde sammeln sich im Einschnitt der Wupper und strömen der Neigung folgend in das Stadtgebiet. Die erwärmten Bereiche des dichtbebauten Stadtgebietes unterstützen zunächst durch ein Druckgefälle diese Kaltluftströmung. Die aus dem oberen Tal der Wupper stammende große nächtliche Kaltluftzufuhr kommt erst in der späten Nacht von Beyenburg über Barmen bis Elberfeld voran. Die westlichen Ortslagen weisen die geringste Kaltluftzufuhr im Tal der Wupper auf. Durch eine allmähliche Erwärmung der von Osten über das Tal der Wupper einfließenden Kaltluft im Bereich von Barmen erreichen die kalten Luftschichten nur zum Ende einer idealen Strahlungsnacht auch das Zentrum von Elberfeld.

Elberfeld erreichen Kaltluftströme unterschiedlicher Größenordnung und aus unterschiedlicher Richtung zu unterschiedlichen Zeiten. Auf den südlich von den Stadtbezirken Elberfeld und Vohwinkel gelegenen Freiflächen entsteht bei geeigneten Bedingungen Kaltluft, die geländefolgend in die eingeschnittenen Talbereiche strömt. Die Talbereiche werden schnell mit Kaltluft aufgefüllt. Da in den südlichen Bereichen weiterhin Kaltluftzuflüsse stattfinden, wird die Kaltluft im Taleinschnitt der Wupper nach Norden gedrängt. In den dichtbebauten und erwärmten Stadtbezirken Elberfeld und Vohwinkel wird die zuströmende Kaltluft aufgezehrt, so dass der von Süden kommende Kaltluftstrom in die Talsenke von Wuppertal einströmen kann, obwohl der Talboden der Wupper dort leicht nach Süden geneigt ist. Dies hat zur Folge, dass es im Stadtteil Arrenberg zeitweise zum Zusammenströmen von Kaltluft (Konvergenz mit Kaltluftstau) kommt. Dabei strömt sowohl Kaltluft aus dem Tal der Wupper oberhalb von Wuppertal als auch solche aus dem Tal unterhalb von Wuppertal und darüber hinaus Kaltluft aus unterschiedlichen kleinen Seitentälern zusammen; diese Kaltluftströme können sich gegenseitig blockieren und die Belüftung reduzieren.

- Die hohe bauliche Dichte entlang der Talachse behindert den Kaltluftabfluss und bewirkt Aufzehrungstendenzen der Kaltluft.
- Obere Hangbereiche, die Freiland oder nur lockere Bebauung aufweisen, bilden Kaltluftabflüsse aus, dichte Hangbebauung schränkt die Kaltluftströmungen ein.
- Die aus dem oberen Tal der Wupper stammende große nächtliche Kaltluftzufuhr kommt erst in der späten Nacht von Beyenburg über Oberbarmen und Barmen bis Elberfeld voran und erwärmt sich deutlich auf dem Weg.
- Die westlichen Stadtteile, insbesondere Elberfeld und Arrenberg sind deutlich schlechter mit der Kaltluft des Hauptstroms aus Osten versorgt.

2.3 Verteilung der Klimatope im Wuppertaler Stadtgebiet im IST-Zustand und im Zukunftsszenario 2050

Die im Folgenden erläuterte rechnergestützte Modellierung der Auswirkung anthropogener Beeinflussung des Klimas im städtischen Raum in Form einer berechneten Klimatopkarte bietet einige Vorteile. Die erfassten Daten bleiben in einer konsistenten Form gespeichert und erleichtern damit eine Fortführung des Kartenmaterials. Durch die Festlegung eines einheitlichen Analyseansatzes und eine nachvollziehbare Gewichtung können subjektive Einflüsse reduziert bzw. verifiziert werden. Im Ergebnis präsentiert sich eine berechnete Klimatopkarte detailliert und räumlich hoch aufgelöst. Es existieren keine starre Grenzen zwischen den Klimatopen, die die Interpretation eines Übergangsbereichs erfordern würden. Die digitale Klimatopkarte weist diesen Übergangsbereich durch eine Verzahnung von verschiedenen Klimatopen aus. Hierdurch wird eine Darstellung erreicht, welche die Stadtstrukturen im klimatischen Sinne realitätsnäher abbilden kann.

Für die Berechnung werden folgende Eingangsdatensätze in digitaler Form benutzt:

- Realnutzung des Untersuchungsgebietes (siehe Abb. 2.1)
- Karte der relativen nächtlichen Lufttemperaturverteilung in 2 m Höhe während einer sommerlichen Strahlungswetterlage (siehe Abb. 2.7)
- Abbildung der Oberflächentemperaturen (IR-Aufnahmen) (siehe Abb. 2.8)

Unter dem Begriff Klimatop sind Flächen mit vergleichbaren mikroklimatischen Verhältnissen zu verstehen. Freiland-, Wald-, Gewässer-, Parkklimatope sowie Gewerbe- und Industrieflächen werden auf Grund ihrer inhaltlichen Definition ausschließlich mit Hilfe der Daten der Nutzungsstruktur abgegrenzt. Im GIS sind diese Flächen durch eine Reklassifikation oder Datenbankabfrage leicht darstellbar. Für Bereiche mit Bebauung ist die Einteilung in Klimatope jedoch nicht so einfach durchführbar, da diese Gebiete ausgesprochen heterogene Strukturen bilden. Um die Zuordnung zu einem der Vorstadt-, Siedlungs-, Stadt- oder Innenstadtklimatope zu klären, ist es notwendig, die thermische Situation des jeweiligen Ortes zu berücksichtigen. In der Abbildung 2.14 ist der Ablauf zur Erstellung der Klimatopkarte für die Stadt Wuppertal zusammengefasst dargestellt.

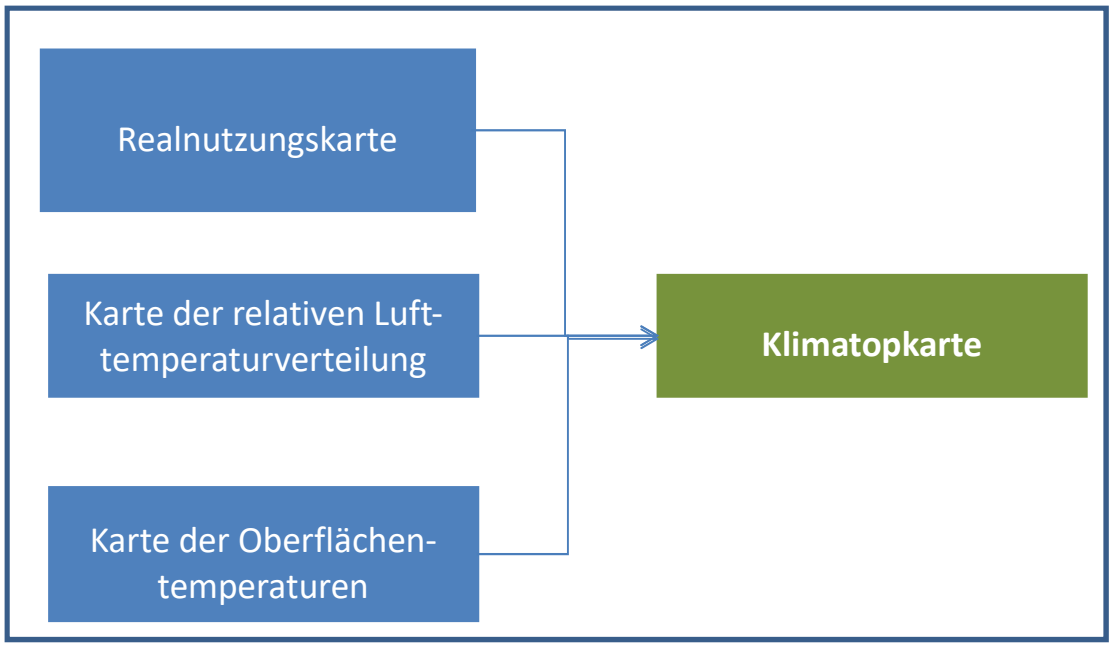


Abb. 2.14 Ablauf zur Berechnung der Klimatope im Stadtgebiet von Wuppertal

Um zu bestimmen, welche Areale in das Klimatop der lockeren Bebauung, in das Siedlungs-, Stadt- oder Innenstadtklimatop einzuordnen sind, muss für jedes dieser Klimatope einzeln eine Berechnung durchgeführt werden, welche den Grad der Eignung widerspiegelt. Da die Inhalte der Eingangskarten, also die Nutzungsstruktur, die Lufttemperaturverteilung und die Karte der Oberflächentemperaturen, nicht direkt vergleichbar, im Sinne der rechnergestützten Verarbeitung mit GIS nicht untereinander verrechenbar sind, müssen die Eingangsparameter zunächst standardisiert werden. Diese Standardisierung wird im Wertebereich von 0 bis 100 vorgenommen und dient gleichzeitig als Maß für die Bestimmung der Eignung der jeweiligen Parameter (0 = keine Eignung, 100 = sehr gute Eignung) für die Zuordnung zu einem der vier Klimatope. Auf diesem Weg wird für jedes der betroffenen Klimatope eine Karte erstellt, welche für jeden Bildpunkt die jeweilige Eignung darstellt. Die anschließende Verschneidung mit GIS, also die Zuordnung eines jeden Bildpunktes zu dem an genau diesem Punkt dominanten Klimatop, erzeugt eine Darstellung, in welcher eine überprüfbare räumliche Verteilung des Klimatops der lockeren Bebauung oder des Siedlungs-, Stadt- und Innenstadtklimatops abgebildet ist. Im Folgenden werden die aufgrund der Flächennutzungskartierung abgegrenzten Klimatope der Gewässer-, Freiland-, Wald-, Park-, Gewerbe- und Industriebereiche den berechneten Klimatopen überlagert, womit eine Gesamtdarstellung der Verteilung der Klimatope im Stadtgebiet erreicht wird (Abb. 2.15). Die Charakteristiken der einzelnen Klimatope werden im Folgenden kurz beschrieben.

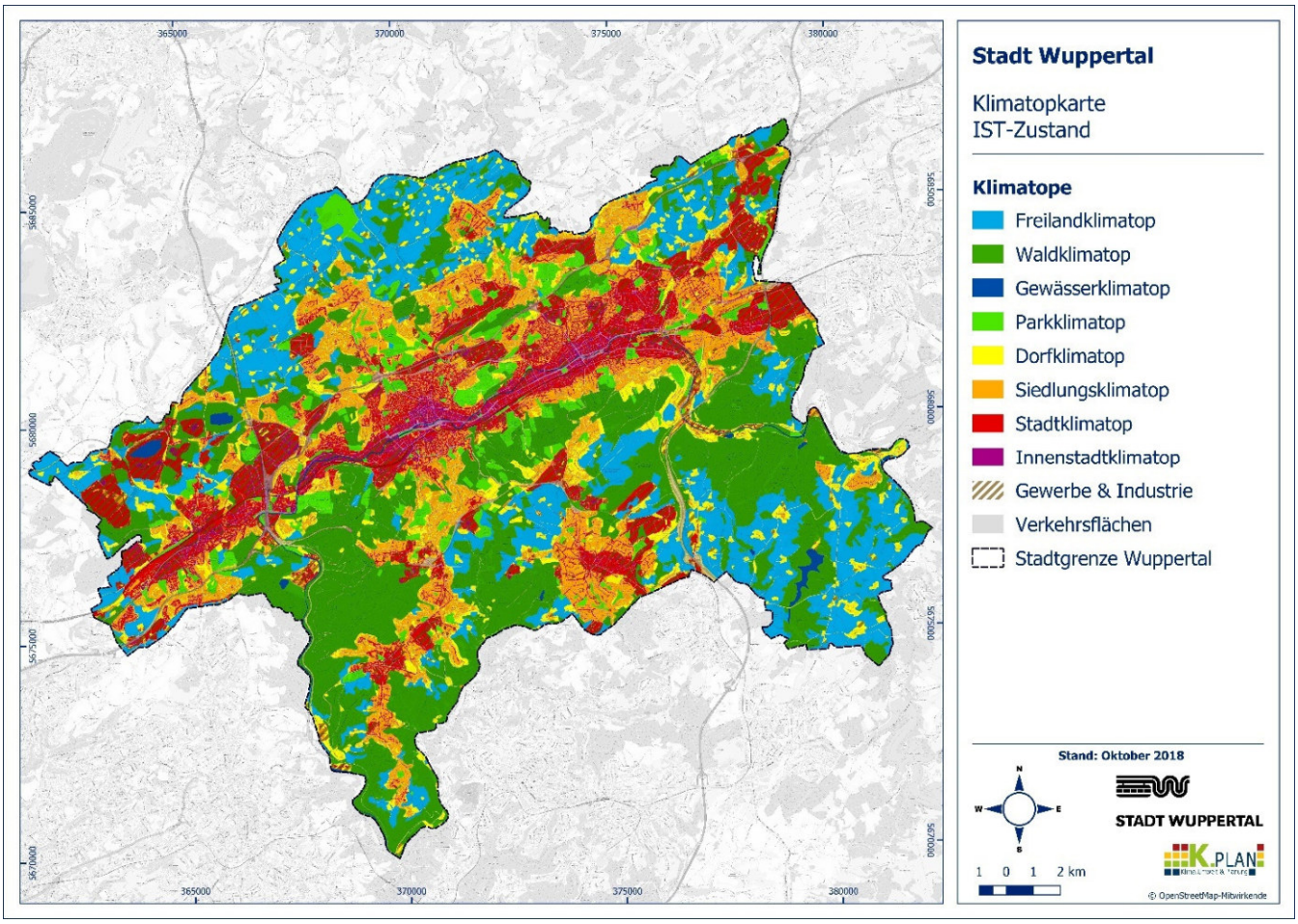


Abb. 2.15 Klimatopkarte der Stadt Wuppertal im IST-Zustand
(Die Klimatopkarte ist in hoher Auflösung auch im digitalen Anhang des Berichts einzusehen)

Freilandklimatop

Dieser Klimatoptyp gibt die Verhältnisse des Freilandes wieder. Freilandklimate stellen sich über den überwiegend landwirtschaftlich genutzten Außenbereichen ein und zeichnen sich durch ausgeprägte Tagesgänge von Temperatur und Feuchte sowie nur wenig lokal beeinflusste Windströmungsbedingungen aus. Da zudem in diesen Bereichen überwiegend keine Emittenten angesiedelt sind, handelt es sich um bedeutsame Frischluftgebiete mit einer hohen Ausgleichswirkung für die in bioklimatischer und immissionsklimatischer Hinsicht belasteten Gebiete mit Wohnbebauung. Bei geeigneten Wetterlagen tragen landwirtschaftlich genutzte Flächen darüber hinaus zur Kaltluftbildung bei.

Waldklimatop

Typische Ausprägungen des Waldklimas sind stark gedämpfte Temperatur- und Feuchteamplituden, die eine Folge des Energieumsatzes im Stammraum (verminderte Ein- und Ausstrahlung) sind. Waldflächen erweisen sich daher aufgrund sehr geringer thermischer und bioklimatischer Belastungen als wertvolle Regenerations- und Erholungsräume. Bei geringen oder fehlenden Emissionen sind Waldflächen darüber hinaus Frischluftentstehungsgebiete, können jedoch aufgrund der hohen Rauhigkeit im Gegensatz zu den unbewaldeten Freiflächen keine Luftleitfunktion übernehmen. Daher zeichnen sie

sich auch durch niedrige Windgeschwindigkeiten im Stammraum aus. Oberhalb des Kronenraumes, der auch als Hauptumsatzfläche für energetische Prozesse betrachtet werden kann, oder im Stammraum ohne oder mit nur geringem Unterwuchs kann auch bei Waldbeständen Kaltluft gebildet werden. Hervorzuheben ist weiterhin die Filterkapazität der Waldflächen gegenüber Luftschadstoffen. Durch Ad- und Absorption vermögen Waldflächen gas- und partikelförmige Luftschadstoffe auszufiltern.

Gewässerklimatop

Gewässerklimate zeichnen sich tagsüber durch deutlich reduzierte Erwärmungsraten auf, so dass bei gleichzeitig hoher Verdunstung der fühlbare Wärmestrom herabgesetzt wird. Während Wasserflächen am Tage relativ kühl sind, sind sie nachts relativ warm. Dieses Phänomen ist auf die hohe Wärmespeicherkapazität des Wassers zurückzuführen, die nur schwache tagesperiodische Temperaturunterschiede an der Gewässeroberfläche ermöglicht. Die Lufttemperaturen in diesem Klimatop weisen einen ausgeglichenen Tages- und Jahresgang mit abgeschwächten Minima und Maxima auf. Ein zusätzlich positiver Effekt für die klimatische Situation wird durch die geringe Rauhigkeit von Gewässerflächen bewirkt, wodurch Austausch- und Ventilationsverhältnisse begünstigt werden.

Parkklimatop

Parkklimate sind gekennzeichnet durch aufgelockerte Vegetationsstrukturen mit Rasenflächen und reich strukturierten lockeren Gebüsch- oder Baumbeständen. Sowohl tagsüber als auch in der Nacht treten die Park- und Grünanlagen als Kälteinseln hervor (Oaseneffekte). Die klimatischen Verhältnisse von Park- und Grünanlagen sind zwischen Freiland- und Waldklima einzustufen. In Abhängigkeit von der Größe der Parkanlagen, deren Ausstattung sowie von der Anbindung an die Bebauung variiert die klimatische Reichweite von Parkflächen. Die Auswirkungen in die Randbereiche der Umgebung sind meist gering und auf die direkt umgebende Bebauung beschränkt.

Klimatop der lockeren Bebauung

Das Klima der lockeren Bebauung bildet den Übergangsbereich zwischen den Klimaten der bebauten Flächen und den Klimaten des Freilandes. Charakteristisch für Flächen, die diesem Klimatop zugeordnet werden, sind in erster Linie Bebauungsstrukturen mit einem geringeren Versiegelungsgrad und starker Durchgrünung mit Baum- und Strauchvegetation. Dieser Klimatoptyp ist charakteristisch für dörfliche Einzelsiedlungen und Vorstadtsiedlungen, die im unmittelbaren Einflussbereich des Freilandes stehen und dadurch günstige bioklimatische Verhältnisse aufweisen. Das Klima in den Vorstadtsiedlungen zeichnet sich durch eine leichte Dämpfung der Klimaelemente Temperatur, Feuchte, Wind und Strahlung aus. Die Windgeschwindigkeit liegt niedriger als im Freiland, aber höher als in der Innenstadt.

Siedlungsklimatop

Das Siedlungsklima unterscheidet sich vom Klima der lockeren Bebauung in erster Linie durch zwei Aspekte: zum einen durch eine dichtere Bebauung und zum anderen durch einen geringeren Grünflächenanteil. Dennoch handelt es sich um Bereiche mit einer mäßigen Bebauung und einer relativ guten Durchgrünung. Hieraus resultiert eine nur schwache Ausprägung von Wärmeinseln, und es werden ein

ausreichender Luftaustausch sowie in der Regel gute bioklimatische Bedingungen in diesen Stadtbezirken gewährleistet. Charakteristisch für die dem Siedlungsklimatop zuzuordnenden Wohngebiete ist, dass die stadtklimatischen Effekte nur einen geringen und selten belastenden Ausprägungsgrad erreichen. Dies ist nicht zuletzt auch eine Folge des Auftretens von Überlagerungseffekten durch geländeklimatische Faktoren wie Kaltluftströme oder Belüftung über Luftleitbahnen.

Nachts zeichnen sich die Gebiete durch eine deutliche Abkühlung aus, tagsüber kommt es nur zu leichten Erwärmungsraten. Das Windfeld weist Strömungsveränderungen auf, die meist nicht erheblich sind. Durch die relative Nähe zu regionalen und lokalen Ausgleichsräumen ist eine Frischluft- und Kaltluftzufuhr auch während windschwacher Wetterlagen gewährleistet.

Stadtklimatop

Kennzeichnend für das Stadtklima ist eine überwiegend dichte, geschlossene Zeilen- und Blockbebauung mit meist hohen Baukörpern und engen Straßen. Während austauscharmer Strahlungsnächte kommt es bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad, die hohen Oberflächenrauhigkeiten und geringen Grünflächenanteile zu einer Zunahme der Überwärmungstendenz. Die dichte städtische Bebauung verursacht ausgeprägte Wärmeinseln mit eingeschränkten Austauschbedingungen, die z. T. mit ungünstigen bioklimatischen Verhältnissen gekoppelt sind.

Innenstadtklimatop

Das Innenstadtklimatop zeichnet sich durch die Ausbildung einer deutlichen Wärmeinsel und somit, bezogen auf die Lufttemperaturen im Vergleich mit dem Freiland, einer hohen Überwärmung aus. Kennzeichnend für die Nutzungsstruktur ist eine ausgesprochen dichte Bebauung mit einem geringen Grünanteil. Allerdings kann bei der Zuordnung des Eignungsgrades auch hier wiederum nicht ausgeschlossen werden, dass vereinzelte Bebauungsstrukturen, beispielsweise durch bewusst angelegte Bepflanzungen, eine aufgelockerte Struktur aufweisen.

Industrie- und Gewerbeflächen

Die Produktions-, Lager- und Umschlagstätten der Industrie- und Gewerbegebiete prägen das Mikroklima. Bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad kommt es verstärkt zu bioklimatischen Konfliktsituationen. Die insgesamt hohe Flächenversiegelung bewirkt in diesen Bereichen eine starke Aufheizung tagsüber und eine deutliche Überwärmung nachts. Der nächtliche Überwärmungseffekt kann hier eine dem Stadtklimatop analoge Ausprägung erreichen. Für die Klimatopkarte wurde berechnet, welchem Klimatop (Innenstadt, Stadt, Siedlung oder lockere Bebauung) diese Flächen aufgrund ihrer thermischen Ausprägung zugeordnet werden können. Aufgelockerte und durchgrünte Gewerbeflächen werden dabei eher den Siedlungs- bis Stadtklimatopen zugeordnet, hoch versiegelte Industriegebiete zeigen die Ausprägungen des Stadt- bis Innenstadtklimatops. Zur Unterscheidung zu den Wohnbauflächen wurden die hier jeweils berechneten Klimatope zusätzlich mit einer Schraffur zur Kennzeichnung als Gewerbe- oder Industriegebiet überlagert.

Die räumliche Verteilung der Klimatope im Stadtgebiet von Wuppertal zeigt im Wesentlichen eine Dreiteilung auf:

- Im Tal der Wupper dominieren aufgrund der intensiven Bebauung die siedlungsbezogenen Klimatope:
  - Stadt- und Innenstadtklimatope mit einer dichten bis sehr dichten Bebauung und gewerbliche und industriellen Nutzungen
  - Hangbereiche werden vom Siedlungsklimatop dominiert
- Außerhalb des Talbereichs der Wupper dominieren weitgehend Freiraumnutzungen:
  - Wald- und Freilandklimatope
  - Kleinräumiger Siedlungsflächen, die sich aus wenigen Gebäuden zusammensetzen und überwiegend der Landwirtschaft zuzuordnen sind
- In den Höhenlagen bestehen einige Siedlungskerne mit dichter Bebauung, wie z.B. im Süden die Stadtbezirke Ronsdorf, Cronenberg, Langerfeld-Beyenburg und im Norden der Stadtbezirk Uellendahl-Katernberg:
  - Aufgrund ihrer Höhenlage, der umgebenden Freiräume und der geringeren räumlichen Ausdehnung sind hier im Vergleich zu den Tallagen günstigere klimatische Verhältnisse vorherrschend.

Zukunftsszenarien für das Klima

Klimaänderungen sind ein bekanntes Phänomen in der Erdgeschichte – auf Kaltzeiten folgen Warmzeiten und umgekehrt. Diese globalen Veränderungen wirken sich jeweils drastisch auf unseren Planeten und seine Lebewesen aus. Heute leben wir in Mitteleuropa in einem gemäßigten Klima, das jedoch immer auch Schwankungen unterliegt. Seit Jahrzehnten untersuchen Klimaforscher diese Trends, um für die Zukunft Prognosen zum Klimawandel ableiten zu können. Auch wenn die Meinungen der Forscher im Detail auseinander gehen, so ist davon auszugehen, dass in Europa die Temperaturen in Zukunft weiter steigen und extreme Wetterereignisse häufiger auftreten werden. Im Vergleich zu den Klimaänderungen der Erdgeschichte ist die Geschwindigkeit, mit der der globale Temperaturanstieg heute voranschreitet, besonders hoch. Hauptgrund für diesen Trend ist die enorme Freisetzung von so genannten Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan, die vor allem von Industrie, Haushalten, Verkehr und der Landwirtschaft ausgehen. Trotz aller Bemühungen der letzten Jahre, die Treibhausgasbelastung zu verringern, ist der Trend zur Klimaerwärmung mit seinen Folgen im besten Falle zu bremsen, nicht aber aufzuhalten oder gar rückgängig zu machen. Daher muss sich unsere Region neben allen Bemühungen zum Klimaschutz auch auf langfristige Veränderungen des Klimas einstellen. Der Klimawandel betrifft auch Wuppertal. Nicht der mittlere globale Temperaturanstieg von rund 2 bis 4 Kelvin (Temperaturänderungen werden in Kelvin angegeben, Schrittweite entspricht der °C-Skala) in den nächsten 50 bis 100 Jahren ist von Bedeutung für Klimaanpassungsmaßnahmen, sondern die aus der Verschiebung der Temperaturverteilung resultierende zunehmende Hitzebelastung in den Innenstädten. Für die Berechnung der Klimatopkarte im Zukunftsszenario 2050 wurden die regionalen Prognosen zur Veränderung der Lufttemperaturen in den nächsten rund 40 Jahren ausgewertet. Dabei bezieht sich das Zukunftsszenario 2050 nicht auf ein einzelnes Jahr, sondern auf die Dekadenmittelwerte des Zeitraums 2050 – 2060.

Definierte Tage mit Wärme- oder Hitzebelastungen:

- Sommertag: Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C
- Heißer Tag: Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C
- Tropennacht: Minimum der Lufttemperatur ≥ 20 °C

Die regionalen Klimaprojektionen des LANUV NRW zeigen deutliche Signale für einen zukünftigen Anstieg der Lufttemperaturen in Nordrhein-Westfalen. Für die nahe Zukunft bis 2050 werden Zunahmen der Jahresmitteltemperatur von 0,8 K bis 1,7 K projiziert, für die ferne Zukunft bis 2100 von 2,3 K bis 3,8 K. Für die Herbst- und Wintermonate fallen die Steigerungen der Temperatur etwas höher aus, für den Frühling etwas geringer. Die Genauigkeit der Werte (Nachkommastellen) sollte vor dem Hintergrund der Modellunsicherheiten vernachlässigt werden, daher geben die Ergebnisse eher einen Überblick über die grundlegend zu erwartenden Klimaänderungen.

Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V. (PIK) hat die zeitlichen und räumlichen Veränderungen des Klimas mittels des regionalen Klimamodelles STARS für die Szenarien RCP 8.5 und 2.6 berechnet. Um die Spannbreite der möglichen zukünftigen Entwicklung darzustellen, wurden mehrere Realisierungen aus eintausend des jeweiligen Szenariums ausgewählt. Diese Modelle bilden alle Treiber anthropogener Treibhausgasemissionen ab und setzen sie in konsistente Szenarien zukünftiger Treibhausgasemissionen und resultierender Strahlungsantriebe um. Es gibt dabei vier verschiedene Szenarienpfade, die darauf beruhen, dass „keine“ bis „viele“ Klimaschutzmaßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgase umgesetzt werden. Auf der Grundlage der RCP-Szenarien wurden mit Hilfe von Klimamodellen neue Projektionen möglicher Klimaveränderungen im 21. Jahrhundert und darüber hinaus berechnet. Die Regionalisierung der Klimaszenarien erfolgte mit dem am PIK entwickelten Klimamodell STARS. Als Grundlage für die Eingabe in das regionale Klimamodell STARS wurden die über Deutschland gemittelten Temperaturentwicklungen zwischen 2011 und 2100 herangezogen.

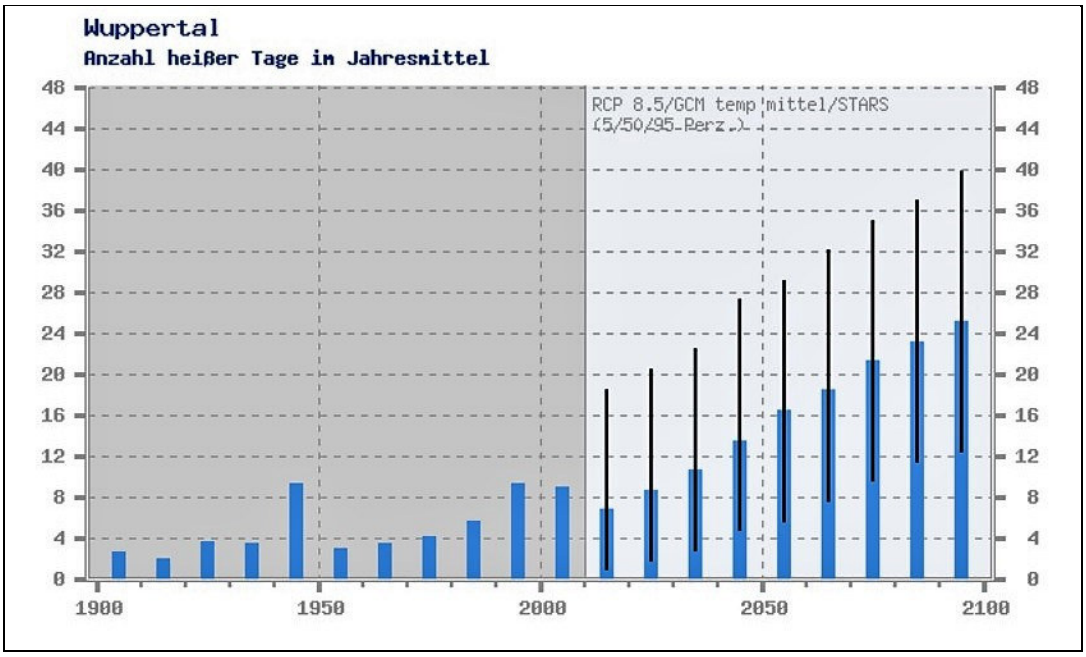


Abb. 2.16 Klimawandel: Anstieg der Anzahl heißer Tage bis zum Jahr 2100 (Quelle: PIK, www.klimafolgenonline.com)

Für Wuppertal zeigen die Klimaprojektionen des PIK einen deutlichen Anstieg der Sommertemperaturen bis zum Jahr 2100. Neben einem starken Anstieg der Anzahl der Sommertage (T ≥ 25 °C) und der Tropennächte, in denen die Temperaturen nicht unter 20 °C sinken, fällt der extrem hohe Anstieg der Anzahl der Heißen Tage mit Lufttemperaturen über 30 °C ins Gewicht (Abb.2.16). Während sich in den vergangenen 100 Jahren die Anzahl schon verdoppelt hat auf aktuell rund 10 Tage pro Jahr, kommt in den nächsten 40-50 Jahren nochmal ein Anstieg von mindestens 100 % dazu. Damit können im Zukunftsszenario 2051-2060 während sommerlicher Hitzeperioden bis zu 20 Hitzetage mit Lufttemperaturen ≥ 30 °C auftreten. Im Ausnahmesommer 2018 gab es bereits 19 Heiße Tage.

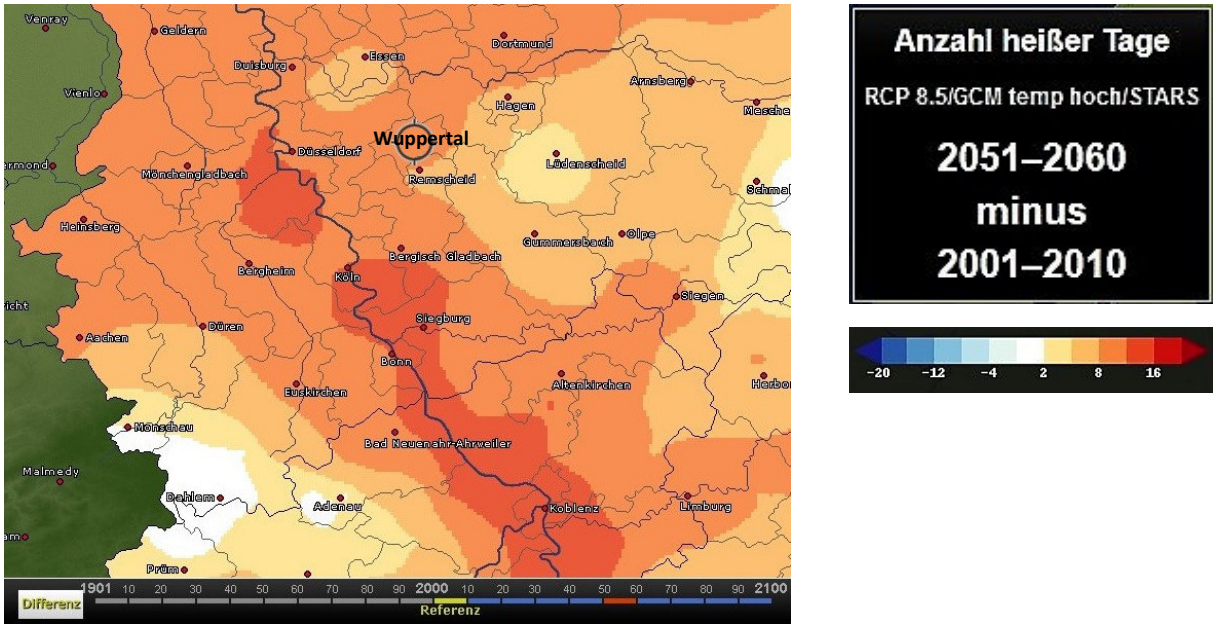


Abb. 2.17 Zunahme heißer Tage im Zukunftsszenario 2050 in der Region um Wuppertal (Quelle: PIK, www.klimafolgenonline.com)

In der Abbildung 2.17 ist die räumliche Verteilung der Zunahme der heißen Tage mit Lufttemperaturen ≥ 30 °C in der Dekade 2050-2060 im Vergleich zur Dekade 2000-2010 dargestellt. Innerhalb von 50 Jahren nimmt die Anzahl um 8 bis 12 Tage im Sommer zu. Abbildung 2.18 zeigt die Verschiebung des zukünftigen Klimas hin zu mehr und stärkerer Hitze. Insbesondere die Zunahme der Streuung, also das häufige Auftreten von Extremereignissen, führt dazu, dass die Hitze in Zukunft um ein Vielfaches zunimmt, während die kalten Wintertemperaturen nur eine geringe Änderung zeigen.

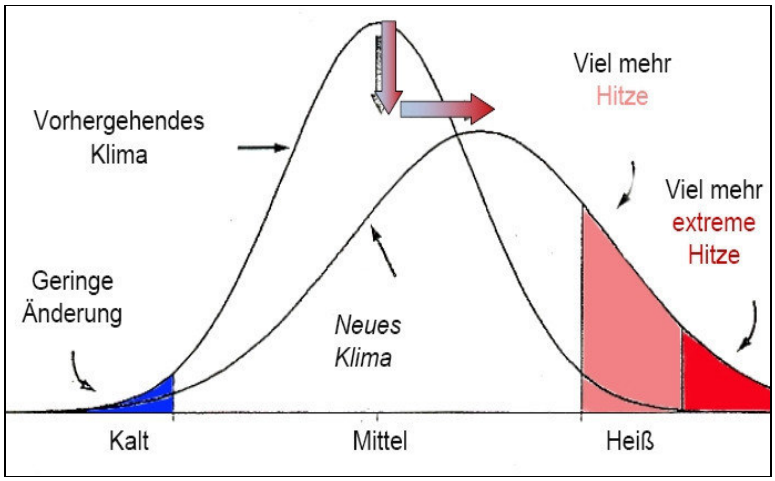


Abb. 2.18 Zunahme von Mittelwert und Streuung der Lufttemperaturen im zukünftigen Klima (Hupfer 2006)

Die klimatischen Unterschiede zwischen den Innenstadtbereichen von Wuppertal und dem Außenbereich treten während der Hitzeperioden nachts besonders deutlich hervor. Diese Nächte sind belastend für den menschlichen Organismus und können gesundheitliche Schäden verursachen. Die Auswertung verschiedener Hitzewellen in Städten zeigt, dass im Verlauf einer mehrtägigen Hitzewelle die nächtlichen Lufttemperaturunterschiede zwischen den Innstädten und der unbebauten Umgebung von Tag zu Tag ansteigen und schon nach drei bis vier Tagen um 2 bis 4 Kelvin zugenommen haben. Entsprechend der Versiegelungsrate und der Dichte der Bebauung wurde deshalb der Ist-Wert der relativen Lufttemperaturverteilung (Abb. 2.7) während sommerlicher Strahlungsnächte im Freiland nicht, aber in der Bebauung je nach Bebauungsdichte erhöht.

Zusätzliche Änderungen könnten sich aufgrund von zukünftigen Bauprojekten oder veränderten Flächennutzungen ergeben. Hierzu wurden die städtebaulichen Vorhaben und Projekte aus dem Arbeitsplan (Stand 03.2018) des Stadtentwicklungsprojektes ausgewertet. Für die Berechnung der Klimatopkarte im Zukunftsszenario 2050 wurde alle Wohnbaupotenzialflächen, Gewerbepotenzialflächen, sonstige städtebauliche Projekte und der Ausbau von Park- und Grünanlagen umgesetzt. Die für die Zukunftsprojektion berücksichtigten Flächen im Stadtgebiet von Wuppertal sind in der Abbildung 2.19 ausgewiesen.

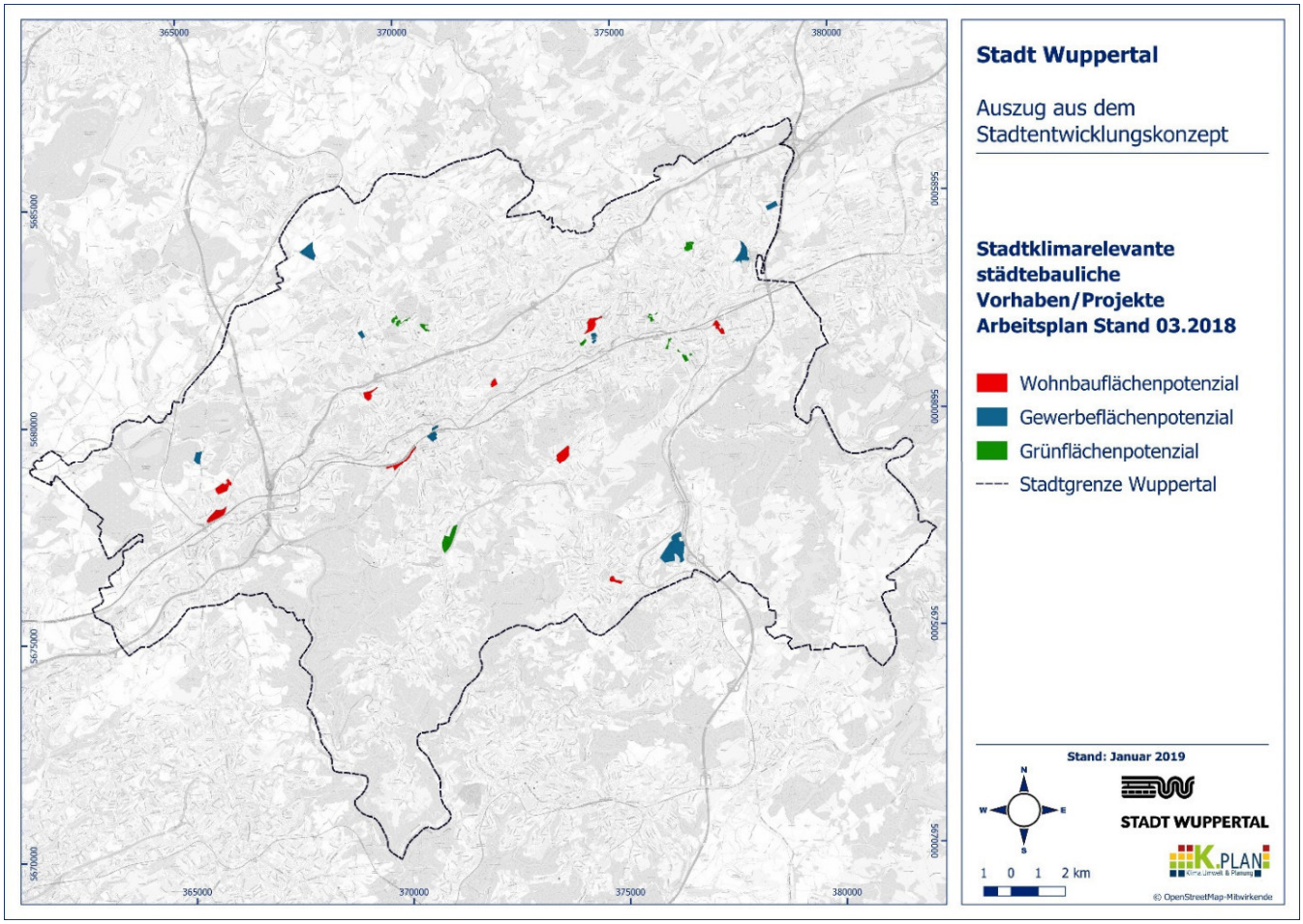


Abb. 2.19 Zur Neuberechnung der Zukunfts-Klimatopkarte herangezogenen Flächenentwicklungen aus dem Stadtentwicklungskonzept der Stadt Wuppertal

Auf dieser Grundlage wurde mit gleichbleibenden Gewichtungen und Grenzwerten wie zur Berechnung der digitalen Klimatopkarte im IST-Zustand eine Klimatopkarte der Zukunftsprojektion für 2050 berechnet. Als Folge zeigt sich im Zukunftsszenario 2050 eine aufgrund der Hitzezunahmen und der Flächennutzungsumwidmung veränderte Klimatopverteilung im Wuppertaler Stadtgebiet (Abb. 2.20).

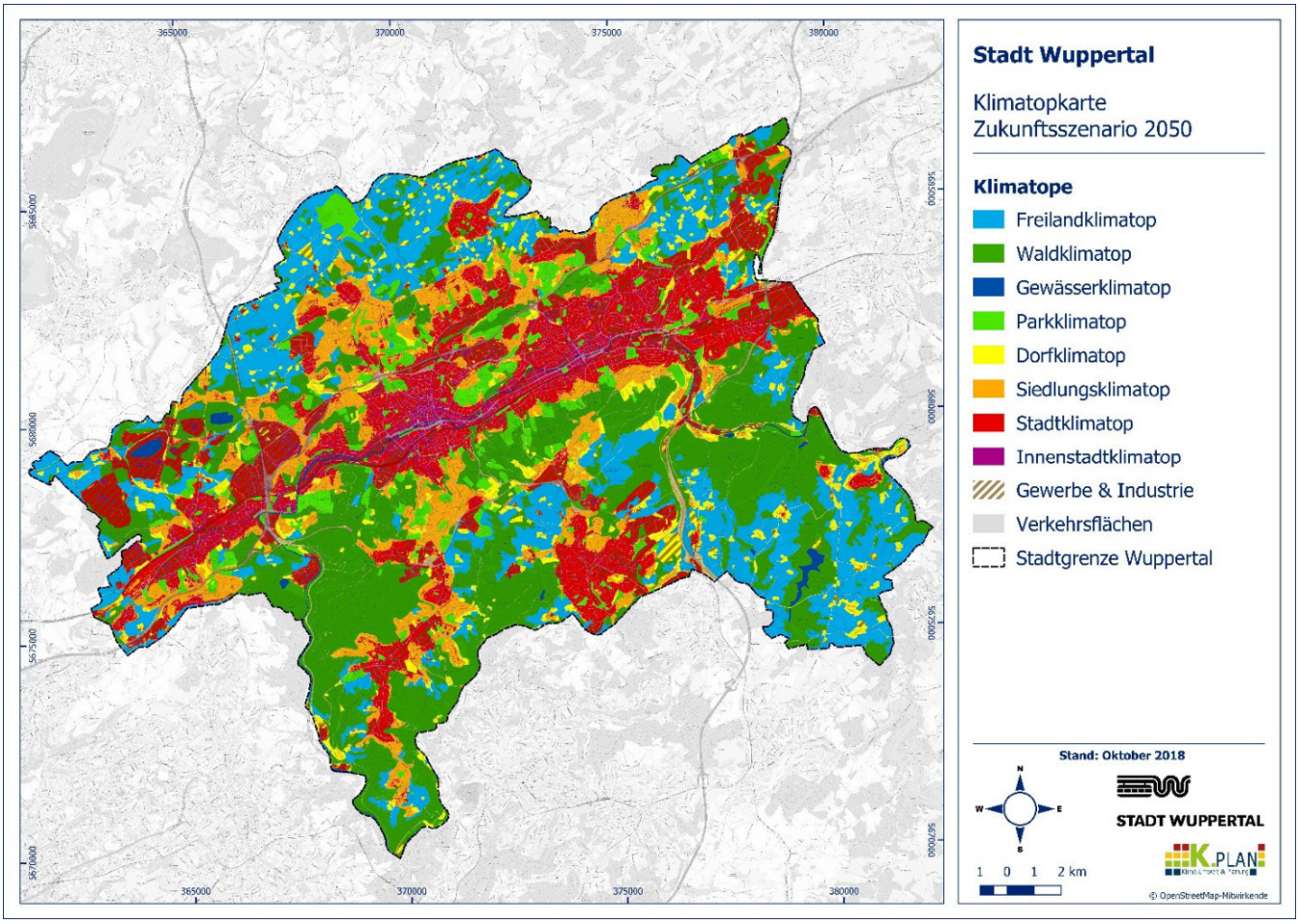


Abb. 2.20 Klimatopkarte der Stadt Wuppertal im Zukunftsszenario 2050 (Die Klimatopkarte Zukunftsszenario 2050 ist in hoher Auflösung auch im digitalen Anhang des Berichts einzusehen)

- Die Klimatopkarte im Zukunftsszenario 2050 (Abb. 2.20) zeigt eine starke Zunahme des Stadtklimatops zu Lasten des Siedlungsklimatops sowohl im Siedlungsband entlang des Tals der Wupper wie auch in den größeren im Außenbereich liegenden Siedlungen, wie Ronsdorf oder Cronenberg.
- Das Klimatop der lockeren Bebauung bleibt im Zukunftsszenario weitgehend von Veränderungen verschont. Hier kann die weitgehend kühle Umgebung der Freilandbereiche den zunehmenden Hitzeeintrag noch kompensieren.
- In den bisherigen Bereichen des Siedlungsklimatops, insbesondere in räumlicher Nähe zu innerstädtischen Gebieten oder Gewerbe- und Industrieflächen, verstärkt sich die im IST-Zustand schwache Ausprägung der Überwärmung durch die Zunahme der Hitzebelastung im Zukunftsszenario.

2.4 Verteilung der aktuellen und zukünftigen Hitzebelastungen im Stadtgebiet von Wuppertal

Um Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel gezielt ein- und möglichst effektiv umzusetzen, sollten die Gebiete und Bereiche identifiziert werden, die eine besondere Sensitivität gegenüber Hitze als Folge des Klimawandels aufweisen. Das sind Gebiete, in denen aufgrund der sozialen, ökonomischen und naturräumlichen Rahmenbedingungen vor Ort besondere Probleme durch die klimatischen Änderungen zu erwarten sind. Auf Grundlage der vorrangegangenen Analysen lassen sich in Wuppertal Gebiete identifizieren, die aufgrund der klimatischen Situation bereits heute als Belastungsräume unter dem Aspekt „Hitze“ bezeichnet werden müssen.

Aufgrund der durchgehenden Bebauung und hohen Versiegelung von Oberflächen gibt es im Wuppertaler Stadtgebiet Bereiche, die sich im Sommer besonders stark aufheizen. Dies ergibt sich dadurch, dass der bebaute Raum Wärme weitaus stärker speichert, als dies für Flächen im unbebauten Umland gilt, durch mangelnde Durchlüftung im innerstädtischen Raum und durch verringerte Abkühlung durch geringere Wasserverdunstungsraten in hoch versiegelten Gebieten. Diese thermische Belastung resultiert neben hohen Strahlungstemperaturen am Tage sowohl aus der städtischen Wärmeinsel, als auch aus der mangelnden Durchlüftung, wodurch ein Abtransport der warmen Luft aus der Stadt bzw. die Advektion kühlerer Luft aus dem Umland erschwert wird. Große Temperaturunterschiede von bis zu 8 Kelvin in warmen Sommernächten zwischen Innenstadt und dem Umland sind die Folge. Dies führt in der Innenstadt vor allem dann zu einer belastenden Situation, wenn die Temperaturen nachts nicht mehr deutlich genug absinken. Die weiter zunehmende Klimaerwärmung wird in Zukunft häufiger zu längeren und stärker ausgeprägten Hitzeperioden auch in Wuppertal führen. Solche Gebiete, die bereits heute als belastend eingestuft sind, werden zukünftig noch stärker betroffen sein und sich in die Umgebung ausdehnen. Neben dem Siedlungsband in der Talachse gilt dies auch für die kleineren Siedlungskerne im Umland.

Grundlagen für die Abgrenzung von potentiellen Problemgebieten unter dem Aspekt der Hitzebelastung des Menschen liefern die Klimatope des „Innenstadtklimas“ und des „Stadtklimas“ der IST-Situation und des Zukunftsszenarios 2050 (siehe Abbildungen 2.15 und 2.19). Hier bilden sich aufgrund der hohen Versiegelung die städtischen Wärmeinseln so stark aus, dass es zu einer Belastung des menschlichen Organismus kommt. Zusätzlich wird die Durchlüftung durch die Bebauungsstrukturen behindert. In diesen Bereichen kommt es insbesondere in den sommerlichen Nachtstunden zu einer deutlichen Überwärmung im Vergleich zum unbebauten Umland.

In der Karte der Hitzebelastungen für die Stadt Wuppertal (Abb. 2.21) auf der nachfolgenden Doppelseite und im digitalen Anhang werden die Räume des Stadt- und des Innenstadtklimatops als Hitzeareale ausgewiesen. Die potentiellen Hitzeareale im IST-Zustand sind unterteilt in „Hitzeinsel“, dies entspricht dem Stadtklimatop, und „starke Hitzeinsel“, dies entspricht dem Innenstadtklimatop aus der neu berechneten Klimatopkarte der Stadt Wuppertal im IST-Zustand (Abb. 2.15). Sie liegen vorwiegend in der Talachse der Wupper, im Bereich der Gewerbe- und Industrieflächen und in kleinerer räumlicher Ausdehnung in den Kernbereichen der Siedlungen auf den Kuppen.

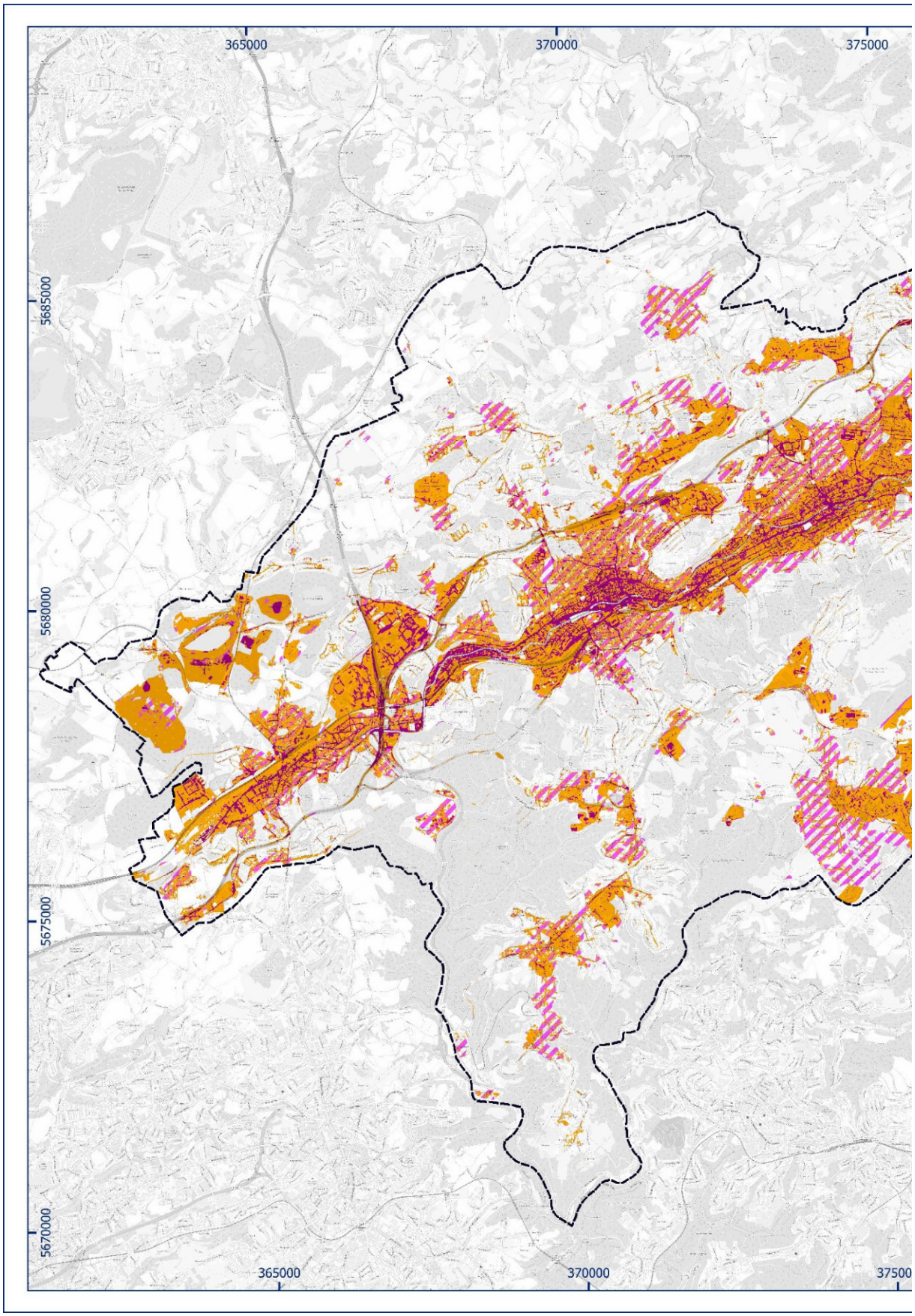
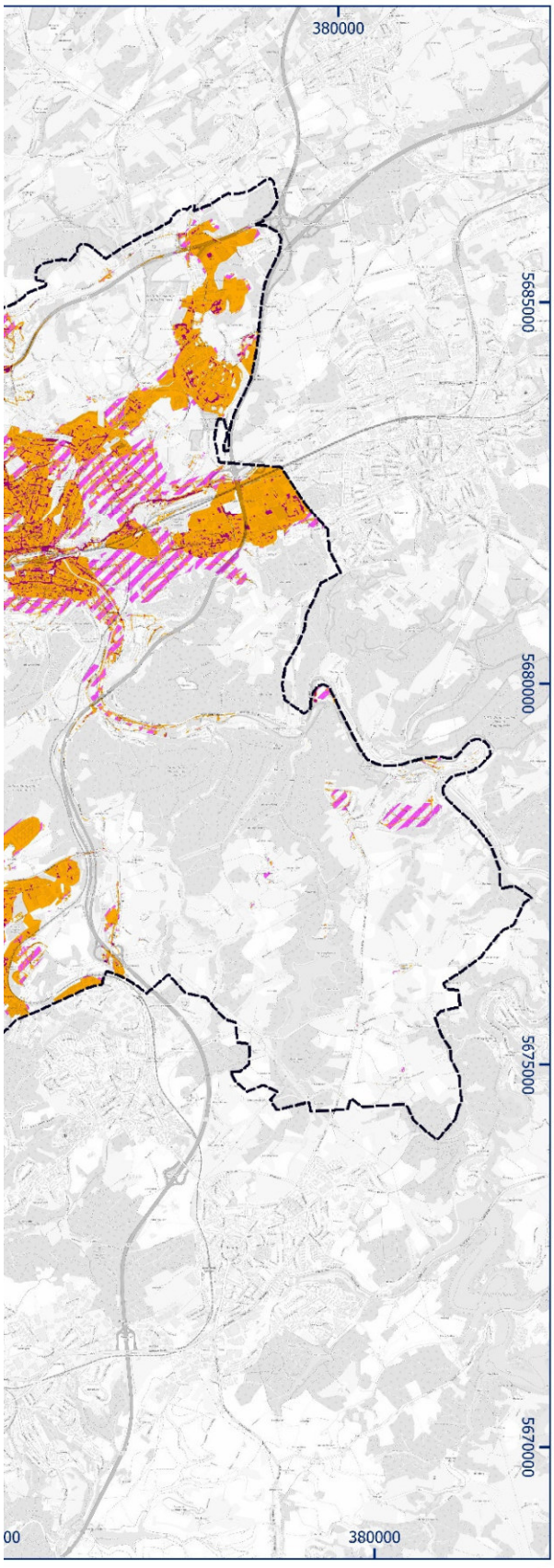


Abb. 2.21 Karte der aktuellen und zukünftigen Hitzebelastungen der Stadt Wuppertal (Die Hitzebelastungskarte ist in hoher Auflösung auch im digitalen Anhang des Berichts einzusehen)



Stadt Wuppertal

Karte der aktuellen und zukünftigen Hitzebelastungen

Hitzeareale

- Hitzeinsel im IST-Zustand
- starke Hitzeinsel im IST-Zustand
- Ausweitung der Hitzeinsel im Zukunftsszenario 2050
- Stadtgrenze Wuppertal

Stand: Oktober 2018

N
W
E
S

1 0 1 2 km

STADT WUPPERTAL

K.PLAN Klima.Umwelt & Planung

© OpenStreetMap-Mitwirkende

Es zeigt sich im Zukunftsszenario eine deutliche Ausweitung der Areale mit einer potentiellen Hitzebelastung im gesamten Stadtgebiet. Zukünftig können auch die umgebenden Stadtteile, die eine leicht erhöhte Bebauungsdichte aufweisen, zusätzlich von der Hitzebelastung aufgrund der Ausweitung der städtischen Wärmeinsel betroffen sein. Diese Flächen sind momentan noch überwiegend dem Siedlungsklimatop zugeordnet.

Abbildung 2.21 zeigt die Ausweitung der Hitzeareale in die Fläche des Wuppertaler Stadtgebietes von der IST-Situation (orange bis rot) bis zum Zukunftsszenario (lila-schraffiert). Die Ausweitung der Hitzebelastungen im Zukunftsszenario beruht auf dem Aufstieg von Gebieten des Siedlungs- und des Stadtklimatops in die jeweils höhere Klasse im Zukunftsszenario 2050. Es zeigt sich eine deutliche Ausweitung der Stadt- und Innenstadtklimatope im Stadtgebiet. Zukünftig können die Randbezirke des Siedlungsbandes in der Talachse zusätzlich von der Hitzebelastung aufgrund der Ausweitung der städtischen Wärmeinsel betroffen sein. Auch fallen zukünftig mehr Industrie- und Gewerbegebiete in die Bereiche mit einer potentiellen Hitzebelastung.

2.5 Verringerung der Hitzebelastung durch Umsetzung von Maßnahmenbündeln im Zukunftsszenario

Im Kapitel 2.3 wurden die Klimatopkarten des IST-Zustandes sowie der Zukunftsprojektion 2050 auf Grundlage der sommerlichen Temperaturerhöhung im Zukunftsszenario berechnet. Zusätzliche Änderungen aufgrund von zukünftigen Bauprojekten oder veränderten Flächennutzungen sind auf der Grundlage des Stadtentwicklungskonzeptes berücksichtigt. Im Folgenden soll gezeigt werden, dass eine Reduktion der bestehenden Hitzebelastung und der Hitzeausweitung im Zukunftsszenario durch die Umsetzung von Maßnahmenbündeln möglich ist. Die Abbildungen 2.22 bis 2.24 zeigen auf der Grundlage der Realnutzungskarte die Bereiche, in denen beispielhaft jeweils ein virtuell eingerechnetes Maßnahmenbündel umgesetzt wurde. Dabei wurde Wert gelegt auf realistisch umsetzbare Maßnahmen wie Anpflanzung von Straßenbäume, Dachbegrünungen und Entsiegelung von Plätzen und Innenhöfen sowie Wechsel des Bodenbelags. Auch das Einbringung von Wasser zur Erhöhung der Verdunstungsrate und die Reduzierung der Rauhigkeiten in den potenziellen Belüftungsbahnen, beispielsweise durch Entfernung von Strömungshindernissen, wurde simuliert.

Die Maßnahmenbündel wurden nicht flächendeckend umgesetzt, sondern konzentrieren sich auf Bereiche, die im Zukunftsszenario 2050 in die ausgewiesenen Hitzeareale fallen. In diesen im Moment noch zu einem „Übergangsbereich der Hitzebelastung“ gehörenden Flächen lässt sich durch Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen ein besonders hoher Effekt erzielen. Die gewählten Testgebiete für die Maßnahmenbündel können als Beispiel dienen für eine Übertragbarkeit der Klimaanpassungsmaßnahmen auf ähnlich strukturierte Stadtviertel. Deshalb wurde bei der Auswahl der Testgebiete darauf geachtet, verschiedenen Stadtstrukturen wie Wohngebiete und Gewerbeflächen sowohl in der Talachse wie auch in den Siedlungen auf den Höhen in die virtuellen Betrachtungen einzubeziehen.

Maßnahmenbündel 1: Verbesserung des Kaltluftzuflusses

- **Testgebiete** (siehe Markierungen in der Abb. 2.22): Bereich der Kaltluftzuflüsse
  - aus dem Tal der Ennepe über Langerfeld
  - aus dem Tal der Wupper bei Barmen
  - aus kleinen Nebentälern von Barmen über Elberfeld bis Arrenberg
- Simulierte **Maßnahmen**:
  - Beseitigung von Strömungshindernissen (einzelne Bauwerke)
  - Teilentsiegelung von Flächen in den Industrie- und Gewerbegebieten
  - Begrünung von Flachdächern, insbesondere Gewerbehallen
- **Wirkungen** der Maßnahmen:
  - Erhöhung des Kaltluftzuflusses (Strömungsintensität)
  - Verminderte Erwärmung der Kaltluft beim Überstreichen von versiegelten Bereichen
- **Ergebnis:**
  - Verringerung der nächtlichen Lufttemperatur um 1 bis 2 Kelvin
  - Reichweite des Kaltluftstroms Richtung Barmen und Elberfeld erhöht

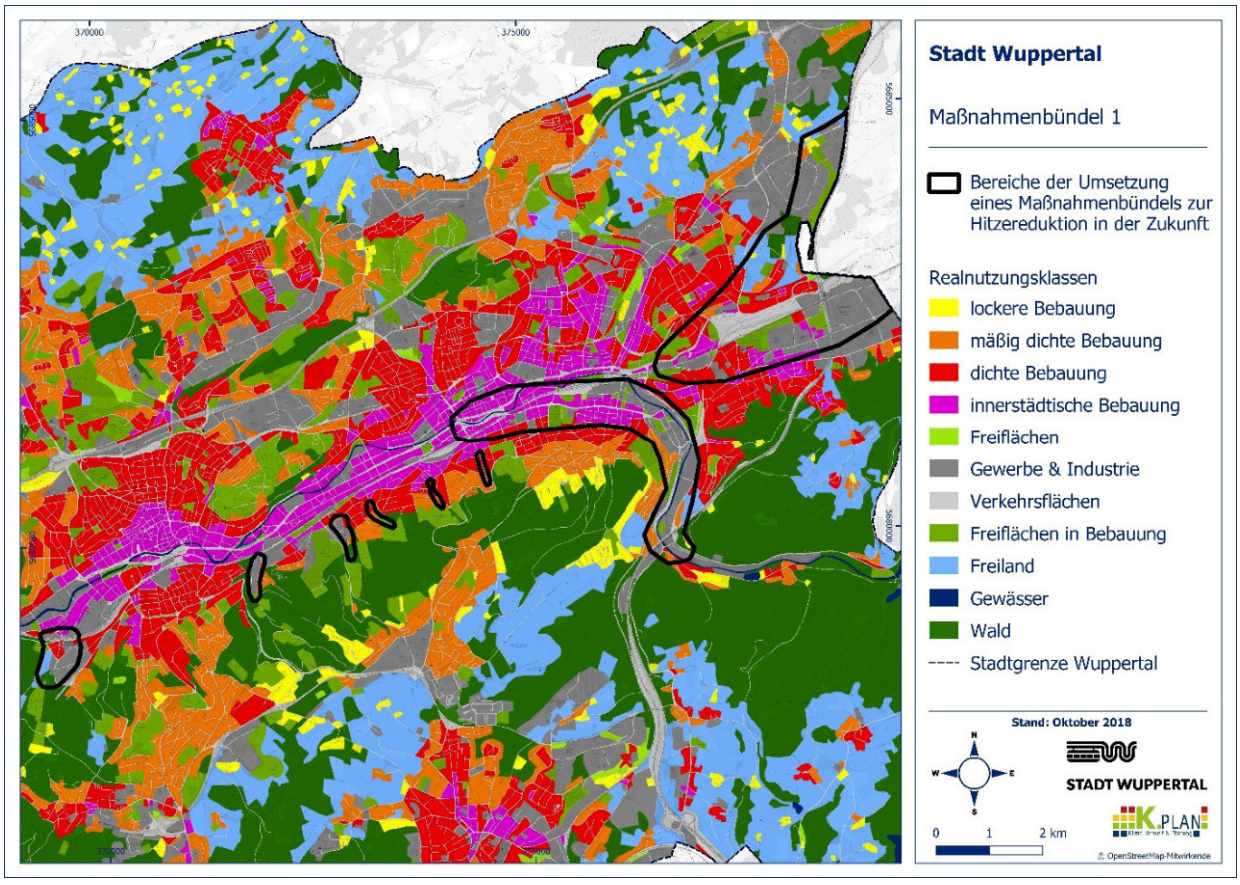


Abb. 2.22 Bereiche der Umsetzung des Maßnahmenbündels 1 zur Hitzereduktion in der Zukunft: Verbesserung des Kaltluftzuflusses

Maßnahmenbündel 2a: Durchgrünung von Wohngebieten auf den Nordhöhen

- **Testgebiete** (siehe Markierungen in der Abb. 2.23): In den etwas stärker verdichteten Stadtteilen von Dönberg, Uellendahl und Katernberg im nördlichen Stadtgebiet gibt es im IST-Zustand noch keine ausgeprägte Hitzebelastung. Das ändert sich im Zukunftsszenario
- Simulierte **Maßnahmen**:
  - Ausweitung der Begrünung im Straßenraum
  - Dachbegrünungen
  - Entsiegelung und Begrünung von Bereichen im privaten Hausumfeld (keine Steinvorgärten!)
- **Wirkungen** der Maßnahmen:
  - Verminderung des Hitzeeintrags am Tag durch Beschattung
  - Abkühlung durch Erhöhung der Verdunstung der Vegetation
  - Verminderte Erwärmung von Flächen durch Entsiegelung
- **Ergebnis:**
  - Verringerung der sommerlichen Lufttemperaturen um rund 1 Kelvin
  - Erhöhung der Bodenkühlleistung

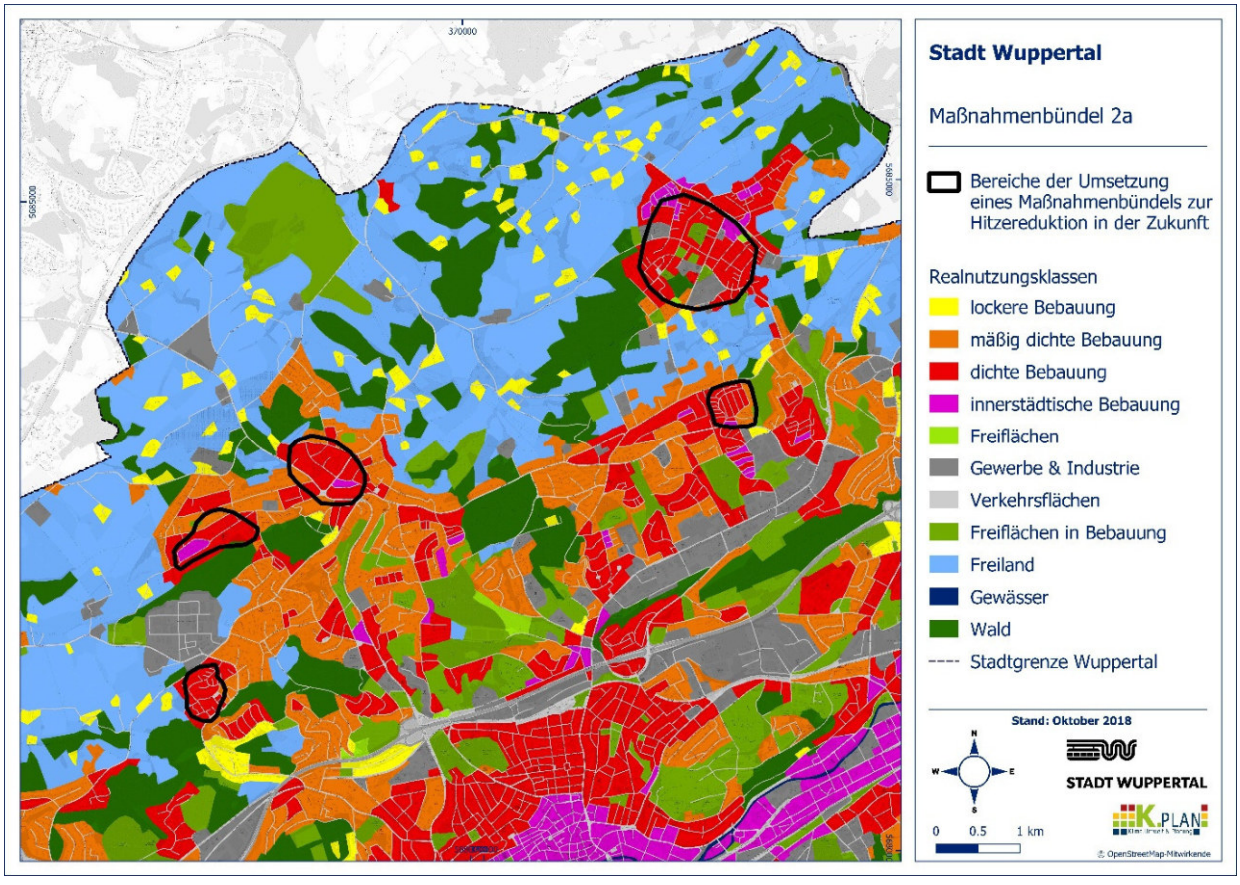


Abb. 2.23 Bereiche der Umsetzung des Maßnahmenbündels 2 zur Hitzereduktion in der Zukunft: Durchgrünung von Wohngebieten auf den Nordhöhen

Maßnahmenbündel 2b: Durchgrünung von Wohngebieten im südöstlichen Stadtgebiet

- **Testgebiete** (siehe Markierungen in der Abb. 2.24): In den etwas stärker verdichteten Stadtteilen Ronsdorf und Beyenburg im südlichen Stadtgebiet gibt es im IST-Zustand noch keine ausgeprägte Hitzebelastung. Das ändert sich im Zukunftsszenario
- Simulierte **Maßnahmen**:
  - Ausweitung der Begrünung im Straßenraum
  - Dachbegrünungen
  - Entsiegelung und Begrünung von Bereichen im privaten Hausumfeld (keine Steinvorgärten!)
- **Wirkungen** der Maßnahmen:
  - Verminderung des Hitzeeintrags am Tag durch Beschattung
  - Erhöhung des Energieverbrauchs durch Transpiration der Vegetation
  - Verminderte Erwärmung von Flächen durch Entsiegelung
- **Ergebnis:**
  - Verringerung der sommerlichen Lufttemperaturen um rund 1 Kelvin
  - Erhöhung der Bodenkühlleistung

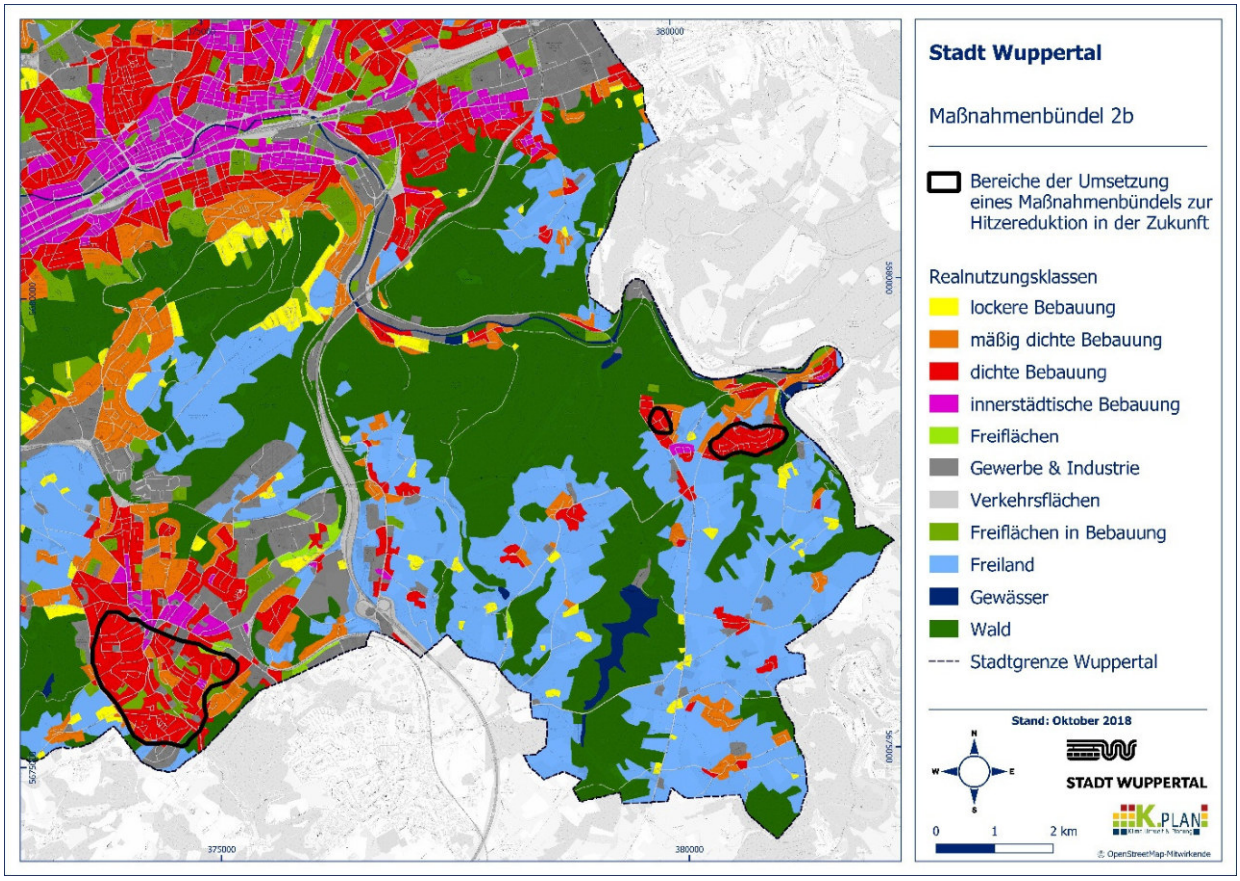


Abb. 2.24 Bereiche der Umsetzung eines Maßnahmenbündels zur Hitzereduktion in der Zukunft: Durchgrünung von Wohngebieten im südöstlichen Stadtgebiet

Maßnahmenbündel 3: Durchgrünung und Teilentsiegelung von Gewerbe- und Industrieflächen

- **Testgebiete** (siehe Markierungen in der Abb. 2.25): Gesamtstädtisch alle Gewerbe- und Industrieflächen, die schon im IST-Zustand eine aktuelle Hitzebelastung aufweisen. Diese wird sich zukünftig verstärken, wenn keine Anpassungsmaßnahmen getroffen werden.
- Simulierte **Maßnahmen**:
  - Ausweitung der Begrünung im Straßenraum, auf Parkplätzen und Freiflächen
  - Dachbegrünungen
  - Teilentsiegelung von Bereichen im Betriebsumfeld
- **Wirkungen** der Maßnahmen:
  - Verminderung des Hitzeeintrags am Tag durch Beschattung
  - Erhöhung des Energieverbrauchs durch Transpiration der Vegetation
  - Verminderte Erwärmung von Flächen durch Entsiegelung
- **Ergebnis:**
  - Verringerung der sommerlichen Lufttemperaturen um rund 1 Kelvin
  - Erhöhung der Bodenkühlleistung

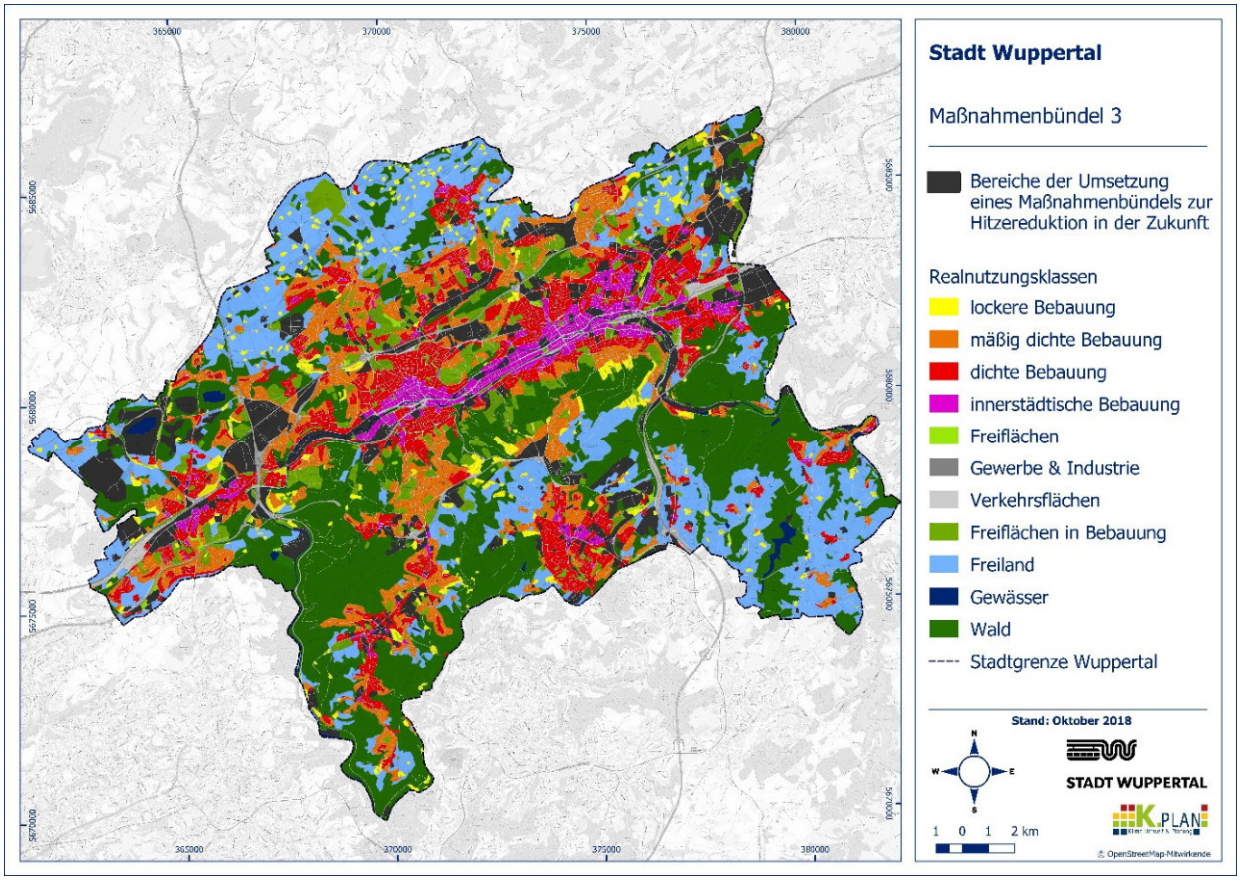


Abb. 2.25 Bereiche der Umsetzung eines Maßnahmenbündels zur Hitzereduktion in der Zukunft: Durchgrünung und Teilentsiegelung von Gewerbe- und Industrieflächen

Mit diesen Veränderungen wurde eine Zukunfts-Klimakarte 2050 nach Umsetzung der 4 Maßnahmenbündel gerechnet. Aus dieser Klimatopkarte wurden wiederum die Bereiche extrahiert, die besonders von sommerlicher Hitzebelastung betroffen sein werden. Grundlage dafür waren, wie auch bei der Betrachtung der Ist-Situation und des Zukunftsszenarios 2050, die Bereiche des Stadt- und des Innenstadtklimatops. In der Abbildung 2.26 sind die erreichten Veränderungen im Vergleich zur IST-Situation und zum Zukunftsszenario 2050 ohne Maßnahmenumsetzung dargestellt. Die Ausweitung der Hitzeinsel im Zukunftsszenario mit Maßnahmenumsetzung im Vergleich zum IST-Zustand beschränkt sich jetzt überwiegend auf die Siedlungsbereiche oberhalb der Talachse. Umsetzung von Maßnahmen, wie beispielhaft an den nördlichen und südlichen Stadtteilen gezeigt, sind aus Platzgründen in den stark verdichteten Bereichen entlang der Talachse nur sehr kleinräumig umsetzbar. In den Bereichen mit simulierten Maßnahmenumsetzungen ist es aber gelungen, die Ausweitung der Hitzebelastung im Zukunftsszenario 2050 auf den Stand der IST-Berechnungen zurückzufahren.

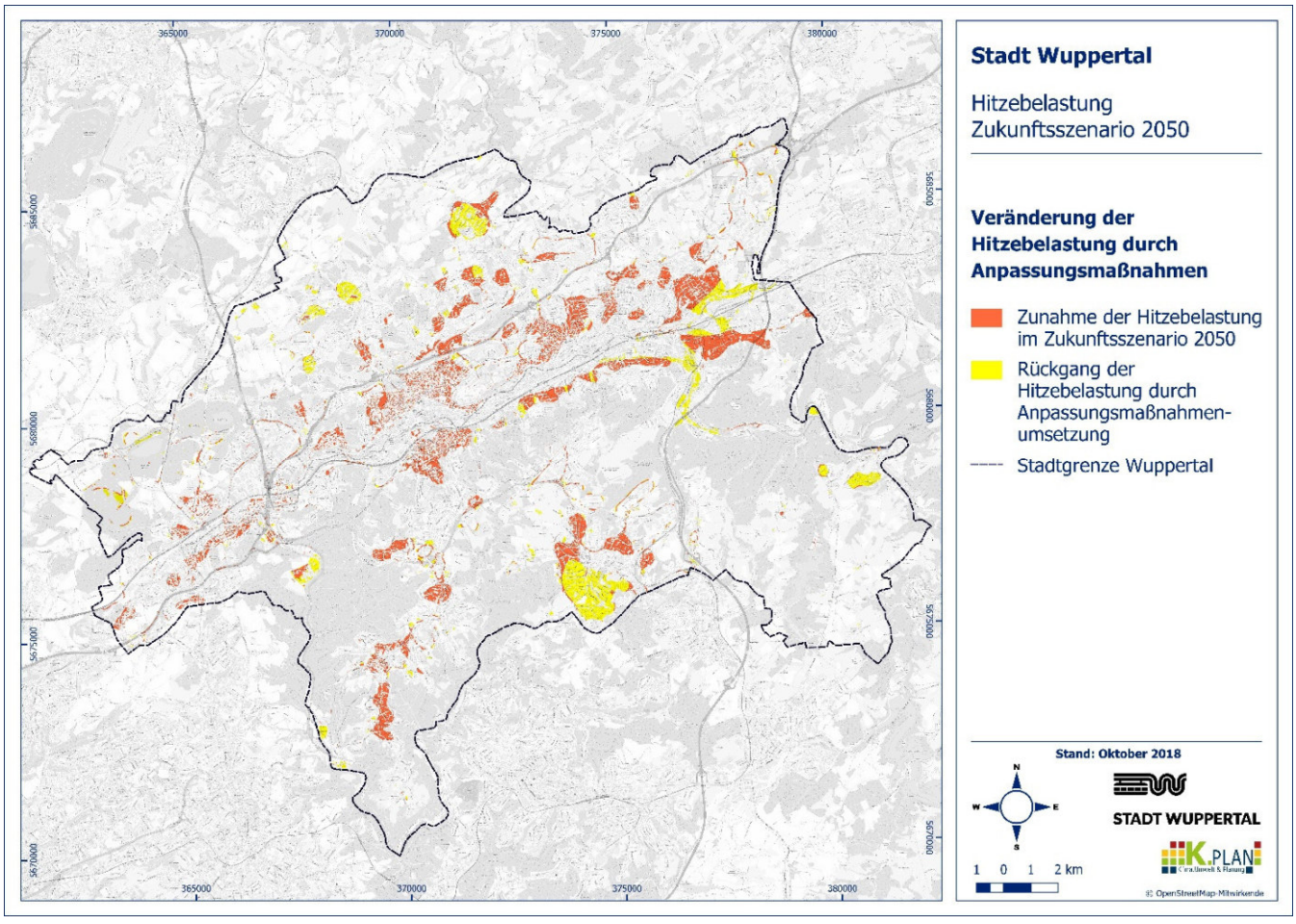


Abb. 2.26 Karte der Veränderungen der Hitzebelastung im Zukunftsszenario durch Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen

Verifizierung der Hitzeintensitäten sowie der Wirksamkeit von modellhaft umgesetzten Klimaanpassungsmaßnahmen an dem innerstädtischen Beispiel „Elberfeld City“

Beispielhaft für einen innerstädtischen Teilraum wurden im Zentrum von Wuppertal-Elberfeld detailliert die Belastungspotenziale durch Hitze untersucht. Darauf aufbauend wurden konkrete Anpassungsmaßnahmen entwickelt. Ausgehend von Thermalaufnahmen, die aus der Vogelperspektive vom Standort auf dem Rathausturm Elberfeld aus getätigt wurden, wurde anschließend durch mikroskalige Modellierungen die Wirksamkeiten von Klimaanpassungsmaßnahmen im Hinblick auf Hitzeminderung überprüft. Zur Bewertung des Ist-Zustandes und zur Überprüfung der klimatischen Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen wird das mikroklimatische Ausbreitungs- und Strömungsmodell ENVI-met eingesetzt. Das Modell dient zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen. Es erfasst urbane Strukturen als Gesamtsystem und beschreibt dynamische klimatologische Vorgänge. Mit diesem mikroskaligen Modell werden die Wechselwirkungen zwischen Oberflächen, Pflanzen und der Atmosphäre in einer städtischen Umgebung simuliert. Es werden Parameter wie Gebäudeoberflächen, Bodenversiegelungsgrad, Bodeneigenschaften, Vegetation und Sonneneinstrahlung einbezogen. Durch die Wechselwirkungen von Sonne und Schatten sowie die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Materialien (spezifische Wärme, Reflexionseigenschaften) entwickeln sich im Laufe eines simulierten Tages unterschiedliche Oberflächentemperaturen, die ihrerseits in Abhängigkeit vom Windfeld ihre Wärme mehr oder minder stark an die Luft abgeben. Um Wechselwirkungen zwischen der Vegetation und der Atmosphäre simulieren zu können, wird das physiologische Verhalten der Pflanzen nachgebildet. Hierzu zählt das Öffnen und Schließen der Spaltöffnungen zur Steuerung des Wasserdampfaustausches mit der Umwelt, die Aufnahme von Wasser über die Wurzeln oder die Änderung der Blatttemperatur im Laufe des Tages. Die klimatischen Besonderheiten einer Fläche zeigen sich besonders deutlich an einem sommerlichen Strahlungstag mit Schwachwindlage. Einen Überblick über das Untersuchungsgebiet „Elberfeld City“ liefert die Abbildung 2.27. Die Umgebung ist dicht und hoch bebaut und zu rund 90 % versiegelt.

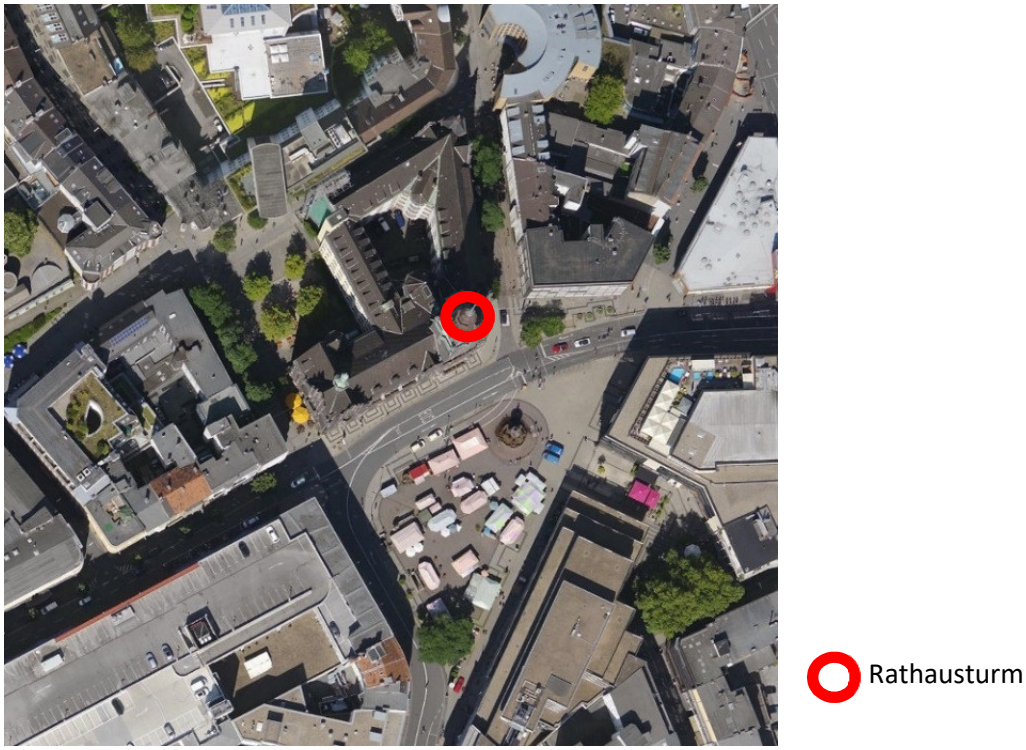


Abb. 2.27 Luftbild des Untersuchungsgebietes „Elberfeld City“

Bei einer Größe des Modellgebietes „Elberfeld City“ von 200 m x 200 m wurde eine horizontale Gitterauflösung im Model von 2 m gewählt, die vertikale Auflösung betrug 1 m. Die Kartierungen erfolgten auf der Grundlage von vorhandenem Kartenmaterial und Luftbildern sowie einer Geländebegehung. Die aufgenommenen Daten wurden dann im nächsten Schritt in das Programm ENVI-met übertragen und dort für eine virtuelle Modellierung vom Ist-Zustand des Untersuchungsgebietes und als Grundlage für die Modellierung der Wirksamkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen verwendet.

Simuliert wurde jeweils ein sommerlicher Strahlungstag über 24 Stunden, um eine maximale Erwärmung im Modellgebiet zu erreichen. Neben der Gebäude-, Vegetations- und Oberflächenstruktur des Modellgebietes wurden jeweils meteorologischen Startparameter für eine mikroskalige Modellierung des Ist-Zustandes sowie des Anpassungs-Szenario festgelegt. Diese Werte entsprechen den typischen Ausgangsbedingungen einer sommerlichen Strahlungswetterlage mit Hitzebelastung. Die Startwerte der meteorologischen Parameter werden für alle Modellrechnungen gleich gewählt. Sommerliche Strahlungstage sind in der Regel Schwachwindwetterlagen. Die Ausgangs-Windgeschwindigkeit in 10 Metern Höhe sollte deshalb für mikroskalige Modellierungen unter 1,5 m/s liegen. Bei einer solchen Wetterlage treten lokalklimatische Effekte am deutlichsten hervor und die Auswirkungen der simulierten Anpassungsmaßnahmen auf das Kleinklima können gezeigt werden.

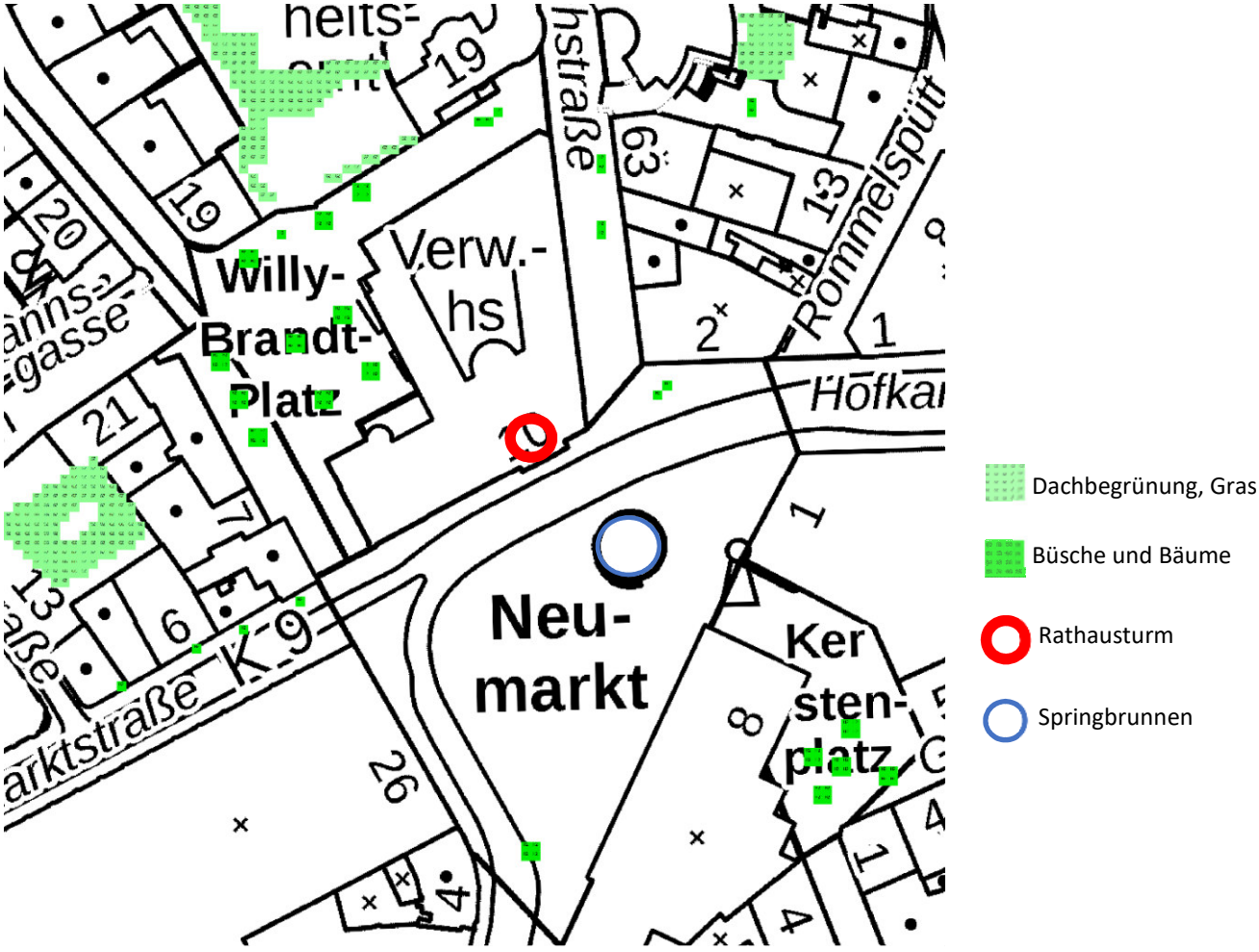


Abb. 2.28 Begrünung im Modellgebiet „Elberfeld City“ im IST-Zustand (Gebäude und versiegelte Flächen aus Gründen der Lesbarkeit nicht dargestellt)

Das ENVI-met Modell der Ist-Situation mit einer Ausdehnung von 200 m x 200 m ist in der Abbildung 2.28 dargestellt. Neben der Lage, Form und Material der Gebäude ist auch die Vegetationsstruktur mit Informationen über Rasenflächen, Büsche und Bäume verschiedener Größen in den Eingabedateien vorhanden. Die unterschiedliche Höhe der Vegetation von Rasenflächen über Büsche bis hin zu Bäumen ist grob anhand der Grüntöne zu unterscheiden. Bäume und Büsche werden in Dunkelgrün, Rasenflächen in Hellgrün wiedergegeben. Zusätzlich wurde die Bodenversiegelung im Modellgebiet erfasst und in die Eingabedatei übertragen.

Die Situation im IST-Zustand zeigt die Problematik der sehr hohen Oberflächentemperaturen im Modellgebiet „Elberfeld City“, die noch um Mitternacht großflächig zwischen 24 °C und 29 °C liegen (Abb. 2.29). Dies ist eine Folge der Materialien, die die tagsüber eingestrahlte Sonnenenergie speichern.

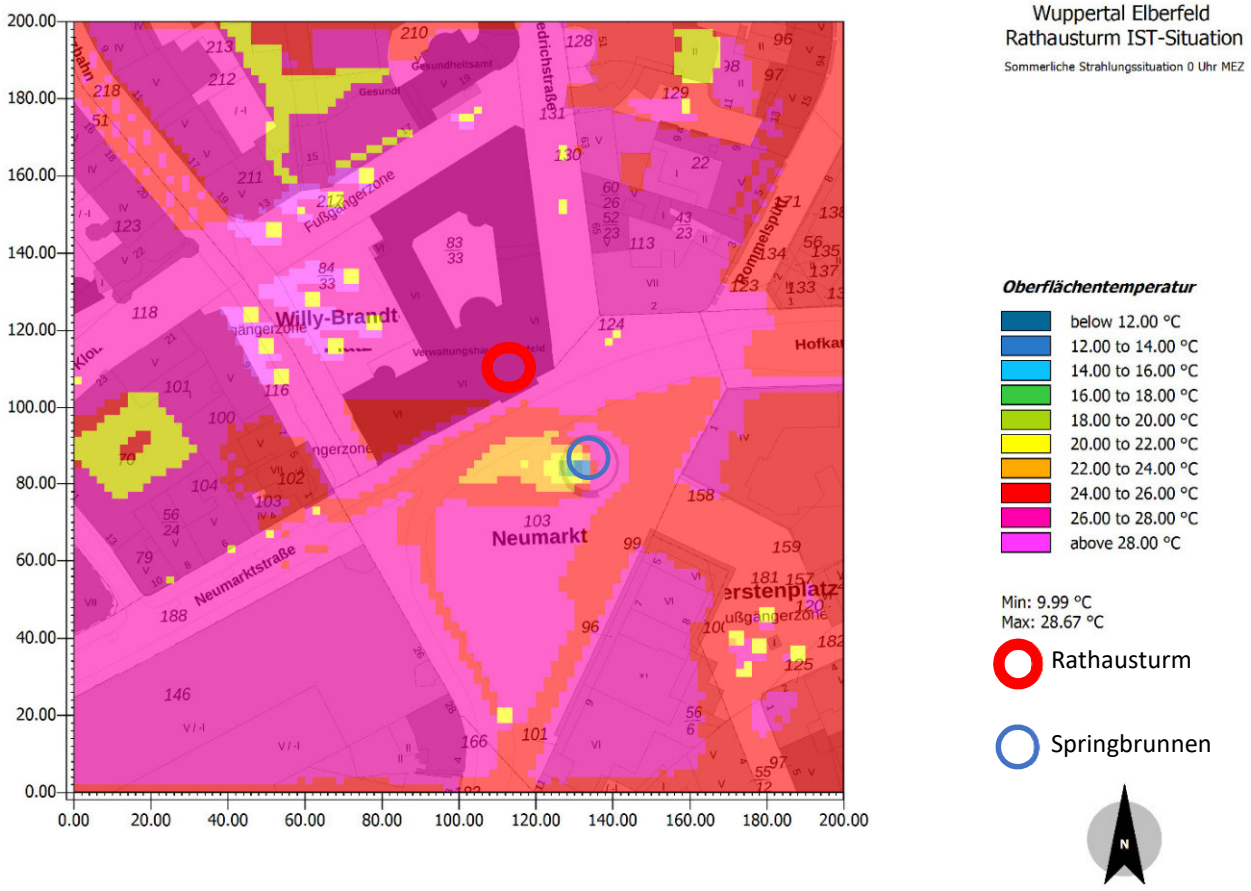


Abb. 2.29 Oberflächentemperaturen um 0:00 Uhr im Modellgebiet „Elberfeld City“ im IST-Zustand

Durch Thermalaufnahmen (IR) vom Elberfelder Rathausturm können die bestehenden Hitzeeinträge auf die Gebäude und größtenteils versiegelten Flächen während eines sommerlichen Hitzetages detailliert gezeigt werden. Die Abbildung 2.30 zeigt die Ergebnisse der Messungen um 20 Uhr an einem wolkenlosen Sommerabend. Die Oberflächentemperaturen liegen je nach Material und Sonnenausrichtung zwischen 10 °C und 24 °C. Hausfassaden, die zu offenen Plätzen zeigen, und weite Straßen, die tagsüber lange der Sonneneinstrahlung ausgesetzt waren, zeigen noch nach Sonnenuntergang die höchsten Oberflächentemperaturen.

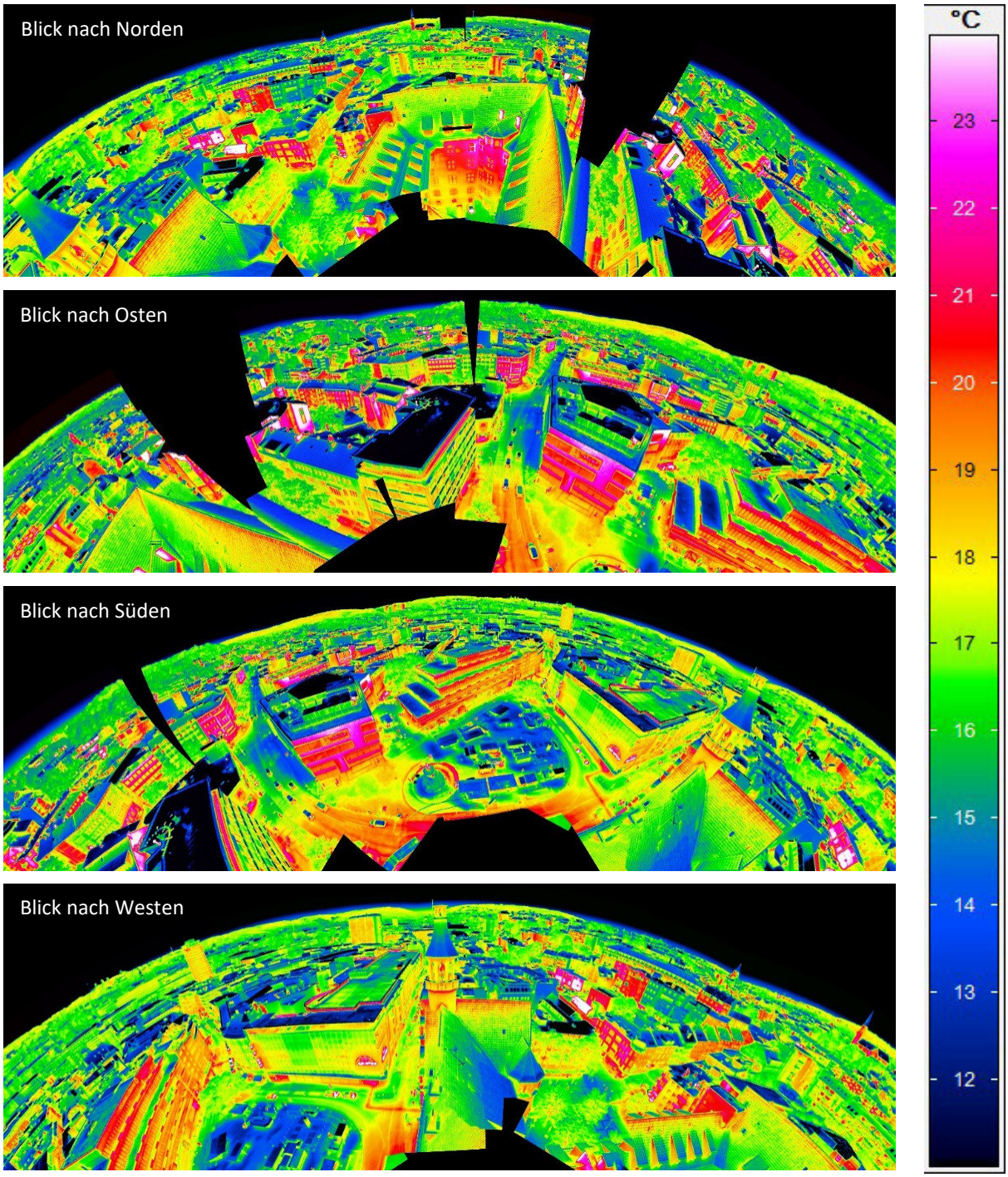


Abb. 2.30 IR-Aufnahmen der Oberflächentemperaturen um 20 Uhr, Untersuchungsgebiet „Elberfeld City“, auf

Für die Überprüfung der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen im Untersuchungsgebiet wurden die zahlreich vorhandenen Flachdächer begrünt. Zusätzlich wurden kleinere Bereich des Willy-Brandt-Platzes sowie des Neumarkts entsiegelt und begrünt. Es wurden Springbrunnen und ein offener Wasserlauf in das Modellgebiet virtuell eingebracht. Die simulierten Anpassungsmaßnahmen sind als exemplarische Beispiele zu betrachten und wurden ausschließlich aus der fachlichen Sicht des Gutachters ausgewählt. An dieser Stelle wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die

Maßnahmenvorschläge zur Klimaanpassung im Vorfeld nicht mit dem Ressort Stadtentwicklung abgestimmt wurden, da es sich hierbei nicht um konkrete Planungsabsichten vonseiten der Stadt Wuppertal handelt. Im Einzelnen wurden die folgenden virtuellen Maßnahmen in das Gebiet eingearbeitet:

- alle Flachdächer extensiv begrünt (ohne Türme und techn. Aufbauten, Solaranlagen)
- auf dem Parkdeck eines Einzelhandelsgebäudes: intensive Dachbegrünung)
- am Willi-Brand-Platz: Springbrunnen und Grünstreifen
- am Neumarkt: Grünstreifen entlang des Randes (4-6 m Breite) mit Hecken
- Neumarkt mit dem Straßenabschnitt Neumarktstraße: helles Pflaster
- Neumarkt: einzelne Bäume und Büsche auf dem Platz
- Kerstenplatz: Springbrunnen mit Verbindung durch einen offenen Wasserlauf bis zum Springbrunnen auf dem Neumarkt, Anlage als Wasserspielplatz möglich

Abbildung 2.31 zeigt ein virtuelles Luftbild des Untersuchungsgebietes, so wie es nach Umsetzung der Maßnahmen aussehen könnte.

Abb. 2.31 Virtuelles Luftbild des Untersuchungsgebietes „Elberfeld City“ nach Maßnahmenumsetzung

Die Abbildung 2.32 zeigt im Vergleich dazu das Modellgebiet im simulierten Anpassungs-Szenario.

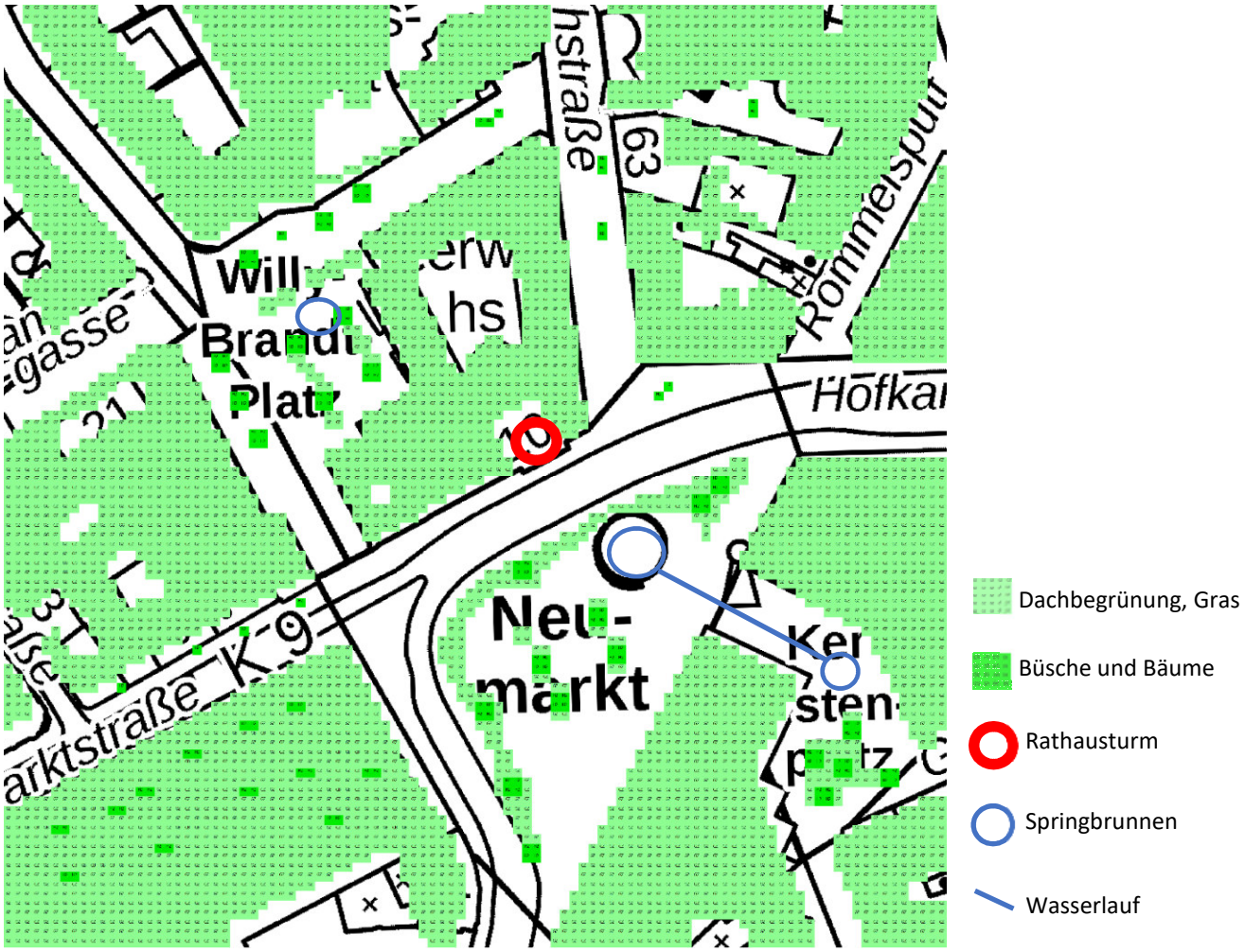


Abb. 2.32 Begrünung im Modellgebiet „Elberfeld City“ im Anpassungs-Szenario

Durch die intensive Begrünung von allen Flachdächern und Teilen der städtischen Plätze konnten die Oberflächentemperaturen um 3 bis 7 Kelvin gesenkt werden (Abb. 2.33). Eine besonders hohe Wirkung zeigt die Veränderung des Oberflächenmaterials auf Neumarkt und Neumarktstraße von dunklem Asphalt auf ein helles Pflaster im Anpassungs-Szenario.

Entscheidend ist im zweiten Schritt, welche Auswirkungen diese Oberflächentemperatur-Absenkungen auf die Lufttemperaturen im Modellgebiet haben können. Abbildung 2.34 zeigt die Differenzen der Lufttemperaturen des Begrünungsszenarios im Vergleich zum IST-Zustand in der Nacht um 23 Uhr. Im gesamten Modellgebiet werden die Lufttemperaturen durch die Anpassungsmaßnahmen um 1 bis 2 Kelvin herabgesetzt. Einen deutlich höheren Effekt erreichen die auf dem Willy-Brandt-Platz und dem Kerstenplatz virtuell installierte Springbrunnen und der offene Wasserlauf zum Neumarkt. Hier wird im direkten Umfeld der Wasseranlage durch Verdunstungsvorgänge die Luft um bis zu 10 Kelvin abgekühlt. Entsprechend der Anströmung des Modellgebietes gibt es eine Fahne von kühler Luft, die mehrere 10er-Meter in die angrenzende Bebauung hineinreicht und mindestens 2 bis 3 Kelvin Abkühlung für die Umgebung bringt.

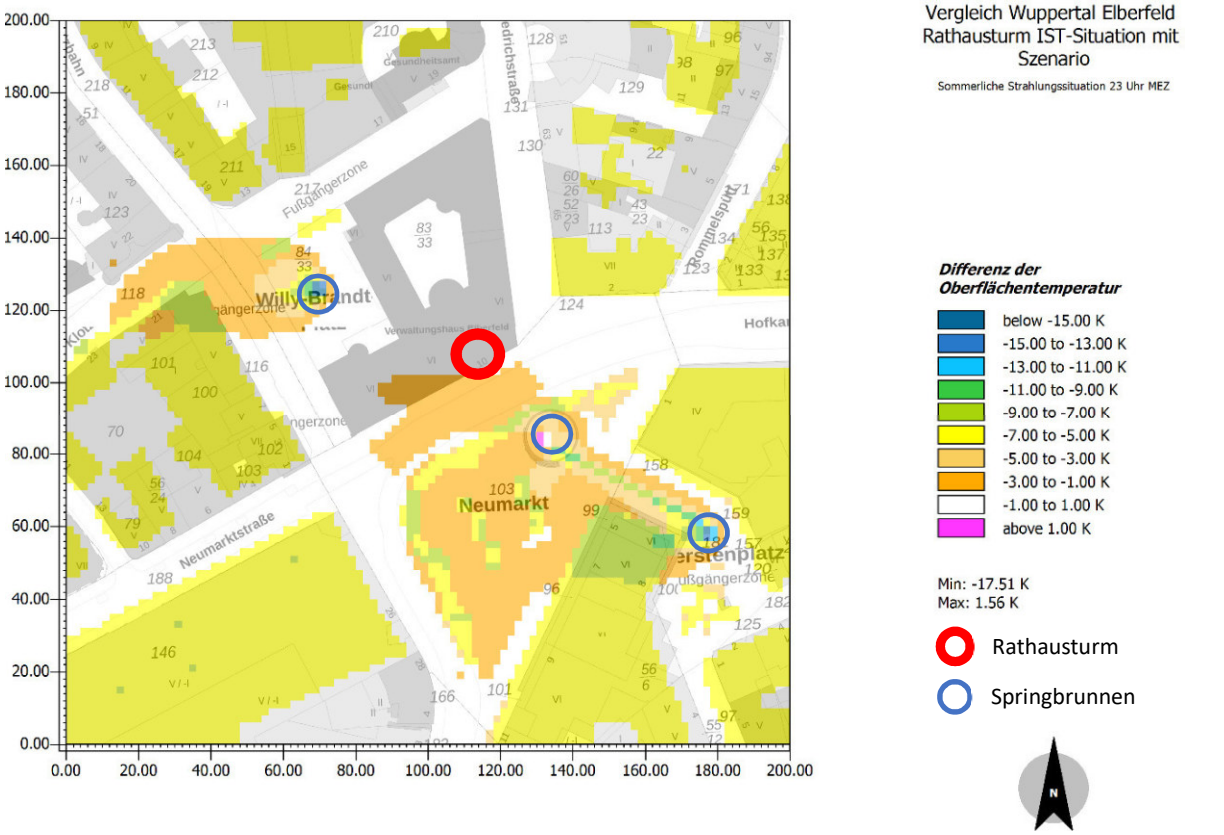


Abb. 2.33 Differenzen der Oberflächentemperaturen um 23:00 Uhr im Modellgebiet „Elberfeld City“ im Anpassungs-Szenario

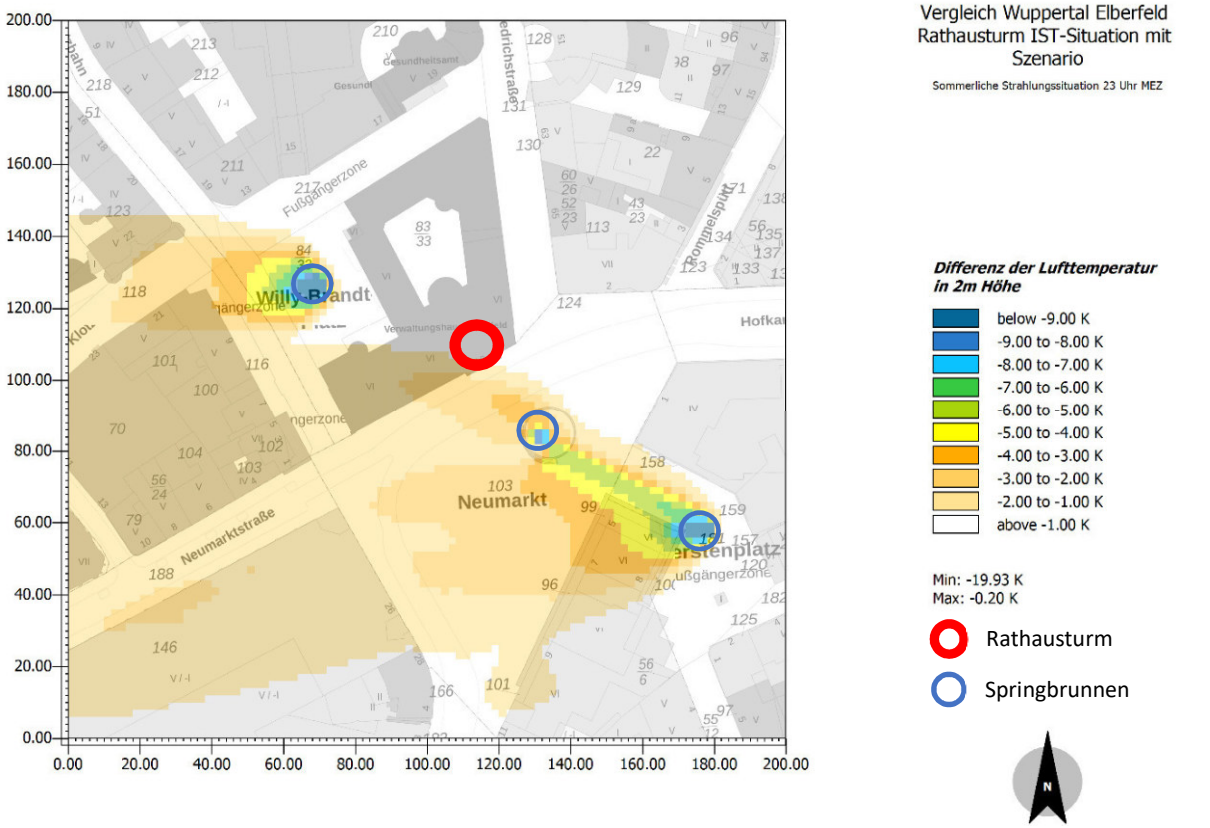
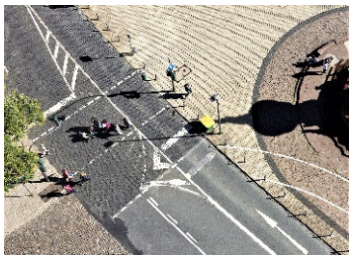


Abb. 2.34 Differenzen der Lufttemperaturen um 23:00 Uhr im Modellgebiet „Elberfeld City“ im Anpassungs-Szenario

- Durch die virtuelle Einbringung von Anpassungsmaßnahmen und modellhafte Berechnung der Wirkungen konnte gezeigt werden, dass durch ein Maßnahmenbündel in einer Kombination aus Dach- und Platzbegrünungen, Oberflächenmaterialwechsel und bewegtes Wasser in der Stadt eine Abkühlung im Quartier um 1 bis 3 Kelvin erreichbar ist.
- Damit könnten, jeweils lokal begrenzt, die zukünftigen Erwärmungen aufgrund des Klimawandels ausgeglichen werden.

Tab. 2.1 Möglichkeiten zur Klimaanpassung im Quartier (positive Beispiele)

Maßnahme	**Fotos**: Stadt Wuppertal, K.PLAN, Ute Bücker
Dachbegrünung - extensiv - intensiv	
Fassadenbegrünung	
Farbgestaltung und Materialauswahl der Oberflächen - Verkehrsflächen - Hauswände - Nutzflächen	
Bewegtes Wasser - Springbrunnen - Wasserläufe - Wasserwand - Wasserspielplatz	
Beschattung durch Bäume/ Elemente	

2.6 Die Hitzebetroffenheit im Stadtgebiet von Wuppertal

Da es in der vorliegenden Untersuchung um die Abgrenzung von jetzigen und zukünftigen Hitzegebieten mit Bezug zum Menschen geht, wurde in einem weiteren Schritt die Bevölkerungsverteilung auf der Grundlage von Wohnblöcken (Quelle: Stadt Wuppertal) herangezogen. Je größer die Einwohnerdichte ist, desto mehr Menschen sind einer möglichen Hitzebelastung ausgesetzt. Bei einem Aufenthalt in den Innenstädten tagsüber kann einer Hitzebelastung durch Standortwechsel und Vermeidung von besonnten Standorten entgegengewirkt werden. Da aber ein Verlassen der Innenstädte bei Hitzewetterlagen auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten unerwünscht ist, ist hier Schutz vor Hitzeeinwirkung am Tag notwendig. Die Wohnbevölkerung kann insbesondere nachts einer Hitzebelastung durch mangelnde Abkühlung im Bereich der städtischen Wärmeinsel nicht ausweichen. Innenstadtbereiche, die überwiegend als Dienstleistungszentrum genutzt werden und einen nur geringen oder durchschnittlich hohen Anteil an Wohnbevölkerung haben, sind Handlungsgebiete mit einer anderen Anfälligkeit als reine Wohngebiete.

Die folgenden Faktoren spielen eine Rolle für das Mortalitätsrisiko bei einer Hitzewelle:

- Soziodemographische Faktoren: Risikogruppen sind ältere Menschen ≥ 65 Jahre und Kleinkinder < 3 Jahre, Frauen sind stärker betroffen als Männer.
- Dauer: Einzelne, isolierte Hitzetage sind besser verträglich als länger andauernde Hitzeperioden. Nach den Klimaprojektionen ist zukünftig neben der generellen Zunahme der heißen Tage vor allem auch eine Zunahme der Länge der Hitzewellen zu erwarten.
- Jahreszeit: Im Frühjahr hat eine Hitzewelle größeren Einfluss als im Sommer, da der menschliche Organismus dann noch nicht an große Hitze angepasst ist und deshalb sensibler auf Hitzebelastungen reagiert. Die aufgrund des Klimawandels zu erwartende Verschiebung der ersten „Heißen Tage“ von Ende Juni auf Anfang April führt daher zu einem vermehrten Auftreten von besonders unverträglichen Hitzewellen.
- Zeitpunkt: Die Nachttemperaturen sind bedeutender als die Tagesmaxima, da die nächtliche Erholungsphase für den menschlichen Körper besonders wichtig ist. Belastend sind sogenannte „Tropennächte“, in denen die Lufttemperatur nicht unter 20 °C sinkt.

Die benötigten Ausgangsdaten zur räumlichen Abgrenzung und Priorisierung zur Maßnahmenumsetzung von Gebieten mit einer Belastung durch Hitze für den Menschen sind:

Eingangsdaten	**Parameter**
a) Bereiche der Städtischen Wärmeinsel (Ist und Zukunft):	Hitzebelastung
b) Einwohnerdichte in den Stadtvierteln von Wuppertal:	Anfälligkeit
c) Anteil der Einwohner über 65 Jahre:	Anfälligkeit
d) Anteil von Kindern unter 3 Jahren:	Anfälligkeit
e) Hitzesensible Einrichtungen:	Anfälligkeit

Hitzesensible Einrichtungen sind Krankenhäuser, Altenheime und Kindertagesstätten. Da aus dem Stadtentwicklungskonzept Aussagen über zukünftig geplante KiTas vorliegen, wurden auch diese in die Berechnungen der Hitzebetroffenheiten mit einbezogen. Die vorliegenden Informationen wurden miteinander verschnitten und als Ergebnis in der Karte der Hitzebetroffenheit (Abb. 2.35) dargestellt.

Die Abbildung 2.35 zeigt für das Stadtgebiet von Wuppertal die Abstufung der Hitzevulnerabilität, also einer abgestuften Anfälligkeit gegenüber Hitze anhand der Bevölkerungsdichte, Bevölkerungsstruktur und den sensiblen Einrichtungen. Dabei wurden die potentiellen Hitzeareale im Stadtgebiet sowohl im Ist-Zustand wie auch im Zukunftsszenario berücksichtigt. Die mittlere Bevölkerungsdichte für Wuppertal liegt, nur bezogen auf die bebauten Flächen im Stadtgebiet, bei rund 6.000 Einwohnern pro km^2.. Für die Anfälligkeit eines Gebietes gegenüber einer klimatischen Belastung des Menschen spielen neben dem Hitzepotential auch soziodemographische Faktoren wie das Alter der Bevölkerung eine Rolle. Das Gewicht soziodemographischer Aspekte wird in der Zukunft weiter zunehmen, da der demographische Wandel zu einer Zunahme der Bevölkerungsgruppe älterer Menschen führen wird.

Laut „Handlungsprogramm Demografischer Wandel - Strategien zum Umgang mit den demografischen Herausforderungen“, herausgegeben von der Stadt Wuppertal (2010), ist die prognostizierte negative Entwicklung der Bevölkerungszahlen („Schrumpfung“) und die Verschiebung der Anteile der Altersgruppen an der Gesamtbevölkerung („Alterung“) auf absehbare Zeit nicht aufzuhalten oder umzukehren sondern allenfalls abzumildern. Diese Tendenz gilt auch weiterhin als wahrscheinlich. Eine Teilkompensation wird voraussichtlich durch Zuwanderung erfolgen („Internationalisierung“). Der aktuellen Bevölkerungsprognose zufolge wird sich der Bevölkerungsrückgang weiter fortsetzen. Da zukünftige Elterngenerationen zunehmend aus geburtenschwachen Jahrgängen gebildet werden, ist der fortschreitende Alterungs- und Schrumpfungsprozess unausweichlich und wird auf lange Sicht nicht korrigierbar sein. Die Anzahl ältere Menschen steigt in Wellenbewegungen bis 2040 von 32.000 auf über 40.000 Einwohner um fast 25 % an, ihr Anteil an der Bevölkerung verdoppelt sich fast.

Die Bertelsmannstiftung kommt in ihrem „Demographiebericht“ für Wuppertal auf ähnliche Zahlen. Demnach wird der Anteil der 65- bis79.Jährigen von 14,8% im Jahr 2016 auf 16 % im Jahr 2030 zunehmen. Der Anteil der ab 80-Jährigen steigt sogar von 6,2 % (2016) auf 14,8 % im Jahr 2030. Dies führt zudem zu stärkerer Auslastung und notwendigen Neubaus von Einrichtungen des Sozial- und Gesundheitswesens. Im Stadtgebiet von Wuppertal kann es zudem in Zukunft zu einer Verschiebung in der räumlichen Verteilung der betroffenen Bevölkerungsgruppen kommen. Durch die hitzeangepasste Planung von neuen Krankenhäusern und Altenheimen kann dies einerseits gesteuert werden, andererseits können in Zukunft ganz andere Stadtviertel als heute von einer Überalterung betroffen sein. Während man früher eher an seinen Wohnstandort verblieb, wird die Bevölkerung zunehmend flexibler und wechselt auch im Alter noch den Wohnsitz.

Die in der nachfolgenden Karte der Hitzebetroffenheit (Abb. 2.35) ausgewiesenen Belastungsgebiete beziehen sich deshalb auf die IST-Situation der Bevölkerungsverteilung, auch wenn die zukünftigen Hitzeareale schon mit eingeflossen sind. Eine Beschreibung der verschiedenen Typen der Hitzebetroffenheit erfolgt in der Tabelle 2.2. auf Seite 58.

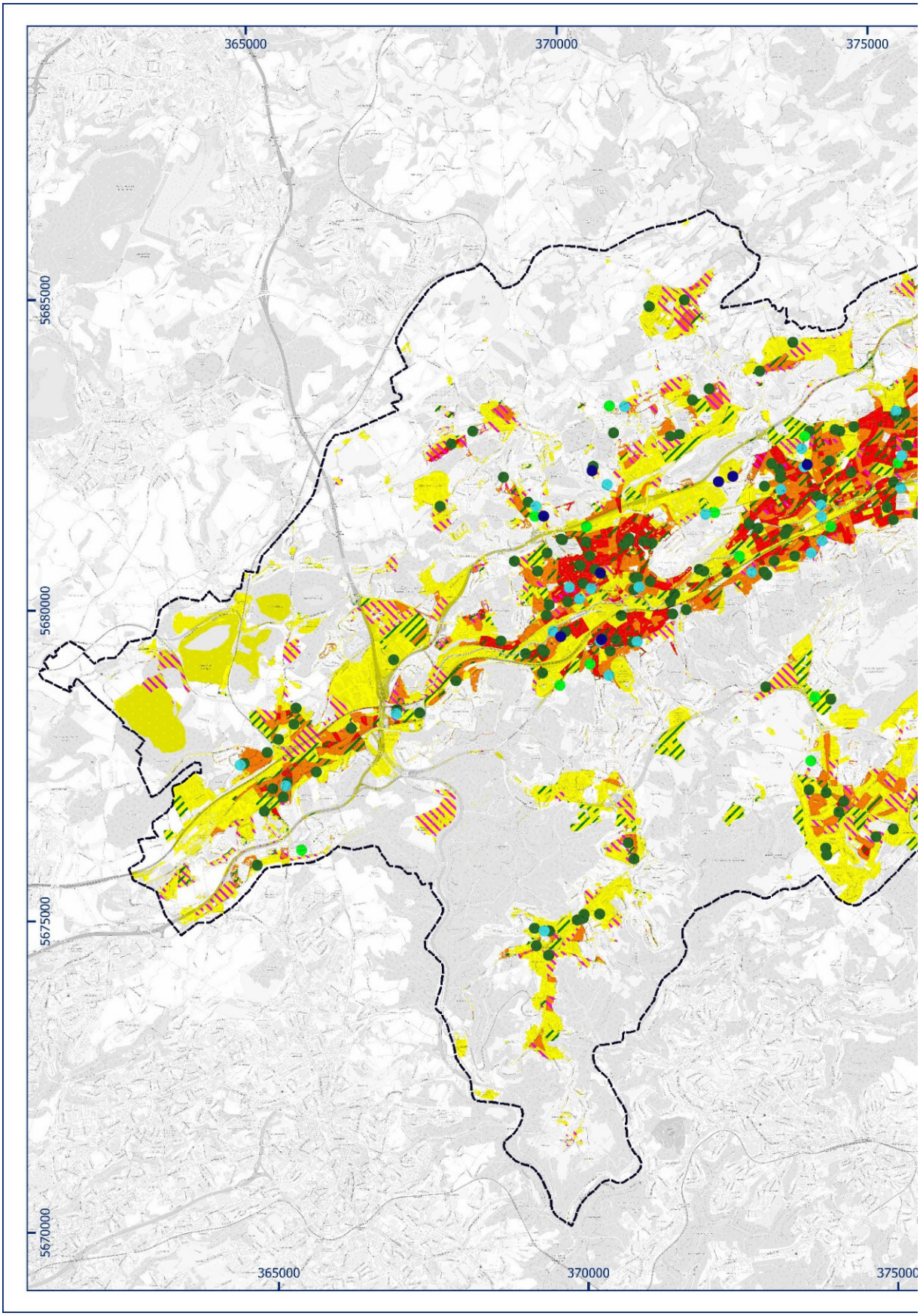
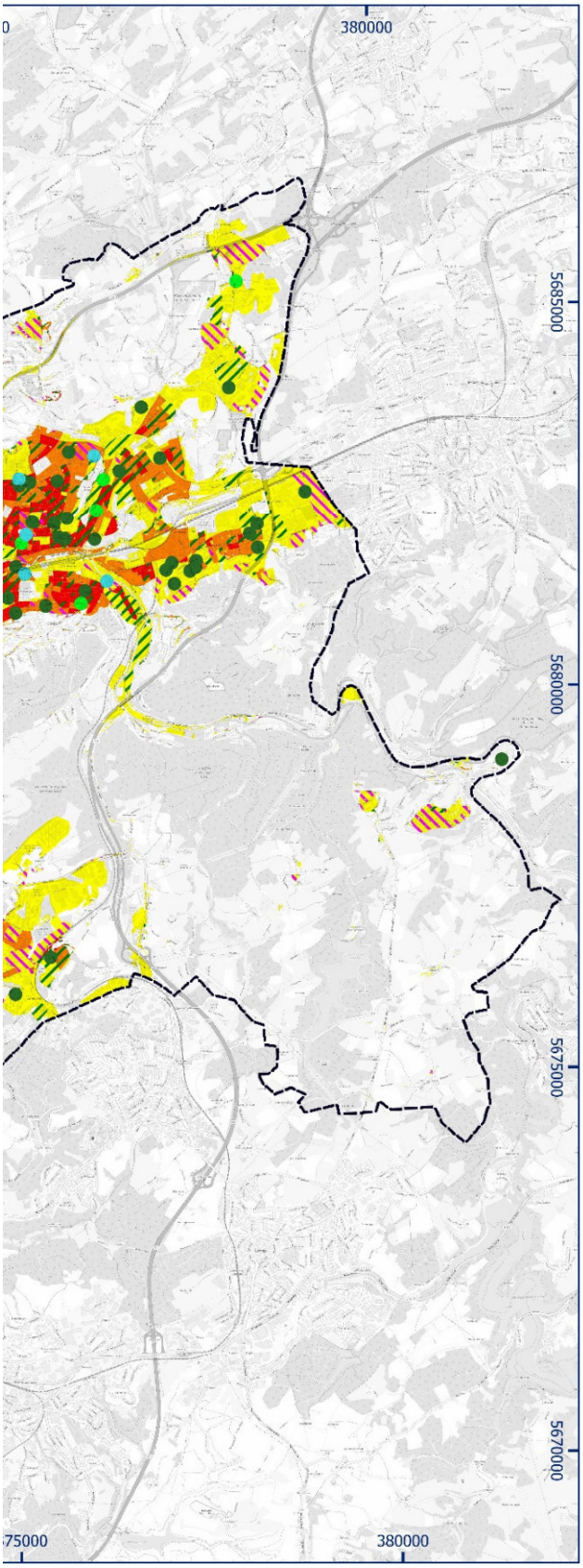


Abb. 2.35 Karte der Hitzebetroffenheit der Stadt Wuppertal (Die Hitzebetroffenheitskarte ist in hoher Auflösung auch im digitalen Anhang des Berichts einzusehen)



Stadt Wuppertal

Karte der Hitzebetroffenheit

Gebiete mit einer Hitzebelastung

- Typ A: Keine Wohnbevölkerung bis zu einer durchschnittlichen Bevölkerungsdichte im Bereich der Hitzeinsel
- Typ B: Durchschnittliche bis zu einer hohen Bevölkerungsdichte im Bereich der Hitzeinsel
- Typ C: Überdurchschnittlich hohe Bevölkerungsdichte im Bereich der Hitzeinsel
- Typ D: überdurchschnittlich hoher Anteil an Personen ab 65 Jahren im Bereich der Hitzeinsel
- Typ E: überdurchschnittlich hoher Anteil an Kindern unter 3 Jahren im Bereich der Hitzeinsel
- Kindertagesstätte im Bereich der Hitzeinsel
- geplante Kindertagesstätte im Bereich der Hitzeinsel
- Krankenhaus im Bereich der Hitzeinsel
- Pflegeheim im Bereich der Hitzeinsel
- Stadtgrenze Wuppertal

Stand: Oktober 2018

N
W
E
S

1 0 1 2 km

STADT WUPPERTAL

K.PLAN Klima.Umwelt & Planung

© OpenStreetMap-Mitwirkende

Tab. 2.2 Gebiete mit einer Hitzebelastung im Stadtgebiet von Wuppertal

Typ der Hitzebetroffenheit	**Beschreibung**
Typ A: Keine Wohnbevölkerung bis zu einer durchschnittlichen Bevölkerungsdichte im Bereich der Hitzeinsel	Eine nur generelle Anfälligkeit gegenüber der Hitzebelastung besteht in Gebieten mit einer nur geringen bis durchschnittlichen Einwohnerdichte bis 6.000 EW/km^2. In diese Stufe fallen viele Industrie- und Gewerbeflächen, die in der Regel keine oder nur eine sehr geringe Wohnbevölkerung aufweisen. Gleiches gilt für die Dienstleistungs- und Shoppingbereiche in den Wuppertaler Kernräumen. Die randlichen Siedlungsbereiche entlang der Talachse sowie die Einzelsiedlungen wie Ronsdorf und Cronenberg weisen auch eine nur unterdurchschnittliche Bevölkerungsdichte auf.
Typ B: Durchschnittliche bis zu einer hohen Bevölkerungsdichte im Bereich der Hitzeinsel Typ C: Überdurchschnittlich hohe Bevölkerungsdichte im Bereich der Hitzeinsel	Wohngebiete im Bereich der Hitzeareale mit durchschnittlich hohen Einwohnerdichten bis 15.000 EW/km^2 (Mittelwert plus einfache Standardabweichung) fallen in den Typ B der Hitzebetroffenheit (orange Bereiche in der Abb. 2.35). Zusammen mit dem Typ C (überdurchschnittlich hohe Bevölkerungsdichte über 15.000 EW/km^2, rote Bereiche in der Abb. 2.35) bilden sie die Kernbereiche der Siedlungen außerhalb der Shopping-areale und der Gewerbegebiete. Die Typen B und C zeigen eine erhöhte bzw. hohe Betroffenheit gegenüber einer Hitzebelastung, da sich in diesen Gebieten die Wohnbevölkerung konzentriert. Sie gehören fast vollständig schon im IST-Zustand zu den hoch belasteten Bereichen.
Typ D: überdurchschnittlich hoher Anteil an Personen ab 65 Jahren im Bereich der Hitzeinsel	Ältere Menschen zeigen eine schlechtere Anpassung an extreme Hitze mit gesundheitlichen Folgen, die von Abgeschlagenheit bis hin zu Hitzschlag und Herzversagen reichen können. Gebiete mit einem hohen Anteil älterer Menschen können daher als anfälliger gegenüber Hitzestress charakterisiert werden. Aus diesem Grund wurde die Anzahl der über 65-jährigen an den Einwohnern eines Wohnblocks (Quelle: Stadt Wuppertal) ermittelt. In der Karte der Hitzebetroffenheit werden die drei Klassen der Bevölkerungsdichte von Bereichen mit einem überdurchschnittlichen Anteil von Einwohnern ab 65 Jahre überlagert. Diese Quartiere weisen einen hohen Handlungsdruck für Anpassungsmaßnahmen auf, da hier ein hohes Hitzepotential bei geringen Durchlüftungsmöglichkeiten zusammenkommt mit einem hohen Anteil an der anfälligen Bevölkerungsgruppe der über 65jährigen. Sie fallen daher unabhängig von der Gesamtbevölkerungsdichte in die Stufe der extrem hohen Anfälligkeit gegenüber einer Hitzebelastung.
Typ E: überdurchschnittlich hoher Anteil an Kindern unter 3 Jahren im Bereich der Hitzeinsel	Kleinkinder haben noch nicht die Fähigkeit entwickelt, sich an extreme Temperaturen anzupassen. Analog zur Abgrenzung der Betroffenheit älterer Menschen wurden für die Wuppertaler Siedlungsbereiche Areale abgegrenzt, in denen es überdurchschnittlich viele Kinder unter 3 Jahren gibt. Dieser Typ E der Hitzebetroffenheit ist wiederum als grün schraffierte

	Fläche den anderen Hitzebetroffenheiten überlagert und weist auf einen hohen Handlungsbedarf hin.
• Kindertagesstätte im Bereich der Hitzeinsel • geplante Kindertagesstätte im Bereich der Hitzeinsel	Kindertagesstätten, die aktuell im Bereich der Hitzeareale liegen oder gebaut werden, sollten durch Klimaanpassungsmaßnahmen zukunftsfähig gestaltet werden. Kinder können insbesondere in den Außenbereichen bei Hitzewellen einer starken Wärmeeinwirkung ausgesetzt werden. Abhilfe kann geschaffen werden indem: - Außenbereiche verschattet werden, - einer Gebäudeaufheizung durch Begrünung, Dämmung und hellem Anstrich entgegengewirkt wird, - Erzieher und Erzieherinnen das Verhalten der Kinder steuern und geeignete Rahmenbedingungen schaffen (reichlich trinken, keine Anstrengungen in der Sonne).
• Krankenhaus im Bereich der Hitzeinsel • Pflegeheim im Bereich der Hitzeinsel	Bei einer Lage von Krankenhäusern, Alten- und Pflegeheimen im Bereich der Hitzeareale muss aktiver Hitzeschutz gestartet werden. Alte und kranke Menschen leiden besonders unter Hitze und können im schlimmsten Fall durch zu große Hitzeeinwirkungen sterben. Abhilfe kann geschaffen werden indem: - das Pflegepersonal Angebote macht, um auf das Verhalten der Menschen einzuwirken (reichlich trinken, keine Anstrengungen in der Sonne), - einer Gebäudeaufheizung durch Beschattung, Begrünung, Dämmung und hellem Anstrich entgegengewirkt wird, - kühle Plätze zur Erholung von der Hitze angeboten werden, - bewegtes Wasser zur Abkühlung genutzt wird